



**UNICAMP**

Número: 46/2007

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**ÁREA : ANÁLISE AMBIENTAL E DINÂMICA TERRITORIAL**

**LUIZ EDUARDO VICENTE**

**CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMAS AMBIENTAIS TROPICAIS COMPLEXOS UTILIZANDO ANÁLISE SISTÊMICA E CLASSIFICAÇÃO HIPERESPECTRAL DE DADOS DO SENSOR ASTER (*ADVANCED SPACEBORNE THERMAL EMISSION AND REFLECTION RADIOMETER*)**

Tese apresentada ao Instituto de Geociências como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

**Orientador:** Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

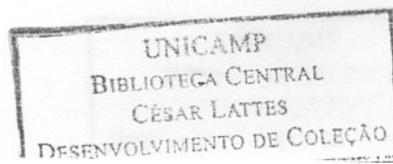
**Co-orientador:** Prof. Dr. Archimedes Perez Filho

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por Luiz Eduardo Vicente e aprovada pela Comissão Julgadora em 29/01/2007  
*Carla P. S. W. L.*

ORIENTADOR

**CAMPINAS - SÃO PAULO**

Janeiro - 2007



UNIDADE BC  
Nº CHAMADA: \_\_\_\_\_  
T/UNICAMP V662.c  
V. \_\_\_\_\_ EX. \_\_\_\_\_  
TOMBO, BCCL 74079  
PROC 16.145-0F  
C \_\_\_\_\_ D X  
PREÇO 11,00  
DATA 3-9-07  
BIB-ID 416606

**Catálogo na Publicação elaborada pela Biblioteca  
do Instituto de Geociências/UNICAMP**

Vicente, Luiz Eduardo  
V662c Caracterização de sistemas ambientais tropicais complexos utilizando  
análise sistêmica e classificação hiperespectral de dados do sensor  
ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection  
Radiometer).- Campinas, SP.: [s.n.], 2007.

Orientadores: Carlos Roberto de Souza Filho, Archimedes Perez  
Filho.

Tese (doutorado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de  
Geociências.

1. Sensoriamento remoto. 2. Processamento de imagens –  
Técnicas digitais. 3. Análise espectral. I. Souza Filho, Carlos  
Roberto. II. Perez Filho, Archimedes. III. Universidade Estadual  
de Campinas, Instituto de Geociências. IV. Título.

Título em inglês: Characterization of complex tropical environmental systems through  
systemic analysis and hiperespectral processing of ASTER (Advanced Spaceborne Thermal  
Emission and Reflection Radiometer) data.

Keywords: - Remote sensing;

- Digital Mapping; *processing*
- Spectral analys.

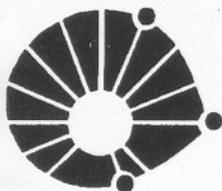
Área de concentração: Análise Ambiental e Dinâmica Territorial

Titulação: Doutor em Ciências

Banca examinadora: - Carlos Roberto de Souza Filho;

- Ailton Luchiari;
- Carlos Roberto Espíndola
- Laerte Ferreira Guimarães;
- Marcos César Ferreira.

Data da defesa: 29/01/2007



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA  
ÁREA ANÁLISE AMBIENTAL E DINÂMICA  
TERRITORIAL

AUTOR: LUIZ EDUARDO VICENTE

CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMAS AMBIENTAIS TROPICAIS COMPLEXOS  
UTILIZANDO ANÁLISE SISTÊMICA E CLASSIFICAÇÃO HIPERESPECTRAL DE  
DADOS DO SENSOR ASTER (*ADVANCED SPACEBORNE THERMAL EMISSION AND  
REFLECTION RADIOMETER*)

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

Aprovada em: 29 / 01 / 2007

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

Carlos Roberto de Souza Filho - Presidente

Prof. Dr. Carlos Roberto Espíndola

Carlos Roberto Espíndola

Prof. Dr. Laerte Guimarães Ferreira Junior

Laerte Guimarães Ferreira Junior

Prof. Dr. Ailton Luchiani

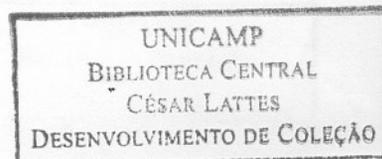
Ailton Luchiani

Prof. Dr. Marcos César Ferreira

Marcos César Ferreira

Campinas, 29 de janeiro de 2007

200741835



*Ao meu pai Dedé (in memoriam) e a minha mãe Vergínia, pelo  
exemplo de vida que sempre me ofereceram;*

*À minha esposa Andréa (minha menina) e ao meu filho Luiz  
Felipe (meu menino), que sempre me fazem lembrar do que  
realmente importa.*

## AGRADECIMENTOS

Expresso aqui meus agradecimentos às instituições, e principalmente, às pessoas que colaboraram na realização deste trabalho:

- Ao Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho (Beto), pela dedicação e seriedade de sua orientação, e por compartilhar seus conhecimentos em Sensoriamento Remoto;
- Ao Prof. Dr. Archimedes Perez Filho, pela sua orientação, amizade e todo apoio que nos deu desde nossa chegada à Campinas;
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo financiamento da pesquisa;
- Ao Prof. Dr. Marcos César Ferreira pelas conversas sobre análise espacial;
- Aos funcionários do Instituto de Geociências, em especial às *meninas* da secretaria de pós-graduação Valdirene e Edinalva pela paciência e apoio;
- Ao Sr. Rinaldo e o Élcio, por serem, além de bons motoristas, bons companheiros de campo;
- Ao pessoal da informática do IGE: Moacir, Paulo e Ricardo pelo suporte nesta atividade onde o computador é fundamental;
- Ao Prof. Dr. Roberto Verdum, por sua simpatia e conhecimentos sobre os pampas, bem como por ser um gaúcho ligeiro que escapa de “porteiras” perigosas;
- Ao Prof. Dr. Laerte pela indicação de bibliografia, bem como aos pesquisadores da Embrapa Cerrados de Goiás, que mui gentilmente enviaram-na, sendo de grande auxílio neste trabalho;
- Aos pesquisadores e funcionários da Estação Ecológica de Assis, em particular à Dra. Giselda Durigan, por sua atenção e disponibilidade durante minha visita àquela unidade, ao técnico Edson, que tanto me ajudou com seu conhecimento de trilhas;
- Aos professores pesquisadores Jolly e Kronka que gentilmente cederam o levantamento da cobertura vegetal do estado de São Paulo, sendo de fundamental importância para a montagem da base de dados deste trabalho;
- Ao Vladimir, funcionário do Laboratório de difratometria de Raio X do Inst. De Geociências de Rio Claro, por sua boa vontade e conhecimentos técnicos desse procedimento;
- Aos sempre prestativos amigos César Kazuo, Juliano Senna, Diego Ducart, Gustavo Gaúcho, Vagney e Paulão, pelas conversas e “dicas” que colaboraram para esta pesquisa;
- Aos companheiros da pós em Geografia especialmente aos colegas de campo: Felipe Seabra, Salvador, Fábio e Márcio;

- Ao amigo Gustavo, pelos seus conhecimentos em informática, e principalmente, pela disponibilidade e boa vontade;
- Ao amigo Charlei a quem tive o prazer de reencontrá-lo como companheiro de pós, depois de ter sido companheiro de graduação;
- Aos amigos de Campinas do *cafofo* e do *submundo*, Paulo, Frangão, Tom, Rita, Milton, Talita e Aline, que tantas vezes mostraram que rir é o melhor remédio;
- Aos amigos que entraram para o clube dos “casados” e continuam cada vez mais amigos, Neném, Anayê e sua herdeira clara; o Sérgio, a Lílian, o Davi e o João; o Araketu e a Criva;
- Aos amigos do *georanch* que estão sempre por perto nesse longo caminho desde a graduação;
- Ao S. Mário e a D. Ana, que além de criarem uma filha tão linda, sempre estão presentes quando precisamos;
- À minha mãe pelo apoio às decisões que me levariam tão longe de casa, e por sempre deixar claro que existe um lugarzinho para a visita do filho pródigo, também a minha querida irmã, principalmente porque agora sou tio;
- Finalmente, mas como primeiros em meu coração, a minha querida esposa e filho pelo carinho e compreensão, visto que sem vocês esse trabalho não faria sentido;

E a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente com este trabalho.

Muito Obrigado!

*Em minha busca particular sempre me perguntei qual seria a inspiração para os que procuram entender o todo e o caos nele contido? Seria o fogo das profundezas da terra, ou o frio das galáxias? Eis que só uma criatura que sempre habitou esses extremos tem a resposta sobre o que a ciência mais persegue.*

*“Poder-se-ia condensar um intelecto que, em qualquer momento, conheceria todas as forças que animam a natureza e as posições dos seres que a compõem. Se este intelecto fosse suficientemente grande para submeter os dados em análise, poderia condensar numa simples fórmula o movimento numa dos grandes corpos do universo e do átomo mais leve, para tal intelecto nada poderia ser incerto e o futuro, assim como o passado, estariam frente aos seus olhos”.*

*Pierre Simom Laplace*

## SUMÁRIO

Dedicatória.....	iv
Agradecimentos.....	v
Epígrafe.....	vi
Sumário.....	vii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiv
Resumo.....	xv
Abstract.....	xvi
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Mudanças ambientais globais, sistemas ambientais e sensoriamento remoto.....	1
1.2. Hipótese.....	4
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo Geral.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
1.4. Base de dados.....	5
1.4.1. O sensor ASTER.....	5
1.5. Validação dos dados multiespectrais.....	11
1.5.1. Espectroscopia de reflectância.....	11
1.5.2. Procedimento de análise por difratometria de raio x.....	13
1.5.3. Procedimento de análise granulométrica de solos.....	14
1.5.4. Procedimento de levantamento de dados de campo.....	14
1.6. Métodos.....	16
1.6.1. Correção atmosférica e conversão de dados para reflectância de superfície.....	16
1.6.2. Processamento digital de dados multiespectrais.....	21
1.6.3. Análise espacial por decorrelação estatística vs análise de mistura espectral e processamento hiperespectral: propriedades espectrais e espaciais de dados.....	21
1.6.4. Análise de Mistura Espectral.....	22
1.6.5. Considerações sobre o método.....	24
1.7. Estrutura da tese.....	24

1.8. Descrição dos estudos realizados por capítulo.....	26
1.8.1. Capítulo 2.....	26
1.8.2. Capítulo 3.....	27
1.8.3. Capítulo 4.....	28
1.8.4. Capítulo 5.....	29
1.9. Referências Bibliográficas.....	30
CAPÍTULO 2: METODOLOGIA: PROPOSTA DE ANÁLISE SISTÊMICA APLICADA A DADOS MULTIESPECTRAIS PARA A CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMAS AMBIENTAIS.....	35
2.1. Representação espacial e mapeamento de sistemas ambientais.....	35
2.2. Dinâmica de sistemas ambientais complexos: conceitos sistêmicos aplicados ao uso de multiespectrais.....	42
2.2.2. Escala.....	42
2.2.3. Zonas de transição, estabilidade e mudanças em sistemas ambientais.....	44
2.3. Referências Bibliográficas.....	50
CAPÍTULO 3: MAPEAMENTO DE FRAGMENTOS E ZONAS DE TRANSIÇÃO EM SISTEMAS AMBIENTAIS TROPICAIS ATRAVÉS DE CLASSIFICAÇÃO HIPERESPECTRAL DE IMAGENS DO SENSOR ASTER ( <i>ADVANCED SPACEBORNE THERMAL EMISSION AND REFLECTION RADIOMETER</i> ).....	54
3.1. Introdução.....	54
3.2. Área de estudo.....	57
3.3. Materiais.....	60
3.4. Arcabouço conceitual.....	60
3.5. Processamento de imagens.....	63
3.5.1. Redução espectral de dados - <i>Minimum Noise Fraction</i> (MNF).....	65
3.5.2. Redução espacial de dados – <i>Pixel Purity Index</i> (PPI).....	66
3.5.3. Algoritmos SMA para processamento hiperespectral: MTMF e SAM.....	68
3.6. Resultados e discussões.....	71
3.6.1. Análise Espectral de membros extremos no ASTER.....	71
3.6.2. Detecção de fragmentos.....	76
3.6.3. Zonas de transição.....	80
3.7. Conclusões.....	72
3.8. Referências Bibliográficas.....	84

CAPÍTULO 4: IDENTIFICAÇÃO DE COMPONENTES MINERAIS EM SOLOS TROPICAIS POR MEIO DE ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA E DADOS DO SENSOR ASTER (ADVANCED SPACEBORNE THERMAL EMISSION AND REFLECTION RADIOMETER).....	93
4.1. Introdução.....	93
4.2. Área de estudo.....	95
4.3. Materiais.....	98
4.4. Métodos.....	99
4.4.1. Pré-processamento dos dados ASTER.....	99
4.4.2. Análise de solos por espectroscopia de reflectância.....	100
4.4.3. Interpretação de assinaturas espectrais de solos.....	101
4.4.4. Análise de solos por difratometria de raio-x (DRX).....	107
4.4.5. Análise dos espectros de referência de solos na resolução espectral do sensor ASTER.....	110
4.4.6. Espectros de referência de solos vs espectros em pixels das imagens ASTER.....	114
4.5. Mapeamento de solos.....	117
4.6. Conclusões.....	121
4.7. Referências Bibliográficas.....	122
CAPÍTULO 4: MÉTODO DE MONITORAMENTO QUANTITATIVO DE PROCESSOS DE ARENIZAÇÃO EM REGIÕES TROPICAIS UTILIZANDO DADOS DO INFRAVERMELHO TERMAL DO SENSOR ASTER (ADVANCED SPACEBORNE THERMAL EMISSION AND REFLECTION RADIOMETER).....	130
5.1. Introdução.....	130
5.1.1. O uso do Infravermelho Thermal (TIR) no estudo de processos de arenização.....	131
5.2. Área de estudo.....	134

5.2.1. Composição mineralógica dos solos.....	136
5.3. Material e métodos.....	141
5.3.1. Espectroscopia de reflectância de minerais no infravermelho termal.....	141
5.3.2. Estratégia de processamento dos dados termais.....	142
5.3.2.1. Correção atmosférica e conversão à emissividade dos dados termais.....	144
5.4. Resultados e Discussão.....	146
5.4.1. Razão de bandas.....	146
5.4.2. Realce por decorrelação.....	150
5.4.3. Classificação hiperespectral.....	153
5.4.3.1. Transformação <i>Minimum Noise Fraction</i> .....	153
5.4.3.2. Detecção de membros extremos: <i>Pixel Purity Index</i> .....	154
5.4.3.3. Classificações SAM ( <i>Spectral Angle Mapper</i> ) e MTMF ( <i>Mixture Tuned Matched Filtering</i> ).....	156
5.5. Conclusões.....	159
5.6. Referências Bibliográficas.....	160
 CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES GERAIS.....	 168
 ANEXOS.....	 171
ANEXO 1 – Resultados dos dados de granulometria de solos.....	172
ANEXO 2 – Resultados dos dados de difratrometria de raio x.....	175
ANEXO 3 – Análise Sistêmica: contexto histórico	181

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Comparação entre bandas espectrais dos sensores ASTER e ETM+.....	8
Figura 1.2. Espectrorradiômetro <i>Fieldspec Full Resolution</i> .....	12
Figura 1.3. Difratrômetro de raios X.....	13
Figura 1.4. Levantamentos de dados de campo realizados nas diferentes áreas de estudo.....	15
Figura 2.1. Modelo vetorial de representação espacial.....	36
	38

Figura 2.2. Modelos de abordagem de sistemas ambientais segundo escala espacial de abrangência.....	
Figura 2.3. Modelo matricial de representação espacial.....	40
Figura 2.4. Modelos de representação vetorial, com base na geometria euclidiana e matricial segundo conjunto de Mandelbroldt.....	41
Figura 2.5. Escala e resolução radiométrica.....	43
Figura 2.6. Esquema conceitual de zonas de transição e o Pêndulo de Yorke.....	45
Figura 2.7. Atratores complexos.....	47
Figura 2.8. Esquema conceitual do mapeamento de elementos num sistema ambiental por meio de uma matriz de pixels.....	49
Figura 3.1. Localização da área de estudo: região de Itirapina-SP.....	59
Figura 3.2. Esquema conceitual de estabilidade e zonas de transição em uma matriz de pixels.....	62
Figura 3.3. Etapas de processamento hiperespectral aplicados aos dados do sensor ASTER.....	64
Figura 3.4. Esquema conceitual de seleção de eixos das Principais Componentes (PC) a partir de gráfico de dispersão.....	66
Figura 3.5. Esquema conceitual da aplicação de uma etapa de interação do índice de pureza de pixel ( <i>pixel purity index</i> - PPI) para seleção de membros extremos por meio da geometria do simplex num gráfico bidimensional de dispersão.....	68
Figura 3.6. Esquema conceitual do <i>Mixture Tuned Matched Filtering</i> (MTMF) disposto em um gráfico bidimensional de dispersão.....	69
Figura 3.7. Esquema conceitual da aplicação do <i>Spectral Angle Mapper</i> (SAM) simplificado para duas dimensões.....	71
Figura 3.8. Membro extremo de caulinita.....	73
Figura 3.9. Comportamento espectral típico de uma folha verde reamostrado para o ASTER.....	75
Figura 3.10. Gráficos de dispersão MTMF.....	77
Figura 3.11. Resultados da classificação MTMF: detecção de fragmentos.....	79

Figura 3.12. Resultados da classificação SAM: zonas de transição.....	81
Figura 4.1. Localização da área de estudo: região de Assis-SP.....	97
Figura 4.2. Composição colorida ASTER 231 somados a localização dos pontos de coleta de amostras de Solos e classificação pedológica.....	99
Figura 4.3. Espectros dos principais minerais componentes de solos tropicais (USGSLib).....	102
Figura 4.4. Espectros de amostras de solo da área de estudo medidos em laboratório no espectrorradiômetro <i>FieldSpec</i> FR.....	105
Figura 4.5. Espectros de referência área de estudo selecionados a partir de assinaturas espectrais de amostras de solo medidas por espectrorradiômetro em laboratório	109
Figura 4.6. Comparação entre espectros de referência de solos medidos em laboratório e re-amostrados para a resolução espectral do ASTER.....	111
Figura 4.7. Exemplo da relação da medida de água estrutural e molecular nos espectros de caulinita e montmorilonita.....	113
Figura 4.8. Espectro medido em laboratório da amostra de solo A4 (NV1).....	114
Figura 4.9. Comparação dos espectros de referência das amostras de solos medidos em laboratório com espectros de referência da imagem ASTER.....	116
Figura 4.10. Classificação MTMF utilizando como membros extremos os espectros dos minerais sob investigação, referentes à área de estudo.....	119
Figura 5.1. Localização da área de estudo: região de São Francisco de Assis-RS.....	135
Figura 5.2. Mapa da área de estudo com áreas de coleta de amostras de solo.....	137
Figura 5.3. Diagramas derivados das análises por difratometria de Raio X realizadas nas amostras de solos na área de estudo.....	138
Figura 5.4. Diagramas derivados das análises por difratometria de Raio X realizadas nas amostras de solos na área de estudo.....	139
Figura 5.5. Diagramas derivados das análises por difratometria de Raio X realizadas nas amostras de solos na área de estudo.....	140
Figura 5.6. Assinaturas espectrais corrigidas para emissividade dos principais minerais sob investigação na área de estudo.....	141
Figura 5.7. Fluxograma de etapas de processamento das imagens termais do	143

ASTER.....

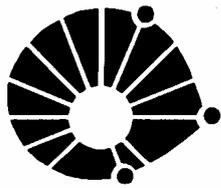
Figura 5.8. Assinaturas espectrais de quartzo, caulinita, calcita e mistura caulinita-quartzo, corrigidas para emissividade e reamostradas para resolução espectral do sensor ASTER-TIR.....	147
Figura 5.9. Modelo linear de mistura espectral para separação de quartzo e caulinita.....	149
Figura 5.10. Realce por decorrelação (RDC) aplicado as imagens ASTER-TIR.....	151
Figura 5.11. Comparação do produto gerado a partir do RDC das bandas AST13/12/10 com a CC_AST231.....	153
Figura 5.12. Aplicação da transformação MNF nos dados ASTER-TIR.....	154
Figura 5.13. Membro extremo de quartzo.....	156
Figura 5.14. Resultado na classificação SAM utilizando membro extremo de quartzo.....	157
Figura 5.15. Classificação MTMF utilizando membro extremo de quartzo.....	159

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Parâmetros técnicos do sensor ASTER.....	6
Tabela 1.2 – Tipos de processamento e produtos padrão do sensor ASTER.....	10

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.1. Radiância do sensor.....	17
Equação 1.2. Fator de reflectância bidirecional (FRBD).....	18
Equação 1.3. Correção atmosférica.....	19
Equação 1.4. Conversão de dados para reflectância de superfície.....	19
Equação 1.5. Análise de mistura espectral.....	23
Equação 1.6. Erro médio quadrático.....	23
Equação 3.1. <i>Spectral Angle Mapper</i> (SAM).....	70
Equação 5.1. Conversão de valores em DN para radiância do sensor segundo parâmetros de calibração do ASTER.....	144
Equação 5.2. Conversão dos valores de radiância do sensor para reflectância de superfície.....	145
Equações 5.3. Conversão dos valores de reflectância de superfície em valores de emissividade.....	145



**UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**Pós-Graduação em Geografia**

**Caracterização de sistemas ambientais tropicais complexos utilizando análise sistêmica e processamento hiperspectral de dados do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*).**

**RESUMO**

**Tese de Doutorado**

**Luiz Eduardo Vicente**

O progressivo aumento da ocupação e uso intensivo de sistemas ambientais em âmbito global gera conseqüências como a degradação de terras, alteração nos ciclos hidrológicos e de nutrientes e diminuição da capacidade de retenção de carbono. Neste sentido, a utilização de sensoriamento remoto orbital tem contribuído para o estudo das transformações em sistemas ambientais, principalmente devido às suas características multi-escalares de abrangência espacial e temporal. Esse tipo de abordagem permite a realização de análise sistêmica por meio da utilização de técnicas de processamento digital de imagens, aliadas ao conhecimento do comportamento espectral dos materiais sob investigação em escala detalhada (componentes físico-químicos), bem como sua distribuição espacial enquanto sistema ambiental. Estudos deste tipo ainda são raros em áreas tropicais, exigindo um maior conhecimento das suas características espectrais locais. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é contribuir para o estudo de sistemas ambientais tropicais levando-se em consideração técnicas propícias a sua análise e mapeamento por sensores orbitais. Para tanto, foram utilizadas imagens ASTER nos intervalos espectrais do visível (0.52-0.69 $\mu$ m), infravermelho próximo (0.78-0.86  $\mu$ m), infravermelho de ondas curtas (1.60 a 2.43  $\mu$ m) e infravermelho termal (8-12 $\mu$ m). Sobre esses dados foram aplicados procedimentos de correção atmosférica considerando parâmetros tropicais locais e técnicas de classificação hiperspectral adaptados para este sensor: (i) *Minimum Noise Fraction*, (ii) *Purity Pure Index*, Visualização n-dimensional, e os algoritmos *Spectral Angle Mapper* e *Mixture Tuned Matched Filtering*. A fim de se abranger diferentes características ambientais, foram escolhidas três áreas de estudo: Região de Itirapina – SP, Região de Assis – SP e Região de São Francisco de Assis – RS. Cada uma dessas regiões apresenta situações particulares, inerentes a transformações em sistemas ambientais tropicais, envolvendo os seguintes aspectos: (i) zonas de transição em fragmentos ecossistêmicos, (ii) componentes minerais típicos de solos tropicais, e (iii) processos de arenização. Para validação dos dados do sensor ASTER foram utilizados, além de dados de campo, análises espectrais teóricas com base em bibliotecas espectrais, medidas espectrorradiométricas locais, bem como análises por difratometria de raio X. Como resultado, por meio do uso do intervalo espectral entre o visível o infravermelho de ondas curtas, foi possível mapear áreas de fragmentos vegetacionais numa escala de detalhe, através da separação de diferentes fitofisionomias, como: cerrado, cerrado e mata estacionária semidecídua. Nos solos tropicais foram detectados componentes minerais típicos, como: caulinita, montmorilonita, gibbsita, óxidos e hidróxidos de ferro. No que se refere ao processo de arenização, estudos aqui desenvolvidos, com base no infravermelho termal, permitiram estimar a distribuição e abundância de áreas ricas em quartzo em contraposição a outros alvos da cobertura, como forma de se estabelecer níveis de estabilidade e degradação relativas a esses locais. O conjunto de resultados obtidos neste trabalho é uma contribuição para um melhor entendimento de sistemas ambientais em regiões tropicais, particularmente no que se refere ao uso de sensoriamento remoto orbital, enquanto ferramenta de análise multi-escalar.



**UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**Pós-Graduação em Geografia**

**Characterization of complex tropical environmental systems through systemic analysis and hiperespectral processing of ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) data**

**ABSTRACT**

**Doctorate Thesis**

**Luiz Eduardo Vicente**

The progressive increase of the occupation and intensive use of environmental systems in a global scale generate consequences such as the degradation of lands, alteration in the hydrologic and nutrients cycles and diminution of the carbon retention capacity. In this sense, the use of orbital remote sensing has contributed for the study of the transformations in environmental systems, mainly due to its multi-scale characteristics of spatial and temporal coverage. This type of approach allows the achievement of systemic analysis by means of digital image processing techniques, coupled with knowledge about the spectral properties of materials under investigation in detail (physical-chemical components), as well as their spatial distribution as an environmental system. This class of study is yet rare in tropical regions, requiring an ample understanding of the spectral signature of the local targets involved. In this view, this work aims to contribute for the study of tropical environmental systems considering advanced techniques for their analysis and mapping by orbital sensors. Images acquired by the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) covering visible (0.52-0.69 $\mu\text{m}$ ), near infrared (0.78-0.86  $\mu\text{m}$ ), shortwave infrared (1,60-2,43  $\mu\text{m}$ ) and thermal infrared (8-12 $\mu\text{m}$ ) wavelengths were employed for these tasks. Firstly, the data were atmospherically corrected based on local tropical parameters and converted to either reflectance (VNIR-SWIR) or emissivity (TIR). Secondly, the pre-processed data were processed through algorithms originally designed for classification of hyperspectral data, such as (i) Minimum Noise Fraction, (ii) Purity Pure Index, (iii) n-dimensional visualization; (iv) Spectral Angle Mapper e and (v) Mixture Tuned Matched Filtering. In order to experiment in different scenarios, three sites were considered: Itirapina and Assis (State of Sao Paulo) and São Francisco de Assis (State of Rio Grande do Sul). Each of these sites shows particular characteristics as regards tropical environmental system transformations, involving the following aspects: (i) transition zones in ecosystem fragments, (ii) typical tropical ground mineral components, and (iii) desertification-like (arenization) processes. ASTER data were verified and validated using ground field data and spectra derived both from laboratory measurements and from spectral libraries, plus X-Ray Diffraction analysis. Based on this multiple data approach, it was possible to map fragments of vegetation in detail, separating different vegetation species based on their distinct spectral signatures between the VNIR-SWIR range, including woodland, shrubland and tropical semideciduous forests. Tropical soils were also mapped with specific minerals such as kaolinite, montmorillonite, gibbsite and iron oxides and hydroxides. As regards the arenization processes, within the study here developed on the basis of ASTER thermal infrared multispectral data, it was possible to estimate the distribution and abundance of quartz-rich areas in contrast to other materials, allowing an assessment about the levels of stability and degradation related to control area. The set of precision results obtained in this work is an important contribution for the study of environmental systems in tropical regions, particularly in what refers to the use of remote orbital sensors as a multi-scale tool.

# *CAPÍTULO 1*

## *INTRODUÇÃO*

### **1.1. MUDANÇAS AMBIENTAIS GLOBAIS, SISTEMAS AMBIENTAIS E SENSORIAMENTO REMOTO**

A relação do Homem com o meio em que vive é, historicamente, uma sucessão de apropriações dos recursos naturais, os quais se tornam em maior ou menor grau, derivações utilitárias das “necessidades” de uma determinada sociedade através de ações antrópicas. O impacto causado por tais ações não é medido apenas pelas possibilidades tecnológicas de exploração vigentes em cada época. Fosse isso, sociedades pré-industriais, como as dos Maias e Astecas, entre outras, não teriam sucumbido ao seu próprio volume de apropriação (Thomas, 2001). Um fator crucial para o entendimento desse processo, encerra-se no ritmo de exploração dos recursos, e sua capacidade de recuperação (Wackernagel *et al.*, 2002), bem como seu desdobramento em escalas espaciais e temporais. A mensuração dessas escalas pode ser verificada por meio da alteração de mudanças entendidas como naturais e próprias do Sistema Terra, e que correspondem, por exemplo, a ciclos de milhares de anos, tais como diferenças no balanço global de energia devido a variações no eixo de inclinação da terra em relação ao Sol; atividades geotectônicas como o vulcanismo e correntes oceânicas. Devido a intensa atividade antrópica, esse ritmo de mudanças vêm se acelerando nos últimos 300 anos, principalmente no período pós-revolução industrial.

Uma das principais abordagens para o entendimento do processo de apropriação dos recursos naturais e os impactos dele decorrentes, fundamenta-se na análise da variedade de usos e coberturas da superfície do planeta, as quais expressam interações em diferentes níveis, entre ambientes marinhos, terrestres e da atmosfera. Estima-se que atualmente cerca de 10 a 15% do planeta seja ocupado por cultivo e *atividades* de ordem industrial e urbana, e que 6 a 8% tenham sido convertidos em pastagens (Olson *et al.*, apud Vitousek *et al.*, 1997), sendo que de maneira geral, aproximadamente 50% da superfície do planeta já foi alterada de alguma forma (Vitousek *et al.*, 1997). Projeções para os próximos 40 anos, apontam que o aumento da população, conjuntamente com a crescente demanda de alimentos, serão responsáveis pela conversão de 10.000.000.000 de hectares de ecossistemas ainda intocados em áreas para a agricultura. A retirada da cobertura vegetal natural, resultado da destruição desses sistemas naturais implicaria

numa diminuição da capacidade de retenção de gases como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e nitrogênio (N), por exemplo, alterando o ciclo de nutrientes (Tilman & Lehman, 2001) e, por conseguinte, diminuindo nichos de biodiversidade, visto que espécies não adaptadas a essa mudança desapareceriam (Zavaleta *et al.*, 2003). O aumento de CO<sub>2</sub> pode influenciar também a alcalinidade dos oceanos, aumentando sua acidez, e resultando numa diminuição do fitoplâncton, alimento fundamental para a vida marinha (Reid *et al.*, 1998). A movimentação de solos resultado de atividades agrícolas, por exemplo, também pode modificar o equilíbrio de estuários, lagos, mangues e rios (Meyer *et al.*, 1994; Vitousek *et al.*, 1997), tendo como outra consequência, o aumento das áreas de deserto devido, tanto a mudança do regime pluviométrico global, quanto ao empobrecimento dos solos e a retirada da vegetação natural perene (Kassas, 1995; Tucker *et al.*, 1999). Neste sentido, ao considerar-se diferentes sistemas ambientais, sejam ecossistemas, geossistemas ou biomas, nenhum deles está livre de alterações diretas ou indiretas derivadas dos diferentes usos da terra.

Dessa forma, a análise e mapeamento das diversas alterações na superfície terrestre são de fundamental importância para o entendimento das modificações ambientais. Um dos principais campos de estudos neste sentido é o do Sensoriamento Remoto Orbital, o qual dispõe da capacidade de reunir as dimensões espaciais e temporais de um fenômeno por meio de sua interação com a Radiação Eletromagnética (REM). Trata-se, portanto, de uma vantagem frente às dimensões globais alcançadas pelos diferentes processos de alteração dos sistemas ambientais. Desde o lançamento do primeiro sensor MSS, a bordo da plataforma do programa ERTS (*Earth Resource Technology Satellite*), mais tarde rebatizado de Landsat, e posteriormente com a série SPOT e os sensores HRV e HRG, o sensoriamento remoto orbital sempre foi utilizado de maneira eficiente, fornecendo dados diversos sobre o uso e cobertura da terra. Porém, estudos derivados desses sensores e outros de sua categoria, ainda careciam de um enfoque de integração ambiental, sendo capazes não apenas de identificar a disposição espacial de determinadas feições na superfície terrestre, mas também de delinear sua relação com o sistema ambiental das quais fazem parte, por meio de suas características físicas e químicas.

Mais recentemente sensores do programa EOS (*Earth Observing System*) como o MODIS, CERES, ASTER, MOPITT, MISR, abriram novas perspectivas para o estudo de sistemas ambientais por meio de sensoriamento remoto orbital (Vicente *et al.*, 2002). A proposta do programa EOS é o estudo do planeta terra como um sistema integrado, a fim de se delinear sua

dinâmica. Para tanto, pretende-se uma cobertura contínua do planeta por longos períodos, com sensores mais aptos ao estudo conjunto de componentes da atmosfera, hidrosfera e litosfera. Por meio desses novos instrumentos, o ganho informacional, no que se refere à análise de solos e vegetação, enquanto principais elementos de ecossistemas terrestres, concretiza-se por meio de resoluções espectrais e espaciais diferenciadas, principalmente de sensores como o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) e o ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), sendo possível a aplicação e o aprimoramento de conceitos e técnicas voltadas ao entendimento de sistemas ambientais. Estudos integrados de sistemas ambientais, utilizando sensoriamento remoto, ou a chamada *remote sensing science/remote sensing applications*, ainda são raros no Brasil, porém, vêm obtendo importantes resultados aplicados a diferentes regiões do planeta. Infelizmente, a maioria desses estudos ainda restringe-se a utilização de sensores hiperspectrais aerotransportados (resolução radiométrica de centenas de bandas), os quais, mesmo fornecendo uma ampla e maior cobertura do espectro eletromagnético, ainda são de uso restrito e alto custo.

Dessa forma, este trabalho pretende utilizar técnicas e ferramentas de sensoriamento remoto, com vistas a análise e mapeamento de sistemas ambientais, enfatizando o aprimoramento da identificação de alvos e sua função no conjunto de tais sistemas. Para tanto, foram utilizados dados do sensor ASTER aliados a técnicas de processamento digital de imagens, especialmente adaptadas para este sensor, e validação laboratorial de dados de superfície. Nesta tese também é proposta uma abordagem de dados multiespectrais no estado da arte do sensoriamento remoto, por meio do conceito de sistemas complexos, como forma de análise integrada de dados ambientais e seus respectivos processos de alteração. Considerando as características tropicais do contexto desse trabalho, as quais o diferenciam como uma das poucas propostas de análise utilizando sensoriamento remoto em ecossistemas tropicais, priorizou-se o aspecto espacial no que se refere a variação de áreas de estudo, com vias a análise do comportamento dos dados multiespectrais em diferentes condições atmosféricas, de iluminação e terreno. Esse enfoque objetiva o aprimoramento da reprodução isonômica das características espectrais de alvos por parte do sensor, com base no aprimoramento das correções atmosféricas aplicadas.

Outro ponto relevante a ser considerado, refere-se às possibilidades de análise do comportamento de alvos por meio da melhoria da resolução espectral em importantes regiões do espectro, como SWIR e o TIR, através do uso do ASTER. A consideração dessas regiões do

espectro eletromagnético em diferentes áreas de estudo, e num contexto de alterações ambientais, inaugura uma nova fase do sensoriamento remoto orbital, a qual necessita do máximo de estudos e aplicações relacionados, os quais servirão de base para futuros sensores, com resoluções espectrais e espaciais cada vez mais íntegras e precisas. Reitera-se que tal afirmação não representa apenas uma tendência, mas sim fatos concretos na forma da continuidade e ampliação de projetos como o EOS, por meio do lançamento de novos satélites nos próximos anos. Espera-se neste sentido, contribuir por meio do uso de sensoriamento remoto orbital, para o avanço no conhecimento dos elementos e processos de mudanças relativos ao conjunto de sistemas ambientais.

## **1.2. HIPÓTESE**

Nesta tese considera-se que sistemas ambientais representam uma mistura espectral de diferentes tipos de cobertura da terra, resultando em um cenário extremamente heterogêneo em pequenas escalas, as quais dependem diretamente da identificação de componentes físicos e químicos num gradiente contínuo de transição. Essa mistura resulta em alterações em maiores escalas, e conseqüentemente em diferentes cenários entendidos como ecossistemas, geossistemas, fragmentos e biomas, por exemplo. Entende-se dessa forma, que a dualidade entre exatidão taxonômica e processual multi-escalar, necessária a este tipo de estudo, pode ser melhor abordada com a decomposição e análise espectral das características físicas e químicas dos componentes de sistemas ambientais, segundo seus padrões de reflectância, e de sua aplicação a sensores óticos orbitais.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo deste trabalho é contribuir para a compreensão de sistemas ambientais tropicais por meio da utilização de técnicas de espectroscopia de reflectância e classificação hiperespectral aplicadas a dados de sensoriamento remoto orbital, especificamente do sensor multiespectral ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*).

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Contribuir para o conhecimento das propriedades espectrais análogas a materiais e processos (e.g. degradação de terras, fragmentação de sistemas ambientais) próprios de ambientes tropicais, por meio da utilização de espectroscopia de reflectância e dados multiespectrais ASTER;
- Utilizar e aprimorar métodos de processamento hiperespectral adaptados aos dados do sensor ASTER visando a detecção de fragmentos em sistemas ambientais tropicais em escala de detalhe (1 : 30 000);
- Utilizar e avaliar diferentes intervalos espectrais, abrangendo o visível (0.52-0.69 $\mu$ m), o infravermelho próximo (0.78-0.86  $\mu$ m), o infravermelho de ondas curtas (1.60 a 2.43  $\mu$ m), e o infravermelho termal (8-12 $\mu$ m), para a detecção e discriminação de componentes minerais típicos de solos tropicais, bem como de fitofisionomias;
- Avaliar dados do sensor ASTER no que refere a sua aplicabilidade para o mapeamento de componentes de solo e vegetação em ambiente tropical;
- Coadunar conceitos de análise sistêmica a interpretação e análise de dados multiespectrais a fim de fornecer subsídios para o mapeamento de sistemas ambientais, considerando sua capacidade de resistência/resiliência, zonas de transição e níveis de estabilidade.

## **1.4. BASE DE DADOS**

### **1.4.1. O SENSOR ASTER**

O sensor *ASTER* (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) opera embarcado no satélite TERRA, lançado em Dezembro de 1999, como parte do programa *EOS* (*Earth Observing System*), resultado de uma colaboração conjunta entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) dos EUA, e o *Ministry of Economy and Industry* (METI) do Japão. Essa colaboração é vislumbrada, em termos técnicos, pelas características herdadas pelo ASTER do *Optical Scanner*, que operava à bordo do JERS (*Japanese Earth Resources Satellite*), as quais incluem o aprimoramento da resolução espectral nas regiões do *REM* (radiação eletromagnética) aptas a trabalhos geológicos/pedológicos (Abrams e Hook, 2002).

Podem-se destacar os aspectos técnicos do sensor ASTER como sendo de extrema eficiência para o mapeamento remoto em escala de detalhe (1: 30 000), como, por exemplo, sua relação de resoluções espectrais e espaciais. O ASTER possui 14 bandas espectrais imageadas por 3 sensores diferentes: três bandas com resolução de 15m, cobrindo as faixas espectrais do

visível (*Visible* - VIS) entre 0.52 e 0.69  $\mu\text{m}$ , e infravermelho próximo (*Near infrared* - NIR) de 0.78 a 0.86  $\mu\text{m}$ ; seis bandas, com 30m de resolução, posicionadas no infravermelho de ondas curtas (*Short Wave Infrared* - SWIR) de 1.600 a 2.430  $\mu\text{m}$ , e cinco bandas com 90m de resolução, no infravermelho termal (*Thermal infrared* - TIR), entre 8.125 e 11.65 (Tabela 1.1).

Tabela 1.1. – Parâmetros técnicos do sensor ASTER (Adaptado de Abrams & Hook, 2002).

Subsistemas	Bandas	Abrangência espectral ( $\mu\text{m}$ )	Resolução Radiométrica	Acurácia Absoluta ( $\sigma$ )	Resolução Espacial (m)	Níveis de quantização
VNIR	1	0.52-0.60	$\text{E}\Delta\rho\leq 0.5\%$	$\leq \sim 4\%$	15	8 bits*
	2	0.63-0.69				
	3N	0.78-0.86				
	3B ***	0.78-0.86				
SWIR	4	1.60-1.70	$\text{NE}\Delta\rho\leq 0.5\%$		30	8 bits*
	5	2.145-2.185	$\text{NE}\Delta\rho\leq 1.3\%$			
	6	2.185-2.225	$\text{NE}\Delta\rho\leq 1.3\%$	$\leq \sim 4\%$		
	7	2.235-2.285	$\text{NE}\Delta\rho\leq 1.3\%$			
	8	2.295-2.365	$\text{NE}\Delta\rho\leq 1.0\%$			
TIR	9	2.360-2.430	$\text{NE}\Delta\rho\leq 1.3\%$		90	12 bits**
	10	8.125-8.475				
	11	8.475-8.825		$\leq 3\text{K}$ (200-240 K)		
	12	8.925-9.275	$\text{NE}\Delta\text{T}\leq 0.3\text{K}$	$\leq 2\text{K}$ (240-270 K)		
	13	10.25-10.95		$\leq 1\text{K}$ (270-340 K)		
	14	10.95-11.65		$\leq 2\text{K}$ (340-370 K)		
Altitude: 705 Km. Resolução Temporal: ~ 16 days. Área de cobertura: 60 x 60 Km ( $\alpha$ IFOV). Total cobertura no cross-tracking direcionado por ponto: 232 Km			* 256 níveis de cinza. ** 4096 níveis de cinza. *** banda de retrovisada – estéreo-par com 3N.			

Outro ponto relevante diz respeito à sua capacidade de imageamento em pares estereoscópicos, criado pelo efeito de paralaxe entre as imagens das bandas 3B e 3N, o que possibilita a confecção de *modelos digitais de elevação* (MDEs) de forma remota no comprimento de onda do NIR (*Near Infrared*) (Steinmayer, 2003). Os MDEs derivados dessas bandas possuem acurácia vertical altimétrica entre 7m (calibrado com pontos de controle no terreno) e 15m (sem pontos de controle) (Hirano *et al*, 2002).

Comparativamente aos sensores multiespectrais tradicionais em uso, como o TM/ETM+, o ASTER tem recobrimento espectral praticamente equivalente, o que possibilita a detecção de compostos de ferro no solo (e.g. hematita e goethita, minerais típicos de solos tropicais), com comportamento típico na região do VIS-NIR (bandas AST1-AST4) (Hunt & Ashley, 1979).

Porém, a resolução espectral do ASTER nesta faixa apresenta um ganho geométrico e textural superior a do TM/ETM<sup>+</sup>, mesmo que seja realizada a fusão da banda 8 (pancromática) de 15 m para ganho de resolução espacial (Souza Filho, 2003). No que se refere à detecção de argilas e carbonatos, tem-se 6 faixas específicas na região do SWIR (bandas 4-9) dispostas continuamente, o que representa uma melhor reprodução da assinatura espectral de alvos com essa composição (Rowan & Mars, 2003). Nessa região do espectro, destaca-se também a capacidade de detecção de componentes bioquímicos da vegetação, especificamente em estrutura latifoliada, como proteínas, lignina e celulose (Almeida & Souza Filho, 2005) (Fig. 1.1).

A região do infravermelho termal (TIR), composta de 5 bandas (10-14), propicia ao ASTER ser o primeiro sensor orbital capaz de realizar imageamentos multiespectrais termais (diurnos e noturnos), abrangendo uma região do REM própria para detecção de compostos como o quartzo e silicatos, de maneira geral, assim como carbonatos (Lima, 2003) (Fig. 1.1).

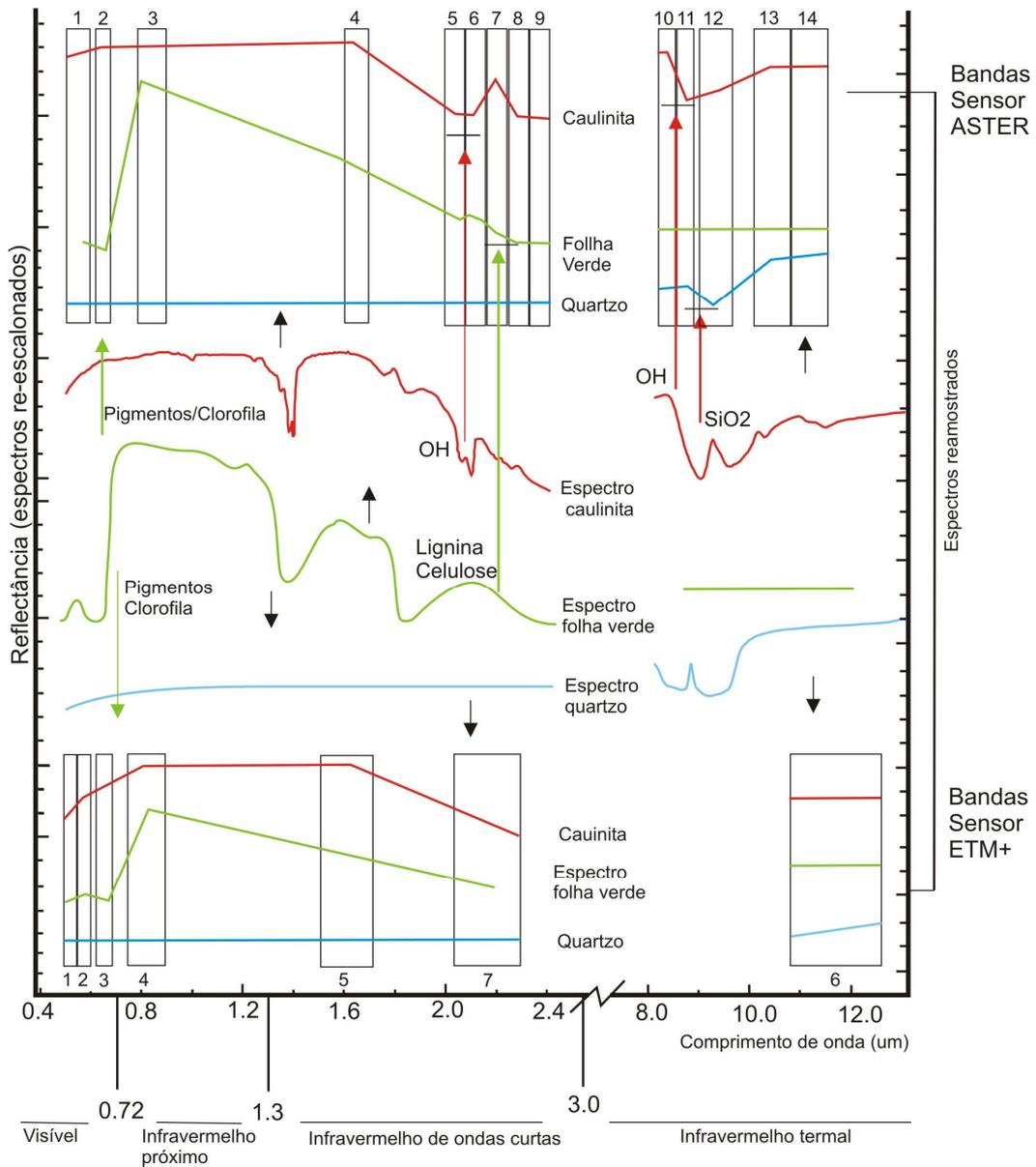


Figura 1.1. Comparação entre bandas espectrais dos sensores ASTER e ETM<sup>+</sup>. Assinaturas espectrais de caulinita, de uma folha verde, e do quartzo (biblioteca espectral da John Hopkins University) reamostradas para as bandas do ASTER e do ETM<sup>+</sup>. O segmento das assinaturas correspondentes ao Infravermelho Termal estão convertidas para emissidade.

Os dados do ASTER são georreferenciados e apresentados no formato *Hierarchical Data Format* (hdf), os quais comportam a sua própria base de metadados, com características geométricas e radiométricas da cena.

Por tratar-se de um sensor experimental, a aquisição de dados ASTER pode ser feita mediante de consulta junto ao acervo de dados da JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), ou por solicitação de imageamento, visto que o tempo de operação do ASTER no TERRA é dividido com mais 4 sensores (CERES - *Clouds and the Earth's Energy System*; MISR - *Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer*; MODIS - *Moderate-resolution Imaging Spectro – Radiometer*; MOPITT - *Measurements of Pollution in the Troposphere*). O acesso gratuito a determinados níveis de processamento está vinculado à apresentação de projetos junto ao ERSDAC (*Earth Remote Sensing Data Analysis Center*) no Japão ou ao JPL, nos Estados Unidos (Abrams & Hook, 2002).

Os principais níveis de processamento do ASTER são: Nível 1A – dados brutos sem calibração, correção ou registro e Nível 1B – dados calibrados geométrica e radiometricamente prontos para uso, compondo um dataset de 14 bandas de todos os subsistemas operantes, com unidades de medida de pixel em radiância:  $W/m^{-2}/sr/\mu m$ .

A partir destes 2 níveis são gerados os subprodutos do Nível 2 e 3 (Tabela 1.2).

Tabela 1.2. - Tipos de processamento e produtos padrão do sensor ASTER (adaptado de Abrams & Hook, 2002).

Código		Nome do Parâmetro	Modo de Produção	Unidade	Acurácia Absoluta	Resolução Horizontal (m)
AST_06V	2	composições coloridas realçadas por decorrelação -VNIR	routine	none	N/A	15
AST_06S	2	composições coloridas realçadas por decorrelação -SWIR	routine	none	N/A	30
AST_06T	2	composições coloridas realçadas por decorrelação -TIR	routine	none	N/A	90
AST_04	2	temperatura de superfície	on-demand	graus C	1-2 C	90
AST_07	2	reflectância na superfície VNIR,SWIR	on- demand	none	4%	15, 30
AST_09	2	Surface radiance - VNIR, SWIR	on- demand	W/m <sup>2</sup> /sr/μm	2%	15, 30
AST_09T	2	radiância na superfície.	on- demand	W/m <sup>2</sup> /sr/μm	2%	90
AST_05	2	Emissividade da superfície	on- demand	none	0.05-0.1	90
AST_08	2	Temperatura cinética de superfície	on- demand	graus K	1-4 K	90
AST13POL	2	Superfície polar e classificação de nuvens	on- demand	none	3%	15, 30, 90
AST14DEM	3	Modelo digital de elevação (MDE)	on- demand	m	>= 7 m	30

A arquitetura de funcionamento do ASTER prenuncia uma tendência nos sensores orbitais com o aumento das resoluções espaciais e espectrais, possibilitando a partir de um mesmo sensor, com isonomia no padrão de dados, análises multiescalares (horizontais e verticais), no que se refere a extensão de cobertura e nível de detalhamento, fornecendo, além dos usuais dados de reflectância, também de emissividade e temperatura (Souza Filho, 2003). Estes dados podem ser utilizados em produtos cartograficamente semi-detalhados, da ordem de 1 : 50 000, ou menos, aliando-se à capacidade de geração de MDEs (modelos digitais de elevação), que constitui uma característica ainda restrita a poucos sensores orbitais. Esse aporte técnico traduz-se em vantagens nos mapeamentos: clinográficos, hipsométricos, uso da terra, pedológicos, geológicos, geomorfológicos, dentre outros (Vicente *et al.*, 2006).

A atual situação do LANDSAT 7, fora de funcionamento, e o LANDSAT 5, em processo de descomissionamento, colocam o ASTER como a principal alternativa de mapeamento de recursos naturais em plataforma orbital existente. Soma-se a esse fato, a importância do ASTER enquanto instrumento de pesquisa, que objetiva o mapeamento de um maior conjunto de alvos na superfície terrestre, precedendo a tendência de aprimoramento nos sensores orbitais, em relação à cobertura de novas e importantes regiões do espectro, bem como a melhoria de suas resoluções espaciais. O que o torna uma referência na análise do comportamento espectral de alvos por meio de sensores orbitais multiespectrais.

### **1.5. VALIDAÇÃO DOS DADOS MULTIESPECTRAIS**

Mesmo que a maioria dos métodos de análise laboratoriais descritos à seguir sejam conhecidos, a opção por descrevê-los refere-se à importância da exatidão desses processos quando aplicados na validação de dados de sensoriamento remoto, atribuindo-lhes um caráter completamente novo e exigindo parâmetros rígidos de calibração e controle dos dados.

#### **1.5.1 ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA**

Para a realização das medidas espectrais foi utilizado o espectroradiômetro portátil modelo *Fieldspec Full Resolution (FR)*, produzido pela *Analytical Spectral Devices Inc.*, pertencente ao Laboratório de Espectroscopia de Reflectância (LER) do Instituto de Geociências da Unicamp (IGE). Esse aparelho possui de 3 detectores independentes os quais detectam a radiação eletromagnética no intervalo de 0,350 $\mu$ m-2,500 $\mu$ m (Fig.1.2a). O primeiro trata-se de um espectrômetro formado por arranjo de fotodiodo de silício com 512 elementos cobrindo o intervalo espectral entre 0,350 $\mu$ m-0,982 $\mu$ m. Os outros detectores são scanners de alta velocidade de InGaAs, termoeletricamente resfriados, os quais cobrem o intervalo entre 1,00  $\mu$ m -2,5  $\mu$ m (*Analytical Spectral Devices*, 1994) (Fig.1.2).

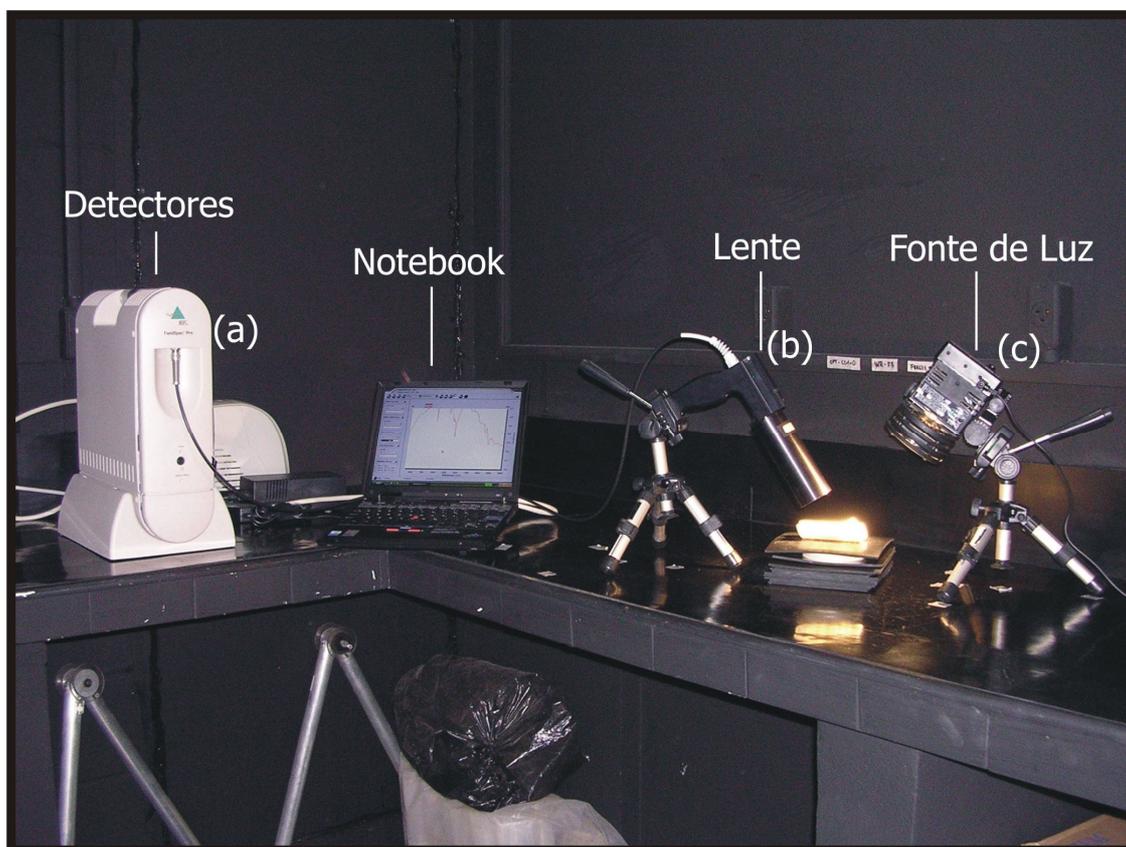


Figura 1.2. Foto do *Espectroradiômetro Fieldspec Full Resolution (FR)* montado para uso no Laboratório de Espectroscopia de Reflectância (LER) do Instituto de Geociências da Unicamp (IGE).

O aparelho opera com 3 lentes de 1°, 5° e 18°, as quais controlam o campo de visada instantânea do sensor (Fig. 1.2b). A fonte de luz consiste numa lâmpada halógena de 300 K (*Analytical Spectral Devices*, 1994) (Fig. 1.2c). Detalhes sobre a sua geometria de aquisição utilizada neste trabalho encontram-se no capítulo 4.

#### **1.5.2. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X**

As análises de difratometria de raios X (DRX) foram realizadas utilizando o difratômetro *Siemens Diffraktometer Kristallofe D500* (Fig.1.3a), pertencente ao laboratório de difratometria de raios X do Instituto de Geologia e Ciências Exatas da Unesp de Rio Claro – SP. Este aparelho opera com um tubo de cobalto com potência de 25mA e 35KV (Fig. 1.3b). O método de preparo consistiu na moagem das amostras para sua colocação em placas de poliéster

(Fig.1.3c). Os dados de leitura foram de: intervalo  $2\theta$  de  $3^{\circ}$ - $70^{\circ}$ , tamanho do passo de  $0.050^{\circ}$ , tempo de 1,0 s, voltagem e corrente do tubo 20KV e 5mA respectivamente. O tempo total de leitura foi de 22min e 20s, com o detector iniciando a operação no ângulo de  $60^{\circ}$  e encerrando em  $130^{\circ}$  (variação de ângulo do goniômetro) (Fig. 1.3b).

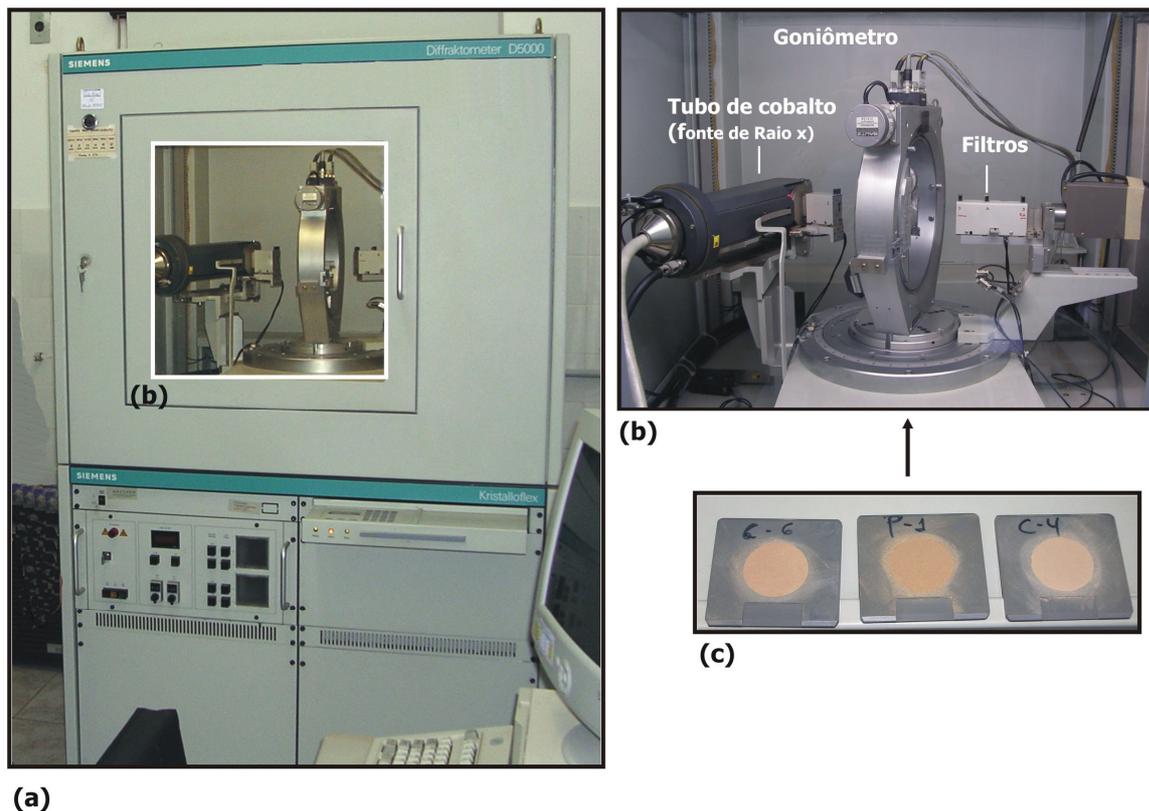


Figura 1.3. Difratorômetro de raios X – Siemens Diffraktometer Kristalloflex D500 (Instituto de Geologia e Ciências Exatas - UNESP/Rio Claro). Na figura b, detalhes do conjunto de leitura e na figura c amostras preparadas para análise após moagem e colocação em placas de poliéster.

### 1.5.3. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE SOLOS

A análise granulométrica foi utilizada para se estimar aspectos físicos de solos, a partir da quantificação e determinação das participações relativas das frações argila, silte e areia. Para tanto, seguiram-se 3 etapas principais: (i) pré-tratamento (e.g. secagem), (ii) dispersão da amostra de solo e (iii) quantificação das frações de solo. Utilizando-se o método da pipeta, foi efetuada a separação das areias por meio de peneiramentos de diferentes diâmetros de trama (1.00, 0.50, 0.25, 0.125, 0.0053 mm). Numa segunda etapa, as amostras de silte e argila foram submetidas à

separação por decantação em água com aplicação de agente sedimentador. Nesta etapa a temperatura é controlada para o estabelecimento de tempo de sedimentação, e a argila (em suspensão) foi coletada. Dessa forma a proporção de silte é calculada pela subtração das outras frações em relação a amostra original (EMBRAPA, 1997).

#### **1.5.4. PROCEDIMENTOS DE LEVANTAMENTOS DE DADOS DE CAMPO**

Foram realizadas diversas incursões às áreas de estudo, nas quais realizaram-se tomadas de pontos de controle via GPS (*global positioning system*) para reconhecimento de tipos de uso e cobertura da terra, coleta de amostras de solos por meio de gradagem, e validação de dados utilizando cartas imagem geradas à partir de dados ASTER e mapas da área estudo (Fig.1.4).

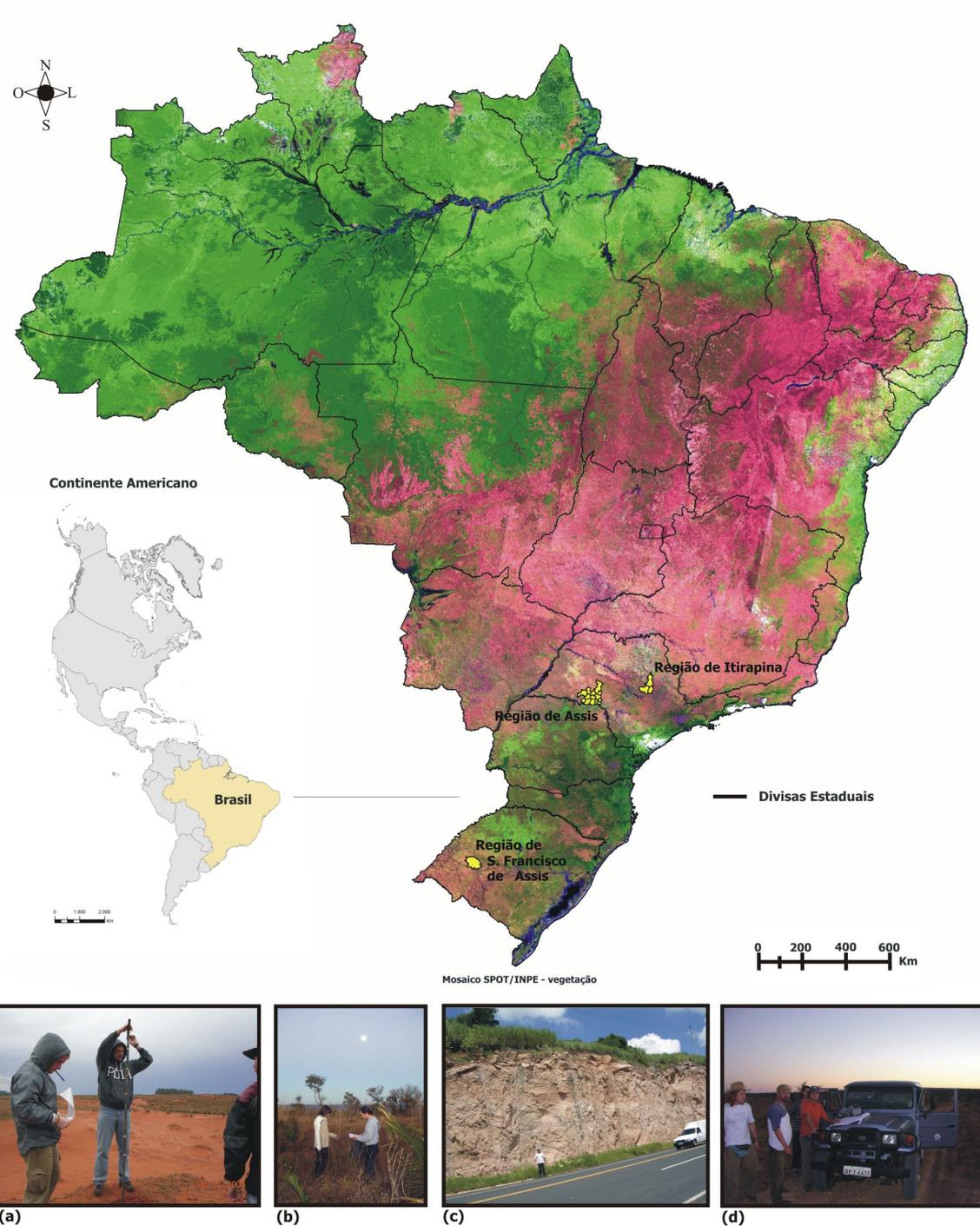


Figura 1.4. Exemplos de levantamentos de dados de campo realizados nas diferentes áreas de estudo (destaques em amarelo no mapa). A figura (a) mostra procedimento de gradagem para coleta de solos em área de formação de areial em São Francisco de Assis – RS. A figura (b) e (d) mostram validação de dados referentes a identificações fitofisionômicas na região de Itirapina – SP, utilizando mapas locais e GPS. A figura (c) refere-se à formação arenítica em área de coleta de solos na região de Assis – SP.

## 1.6. MÉTODOS

### 1.6.1. CORREÇÃO ATMOSFÉRICA E CONVERSÃO DE DADOS PARA REFLECTÂNCIA DE SUPERFÍCIE

O sensoriamento com base no comportamento espectral de alvos, tem por fundamento a comparação de feições diagnósticas que expressam a composição física e química de cada elemento na superfície terrestre. Esse tipo de abordagem resume o sensoriamento remoto no seu mais alto nível, fornecendo a possibilidade de análise das características intrínsecas de cada alvo possibilitando sua análise não apenas quantitativa, mas também qualitativa.

Sensores óticos constituem-se em instrumentos de aquisição de dados remotos de forma passiva, ou seja, que dependem do fluxo de energia de um corpo externo emissor, notadamente a nossa principal fonte de energia, o sol. Quando esse tipo de instrumento opera embarcado em plataformas orbitais está sujeito à influência direta dos elementos constituintes da atmosfera, como gases e aerossóis, diminuindo e alterando o comportamento da radiação eletromagnética captada pelo sensor. Das dezenas de tipos de gases componentes da atmosfera, apenas alguns apresentam efeitos de absorção/espalhamento que resultam em variação da radiação eletromagnética (REM) na forma de feições de absorção. Em ordem de maior influência tem-se em primeiro lugar o vapor d'água que constitui cerca de 2/3 da atmosfera e apresenta feições de absorção em torno de 0.94  $\mu\text{m}$ , 1.14  $\mu\text{m}$ , 1.38  $\mu\text{m}$  e 1.88  $\mu\text{m}$ . Seguem-se posteriormente os demais gases com participação total de 1/3 na atmosfera, os quais são: Oxigênio ( $\text{O}_2$ ) (feições entre 0.60 e 0.30  $\mu\text{m}$ ); Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) (feições em torno de 1.96 $\mu\text{m}$ , 2.01 $\mu\text{m}$ , 2.08 $\mu\text{m}$ ), Metano ( $\text{CH}_4$ ) (feição em torno de 2.35  $\mu\text{m}$ ) e Ozônio ( $\text{O}_3$ ) (feição próxima a 0.60  $\mu\text{m}$ ) (Gao *et al.*, 1993).

Dado que o espalhamento decorre a razão de  $\frac{1}{\lambda^4}$ , onde  $\lambda$  = comprimento de onda, entende-

se que devido ao tamanho reduzido das partículas dos gases, o tipo de espalhamento associados aos mesmos ocorre principalmente nos menores comprimentos de onda, na região do visível e do infravermelho próximo, sendo denominado Molecular ou *Rayleigh* (Green *et al.*, 1993). Já as partículas de aerossóis, com tamanho que pode variar entre 0.1 a 10  $\mu\text{m}$ , apresentam um espalhamento conhecido como MIE, o qual decresce na relação inversa aos maiores comprimentos de onda (Zullo, 1994). O comportamento dos gases e aerossóis deve ser considerando conjuntamente aos diferenciais da energia eletromagnética em sua trajetória da

fonte (sol), ao atingir o alvo e ser captada pelo sensor enquanto radiância ( $L_{sen}$ ), como sendo resultado da soma da radiância direta ( $L_{dir}$ ), radiância difusa ou resultante de espalhamento ( $L_e$ ), mais a radiância da superfície ou alvo ( $L_{sup}$ ) (Zullo, 1994; Chandrasekhar, 1960), expressos na equação:

$$L_{sen} = L_{dir} + L_e + L_{sup}$$

Equação 1.1. Radiância do sensor.

Para o efetivo conhecimento das propriedades físicas e químicas de alvos na superfície terrestre deve-se considerar a radiância enquanto função direta do fluxo radiante do sol ou irradiância ( $E$ ), considerando-se as particularidades de um determinado objeto em refletir quantidades relativas de REM em diferentes comprimentos de onda ( $\lambda$ ) independente da intensidade de  $E$ , o que é definido como reflectância ( $\rho$ ). Dado que as intensidades de radiância ( $L$ ) variam em função das condições geométricas de iluminação e visada, tanto do sensor quanto do alvo, visto que o comportamento da maioria dos alvos terrestres é anisotrópico (não reflete igualmente a REM em todas as direções), a estimativa de reflectância ( $\rho$ ) é realizada considerando tal variação no cálculo do fator de reflectância bidirecional (FRB) (Zullo, 1994), expresso na equação:

$$\rho_{\lambda}(\psi_{sen}, \theta_{sen}, \psi_{fo}, \theta_{fo}) = \frac{L_{\lambda}(\psi_{sen}, \theta_{sen}, \psi_{fo}, \theta_{fo})}{E_{\lambda}(\psi_{fo}, \theta_{fo})}$$

Onde:

$\rho_{\lambda}$  = Fator de reflectância espectral bidirecional

$\psi_{sen}$  = Ângulo azimutal do sensor

$\theta_{sen}$  = Ângulo zenital do sensor

$\psi_{fo}$  = Ângulo azimutal da fonte (sol)

$\theta_{fo}$  = Ângulo zenital da fonte (sol)

$L_{\lambda}$  = Radiância espectral bidirecional

$E_{\lambda}$  = Irradiância espectral solar (superfície)

Equação 1.2. Cálculo do fator de reflectância bidirecional (FRBD).

Considerando-se os parâmetros do comportamento da REM descritos anteriormente, este trabalho atenta para as variações ambientais desse conjunto de elementos, com ênfase nas particularidades próprias de ambientes tropicais, dada a sua grande disponibilidade de energia disponível, resultado direto do ângulo de incidência solar (Ayoade, 1991). Tais características influenciam diretamente parâmetros como pressão, temperatura e densidade do vapor d'água, os quais são os principais responsáveis pelo espalhamento de gases, além de influenciarem na composição e quantidade de aerossóis de conteúdo orgânico (fuligem), provenientes de grande geração e transformação de biomassa, e que agem como partículas de condensação. Outro implicador diz respeito ao comportamento da REM, expresso nas equações anteriores, entre superfície terrestre e sensor, onde a dimensão e distribuição dos alvos fruto dos ângulos de iluminação e visada ( $\theta_{sen+fo}$ ,  $\psi_{sen+fo}$ ) influenciam diretamente tais parâmetros gerando alta similaridade espectral. Essas características também são exacerbadas em ambientes tropicais pela própria quantidade de alvos com alta correlação de características espectrais em todos os comprimentos de onda, como exemplo, tem-se a abundância de vegetação, que age como

*background* e dificulta processos de identificação de fitotipos ou de características pedológicas e litológicas.

Para a correção destes efeitos e conversão dos dados de radiância para reflectância de superfície ( $\rho_{\text{sup}}$ ) são utilizados modelos de simulação das condições atmosféricas, dentre os quais pode-se citar o Lowtran, desenvolvido pela força aérea americana na década de 1960, e seu aprimoramento mais recente o Modtran (*Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model*), ou Modelo de Transferência Radiativa, que também utiliza dados empíricos, e que é aplicado nesta tese através do programa ACORN (*Atmospheric Correction Now*). Considerando que os valores de reflectância de superfície ( $\rho_{\text{sup}}$ ) apresentam relação com os valores de radiância total medida pelo sensor ( $L_{\text{sen}}$ ); reflectância da atmosfera ( $\rho_{\text{atm}}$ ); transmitância ( $\tau$ ), bem como irradiância ( $E$ ), é possível estimar as condições de espalhamento/absorção para correção dos efeitos da atmosfera e conversão para reflectância de superfície, através das seguintes equações (Chandrasekhar, 1960; Green, 1991):

$$L_{\lambda \text{ sen}} = \frac{E_{\lambda \text{ top}} \cdot \rho_{\lambda \text{ atm}}}{\pi} + \frac{E_{\lambda \text{ top}} \cdot \tau_{\lambda \text{ atm}}^{\downarrow} \cdot \rho_{\lambda \text{ sup}} \cdot \tau_{\lambda \text{ atm}}^{\uparrow}}{\pi} \left( W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot sr^{-1} \right)$$

Equação 1.3. Correção atmosférica.

Com a resolução da equação acima extrai-se o valor de  $\rho_{\lambda \text{ sup}}$  em:

$$\rho_{\lambda \text{ sup}} = \left[ \frac{L_{\lambda \text{ sen}} - L_{\lambda \text{ top}} \cdot \rho_{\lambda \text{ atm}} / \pi}{L_{\lambda \text{ top}} \cdot \tau_{\lambda \text{ atm}}^{\downarrow} \cdot \tau_{\lambda \text{ atm}}^{\uparrow} / \pi} \right]$$

Equação 1.4. Conversão de dados para reflectância de superfície.

Onde:

$\lambda$  = Comprimento de onda;

$L_{\lambda sen}$  = Radiância espectral total medida pelo sensor;

$E_{\lambda top}$  = Irradiância solar do topo da atmosfera (*Top of Atmosphere*);

$\tau_{\lambda atm} \downarrow$  = Transmitância descendente da atmosfera;

$\tau_{\lambda atm} \uparrow$  = Transmitância ascendente da atmosfera;

$\rho_{\lambda sup}$  = Reflectância da superfície;

$\rho_{\lambda atm}$  = Reflectância da atmosfera;

Também é possível, no caso do ACORN, acrescentar parâmetros empíricos com o objetivo de refinar a correção, tais como:

- (i) Elevação média da região de estudo;
- (ii) Altitude da plataforma;
- (iii) Data da passagem;
- (iv) Níveis de aerossóis (visibilidade);
- (v) Coordenadas da área;
- (vi) Quantidade de vapor d'água na atmosfera;
- (vii) Modelo atmosférico (tropical).

Uma vantagem em relação ao sensor ASTER trata-se da possibilidade de aquisição dos parâmetros de correção à partir do sensor MODIS, dado que o mesmo possui no seu conjunto de bandas, dados sobre aerossóis e vapor d'água da atmosfera. Essa possibilidade constitui-se, portanto, em um acréscimo ao refinamento destes procedimentos, visto que este sensor imagea nas mesmas condições de luminosidade e altitude que o ASTER, operando no mesmo satélite (TERRA).

Dessa forma, a consideração do comportamento local da atmosfera em ambientes tropicais, constitui-se num desafio e necessidade ao sensoriamento remoto orbital. Em testes comparativos

realizados sobre imagens nível 1B\_AST07, produto esse já corrigido para reflectância por algoritmos e parâmetros *standart* da NASA, e em imagens 1B com correções implementadas com parâmetros locais especialmente para este trabalho, os resultados nas últimas mostraram-se nitidamente superiores, principalmente no que se refere ao conjunto de bandas do SWIR. No caso do TIR os procedimentos de correção e conversão à emissividade são demonstrados em detalhes no capítulo 5.

### **1.6.2. PROCESSAMENTO DIGITAL DE DADOS MULTIESPECTRAIS**

Com base na proposta deste trabalho, buscou-se a aplicação de um refinado conjunto de técnicas e instrumentos em Sensoriamento Remoto, no que tange a sua relação entre resolução espectral e espacial *vs* área de abrangência, assim como a concepção de modelagem e análise de propriedades espectrais de dados. Este conjunto de procedimentos é oriundo de técnicas de processamento hiperespectral desenvolvido originalmente para a utilização em sensores do mesmo tipo, tais como: o AVIRIS/JPL (224 bandas); o Hyperion/NASA GSFC (220 bandas) e o FTESI/AFRL (256 bandas), entre outros (Boardman, 1993; Clark, 1999).

A adaptação deste conjunto de técnicas para o uso em sensores multiespectrais com alta resolução espectral sugere um novo escopo de possibilidades em termos de mapeamento em Sensoriamento Remoto, dada a acessibilidade e melhoria da resolução espectral e espacial destes sensores. A seguir, são descritas as concepções funcionais deste conjunto de procedimentos.

### **1.6.3. ANÁLISE ESPACIAL POR DECORRELAÇÃO ESTATÍSTICA VS ANÁLISE DE MISTURA ESPECTRAL E PROCESSAMENTO HIPERESPECTRAL: PROPRIEDADES ESPECTRAIS E ESPACIAIS DE DADOS**

O conjunto de técnicas de sensoriamento remoto hoje existente, em sua grande parte, baseia-se na abordagem aritmética de componentes estatísticos, os quais compõem análises de cunho supervisionado e não supervisionado. Estes métodos consideram a análise conjunta de um grupo de pixels, baseado em sua co-relação areal em relação à predominância de uma feição em seu recorte espacial (resolução espacial), gerando classes a partir da perspectiva de detecções baseadas na resolução espacial do dado e sua distribuição relativa (classificação). Pertencentes a esse arcabouço, destacam-se como os principais conjuntos de técnicas de análise *espacial ou qualitativa (discriminação entre alvos)* de dados, a matemática de Bandas (razão, subtração) e Análises por Principais Componentes (APC). Dessa maneira, a abordagem espacial fundamenta-

se, na busca de padrões de repetição/ocorrência/frequência, mediante a utilização de princípios estatísticos e sua capacidade de decorrelação de feições na superfície terrestre (Smith *et al.*, 1990)

Outro conjunto de procedimentos em sensoriamento remoto diz respeito a abordagem por análise *espectral ou quantitativa (discriminação e quantificação dos elementos componentes do alvo)*, na qual o pixel torna-se um elemento isolado na medida direta de suas propriedades de interação energia-matéria, expresso nas suas características espectrais. Os métodos de classificação espectral são aplicados mediante um conhecimento prévio dos alvos, implicando uma classificação supervisionada baseada na amostragem e análise de assinaturas espectrais e sua comparação com pixels da imagem, na busca de ocorrência e quantidade. Tais assinaturas podem ser obtidas tanto pela coleta de membros extremos (*endmembers*) na própria imagem, com o auxílio de alvos de controle, em bibliotecas espectrais medidas em laboratórios, como em campo, com o uso de espectrorradiômetro. A classificação por análise espectral permite discretizar cada pixel por sua correlação com o material que o compõe (espectro) de maneira mais direta, estabelecendo localização, e por vezes, quantidade em termos de composição estimada em um mesmo pixel (sub-pixel), o que a credencia como uma poderosa abordagem de feições altamente correlacionadas ou raras.

Processamentos de cunho espectral são amplamente utilizados para o tratamento de dados hiperespectrais, com o intuito de reduzir a redundância estatística em operações com grandes quantidades de dados, no que tange ao aumento do número de bandas do sensor, refinando a resposta e aproximando a classificação de uma abordagem qualitativa. (Bateson & Curtiss, 1993; Boardman & Kruse, 1994; Richardson *et al.*, 1994; Kruse, 1999). Baseando-se em tais premissas, proceder de forma conjunta e integrada tornou-se uma opção de refinamento e melhoria de resultados, adotada na proposta de Boardman e Kruse (1994) para processamento de dados hiperespectrais. Esse conjunto de procedimentos utiliza técnicas de análise espacial nas etapas iniciais como forma de redução da dimensionalidade de dados, correção de redundâncias e identificação de membros extremos, sendo que o conjunto de dados gerados a partir das mesmas são refinados e classificados por métodos de análise espectral.

#### **1.6.4. ANÁLISE DE MISTURA ESPECTRAL**

As técnicas de classificação espectral possuem como base conceitual a análise comparativa entre assinaturas espectrais de referência (membros extremos) e alvos de controle da imagem. A

modelagem e a análise comparativa entre tais dados servem de parâmetro para a obtenção não apenas da localização (ocorrência) de alvos correlatos à análise no restante da imagem, mas também do mapeamento de abundância (quantidade) e distribuição do material de composição do alvo mapeado. O conceito de análise de mistura espectral entende os valores inerentes a um pixel como resultantes da mistura de diferentes materiais da superfície, sendo que a correspondência entre níveis de reflectância e fração de área ocupada pelo material podem ser estimados por uma relação algébrica linear. Portanto, ao aplicar-se algoritmos SMA pode-se à partir dos valores da soma da reflectância de cada material no pixel, multiplicados por sua fração de área na imagem, estimar a fração de área ocupada por esse material dentro de cada pixel (abundância) (Adams, *et al.*, 1986; Gillespie, *et al.*, 1990; Small, 2004). De maneira geral essa relação pode ser expressa na seguinte equação (Dennison & Roberts, 2003).

$$\rho'_\lambda = \sum_{i=1}^N f_i * p_{i\lambda} + E_\lambda$$

Onde:

$\rho'_\lambda$  = Reflectância de um pixel

$p_{i\lambda}$  = Reflectância de um membro extremo (*endmember*)  $i$  para uma banda específica ( $\lambda$ )

$f_i$  = Fração do membro extremo

$N$  = Número de membros extremos

$E_\lambda$  = Erro residual

Equação 1.5. Análise de mistura espectral.

Dependendo da abordagem o modelo pode ser validado tanto por sua componente residual ( $E_\lambda$ ), quanto pela aplicação do erro médio quadrático (*Root Mean Square Error* – RMSE), onde  $M$  é igual ao número de bandas.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{\lambda=1}^M (E_\lambda)^2}{M}}$$

Equação 1.6. Erro médio quadrático.

As técnicas SMA podem ser divididas em detecção por *pixel total* e em escala de *sub-pixel*. A detecção por pixel total restringe-se ao mapeamento da distribuição do material em sua predominância percentual no pixel; caso contrário, não será detectado. Têm-se como exemplos desse tipo de classificação as técnicas: *Binary Encoding* (Goetz *et al.*, 1985); Tricorder/Tetracorder e sua variação *Spectral Feature Fitting - SFF* (Clark & Swayze, 1995; Swayze & Clark, 1995) e o *Spectral Angle Mapper - SAM* (Kruse *et al.*, 1993).

No que se refere ao mapeamento em escala de sub-pixel, a feição é mapeada não por sua predominância no pixel, mas, sim, por sua ocorrência, mesmo que mínima, neste recorte espacial. Estabelece-se, portanto, uma estimativa relativa de abundância, ocorrência e distribuição do material componente do alvo, delineando uma mistura de materiais dentro de cada pixel, expressa em seu comportamento espectral. Como exemplos de técnicas associadas a esse conceito, têm-se: a *Linear Spectral Unimixing – LSU* (Carvalho Júnior *et al.*, 2003; Smith & Adams, 1985; Mustard, 1993; Roberts *et al.*, 1993); *Matched Filtering* e seu refinamento através do *Mixture Tuned Matched Filtering - MTMF* (Chen & Reed, 1987; Boardman *et al.*, 1995; Harsanyi & Chang, 1994). Dentre os métodos citados anteriormente, o presente trabalho utiliza o SAM e o MTMF, adaptando-se-os para a classificação de dados multiespectrais, que serão descritos e detalhados em cada capítulo, segundo a sua aplicação em diferentes objetivos de mapeamento.

#### **1.6.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO**

Algumas vantagens podem ser apontadas no que se refere à aplicação da análise espectral em conjunto com técnicas de processamento hiperespectral. Uma delas diz respeito ao refinamento da precisão da decorrelação de feições na imagem, obtendo resultados em menor resolução espacial. Outra vantagem diz respeito à maior aproximação entre o real comportamento espectral do alvo e o obtido na imagem, mediante a utilização de assinaturas espectrais e o refinamento da correção atmosférica, o que aumenta a possibilidade da tão requerida capacidade de reprodução isonômica de resultados em conjuntos de dados de outras áreas (cenas).

#### **1.7. ESTRUTURA DA TESE**

Essa tese de doutorado está estruturada em quatro capítulos auto-consistentes, três dos quais tentativamente organizados na forma de artigos, os quais discutem diferentes aspectos e características de sistemas ambientais tropicais, por meio do seu mapeamento e análise utilizando

sensoriamento remoto e análise sistêmica. Considerando-se os objetivos do trabalho, detalhados anteriormente, bem como os métodos adotados no estudo, certos temas permeiam todos os capítulos. Dessa forma, antecipa-se que há repetições que não puderam ser evitadas dentro da estrutura pretendida para a tese. Em geral, esse tipo de situação restringe-se apenas ao uso de materiais e alguns métodos, visto que a utilização dos mesmos, objetiva sua avaliação por meio da construção de resultados inéditos em cada capítulo. Com o intuito de tornar a leitura desta tese a mais prática e acessível possível, resguardou-se sua objetividade entorno de um contexto teórico-aplicado, bem como da proposta de análise e seus resultados segundo os objetivos já delineados anteriormente. Porém, optou-se em manter um breve levantamento histórico acerca da evolução do pensamento sistêmico na forma de anexo, voltado aos leitores que queiram aprofundar-se nesses aspectos. O conteúdo deste anexo perfaz uma compilação de artigos publicados em periódico, e em anais de congresso, os quais foram submetidos durante o período de doutoramento.

Neste capítulo introdutório são descritos os objetivos, a hipótese da tese, os métodos de trabalho, no que concerne ao uso de algoritmos de classificação hiperespectral, bem como as características da base de dados utilizada, e os procedimentos para sua validação. No capítulo 2, fundamenta-se o arcabouço teórico conceitual da tese, com base nos princípios da análise de sistemas complexos, e sua aplicação no estado da arte do sensoriamento remoto, por meio da utilização de dados multiespectrais, e sua relação com parâmetros de mapeamento em sistemas ambientais.

Nos três capítulos seguintes, a proposta de análise é desenvolvida de forma aplicada, em diferentes áreas de estudo, localizadas na Região de Itirapina – SP, Região de Assis – SP e Região de São Francisco de Assis – RS. Cada uma dessas regiões apresenta situações particulares inerentes a transformações em sistemas ambientais tropicais. O capítulo 2 enfoca a detecção de fragmentos vegetacionais, como forma de se estabelecer processos de transição entre diferentes estados de equilíbrio de um sistema ambiental. O terceiro capítulo centra-se num outro importante elemento de sistemas ambientais, especificamente o mapeamento de componentes minerais de diferentes tipos de solos tropicais. Finalmente, no quarto capítulo são analisados processos de degradação de terras referentes a arenização. Dados detalhados sobre essas áreas, fundamentação teórica sobre o tema, bem como mapas de localização encontram-se nos seus respectivos capítulos, resumidos à seguir.

## **1.8. DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS REALIZADOS POR CAPÍTULO**

### **1.8.1. CAPÍTULO 2**

Atualmente o termo sistemas é utilizado por diversos campos da ciência, indo muito além de áreas responsáveis por sua gênese como a Física e a Química. Pode-se encontrar trabalhos relacionados ao conceito de sistemas, ou sob outros termos como ciência da complexidade e ciência do caos, em aplicações muito distintas, como a psicopedagogia e a administração de empresas, por exemplo. Esse fato corresponde à plena expectativa de pesquisadores que sempre almejavam encontrar nos sistemas, um modelo que abrangesse diversos campos do conhecimento. Porém, grande parte desses trabalhos trata repetidamente da discussão de conceitos subjacentes, tentando sua adaptação para aplicações específicas, as quais muitas vezes não ultrapassam o campo teórico. O risco de abordagens deste tipo é a própria banalização do termo e dos conceitos a ele relacionados. Deve-se lembrar que a evolução da perspectiva sistêmica é fruto de trabalhos aplicados, com rígido controle de resultados e fundamentação físico-matemática. Foi a observação, mensuração e análise de fenômenos naturais aparentemente simples como o gotejar de uma torneira, o melindrar de um fluido, ou complexos como a formação de uma tempestade, que deram a esses conceitos sua relevância na tentativa de explicações não encontradas na ciência cartesiana. As ditas ciências da terra e seu objeto ambiental possuem uma relação muito próxima à análise de sistemas, visto que tratam basicamente de conjuntos de elementos em interação, os quais transcendem escalas por estarem num meio não controlado. Para a melhor compreensão deste objeto, a análise sistêmica deve ir além da discussão pura que em outras épocas tanto enriqueceu o tema, porém, hoje beiram a retórica e o casuísmo teórico por sua pura repetição. Deve-se reiterar que antes da pesquisa ambiental dita sistêmica, que per si é fruto de um árduo esforço transdisciplinar, termo esse também tão batido, o conhecimento sobre o tema, sejam solos, minerais ou vegetação, deve ser obtido de maneira tradicional, ou seja, por meio de levantamento de dados, controle de resultados e aprofundamento das características intrínsecas aos componentes de um sistema. Apenas dessa forma é possível relacionar esse conhecimento espacial e temporalmente. Neste sentido, dados e imagens de satélite possuem um caráter de unicidade espacial, o qual é fundamental na compreensão de estruturas e processos inerentes aos sistemas ambientais, e que atualmente por meio de novos sensores e técnicas de processamento digital, assumem cada vez mais um caráter inter-escalar, sendo capazes de considerar tanto propriedades físicas e químicas de cada elemento (micro), quanto sua interação e distribuição

espacial (macro). Este capítulo tem por objetivo a fundamentação epistemológica da tese no que tange a formulação de uma proposta do uso do conceito de sistemas, aplicado a dados multiespectrais. Para tanto discute-se conceitos como escala, equilíbrio dinâmico e estabilidade, com vias a sua aplicação em estudos ambientais utilizando o ferramental de sensores óticos orbitais. A contribuição deste capítulo está na compreensão do papel dos elementos dentro de um sistema e seu caráter espacial, no que se refere a sua representação numa matriz de pixels, próprias de representações espaciais bidimensionais e imagens de satélite. Essa fundamentação permeia todos os outros capítulos, por meio da aplicação prática dos conceitos discutidos.

### **1.8.2. CAPÍTULO 3**

Diferentemente de grandes ecossistemas preservados, os fragmentos remanescentes em regiões fortemente antropizadas constituem-se em pequenas áreas-testemunho envoltas por áreas mais amplas submetidas a acelerados processos de transformação. O mapeamento de zonas de transição entre esses fragmentos pode fornecer indicadores para o entendimento da capacidade de regeneração, estabilização ou completa degradação desses ecossistemas. Esse tipo de mapeamento constitui-se num desafio ao sensoriamento remoto em regiões tropicais, dada à dimensão dos alvos, a diversidade de estrutura de dossel, a presença de solos diversos e com elevado nível de umidade, dentre outras características típicas. Objetivando fornecer subsídios para a análise espacial desses processos, este estudo utiliza dados do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e produtos derivados de técnicas de classificação hiperespectral adaptadas para o mapeamento de fragmentos de ecossistemas em ambientes tropicais. Foram mapeados fragmentos de savana, floresta estacional e cultivos na região de Itirapina, interior do Estado de São Paulo, Brasil. Neste estudo foram consideradas combinações das bandas de 1 a 9 do sensor, cobrindo as regiões do visível (0.52 e 0.69  $\mu\text{m}$ ), infravermelho próximo (0.78 a 0.86  $\mu\text{m}$ ) e infravermelho de ondas curtas (1.40 a 2.43  $\mu\text{m}$ ), tendo como base membros extremos (*endmembers*) de vegetação e solo. O conjunto de resoluções espacial de 15 m (reamostrados no SWIR a partir de 30 m), e espectral do ASTER (9 bandas-VNIR/SWIR), bem como o uso combinado de técnicas hiperespectrais para a extração de informações relativas à cobertura, mostraram-se extremamente satisfatórios na obtenção de resultados numa escala de detalhe na área de estudo, com ênfase na detecção de componentes bioquímicos de vegetação e minerais de solo na região do SWIR, que agiram como importantes

discriminadores entre os diferentes tipos de cobertura da terra. Entre os principais resultados atingidos destacam-se: (i) capacidade de detecção de fragmentos vegetacionais de dimensões reduzidas a partir da distinção entre diferentes fitofisionomias e uso antrópico; (ii) distinção entre solos com altos teores de argila e aqueles com altos teores de areia, cujos componentes definem propriedades granulométricas, que afetam suas capacidades de drenagem, presença de nutrientes e erodibilidade, dentre outros comportamentos; (iii) mapeamento de zonas de transição entre esses respectivos tipos de superfícies, as quais se constituem em indícios de mudanças no arranjo geral da organização e funcionalidade dos fragmentos estudados.

### **1.8.3. CAPÍTULO 4**

O diagnóstico de características de solos constitui-se em importante subsídio para a compreensão de transformações em sistemas ambientais, visto que sua composição física, e química expressa transformações em diferentes escalas, sejam elas derivadas do uso da terra, processos pedogenéticos ou mudanças climáticas. Uma alternativa eficiente para o mapeamento de solos é uma técnica conhecida como espectroscopia de reflectância, a qual compreende a análise de feições espectrais de absorção entre o visível (*visible* - VIS) e o infravermelho de ondas curtas (*Short Wave Infrared* - SWIR) (1.3-2.5  $\mu\text{m}$ ). Esse tipo de análise, aliada ao uso de sensores óticos orbitais (e.g. TM, ETM, SPOT), tem obtido importantes resultados no mapeamento de processos de transformação em sistemas ambientais, particularmente em climas áridos e semi-áridos em regiões extra-tropicais, visto que tais instrumentos possuem um caráter sinótico de cobertura de grandes áreas. No caso de ambientes tropicais úmidos, a aplicação deste tipo de abordagem é dificultada em função de fatores locais, tais como elevados níveis de aerossóis na atmosfera, pouca exposição de regolito, umidade do solo e grande presença de vegetação. Dessa forma, objetivando contribuir para este tipo de mapeamento em ambientes tropicais, este estudo utiliza dados do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) aliado à técnicas de espectroscopia de reflectância para o mapeamento de componentes minerais em solos na região de Assis – SP. Para tanto, foram realizadas 42 coletas de amostras na profundidade 0-20 cm, considerando-se que essa camada superficial apresenta maior relação com o conjunto da radiância captada pelo sensor. Essas amostras foram mensuradas por um espectrorradiômetro e os espectros derivados foram interpretados visando à caracterização espectro-mineralógica dos solos. Essa interpretação foi

suportada por análises de difratometria de Raio-X em amostras representativas equivalentes. O conjunto de assinaturas espectrais foi re-amostrado para as bandas do sensor ASTER no VNIR (AST1-4: 0.52-0.86  $\mu\text{m}$ ) e SWIR (AST5-9: 1.60 a 2.43  $\mu\text{m}$ ) e validada por meio da comparação entre os dados espectrais de campo e valores de reflectância aparente das imagens ASTER. A concordância entre as assinaturas medidas no campo e aquelas derivadas dos pixels da imagem ASTER foi satisfatória, com valores de  $R^2$  variando entre 0,6493 e 0,7886. Dessa forma, foi possível a reprodução das feições diagnósticas de minerais típicos de solos tropicais. Esse conjunto de assinaturas foi utilizado como membros extremos em rotinas de classificação hiperespectral adaptada para dados ASTER (*Mixture Tuned Matched Filtering*). Como resultado, foi possível a identificação e mapeamento remoto dos minerais (i) caulinita, (ii) montmorilonita e (iii) gibbsita, bem como o estabelecimento (iv) da abundância relativa do íon Fe nos solos, além (v) da caracterização de solos arenosos.

#### **1.8.4. CAPÍTULO 5**

A intensa retirada de cobertura vegetal natural e o contínuo uso e ocupação de extensas áreas para atividades humanas vêm gerando um cenário preocupante sobre as modificações ambientais. Um dos indicadores dessas modificações encontra-se na deflagração de processos de degradação de terras em diferentes regiões do planeta, associados, por vezes, à processos de desertificação. No caso do Brasil, processos semelhantes têm ocorrido, a exemplo da região Sul, sendo denominado “arenização”. O conceito de arenização desvincula a gênese desse processo de fatores climáticos, associando-o à fragilidade do solo. Baseado nessa premissa, o principal componente neste tipo de fenômeno diz respeito a características pedológicas associados à vegetação, notadamente em áreas de solos arenosos, mais suscetíveis a processos erosivos. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi o mapeamento da abundância e distribuição de certos minerais nos solos em locais de arenização, na região de São Francisco de Assis - RS, utilizando dados de sensoriamento remoto, particularmente no intervalo espectral do infravermelho termal (*Thermal Infrared-TIR*) (3 $\mu\text{m}$  – 1 mm). Essa faixa do espectro, principalmente em torno de 10 $\mu\text{m}$ , apresenta as principais feições diagnósticas dos silicatos (banda *reststrahlen*), entre os quais o quartzo. Nesse estudo, foram utilizados dados termais do sensor ASTER, nas bandas AST10 a AST14 (8-12  $\mu\text{m}$ ), as quais tiveram seus efeitos para atmosfera corrigidos, sendo convertidas posteriormente para emissividade por meio da aplicação da lei de Kirchhoff ( $\epsilon = 1 -$

R) e classificados seguindo os seguintes procedimentos: (i) realce por decorrelação, (ii) razão de bandas e (iii) classificação hiperespectral. Os resultados foram extremamente satisfatórios, possibilitando o mapeamento de áreas com alto teor de sílica e estabelecendo sua relação de abundância e distribuição em relação a outros minerais como os argilominerais e carbonatos. A determinação dos níveis de mistura desses componentes minerais é de fundamental importância para a estimativa de estabilidade e erodibilidade dos solos, principalmente no que tange ao monitoramento de áreas sujeitas a processos de arenização. No Brasil, o uso de sensores multiespectrais termais em nível orbital ainda é extremamente restrito, o que torna a exploração e avaliação do TIR de fundamental importância. Neste sentido, os diferentes processamentos empregados aos dados temais do sensor ASTER neste trabalho atestam sua qualidade e precisão na reprodução das características de diferentes minerais, com assinaturas diagnósticas nesta região do espectro.

#### **1.9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Abrams, M., & Hook, S. J. (2002). *Aster User Handbook: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*. USA: NASA/Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2, 135p.
- Adams, J. B.; Smith, M. O., & Johnson, P. E. (1986). Spectral mixture modeling a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander I site. *J. Geophys. Res.*, 91, 8098-8112.
- Almeida, T. I. R., & Souza Filho, C. R. (2006). ASTER and Landsat ETM+ Images Applied to Sugarcane Yield Forecast. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 4057-4069.
- Analytical Spectral Devices. (1999). *FieldSpec FR – user’s guide*, 89 p.
- Ayoade, J. O. (1991). *Introdução à climatologia para os trópicos*. São Paulo: Bertrand Brasil, 332 p.
- Bateson, C. A.; Curtiss, B. (1993). A tool for manual endmember selection and spectral unmixing. In: *Annual JPL Airborne Geosciences Workshop, 4, Pasadena, CA, Summaries. JPL Publ.*, 93-26, p. 3-6.
- Boardman, J. W. (1993). Automated spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts: In: *Annual JPL Airborne Geosciences Workshop, 4, Pasadena, CA. Summaries. JPL Publ.* 93-26, 11-14.

- Boardman, J. W., & Kruse, F. A. (1994). Automated spectral analysis: A geologic example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada. In: ERIM Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 10. *Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI. Proceedings*, 1, 407-418.
- Boardman, J. W., Kruse, F. A., & Green, R. O. (1995). Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. In: Summaries, Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop, *JPL Publication 95-1*, 1, 23-26.
- Carvalho Júnior, O. A.; Carvalho, A. P. F.; Guimarães, R. F.; Meneses, P. R.; Shimabukuro, Y. E. (2003). *Mistura Espectral: (I) Detecção dos membros finais utilizando a geometria do simplex*. Espaço e Geografia, v. 6(1), 151:176.
- Chandrasekhar, S. (1960). *Radiative Transfer*. Dover Publications, New York, 393p.
- Clark, R. N.; Swayze, G. A. (1995). Mapping minerals, amorphous materials, environmental materials, vegetation, water, ice, and snow, and other materials: The USGS Tricorder Algorithm. In *Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication 95-1*, 39 – 40.
- Chen, J. Y., & Reed, I. S. (1987). A detection algorithm for optical targets in clutter. *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, v. AES-23, n. 1.
- Dennison, P. E., & Roberts, D. A. Endmember selection for multiple endmember spectral mixture analysis using endmember average RMSE (2003). *Remote Sensing of Environment*, 87, 123-135.
- di Castri, F.; Hansen, A. J. & Holland, M. M. (1988). A new look at ecotones: emerging international projects on landscape boundaries. *Biology International*, Special Issue 17.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)/Centro nacional de pesquisa de solos – Rio de Janeiro (1997). *Manual de métodos de análise de solo*. 2 ed, 212 p.
- Gao, B. C.; Hiedebrecht, K. B., & Goetz, A. F. H. (1993). Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 44, 165-178.
- Gillespie, A. R.; Smith, M. O.; Adams, J. B.; Willis, S. C.; Fischer, A. F. III, & Sabol, D. E. (1990). Interpretation of residual images: Spectral mixture analysis of AVIRIS images, Owens Valley, California. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop*. Pasadena, CA, NASA Jet Propulsion Laboratory.

- Goetz, A. F. H., Vane, G., Solomon, J. E., & Rock, B. N. (1985.). Imaging spectrometry for earth remote sensing. *Science*, 228, 1147 – 1153.
- Green, R. O. (1991). Retrieval of reflectance from AVIRIS-measured radiance using a radiative transfer code. In: Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). In: Third Workshop, JPL public. 91-28, Pasadena, May 1991. *Proceedings*, 1991, 200-210.
- Green, R. O.; Conel, J. E., & Roberts, D. A. (1993). Estimation of aerosol optical Depth, and additional atmospheric parameters for the calculation of apparent reflectance from radiance measured by the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer. In: *Fourth Annual Airborne Geoscience Workshop*, JPL public. 93-26, *Proceedings*, 83-86.
- Harsanyi, J. C., & Chang, C. (1994). Hyperspectral image classification and dimensionality reduction: an orthogonal subspace projection approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32, 779-785.
- Hirano, A.; Welch, R., & Lang, H.. (2003). Mapping from Aster stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 57, 356-370.
- Hunt, G. R. & Ashley R. P. (1979). Spectra of altered rocks in the visible and near-infrared. *Economic Geology*, 74, 1613-1629.
- Kassas, M. (1995). Desertification: A general review. *J. Arid Enviroment*, 30, 115-128.
- Kruse, F. A., Lefkof, A. B., Boardman, J. W., Heiedbrechet, K. B.; Shapiro, A.T., Barloon, P. J., & Goetz, A. F. H. (1993). The spectral image processing system (SIPS) – Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing Environment*, v. 44, 145-163.
- Kruse, F. A. (1999). Mapping hot spring deposits with AVIRIS at Steamboat Springs, Nevada. In: *JPL Airborne Earth Science Workshop*, 8, Pasadena, CA. Summaries, *JPL Publ.* 99-17. 1, 239-245.
- Lima, V. S. (2003). *Assinaturas espectrais de gossans associados à mineralizações de Pb-Zn-Ba na bacia de Irecê (BA): um estudo baseado em dados dos sensores TM e ASTER*. Dissertação de mestrado (Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 154 p.
- Meyer, W. B., & Turner II, B. L. (1994). *Changes in land use and land cover: A global perspective*. Cambridge University Press, Cambridge.

- Mustard, J. F. (1993). Relationships of soil, grass, and bedrock over the Kaweah Serpentine Melange through spectral mixture analysis of AVIRIS data. *Remote Sensing Environment*, 44, 293-308.
- Reid, P. C.; Edwards, M.; Hunt, H.G., & Warner, A. J. (1998). Phytoplankton change in the North Atlantic. *Nature*, 391, 546-546.
- Roberts, D. A.; Green, R. O.; Sabol, D. E., & Adams, J. B. (1993). Temporal changes I endmember abundances, liquid water and water vapor over vegetation at Jasper Ridge. In: Annual JPL Geoscience Workshop, 4, Pasadena, CA. Proceedings, *JPL Publ.* 93-26, 153-156.
- Rowan, L. C., & MARS, J. C. (2003). Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 350-366.
- Richardson, L. L.; Buison, D.; Luci, C. J., & Ambrosia, V. (1994). The detection of algal photosynthetic accessory pigments using Airborne Visible-Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) spectral data. *Marine Technology Society Journal*, 28, 10-21.
- Smith, M. O., & Adams, J. B. (1985). Interpretation of AIS images of Cuprite, Nevada, using constrains of spectral mixtures. In: Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop. Pasadena, CA. *Proceedings, JPL Publ.*, 85-41, 62-68.
- Smith, M. O.; Ustin, S. L.; Adams, J. B., & Gillespie, A. R. (1990). Vegetation in Deserts: I. A Regional Measure of abundance from Multispectral Images. *Remote Sensing of Environment*, 31, 1-26.
- Souza Filho, C. R. (2003). Aster à vista. *Infogeo*, 29, 62-64.
- Thomas, K. (2001). *O Homem e o mundo natural*. São Paulo: Companhia das Letras, 454 p.
- Tucker, C. J. & Nicholson, S. E. (1999). Variations in the size of the Sahara Desert from 1980 to 1997. *Ambio*, 28, 587-591.
- Small, C. (2004). The Landsat ETM<sup>+</sup> spectral mixing space. *Remote Sensing of Environment*. 93, 1-17.
- Steinmayer, M. (2003). Extração de Modelos Digitais de Terreno com o sensor Aster. *Infogeo*, 38, 38-39.
- Swayze, G. A., & Clark, R. N. (1995). Spectral identification of minerals using imaging spectrometry data: evaluating the effects of signal to noise and spectral resolution using the

- Tricorder Algorithm. In: *Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*, JPL Publication 95-1, 157 – 158.
- Tilman, D., & Lehman, C. (2001). Human-caused environmental change: Impacts on plant diversity and evolution. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. Colloquium paper, 98 (10), 5433-5440.
- Vicente, L. E.; Souza Filho, C. R., & Perez Filho, A. (2002). Um estudo sistêmico aplicado a gestão de recursos hídricos: proposta de análise através de modelos conceituais e sensores orbitais. In: *Simpósio Nacional de Geomorfologia IV*, São Luís do Maranhão. Anais do IV Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2002, v. II – CD ROM.
- Vicente, L. E.; Souza Filho, C. R., & Perez Filho, A. (2006). Elaboração de Modelos Digitais de Elevação para Estudos Geomorfológicos Através de Sensores Orbitais: Validação de Dados Altimétricos Aster. In: *Simpósio Nacional de Geomorfologia VI - Regional Conference On Geomorfology I*, Goiânia. Anais do VI Simpósio Nacional de Geomorfologia - Regional Conference On Geomorfology, 2006. v. II – CD ROM.
- Vitousek, P. M.; Mooney, H. A. & Melillo, J. M. (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277, 494-499.
- Wackernagel, M.; Schulz N. B; Deumling, D.; Linares, C. A.; Jenkins, M.; Kapos, V.; Monfreda, C.; Loh, J.; Myers, N.; Norgaard, R. & Randers, J. (2002). Tracking the ecological overshoot of the human economy. [www.pnas.org/cgi/doi/10.073/pnas.142033699](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.073/pnas.142033699), 99(14).
- Zavaleta, E. S.; Shaw, M. R.; Chiariello, N. R.; Mooney, H. A., & Field, C. B. (2003). Additive effects of simulated climate change, elevated CO<sub>2</sub>, and nitrogen deposition on grassland diversity. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 100 (13), 7650-7654.
- Zullo, J. J. (1994). Correção atmosférica de imagens de satélites e aplicações. Tese de doutorado – IEEC-UNICAMP, Campinas – SP, 191 p.

## *CAPÍTULO 2*

### **2. METODOLOGIA: PROPOSTA DE ANÁLISE SISTÊMICA APLICADA A DADOS MULTIESPECTRAIS PARA A CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMAS AMBIENTAIS**

#### **2.1 REPRESENTAÇÃO ESPACIAL E MAPEAMENTO DE SISTEMAS AMBIENTAIS**

O uso do termo sistemas ambientais remete a diferentes variações do conceito de sistemas aplicadas ao estudo do meio ambiente, tais como: ecossistemas e geossistemas (Tansley, 1935; Sothava, 1972; Bertrand, 1972). Ambas as definições têm em comum o preceito básico de sistemas, como sendo um conjunto de elementos em interação (Bertalanffy, 1973). Porém, mais especificamente possuem características espaciais enquanto deflagradoras de sua funcionalidade, processos e transformações. Dessa forma a idéia de sistemas torna-se um modelo prático de análise no que se refere a busca da compreensão do todo pela interação de suas partes, e não pela redução das mesmas como preconizava a ciência em bases cartesianas (Morin, 2002). Para estudos ambientais acima de tudo a interação de elementos e não o elemento em si consiste no fundamento da análise.

A problemática sobre modelos de mapeamento de cunho sistêmico considerando o espaço/tempo, foi abordada principalmente a partir da década de 1950, por autores como: Berry (1964); Tobler (1966); King (1969); Sack (1974); Chorley e Hagget (1975), entre outros. Essa questão ganha uma nova conotação instrumental na medida em que sua implementação, a partir da década de 1960, incorporada a estruturas computacionais, resulta em algoritmos e aplicativos avançados.

É neste ínterim, que surge enquanto resultado desse arcabouço técnico científico, o SIG (Sistemas de Informações Geográficas), que constitui o exemplo mais notório da aplicação conjunta de tais modelos, manifestando-se em aplicações práticas, tais como funções de busca ou *query* (consulta de um elemento em vários lugares ou vice-versa, mediante critérios pré-estabelecidos), ou a consulta por *overlay* (sobreposição de mapas) (Burrough, 1981).

O poder de armazenamento, compilação e análise de dados, aliadas a sua flexibilidade operacional resultou em uma ferramenta amplamente aplicada nos atuais estudos do meio ambiente. Porém, a sua praticidade operacional, muitas vezes, alija seus usuários de concepções mais aprofundadas sobre sua estrutura conceitual, que, por sua vez, guarda uma relação direta com um modelo geral de leitura da realidade.

Peuquet (1994) rediscute esses modelos conceituais, propondo uma *estrutura integrada de representação*, com inserção da perspectiva temporal. Uma das relevantes críticas de Peuquet nos remete ao que ela chama de *cartographic representational paradigm*, que se constitui na representação baseada na combinação de elementos geométricos, como: linha, ponto, semi-reta e polígono, usualmente conhecida como *estrutura vetorial*.

Na medida que entende-se a estrutura vetorial como uma derivação direta da geometria clássica, percebe-se que a fluidez da combinação espaço/tempo torna-se limitada. Usualmente tem-se na álgebra booleana através de operadores como: *and*, *or*, *not*, por exemplo, o modelo mais aplicado, resultando numa modelagem estática e estanque dos fenômenos físicos. O conceito fundamental que permeia essa representação é a do espaço discreto e descontínuo (Figura 2.1).

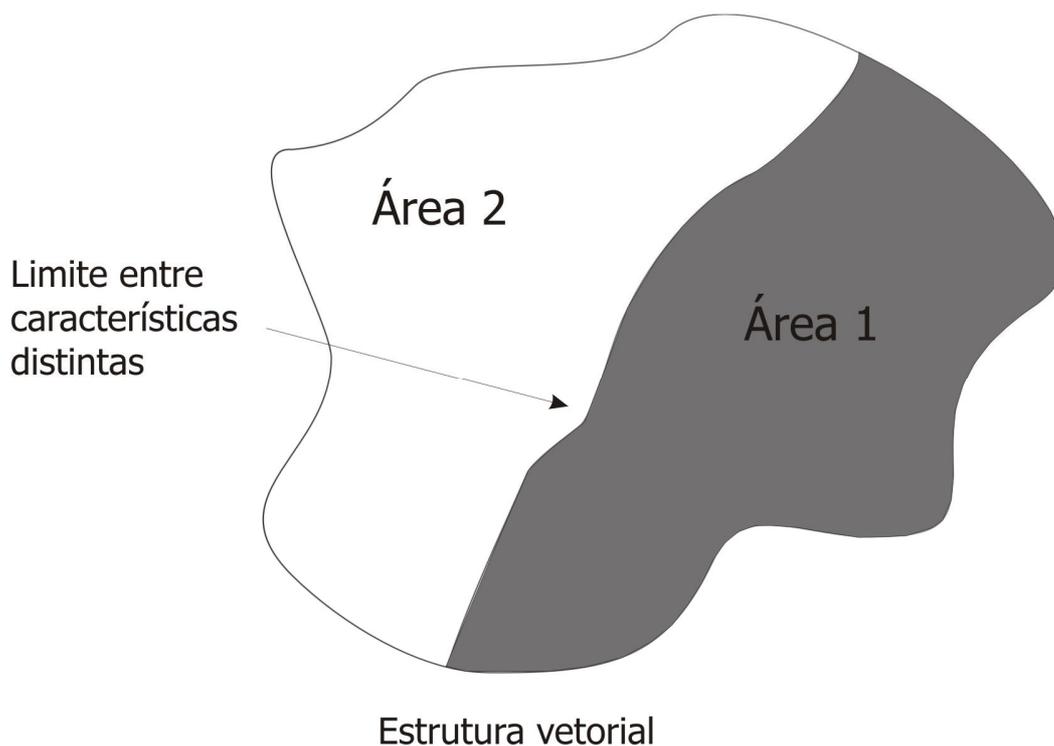


Figura 2.1. Modelo vetorial de representação espacial. A figura ilustra a discretização locacional baseada da distinção de atributos através de representações de formas euclidianas, no caso polígonos que representam áreas distintas. Esse tipo de representação fundamenta-se na álgebra booleana e oferece limitações para o mapeamento de processos de transição, visto que os limites entre elementos diferentes são excessivamente arbitrários.

Uma primeira contribuição da idéia de sistemas nesse campo surge através do delineamento funcional e hierárquico dos processos espaço/tempo envolvidos no fenômeno, e não apenas pelas características intrínsecas e momentâneas dos mesmos. Berry (1964) enfatiza tal influência referindo-se a sua proposta como *systematic geography*, fazendo menção à influência do modelo sistêmico proposto por Bertalanffy (apud Berry, 1964) anos antes.

*“If the object of systematic geography is to find those fundamental patterns and associations characterizing a limited range of functionally interrelated variables over a wide range of places, the object of regional geography is to find the essential characteristics of a particular region – its “regional character” based upon the localized associations of variables in place – by examine a wide range of variables over a limited number places.” (Berry, 1964)*

Berry (1964) propõe um modelo de análise espacial baseado numa matriz geográfica, correlacionando variáveis, lugares (espaço) e tempo, fornecendo um modelo integrado de análise e representação espacial mais apto à abordagem de processos, o qual encontra-se presente até hoje em forma de algoritmos computacionais de representação espacial. Porém, em suas variações e usos ainda encontra-se subjacente a influência direta da ciência clássica e da idéia, não casual, de estaticidade dos fenômenos, e conseqüentemente de suas representações. Parkers e Thrift (apud Langran, 1992), enfatizam esse aspecto ao reiterar que *Geography differs from geometry because in geography, space is indivisibly coupled with time*.

Verifica-se assim que um dos paradigmas universais da ciência atual encontra-se inserido nestas estruturas de representação, enquanto modelo de leitura da realidade, sejam elas conceituais ou aplicadas. O fundamento dessa linha de pensamento baseia-se na diferenciação areal proposta por Hartshorne (apud Sack, 1974) na década de 1930, derivando-se numa análise corológica (Sack, 1974), com suporte idiográfico de representação e pautada na idéia de *objeto*. O espaço é segmentado segundo uma descritiva dos elementos contidos no mesmo, gerando limites pré-definidos, para posteriormente ser comparado com outras áreas (objetos/regiões).

Pode-se identificar tal acepção da representação do meio através de recortes analíticos em bases sistêmicas que obedecem a uma escala quase que didática: como biosfera, bioma, biota

(Socthava, 1972; Bertrand, 1972; Tansley, 1935). Tais modelos assumem uma perspectiva de classificação e inventário taxonômico, com base nas características intrínsecas de cada formação natural, delineando um quadro morfogenético passível de ser discretizado no espaço através de limites baseados na homogeneidade, densidade e extensão dessas características, as quais obedecem a uma lógica fundamentada na geometria euclidiana e na lógica booleana. Exemplo disso são subdivisões escalares presentes em tais concepções do tipo: táxon, geótopo, geofácia e ecótono, domínio, região natural (Figura 2.2).

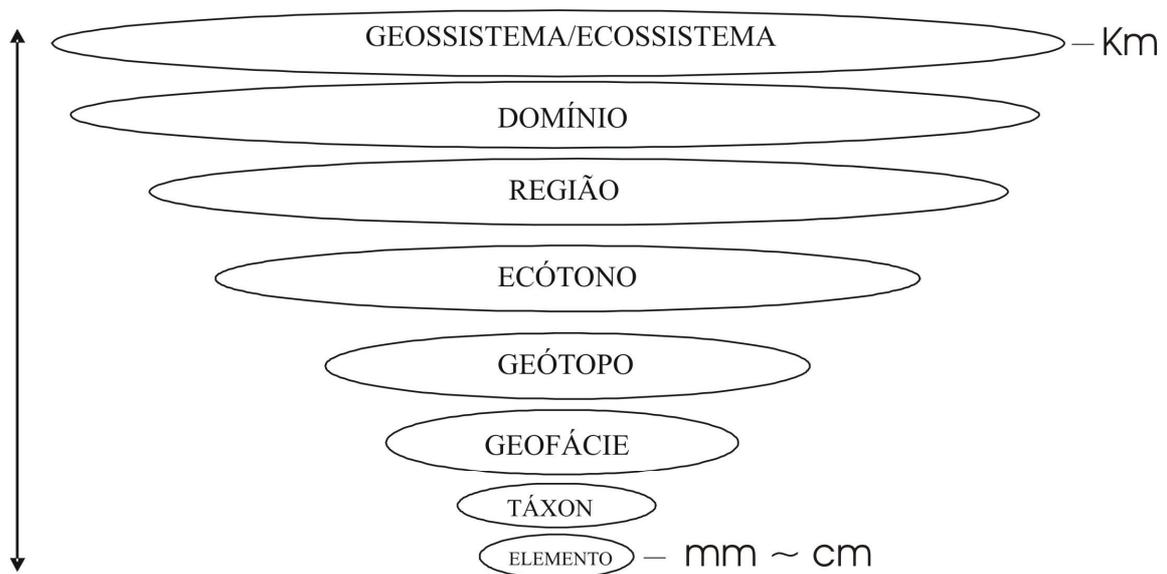


Figura 2.2. Modelos de abordagem de sistemas ambientais segundo escala espacial de abrangência.

A idéia de sistemas está subjacente pressupondo hierarquia, relação e funcionalidade, extendendo-se a seus métodos de representação através de processos de classificação e discretização. Essa perspectiva é básica e necessária como uma primeira etapa, pois a partir dela reconhece-se um momento de análise inicial, porém, utilizá-la como fim para o entendimento da complexidade de um sistema ambiental é limitador, na medida em que existe um alijamento entre forma/função, espaço/tempo, o qual retrata apenas um estado do sistema.

Parte-se da premissa que a espacialidade de um sistema ambiental expressa sua organização e funcionalidade, assim como as probabilidades de novas organizações e funcionalidades considerando sua evolução no espaço/tempo.

Uma das bases para superação deste paradigma pode ser resgatada na consideração do espaço/tempo enquanto contínuo, e assim sendo, a necessidade de representá-lo dessa forma. Sack (1974) delineaia como antítese da escola corológica, o que chama de escola espacial, na medida da consideração do *arranjo e distribuição* dos elementos no espaço e no tempo.

*“The spatial school, initiated by Schaefer’s “Excepcionalism in Geography”, inverted the corological conception. The study of the where of things, their spatial distribution (...)” (Sack, 1974).*

Surge, portanto, em somatória a idéia de objeto, a idéia de *campo*. Essa por sua vez, muito mais adequada à modelização de processos, por tratar de uma disposição contínua dos elementos. A noção de campo enriquece as representações espaciais sob a ótica sistêmica, sendo um dos conceitos abordados nas pesquisas em fractais iniciadas por Mandelbrot (1983), onde a dimensão fractal, ou seja, a função de transformação de um elemento sujeito a processos dinâmicos, pode ser aplicada tanto para o espaço, quanto para o tempo, denotando assim sua complexidade. A compartimentação sistêmica de representação espacial pode, portanto, comportar conceitos inerentes a própria complexidade, e não apenas ao seu modelo funcional (sistema).

Em termos aplicados, esse conceito foi melhor desenvolvido para o entendimento do arranjo espacial de elementos, em detrimento ao parâmetro temporal. Corrobora-se tal afirmação na medida de sua aplicação prática no desenvolvimento de interpoladores geoestatísticos. A sua incorporação aos modelos de representação espacial torna-se viável através de sua disposição num espaço bidimensional, conhecido por estrutura *matricial*. Essa estrutura adequa-se plenamente a modelagem de fenômenos de distribuição espacial complexa, como: altimetria, pluviosidade, temperatura, ou na representação de dados de sensores remotos (radares, sensores orbitais, etc), pois trabalha sob uma perspectiva de gradiente de transição, considerando o espaço como contínuo e relacional (Figura 2.3).

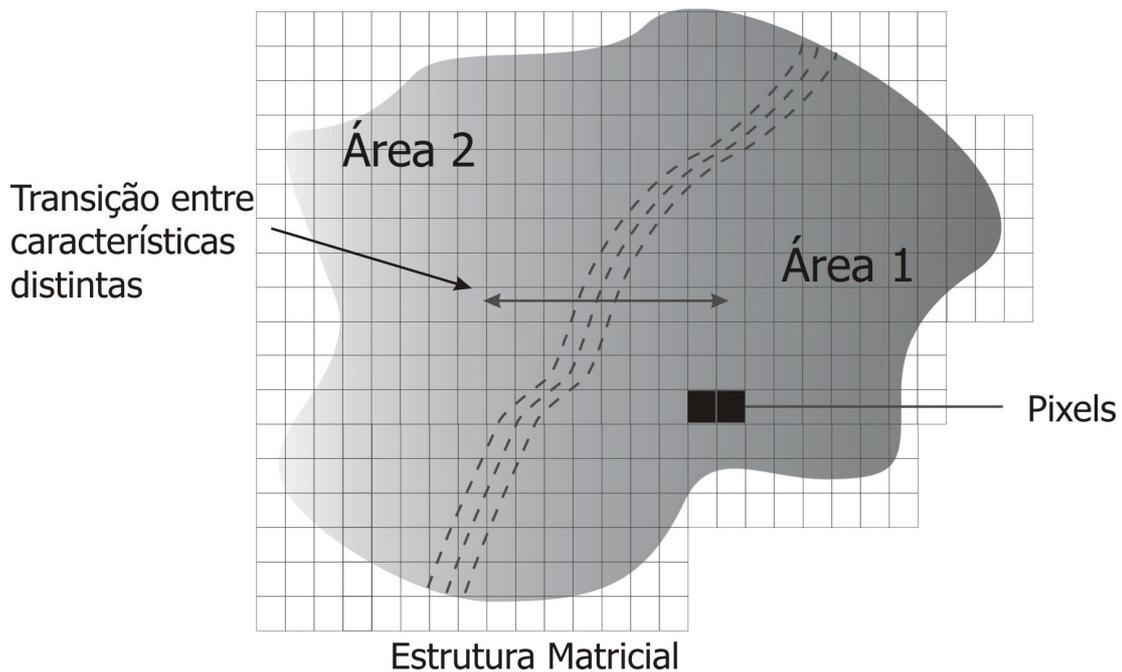
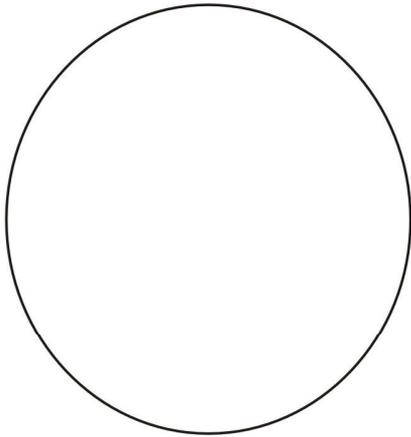


Figura 2.3. Modelo matricial de representação espacial. A figura ilustra a distinção gradativa entre atributos dos elementos 1 e 2, e sua disposição espacial através da variação dos valores de pixels da matriz. A quantidade de informação de cada pixel é determinada por sua abrangência espacial, sendo que a relação entre essa informação e sua distribuição determinam as características de novos elementos em escalas diversas.

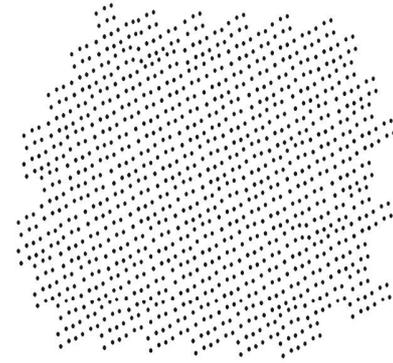
Dessa forma, equações que expressam formas euclidianas (círculo, semi-reta) são estacionárias, buscam a resolução de uma incógnita. Já os fractais, a modelagem geoestatística e sua representação matricial, por exemplo, possuem a dinâmica expressa pela tentativa e erro na busca de um processo, gerando formas *ad infinitum* em co-relações numéricas, tornando-se um diferencial conceitual/aplicado dos métodos de representação vetorial, com ênfase no conteúdo dos *pixels* (*picture element*) como base para o conhecimento do elemento representado. Esse tipo de representação só se tornou tecnicamente viável com a utilização de computadores, que possibilitam a varredura rápida de uma malha de pixels (matriz) considerando seus atributos, o que demanda grande quantidade de cálculos (Figura 2.4).



$$X^2 + Y^2 = 1$$

Representação de um círculo segundo geometria euclidiana

(a)



$$Z - Z^2 + C$$

Representação matricial de formas segundo conjunto de Mandelbrot

(b)

Figura 2.4. Modelos de representação vetorial, com base na geometria euclidiana (a) e matricial segundo conjunto de Mandelbrot (b). As variáveis na Figura a representam a solução de uma equação na qual se determinam pontos com valores de localização num plano cartesiano (x,y). Na figura b, existe uma interação entre os valores de um número inicial (C) com suas variações (Z), sendo que os valores intrínsecos ao processo de interação resultam em novos valores de pontos e por conseguinte em novas formas (adaptado de Gleick, 1989).

Um dos melhores exemplos de instrumental baseados na continuidade do espaço/tempo surge com o advento dos sensores orbitais na década de 1970, por meio do projeto ERTS (*Earth Resource Technology Satellite*) e os primeiros sensores Landsat, os quais utilizam os conceitos anteriormente descritos, na medida em que o tipo de dado gerado é apresentado na forma de uma matriz de pixels. O atributo contido nos pixels dessa matriz possui informações diretamente relacionadas aos diferentes sistemas ambientais terrestres, obtidas pela interação entre os seus elementos componentes, como: solo, vegetação e rochas, e distintos comprimentos de onda da radiação eletromagnética, o que lhe confere características multiespectrais. Nesta abordagem a análise de um sistema ambiental passa por preceitos espaciais, onde a compreensão todo-parte, seria o máximo da abrangência horizontal entre os elementos ou relações topológicas, concomitante com o aprofundamento vertical relativo às características desses mesmos elementos, definidas por seus aspectos corológicos. Berry, 1964 e Sack, 1974, entre outros, enfatizaram tal necessidade em procedimentos de mapeamento, tomando por base a utilização de representações n-dimensionais, porém, ainda sem a possibilidade do uso amplo de dados

multiespectrais. Dessa forma, propõem-se dois campos de análise baseados nessa estrutura funcional de dados, o sensoriamento remoto multiespectral como forma de mapeamento e representação n-dimensional, e os conceitos sistêmicos, ambos mais aptos a modelagem temporo/espacial, visto que possibilitam uma abordagem sistêmica, por meio da aquisição e análise integrada de dados da superfície terrestre.

## **2.2. DINÂMICA DE SISTEMAS AMBIENTAIS COMPLEXOS: CONCEITOS SISTÊMICOS APLICADOS AO USO DE DADOS MULTIESPECTRAIS**

Um desafio constante para estudos de sistemas ambientais trata da necessidade de considerar conjuntamente aspectos individuais (taxonômicos) dos elementos, aliados ao seu papel coletivo (relações todo-parte-todo). Tradicionalmente abordagens desse tipo baseiam-se em rígidos mapeamentos de campo como forma de sintetizar a funcionalidade do todo organizado. Um exemplo dessa afirmação encontra-se no conceito de ecossistema o qual se baseia na idéia de unidades de organismos vivos conviventes, os quais ocupam porções do espaço definidas enquanto: nichos, biomas, ecótonos (Tansley, 1935; di Castri, 1988). Da mesma forma, o conceito de geossistema se utiliza em maior ou menor grau de unidades espaciais ou geoesferas tais como: geócoros, geofácies, geomas, (Sothava, 1972; Bertrand, 1972). A definição dessas unidades em ambas as classificações verifica-se pelas características intrínsecas de seus elementos formadores, pela interação entre os mesmos, bem como pela própria escala de análise, sendo que tais conceitos são analisados à seguir sob a ótica da utilização de dados multiespectrais proveniente de sensoriamento remoto orbital, segundo a proposta desta tese.

### **2.2.2. ESCALA**

O conceito de escala, o qual comporta a noção sistêmica de hierarquia, torna-se função direta principalmente das resoluções espectrais e espaciais dos sensores. Um exemplo disso trata-se do fatiamento da radiação eletromagnética em intervalos espectrais como o: visível (0.52 e 0.69  $\mu\text{m}$ ), o infravermelho próximo (0.78 a 0.86  $\mu\text{m}$ ) e o infravermelho de ondas curtas (1.60 a 2.43  $\mu\text{m}$ ), os quais delineiam o comportamento da maioria dos materiais na superfície terrestre, tais como solos e vegetação (Fig. 2.1c) (Salisbury *et al.*, 1991). Maiores resoluções significam maiores detalhes relativos a cada componente de um sistema ambiental (Fig. 2.1b).

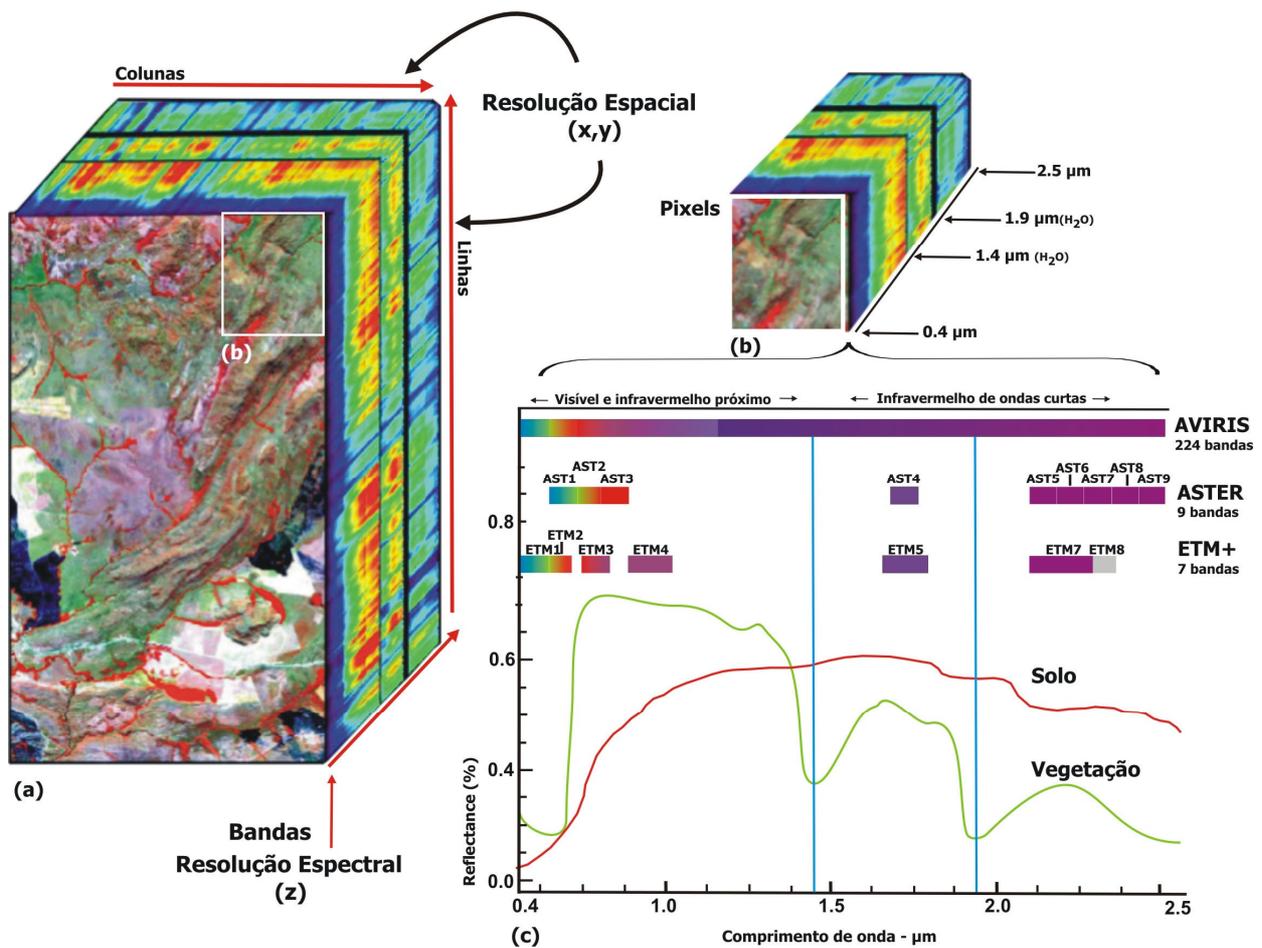


Figura 2.5. Escala e resolução radiométrica. O cubo hiperespectral do sensor AVIRIS (Fig. a) ilustra a estrutura de uma imagem orbital de resolução espectral ideal, referindo-se às escalas detalhadas, sendo comparada com as resoluções dos sensores ASTER e ETM+ (Fig. c). No detalhe (Fig. b) ilustra-se o procedimento de cobertura espectral em um pixel segundo a escala de abordagem, com destaque para os intervalos espectrais sem dados, devido a efeitos da atmosfera.

Um sensor hiperespectral como o AVIRIS, por exemplo, possui bandas estreitas com resoluções espectrais de centenas de bandas, o que lhe confere a capacidade de reprodução quase que por completo do comportamento espectral de elementos da superfície terrestre (Fig. 2.5). Já sensores multiespectrais (ASTER, ETM+), possuem bandas mais largas centradas nas principais variações da energia eletromagnética (feições diagnósticas) relativas a elementos importantes como pigmentos da vegetação e ferro no solo (Fig. 2.5). Esses sensores são exemplos de avanços instrumentais, mesmo que o primeiro ainda de uso restrito, no sentido da possibilidade do refinamento da escala de abordagem.

No que se refere ao aspecto metodológico a análise sistêmica começa a ser considerada em pesquisas recentes, as quais enfatizam a necessidade de detecção e análise do maior número de elementos componentes da superfície terrestre de forma integrada. Exemplo disso são os mapeamentos de vegetação utilizando dados multiespectrais, os quais se baseiam na sua grande maioria em regiões do espectro conhecidas como o visível (0.52 e 0.69  $\mu\text{m}$ ) e o infravermelho próximo (0.78 a 0.86  $\mu\text{m}$ ). Essas regiões, mesmo comportando importantes informações sobre a planta, como pigmentos (e.g. clorofilas, antocianinas), não cobrem outros componentes, que tornam a planta fotossinteticamente ativa um sistema formado, além de pigmentos, por água, compostos bioquímicos, estrutura de dossel, bem como parte de um conjunto de plantas (Almeida Filho, 2005). Mesmo estudos atuais nessa área envolvendo dados hiperespectrais realizados por autores como: Rondeaux *et al.*, (1996); Thenkabail *et al.*, (2002) e Schuerger *et al.*, (2003), são analisados por Almeida Filho (2005) como apenas um aperfeiçoamento da análise da informação contida no visível e no infravermelho próximo. Portanto, o avanço dos sensores é apenas parte da melhoria na escala de abordagem, a qual envolve também uma mudança na metodologia envolvida, abordando outras regiões do espectro eletromagnético de maneira sistêmica, com vias ao seu papel de conjunto enquanto delimitadora dos elementos de um sistema ambiental.

### **2.2.3. ZONAS DE TRANSIÇÃO, ESTABILIDADE E MUDANÇAS EM SISTEMAS AMBIENTAIS**

Uma das maneiras de se determinar o nível de complexidade de um sistema está relacionada ao seu grau de heterogeneidade, que pode ser definida pelo número de elementos que esse sistema possui (Gondolo, 1999; Pessoa Jr., 1996), bem como pela quantidade de dados subjacentes ao mesmo, enfoque esse que tem por base a teoria da informação (Shannon, 1949). No caso de sistemas ambientais esses elementos correspondem, por exemplo, a quantidade de espécies vegetais num ecossistema, a variedade de usos da terra num geossistema, ou as características minerais encontrados nos diferentes tipos de solo em um domínio. Neste sentido, quanto maior o número de elementos, tanto maior será o número de inter-relações, níveis hierárquicos e, por conseguinte, as probabilidades de transformações e derivações de novas funcionalidades desse sistema.

Sistemas ambientais de maneira geral concentram-se justamente na antítese da complexidade, ou seja, no agrupamento de elementos do mesmo tipo e funcionalidade expressos

em áreas homogêneas. A noção de área *Core* é um exemplo dessa afirmação, na medida em que divide o espaço segundo a presença dos principais tipos classificados (Holling, 1973; Ludwig *et al.*, 1997; Laurance *et al.*, 2001) Porém, importantes informações sobre alterações nesse sistema bem como sua complexidade, encontra-se nas áreas de transição, nas fronteiras. Nossas escalas de abordagem ou metodologias de mapeamento, por vezes, não alcançam a transição fragmentária sutil contida no ambiente.

Pode-se fazer uma analogia por meio do exemplo que embasou esse conceito referente ao pêndulo de Yorke (Gleick, 1989). Ao modelar-se o movimento de um pêndulo atribui-se aos seus extremos as cores branca e preta. Durante o movimento temos a mudança de uma cor para outra, mas apenas nos extremos de deslocamento existe uma definição exata de ambas as cores, nas demais posições existe uma mistura entre as mesmas, as quais são caracterizadas por *zonas de transição*. Assim como no campo de abrangência do pêndulo, as zonas de transição também são maioria na natureza, sendo que em alguns casos, conceitos como os de ecótono objetivam abarcar tais características (di Castri *et al.*, 1988) (Fig. 2.6).

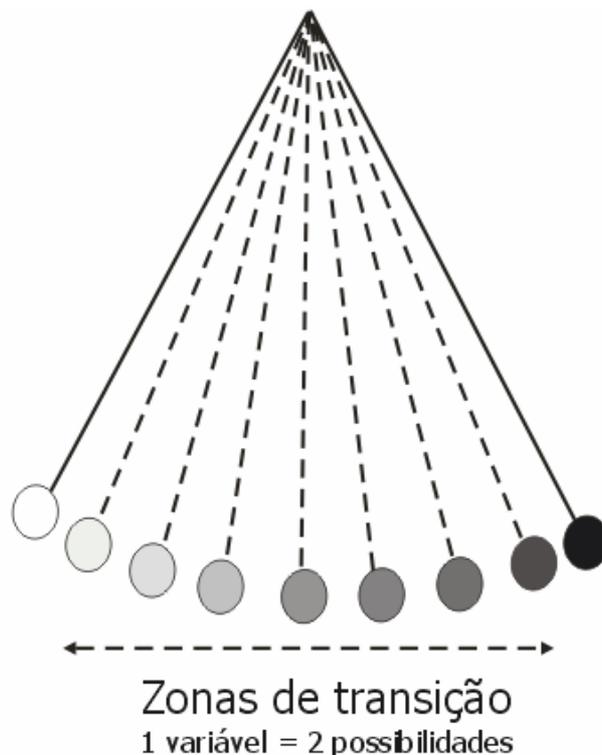


Figura 2.6. Visualização do pêndulo de Yorke, como exemplo do conceito de zonas de transição (adaptado de Cruthfield *et al.*, 1986 apud Gleick, 1989)

Dessa forma, a própria estabilidade num sistema pode ser determinada por meio da medida de possibilidades de transformação com base em seu comportamento. Tradicionalmente essa estimativa é feita por meio da disposição das variáveis do sistema num gráfico bi-dimensional (espaço de fase), sendo que a trajetória descrita nesse gráfico é função das transformações ocorridas no sistema ao longo do tempo (eixo y). Como resultado observa-se a tendência de agregação dos dados em determinadas regiões desse gráfico, as quais são definidas como atratores. Nestes locais o sistema apresenta variáveis de mesmo comportamento, definindo uma tendência à estabilidade, a qual pode ser estimada pela modificação da linha de trajetória, formando uma região de influência denominada bacia de atração (Lorenz, 1963). Quanto maior a bacia, maior a estabilidade do sistema (Hénon, 1976; Grebogi *et al*, 1987) (Fig.2.7b). Como exemplo clássico, podemos citar o atrator de Lorenz<sup>1</sup> (1963) baseado em variáveis atmosféricas, no qual as trajetórias representam a não repetição das condições iniciais, tornando o sistema criativo e expondo-o a mudanças infinitas de condições em seus vértices, delineando transição, estados de equilíbrio e transformação em diferentes escalas (camadas diversas) num espaço finito (Fig.2.7a).

---

<sup>1</sup> O atrator de Lorenz é resultado da modelagem de um conjunto de variáveis atmosféricas, reconhecendo neste processo que uma pequena aproximação de casas decimais no início, as quais representariam a direção e intensidade dos ventos, poderiam significar um ciclone ao longo do tempo. Lorenz chamou isso de *dependência sensível das condições iniciais*, mais tarde conhecido como *Efeito Borboleta* (Lorenz, 1963).

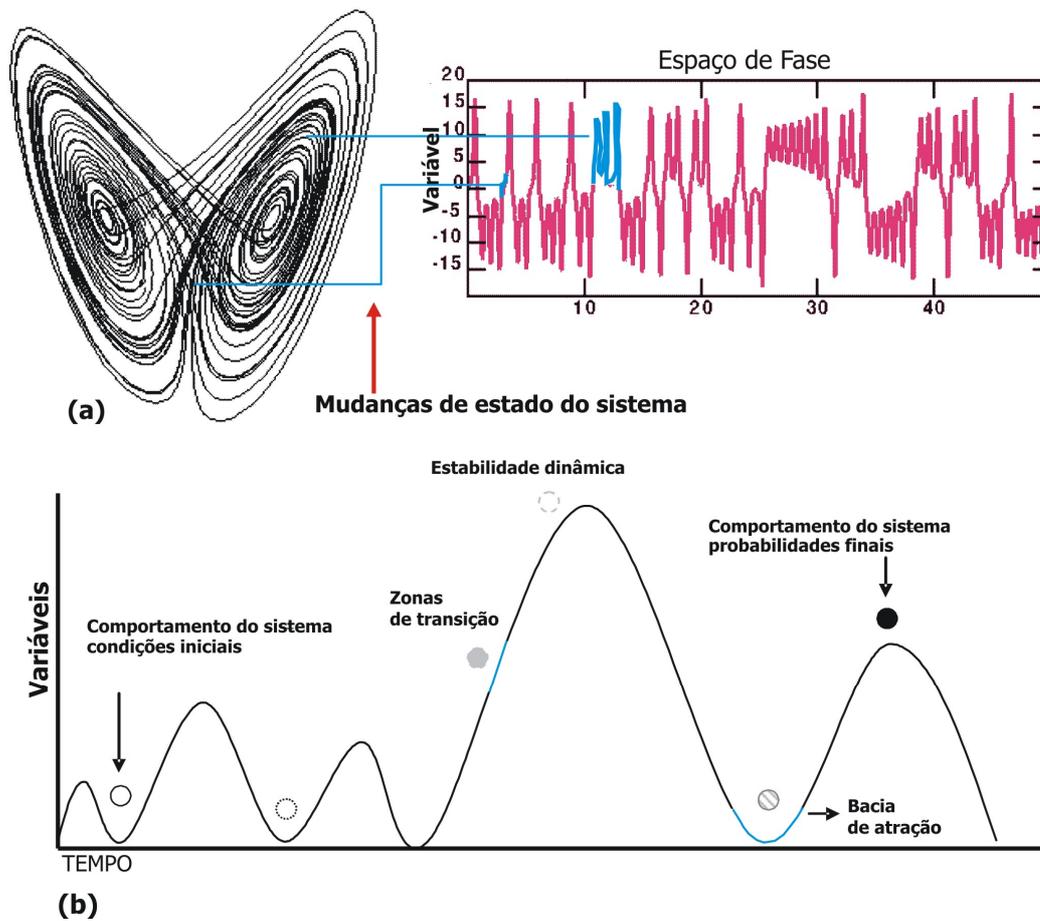


Figura 2.7. Atratores complexos. O atrator de Lorenz baseia-se na modelagem de parâmetros atmosféricos num espaço de fase, delineando o seu comportamento por meio de uma trajetória definida no tempo (Fig. a). Observa-se mudanças de estados do sistema gerando comportamento não linear e criativo (expirais). Na figura b esse comportamento é colocado ilustrativamente com ênfase nas bacias de atração e zonas de transição (Fig. b), como regiões do gráfico que determinam níveis de estabilidade de um sistema.

Neste trabalho, o conceito de atratores é transposto para uma matriz de pixels  $n$ -dimensionais, onde  $x$  e  $y$  definem a localização do elemento no sistema, e  $z$  refere-se às suas características individuais ou taxonômicas, expressas em valores de DN (*digital numbers*), reflectância aparente ou emissividade ( $\epsilon_\lambda$ ). Dessa forma, a analogia do pêndulo e o conceito de zonas de transição aplicam-se de maneira ampliada à resolução radiométrica de um sistema sensor, o qual dispõe usualmente de 0 a 255 (8 bits) níveis de cinza entre o preto e o branco. Sob essa perspectiva, a imagem representa um leque muito maior de possibilidades de mapeamento de transições (Fig.2.8a). Essa transposição desloca o eixo  $y$  relativa a variável tempo (gráficos bi-dimensionais) para o espaço, o que a torna muito mais adequada ao mapeamento de sistemas

ambientais, visto que assume um número maior de variáveis a serem consideradas *in-loco*. O fator tempo não se perde, e sim se traduz na resolução temporal do sensor (Fig. 2.8b).

Assim, no que se refere aos estados de estabilidade possíveis de um sistema, dois se destacam como principais: (i) resiliência, ocorre quando um sistema após ser perturbado retorna as suas condições iniciais, sem alterações estruturais ou funcionais, (ii) resistência, acontece quando o sistema não sofre nenhum tipo de alteração mesmo durante a perturbação (Holling, 1973; Ludwig *et al.*, 1997), e finalmente, (iii) estabilidade múltipla que é típica de sistemas com mais de um estado estável, alternando-se entre os mesmos quando sob distúrbios (Clark *et al.*, apud Mattos & Perez Filho, 2004).

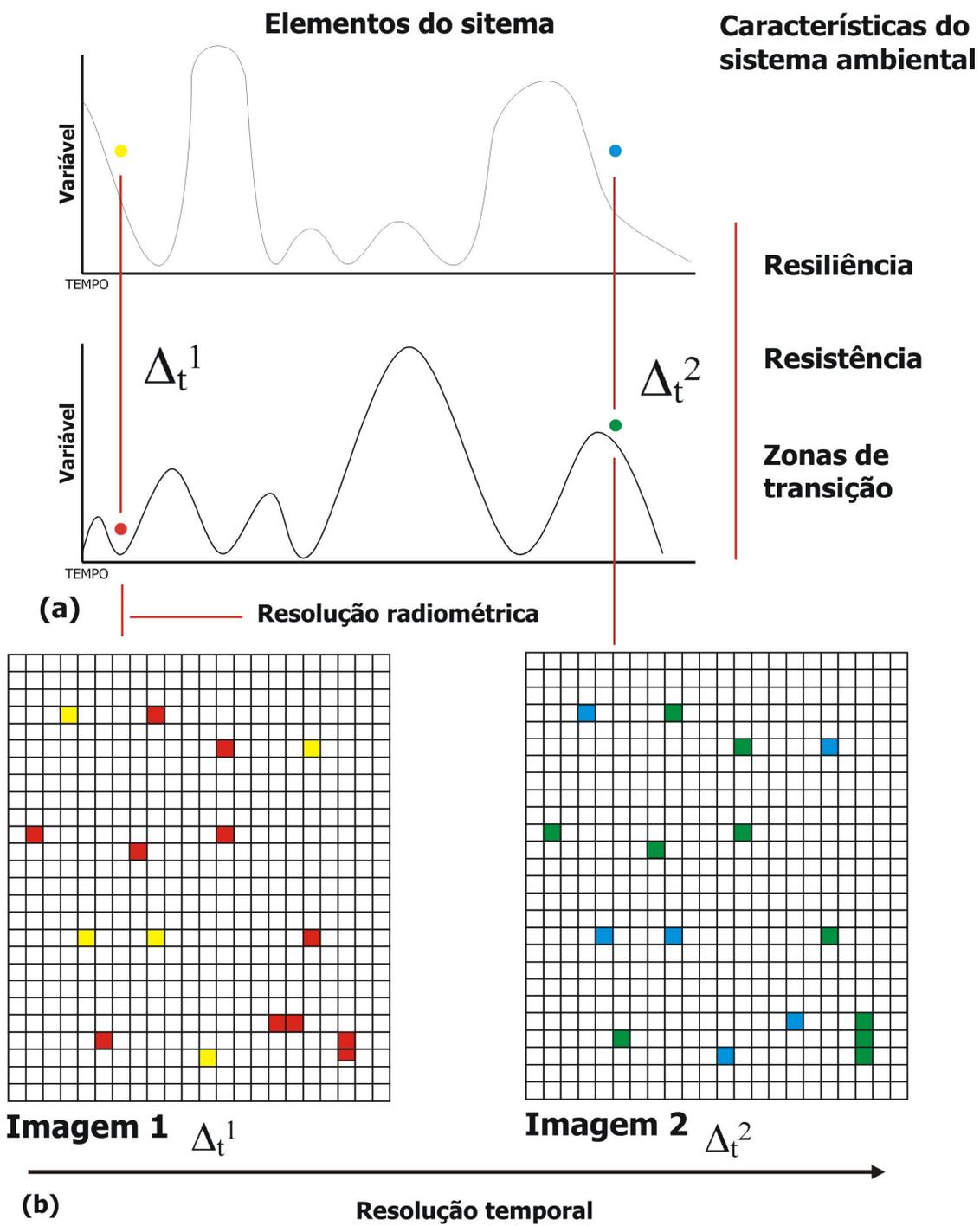


Figura 2.8. Esquema conceitual do mapeamento de elementos num sistema ambiental por meio de uma matriz de pixels. O comportamento do elemento no sistema (Fig. a) é considerado espacialmente por sua transposição para a uma matriz de pixels (Fig.b), onde x, y são iguais a sua localização, e z é a sua característica (trajetória do gráfico bi-dimensional – Fig.a). O aspecto temporal é reproduzido na forma de diferentes imagens em  $\Delta_t^1, \Delta_t^2, \dots$ (Fig. b)

As considerações dos níveis de estabilidade em estudos de sistemas ambientais são de extrema importância em termos aplicados, sendo que alguns exemplos encontram-se no mapeamento de áreas de desertificação, estabelecendo correlações entre formações de savanas e aumento de áreas de pastagem (Kassas, 1995; Tucker & Nicholson, 1999), ou na compreensão da relação entre fitoplâncton e absorção de CO<sup>2</sup> pelos oceanos (Reide *et al.*, 1998; Hare *et al.*, 2000), ou nas próprias abordagens implementadas nesta tese, nos capítulos seguintes. Outro aspecto a ser considerado nesta proposta metodológica trata-se da busca do aumento da escala de abordagem em sistemas ambientais, por meio de diferentes e muitas vezes pouco estudadas regiões do espectro eletromagnético, no que tange a consideração integrada de elementos como vegetação e solos, seus componentes químicos e físicos. A importância deste tipo de abordagem conceitual reside na otimização do ferramental de aquisição de dados por meio da consideração do comportamento intrínseco dos diferentes elementos da superfície terrestre enquanto um sistema organizado, funcional e dinâmico, e não apenas pela sua identificação e discretização.

### **2.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Almeida, T. I. R. (2005). *Geobotânica por sensoriamento remoto em florestas tropicais e a abordagem sistêmica: uma ferramenta auxiliar no mapeamento geológico regional e na prospecção mineral*. Tese de livre docência, Departamento de Geologia sedimentar e Ambiental do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, p. 158p.
- Berry, B. J. L. (1964). Approaches to regional analysis: a synthesis. *Annals of the Association of American Geographers*, 54(1), 2- 11.
- Bertalanffy, Ludwig. von. (1973). *Teoria geral dos sistemas*. Petrópolis: Vozes, 351p.
- Bertrand, G.. (1972). Paisagem e Geografia Física global. *Caderno de Ciências da Terra*. Universidade de São Paulo, 13, 2-27.
- Burrough, P. A. (1981). *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assesment*. Nova Yorque: Claredon Press-Oxford.
- Chorley, R. J.; Haggett, P. (1975). *Modelos físicos e de informação em geografia*. Rio de Janeiro: Ed. da Universidade de São Paulo, 270p.
- Clark, R. N.; Swayze, G. A. (1995). Mapping minerals, amorphous materials, environmental materials, vegetation, water, ice, and snow, and other materials: The USGS Tricorder

- Algorithm. In *Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication 95-1*, 39 – 40.
- di Castri, F.; Hansen, A. J. & Holland, M. M. (1988). A new look at ecotones: emerging international projects on landscape boundaries. *Biology International*, Special Issue 17.
- Gleick, J. (1989). *Caos: a construção de uma nova ciência*. Lisboa: Gadiva, 420p.
- Gondolo, G. C. F. (1999). *Desafios de um sistema complexo à gestão ambiental: bacia do Guarapiranga, região metropolitana de São Paulo*. São Paulo: Annablume, 162p.
- Grebogi, C.; Ott, E., & Yorke, J. A. (1987). Chaos, strange attractors, and fractal basin boundaries in non-linear dynamics. *Science*, 238, 632-638. In: BAI-LIN, H. *CHAOS II. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.*, p. 256-262, 1990, 737p.
- Hare, S. R., & Mantua, N. J. (2000). Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Prog. Oceanogr.*, 47, 103-145.
- Hénon, M. (1976). A two dimensional mapping with a strange attractor. *Communications in Mathematical Physics*. Springer-Verlag, 50, 69-77. In: BAI-LIN, H. *CHAOS II. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.* p.235-243, 1990, 737p.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 4, 1-23.
- Kassas, M. (1995). Desertification: A general review. *J. Arid Environment*, 30, 115-128.
- King, L. J. (1969). The analysis of spatial form and its relation to geographic theory. *Annals of the Association of American Geographers*, 3 (59): 573-595.
- Langran, Gail. (1992). *Time in Geographic Information Systems*. Basingstoke: Burgess Science Press, 189 p.
- Laurance, W. F.; Didham, R. K, & Power, M. E. (2001). Ecological boundaries: a search for synthesis. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(2), 70-71.
- Lorenz, E. N.. (1963). Deterministic non periodic flow. *Journal of the atmospheric Sciences*, v. 20, n.2, p. 130-141 In: BAI-LIN, H. *CHAOS II. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.* p. 244-255, 1990, 737p.
- Ludwig, D., Walker, B., & Holling, C. S. (1997). Sustainability, Stability and Resilience. *Conserv. Ecol.* <http://www.consecol.org/vol1/iss1/art7/>
- Mandelbrot, B. B. (1983). *The fractal geometry of Nature*. Nova Iorque: W. H. Freeman and Company, 458 p.

- Mattos, S.H.V.L., Perez Filho, A. (2004) *Complexidade e estabilidade em sistemas geomorfológicos: uma introdução ao tema*. Revista Brasileira de Geomorfologia, 1, 11-18.
- Morin, E. (2002). *O método 1: a natureza da natureza*. Porto Alegre: Ed. Sulina, 479 p.
- Pessoa Jr., O. Medidas sistêmicas e organização. (1996). In: Debrum, M.; Gonzáles, M. E. Q., & Pessoa Jr., O. (orgs). *Auto-organização: estudos interdisciplinares em filosofia ciências naturais e humanas, e artes*. Campinas: UNICAMP, Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência, p.129-64.
- Peuquet, D. J. (1994). It's about time: a conceptual framework for the representation of temporal dynamics in Geographic Information System. *Annals of the Association of American Geographers*, 84(3): 441-461.
- Reid, P. C., Edwards, M., Hunt, H.G., & Warner, A. J. (1998). *Phytoplankton change in the North Atlantic*. *Nature*, 391, 546-546.
- Rondeaux, G.; Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55: 95-107.
- Sack, Robert D. (1973). A concept of physical space in Geography. *Geographical Analysis*, January: 16- 34.
- Sack, Robert D. (1974). Chorology and spatial analysis. *Annals of the Association of American Geographers*, 64(3), 439- 452.
- Salisbury, J. W.; Walter, L. S.; Vergo, N., & D'Aria, D. M. (1991). *Infrared (2.1-25 micrometers) Spectra of Minerals*. USA: Johns Hopkins University Press, 294 p.
- Schuerger, A. C.; Capelle, G. A.; Di Benedetto, J. A.; Mao, C.; Thai,, C. N.; Evans, M. D.; Richards, J. T.; Blank, T. A., & Stryjewski, E. C. (2003). Comparison of two hyperspectral imaging and two laser-induced fluorescence instruments for the detection of zinc stress and chlorophyll concentration in bahia grass (*Paspalum notatum* Flugge). *Remote Sensing of Environment*, 84 (4): 572-588.
- Shannon, C., & WEAVER, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. Urbana: University of Illinois Press.
- Sothava, V. B. (1972). Por uma teoria de classificação de geossistemas terrestres. (tradução publicada em 1977). *Caderno de Ciências da Terra*. Universidade de São Paulo, 14, 2-24.

- Tansley, A. G. (1935). The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 16, 284-307.
- Thenkabail, P. S.; Smith, R. B., & De Pauw, E. (2002). Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68: 607-621.
- Tobler, W. R. (1966). Numerical map generalization and notes on the analysis of geographical distributions. Michigan Inter-Univ. Community of Mathematical Geographers. Ann Arbor. *Discussing Paper*, 8:1-24.
- Tucker, C. J., & Nicholson, S. E. (1999). Variations in the size of the Sahara Desert from 1980 to 1997. *Ambio*, 28, 587-591.

## ***CAPÍTULO 3***

### ***MAPEAMENTO DE FRAGMENTOS E ZONAS DE TRANSIÇÃO EM SISTEMAS AMBIENTAIS TROPICAIS ATRAVÉS DE CLASSIFICAÇÃO HIPERESPECTRAL DE IMAGENS DO SENSOR ASTER (ADVANCED SPACEBORNE THERMAL EMISSION AND REFLECTION RADIOMETER)***

#### **3.1. INTRODUÇÃO**

Ecosistemas são, por definição, conjuntos de elementos bióticos e abióticos que, enquanto sistema, possuem características particulares que lhes fornecem singularidade e funcionalidade (Tansley, 1935). Variações nestas características concretizam-se a partir de descontinuidades espaciais, chamadas ecótonos ou zonas de transição (Di Castri *et al.*, 1988; Wiens *et al.*, 1985). Essas variações podem ser atribuídas a fatores naturais, como diferentes correlações entre vegetação, solo e clima, estágios diferenciados de desenvolvimento vegetacional, ou ação antrópica (Gosz, 1993; Forman & Godron, 1986). A ação antrópica, em particular, concretiza-se principalmente pela retirada de vegetação natural e pelo extensivo e intensivo uso da terra (Skarpe, 1991; van de Koppel, 1997; Cardille & Foley, 2002; Wackernagel *et al.*, 2002; Fearnside, 1993; Skole & Tucker, 1993; Vitousek *et al.*, 1997), gerando um aumento da fragmentação de ecossistemas e de suas zonas de transição.

Podem-se destacar quatro questões fundamentais no que se refere ao aumento de fragmentação de ecossistemas: (i) estruturalmente, fragmentos constituem muitas vezes, importantes focos de biodiversidade e endemismo, principalmente em regiões tropicais (Risser, 1993, Metzger, 1997; Bierregaard *et al.*, 1992); (ii) em termos de dinâmica ambiental, estados de estabilidade, resistência e resiliência podem ser estimados mediante o estudo integrado de fragmentos com características taxonômicas bem definidas (áreas *core*) e do estudo de zonas de transição, as quais correspondem a produtos de reações de ecossistemas frente a perturbações antrópicas ou naturais (Laurance *et al.*, 2001, Holling, 1973; Ludwig *et al.*, 1997); (iii) processos relativos ao estágio de desenvolvimento vegetacional, intemperismo químico e erosão são usualmente mais acelerados em regiões tropicais, tornando esses ambientes muito mais vulneráveis a modificações rápidas; (iv) processos de fragmentação são indicadores de transformação em escala global, devido à alteração de processos tais como como fixação de

carbono, ciclo de nutrientes, permuta de gases atmosféricos (e.g. N, CO<sub>2</sub>, O), níveis de albedo e evapotranspiração (Asner, 1997; Houghton, 1994; Kauffman, *et al.*, 1994; Kokaly, 2001).

Relevantes contribuições vêm surgindo em estudos de fragmentos, em meso e macro-escala, com a utilização de sensoriamento remoto multiespectral, visto tratar-se de método sinóptico e eficiente para análise de grandes áreas, e que permite a correlação de dados espaciais e temporais (Shoshany & Svoray, 2002; Xiao & Moody, 2005). Neste sentido, estudos de fragmentos ecossistêmicos vêm sendo abordados a partir da extração de informações de imagens multiespectrais através do tradicional uso de índices de solo e vegetação. O *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Rouse *et al.*, 1973) e o *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) (Huete, 1988), por exemplo, têm sido historicamente aplicados a dados dos sensores MSS, TM, ETM+ (plataformas Landsat) e HRV e HRG (plataformas SPOT), e constituem-se num dos mais eficientes métodos de mapeamento da superfície terrestre.

Entretanto, uma das dificuldades para o uso de índices em estudos de detalhe, particularmente no que tange a fragmentos e suas zonas de transição, é a sua limitação no reconhecimento de características individuais e gradientes transicionais entre diferentes tipos de cobertura da terra. Esse tipo de abordagem é fundamental no entendimento de processos complexos que se iniciam em escalas centimétricas a métricas (e.g. desertificação, erosão, alterações de biomassa) (Kassas, 1995; Hanan *et al.*, 1991). Parte dessa limitação deve-se ao fato de que tais métodos, baseiam-se principalmente nas regiões do visível (*Visible/VIS* - 0.52 e 0.69  $\mu\text{m}$ ) e do infravermelho próximo (*Near Infrared/NIR* - 0.78 a 0.86  $\mu\text{m}$ ), cobrindo comprimentos de onda onde há maior absorção da clorofila (*visible red*), maior reflexão da radiação em função da estrutura da planta (*near infrared*) e a região do espectro intermediária entre essas duas faixas, conhecida como *red edge* (Clark *et al.*, 1995; Knipling, 1970). Essa região do espectro é muito adequada, para o estabelecimento de estágios de desenvolvimento da planta (senescência), sendo também utilizada como bom indicador para caracterização das frações de vegetação fotossinteticamente ativa (*photo-synthetically active vegetation* - PAV), vegetação seca, solos, etc. (Running *et al.*, 1989). No que se refere às características pedológicas, constitui importante forma de detecção de óxidos/hidróxidos de ferro presentes em solos (e.g. hematita, goethita) (Hunt *et al.*, 1977).

Porém, estudos demonstram que características típicas de fragmentos ecossistêmicos em regiões tropicais como: rugosidade e sombreamento provenientes de grande variedade de

espécies herbáceas, arbóreas e arbustivas; variações acentuadas nos tipos de solos; elevada umidade atmosférica e matéria orgânica, mascaram resultados com base nos índices anteriormente descritos, como índices de área foliar (IAF) e biomassa (Norman *et al.* 1985; Kimes, 1984; Huete, 1988; Epiphanyo & Vitorello, 1985).

Como forma de superação de tais limitações o uso do infravermelho de ondas curtas (*Short Wave-Infrared*/SWIR-1.40 a 2.43  $\mu\text{m}$ ) tem se mostrado eficiente ao complementar as informações do visível e infravermelho próximo, tanto em estudos de vegetação (Baret *et al.*, 1988; Apan *et al.*, 2004) quanto no de minerais (Rowan & Mars; 2003). O SWIR apresenta importantes feições diagnósticas relacionadas a componentes bioquímicos da vegetação como: lignina, proteínas e açúcares (Kokaly & Clark 1999; Curran *et al.*, 2001; Fourty & Baret, 1998), os quais são elementos chave para a distinção entre fitofisionomias (Guenegou *et al.*, 1994; Almeida, 2005), bem como de componentes minerais de solos, como hidroxilas e carbonatos (e.g. Fe-OH; Al-OH; Mg-OH; CO<sub>3</sub>), associados principalmente a argilominerais (e.g. nontronita, caulinita, montmorolinita, saponita) (Rowan & Mars; 2003; Hunt, 1977). Dessa forma acredita-se que o uso integrado dessas regiões do espectro também forneça maiores subsídios ao estudo de fragmentos e zonas de transição em ecossistemas.

Limitações de detecção como os descritos acima, são acentuadas pela impossibilidade dos índices estabelecerem transições entre diferentes tipos de materiais num mesmo pixel. Isso, muitas vezes, mascara efeitos de borda, considerando-se a resolução espacial do sensor. Neste trabalho considera-se que zonas de transição representam uma mistura espectral de diferentes tipos de cobertura da terra, resultando em um cenário extremamente heterogêneo em pequenas escalas, as quais dependem diretamente da identificação de componentes biofísicos e bioquímicos num gradiente contínuo de transição. Essa necessidade de exatidão taxonômica e processual pode ser alcançada em parte com a utilização da análise de mistura espectral (*spectral mixture analysis* – SMA) (Adams *et al.* 1986; Smith *et al.*, 1985; Adams & Adams, 1984) através da identificação num nível fitosionômico, no caso da vegetação e de determinados tipos de componentes minerais, no caso de solos e rochas, por exemplo. O SMA simula processos físicos de mistura espectral com base em espectros puros, ou membros extremos. Cada membro extremo corresponde a uma fração de área dentro de cada pixel, que é obtida pela inversão dos modelos lineares de mistura, estabelecendo-se a quantidade de determinados tipos de cobertura. Esse procedimento representa cada pixel como uma mistura espectral de membros extremos, gerando

uma representação contínua de diferentes tipos de cobertura da terra (Smith *et al.*, 1990; Small, 2004; Adams *et al.*, 1986; Gillespie *et al.*, 1990). Trata-se, portanto, de uma abordagem mais apta para zonas de transição, pois considera a heterogeneidade em seus gradientes, o que também representa uma vantagem no estudo de florestas tropicais, as quais apresentam extrema variação de conteúdo num mesmo pixel.

O uso de SMA aplicada a espectrometria de imageamento (Goetz, 1985), mediante a utilização de sensores hiperespectrais como o AVIRIS, gerou uma nova gama de procedimentos de classificação hiperespectral e algoritmos de classificação de alto nível, que tem por base a diminuição de redundância e ruído de grandes quantidades de dados (Boardman & Kruse; 1994; Adams *et al.*, 1989; Kruse *et al.*, 1993). Essa abordagem tem gerado bons resultados não apenas em sua aplicação a sensores hiperespectrais, mas também por sua adaptação à sensores multiespectrais, particularmente o sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) (Souza Filho *et al.* 2003; Galvão *et al.* 2005; Ducart *et al.* 2005; Hubbard & Crowley 2005; Vicente *et al.*, 2005).

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho compreende a utilização dos dados do sensor ASTER de forma integrada nas regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas, associado a procedimentos de classificação hiperespectral adaptados para seu processamento, visando ao mapeamento de fragmentos e zonas de transição entre diferentes tipos de cobertura de ecossistemas em ambientes tropicais.

### **3.2. ÁREA DE ESTUDO**

A área escolhida para esse estudo é a Estação Ecológica e Experimental de Itirapina e seus arredores, incluindo a represa do Lobo e a reserva particular do Botelho, na divisa dos Municípios de Brotas, Itirapina e São Carlos, no estado de São Paulo. Essa área foi escolhida por apresentar uma série de processos de fragmentação comuns a diversas outras áreas, no que tange à heterogeneidade de coberturas vegetais e tipos de solo, assim como o intenso uso antrópico. A vegetação original da área era constituída, em grande parte, por Cerrado (Savana) e, de forma mais restrita, por floresta estacional semidecidual. Com a fragmentação devida ao intenso uso da terra, essas duas fitofisnomias estão hoje reduzidas a um mosaico de 16.313 fragmentos remanescentes, no estado de São Paulo (SMA-IF/Biota-FAPESP, 2002).

A Savana brasileira, em particular, representa um desafio para a utilização de sensoriamento remoto, pois compreende grande variação fitofisionômica, considerando-se como formações principais: cerrado (ou savana florestada); cerrado (ou savana); campo cerrado (ou savana arborizada); campo limpo de cerrado e campo sujo cerrado (ou savana gramíneo-lenhosa) (Eiten, 1983; Veloso et al., 1991). Essa variação está associada a importantes fatores de transição, como nível de nutrientes, tipos de solos, áreas queimadas, conformação lito-estrutural, influência climática e paleoclimática (Eiten, 1990; Goodland & Pollard, 1973), os quais são indicadores de vulnerabilidade do ecossistema, no que se refere a processos de erosão, arenização e desertificação, visto que essa vegetação, muitas vezes, ocupa solos extremamente frágeis (Goedert, 1985; Rodrigues et al., 1986). A savana brasileira apresenta características climáticas, fitofisionômicas e taxonômicas próprias, que a distinguem das savanas de regiões áridas e semi-áridas (Ab´Saber, 2003). Essas características fazem do estudo de fragmentação, frente a diferentes usos da terra, um importante indicador de mudanças ambientais em ecossistemas tropicais.

A área de estudo faz parte da Bacia Sedimentar do Paraná, no Planalto Centro Ocidental, região de relevo suavemente ondulado, com formas pouco dissecadas, baixa densidade de drenagem e declividade (IPT, 1997) (Fig. 3.1).

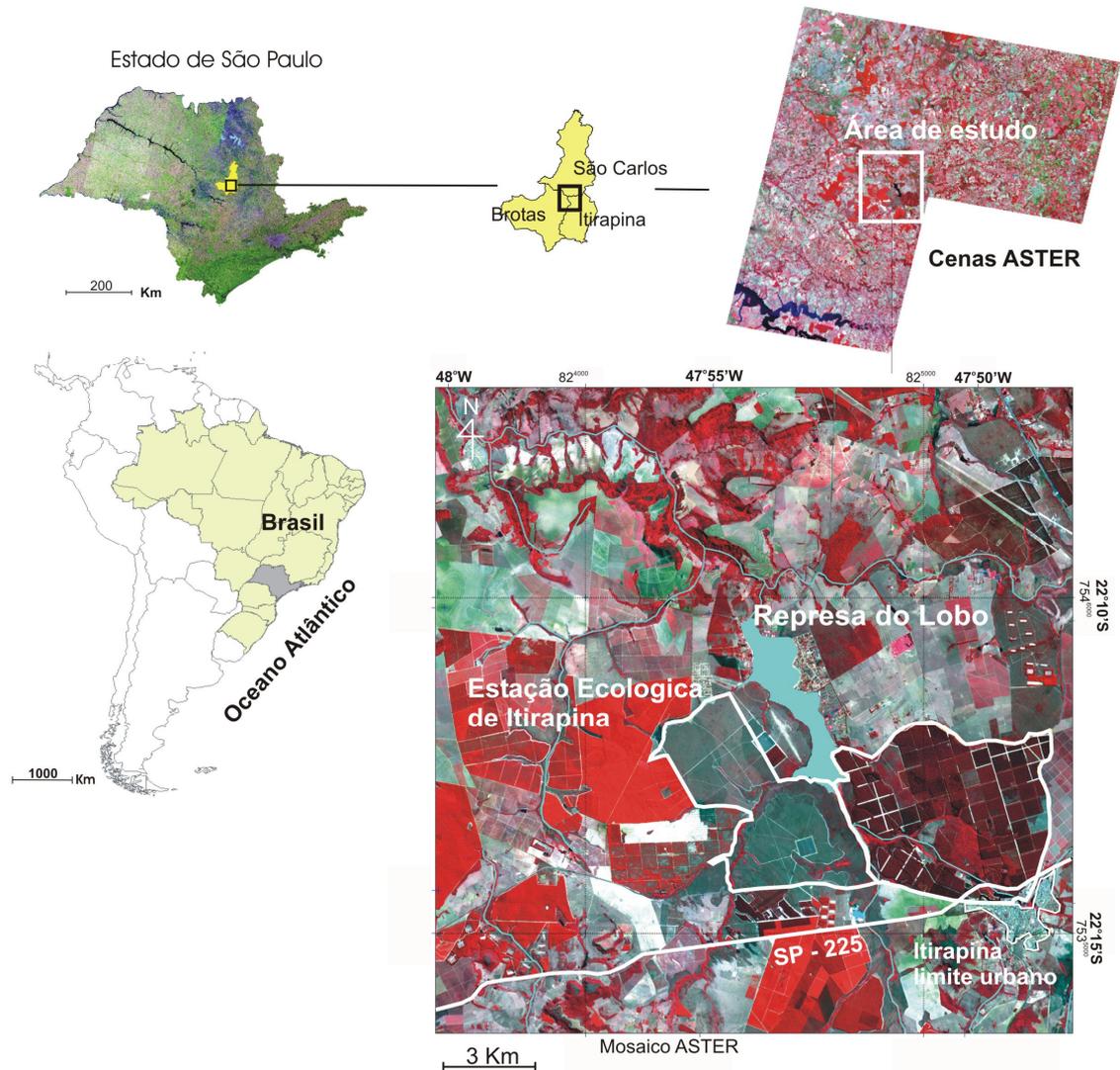


Figura 3.1. Localização da área de estudo. Imagem ASTER (CC 321), mostrando a Represa do Lobo, a Estação Ecológica de Itirapina, e seus arredores.

Os solos predominantes na região, em ordem de preponderância, são: os Neossolos Quartzarênicos (RQ2), de textura essencialmente arenosa com base quartzosa, em alguns casos com hidromorfismo; o Latossolo Vermelho Amarelo Álico de textura média (LVA2), proveniente do arenito Pirambóia; os Organossolos Méssicos (OY1), de cunho orgânico, presente em locais baixos e mal drenados e, mais ao norte, eventuais manchas de Latossolo Vermelho (LV26), com predominância textural da argila, proveniente de rochas basálticas (IAC, 1999). O conjunto pedogênico é, em grande parte, fruto do intemperismo das formações areníticas dos grupos Botucatu e Pirambóia (IPT, 1981).

Os padrões de precipitação observados em Itirapina mostram-se análogos aos de outras áreas de ocorrência de Cerrados, com distribuição sazonal caracterizada por uma estação chuvosa e outra de estiagem, com verão chuvoso e inverno seco. A média anual de precipitação está entre os valores encontrados por Nimer e Brandão (1989) para o Domínio dos Cerrados.

### **3.3. MATERIAIS**

Foram utilizadas imagens ASTER, adquiridas junto a NASA, no Nível 1B de processamento, com correções geométricas e radiométricas aplicadas, e na versão de pré-processamento V003 (detalhes sobre o sensor descritos no capítulo 1). A área de estudo não se encontra disposta por completo em uma única cena. Nesse caso, um mosaico compreendendo 3 cenas tomadas em período seco (05/09/2003, 08/06/2004 e 09/05/2003) foi confeccionado. A interpretação de membros extremos na imagem ASTER foi avaliada mediante o auxílio de mapas referentes a área de estudo: (i) pedológico - escala 1 : 500 000, (IAC, 1999); (ii) geomorfológico – escala 1 : 500 000 (IPT, 1997); (iii) geológico – escala 1 : 500 000 (IPT, 1981); (iv) levantamento da cobertura vegetal do estado de São Paulo em escala  $\pm$  1 : 25 000 (SMA-IF/Biota-FAPESP, 2002). Também, foram utilizadas amostras de solo coletadas em campo mediante tradagem (profundidades: 0-20, 80-100 e 180-200 cm)

### **3.4. ARCABOUÇO CONCEITUAL**

Considerando-se o estudo de ecossistemas, o método utilizado neste trabalho tem como fundamento o conceito de sistemas como conjunto funcional de elementos (Bertalanffy, 1973). Essa funcionalidade é diretamente proporcional à identidade, estabilidade e resiliência desse sistema, ou seja, os fatores que o tornam particular (Holling, 1973; Ludwig *et al*, 1997; Scheffer *et al.*, 2001; Rinaldi & Schaffer, 2000). Esses princípios são fundamentais no entendimento da dinâmica de ecossistemas, sendo que, para sua melhor compreensão, os mesmos podem ser representados graficamente por bacias de atração, como medida da quantidade de elementos de comportamento semelhante. Dessa forma, quanto maior a profundidade de uma bacia, tanto maior será sua estabilidade (Grebogi & Yorke; 1987; Hénon, 1976; Vandermeer & Yodzis, 1999) (Fig. 3.2a). Ecossistemas, em particular, são sistemas abertos, com constantes trocas de energia e matéria, aos quais são atribuídos um caráter dinâmico de constantes alterações que podem resultar em novas funcionalidades (Bertalanffy, 1973; Prigogine, 1996; Vandermeer & Yodzis;

1999). Essas alterações geram processos de transição que podem ser analisados espacialmente num contexto ambiental por meio de áreas homogêneas (com mesmas características e funcionalidades) e áreas heterogêneas (diversidade de tipos e funções). Os gradientes espaciais entre essas áreas constituem-se, por sua vez, em zonas de transição (Watt, 1947; Connel, 1975), as quais encerram a principal informação sobre a dinâmica do ecossistema frente a perturbações diversas, assim como as tendências de novas funcionalidades.

De maneira aplicada, esses princípios são apresentados neste trabalho por meio de uma matriz de pixels inerentes aos dados de sensores orbitais. Nesse caso, o mapeamento de diversas coberturas da terra constitui subsistemas e elementos de um mesmo ecossistema, aos quais são atribuídos identidade e funcionalidade, sendo que alterações em suas propriedades traduzem-se espacialmente em diferentes tipos de solo, vegetação, relevo, hidrografia, etc.

A eficiência do SMA baseia-se numa apurada escolha e análise dos membros extremos por meio de suas assinaturas espectrais, sendo que cada membro extremo corresponde a um tipo de cobertura com feições espectrais típicas relacionadas à sua composição física e química (e.g. argilas, areia, lignina, celulose, amido) (Song, 2005) (Fig. 3.2a). Os limiares de cada tipo de cobertura são determinados pela presença e quantidade de componentes individualizados, estabelecendo-se, assim, zonas de transição que expressam mudanças entre esses limiares. Essa dinâmica de mudanças ocorre, na maioria das vezes, de maneira gradual e integrada, iniciando-se em escalas que dificultam sua identificação.

Com o uso do SMA pode-se determinar o grau de mistura entre os membros extremos em escalas menores (relações corológicas), assim como sua distribuição espacial (relações topológicas), mapeando-se mudanças a partir da estimativa de suas quantidades na matriz de pixels considerada (Fig. 3.2b). Dessa forma, esse procedimento determina espacialmente níveis de estabilidade num sistema, visto que o SMA estima a fração de área de um determinado material com base na reflectância do pixel, podendo não apenas localiza-lo, mas também quantificá-lo. Locais com maior presença de determinado tipo de cobertura são classificadas como áreas homogêneas (áreas *core*) com base nas características físicas e químicas de seus componentes, bem como na sua abundância, e, portanto, apresentam maior resistência a mudança de tipos de cobertura. Áreas heterogêneas, ao contrário, apresentam grande variação de coberturas da terra, estimadas por sua pouca abundância, resultando em maiores possibilidades de mudanças para um outro tipo de cobertura hegemônica (Watt, 1947; Connel, 1975; Hagget, 1977;

Zonneveld, 1989). Essas mudanças podem significar, por exemplo, processos erosivos em solos arenosos, mediante a retirada de cobertura vegetal, declínio ou ascensão de espécies vegetais, pela alteração de biomassa e pigmentos, ou regeneração de áreas desmatadas com a detecção de vegetação nativa em estágios iniciais.

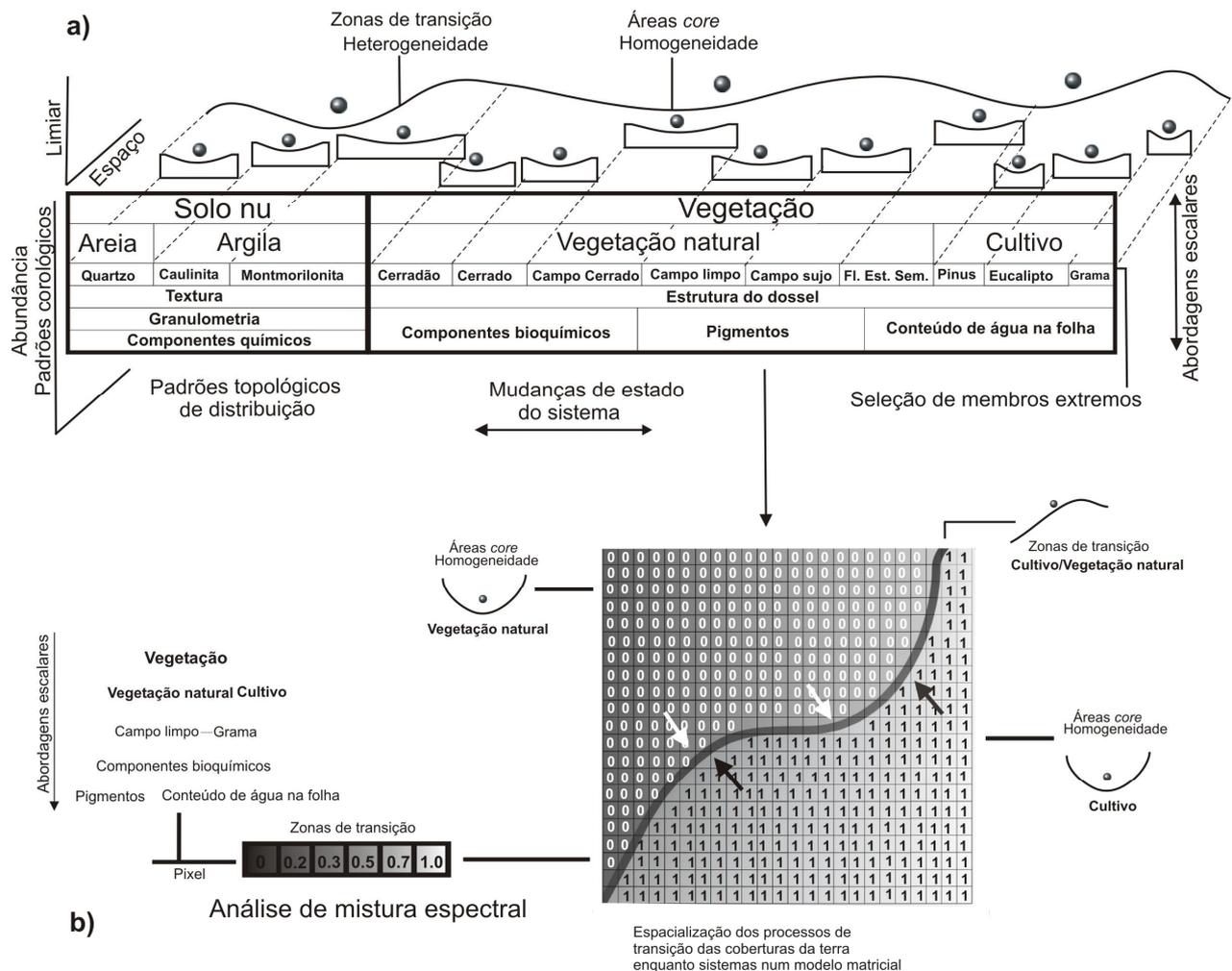


Figura 3.2. Esquema conceitual de estabilidade e zonas de transição em uma matriz de pixels. No esquema (a) os processos de transição entre diferentes coberturas são representados por bacias de atração. Cada esfera representa o comportamento de uma cobertura da terra em diferentes escalas e seus componentes em relação a sua quantidade e distribuição. Mudanças em sua posição significam variações na quantidade e distribuição da superfície mapeada, expressando homogeneidade ou heterogeneidade e, portanto, áreas de transição na matriz de pixels (imagem multiespectral) (b).

Na figura 3.2a os processos de transição entre diferentes coberturas são representados por bacias de atração, visto que as mesmas expressam a dinâmica de elementos com a mesma funcionalidade (Hénon, 1976; Grebogi & Yorke, 1987). Cada esfera representa o comportamento de uma cobertura da terra em diferentes escalas, e seus componentes em relação a sua quantidade e distribuição. Sua posição no fundo significa quantidade e distribuição hegemônica (homogeneidade) da cobertura mapeada; já sua posição entre o fundo e o topo expressa a variação na sua quantidade e distribuição, significando a maior participação de outras coberturas (heterogeneidade) e, portanto, áreas de transição. No detalhe da Figura 3.2b, observa-se, através de uma representação entre dois membros extremos (cultivo e vegetação natural), a transposição do conceito de dinâmica e transição em sistemas para um plano matricial próprio da estrutura de pixels de uma imagem multiespectral, sendo possível, dessa forma, a espacialização dos elementos envolvidos em diferentes coberturas da terra e sua variação escalar. Neste sentido, os modelos lineares de mistura espectral conseguem um ganho de escala representativo, sendo que nesse trabalho explora-se não apenas o ganho informacional, mas também a estimativa de transições. É importante reiterar, que, no caso de algumas áreas, a delimitação é arbitrariamente imposta por limites de propriedades, porém, essa condição não expressa de fato o comportamento do ecossistema, bem como, não exclui a análise de locais de transição entre, cultivo e remanescentes da vegetação natural dentro desses limites, mas sim, reitera a importância de considerá-los como parte dos processos de alteração.

### **3.5. PROCESSAMENTO DE IMAGENS**

Entre os métodos SMA, destacam-se por sua precisão o SAM (*Spectral Angle Mapper*) e o MTMF (*Mixture Tuned Matched Filtering*) (Kruse *et al.*, 1993; Chen e Reed, 1987; Harsanyi & Chang, 1994), sendo que o sucesso desses algoritmos depende de uma série de procedimentos desenvolvidos originalmente para dados hiperespectrais, e adaptados neste trabalho para uso com dados multiespectrais do sensor ASTER, aqui sintetizados na Figura 3.3.

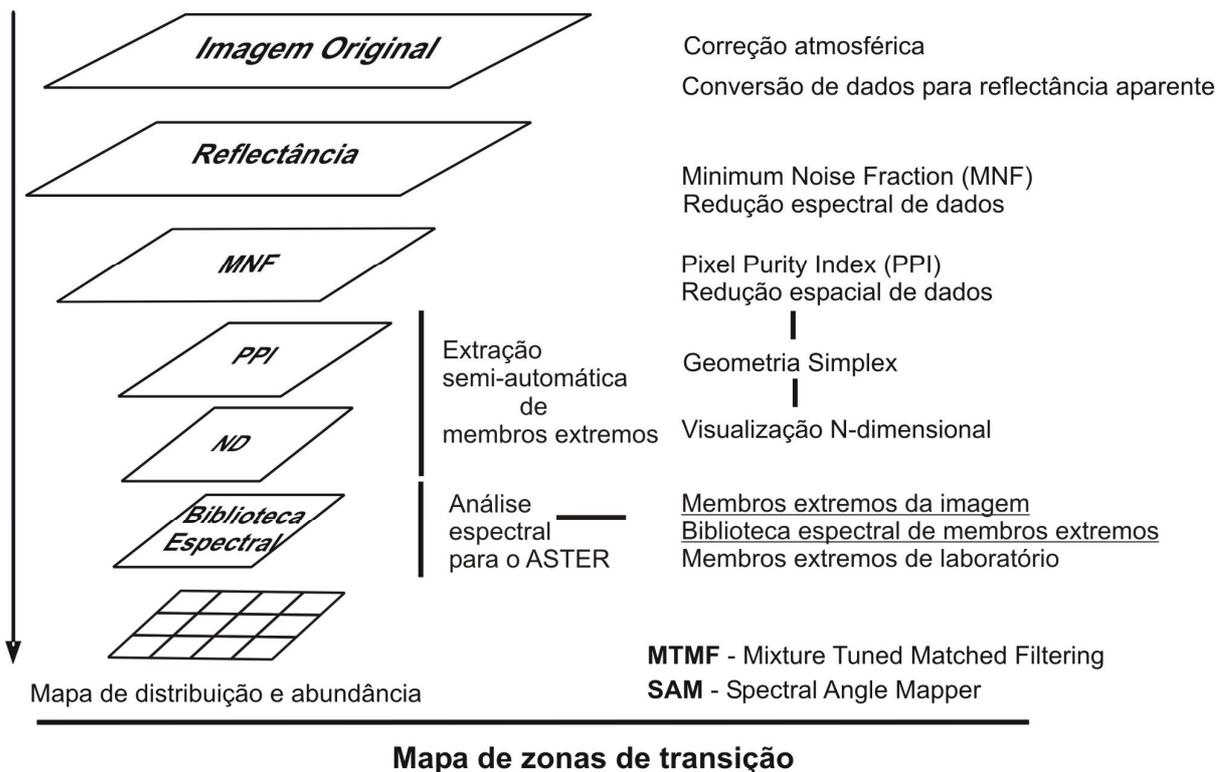


Figura 3.3 - Etapas de processamento hiperespectral aplicados aos dados do sensor ASTER para o mapeamento de zonas de transição. Estão grifados os métodos de extração de membros extremos utilizados neste artigo. Figura adaptada de Boardman *et al.*, (1994).

As 3 cenas originais *Nível 1B* foram submetidas à correção do efeito *crossstalk*, usando o *crossstalk correction software* (ERSDAC, 2003). Esse efeito é causado, no ASTER, pela dispersão da luz incidente na banda 4, a qual é refletida no plano focal de outras bandas do SWIR, causando, por exemplo, o aparecimento de “fantasmas” na interface entre superfícies de terra e água (Iwasaki & Tonooka, 2005). Em seguida, os dados foram compensados para minimização dos efeitos atmosféricos com o emprego do programa *Atmospheric Correction Now* (ACORN), que utiliza o modelo de transferência radiativa *Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model* (MODTRAN) (ACORN, 2002). A vantagem de utilização deste modelo reside na obtenção de um maior refinamento de parâmetros de ordem local, como aspectos sazonais baseados no ângulo de inclinação terrestre expresso em latitudes, assim como a consideração de parâmetros atmosféricos próprios de regiões tropicais. Como produto final, tem-se uma imagem corrigida para reflectância aparente. Uma correção atmosférica bem sucedida é a base para processamentos SMA, visto que a utilização de membros extremos baseia-se em

verdades terrestres dos diferentes tipos de cobertura, as quais são medidas pelos níveis de reflectância dos membros extremos. A retirada dos efeitos da atmosfera também propiciou um excelente ganho de qualidade do mosaico das cenas, visto que níveis de vapor d'água e aerossóis variam temporal e espacialmente (Gao *et al.*, 1993).

Considerando o máximo de precisão na abordagem dos fragmentos, trabalhou-se com uma seleção de bandas nas faixas do VIS/NIR (bandas 1, 2 e 3) e do SWIR (bandas 4-9). Devido à diferença de resolução espacial entre as bandas do VIS-NIR (15m) e do SWIR (30m), foi realizada uma re-amostragem espacial das bandas do SWIR, aumentando artificialmente sua resolução para 15m, permitindo, assim, a composição de uma imagem com 9 bandas espectrais.

### **3.5.1. REDUÇÃO ESPECTRAL DE DADOS - *MINIMUM NOISE FRACTION (MNF)***

A imagem ASTER foi submetida à transformação *Minimum Noise Fraction (MNF)* (Green *et al.*, 1988; Boardman & Kruse, 1994). Esse procedimento de redução espectral é uma derivação da Análise por Principais Componentes (APC), realizada pela aplicação de duas transformadas contrapostas ortogonalmente num plano bidimensional. A primeira transformada dispõe direcionalmente, num sentido, o conjunto de dados com maior variância em torno de seu eixo, sendo que os mesmos apresentam maior ou menor redundância de acordo com a sua distância e disposição ao longo deste eixo; quanto mais próxima maior a correlação. A segunda transformada, da mesma forma, contrapõe ao longo de seu eixo à segunda maior variância, e assim sucessivamente (Fig. 3.4). Esse procedimento é capaz de diminuir a correlação típica advinda da proximidade das características espectrais entre bandas, assim como diminuir a interferência atmosférica, separando os dados com alta decorrelação (maior variância) nas primeiras imagens MNF, e as menos decorrelacionadas (menor variância) nas últimas MNFs. Tal redução da dimensionalidade dos dados torna-se a base para outros procedimentos, como a extração de membros extremos por análise de agrupamento estatístico, ou procedimentos correlatos, dada a concentração da informação num menor número de bandas.

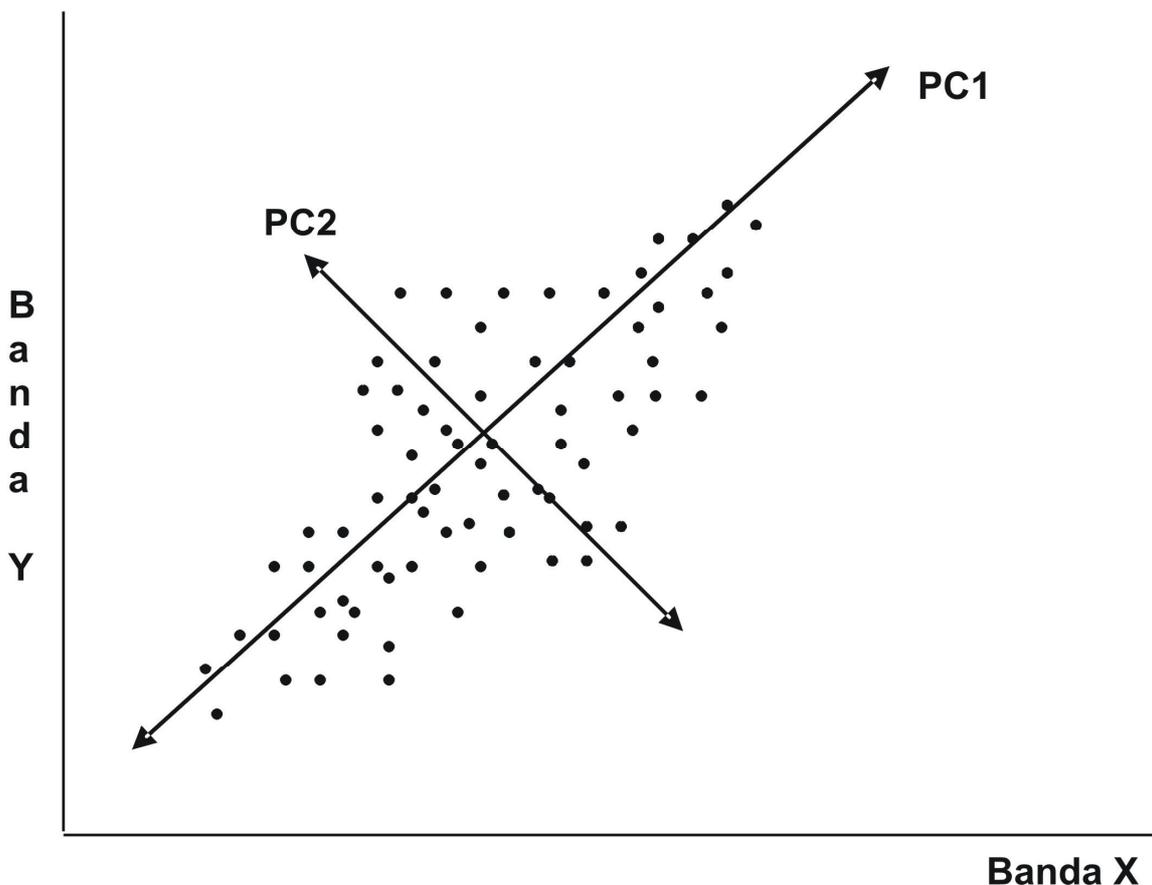


Figura 3.4. Esquema conceitual de seleção de eixos das Principais Componentes (PC) a partir de gráfico de dispersão. (adaptado de Envi-Research Systems, 2003).

No caso do ASTER, essa redução da dimensionalidade dos dados faz-se necessária não pela quantidade de bandas, visto que não se trata de um sensor hiperespectral, mas, sim, como um refinamento de possíveis conjuntos de membros extremos passíveis de separação, os quais são expressos no conjunto de imagens MNF, como pré-processamento para aplicação do algoritmo *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF). Dessa forma, esse procedimento visa forçar a variância do ruído na nuvem de dados da imagem para 1.

### 3.5.2. REDUÇÃO ESPACIAL DE DADOS – *PIXEL PURITY INDEX* (PPI)

Com base nas etapas anteriores, pode se estabelecer, com o *Pixel Purity Index* (PPI) (Boardman *et al*, 1995), parâmetros para redução espacial dos dados. A dimensionalidade dos dados de uma imagem em sua disposição espacial num espaço n-dimensional gera formas geométricas com base em seu comportamento espectral. Essa concepção é descrita como um

*simplex*, que auxilia na determinação das relações de mistura dos materiais presentes nas assinaturas de feições (Smith *et al.*, 1985 e 1990; Bateson & Curtiss, 1993; Boardman, 1993).

A aplicação do *simplex* é refinada a partir da utilização de um índice, no caso o PPI, que pode ser analisado num gráfico de dispersão, no qual, a partir do valor médio dos dados (já em reflectância aparente), estabelece-se um primeiro limiar de correlação com base em um vetor que perpassa a nuvem de dados, sendo que cada conjunto de pixels é localizado mediante o seu valor, com o emprego de um histograma (Fig. 3.5). Dessa maneira, estabelece-se graficamente uma relação de distância do referido vetor, onde se delinea a maior ou menor ocorrência de conjuntos de pixels mais próximos da média, ou seja, junto à região central, e pixels distantes da média, em áreas extremas ao vetor. Outros dois limiares são estabelecidos ao longo do traçado do vetor, na medida do desvio padrão do histograma, um inferior e outro superior. Por decorrelação estatística, os pixels puros, ou seja, com valores de *reflectância* distantes da média geral, ocorrem nas extremidades, enquanto os pixels misturados, que representam a grande maioria, localizam-se na região central. Essa disposição dos dados é submetida a um processo de interações durante o PPI, nas quais são testadas diferentes projeções do *simplex*, cujos pixels que ultrapassem tais limiares mais vezes são selecionados como puros ou membros extremos (Boardman & Kruse, 1994). Cada tipo de alvo, baseado em seu nível de correlação e similaridade espectral com o entorno, pressupõe um número específico de interações, a fim de se refinar, ao máximo, sua resposta.

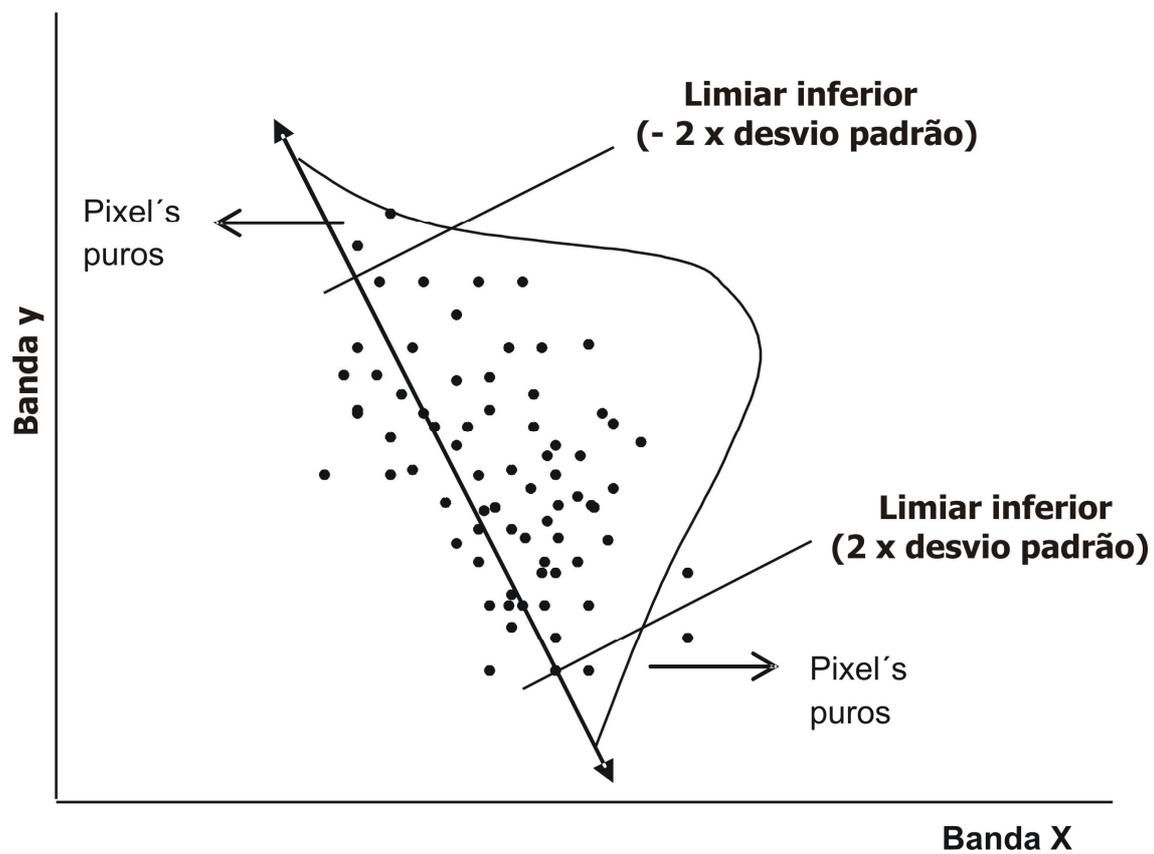


Figura 3.5. Esquema conceitual da aplicação de uma etapa de interação do índice de pureza de pixel (*pixel purity index* - PPI) para seleção de membros extremos por meio da geometria do simplex num gráfico bidimensional de dispersão (Adaptado de Envi – Research Systems, 2003).

### 3.5.3. ALGORITMOS SMA PARA PROCESSAMENTO HIPERESPECTRAL: MTMF E SAM

O algoritmo MTMF é um refinamento do algoritmo *Matched Filtering* (MF) (Chen & Reed, 1987), que estabelece uma medida, de 0 a 1, traçada na forma de um vetor, entre a média dos valores dos pixels considerados n-dimensionalmente (valor 0) e os membros extremos (valor 1), gerando como resultado uma imagem denominada *MF Score*. Nessa imagem, valores intermediários entre 0 e 1 correspondem à porcentagem do membro extremo na mistura espectral. A componente *Mixture Tuned* do algoritmo, por sua vez, objetiva eliminar os falsos positivos, segundo a adoção de cones tridimensionais, cujo diâmetro é controlado por desvios-padrão da nuvem média de pontos com base nas imagens *MF Score*, e centrados nos vetores formados por cada membro extremo, contrapondo-se ao seu próprio grau de improbabilidade num gráfico de dispersão (Fig. 3.6).

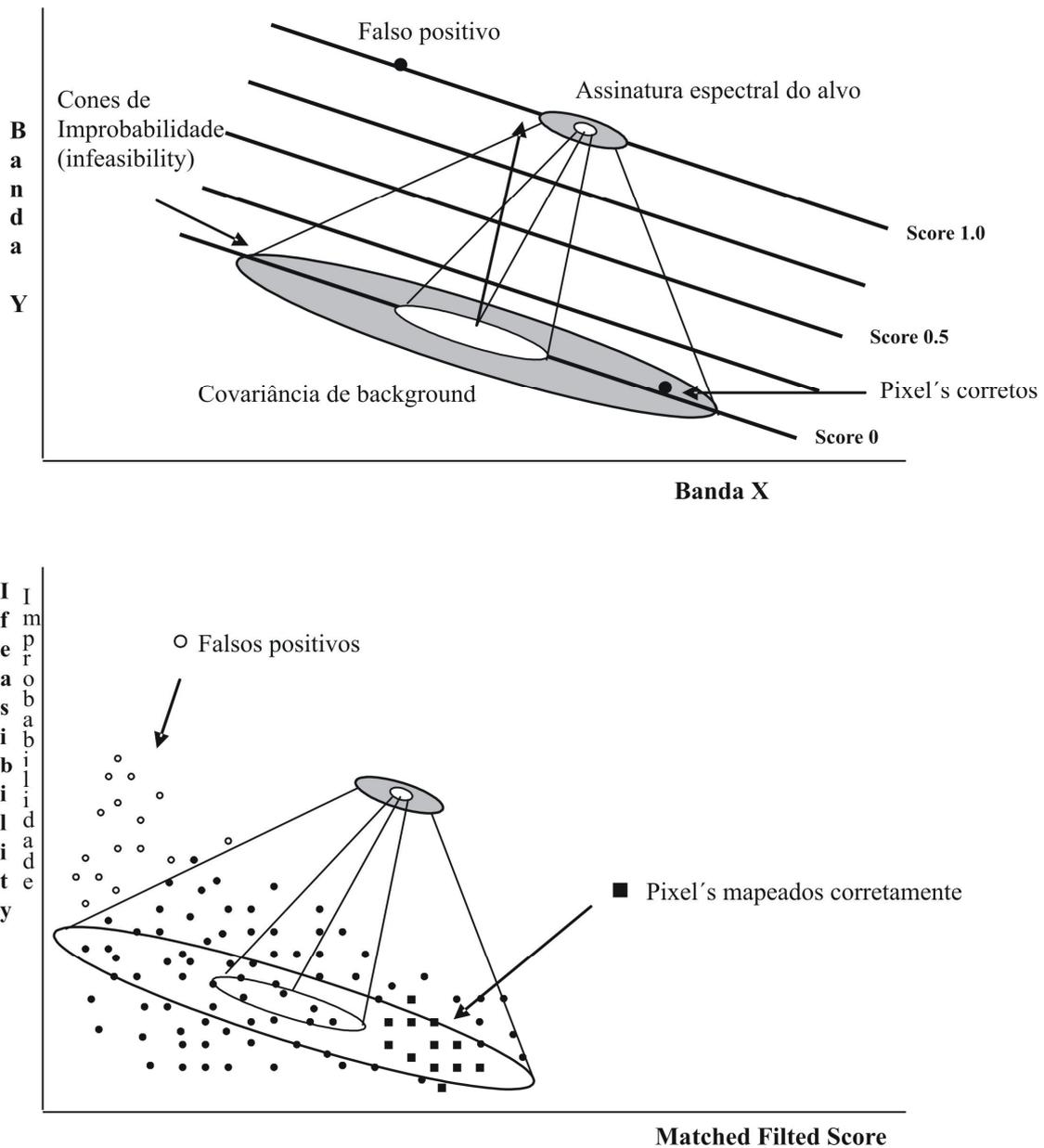


Figura 3.6. Esquema conceitual do *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF) disposto em um gráfico bidimensional de dispersão. O mapeamento de pixels corretos e falsos positivos é feito por meio da relação inversa dos valores de *Infeasibility* e *MF Score*. (adaptado de Envi-Research Systems, 2003).

Esse conjunto de procedimentos do MTMF apresenta um alto nível de refinamento, sendo indicado para detecção de alvos raros ou escassos. Por operar na escala de sub-pixel, o algoritmo permite a detecção de sutilezas espectrais na menor resolução imageada. Esse aspecto é uma vantagem em estudos de pequena escala em ecossistemas baseados em dados ASTER, visto que

informações precisas sobre pequenas áreas com predominância de determinados tipos de fragmentos podem ser determinadas.

Na classificação SAM (Kruse *et al.*, 1993), os valores de membros extremos (e) e pixels da imagem a serem testados (t) são transformados em vetores num espaço n-dimensional, onde n = número de bandas e i é o valor individual de cada banda, sendo que quanto maior o ângulo ( $\alpha$ ) entre os mesmos, menor a sua similaridade, e vice-versa. Essa relação é expressa na equação (adaptado de Kruse *et al.*, 1993):

$$\theta = \text{Cos}^{-1} \left[ \frac{\sum_{i=1}^n t_i e_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2 \sum_{i=1}^n e_i^2}} \right]$$

Equação 3.1. Spectral Angle Mapper (SAM).

O processamento SAM gera dois produtos (1) uma imagem de classificação contendo a distribuição espacial dos membros extremos considerados no processamento, para determinado limiar máximo, em radianos, entre os vetores de referência e os vetores desconhecidos; (2) um conjunto de imagens denominadas *Rule* images, contendo, para cada pixel, os ângulos, em radianos, entre o vetor do membro extremo de referência e o vetor derivado dos pixels desconhecidos na imagem (Fig. 3.7).

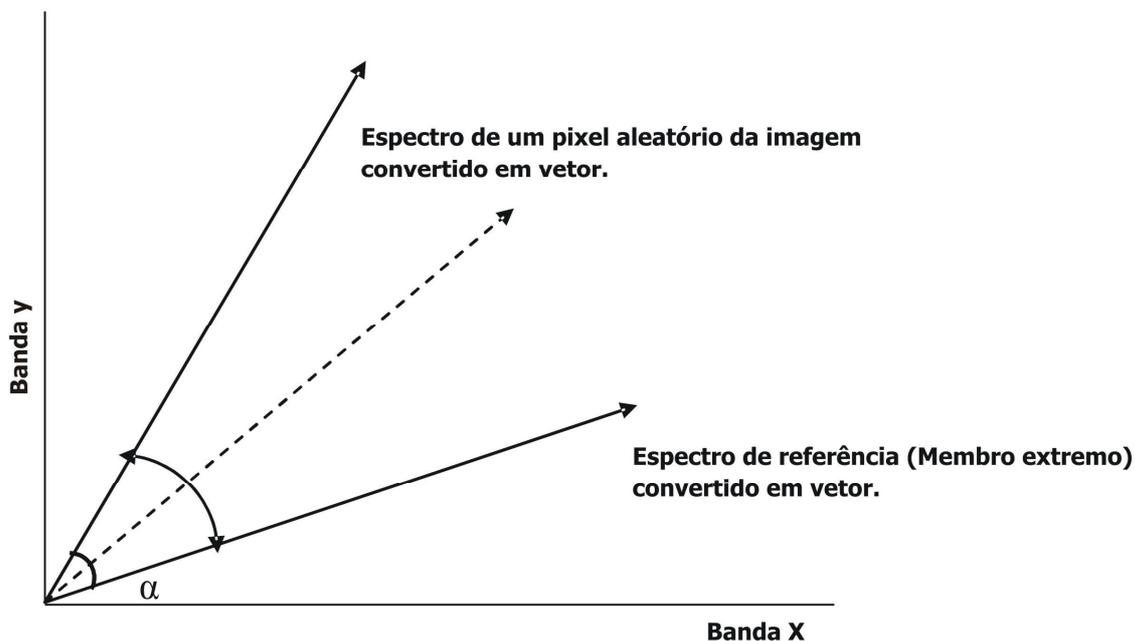


Figura 3.7. Esquema conceitual da aplicação do *Spectral Angle Mapper* (SAM) simplificado para duas dimensões. (adaptado de ENVI – RESEARCH SYSTEMS, 2003)

A relação de ângulos com os níveis de cinza da imagem possibilita o estabelecimento de um amplo gradiente entre diferentes membros extremos, com base na resolução radiométrica do sensor. No caso do ASTER, são 256 variações possíveis (0-255 DN) com uma cobertura de 9 bandas ( $n=9$ ) no VIS/NIR/SWIR, o que proporciona um método eficaz para o mapeamento de zonas de transição entre diferentes tipos de superfície. A acurácia desse procedimento baseia-se no correto monitoramento de ângulos e ajustes de histograma com base em alvos de controle.

### 3.6. Resultados e discussões

#### 3.6.1. Análise Espectral de Membros Extremos no ASTER

Foram utilizados membros extremos de bibliotecas espectrais juntamente com espectros extraídos da própria imagem. Cada membro extremo foi validado segundo alvos de controle reconhecidos em campo e georeferenciados via GPS, nos quais foram realizadas coletas de amostras de solo (detalhes no ítem 3.3) e identificação de 9 diferentes fitofisionomias, entre usos da terra e vegetação natural: cerrado, cerradão, campo cerrado, campo limpo, campo sujo, floresta estacional semidecídua, eucalipto, grama, pinus. As assinaturas espectrais dos membros extremos foram reamostradas e analisadas segundo a resolução espectral do ASTER.

### **(i) Membro extremo - Solo Exposto**

Trabalhos relacionados ao estudo de padrões de comportamento espectral de solos tropicais (Madeira Netto *et al.*, 1993; Valeriano *et al.*, 1995; Epiphanyo *et al.*, 1987 e 1992) demonstram uma dissociação entre tipos de assinaturas e classes de solos. Nesse caso, não é simples o estabelecimento de um método de classificação isonômico de solos utilizando o seu comportamento espectral registrado na resolução espectral de sensores remotos multiespectrais clássicos. Uma alternativa para o seu mapeamento está na detecção de componentes argilo-minerálicos, destacando-se as argilas, as quais aparecem em abundância, e o quartzo. A porcentagem de participação de ambos embasa a classificação das características granulométricas, que determinam sua arquitetura e capacidade de drenagem. Neste sentido, a presença do argilo-mineral caulinita, pode ser um indicador de solos mais resistentes a erosão, frente a processos de lixiviação e carreamento típicos de solos tropicais, particularmente em áreas de Cerrado (Eiten, 1990).

Nesse trabalho, foi utilizada uma amostra de caulinita (PS-1A) da biblioteca espectral do *Jet Propulsion Laboratory/National Aeronautics and Space Administration* (JPL/NASA), reamostrada para as bandas do ASTER e comparada com um membro extremo da própria imagem retirado de área com Latossolo Vermelho (LV1) (Fig. 3.8).

Para um melhor delineamento das feições de absorção, foi aplicada uma função matemática de normalização para a remoção do contínuo (Fig. 3.8). Esse método consiste no estabelecimento de uma reta (função) entre os valores de reflectância em cada comprimento de onda, os quais são divididos pelos valores de reflectância do espectro de referência. Dessa maneira, ressaltam-se os centros das feições de absorção mediante a eliminação de valores redundantes nos demais comprimentos de onda, em relação ao material que se deseja destacar (Clark & Roush, 1984; Clark, 1999). Dessa maneira, pode se identificar, em ambos os membros extremos, a principal feição de absorção das hidroxilas (OH), por volta de 2.2  $\mu\text{m}$ , próprias da caulinita e associadas às argilas. Mapas pedológicos (IPT, 1981) e análises granulométricas dos alvos de controle confirmam o alto teor de argila dessas áreas, sendo que o ASTER mostra-se apto para mapeamento dessa feição de absorção nas bandas de 5 a 8 (Fig. 3.8). Resultados semelhantes haviam sido alcançados por Galvão *et al.* (2005) em áreas de savana tropical, onde se destaca a forte influência da vegetação não fotossinteticamente ativa (NPAV), o que pode mascarar os resultados dependendo do método de processamento utilizado. Propõe-se como alternativa para

superação dessa limitação a contraposição de membros extremos de argila aos de frações de vegetação, principalmente gramíneas e herbáceas, gerando uma gama de combinações possíveis no SMA, podendo-se estimar áreas de solo-nu, as quais apresentarão misturas espectrais diferentes em relação a áreas cobertas por vegetação. Soma-se a esse procedimento a estimativa da presença de areia, que pode refinar as estimativas de composição de solos.

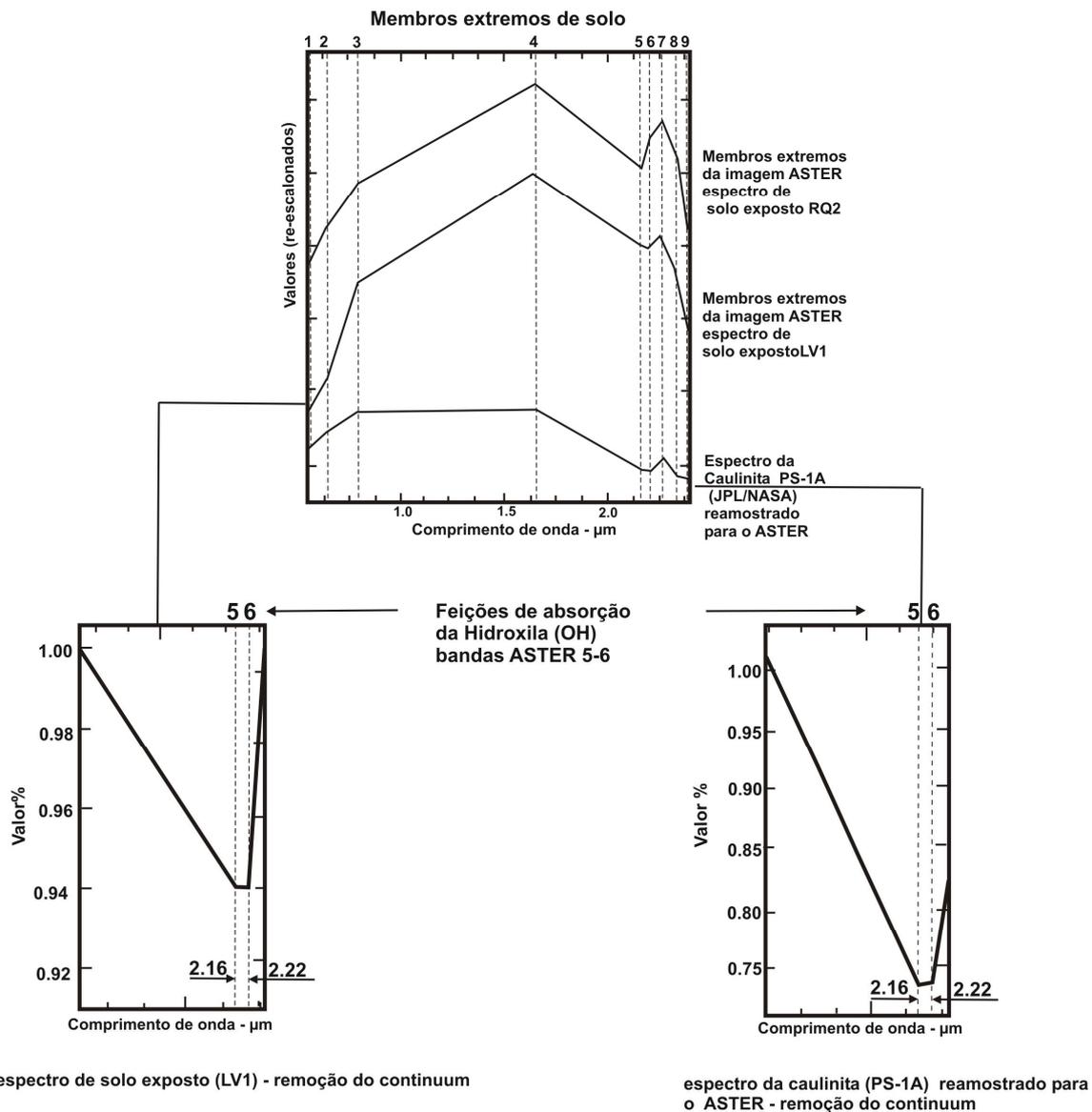


Figura 3.8. O membro extremo de caulinita (PS-1A) (JPL/NASA) foi reamostrado para a resolução espectral do sensor ASTER e comparado com o membro extremo derivado da imagem de solos com alto teor de argila (LV1), validando as feições de absorção nas bandas de 5-9 (SWIR). Para estimativa da presença de areia foi utilizado um membro extremo da imagem de neossolos quartzarênicos (RQ2).

A detecção das coberturas arenosas deu-se a partir da coleta de membros extremos, na própria imagem, em áreas com Neossolos Quartzarênicos (RQ2), os quais possuem, em sua composição, alto teor de areia. Visto que o quartzo, principal componente da areia, não apresenta feições de absorção nas bandas do NIR e SWIR (Salisbury, 1991), os principais fatores de discriminação deste tipo de solo são sua alta reflectância, sobretudo nas bandas 2 e 3. Esse comportamento denota total ausência de compostos de ferro (e.g. hematita, goethita) comumente encontrados em solos argilosos, o que corrobora também sua baixa umidade, devido à drenagem excessiva própria de solos com pouca presença de argila (Fig. 3.8). A validação destas áreas foi feita através de mapa pedológico (IAC, 1999) e análise granulométrica de 20 amostras de solo em 3 profundidades (0-20, 80-100, 180-200 cm), as quais apresentaram, em média, 89% de areia.

#### **(ii) Membro extremo – Vegetação**

Considerando-se os aspectos biofísicos, analisou-se o comportamento espectral típico de uma folha verde re-amostrada para a resolução espectral VNIR-SWIR do sensor ASTER, identificando os seus parâmetros comportamentais para este sensor. Destaca-se a região de maior absorção de clorofila ( $\sim 0.68$  a  $\sim 0.73\mu\text{m}$ ) e seu principal gradiente de inflexão no espectro, próximo ao *redge edge* (Knipling, 1970) (Fig. 3.9a) indo do VIS na banda 2 ( $0.63 - 0.69\mu\text{m}$ ), ao NIR na banda 3 ( $0.78 - 0.86\mu\text{m}$ ) (Fig. 3.9b). Podem se estimar genericamente os pigmentos detectados por essa faixa do espectro como sendo: 65% de clorofila, 6% de carotenos, 29% de xantofilas (Ponzoni, 2001). A região do SWIR é responsável pela detecção de componentes bioquímicos latifolares, correspondendo, no ASTER, às bandas de 5 a 9 ( $1.6$  a  $2.43\mu\text{m}$ ) (Fig. 3.9b). Identifica-se uma inversão sintomática proporcional da reflectância entre as bandas 3 e 4, que se pode atribuir à presença de água na estrutura latifoliada ressaltada na banda 4, bem como a variação de clorofila evidenciada na banda 3 (Fig. 3.9b). A detecção de tais elementos presentes num comportamento espectral típico pode, a priori, delinear a diferenciação básica entre estrutura arbórea, herbácea e gramínea, visto que áreas densamente vegetadas possuem maior presença de folhas, com maior quantidade de água foliar e pigmentos.

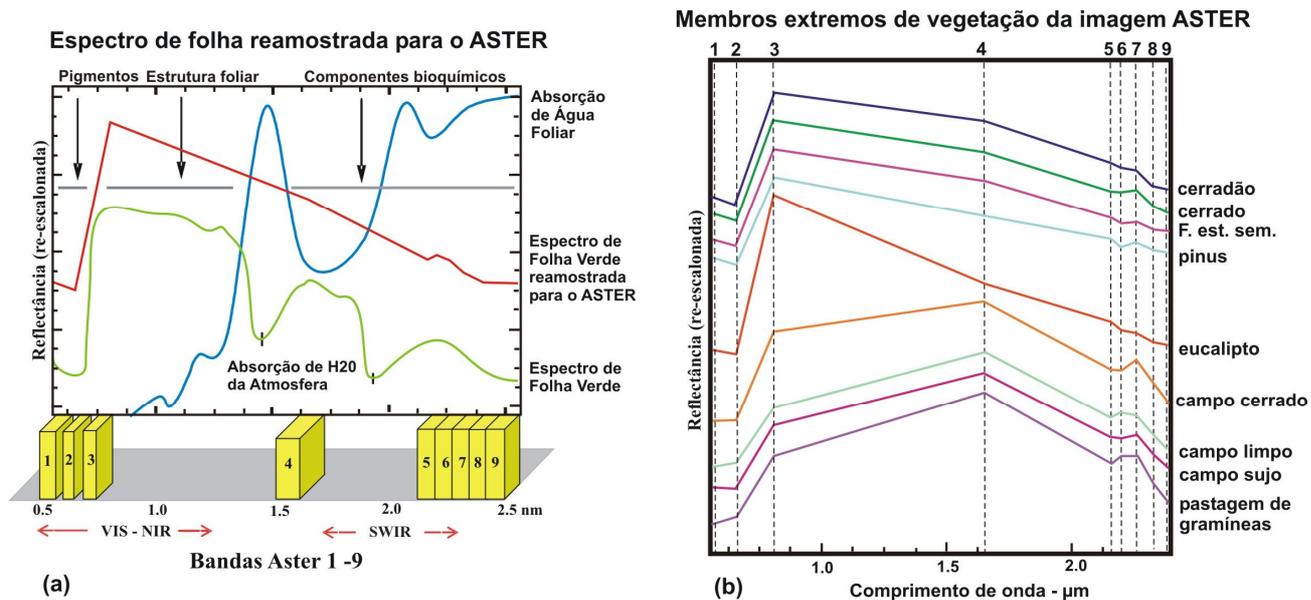


Figura 3.9 - O esquema mostra o comportamento típico de uma folha verde (Fig. a) em relação aos membros extremos das fitofisionomias coletadas na imagem (Fig. b). Evidencia-se a curva típica relativa a região de maior absorção de clorofila entre as bandas 2 e 3 (0.63 - 086 $\mu$ m) (Fig. b), e suas diferentes variações em relação a formações gramíneas e arbóreas, assim como a retenção de água pela estrutura latifoliar na banda 4 (1.60-1.70 $\mu$ m) (Fig. b). Os espectros estão escalonados para melhor visualização.

Os membros extremos coletados seguem as mesmas variações de inversão típica, derivada da absorção de clorofila expresso na banda 2, e água foliar na banda 4. Pode se observar esse aspecto comparando-se amostras de campo cerrado, cerrado e cerradão (Fig. 3.9b). No caso do campo cerrado, a banda 3 apresenta menor reflectância que a banda 4, ocorrendo o contrário em áreas de vegetação mais fechada. Isso se deve à densa estrutura latifoliada em áreas de fitofisionomias arbóreas com grande presença de clorofila, as quais apresentam uma maior absorção na banda 2 (VIS) e variações referentes a diferenças na estrutura celular da folha, assim como no dossel, expressos por sua vez na banda 3 (NIR). Portanto, entre as bandas 1 e 4 do VIS/NIR (Fig. 3.9b), são observados diferentes níveis de água foliar entre fitofisionomias arbóreo-arbustivas e gramíneo-lenhosas devido à variação de reflectância e conseqüente diminuição de albedo (e.g. cerrado vs campo vs cerradão), assim como variações típicas na forma das folhas destas formações vegetais (Guyot, 1995; Jacquemoud & Ustin, 2001).

Porém, a maior dificuldade encontra-se na separação de subtipos muito próximos espectralmente, que apresentam sutis feições de absorção, tais como estruturas arbóreas densas. A mesma dificuldade é encontrada em situações com grande área foliar, como mata ciliar vs

cerradão e, no caso de gramíneas diversas, comuns em campo cerrado vs pastagem vs campo sujo. No caso específico da pastagem de gramíneas, observa-se um comportamento espectral atípico com um NIR de baixa reflectância, e alta reflectância em 1.650 nm (banda 4), isso se deve a diversos fatores como: baixa umidade, manejo, resquícios de fogo, bem como pela geometria de dossel deste tipo de gramínea, que não é tipicamente planófilo, e sim, tendendo ao erectófilo em sua totalidade, diferentemente do que é usual nesta formação (Fig. 3.9b). Neste caso, a maior resolução espectral na região do SWIR demonstrou ser capaz de delinear diferenças nas etapas de senescência, assim como presença de vegetação não fotossinteticamente ativa (NPAV) (grama seca) e possíveis resquícios da ação do fogo. Esses elementos, por sua vez, são fundamentais não apenas na formação das savanas, mas como indicadores de fragmentação da vegetação, os quais podem ser aferidos por compostos químicos na planta, tais como: lignina, celulose, amido, açúcares e proteínas, detectáveis nas feições de absorção das bandas 5 a 7. Esse tipo de variação fica nítida ao se observar, por exemplo, os membros extremos de eucalipto, cerradão, campo cerrado e campo limpo (Fig. 3.9b).

A consideração do SWIR em estudos de vegetação para estimativa de componentes bioquímicos ainda é relativamente recente, sendo um dos motivos a reduzida resolução espectral dos sensores orbitais atuais nesta região do espectro. Dessa forma, mesmo que ainda haja divergências a respeito dessa abordagem, exigindo uma maior quantidade de estudos, os resultados desse trabalho confirmam a capacidade do ASTER em reproduzir o comportamento espectral desses componentes no SWIR, a qual já foi avaliada com sucesso por Almeida & Souza Filho (2005) em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, o que se constitui, portanto, num dos diferenciais na identificação de diferentes fitofisionomias nessa escala de abordagem.

### **3.6.2. DETECÇÃO DE FRAGMENTOS**

Com base na análise espectral dos membros extremos foram considerados separadamente, nos processamentos (SAM, MTMF): o conjunto de bandas 1 a 3 (somente VIS/NIR), de 1 a 9 (VIS/NIR e SWIR) e as bandas de 4 a 9 (somente SWIR). Corroborando as análises preliminares, a utilização do VIS/NIR mostrou-se satisfatória para a identificação das fitofisionomias elencadas, tendo como referência os alvos de controle, onde se verificou uma maior capacidade de discretização baseada nos maiores gradientes entre bandas (arbóreas, herbáceas e gramíneas), considerando as características biofísicas latifolias para vegetação (Knippling, 1970), ressaltadas

nas bandas de 1 a 4. Ao considerar-se conjuntamente o SWIR (bandas 5-9), os mínimos gradientes reconhecidos nessas bandas foram capazes de detectar outros subtipos não considerados nos alvos de controle inicialmente. No caso do solo, a consideração conjunta das 9 bandas também apresentou bons resultados, visto que se trata de um tipo de alvo com feições espectrais diagnósticas simultaneamente nas regiões do VIS e NIR (minerais contendo ferro férrico e ferroso em sua composição) e SWIR (minerais portadores da molécula hidroxila (OH), particularmente as argilas) (Rowan & Mars, 2003).

Considerando-se o diagrama de dispersão entre *matched filter score* e *infeasibility*, derivados do MTMF, a separação entre os pixels com assinatura genuína dos membros extremos e os falsos positivos foi realizada com base na seleção dos pixels com mais baixos valores simultâneos para essas duas variáveis. Adicionalmente, pontos de controle de campo (cf. círculos na Figura 3.10) foram utilizados para restringir o resultado da classificação, tornando o processo decisório menos subjetivo. Os resultados advindos de alguns alvos e seus respectivos diagramas de dispersão podem ser observados na Figura 3.10.

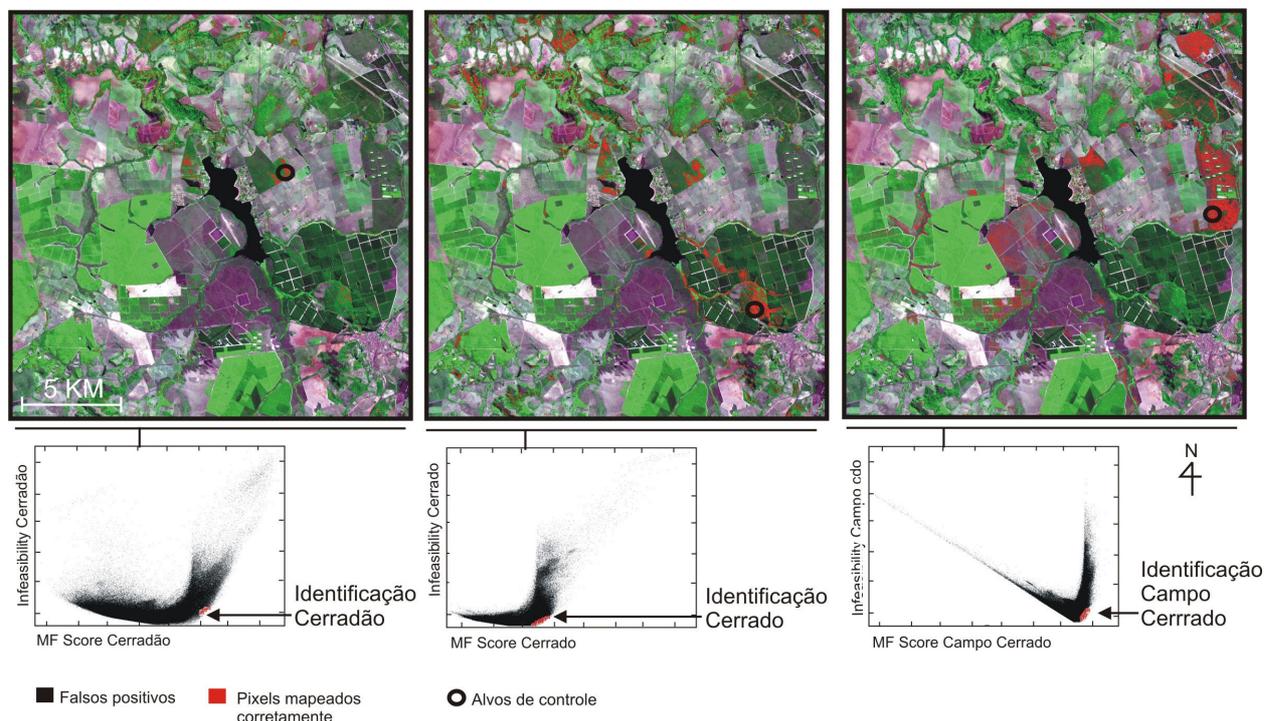


Figura 3.10. Gráficos de dispersão MTMF. Por meio da aplicação do MTMF os pixels identificados corretamente são mapeados diretamente nas imagens ASTER (composição colorida 231 RGB). Com o auxílio dos alvos de controle é possível estabelecer-se o melhor ajuste para identificação de cada cobertura, tendo como base a contraposição no diagrama de dispersão de dados *MF score* e *infeasibility*, provenientes de membros extremos individuais. Na figura estão os exemplo de cerradão, cerrado e campo cerrado.

Com a utilização do MTMF, somado ao rígido controle de *membros extremos*, conseguiu-se a separação de 9 (nove) tipos de cobertura vegetal, inclusive dos subtipos arbóreos (cerradão), gramíneo-lenhosos (campo limpo, campo sujo) e reflorestamento de grande porte (pinus), assim como áreas mistas, com formações arbóreas e gramíneas, como é o caso do campo cerrado. No caso dos solos, foram identificados os extremos de argila e areia em áreas desprovidas de vegetação, assim como a mistura entre esses alvos e o seu recobrimento em áreas vegetadas (Figura 3.11).

Um exemplo da precisão alcançada pode ser demonstrado com a validação de um dos alvos de controle na principal área da estação ecológica, destacada na figura. 3.11b. Esta área foi classificada originalmente, a partir de mapeamentos na escala de 1:25 000, como sendo toda ocupada por cerradão (savana florestada) (SMA/IF, 2002). Porém, com o mapeamento realizado foi possível identificar, neste mesmo local, fitofisionomias de cerrado, campo cerrado, campo sujo, campo limpo e remanescentes de pinus. Por toda a área foram identificados fragmentos de pequeno porte, remanescentes de savana e floresta estacional semidecidual, os quais se encontram, em grande parte, fora da área de preservação, muitos em pequenas propriedades em meio a pastagens ou áreas de cultivo.

Áreas de recuperação foram não apenas identificadas, mas também classificadas. A figura 3.11c mostra que parte das glebas, anteriormente utilizadas para plantação de pinus, hoje apresentam formações de cerrado, cerradão, floresta estacional semidecidual e campo cerrado. Essas áreas constituem um bom exemplo de transição, apresentando grande heterogeneidade de tipos de cobertura, as quais podem, com o decorrer do tempo, derivar para diferentes estados, assumindo qualquer uma das coberturas identificadas de maneira homogênea. O contrário pode ser verificado na Figura 3.11b, que, por tratar-se de uma área preservada, apresenta grandes porções homogêneas de um tipo de cobertura, no caso campo limpo. Neste mesmo recorte, no setor nordeste, é possível identificar ainda uma extensa mancha de areia ao longo da margem leste da Represa do Lobo, em meio a fragmentos de savana.

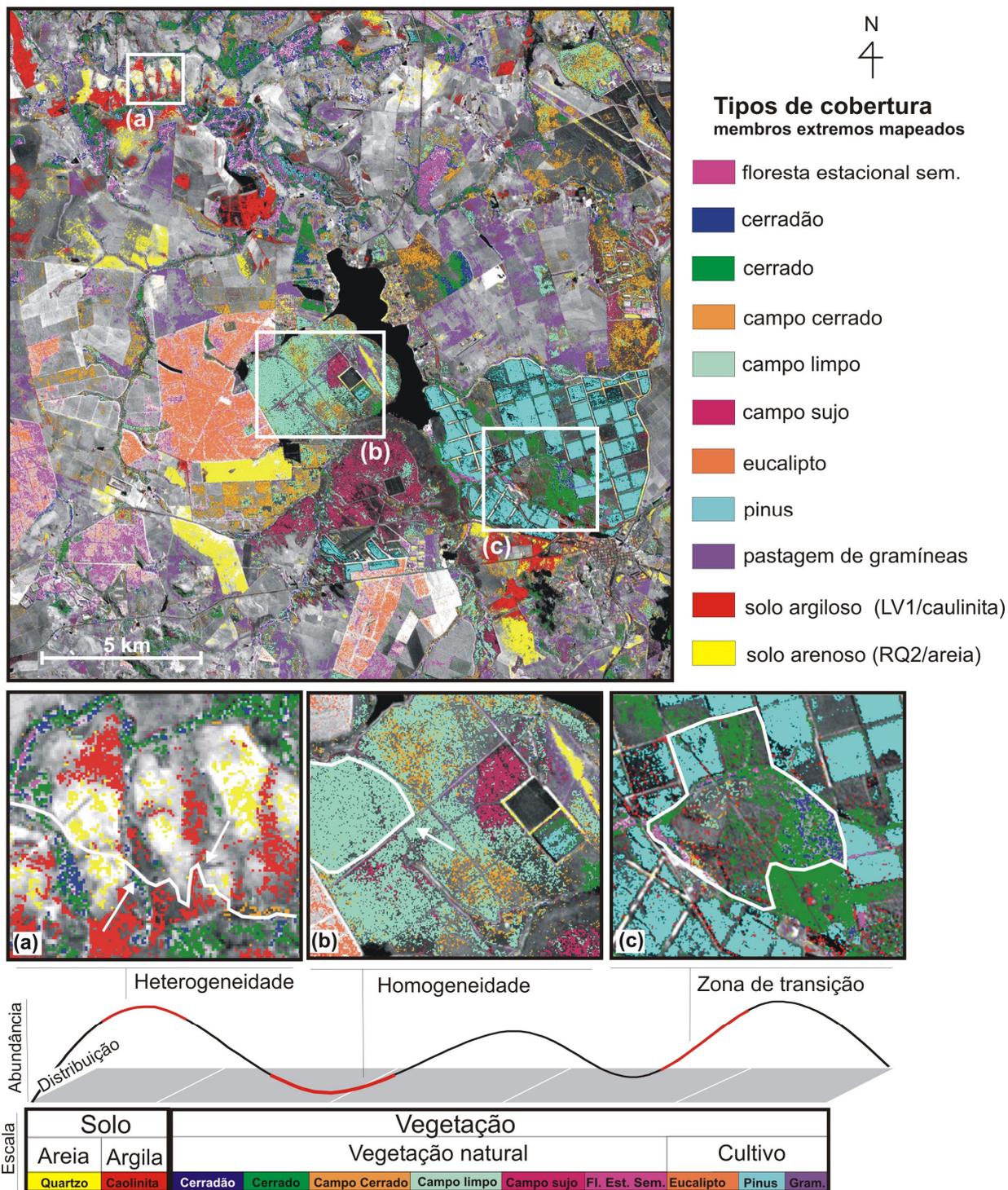


Figura 3.11. Resultados do processamento MTMF aplicado a imagem ASTER. No detalhe pode-se observar áreas de grande heterogeneidade com pequenos fragmentos de diferentes tipos de cobertura e suas áreas de transição (a e b). Também observa-se áreas com pouca variação nos tipos de cobertura, constituindo-se em áreas homogêneas em locais de vegetação natural preservada (c).

A noroeste da área de estudo, em meio a manchas de solos arenosos e resquícios de vegetação, pode-se detectar uma maior presença de solos argilosos, resultado do intemperismo de rochas basálticas ao norte, associadas a Latossolos do local (IAC, 1999) (Fig. 3.11a). Esse recorte apresenta acentuada heterogeneidade de tipos de cobertura vegetal e mistura de solos argilosos e arenosos numa pequena área, constituindo-se num tipo de mosaico muito comum devido ao intensivo uso da terra. As manchas arenosas podem ser observadas com maior precisão, e ocorrem predominantemente ao sul e no centro da grande formação de Neossolos Quartzarênicos (IAC, 1999). Um dado que chama a atenção é a grande quantidade de solos arenosos com áreas equivalentes a dezenas de metros. Essas áreas foram notadas nos trabalhos de campo, porém, com o mapeamento baseado nos dados ASTER, foi possível identificar áreas menores, disseminadas por todo o local, que de outra maneira passariam despercebidas. Muitas dessas áreas já apresentam predominância da areia sobre diversos tipos de vegetação rasteira, inviabilizando o cultivo e diminuindo as chances de recuperação da vegetação natural. Resta saber se esse conjunto de manchas arenosas vem apresentando aumento, o que poderia constituir um processo de arenização.

### **3.6.3. ZONAS DE TRANSIÇÃO**

Visto que o algoritmo MTMF opera na escala de sub-pixel, a identificação dos tipos de cobertura torna-se mais precisa. Porém, as transições entre as coberturas são discretas, havendo sobreposição entre os pixels mapeados, já que se trata de uma imagem de classificação. Com a utilização do SAM foi possível apurar esse procedimento, estabelecendo mínimos gradientes de transição de maneira contínua entre diferentes tipos de cobertura (Fig. 3.12g). Para isso, foram geradas *Rule Images* a partir dos membros extremos, sendo que os níveis de transição de cada tipo de cobertura foram estabelecidos a partir do monitoramento de ângulos das imagens em relação aos alvos de controle, e de ajustes de histograma (Fig. 3.12d, e, f).

A visualização dos resultados dá-se a partir da montagem de triplets (RGB) com as *Rule images* dos tipos de cobertura as quais se deseja estabelecer transições. Pode se verificar essa situação na figura 3.12a, cuja classificação permite a identificação de areia (RQ2), caulinita (LV1) e gramíneas, sendo que em áreas homogêneas, com predominância de apenas uma dessas coberturas, as cores são bem definidas nos extremos do triângulo (vermelho, verde e azul). Já em áreas heterogêneas, com mistura de cobertura, as cores assumem um caráter transitório,

deslocando-se dos extremos. Essa variação de cores é capaz de mapear transições contínuas e que se sobrepõem diferentemente do MTMF, que classifica cada tipo de cobertura de maneira discreta, não proporcionando a mesma noção de transição entre elas (Figura 3.12b).

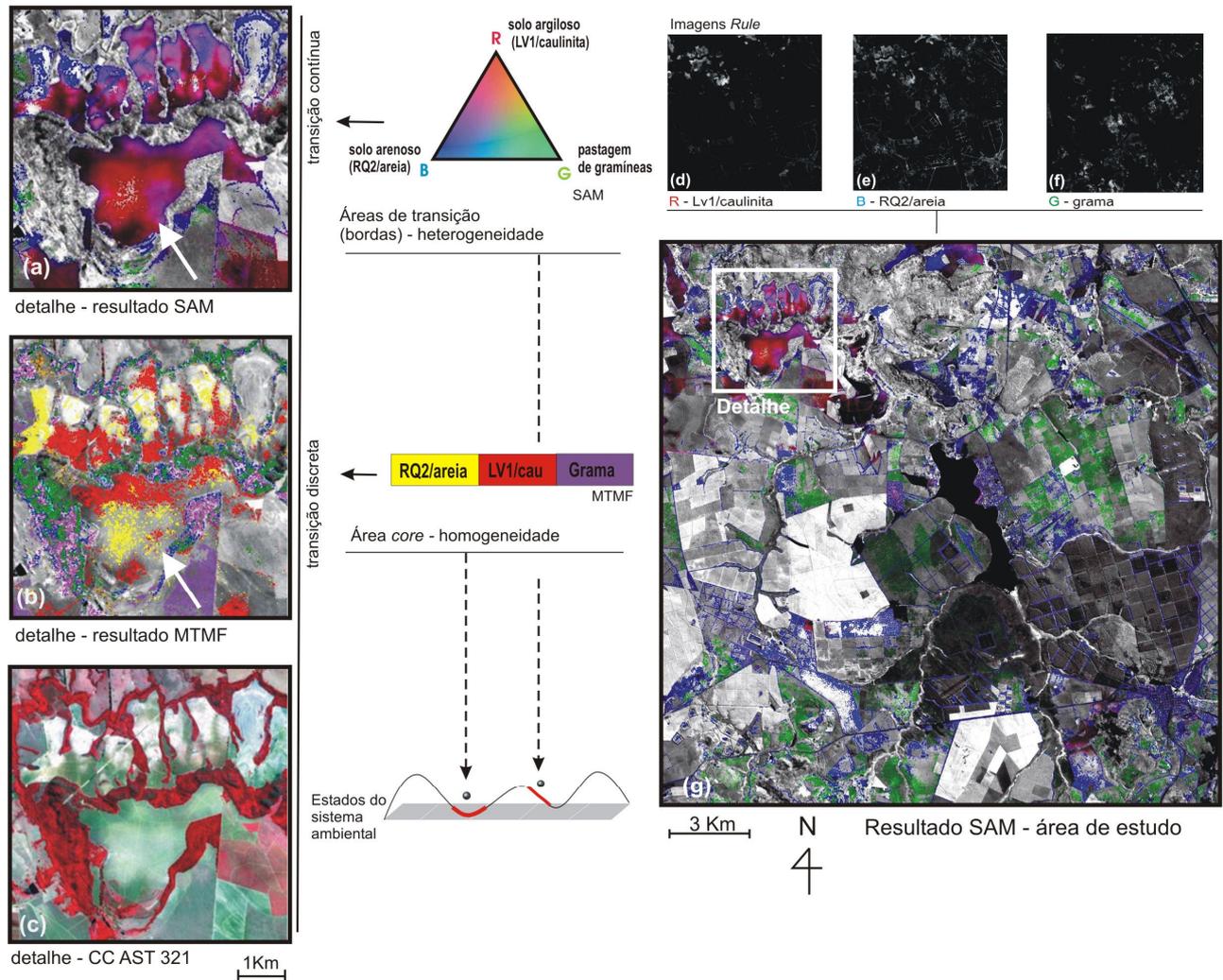


Figura 3.12. Ilustração dos diferentes tipos de transições mapeados através das técnicas SAM e MTMF. Através do SAM pode-se estabelecer gradientes contínuos de acordo com a variação de ângulos entre 0.0 a 0.9, que pode ser obtida através do ajuste de histograma (g). Nota-se a variação de cores do azul (RQ2) para o vermelho (LV1), passando por tons de lilás devido à transição entre os membros extremos estabelecida nos pixels na cena em detalhe (d, e, f). No MTMF a identificação dos tipos de cobertura é mais precisa, porém a transição é discreta, pois baseia-se na proporção mínima do membro extremo no pixel (b). Para comparação encontra-se no detalhe c a cena original AST 321.

Comparando-se os resultados derivados do SAM (Fig. 3.12a) e MTMF (Fig. 3.12b), com o detalhe da cena AST 321 (RGB) original (Fig. 3.12c), numa das áreas mais heterogêneas, verifica-se uma maior precisão dos dados mapeados, não apenas no que se refere à separação de tipos de cobertura em nível de detalhe, assim como no estabelecimento de zonas de transição entre as mesmas.

### **3.7. CONCLUSÕES**

A adaptação do processamento hiperespectral aos dados do sensor ASTER proposta neste trabalho mostrou-se satisfatória para o mapeamento de áreas de transição numa escala de semi-detalhe, considerando processos de fragmentação em ambiente tropical. Os resultados obtidos pelo método MTMF permitiu a detecção de pequenos fragmentos, estabelecendo áreas heterogêneas em escala de detalhe. A utilização do SAM, por trabalhar numa escala de pixel-total, mostrou-se menos precisa, porém de fundamental importância no que se refere à possibilidade de se estabelecer gradientes contínuos entre os vários tipos de cobertura. Dessa forma, a consideração conjugada de diferentes tipos de cobertura da terra e seu mapeamento mediante seus principais componentes físicos e químicos propiciado por essa abordagem, mostrou-se capaz de estabelecer gradientes entre os diferentes estágios de alteração de vegetação e solo.

Considerando a forte influência da atmosfera em climas tropicais, este estudo recomenda um rígido controle dos membros extremos, assim como uma correção atmosférica baseada em parâmetros locais, visto que essas etapas de pré-processamento são fundamentais em procedimentos de SMA. Existe uma escassez de bibliotecas de referência para uso em regiões inter-tropicais, sendo que o uso de membros extremos da própria imagem torna-se uma necessidade, representando o primeiro passo para estudos comparativos do comportamento espectral de alvos de diferentes áreas a partir de sensores multiespectrais.

Mesmo com o refinamento do comportamento espectral da imagem estabelecido pela sua conversão para reflectância aparente, recomenda-se cuidado em métodos semi-automáticos de detecção de membros extremos. Testes de extração automática de membros extremos realizados neste trabalho, com a utilização do algoritmo *Pixel Purity Index* (PPI) e do tetraedro, ambos baseados em princípios na geometria do simplex (Boardman *et al.* 1995; Boardman, 1993), não atingiram uma separação satisfatória de membros extremos, sendo que os extremos dos vértices

apresentaram membros extremos incongruentes com o objetivo da análise. Pode-se atribuir esse resultado ao número reduzido de bandas, visto que é um procedimento voltado para dados hiperespectrais, assim como a grande heterogeneidade de coberturas, visto que a vegetação, assim como o solo, são alvos genéricos na paisagem, apresentando baixa decorrelação entre bandas, diferentemente de minerais puros, alvos para os quais o SAM e MTMF foram desenvolvidos originalmente. A melhor opção, portanto, foi a utilização de membros extremos coletados nos alvos de controle, para essa escala de abordagem.

Em relação às características técnicas do ASTER, este trabalho constatou um aumento do número fitofisionomias mapeadas em relação aos alvos de controle com a utilização conjunta das bandas VNIR/SWIR (9 bandas). Essa verificação indica uma melhoria na capacidade de detecção de tipos vegetacionais relacionada ao detecção de componentes bioquímicos expressos na faixa SWIR do espectro, assim como sua correlação com as feições de absorção no ASTER. No que se refere aos solos, o uso conjunto das bandas VNIR-SWIR também gerou os melhores resultados, devidos ao aproveitamento de gradientes relativos a compostos de ferro no solo (bandas VNIR) e hidroxilas associadas a argilas (bandas SWIR). Os resultados no mapeamento de solo confirmam a capacidade do ASTER na detecção de componentes minerais, com destaque para a capacidade de discriminação e identificação de argilas, como a caulinita, cuja resposta no conjunto de bandas contínuas no SWIR (5-9) é diagnóstica. Particularmente no que se refere as características pedológicas, o reconhecimento de um número considerável de porções de solos arenosos associadas a retirada do Cerrado na área de estudo, nos coloca a necessidade de um monitoramento contínuo desses locais, a fim de se determinar seu possível aumento, o que poderia constituir um processo de arenização.

Ainda existe carência de estudos ecossistêmicos que considerem a interdependência das alterações de micro, meso e grande escala. Neste sentido, o uso dos dados do sensor ASTER associados a algoritmos hiperespectrais, utilizados neste trabalho, demonstram um caminho eficiente para estudos multiescalares mediante o uso de sensoriamento remoto multiespectral. Torna-se possível a identificação de alterações em ecossistemas mediante a detecção de fragmentos e zonas de transição em escalas métricas, aliados à alta capacidade de sensores multiespectrais como o ASTER em mapear grandes áreas, graças à sua cobertura global e facilidade de acesso aos dados. Esse tipo de abordagem é prerrogativa no avanço do conhecimento sobre a extensão e gênese dos processos ambientais do nosso planeta,

considerando suas inter-relações. Dessa forma, a consideração conjunta de diferentes tipos de solo e vegetação, a partir de suas zonas de transição, pode auxiliar no entendimento de diversos processos inerentes a ecossistemas e suas respostas à ação antrópica, tais como efeitos de borda, formação de ecótonos, capacidade de regeneração de espécies, níveis de erodibilidade etc. Trata-se, portanto, de uma análise espacial integrada.

### **3.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Ab'Saber, A. (2003). *Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas*. São Paulo: Ateliê Editorial, 159 p.
- ACORN 2002. *ACORN 4.0 tutorial*. (2002). EUA, AGI-Colorado, 109p.
- Adams, J. B., & Adams, J. (1984). Geologic Mapping using LANDSAT MSS and TM images. Removing vegetation by modeling spectral mixtures. In: *Third Thematic Conf. Remote Sensing for Expl. Geol.*, ERIM, Colorado Springs, CO, 2, 615-622.
- Adams, J. B.; Smith, M. O., & Johnson, P. E. (1986). Spectral mixture modeling a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander I site. *J. Geophys. Res.*, 91: 8098-8112.
- Adams, J. B.; Smith, M. O., & Gillespie, A. R. (1989). Simple models for complex natural surfaces: a strategy for the hyperspectral era of remote sensing. In: *Proc. IEEE Int. Geosci. and Remote Sensing Symp.* '89 1, IEEE, New York, 16-21.
- Almeida, T. I. R. (2005). *Geobotânica por sensoriamento remoto em florestas tropicais e a abordagem sistêmica: uma ferramenta auxiliar no mapeamento geológico regional e na prospecção mineral*. Tese de livre docência, Departamento de Geologia sedimentar e Ambiental do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, p. 158p.
- Almeida, T. I. R., & Souza Filho, C. R. (2006). ASTER and Landsat ETM+ Images Applied to Sugarcane Yield Forecast. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 4057-4069.
- Apan, A.; Held, A.; Phinn, S., & Markley, J. (2004). Detecting sugarcane 'orange rust' disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 25(2): 489-498.
- Asner, G. P.; Seastedt, T. R., & Townsend, A. R. (1997). The decoupling of terrestrial carbon and nitrogen cycles. *Bioscience*, 47, 226-234

- Bateson, C. A., & Curtiss, B. (1993). A tool for manual endmember selection and spectral unmixing. In: Annual JPL Airborne Geosciences Workshop, 4, Pasadena, CA, Summaries. *JPL Publ.*, 93-26, p. 3-6.
- Boardman, J. W., & Kruse, F. A. (1994). Automated spectral analysis: A geologic example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada. In: ERIM Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 10. *Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI. Proceedings*, 1, 407-418.
- Boardman, J. W. (1993). Automated spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts: In: *Annual JPL Airborne Geosciences Workshop*, 4, Pasadena, CA. Summaries. *JPL Publ.* 93-26, 11-14.
- Boardman, J. W., Kruse, F. A., & Green, R. O. (1995). Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. In: Summaries, Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop, *JPL Publication 95-1*, 1, 23-26.
- Bertalanffy, L. (1973). *Teoria geral dos sistemas*. Petrópolis: Vozes, 351p.
- Bierregaard, R. O.; Lovejoy, T. E.; Kapos V.; dos Santos, A. A., & Hutchings, R. W. (1992). The biological dynamics of tropical rainforest fragments. *Bioscience*, 42, 859-866.
- Cardille, J. A., & Foley, J. A. (2002). Agricultural land-use change in Brazilian Amazônia between 1980 and 1995: Evidence from integrated satellite and census data. *Remote Sensing of Environment*, 87, 551-562.
- Chen, J. Y., & Reed, I. S. (1987). A detection algorithm for optical targets in clutter. *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, v. AES-23, n. 1.
- Clark, R. N., & Roush, T. L. (1984). Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research*, 89(B7), 6.
- Clark, R. N.; King, T. V. V.; Ager, C., & Swayze, G. A. (1995). Initial vegetation species and senescence/stress mapping in the San Luis Valley, Colorado using imaging spectrometer data. *Proceedings of Summitville Forum '95*, edited by H. H. Posey, J. A. Pendelton and D. Van Zyl, Colorado Geological Survey Special Publications 38, 64-69.
- Clark, R. N. (1999). *Spectroscopy of rock and minerals, principles of spectroscopy*. In: Rencz, A. (ed.), *Manual of Remote Sensing*, 3<sup>a</sup> ed: J. Wiley and Sons Inc., New York, p. 3-58.
- Connel, J. H. (1975). Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science*, 199, 1302-1310.

- Curran, P. J.; Dungan, J. L., & Peterson, D. L. (2001). Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry Testing the Kokaly and Clark methodologies. *Remote Sensing of Environment*, 76, 349-359.
- di Castri, F.; Hansen, A. J., & Holland, M. M. (1988). A new look at ecotones: emerging international projects on landscape boundaries. *Biology International*, Special Issue 17.
- Ducart, D. F.; Crósta, A. P.; Souza Filho, C. R. (2005). Mapeamento de alteração hidrotermal no distrito de Los Menucos, Argentina, por meio de imagens multiespectrais ASTER. In: *Simp. Bras. de Sens. Rem.*, Goiânia, INPE/SELASR. 12, 4057-4064. <<http://www.ltid.inpe.br/sbst2005>>
- Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC) (2001). *The crostalk correction software user's guide*, 21 p.
- Eiten, G. (1983). *Caracterização da vegetação do Brasil*. Brasília: CNPQ, 305p.
- Eiten, G. (1990). A vegetação do Cerrado. In: Pinto, M.L.N. (Org) *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 657p.
- ENVI/Research Systems, Inc. Hyperspectral Image Analysis in ENVI. (2003). In: ENVI user's group meeting, *ASPRS*, Washington DC, may 06.
- Epiphanyo, J. C. N., & Vitorello, I. (1985). Interrelationships between view angles (azimuth) and surface moisture and roughness conditions in field measured radiometer reflectance of an Oxisol. In: *International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, 3, Les Arc, France. Proceedings, Paris: INRA, p.185-192.
- Epiphanyo, J. C. N.; Lamparelli, R. A. C.; Bertoldo, M. A., & Formaggio, A. R. (1987). Bandas termal e refletidas do TM/Landsat-5 no estudo do comportamento espectral de três latossolos. In: *Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, 21, Campinas, 33 p.
- Epiphanyo, J. C. N.; Formaggio, A. R., Valeriano, M. M., & Oliveira, J. B. (1992) *Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo*. São José dos Campos: INPE – 5424 PRP/172, 132 p.
- Fearnside, P. (1993). Deforestation in Brazilian Amazônia – the effect of population and land-tenure. *Ambio*, 22(8), 537-545.
- Forman, R. T. T. & Godron, M. (1986). *Landscape Ecology*. John Wiley & Sons, New York, New York, USA.

- Fourty, Th., & Baret, F. (1998). On spectral estimates of fresh leaf biochemistry. *International Journal of Remote Sensing*, 19(7), 1283-1297.
- Galvão, L. S.; Almeida-Filho, R., & Ícaro, V. (2005). Spectral discrimination of hidrotermally altered materials using ASTER short-wave infrared bands: Evaluation in a tropical savannah environment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 7, 107-114.
- Gao, B. C.; Hiedebrecht, K. B., & Goetz, A. F. H. (1993). Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 44, 165-178.
- Gillespie, A. R.; Smith, M. O.; Adams, J. B.; Willis, S. C.; Fischer, A. F. III, & Sabol, D. E. (1990). Interpretation of residual images: Spectral mixture analysis of AVIRIS images, Owens Valley, California. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop*. Pasadena, CA, NASA Jet Propulsion Laboratory.
- Goedert, W. J. (1985). *Solos dos Cerrados: tecnologia e estratégias de manejo*. EMBRAPA/CPAC, Brasília, 422 p.
- Goetz, A. F. H., Vane, G., Solomon, J. E., & Rock, B. N. (1985.). Imaging spectrometry for earth remote sensing. *Science*, 228, 1147 – 1153.
- Goodland, R., & Pollard, R. (1973). The Brazilian cerrado vegetation: a fertility gradient. *Journal of Ecology*, 61, 219-224.
- Gosz, J. R. (1993). Ecotones hierarchies. *Ecological Applications*, 3 (3), 369-376.
- Guyot, G. (1995). La réflectance des couverts vegetaux. *Photo-Interprétation*, 95 (3), 157-180.
- Grebogi, C., Ott E., & Yorke, J. A. (1987). Chaos, strange attractors, and fractal basin boundaries in non-linear dynamics. *Science*, 238, 632-638.
- Green, A. A., Berman, M., Switzer, P., & Craig, M. D. (1988). A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 26 (1), 65-74.
- Guenegou, M. C.; Levasseur, J. E.; Anseau, C.; Palmier, C.; Loisel, C., & Courel, M. F. (1994). Limites de l'utilisation de la haute resolution spectrale et des paramètres spectraux dans le visible et proche infrarouge pour l'étude de la vegetation. In: *Symposium Internacional Medidas Fisicas et Signaturas en Teledeteccion*, 6, Val d' Isère. Annales: Aussois, France: CNES, 285-290.

- Hagget, P.; Cliff, A. D., & Frey, A. (1977). Map description. In: *Locational methods*. London, Edward Arnold, 291-308.
- Hanan, N. P.; Prevost, Y.; Diouf, A., & Diallo, O. (1991). Assesment of desertification around deep wells in the Sahel using satellite imagery. *The journal of applied ecology*, 28(1), 173-186.
- Harsanyi, J. C., & Chang, C. (1994). Hyperspectral image classification and dimensionality reduction: an orthogonal subspace projection approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32, 779-785.
- Hénon, M. (1976). A two dimensional mapping with a strange attractor. *Communications in Mathematical Physics*. Springer-Verlag, 50, 69-77.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 4, 1-23.
- Houghton, R. A. (1994). The worldwide extent of land-use change. *Bioscience*: 44, 305-313.
- Hubbard, B. E., & Crowley, J. K. (2005). Mineral mapping on the Chilean-Bolivian Altiplano using co-orbital ALI, ASTER and Hyperion imagery: data dimensionality issues e solutions. *Remote Sensing of Environment*, 99, 173-186.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309.
- Hunt, G. R. (1977). Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42 (3), 501-513.
- Iwasaki, A., & Tonooka, H. (2005). Validation of a crosstalk correction algorithm for ASTER/SIWR. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(12), 2747-2751.
- Jacquemoud, S., & Ustin, S. (2001). Leaf optical properties: a state of the art. In: International Symposium Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing, 8, Aussois, France. *Proceedings*, CNES, 223-232.
- Kassas, M. (1995). Desertification: A general review. *J. Arid Enviroment*, 30, 115-128.
- Kauffman, J. B.; Cummings, D. L., & Ward, D. E. (1994). Relationship of fire, biomass and nutrients dynamics along the vegetation gradient in the Brazilian Cerrado. *Journal of Ecology*, 82, 519-531.

- Kimes, D. S. (1984). Modelling the directional reflectance from complete homogeneous vegetation canopies with various leaf orientation distributions. *Journal of American Optical Society*, Washington – DC, 1, 725-737.
- Kokaly, R., & Clark, R. N. (1999). Spectroscopic Determination of Leaf Biochemistry Using Band-Depth Analysis of Absorption Features and Stepwise Multiple Linear Regression. *Remote Sensing of Environment*, 67, 267-287.
- Kokaly, R. F. (2001). Investigating a physical basis for spectroscopic estimates of leaf nitrogen concentration. *Remote Sensing of Environment*, 75, 153-161.
- Knipling, E. B. (1970). Physical and Physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1, 155-159.
- Kruse, F. A., Lefkof, A. B., Boardman, J. W., Heiedbrechet, K. B.; Shapiro, A.T., Barloon, P. J., & Goetz, A. F. H. (1993). The spectral image processing system (SIPS) – Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing Environment*, 44, 145-163.
- Laurance, W. F.; Didham, R. K., & Power, M. E. (2001). Ecological boundaries: a search for synthesis. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(2), 70-71.
- Ludwig, D., Walker, B., & Holling, C. S. (1997). Sustainability, Stability and Resilience. *Conserv. Ecol.* <http://www.consecol.org/vol1/iss1/art7/>
- Madeira Netto, J. S., POUGET, M., Bedidi, A., & Cerville, B. (1993). Informações quantitativas sobre a mineralogia dos latossolos a partir da reflectância espectral no visível e no infravermelho próximo e médio. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 7, Curitiba, 1993. Anais – São José dos Campos, CNPQ/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 919-28.
- Metzger, J. P. (1997). Relationship between landscape structure and tree species diversity in tropical forests of South-East Brazil. *Landscape and Urban Planning*, 37, 29-35.
- Nimer, E., & Brandão, A.M.P.M. (1989). *Balanço hídrico e clima na região dos Cerrados*. Rio de Janeiro: IBGE, 162p.
- Norman, J. M.; Welles, J. M., & Walter, E. A. (1985). Contrast among bidirectional reflectance of leaves, canopies and soils. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, New York, 23, 659-668.

- Ponzoni, F. J. (2001). Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S (org.). *Sensoriamento Remoto: reflectância de alvos naturais*. Brasília, DF: UNB, 262 p.
- Prigogine, I. (1996). *O Fim das incertezas: tempo caos e as leis da natureza*. São Paulo: Editora da UNESP, 199p.
- Risser, P. G. (1993). Ecotones at local to regional scales from around the World. *Ecological Applications*, 3 (3), 367-368.
- Rodrigues, V.; Matallo Junior, H.; Lima, M. G.; Fonteles, M. M.; Almeida, A. J., & Ferreira, D. G. (1986). Situação da desertificação no Estado Piauí. In: *Seminário sobre desertificação no Nordeste*, Sema, Brasília, 30-57.
- Rouse, J.W.; Haas, J.A.; Schell, J.A., & Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *Earth Resources. Technology Satellite-1 Symposium*, Goddard Space Flight Center, Washington D.C., 309-317.
- Rowan, L. C.; Hook, S. J.; Abrams, M. J., & Mars, J. C. (2003). Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflected Radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system. *Economic Geology*, 98: 1019-1027.
- Rinaldi, S., & Scheffer, M. (2000). Geometric analysis of ecological models with slow and fast processes. *Ecosystems*, 3, 507-521.
- Running, S. W.; Ramakrishna, R. N.; Peterson, D. L.; Band, L. E.; Potts, D. F.; Pierce, L. L., & Spanner, M. A. (1989). Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis coupling satellite data with ecosystem simulation. *Ecology*, 70(4), 1090-1101.
- São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. *Mapa geomorfológico do estado de São Paulo*, 1 : 500 000, 1997.
- São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. *Mapa geológico do estado de São Paulo*, 1 : 500 000, 1981.
- São Paulo, Instituto Agrônomo de Campinas. *Mapa pedológico do estado de São Paulo*, 1 : 500 000, 1999.
- São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente (SMA)-Instituto Florestal(IF)/Biota-FAPESP. (2002). Levantamento da cobertura vegetal do estado de São Paulo. Base cartográfica digital.

- Salisbury, J. W., Walter, L. S., Vergo, N., & D'Aria, D. M. (1991). Infrared (2.1-25 micrometers) Spectra of Minerals. *Johns Hopkins University mineral library*, Johns Hopkins University Press, 294 p.
- Scheffer, M.; Carpenter, S.; Foley, J. A.; Folkes, C., & Walker, B. (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413, 591-596.
- Shoshany, M., & Svoray, T. (2002). Multidate adaptive unmixing and its application to analysis of ecosystems transitions along a climatic gradient. *Remote Sensing of Environment*, 82, 5-20.
- Skarpe, C. (1991). Impact of grazing in savanna ecosystems. *Ambio*, 20, 351-356.
- Skole, D. L. & Tucker, C. (1993). Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 – 1988. *Science*, 260, 1905-1910.
- Song, C. (2005). Spectral Mixture Analysis for subpixel vegetation fractions in the urban environment: How to incorporate endmember variability? *Remote Sensing of Environment*, 95, 248-263.
- Small, C. (2004). The Landsat ETM<sup>+</sup> spectral mixing space. *Remote Sensing of Environment*. 93, 1-17.
- Smith, M. O.; Johnson, P. E., & Adams, J. B. (1985). Quantitative determination of mineral types and abundances from reflectance spectra using principal components analysis. In: *Proc. 15<sup>th</sup> Lunar Planet Science Conference. J. Geophys Res.*, 80 Suppl., Part 2, C797-C804.
- Smith, M. O., & Adams, J. B. (1985). Interpretation of AIS images of Cuprite, Nevada, using constraints of spectral mixtures. In: Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop. Pasadena, CA. *Proceedings, JPL Publ.*, 85-41, 62-68.
- Smith, M. O.; Ustin, S. L.; Adams, J. B., & Gillespie, A. R. (1990). Vegetation in Deserts: I. A Regional Measure of abundance from Multispectral Images. *Remote Sensing of Environment*, 31, 1-26.
- Souza Filho, C. R., Tápia, C. H., Crósta, A. P., & XAVIER, R. P. (2003). Infrared spectroscopy and ASTER imagery analysis of hydrothermal alteration zones at the Quellaveco Porphyry-Cooper Deposit, Southern Peru. In: *Proceedings of the American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Annual Conference – “Technology: Converging at the Top of the World”*, 1-12.

- Tansley, A. G. (1935). The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 16, 284-307.
- Valeriano, M. M., Epiphanyo, J. C. N.; Formaggio, A. R., & Oliveira, J. B. (1995). Bi-directional reflectance factor of 14 soil classes from Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, London, 16, 113-128.
- Van de Koppel, J., Rietkerk, M., & Weissing, F. J. (1997). Catastrophic vegetation shifts and soil degradation in terrestrial grazing systems. *Trends Ecol. Evol.* 12, 352-356.
- Vandermeer, J., & Yodzis, P. (1999). Basin boundary collision as a model of discontinuous change in ecosystems. *Ecology*, 80, 1817 – 1827.
- Veloso, H. P.; Rangel Filho, A. L. R., & Lima, J. C. A. (1991). *Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal*. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais.
- Vicente, L. E.; Souza Filho, C. R., & Perez Filho, A. (2005). Mapeamento de formações arenosas em fragmentos de Cerrado utilizando dados e produtos do sensor ASTER. In: *Simp. Bras. de Sens. Rem.*, Goiânia, INPE/SELASR. 12: 3419-3426. <<http://www.ltid.inpe.br/sbsr2005>>
- Vitousek, P. M.; Mooney, H. A., & Melillo, J. M. (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277, 494-499.
- Xiao, J., & Moody, A. (2005). A comparison of methods for estimating fraction green vegetation cover within a desert to upland transition zone in central New Mexico, USA. *Remote Sensing of Environment*, 98, 237-250.
- Wackernagel, M.; Schulz N. B; Deumling, D.; Linares, C. A.; Jenkins, M.; Kapos, V.; Monfreda, C.; Loh, J.; Myers, N.; Norgaard, R., & Randers, J. (2002). Tracking the ecological overshoot of the human economy. [www.pnas.org/cgi/doi/10.073/pnas.142033699](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.073/pnas.142033699), 99 (14).
- Watt, A. S. (1947). Pattern and process in the plant community. *Jornal of Ecology*, 35(1-2), 1-22.
- Wiens, J. A.; Crawford, C. S. & Gosz, J. R.. (1985). Boundary dynamics: a conceptual framework for studying landscape ecosystems. *Oikos*, 45, 421-427.
- Zonneveld, I. S. (1989). The land unit – A fundamental concept in landscape ecology, and its applications. *Landscape Ecology*, 3(2), 67-86.

## ***CAPÍTULO 4***

### ***IDENTIFICAÇÃO DE COMPONENTES MINERAIS EM SOLOS TROPICAIS POR MEIO DE ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA E DADOS DO SENSOR ASTER (ADVANCED SPACEBORNE THERMAL EMISSION AND REFLECTION RADIOMETER).***

#### **4.1. INTRODUÇÃO**

A consideração de características pedológicas é de suma importância no entendimento de processos de transformação de ecossistemas terrestres, visto que mesmo alterações climáticas de grande escala, ou mudanças locais no uso da terra, agem de maneira direta e indireta nas propriedades do solo, por meio de processos físicos e químicos. Tais mudanças envolvem a alteração do suporte à cobertura vegetal e, por conseguinte, da capacidade de retenção de gases de efeito estufa e fixação de carbono (e.g. CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>), aumento de erodibilidade, alteração no ciclo de nutrientes, assoreamento de cursos d'água, dentre outras (Tilman & Lehman, 2001; Pickup & Nelson, 1984; Foley et al., 2005; Zavaleta, 2003). Dessa forma, o conhecimento dos constituintes típicos de cada tipo de solo enunciam sua vulnerabilidade, ou resistência, frente a modificações de diferentes tipos, tornando-se base para a compreensão de transformações no meio ambiente e para o planejamento sobre os diferentes usos da terra.

Estudos tradicionais de solo exigem ampla cobertura de amostras de campo e análises laboratoriais, considerando-se diferentes profundidades de coleta e o relevo do local. Este tipo de análise depende de considerável quantia de tempo e recursos, tanto maior quanto mais abrangente for sua escala de abordagem (Brady, 1989; Oliveira, 1988). Um auxílio às classificações tradicionais encontra-se no estudo do comportamento espectral de solos a partir do uso de espectroscopia de reflectância (Ben-Dor *et al.*, 1998). Este tipo de abordagem trata de um método não destrutivo, que analisa as feições espectrais de absorção entre o visível (*visible* - VIS) e o infravermelho de ondas curtas (*short wave infrared* - SWIR) (0.3-2.5 µm), com base na razão entre energia incidente (irradiância) e energia refletida (radiância), quantificando diferentes níveis de reflectância, que são particulares para cada material analisado (Clark, 1999). Nesta faixa do espectro é possível identificar importantes componentes de solos, como: óxidos e hidróxidos de ferro (Fe), carbonatos (CO<sub>3</sub>), sulfatos (SO<sub>4</sub>) e matéria orgânica, assim como transições

vibacionais típicas de ligações catiônicas presentes em argilas formadoras de solos (e.g. -OH, Al-OH, Mg-OH e Fe-OH) (Stoner & Baumgardner, 1981; Grove *et al.*, 1995; Ben-Dor *et al.*, 1997; Thompson *et al.*, 1999; Chang *et al.*, 2001).

O eficiente uso da espectroscopia de reflectância no estudo de sistemas ambientais baseia-se no levantamento e análise de assinaturas espectrais em diversos ambientes, associando esse conhecimento à cobertura de bandas de sensores óticos multi e hiperespectrais, os quais são capazes de cobrir grandes áreas geográficas. Essa associação dá-se pela modelagem de comportamentos espectrais aplicados tanto aos algoritmos para Análise de Mistura Espectral (*Spectral Mixture Analysis* - SMA), por intermédio de espectros puros ou membros extremos (*endmembers*) (Asner & Lobell, 2000; Chabrillat *et al.*, 2002), ou na formulação e aprimoramento de índices espectrais e razões de bandas (Vägen *et al.*, 2005; Arsenault, & Bonn, 2005). Essa combinação tem gerado bons resultados, propiciando um amplo mapeamento de solos em diferentes áreas, mas particularmente em regiões áridas e semi-áridas (Morra *et al.*, 1991; Clark & Roush, 1984; Shepherd & Walsh, 2002).

As condições para este tipo de abordagem em regiões inter-tropicais úmidas são dificultadas pela presença de aerossóis na atmosfera, assim como pela densa cobertura vegetal com pouca exposição do regolito, rochas e solos (Coleman *et al.*, 1993; Ben-Dor, 2002). Particularmente no caso do Brasil, soma-se a essas dificuldades a escassez de dados espectrais (bibliotecas espectrais) que considerem suas condições ambientais específicas. Neste sentido, importantes resultados vêm sendo obtidos com a utilização de assinaturas espectrais locais, freqüentemente aplicadas a sensores multiespectrais, como o ETM+ (Landsat), por exemplo (Galvão *et al.*, 1995; Valeriano *et al.*, 1995; Epinhanio *et al.*, 1992; Madeira Neto, 1991; Nanni & Demattê, 2006).

Uma importante contribuição para este tipo de mapeamento encontra-se no *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER). Este sensor alia as tradicionais bandas de cobertura nas regiões do visível (*visible* – VIS) – (0.52 e 0.69  $\mu\text{m}$  - bandas 1 e 2) e infravermelho próximo (*Near Infrared* – NIR) (0.78 a 0.86  $\mu\text{m}$  – banda 3), com uma cobertura relativamente mais densa na região do infravermelho de ondas curtas (Short Wave Infrared - SWIR) (1.600 a 2.430  $\mu\text{m}$  – bandas 4-9) (Abrams & Hook, 1995) (detalhes descritos no capítulo 1). Essas características são um exemplo de uma tendência geral de aumento de resoluções espectrais no sensoriamento remoto orbital, as quais atualmente se encontram restritas

apenas aos sensores hiperespectrais (AVIRIS, Hyperion, Hymap, Rapid Eye, HERO, CHRIS). Dessa forma, o aprimoramento do uso do ASTER possibilita o refinamento do conhecimento espectral de solos tropicais por meio de seu mapeamento e validação em diferentes áreas (Vicente *et al.*, 2005; Galvão *et al.*, 2005), constituindo-se numa ferramenta prática e eficiente de entendimento de alterações nesse tipo de ambiente.

Neste contexto, o objetivo deste estudo é a análise do comportamento espectral de diferentes minerais em solos tropicais de regiões úmidas, a partir do uso de espectroscopia de reflectância, bem como sua convalidação na região do VIS e SWIR, no que refere ao uso do sensor orbital ASTER. Para tanto, foi realizada uma validação das assinaturas espectrais colhidas em campo, utilizadas como **membros extremos de referência** ao serem reamostradas para o sensor ASTER, comparando-as com assinaturas espectrais desses mesmos locais pelos **membros extremos da imagem** (Gillespie *et al.*, 1990; Adams *et al.*, 1993). Dessa forma, puderam ser analisadas feições diagnósticas dos componentes minerais de solo, assim como quantificar o nível de correlação entre os espectros de referência de campo e da imagem, estimando a eficácia do sensor no seu efetivo mapeamento.

## 4.2. ÁREA DE ESTUDO

A escolha da área de estudo obedeceu a critérios de uso intensivo da terra com alternância entre fragmentos de coberturas vegetais originais e diferentes tipos de cultivo, com variação de formações rochosas, solos e relevo. Seguindo tais parâmetros, definiu-se uma área na região de Assis, no oeste do Estado de São Paulo, à cerca de 426 Km da capital, abrangendo parte ou integralmente os municípios de Platina, Cândido Mota, Palmital, Ibirarema, Campos Novos Paulista, Ocaçu, Marília, Oscar Bressane, Echaporã, Lutécia, Paraguaçu Paulista e Assis, com aproximadamente 285.220 Km<sup>2</sup> (IBGE/CIM, 2004).

Essa área encontra-se na bacia sedimentar do Paraná, no Planalto Ocidental Paulista, integrando as unidades de Planalto Centro Ocidental e Planaltos Residuais de Marília e São Carlos (cuestas basálticas), com altitudes variando entre 300 a 700 m (IPT, 1981). Nesta região encontra-se a confluência de 3 formações litoestruturais: a nordeste, a Formação Adamantina e a Noroeste a Formação Marília, em áreas de maior altitude, e ao longo do rio Panapanema, em áreas mais baixas, a Formação Serra Geral (IAC, 1999) (Fig. 4.1).

Trata-se, portanto, de uma área com razoável variação de litotipos e relevo, resultando em diferentes tipos de solos, os quais variam entre arenosos da categoria Neossolos Litólicos a Latossolos Vermelhos, com 3 diferentes classes: LV78, LV1, PVA2, PVA10, PVA5, RL4 e NV1, segundo levantamento de 1: 500 000 na área de estudo (IAC, 2000) (Fig.4.1).

Soma-se a esse quadro físico uma intensa ocupação antrópica, instituída desde o século XIX e intensificada em meados da década de 1960. Essa ocupação consiste em diferentes usos da terra, com predominância de atividades agropastoris, entremeadas com manchas de vegetação natural preservada, tendo como principal característica o pequeno tamanho dos alvos a serem mapeados e sua distribuição heterogênea. O principal local de preservação, usado como referência dos ecossistemas originais da área (e.g. solos e vegetação), é a Estação Ecológica de Assis (EEA), onde se encontram remanescentes de Cerrado, visto que se trata da vegetação natural predominante. A EEA, assim como outras áreas de preservação no seu entorno, serviram de base, neste estudo, para a coleta e análise de assinaturas espectrais de vegetação e solos (Fig 4.1).

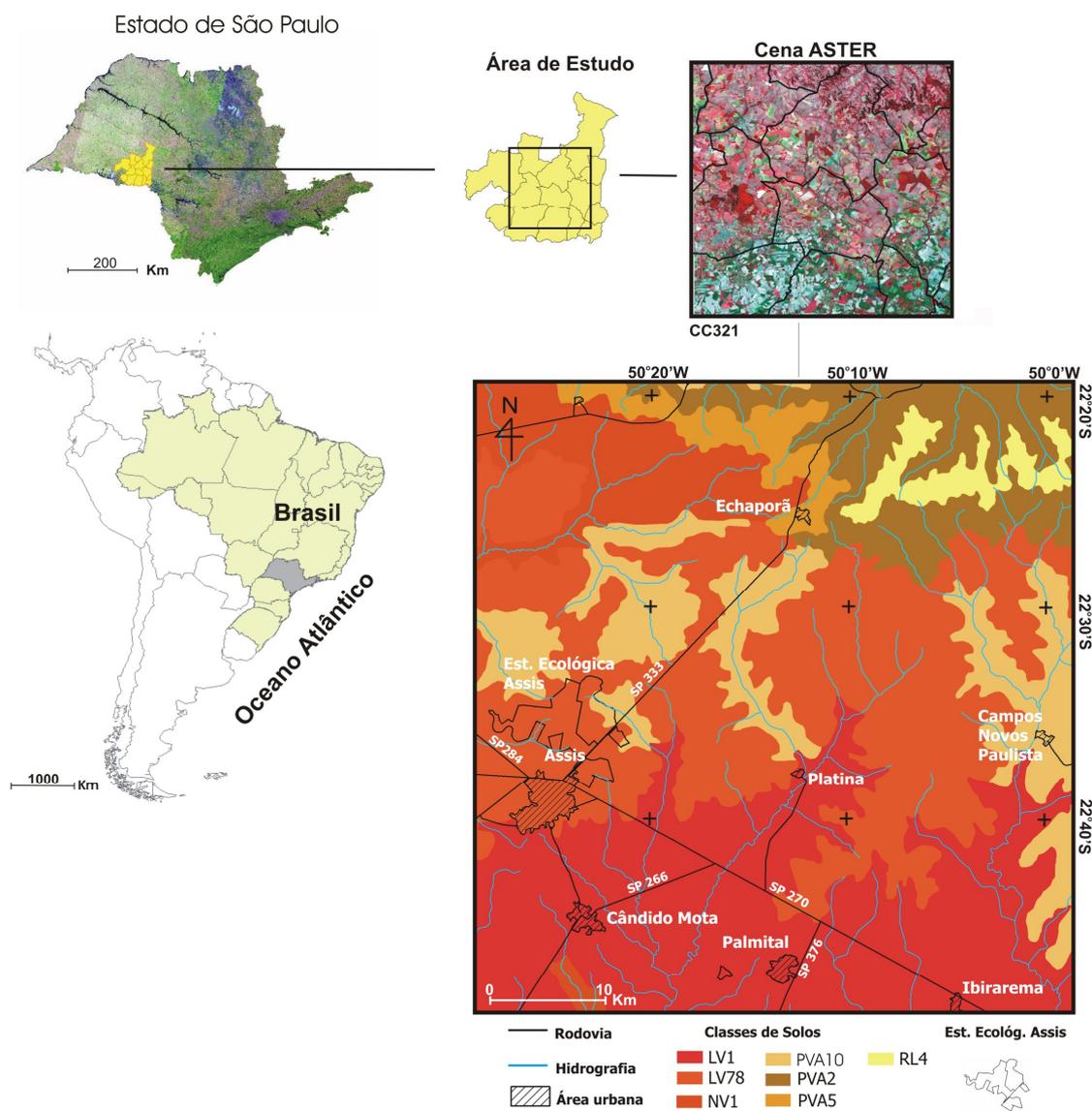


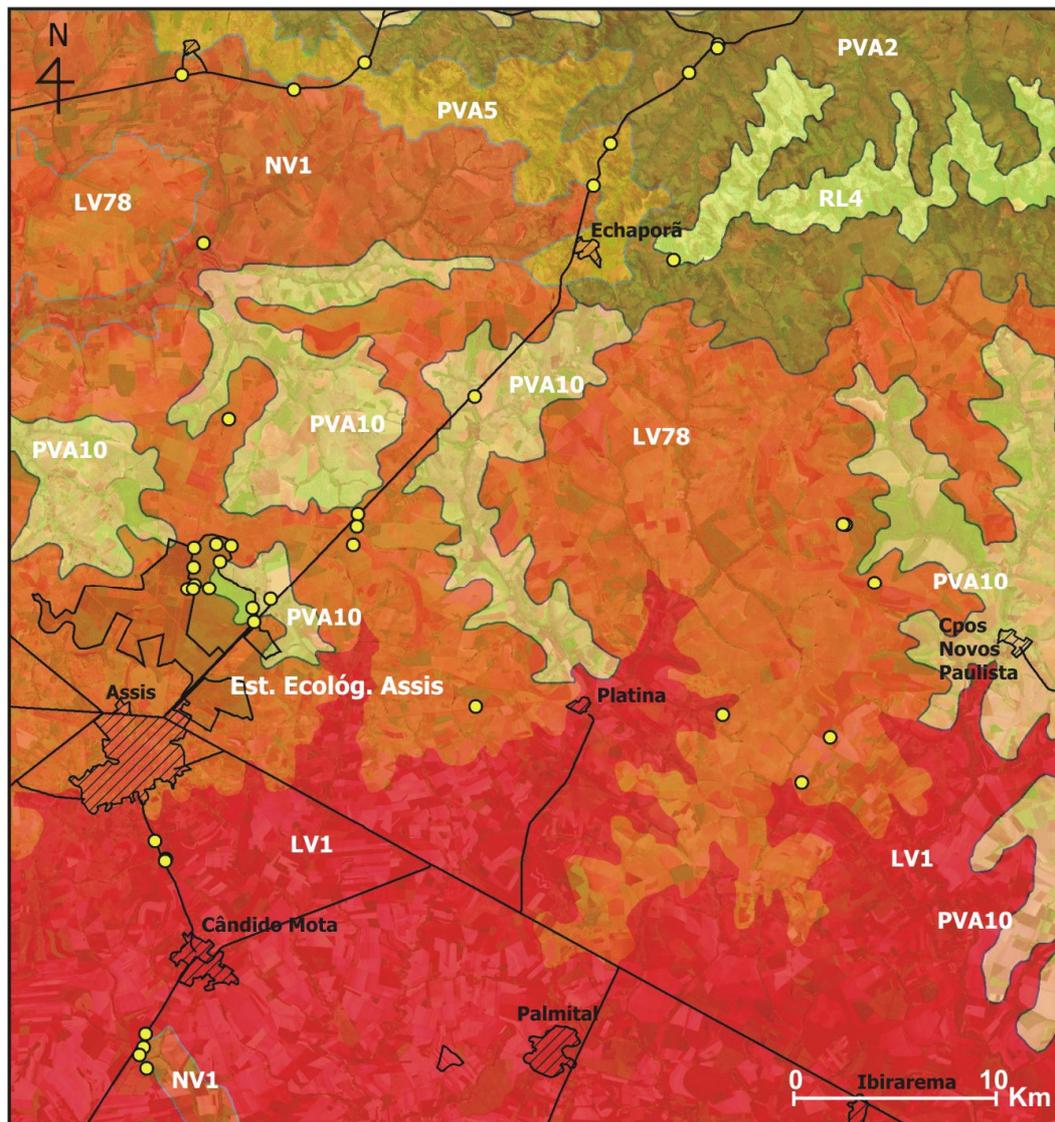
Figura 4.1. Localização da área de estudo. O mapa de solos foi elaborado com base no levantamento pedológico do IAC – 1 : 250 000 (2000).

Devido à sua posição geográfica, o clima regional caracteriza-se por ser tipicamente tropical, com temperaturas médias de 22°C, e precipitações em torno de 1440 mm anuais. Apresenta duas estações bem definidas: um período mais quente e chuvoso, entre outubro e março, com a média pluviométrica mensal variando entre 135,5 e 236,5mm; e um período com temperaturas amenas e menor pluviosidade, entre 99,5 e 34,0mm.

### 4.3. MATERIAIS

Foi utilizada uma cena ASTER com data de passagem de 19/09/2003, sendo priorizado o período de estiagem, adquirida junto a NASA, no Nível 1B de processamento, com correções geométricas e radiométricas aplicadas, e na versão V003, que implica ajustes adicionais de correção realizados a partir de maio de 2002. A coleta e interpretação dos membros extremos na imagem foi validada pelo uso de mapas referentes à área de estudo: (i) pedológico - escala 1 : 500 000 (IAC, 2000); (ii) pedológico escala 1 : 100 000 (IAC, 1996) geomorfológico – escala 1 : 500 000 (IPT, 1981); (iii) geológico – escala 1 : 500 000 (IPT, 1981); (iv) geológico – escala 1 : 250 000 (DAEE/UNESP, 1982); (v) levantamento da cobertura vegetal do estado de São Paulo em escala  $\pm$  1 : 50 000 (SMA-IF/Biota-FAPESP, 2002); (vi) base cartográfica integrada digital do Brasil ao milionésimo (IBGE, 2004).

Foram selecionados 42 pontos de coleta de amostras de solos, georreferenciados via *Global Positioning System* (GPS), com base em levantamento pedológico na escala 1 : 500 000 (IAC, 1999), perfazendo um total de vinte e sete amostras abrangendo todas as 3 classes de solos da área de estudo (LV78, LV1, PV; PVA2, RL4, NV1) (Fig 4.2). A disposição dos pontos objetivou obter uma variação satisfatória de propriedades de solo dentro de uma meso-escala, considerando o tamanho da área e a disposição do relevo. Cada amostra foi coletada numa profundidade de 0-20 cm, sendo que essa camada superficial apresenta maior relação com a radiância captada pelo sensor, em geral com a presença de argilas silicatadas, óxidos de ferro e alumínio, dentre outros (Brady, 1989).



Mapa de solos + CC\_AST231 — Principais Rodovias ● Pontos de coletas de amostras

Figura 4.2. Composição colorida ASTER 231 somada à localização dos pontos de coleta de amostras de Solos e classificação pedológica.

## 4.4. MÉTODOS

### 4.4.1. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS ASTER

Os dados da cena original ASTER (1B) foram convertidos para reflectância aparente e submetidos aos procedimentos de correção atmosférica com a utilização do modelo de transferência radiativa *Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model* (MODTRAN) com base em parâmetros regionais. As seguintes condições de imageamento foram consideradas no modelo aqui implementado: (i) elevação média da região de estudo, (ii) altitude

da plataforma, (iii) data da passagem, (iv) níveis de aerossóis (visibilidade), (v) coordenadas da área, (vi) quantidade de vapor d'água na atmosfera e (vii) modelo atmosférico (tropical) (ACORN, 2002). Uma vantagem do sensor ASTER é a possibilidade de utilização de dados atmosféricos MODIS no modelo MODTRAN, haja vista que o MODIS adquire imagens sob as mesmas condições de exposição, iluminação, altitude e resolução temporal do ASTER. Com base em produtos derivados do MODIS, é possível estimar-se a quantidade de vapor d'água e aerossóis no momento da passagem do satélite TERRA, o que aumenta de maneira acentuada a qualidade do resultado da compensação atmosférica. Previamente à compensação atmosférica, as bandas SWIR do ASTER foram submetidas à correção do efeito *crosstalk* usando o *crosstalk correction software* (ERSDAC, 2003). O efeito *crosstalk* é causado no ASTER devido à dispersão da luz incidente na banda AST4, a qual é transportada para o plano focal de outras bandas do SWIR, causando o aparecimento de “fantasmas” na interface entre superfícies de terra e água (Iwasaki & Tonooka, 2005). Todos esses cuidados no pré-processamento são fundamentais para que a comparação entre assinaturas espectrais colhidas em campo e assinaturas da imagem ASTER seja realizada de modo a excluir ruídos do sensor e efeitos atmosféricos, tornando a reflectância entre esses dados equivalente.

Para que fosse possível trabalhar conjuntamente com as faixas do visível (VIS) e infravermelho próximo (NIR) (bandas AST1, AST2 e AST3), com 15 m de resolução, e do infravermelho de ondas curtas (SWIR) (bandas AST4-AST9), com 30 metros de resolução, foi realizada uma re-amostragem espacial das bandas do SWIR, aumentando artificialmente sua resolução para 15m, permitindo, assim, a composição de uma base de imagens com 9 bandas espectrais.

#### **4.4.2. ANÁLISE DE SOLOS POR ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA**

As curvas de reflectância espectral das amostras de solo foram obtidas no Laboratório de Espectroscopia de Reflectância (LER) do Instituto de Geociências/UNICAMP, com um espectrorradiômetro portátil modelo *FieldSpec Full Resolution* (FR). Esse aparelho opera no intervalo do espectro eletromagnético entre 0.35  $\mu\text{m}$  a 2.5  $\mu\text{m}$ , abrangendo, portanto, o VNIR e SWIR, regiões do REM (radiação eletromagnética) investigadas neste trabalho (detalhes técnicos no capítulo 1). Os procedimentos de calibração e medidas de reflectância espectral realizadas com o espectrorradiômetro seguem padrões pré-estabelecidos, no que se refere às suas funções

eletrônicas de captação e registro, sendo utilizada como fonte de luz uma lâmpada halógena de 3000<sup>0</sup> K, e placa de calibração que funciona como uma superfície lambertiana quase ideal (com capacidade de reflexão de 100% da luz incidente), composta de *Spectralon* (composto foto-sintético) (*Analytical Spectral Devices*, 1994; Senna, 2003).

A geometria de posicionamento do aparelho, a qual simula o campo de visada instantânea do sensor (IFOV), foi adaptada segundo os níveis de reflectância dos solos amostrados. A distância entre a base da fonte de luz e o alvo foi de 24 cm, gerando um ângulo de 40° entre os mesmos. Na simulação do campo de visada instantânea (IFOV) foi utilizada uma lente de 1°, também com um ângulo aproximado de 40°, visto que a distância de sua base ao alvo foi de 25 cm. Trata-se de um procedimento particular, objetivando a otimização da qualidade dos espectros em função das características do material analisado, no caso solos tropicais de regiões úmidas (e.g. granulometria, propriedades químicas, cor), assim como sua reprodução futura (detalhes sobre o procedimento no capítulo 1), considerando sua baixa reflectância em relação a outros alvos, como minerais e rochas, por exemplo. As amostras utilizadas foram submetidas a um processo de secagem, visando anulação dos efeitos de umidade, os quais podem gerar oscilações não-lineares na assinatura espectral dos alvos (Lobell & Asner, 2002; Muller & Décamps, 2002). Cada amostra foi medida duas vezes com variação de 90°, sendo realizada uma média de ambas as medidas, visando à equalização dos efeitos texturais da disposição da superfície do alvo em relação ao campo de visada do espectrorradiômetro (*Analytical Spectral Devices*, 1994, Vågen *et al.*, 2005).

#### **4.4.3. INTERPRETAÇÃO DE ASSINATURAS ESPECTRAIS DE SOLOS**

A análise espectral das amostras baseou-se principalmente em seus componentes mineralógicos, seguidos da presença de matéria orgânica e umidade. Como bases comparativas para a análise, foram utilizadas assinaturas espectrais de referência da biblioteca espectral da *United States Geological Survey* (USGSLib), concernentes aos minerais: hematita ( $F_2O_3$ ), goethita ( $FeOOH$ ), caulinita ( $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$ ), montmorilonita ( $Al_4Si_8(OH)_4H_2O$ ) e gibbsita ( $Al-OH_3$ ). Esses minerais são comuns em solos tropicais devido a sua estreita relação com processos de lixiviação e carreamentos típicos de climas úmidos. A montmorilonita em particular, mesmo sendo mais comum em regiões semi-áridas, em áreas inter-tropicais está

associada a solos mal drenados. Dessa forma, a determinação da presença e quantidade destes mineirais é fundamental na estimativa de fertilidade e fragilidade de terras (EMBRAPA, 1999).

Minerais como a hematita e a goethita na forma de óxidos e hidróxidos nos solos, estão relacionados à presença de ferro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) e ferro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ), devido a sua abundância em rochas resistentes, e grande mobilidade quando expostos ao intemperismo oxidante (Meneses & Ferreira Júnior, 2001). A região de inflexão desses minerais entre 0.4 e 1.0  $\mu\text{m}$  no VNIR, confere aos solos diferentes colorações, indo do vermelho (hematita) ao amarelo (goethita), apresentando feições diagnósticas, no caso da hematita em torno de 0.540 e 0.880  $\mu\text{m}$ , e para goethita em 0.480 e 0.940  $\mu\text{m}$ , respectivamente (USGSLib, Hunt et al., 1970) (Fig. 4.3).

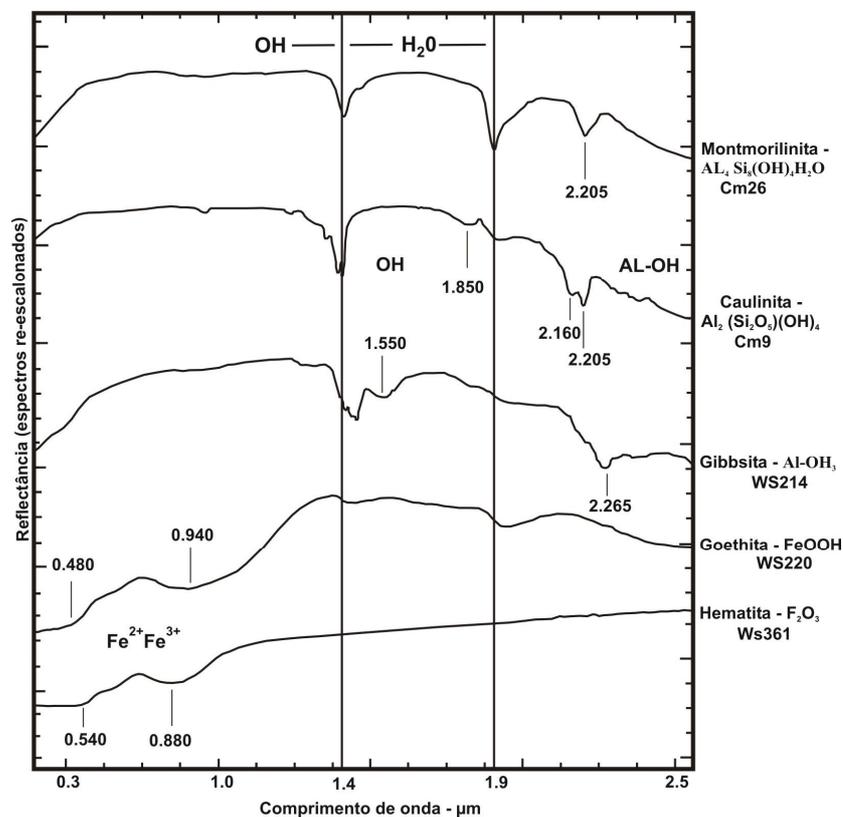


Figura 4.3. Espectros dos principais minerais componentes de solos tropicais considerados neste estudo (USGSLib). Para melhor visualização das assinaturas, seus valores de reflectância foram re-escalados. Em destaque as principais feições de absorção devido a presença de água, hidroxilas e ferro na estrutura dos minerais.

No caso dos argilomineirais caulinita e montmorilonita, as feições de absorção típicas situam-se em torno de 1.4, 1.9 e 2.205  $\mu\text{m}$ . As feições em 1.4 e 2.205  $\mu\text{m}$  estão associadas a

presença de hidroxilas (OH) na estrutura desses minerais, e a feição em 1.9  $\mu\text{m}$ , destacada na montmorillonita, é função da vibração de moléculas de água nesse argilo-mineral (USGSLib; Hunt & Salisbury, 1970). A gibbsita, um hidróxido de alumínio ( $\text{Al-OH}_3$ ), apresenta feições acima de 2.200  $\mu\text{m}$  (USGSLib; Hunt *et al.*, 1971) (Fig. 4.3). A distinção espectral desses minerais baseia-se não apenas na variação de água e hidroxilas nos menores comprimentos de onda, mas, principalmente, pelas suas ligações com metais (Al, Mg, Fe) no intervalo de 2.000 a 2.500  $\mu\text{m}$  (SWIR) (USGSLib; Hunt & Salisbury, 1970).

Outro componente de solos a ser considerado em análises espectrais são compostos de carbono derivados da decomposição de matéria orgânica (huminas, ácidos fúlvicos e ácidos húmicos), que influenciam toda a faixa do espectro entre o VNIR/SWIR, homogeneizando e reduzindo as feições de absorção (Henderson *et al.*, 1992). A estimativa da influência desse componente, assim como a água no solo, nas bandas 1.4 e 1.9  $\mu\text{m}$ , é de extrema importância em regiões tropicais, dada a sua estreita dependência de fatores climáticos (e.g. umidade, intemperismo químico), incidindo e alterando a leitura de outros componentes como os óxidos de ferro, por exemplo (Madeira Netto, 1991; Epiphanyo, 1992).

Para um melhor delineamento das feições de absorção, foi aplicada uma função matemática de normalização para a remoção do contínuo (Fig. 4.4). Esse método consiste no estabelecimento de uma reta (função) entre os valores de reflectância em cada comprimento de onda, os quais são divididos pelos valores de reflectância do espectro de referência. Dessa maneira, ressaltam-se os centros das feições de absorção mediante a eliminação de valores redundantes nos demais comprimentos de onda, em relação ao material que se deseja destacar (Clark & Roush, 1984; Clark, 1999).

No conjunto de amostras analisadas, pôde-se detectar a presença de óxidos de ferro de maneira mais acentuada nos Nitossolos, seguidos dos Latossolos, os quais apresentaram feições amplas entorno de 0.520 e 0.890  $\mu\text{m}$  (Fig. 4.4), respectivamente. Ambas as feições são proporcionais entre si, e têm relação com a presença de ferro férrico e ferro ferroso, visto que sua principal inflexão encontra-se no ultravioleta, porém propaga-se através de um flanco de baixa energia para o visível (Hunt *et al.*, 1970). Portanto, a acurada detecção desses óxidos deve considerar a presença conjunta dessas feições, com prioridade para região acima de 0.700  $\mu\text{m}$ . Os valores obtidos nos NV e LV indicam predomínio da hematita, o que é corroborado pela coloração das amostras. Outras pesquisas também indicam essa faixa de inflexão do espectro em

solos tropicais para este mineral, derivados particularmente de rocha basáltica (Stoner *et al.*, 1991; Demattê, 1999; Madeira Netto *et al.*, 1993). Outro indicador da alta presença de ferro total do conjunto de Nitossolos é sua baixa reflectância (Fig. 4.4) (Stoner & Baumgardner, 1981). A proporção de ferro cai nas demais amostras de PV, e é praticamente inexistente em RL. Exceções foram observadas com uma pequena concavidade em torno de 0.480 e 0.900  $\mu\text{m}$ , o que pode indicar goethita nas amostras 11 (LV78), 21 (LV1), 12 e 24 (PVA10), sendo que a coloração relativa às mesmas revela apenas uma pequena diminuição no matiz de vermelho ao amarelo, confirmando sua pequena quantidade encontrada no solo (Fig. 4.4).

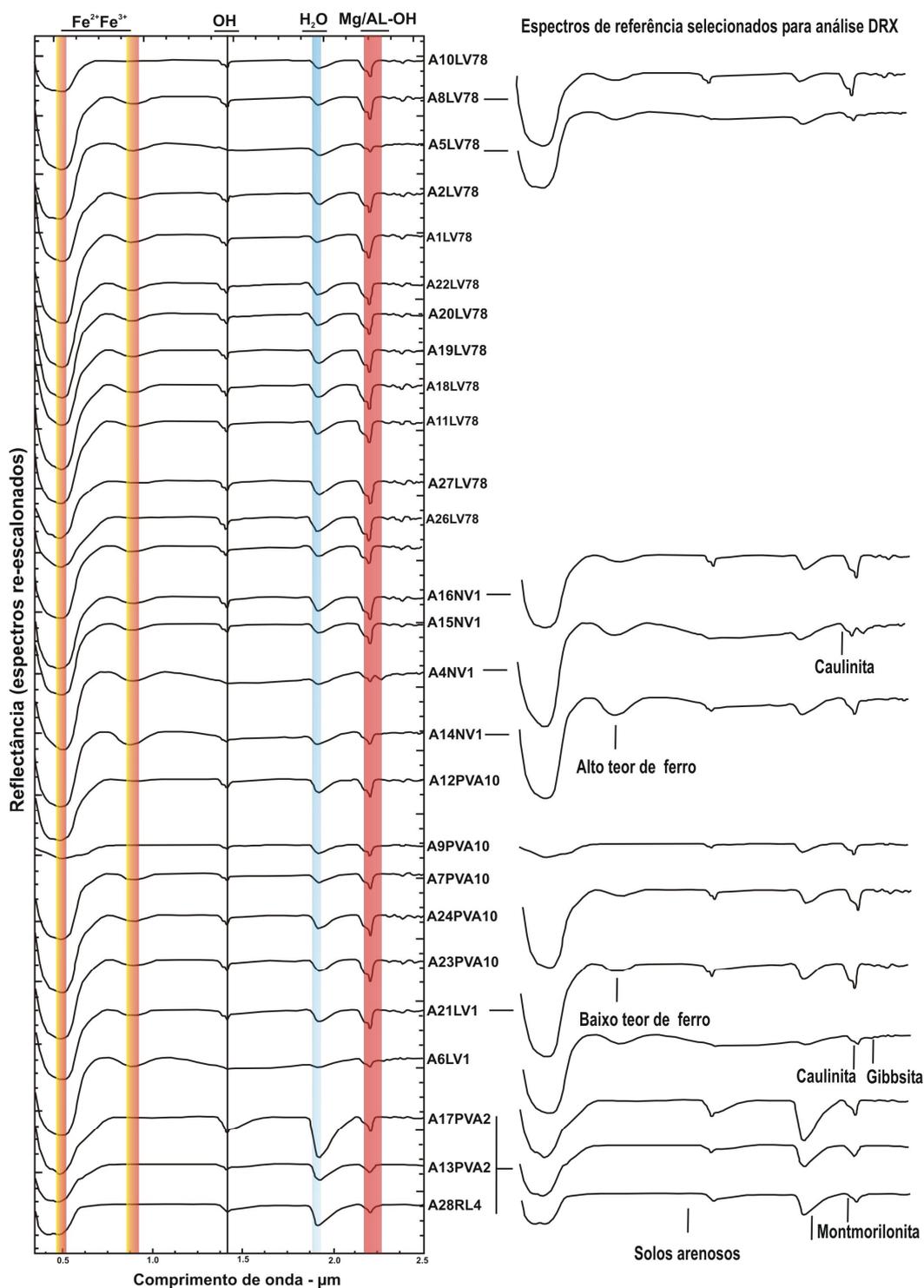


Figura 4.4. Espectros de amostras de solo da área de estudo medidos em laboratório por meio do espectrorradiômetro *FieldSpec* FR. Para melhor visualização das principais feições de absorção foi aplicada uma técnica de normalização através de remoção do contínuo. Em destaque encontram-se os espectros que representam os padrões mais comuns encontrados na área de estudo, e conseqüentemente, em solos tropicais, os quais foram escolhidos como membros de referência para comparação e uso com os dados ASTER.

No caso dos argilominerais, observa-se uma predominância de sua absorção típica pela ondulação descendente a partir de 2.160 até 2.200  $\mu\text{m}$ , na maioria dos solos, devido à presença de hidroxilas (OH) (Hunt & Salisbury, 1970), corroborando sua base de decomposição de rochas basálticas de variações argilosas, as quais compõem a litoestrutura predominante nos locais dessas amostras. Nas amostras 9, 13, 17 (PVA2) e 28 (RL4), as profundas bandas de absorção em 1.4 e 1.9  $\mu\text{m}$ , associadas a uma feição única em 2.2 $\mu\text{m}$ , e uma leve concavidade em torno de 0.61  $\mu\text{m}$ , podem evidenciar a presença de minerais 2:1 (minerais que possuem duas moléculas de sílica para uma molécula de água na formação tetrahédrica de sua estrutura cristalográfica), mais especificamente montmorilonita (Demattê *et al.*, 1998). A presença de montmorilonita em solos arenosos não é comum, porém, já foi verificada na região de São Pedro – SP. Sua origem alóctone é atribuída ao mesmo material de origem desta área de estudo, o arenito Botucatu (Demattê, 1977). A distinção entre montmorilonita e caulinita é feita pela presença de moléculas hidroxila e de água em sua estrutura, as quais estão diretamente associadas as bandas 1.4 e 1.9  $\mu\text{m}$  (Hauff *et al.*, 1990; Kruse *et al.*, 1991). A presença de hidroxila e sua ligação com metais, como o alumínio, gera diferentes simetrias das feições de absorção dessas argilas, ambas centradas em torno de 2.2  $\mu\text{m}$ , o que auxilia na distinção entre os mesmos (Demattê, 1995; 2000).

A presença de gibbsita foi verificada em apenas uma das amostras (A4 - NV1), associada a um local de intensa exposição do solo e uso agrícola. Esse mineral foi diagnosticado por uma feição em 2.264  $\mu\text{m}$ , cuja inflexão característica já foi verificada por Madeira Netto (1991) e Demattê (2000) em solos tropicais bem desenvolvidos.

As amostras 4 (NV), 14, 5 e 6 (LV) perfazem um conjunto de assinaturas com baixa reflectância e intensas feições de absorção no SWIR, que chegam a mascarar as bandas de absorção da hidroxila e da água em 1.4  $\mu\text{m}$  e 1.9  $\mu\text{m}$ . Este comportamento é atribuído aos altos teores de óxidos de ferro, assim como a presença de minerais opacos (Stoner & Baumgardner, 1981). Neste caso, as intensas feições de óxidos encontradas em 0.880  $\mu\text{m}$  explicam tal comportamento, associado à provável presença de magnetita, sendo própria do intemperismo de rochas basálticas (Hunt *et al.*, 1974). Esse comportamento já foi verificado em solos derivados de rochas básicas, corroborando a grande influência de minerais opacos em solos tropicais (Epiphanyo *et al.*, 1992; Madeira Netto, 1991). Um último conjunto de solos nas amostras: A26, A10 (LV78), A13, A17 (PVA2) e A9 (PVA10), estão associados a um padrão de textura arenosa e baixo teor de ferro, tendo como consequência alta reflectância e feições de absorção mais

nítidas no SWIR. Observa-se que algumas variações de pequena escala encontradas nas análises espectrométricas podem suscitar re-classificações nos subtipos de solos, visto que a base usada como indicadora é de 1: 500.000 (IAC, 1999).

#### **4.4.4. ANÁLISES DE SOLO POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X (DRX)**

A partir do conjunto de amostras de solo colhidas em campo e da análise do seu comportamento espectral, selecionou-se um conjunto de 12 espectros de referência com as principais características encontradas na área de estudo, bem como como de particularidades relativas às feições de absorção dos minerais mapeados, assim classificados: (i) teor de ferro: alto e baixo; (ii) presença de caulinita; (iii) presença de montmorilonita, (iv) presença de gibbsita e (v) Granulometria: solos arenosos (Fig. 4.5).

Foram realizadas análises de DRX nas frações totais de solo neste conjunto de amostras, utilizando o difratômetro *Siemens Diffraktometer Kristallofe* (detalhes técnicos no capítulo 1) como forma de validação da presença dos minerais identificados durante a espectroscopia. Desse conjunto foram escolhidas 5 amostras para serem validadas junto à cena ASTER, servindo como membros extremos de referência (Fig. 4.5). O conjunto de análises DRX em sua íntegra encontra-se no anexo 2.

A presença de quartzo é constante devido ao caráter total da fração de solos, o que não inviabiliza a identificação dos demais minerais. A amostra A13 (Fig. 4.5a), caracterizada por alta reflectância e total ausência de óxidos de ferro, apresenta, concordantemente, segundo as análises por DRX, predominância de quartzo, atestada pela alta contagem nos seus picos característicos ( $d=3.351$ ) (Fig. 4.5b). A presença de caulinita foi observada em maior proporção na amostra A6 ( $d=7.185$ ) (Fig. 4.5e), cujo espectro exibe a variação espectral típica do duplê entre 2.165 e 2.205  $\mu\text{m}$  (Fig. 4.5a); a magnetita, detectada via DRX nessa amostra, é responsável pela baixa reflectância geral e por inibir o aparecimento mais conspicuo das feições da caulinita no SWIR (Fig. 4.5a). Nas amostras A14 e A21, ficam evidentes as variações dos teores de óxidos de ferro, observada nas inflexões entorno de 0.540 e 0.880  $\mu\text{m}$  (Fig. 4.5a), resultado principalmente da presença de hematita encontrada em maior quantidade na amostra A14 ( $d= 2.7078$  e  $d= 4.5193$ ) (Fig. 4.5f), e inexistente na A21, com poucos traços de goethita (Fig. 4.5d).

A presença de montmorilonita ocorre de maneira interstratificada, conjuntamente com a illita, sendo mais abundante na amostra A13 de constituição arenosa (Fig. 3.5b). A sua posição

( $d=9.472$ ) no DRX denota uma grande amplitude basal das moléculas dos minerais constituintes, próprias de argilominerais 2:1, sendo que a distância interplanar dos picos remete a um solo pouco alterado, com minerais que ainda conservam sua estrutura cristalográfica (alta cristalinidade) (Gomes, 1986; Sawhney, 1989). As assinaturas espectrais das amostras A13 e A21 demonstram a gradação da presença de montmorilonita através da alteração de simetria da concavidade em  $2.165 \mu\text{m}$ , e da acentuada profundidade em  $1.9 \mu\text{m}$  (Fig. 4.5a). No caso da gibbsita, é possível confirmar a sua presença na amostra A4 nos picos  $d=4.866$  e  $d=4.386$  (Fig. 4.5c), o que explica a inflexão de seu espectro em  $2.265 \mu\text{m}$  (Fig. 4.5a).

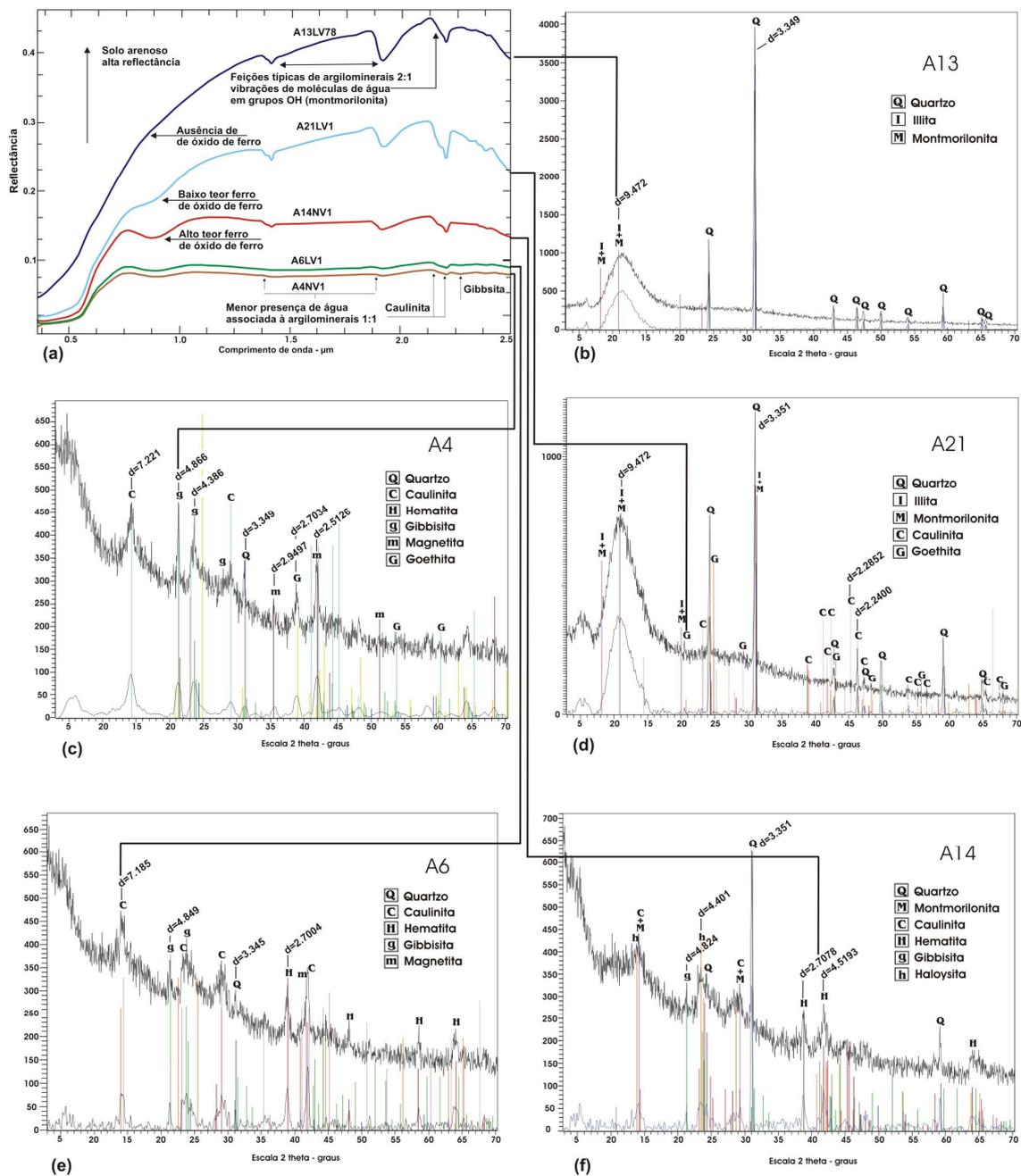


Figura 4.5. Espectros de referência área de estudo selecionados a partir de assinaturas espectrais de amostras de solo medidas pelo espectroradiômetro em laboratório. Os valores de reflectância absoluta foram preservados visando ilustrar a variação entre as amostras (Fig. a). As medidas por DRX apresentam os principais minerais componentes da amostra, com destaque para os valores em "d" (distância entre planos basais sucessivos medidos em angstrom (Å)) no seu principal pico (Figuras b, c, d, e, f).

#### **4.4.5. ANÁLISE DOS ESPECTROS REFERÊNCIA DE SOLOS NA RESOLUÇÃO ESPECTRAL DO SENSOR ASTER**

Esta etapa tem por objetivo avaliar a capacidade de reprodução das principais feições de absorção selecionadas com base nos espectros de referência para a resolução espectral do sensor ASTER. A variação espectral e espacial dessas assinaturas é fundamental para a estimativa da capacidade de mapeamento destes componentes de solo por esse sensor.

A caracterização espectral das assinaturas dos materiais portadores de ferro em sua estrutura na resolução espectral do ASTER foi realizada comparando-se os espectros de solos re-amostrados, considerando-se as amostras com alto (A14) e baixo teor de ferro (A2). Tais amostras mostram feições de absorção nítidas entorno de 0.880  $\mu\text{m}$ , as quais são delineadas nas bandas AST1 (0.52-0.60  $\mu\text{m}$ ), AST2 (0.63-0.69  $\mu\text{m}$ ) e AST3 (0.78-0.86  $\mu\text{m}$ ). A variação do conteúdo em ferro fica evidente na mudança do ângulo formado entre as bandas, denotando absorção cada vez maior (diminuição da reflectância) relativa as feições em 0.880  $\mu\text{m}$  principalmente na banda AST3 (Fig. 4.6). Essa correlação de bandas é semelhante a do Landsat (ETM1:0.45-0.52  $\mu\text{m}$ ; ETM2- 0.52-0.60  $\mu\text{m}$ ; ETM3: 0.63-0.69  $\mu\text{m}$ ), onde variações de razões 3/1 obtiveram sucesso na detecção desse tipo de material (Madeira Netto *et al.*, 1991; Fraser, 1991). Porém, mesmo com um ganho significativo em relação a resolução espacial de 15m, a cobertura espectral do ASTER nesta faixa do espectro (0.520  $\mu\text{m}$  - 0.860  $\mu\text{m}$ ) limita a identificação de compostos de ferro (hematita e goethita).

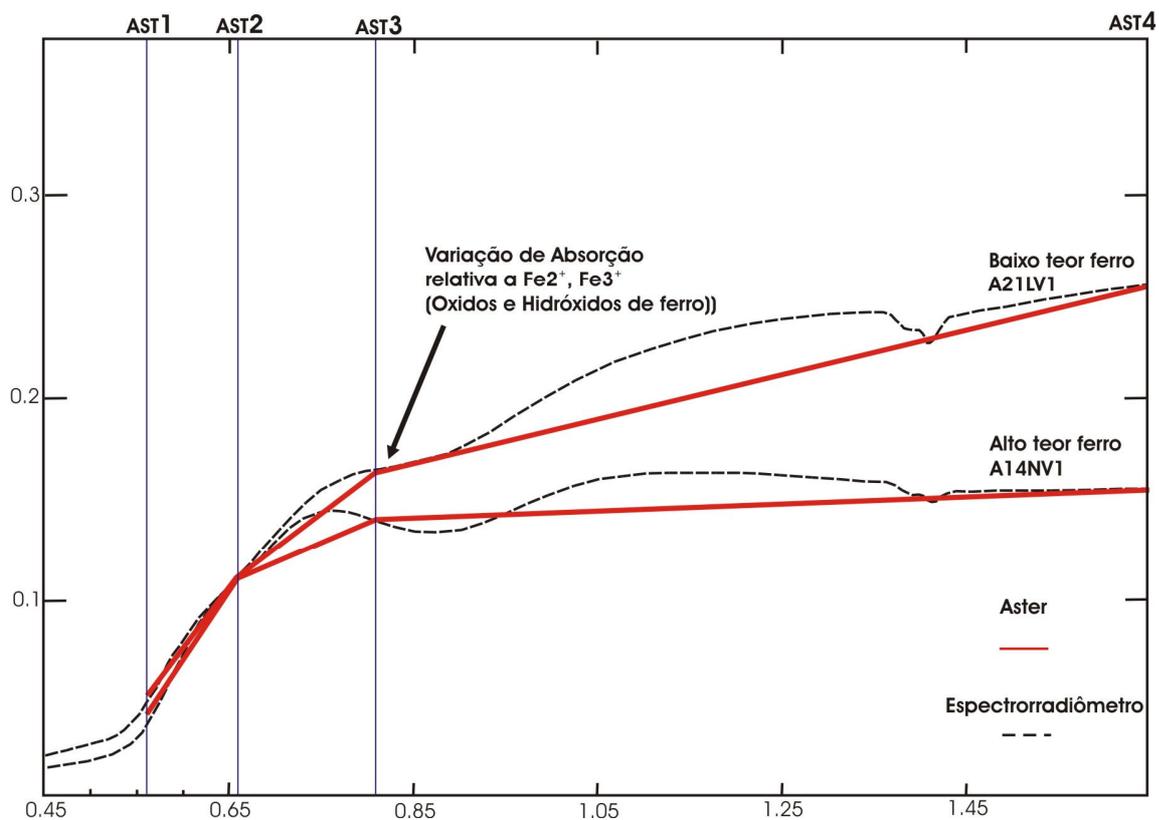


Figura 4.6. Comparação entre espectros de referência de solos medidos em laboratório e re-amostrados para a resolução espectral do ASTER. A variação dos teores de ferro dá-se pela alteração das profundidades das feições entorno em 0.520 e 0.880  $\mu\text{m}$ , assim como dos níveis de reflectância.

As características do ASTER na região do SWIR possibilitaram a reprodução do comportamento espectral da caulinita na amostra A6 (dublê entre 2.160 e 2.205  $\mu\text{m}$ ) e sua distinção da montmorilonita na amostra A13, com uma única feição em 2.200  $\mu\text{m}$  (tal como corroborado pela DRX). Essa reprodução dá-se através das feições nas bandas AST5 (2.145-2.185) e AST6 (2.185-2.225) (Fig. 4.7) - as amostras apresentam diferenças na profundidade da banda de absorção em 2.160  $\mu\text{m}$ . A presença de magnetita e óxidos de ferro também contribui para a diminuição das feições ao longo do espectro (Hunt *et al.*, 1974), porém ainda conservando a inflexão da caulinita (Figura 4.7a).

Essa variação está diretamente associada à água molecular, expressa principalmente na banda 1.9  $\mu\text{m}$  (Figura 4.7b). No caso de sua interpretação através de sensores orbitais, esse comportamento, como foi observado anteriormente, está associado a presença de argilominerais 2:1, no caso a montmorilonita, visto que esse tipo de mineral expande suas camadas na presença

de água (mineral expansivo) e sua variação está associada a redução do degrau em 2.160  $\mu\text{m}$ , tornando a feição única em 2.205  $\mu\text{m}$ .

A reprodução ideal de variação destes minerais em sua forma pura (USGSlib) encontra-se reproduzida na figura 4.7c. No caso dos solos A13 e A6, pode-se observar a mesma variação, porém, devido a mistura de outros elementos e o grau de desordem na estrutura cristalina da caulinita (Gomes, 1986; Ducart, 2004), o dublê quase nunca é perfeito, o que denota a presença de material menos cristalino, conforme constatado através das medidas de DRX. Portanto, a variação da profundidade de tais bandas também é um importante indicador do nível de alteração do material no solo. Com esses cuidados, e agregando-se outros parâmetros de análise, foi possível a separação entre tipos argilominerálicos 2:1 e 1:1, com comportamento típico nesta região do espectro.

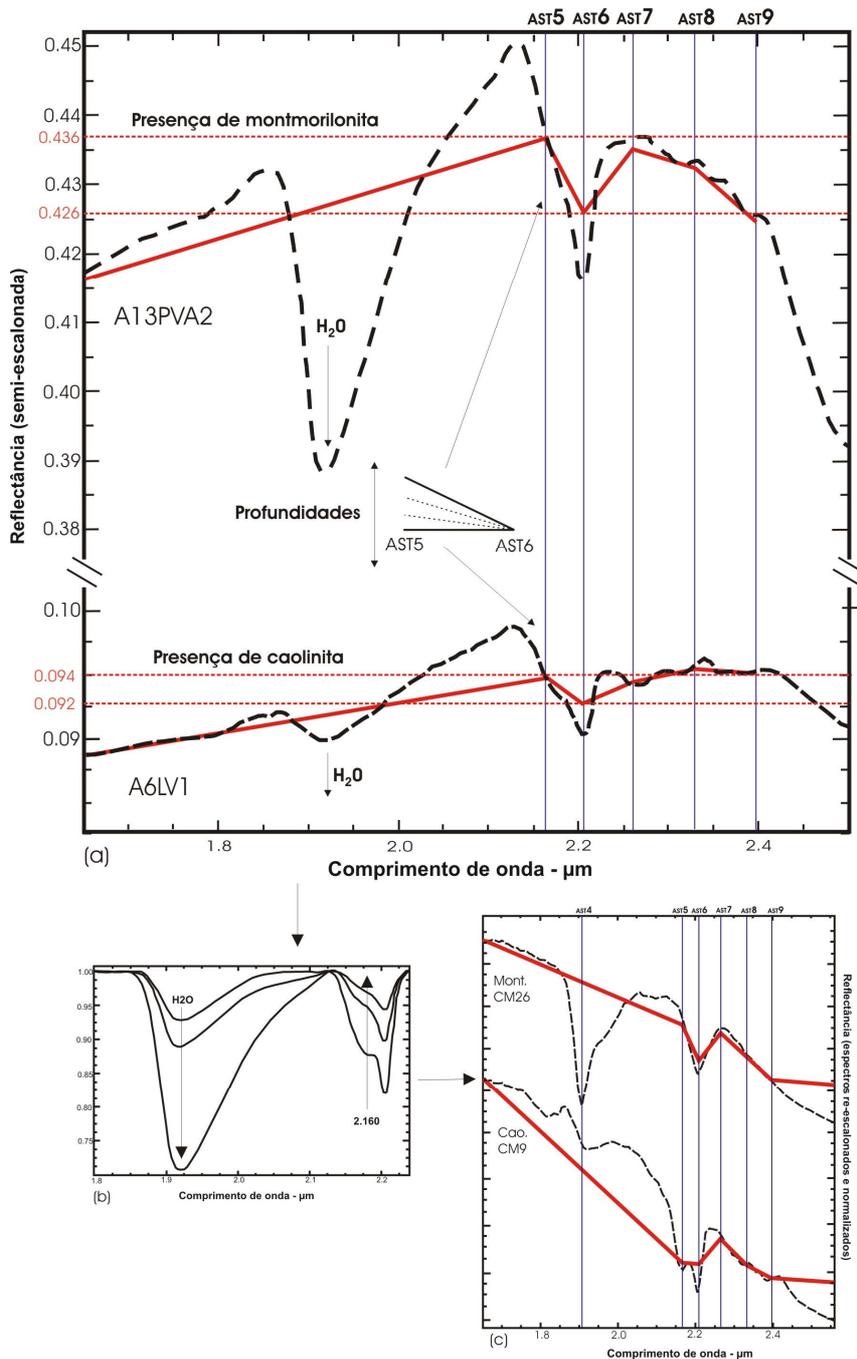


Figura 4.7. Exemplo da relação da medida de água estrutural e molecular expressa na profundidade da banda 1.9 μm, em relação as profundidades das bandas 2.160 e 2.205 μm, na formação da dupla absorção de caulinita e da estimativa de presença de minerais 2:1 (Figs. 4.7b e 4.7c). A figura 4.7a mostra o espectro original de solos medidos em laboratório e re-amostrados para as bandas do sensor ASTER (a). É possível comparar a variação das bandas AST5 e AST6 dos solos com os espectros dos minerais de origem numa situação ideal de variação (caulinita e montmorilonita) (USGSLib) (c), constatando-se uma variação semelhante nessas bandas do ASTER.

A feição de absorção em 2.264  $\mu\text{m}$ , típica da gibbsita, identificada na amostra 4 (NV1), foi reproduzida pela banda AST7 (2.235-2.285  $\mu\text{m}$ ), formando um duplê com a feição devido as hidroxilas em 2.205  $\mu\text{m}$  (AST6) (Fig. 4.8). A amostra possui baixa reflectância devido ao abundante conteúdo em ferro; entretanto, as feições ficam evidentes com a retirada do contínuo (Fig. 4.8). A variação da profundidade e deslocamento da banda AST7, mediante sua imediata correlação com a banda AST6 em 2.205  $\mu\text{m}$ , pode fornecer importantes informações sobre a presença e quantidade deste tipo de mineral nos solos.

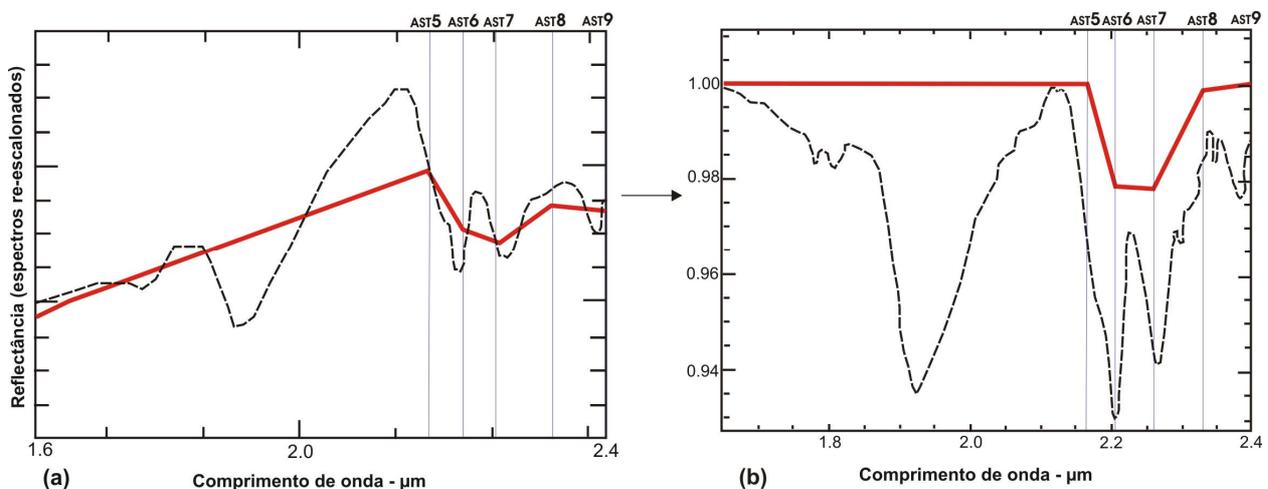


Figura 4.8. Espectro medido em laboratório da amostra de solo A4 (NV1) (a). Devido ao alto conteúdo em ferro os espectros foram escalonados e normalizados para uma melhor visualização da feição de absorção da gibbsita em 2.265  $\mu\text{m}$  (b).

#### 4.4.6. ESPECTROS DE REFERÊNCIA DE SOLOS VS ESPECTROS EM PIXELS DAS IMAGENS ASTER

A capacidade de um sensor orbital em mapear as variações espectrais definidas em laboratório com base em amostras de campo encontra-se na relação entre sua resolução espectral, avaliada anteriormente, conjuntamente com sua resolução espacial, que é definida pelo seu campo de visada instantânea no terreno (*GIFOV – Ground Instantaneous Field of View*). No caso do ASTER, a resolução espacial é de 15m x 15m, o que estabelece uma das menores áreas de imageamento mínimo em sensores de sua categoria (225m<sup>2</sup>), constituindo-se numa vantagem no que se refere ao refinamento dos níveis de mistura envolvendo diferentes alvos (e.g. solos, rocha, umidade e vegetação) num mesmo GIFOV. Outro aspecto importante a ser avaliado nas imagens ASTER são efeitos atmosféricos (e.g. vapor d'água, CO<sub>2</sub>, aerossóis) e os efeitos de sombra

devido a influência do relevo, que podem modificar os níveis de reflectância e variações de albedo.

Para avaliar o nível de correlação entre os espectros das amostras de solo obtidas em campo e os dados dos mesmos locais, extraídos da imagem ASTER, foram primeiramente considerados pixels de imagem ortorretificada em contraposição aos pontos coletados via *GPS*, objetivando ao aumento da precisão na sobreposição de áreas (Fig. 4.9a). Posteriormente, foi aplicada uma análise de regressão, sendo que cada assinatura foi comparada individualmente, gerando-se um gráfico de regressão para as 9 bandas (Fig. 4.9). Como resultados foram obtidos valores de  $R^2$  satisfatórios, oscilando entre 0,6493 e 0,7886. A única exceção foi a amostra contendo gibbsita (A4 - NV1), que apresentou baixos valores de  $R^2$ , da ordem de 0.1361, inviabilizando sua utilização na etapa posterior. Atribui-se essa dissonância, com destaque à não detecção da feição de absorção em 2.265  $\mu\text{m}$ , às pequenas quantidades do mineral gibbsita na área, associadas a alteração do local de coleta, a qual está sujeita a intensa atividade agrícola, típica da região, alterando os valores do pixel, provavelmente pela presença de vegetação (Fig. 4.9f).

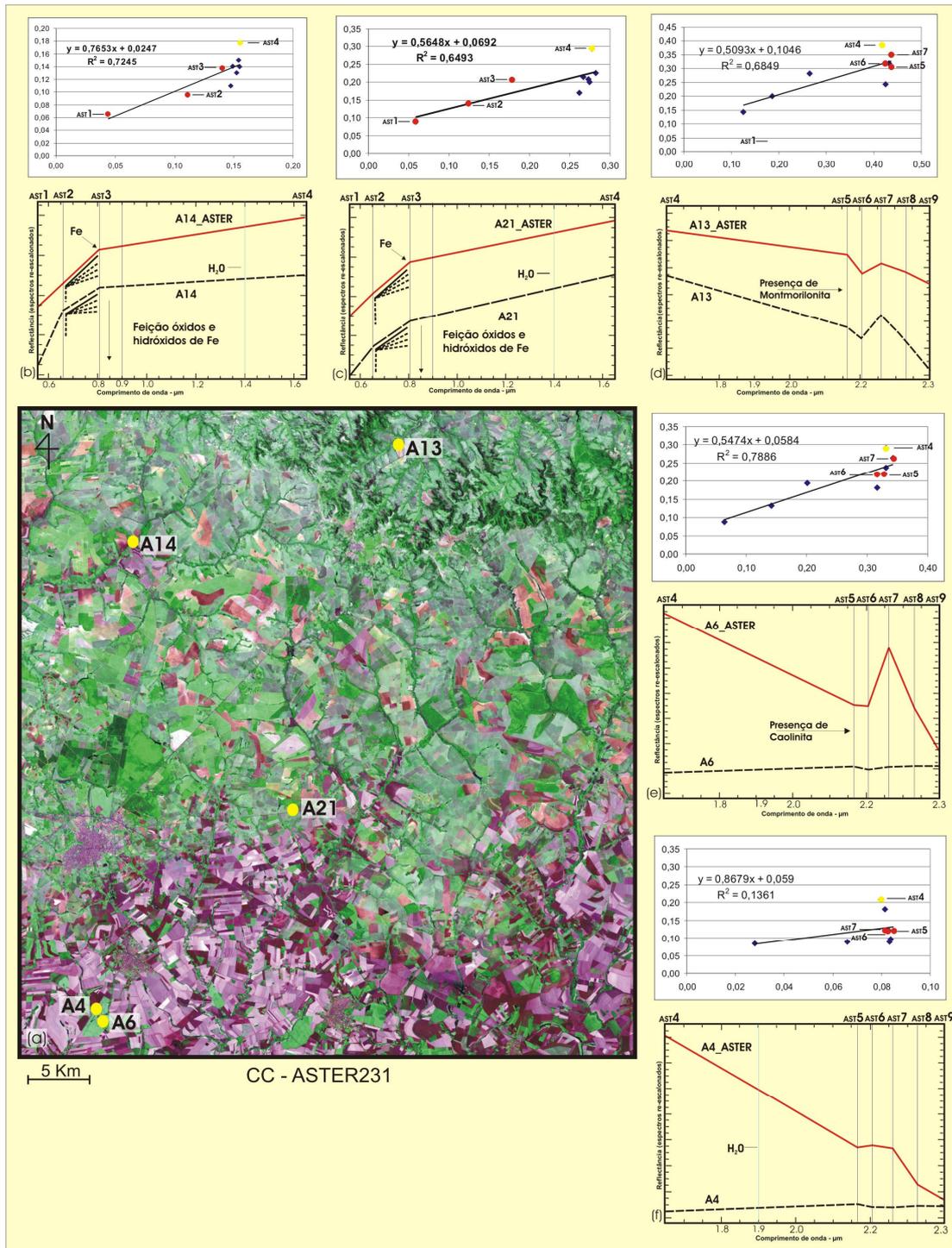


Figura 4.9. Comparação dos espectros de referência das amostras de solos medidos em laboratório com espectros de referência da imagem ASTER (pixel equivalente ao local de coleta na imagem) (Fig. a). Foi aplicado regressão linear em cada par de amostras para avaliação do seu nível de correlação, estimando assim a capacidade de reprodução do sensor em relação as feições de absorção identificadas em laboratório (Figuras b, c, d, e, f).

A reprodução, não apenas do duplê de caulinita (2.160 e 2.205  $\mu\text{m}$ ), mas também das demais feições de absorção compreendidas nas bandas AST7, AST8 e AST9, comprovam a boa correlação entre os dados, os quais apresentaram elevados valores de  $R^2$  em A6 (0,7886 - Fig. 4.9d) e A13 (0,6849 - Fig. 4.9 d, e) mesmo considerando-se a elevada mistura de materiais na área de estudo (restos de cultivo, gramíneas). A variação entre as profundidades e inclinação da curva de reflectância espectral entre as bandas AST2 e AST3 (Fig. 4.9b e c), que atestam a presença e abundância relativa de ferro (inflexões típicas entre 0.8 $\mu\text{m}$  e 0.9 $\mu\text{m}$  (Hunt *et al.*, 1970), apresentam-se bem reproduzidas na imagem ASTER, atestando sua capacidade de mapeamento dessas variações, sendo que essas amostras apresentaram os valores mais elevados  $R^2$  (0.7245, 0.6493) (Fig. 4.9b e c).

#### **4.5. MAPEAMENTO DE SOLOS**

Para o mapeamento das características de solo identificadas nas etapas anteriores utilizou-se o algoritmo hiperespectral MTMF (*Mixture Tuned Matched Filtering*). Esse algoritmo constitui-se num modelo linear de mistura espectral (*Spectral Mixture Analysis*) com a capacidade de estimar a mínima participação de um material no pixel (escala de sub-pixel), mesmo que esse material seja percentualmente inferior (até 4%) (Chen & Reed, 1987; Harsanyi & Chang, 1994; Williams & Hunt Jr., 2002). Enquanto modelo linear de mistura espectral o MTMF, opera com todos os comprimentos de banda envolvidos na formação da feição diagnóstica, e não apenas com a diferença entre as mesmas (índices e razões de bandas) (detalhes no capítulo 1). Esse procedimento, originalmente desenvolvido para uso em imagens hiperespectrais tem se mostrado extremamente eficiente quando de sua adaptação ao ASTER (Rowan, 1998; Hubbard & Crowley, 2005; Souza Filho *et al.*, 2003), particularmente no que se refere ao mapeamento de alvos com grande percentual de mistura espectral e de dimensões reduzidas, características essas inerentes aos solos e vegetação em áreas altamente antropizadas (Vicente *et al.*, 2005).

Como membros extremos (*endmember*) para classificação MTMF, foram utilizados os espectros de referência de solos extraídos dos locais de coleta na imagem ASTER. No caso dos componentes de ferro, restringiu-se às feições das bandas AST1, AST2, AST3 (VNIR) e AST4 (SWIR). Para os argilominerais foram consideradas as bandas AST4, AST5, AST6, AST7 e AST8 (SWIR), visto que as mesmas perfazem as principais feições diagnósticas dos elementos a serem mapeados em diferentes regiões do espectro. Nesse sentido, foi de extrema importância a

identificação e análise do comportamento dessas feições de absorção reamostradas para o ASTER em etapas anteriores, sendo possível incluir dois membros extremos da imagem (MEI) para discriminação de solos arenosos (MEI 2) da VNFA (Vegetação Não Fotossinteticamente Ativa - MEI 1).

A VNFA é comumente confundida com solos arenosos no que se refere a sua detecção por sensores orbitais, devido aos altos valores de reflectância inerentes tanto à areia, quanto à folhagem seca. Esse fato aumenta a dificuldade de avaliação da degradação de terras, visto que este tipo de solo está associado à intenso processo erosivo e baixa fertilidade. Neste caso, a consideração de componentes bioquímicos próprios da VNFA na região do SWIR (Galvão et al., 2005; Almeida, 2005), comentados anteriormente, constitui uma forma de separação entre esses alvos, confirmado por resultados obtidos no capítulo 3 na área de estudo de Itirapina. Portanto, foram considerados 6 diferentes membros extremos: (i) solos com presença abundante de ferro, (ii) solos pobres em ferro, (iii) solos arenosos, (iv) solos argilosos com predominância de caulinita, (v) solos argilosos com predominância de montmorilonita e (vi) VNFA.

A classificação MTMF conseguiu a separação entre vegetação fotossinteticamente ativa (VFA), solo nu e vegetação não fotossinteticamente ativa (VNFA), conservando as mínimas feições dos membros extremos e seu percentual de mistura no pixel. Pode-se confirmar essa observação mais detalhadamente nas figuras 4.10a e b, onde as variações de reflectância nas bandas AST6 e AST7 (2.185 e 2.285  $\mu\text{m}$ ) confirmam a presença de VNFA, devido principalmente a detecção de amido e lignina na estrutura vegetal (Zagolski *et al.*, 1996), demonstrando serem suficientes para a distinção entre solos arenosos e áreas com restos de cultivo. Portanto, tais variações de profundidade nessas bandas, indicam neste caso a presença ou não de vegetação seca (rica em compostos bioquímicos) nos pixels da imagem.

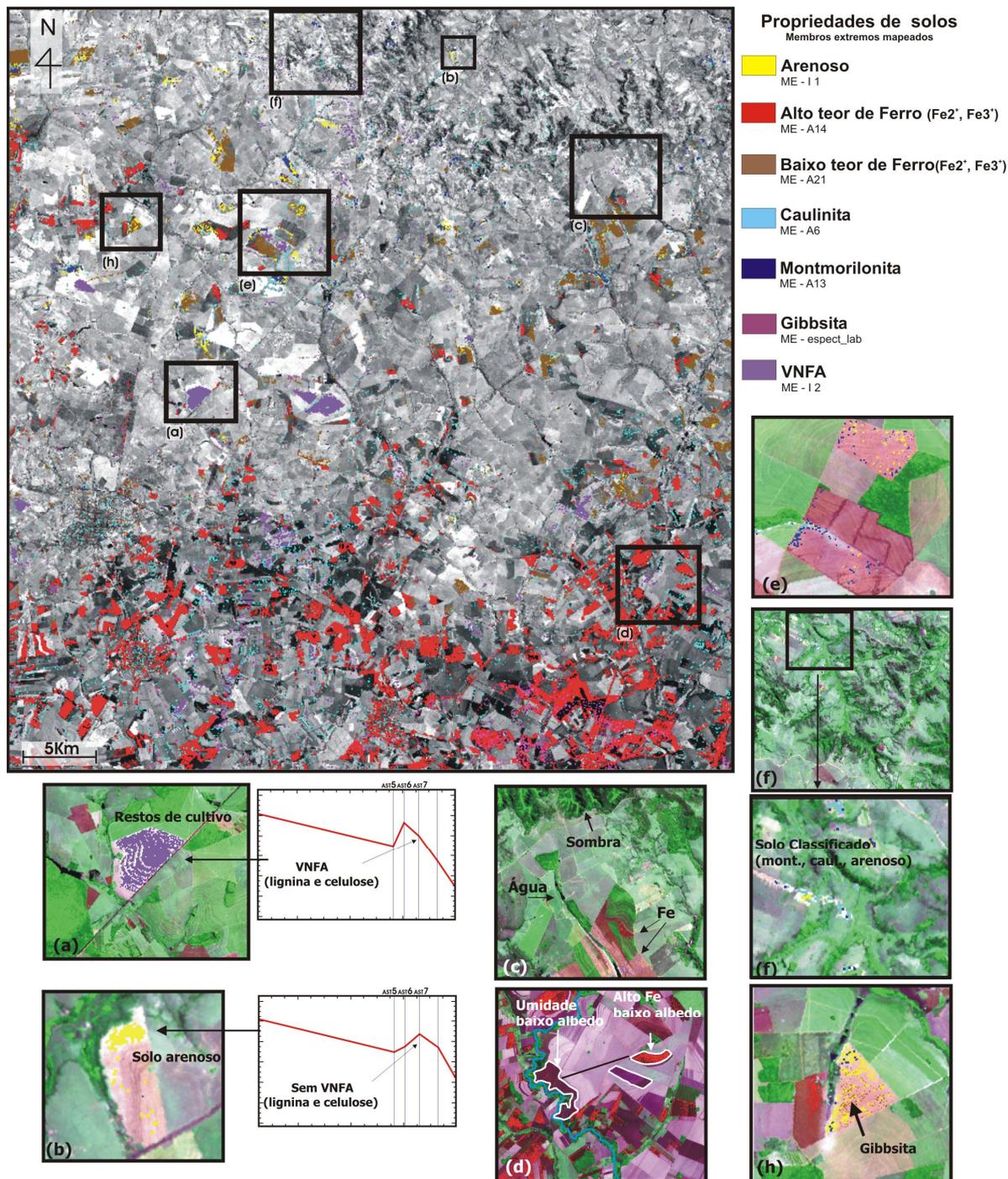


Figura 4.10. Classificação MTMF utilizando como membros extremos os espectros dos minerais sob investigação, referentes a área de estudo. Os locais mapeados podem ser melhor observados por meio das figuras em detalhe (a, b, c, d, e, f, g, h) sobre composição colorida AST231.

Solos com altos teores de ferro estão associados a baixo albedo, devido à diminuição de reflectância e à redução de feições diagnósticas (Stoner & Baumgardner, 1981). Essa combinação, por vezes, gera classificações equivocadas, em que áreas de baixo albedo, porém, associadas à sombras topográficas ou umidade (e.g. fluvial, pluvial, freática), são classificadas como possuidoras de elevados níveis de óxidos de ferro, sendo que uma manifestação típica em ambas, é a saturação do matiz de cor do pixel (Robinove *et al.*, 1981). Esse tipo de situação encontra-se exemplificada na figura 4.10c com uma composição CC\_AST231, sendo que ao compara-la com a classificação MTMF na figura 4.10d (sobreposta a banda AST3 para melhor visualização), observa-se que os efeitos de sombra e umidade (presentes em 3.10c) inexistem em 3.10d, verificando-se uma dissociação de cores do vermelho de matiz intenso com abundância de ferro na classificação MTMF, de outros matizes equivalentes na CC\_AST231 que não possuem elevados níveis de ferro, visto que solos com o mesmo padrão de cores possuem materiais diferentes na composição colorida (Fig. 4.10c).

Caulinita e montmorilonita apresentam-se relativamente escassas e dispersas, notadamente a segunda, visto que a caulinita é mais comumente associada a processos de intemperismo e lixiviação intensos, inerentes à formação pedogenética em solos tropicais (Resende *et al.*, 1988; EMBRAPA, 1999). Essas características corroboram a maior presença de ambas ao Norte-Noroeste, em áreas de solos mais jovens e menos profundos, conservando as características básicas desses minerais (Fig. 4.10e). Porém, mesmo tratando-se de alvos raros e sujeitos ao mascaramento típico de ferro amorfo em solos altamente intemperizados (Epiphanyo, 1992; Formaggio *et al.* 1996), pôde-se identificar a presença de ambos os minerais mesmo em pequena escala em áreas de relevo acidentado, como, por exemplo, na formação de cuevas ao norte (Fig. 4.10f).

A presença de gibbsita é rara e ocorre predominantemente nos Latossolos, onde foi possível identificá-la mesmo em meio a solos ricos em ferro, os quais apresentam uma tendência ao mascaramento das demais feições de absorção (Fig. 4.10h). A identificação da gibbsita nestes locais é corroborada por sua associação à antigas superfícies com elevados níveis de alteração dos solos. A presença deste mineral constitui-se, portanto, num importante indicador do nível de intemperismo dos solos.

De maneira geral o mapeamento da área de estudo delinea também os litotipos rochosos por meio da relação dos solos com o substrato geológico, visto que os solos mais jovens se

encontram em altitudes mais elevadas ao norte, envolvendo as formações Adamantina e Marília (formadas predominantemente por sedimentos arenosos), com a maior presença de caulinita seguida da de montmorilonita. Ao sul, em altitudes menores (bacia do rio Paranapanema), encontram-se solos derivados do intemperismo de rochas basálticas da Formação Serra Geral, caracterizados pela alta concentração de óxidos e hidróxidos de ferro, e pela presença de gibbsita.

#### **4.6. CONCLUSÕES**

Pelo uso de espectroscopia de reflectância foi possível avaliar a capacidade do ASTER em reproduzir feições diagnósticas referentes a importantes características de solos tropicais, considerando seus componentes minerais e granulometria. A análise comparativa entre as 6 coberturas de referência selecionados para análise (ie. solos ricos em ferro, solos pobres em ferro, solos arenosos, solos ricos em caulinita, solos ricos em montmorilonita e VNFA), demonstrou uma alta correlação entre os espectros derivados das amostras de campo e os espectros derivados dos pixels das imagens ASTER, com valores de  $R^2$  variando entre 0,6493 e 0,7886.

No que tange a região do VNIR (0.52 a 0.86  $\mu\text{m}$ ), estabeleceu-se a relação entre diferentes níveis de óxidos/hidróxidos de ferro referente as suas inflexões típicas entre 0.80 e 0.90  $\mu\text{m}$ , e a variação das bandas AST2 e AST3. Na região do SWIR (1.60 a 2.43  $\mu\text{m}$ ), a exploração das feições diagnósticas da caulinita, montmorilonita e gibbsita (2.160-2.265  $\mu\text{m}$ ) propiciou o estabelecimento de parâmetros de detecção e distinção entre esses minerais, com base nas características espectrais do ASTER, relativas as bandas AST5, AST6 e AST7. A reprodução contínua do espectro dessa região também se mostrou extremamente eficiente na separação entre VNFA, VFA e solo nu, expresso nas variações entre as bandas AST6, AST7 e AST8. A capacidade de reprodução das feições analisadas foi comprovada não apenas por sua delimitação e validação espectral, mas também pelo seu mapeamento mediante, a utilização do algoritmo MTMF. A partir desse algoritmo foram obtidos resultados satisfatórios na área de estudo, mesmo com grandes variações topográficas e mistura espectral de alvos devido ao intenso uso da terra no local.

Outra conclusão trata-se do contexto do estudo em áreas tropicais e sua relação com a água atmosférica e aerossóis, sendo que a utilização do modelo de transferência radiativa (MODTRANS – ACORN) mostrou-se adequado à redução dos efeitos das colunas de absorção da água em 1.400 e 1.900  $\mu\text{m}$  no ASTER, de forma que sutis feições diagnósticas reconhecidas

em laboratório (e.g. óxidos de ferro, argilominerais) mantiveram-se na imagem, podendo ser utilizadas nos processos de classificação. A eficiência desses parâmetros de correção atmosférica, aliados aos dados ASTER, permite seu efetivo uso em diferentes áreas, sendo de fundamental importância no estabelecimento de padrões isonômicos de comportamento espectral de alvos. Isso torna possível a comparação com o resultado de estudos semelhantes em diferentes áreas, estabelecendo validações úteis para futuros mapeamentos em ambientes tropicais.

É possível, a partir desse estudo, realizar análises espectrais em diferentes áreas tendo como base o comportamento espectral estudado na região de Assis, sendo que a grande abrangência desta área corrobora a possibilidade de mapeamentos, em meso-escala, de diferentes características de solo utilizando tais métodos aplicados ao sensor ASTER. A alta densidade de uso e ocupação da terra no local reitera a necessidade de consideração conjunta de sistemas ambientais e suas regiões adjacentes, como forma de avaliação das transformações pretéritas e futuras. Neste sentido, estudos multi-escalares capazes de considerar aspectos micro, tais como características físicas e químicas dos alvos e transcendê-las em mapeamento de grande escala, são de vital importância como recurso holístico no entendimento não apenas de ecossistemas, em si, mas de sua relação com a ação antrópica.

#### **4.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ACORN 2002. *ACORN 4.0 tutorial*. (2002). EUA, AGI-Colorado, 109p.
- Abrams, M., & Hook, S. J. (1995). Simulated ASTER data for geological studies. *IEE Trans. on Geosc. And Rem. Sensing*, 33: 629-699.
- Adams, J. B.; Smith, M. O., & Gillespie, A. R. (1993). Imaging spectroscopy: interpretation based on spectral mixture analysis. In: Pieters, C. M., & Englert, P. (eds), *Remote Geochemical Analysis: Elemental and mineralogical composition 7*, Cambridge University Press, New York, p. 145-166.
- Almeida, T. I. R. (2005). *Geobotânica por sensoriamento remoto em florestas tropicais e a abordagem sistêmica: uma ferramenta auxiliar no mapeamento geológico regional e na prospecção mineral*. Tese de livre docência, Departamento de Geologia sedimentar e Ambiental do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, p. 158p.
- Analytical Spectral Devices (1994). *FieldSpec FR – user’s guide*, 89 p.

- Arsenault, E., & Bonn, F. (2005). Evaluation of soil erosion protective cover by crop residues using vegetation indices and spectra mixture analysis of multispectral and hyperspectral data. *CATENA*, 62: 157-172.
- Asner, G. P. & Lobell, D. B. (2000). A biogeophysical approach for automated SWIR unimixing of soils and vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 74: 99-112.
- Ben-Dor, E.; Inbar, Y., & Chen, Y. (1997). The reflectance spectra of organic matter in the visible near infrared and short wave infrared region (400-2500nm) during a controlled decomposition process. *Remote Sensing of Environment*, 61: 1-15.
- Ben-Dor, E.; Irons, J. A., & Epema, A. (1998). *Soil spectroscopy*. In: Rencz, A. (ed.), Manual of Remote Sensing. 3<sup>a</sup> ed: J. Wiley and Sons Inc., New York, p. 111-189.
- Ben-Dor, E. (2002). Quantitative remote sensing of soil properties. *Adv. Agron.*, 75: 173-243.
- Brady, N. C. (1989). *Natureza e propriedades dos solos*. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 878 p.
- Brasil, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Base Cartográfica Integrada Digital do Brasil ao Milionésimo*, 1 : 1 000 000, 2004.
- Chabrillat, S.; Goetz, A. F. H.; Krosley, L.; Olsen, H. W. (2002). Use of hyperespectral images in the identification and mapping of expansive clay soils and role spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*, 82: 431-445.
- Chang, C. W.; Laird, D. A.; Mausbach, M. J., & Hurburgh, C. R. (2001). Near-infrared reflectance spectroscopy – principal components regression analyses of soil properties. *Soil Science Society of American Journal*, 65: 480-490.
- Chen, J. Y., & Reed, I. S. (1987). A detection algorithm for optical targets in clutter. *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, v. AES-23, n. 1.
- Clark, R. N., & Roush, T. L. (1984). Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research*, 89(B7): 6.
- Clark, R. N. (1999). *Spectroscopy of rock and minerals, principles of spectroscopy*. In: Rencz, A. (ed.), Manual of Remote Sensing, 3<sup>a</sup> ed: J. Wiley and Sons Inc., New York, p. 3-58.
- Coleman, T. L.; Agbu, P. A., & Montgomery, O. L. (1993). Spectral differentiation of surface soils and soils properties. Is it possible from space platforms? *Soil Science Society of American Journal*, 155: 283-293.
- Demattê, J. L. I., & Holowaychuck, N. (1977). Solos da região de São Pedro, Estado de São Paulo: II mineralogia (1). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 1: 99-103.

- Demattê, J. A. M. (1995). *Relações entre dados espectrais e características físicas, químicas e mineralógicas de solos desenvolvidos de rochas eruptivas*. Tese de doutorado, Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiróz” – ESALQ, Piracicaba – SP, 265 p.
- Demattê, J. A. M.; Souza, A. A., & Nanni, M. R. (1998). Avaliação espectral de amostras de solos e argilo-minerais em função de diferentes níveis de hidratação. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Santos, INPE/SELASR. 9: 1295-1298.
- Demattê, J. A. M. (1999). *Reflectância espectral de solos*. Tese de livre docência, Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiróz” - ESALQ, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP, 452 p.
- Demattê, J. A. M.; Campos, R. C., & Alves M. C. (2000). Avaliação espectral de solos desenvolvidos em uma toposequência de diabásio e folhelho da região de Piracicaba, SP. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35(12): 2447-2460.
- Ducart, D. F. (2004). Caracterização da alteração hidrotermal associadas às ocorrências auríferas de Los Menucos, Argentina, por meio de técnicas de sensoriamento remoto e espectroscopia de reflectância. Dissertação de mestrado (Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 86p.
- Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC). (2003). *The crostalk correction software user's guide*, 21 p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)/Centro Nacional de Pesquisa de Solos - Rio de Janeiro (1999). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília: SPI, 412 p.
- Epiphanyo, J. C. N.; Formaggio, A. R., Valeriano, M. M., & Oliveira, J. B. (1992) *Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo*. São José dos Campos: INPE , 132 p.
- Foley, J. A.; DeFries, R.; Asner, G. P.; Barford, C.; Bonan, G.; Carpenter, S. R.; Chapin, F. S.; Coe, M. T.; Daily, G. C.; Gibbs, H. K.; Helkowski, J. H.; Holloway, T.; Howard, E. A.; Kucharik, C. J.; Monfreda, C.; Patz, J. A.; Prentice, C.; Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309: 570-574.
- Formaggio, A. R.; Epiphanyo, J. C. E; Valeriano, M. M., & Oliveira, J. B. (1996). Comportamento espectral (450-250 nm) de solos tropicais de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 20, n.3, p. 467-474.

- Fraser, S. J. (1991). Discrimination and identification of iron oxides using satellite thematic mapper data: a newman case study. *International Journal of Remote Sensing*, 12: 635-641.
- Galvão, L. S.; Vitorello, I., Paradella, W. R. (1995). Spectroradiometric discrimination of laterites with principal components analysis and additive modeling. *Remote Sensing of Environment*, 53: 70-75.
- Galvão, L. S.; Almeida-Filho, R., & Ícaro, V. (2005). Spectral discrimination of hidrotermally altered materials using ASTER short-wave infrared bands: Evaluation in a tropical savannah environment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 7: 107-114.
- Gillespie, A. R.; Smith, M. O.; Adams, J. B.; Willis, S. C.; Fischer, A. F. III, & Sabol, D. E. (1990). Interpretation of residual images: Spectral mixture analysis of AVIRIS images, Owens Valley, California. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> *Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop*. Pasadena, CA, NASA Jet Propulsion Laboratory.
- Gomes, C. F. (1986). *Argilas: o que são e para que servem?* Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian, 455 p.
- Grove, C. I.; Hook, S. J., & Paylor II, E. D. (1995). Laboratory reflectance spectra of 166 minerals 0.4 to 2.5 micrometer. *Jet Propulsion Laboratory (JPL) Publ.*, 92-2, California Institute of Technology, Pasadena, CA.
- Hauff, P. L.; Kruse, F. A., & Thiry, M. (1990). Spectral identification and characterization of Kaolinite/smectite clays in weathering environments. In: *Australasian Remote Sensing Conference*, 5, Perth, Australia. Proceedings, p: 898-905.
- Harsanyi, J. C., & Chang, C. (1994). Hyperspectral image classification and dimensionality reduction: an orthogonal subspace projection approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32: 779-785.
- Henderson, T. L.; Baumgardner, M. F.; Chen, Franzmeier, D. P.; Scott, D. E., & Coster D. C. (1992). High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 56: 865-872.
- Hubbard, B. E., & Crowley, J. K. (2005). Mineral mapping on the Chilean-Bolivian Altiplano using co-orbital ALI, ASTER and Hyperion imagery: data dimensionality issues e solutions. *Remote Sensing of Environment*, 99: 173: 186.

- Hunt, G. R., & Salisbury, J. W. (1970). Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: II Carbonate. *Modern Geology*, 2: 23-30.
- Hunt, G. R.; & Salisbury, J. W.; Lenhoff, C. J. (1971). Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: III Oxides and Hidroxides. *Modern Geology*, 2: 195-295.
- Hunt, G. R.; & Salisbury, J. W.; Lenhoff, C. J. (1974). Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: IX Basic and ultrabasic igneous rocks. *Modern Geology*, 5: 15-22.
- Iwasaki, A., & Tonooka, H. (2005). Validation of a crosstalk correction algoritm for ASTER/SIWR. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(12): 2747-2751.
- Kruse, F. A., & Thiry, M., & Hauff, P. L. (1991). Spectral identification (1,2 – 2,5 µm) and characterization of Paris Basin Kaolinite/smectite clays using a field spectrometer. In: *International Colloquium – Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, 5, Courchevel, France. Proceedings: INRA, p. 181-184.
- Lobell, D. B., & Asner, G. P. (2002). Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of American Journal*, 66: 722-727.
- Madeira Netto, J. S. (1991). *Étude quantitative des relations constituants mineralogiques – reflectance diffuse des latosols bresiliens: application a l'utilisation pedologique des donnees satellitaires TM (Region de Brasília)*. Tese de doutorado: L'Universite Paris 6, 229 p.
- Madeira Netto, J. S.; Pouget, M.; Bedidi, A., & Cervelle, B. (1991). Relations entre lês constituants minéraux d'oxisols brésiliens el leurs signatures spectrales du visible a l'infraruge moyen: application a des données satellitaires (Landsat TM). I. Les oxydes de fer. II. La kaolinite at la gibbsite, implications sur la texture. Journées de télédetection, 2, 1990. In: *Caractérisation et suivi des milieux terrestres en regions arides et tropicales*, 1991, 21-25.
- Madeira Netto, J. S.; Pouget, M.; Bedidi, A., & Cervelle, B. (1993). Informações quantitativas sobre a mineralogia dos latossolos a partir da reflectância espectral no visível e infravermelho próximo e médio. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Curitiba, CNP/Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, 7: 919-28.
- Morra, M. J.; Hall, M. H., & Freeborn, L. L. (1991). Carbon and nitrogen analisys of soils fractions using near infrared reflectance spectroscopy. *Soil Science Society of American Journal*, 55: 288-291.

- Meneses, P. R. & Ferreira Júnior, L. G. (2001). Comportamento espectral de Minerais e Rochas. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S (org.). *Sensoriamento Remoto: reflectância de alvos naturais*. Brasília, DF: UNB, 262 p.
- Muller, E., & Décamps, H. (2002). Modelling soil moisture-reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 76: 173-180.
- Nanni, M. R., & Demattê, J. A. N. (2006). Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. *Soil Science Society of American Journal*, 70: 393-407.
- Oliveira, J. B. (1988). Evolução dos trabalhos de levantamento de solos e dos estudos de variabilidade espacial no estado de São Paulo. *Inst. Agron. Campinas*, 40 (2): 138-148.
- Pickup, G., & Nelson, D.J. (1984). Use of Landsat radiance parameters to distinguish soil erosion, stability, and deposition in Arid Central Australia. *Remote Sensing of Environment*, 16: 195 - 209.
- Resende, M.; Curi, N., Santana, D. P. (1988). *Pedologia e fertilidade do solo: interações e aplicações*. Brasília: Ministério da Educação, 83 p.
- Robinove, C. J.; Chavez, P.S.; Gehring, D., & Holmgren, R. (1981). Arid land monitoring using Landsat albedo difference images. *Remote Sensing of Environment*, 11:133-156.
- Rowan, L. C. (1998). Analysis of simulated advanced spaceborne thermal emission and reflection (ASTER) radiometer data of the Iron Hill, Colorado, study area for mapping lithologies. *Journal of Geophysical Research*, 103 (D24), 32291-32306.
- São Paulo, Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE)/Universidade Estadual Paulista (UNESP) – campus de Rio Claro, Mapa geológico do estado de São Paulo, quadrícula: Marília, 1 : 250 000, 1982.
- São Paulo, Instituto Agrônomo de Campinas, Levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo, 1 : 100 000, quadrículas: Assis e Maracáí, 1996.
- São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas . *Mapa geomorfológico do estado de São Paulo*, 1 : 500 000, 1981.
- São Paulo, Instituto Agrônomo de Campinas. *Mapa pedológico do estado de São Paulo*, 1 : 500 000, 1999.
- São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente (SMA)-Instituto Florestal(IF)/Biota-FAPESP. (2002). Levantamento da cobertura vegetal do estado de São Paulo. Base cartográfica digital.

- Sawhney, B. L. (1989). Interstratification in layer silicates. In: Minerals in soils environments. Wisconsin: *Soil Science Society of America*, nº 1, 2 ed., p.789-824.
- Senna, J. A. (2003). *Caracterização de argilo-minerais de utilização na indústria cerâmica por espectroscopia de reflectância*. Dissertação de mestrado (Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 221 p.
- Shepherd, K. D., & Walsh, M. G. (2002). Development of reflectance libraries for characterization of soil properties. *Soil Science Society of American Journal*, 66: 988-998.
- Souza Filho, C. R., Tápia, C. H., Crósta, A. P. & XAVIER, R. P. (2003). Infrared spectroscopy and ASTER imagery analysis of hidrothermal alteration zones at the Quellaveco Porphyry-Cooper Deposit, Southern Peru. In: *Proceedings of the American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)*, Annual Conference – “Technology: Converging at the Top of the World”, p. 1-12.
- Stoner, E. R., & Baumgardner, M. F. (1981). Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Science Society of American Journal*, 45:1161-1165.
- Stoner, E.; Derksen I.; Macedo, J. (1991). Discriminação espectral de latossolos do planalto central brasileiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 26(10): 1599-1606.
- Tilman, D., & Lehman, C. (2001). Human-caused environmental change: Impacts on plant diversity and evolution. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. Colloquium paper, 98 (10): 5433-5440.
- Thompson, A. J. B.; Phoebe, L, H., & Audrey, J. R. (1999). Alteration mapping in exploration: application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy. *Society of Economic Geologist, Newsletter*, 39:1-27.
- Valeriano, M. M.; Epiphânio, J. C. N.; Formaggio, A. R., & Oliveira, J. B. (1995). Bi-directional reflectance factor of 14 soil classe from Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 35: 113-128.
- Vägen, T.; Shepherd, K. D., & Walsh, M. G. (2005). Sensing landscape level change in soil fertility following deforestation and conversion in the highlands of Madagascar using VIS-NIR spectroscopy. *Geoderma*, 14p.
- Vicente, L. E.; Souza Filho, C. R., & Perez Filho, A. (2005). Mapeamento de formações arenosas em fragmentos de Cerrado utilizando dados e produtos do sensor ASTER. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, INPE/SELASR. 12: 3419-3426. <<http://www.ltid.inpe.br/sbsr2005>>

- Williams, A. P., & Hunt Jr., E. R. (2002). Estimation of leafy spurge cover from hyperspectral imagery using mixture tuned matched filtering. *Remote Sensing of Environment*, 82: 446-456.
- Zagolski, F.; Pinel, V.; Romier, J.; Alcayde D.; Fontanaru, J.; Gastellu-Etchegorry, J. P.; Giordano, G.; Marty, G.; Mougin, E., & Jofre, R. (1996). Forest canopy chemistry with high spectral resolution remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 17: 1107-1128.
- Zavaleta, E. S.; Shaw, M. R.; Chiariello, N. R.; Mooney, H. A., & Field, C. B. (2003). Additive effects of simulated climate change, elevated CO<sub>2</sub>, and nitrogen deposition on grassland diversity. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 100 (13): 7650-7654.

## *CAPÍTULO 5*

### ***MÉTODO DE MONITORAMENTO QUANTITATIVO DE PROCESSOS DE ARENIZAÇÃO EM REGIÕES TROPICAIS UTILIZANDO DADOS DO INFRAVERMELHO TERMAL DO SENSOR ASTER (ADVANCED SPACEBORNE THERMAL EMISSION AND REFLECTION RADIOMETER)***

#### **5.1. INTRODUÇÃO**

A intensa retirada de cobertura vegetal natural e contínuo uso e ocupação de extensas áreas para atividades humanas, vêm gerando um cenário preocupante em relação às modificações ambientais (Vitousek et al., 1997; Tilman et al., 2001). Um dos indicadores dessas modificações encontra-se na deflagração de processos de degradação de terras em diferentes regiões do planeta, incluindo a queda de fertilidade e erosão do solo (Skarpe, 1991; van de Koppel, 1997; Schlesinger et al., 1990, Houghton, 1994). O aumento de áreas degradadas apresenta consequências tanto locais como globais no que se refere à alteração nos ciclos de carbono, aumento dos gradientes de temperatura de superfície, diminuição na capacidade de produção de alimento e destruição de ecossistemas (Tilman, 1999; Hulme & Kelly, 1993; Wackernagel et al., 2002; Woodruff, 2001; Sala *et al.*, 2000).

Esse tipo de processo de degradação de terras é cada vez mais comum em todo o planeta, sendo considerado, indevidamente, por alguns autores, como desertificação. Porém, diferenças quanto à sua gênese têm redefinido a terminologia sobre processos de desertificação. Segundo a Conferência das Nações Unidas sobre Desertificação (1992), desertificação compreende a “degradação de terras áridas, semi-áridas e sub-áridas, resultante de vários fatores, incluindo as variações climáticas e as atividades humanas”. Entretanto, a ocorrência desses processos no Brasil, em geral, não estão associados aos fatores de âmbito climático, mas, sim, ao “retrabalhamento de depósitos areníticos (pouco consolidados) ou arenosos (não consolidados), que promove, nessas áreas, uma dificuldade de fixação da vegetação, devido à constante mobilidade dos sedimentos” (Suertegaray *et al.*, 2001; Verdum, 1997).

Portanto, independentemente das características climáticas, esses processos podem ser encontrados tanto em regiões áridas e semi-áridas, sendo, mais apropriadamente, denominados desertificação (Kassas, 1995; Verstraete & Schwartz, 1991), quanto em regiões sub-tropicais ou

temperadas, onde são geralmente denominados de arenização (Suertegaray *et al.*, 2001; Verдум, 1997). Em ambas as condições, a degradação está associada a solos frágeis (não ultrapassando 15% de argila em sua composição), o que corrobora a necessidade de consideração de aspectos pedológicos como importante indicador de vulnerabilidade da cobertura.

A classificação da fragilidade de solos é baseada fundamentalmente na participação relativa das frações argila e areia do solo, uma vez que a granulometria afeta diversos componentes, tais como a capacidade de retenção de água e sua disponibilidade, bem como a percolação de soluções e outras substâncias. Em alguns casos, como nos solos arenosos, ainda deve-se considerar a ausência de vegetação associada a ocorrência de ventos de certa intensidade. Também afetam a fragilidade, componentes como: compostos de ferro, matéria orgânica, argilo-minerais, carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e silicatos (Si-O) (Brady, 1989). Dessa forma, solos argilosos, de maneira geral, possuem boa capacidade de trocas catiônicas e retenção de umidade, representando ganho de nutrientes e estabilidade estrutural à processos erosivos. Solos arenosos, ao contrário, possuem excessiva capacidade de drenagem, o que lhes confere pouca retenção iônica associada a baixa retenção de nutrientes e alta erodibilidade por desagregação das partículas maiores com mais facilidade (Brady, 1989).

O monitoramento espacial e temporal de áreas sujeitas a degradação ambiental e submetidas a processos erosivos intensos, considerando suas propriedades intrínsecas, é de fundamental importância para a mitigação de processos de arenização. O uso de sensores multiespectrais vem gerando importantes contribuições neste tipo de abordagem, por meio do mapeamento do uso da terra, estimativas de biomassa e perda da qualidade do solo (IPCC, 2003; Hanan *et al.*, 1991). A utilização do sensoriamento remoto multiespectral neste tipo de estudo baseia-se, em grande parte, na região do espectro eletromagnéticos (EEM), com a maior cobertura de bandas nos sensores atuais (e.g. ETM-TM/Landsat e HRV/Spot), abrangendo a faixa do visível (*visible* - VIS) (0.52-0.69 $\mu\text{m}$ ), infravermelho próximo (*Near Infrared* - NIR) (0.78-0.86  $\mu\text{m}$ ) até o infravermelho de ondas curtas (*Short Wave Infrared* - SWIR) (0.4  $\mu\text{m}$  a 2.5  $\mu\text{m}$ ).

#### **5.1.1. O USO DO INFRAVERMELHO THERMAL (TIR) NO ESTUDO DE PROCESSOS DE ARENIZAÇÃO**

De maneira geral, estudos sobre a degradação de terras baseados nas faixas espectrais do VNIR-SWIR são capazes de estimar a perda de vegetação, a partir dos níveis de albedo dissociado de matéria orgânica, identificando alterações no tamanho e distribuição das manchas

de solo nu (Robinove *et al.*, 1981). A esse procedimento soma-se a detecção de óxidos e hidróxidos de ferro (ferro férrico e ferro ferroso), definidos na região do VNIR (0.4-1.3 $\mu$ m), responsáveis por diferentes tonalidades do solo, os quais podem ser associados às argilas e constituem indicadores de seu empobrecimento e erodibilidade (Latz *et al.*, 1984; Wessman, 1991). Porém, as medidas de albedo, assim como a presença de ferro no solo, estão sujeitas à influência climática sazonal e local, principalmente em climas tropicais. Isso se deve ao excesso de umidade (vapor d'água na atmosfera, retenção de água no solo e na vegetação) bem como diferenças fenológicas da vegetação, o que pode alterar leituras de biomassa baseadas em índices, como o de área foliar (*Leaf Area Index* - LAI) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Hales *et al.*, 2004; Galvão *et al.*, 1999, Huete *et al.*, 1994).

Uma das alternativas para o refinamento dessa abordagem encontra-se na detecção direta de silicatos associados à areia, principalmente o quartzo, que conjuntamente com os argilominerais, são fundamentais na classificação pedológica. Dessa forma, a detecção de componentes mineralógicos (e.g. quartzo, caulinita), bem como propriedades granulométricas, permite estimar de maneira mais exata, os níveis de alteração dos solos, e, portanto, sua fragilidade frente a processos de lixiviação e carreamentos inerentes aos processos de arenização. Porém, este tipo de mapeamento sempre foi limitado pelo comportamento espectral do quartzo, em particular, visto que o mesmo apresenta somente feições de absorção típicas na região do Infravermelho Termal (*Thermal Infrared* - TIR) (3 $\mu$ m-11 mm) (Salisbury *et al.*, 1991; Hunt & Salisbury, 1970). Essa região do espectro, até recentemente, era pouco abrangida pelos sensores multiespectrais, restringindo-se apenas à banda 6 no TM (10-11  $\mu$ m), com NE $\Delta$ T (*noise-equivalent temperature difference*) de  $\leq 0.30$  a 280 K e resolução espacial de 120 m, assim como no ETM+ (10.31-12.36  $\mu$ m), com NE $\Delta$ T de 0.22 a 280 K, com 60 m de resolução espacial. A cobertura de uma única banda, nestes sensores, impossibilita processamentos simples tais como razões de banda, visando à identificação das principais feições de absorção dos minerais.

Estudos mais detalhados, considerando o TIR, sempre dependeram de sensores aerotransportados, de pouca abrangência e acesso restrito, aplicados principalmente em estudos de regiões áridas e semi-áridas, como o TIMS (*Thermal Infrared Multispectral Scanner*), o MIRACO2LAS (*Mid-infrared Airborne CO2 Laser Spectrometer*) ou o SEBASS (*Spatially Enhanced Broadband Array Spectrograph System*) (Kahle *et al.*, 1980; Cudahy *et al.*, 1999, Cudahy *et al.*, 2000). Foi a eficiência do TIMS no mapeamento de minerais, utilizando o

infravermelho termal, que direcionou a concepção do subsensor TIR do *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) (Kahle & Goetz, 1983; Kahle *et al.*, 1980), tornando-o o primeiro sensor multiespectral orbital termal apto ao mapeamento de componentes minerais. Este subsensor possui 90 m de resolução espacial, 4096 níveis de cinza (12 bits), cobertura semi-contínua de 5 bandas (8.125-10.95 $\mu$ m) e um consistente NE $\Delta$ T de 0.3 a 300 K (tabela 1) (Ninomiya *et al.*, 2005; Abrams & Hook, 2002) (detalhes descritos no cap.1).

O uso do ASTER-TIR tem gerado bons resultados no mapeamento de minerais e no monitoramento da degradação de solos em diversas partes do mundo, principalmente em climas áridos e semi-áridos (Hook *et al.*, 2005; Hewson *et al.*, 2005; Schmugge *et al.*, 2002; Ramsey, *et al.*, 1999). No caso de climas tropicais, é provável que o uso do TIR seja de extrema importância, pois essa região do espectro apresenta uma transparência relativamente alta, com taxas máximas de emissividade terrestre (300 K), além de apresentar feições diagnósticas não apenas de silicatos, mas também de sulfatos e carbonatos (Kahle *et al.*, 1993; Vaughan *et al.*, 2005). Esses fatores tendem a aumentar a decorrelação de componentes do solo, diminuindo os efeitos típicos da vegetação presentes principalmente no VIS (0.4-0.7  $\mu$ m) e no SWIR (2.2  $\mu$ m).

Pesquisas recentes têm obtido resultados relevantes no mapeamento de solos no Brasil, usando o VNIR-SWIR do ASTER (Galvão *et al.*, 2005; Vicente *et al.*, 2005), porém, a aplicação do TIR para esse tipo de mapeamento, ainda é inédita. No caso de mapeamentos geológicos, as imagens termais do ASTER foram usadas no Brasil, numa região semi-árida, especificamente na detecção de minerais no estudo de gossans, realizado por Lima (2003) na bacia do Irecê - BA. Dessa forma, o presente trabalho é pioneiro na utilização de dados termais multiespectrais para o mapeamento de propriedades de solos, ressaltando-se o enfoque em áreas degradadas, e um dos únicos em clima tropical de regiões úmidas, o que contribui para o estabelecimento de parâmetros de avaliação para outros sistemas ambientais com processos semelhantes no planeta.

Dessa maneira, um dos objetivos deste trabalho é o mapeamento da abundância e distribuição de componentes minerais em áreas de arenização, utilizando dados termais do sensor ASTER, como subsídio a análise espacial deste tipo de processo. Um segundo objetivo consiste na avaliação da capacidade deste sensor no que tange a reprodução de feições diagnósticas de minerais típicos de solos tropicais no infravermelho termal.

## **5.2. ÁREA DE ESTUDO**

Uma das principais regiões de formação de areais no Brasil encontra-se no Sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, a partir do meridiano 54°S, seguindo a oeste até a divisa com o Uruguai e a Argentina (SECP, 2001). A área de estudo deste trabalho compreende um recorte a Nordeste desta área, no sentido norte-sul, dentro do município de São Francisco de Assis (Fig. 5.1). Esse recorte objetiva cobrir algumas das principais áreas já mapeadas com formações de areais, visto que São Francisco de Assis apresenta a segunda maior quantidade de ocorrências dentre os municípios já mapeados na região de ocorrência deste tipo de fenômeno, no Sudoeste do Rio Grande do Sul, representando cerca de 5,88 Km<sup>2</sup> ou 0.027% da área total do município (SECP, 2001).

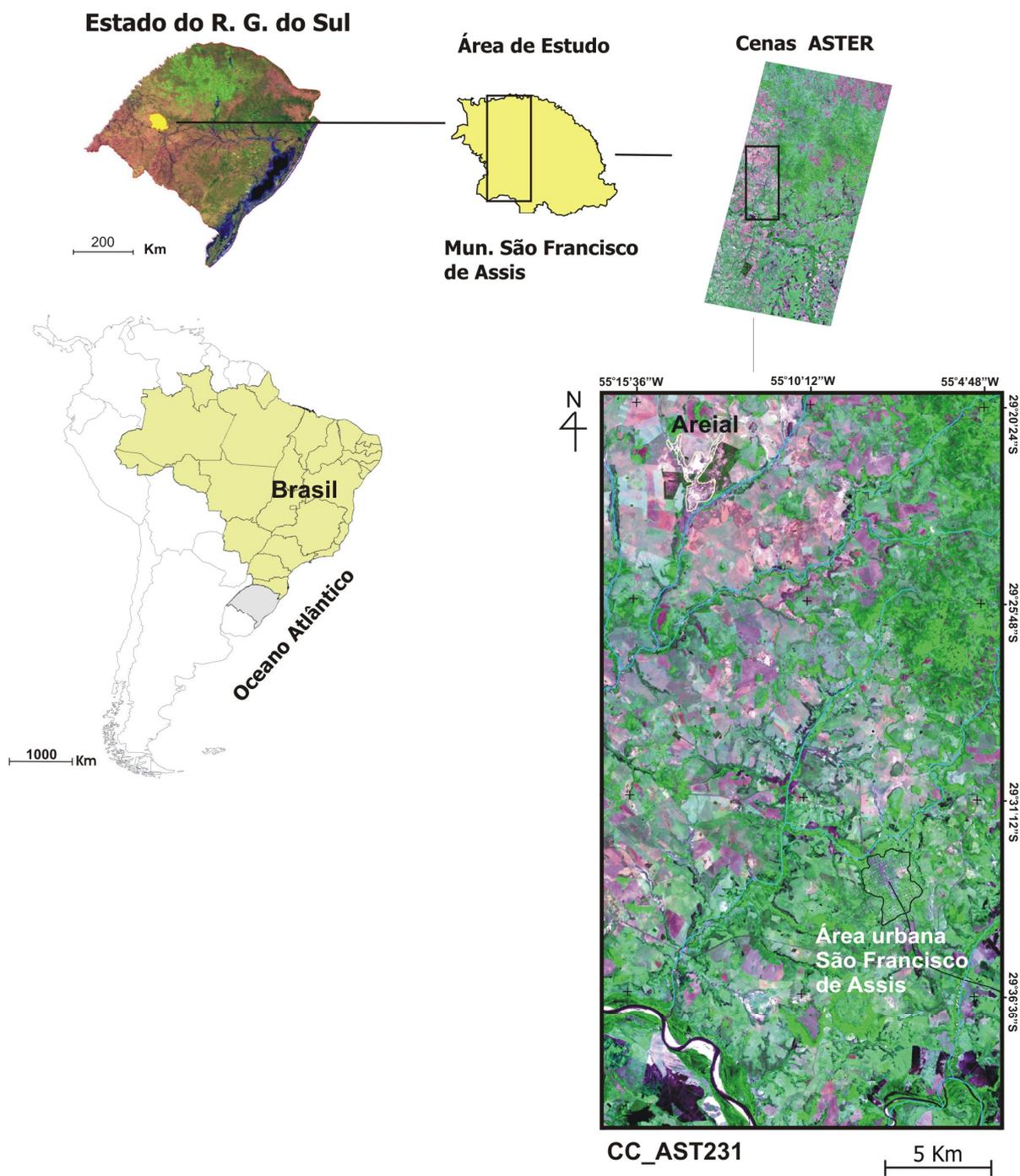


Figura 5.1. Mapa de localização da área de estudo. A imagem em destaque é uma composição colorida falsa-cor das bandas 231 (RGB) do sensor ASTER.

Na composição litológica da área prevalecem rochas sedimentares da Formação Rosário Sul (Rrs) em sua porção central, seguida da Formação Serra Geral (JK) ao norte, e Formação

Botucatu (Jb) a sul-sudoeste, entremeadas por depósitos aluvionares (QHa) ao longo das principais planícies fluviais (SAA/IBGE – Geologia, 2003). A geomorfologia local compreende, em sua grande parte, a Depressão Central Gaúcha, com predominância das depressões do Rio Jacuí e Ibicuí, margeado a sudoeste pelo Planalto da Campanha com as unidades Planalto de Uruguaiana nível alto e nível baixo, entrecortados por Planícies alúvio-coluvionares (SAA/IBGE - Geomorfologia, 2003). Esse tipo de conformação morfoestrutural confere ao local um relevo suave e minimamente dissecado com planícies e terraços fluviais, assim como presença de morros testemunhos ou “cerros”, na linguagem local. Os solos predominantes na área de estudo variam de Latossolos Vermelho-escuro Álico (LEa) na porção centro-norte, a diferentes tipos de argissolos ao sul (e.g. PBPa, PBPe, PEa, PEd, PVa) (SAA /IBGE - Pedologia, 2003), e manchas de neossolos quartzarênicos em toda a área (Azevedo & Kaminski, 1995).

A pluviosidade local é consonante com climas tropicais e subtropicais, mantendo consideráveis níveis de umidade, oscilando entre 1.250 a 1.500 mm anual, com médias mensais superiores a 100 mm em grande parte dos meses. As temperaturas apresentam um amplo gradiente sazonal, com médias mensais nos verões em torno de 25°, e invernos entre 13° e 14° (Moreno, 1961). Tais características são resumidas por Nimer (1971) com a classificação “mesotérmico brando super úmido”.

#### **5.2.1. COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DOS SOLOS**

Por meio de mapas da área de estudo (geológico, geomorfológico e pedológico) e trabalhos de campo, foram selecionados 5 pontos para coleta de amostras de solo em 3 profundidades (0-20, 80-100 e 180-200 cm). A escolha dos pontos de coleta teve como base as principais formações de areais, bem como locais que representassem a variação de tipo da área. Observando-se a análise granulométrica é possível estimar a predominância da fração areia, com percentuais médios acima de 90% (Fig. 5.2b – Tabela 1).

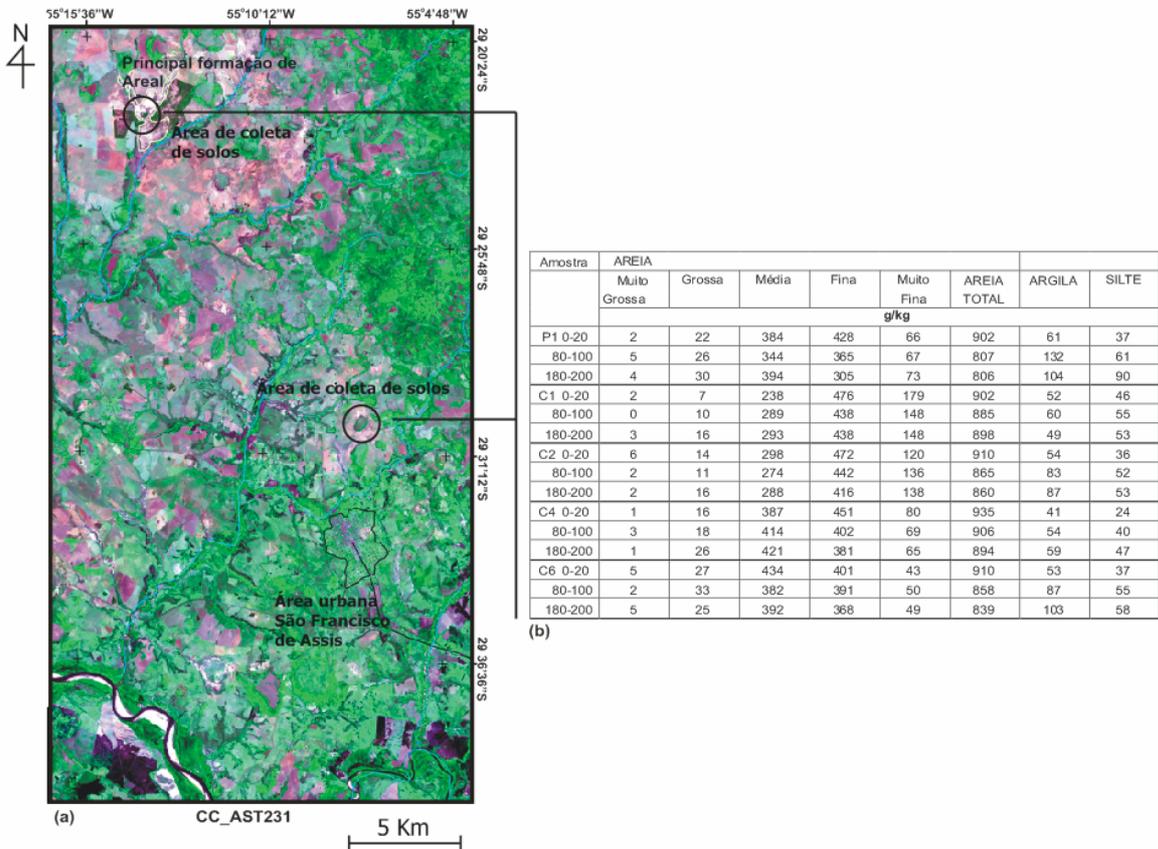


Figura 5.2. Mapa da área de estudo com áreas de coleta de amostras de solo em destaque (Fig. a). Tabela 1. Dados de análise granulométrica de solos da área de estudo realizados pelo método de pipeta (Labsol/Feagri segundo EMBRAPA, 1997) (Fig.b).

Para detecção dos principais minerais no solo foi realizada uma análise por difratometria de raio X (DRX), utilizando o difratômetro *Siemens Diffraktometer Kristallofe*. As amostras foram coletadas a uma profundidade entre 0-20 cm, visando a uma comparação mais direta com a informação passível de ser detectada por um sensor remoto orbital.

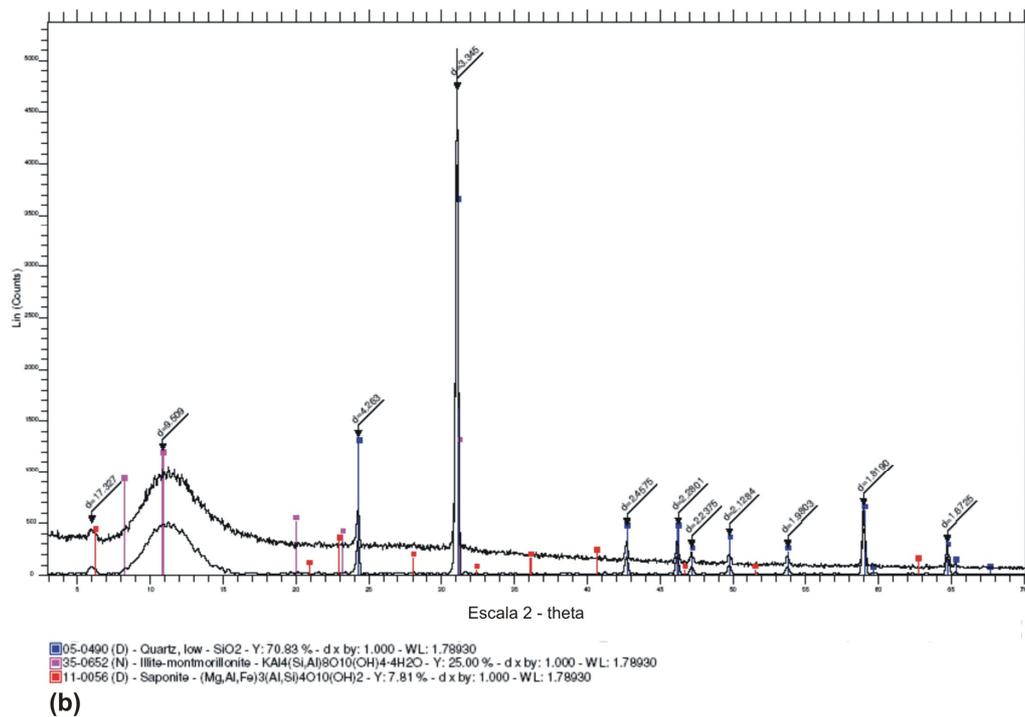
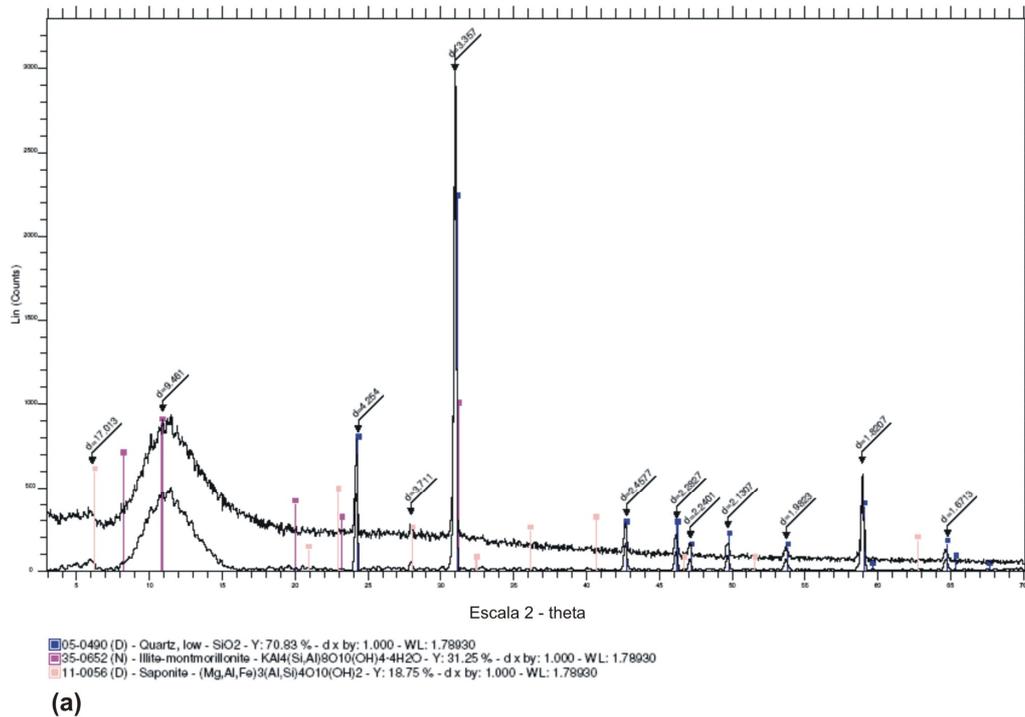


Figura 5.3. Diagramas derivados das análises por difratometria de Raio X realizadas nas amostras de solos na área de estudo, considerando-se a localização das principais formações de areais. Visto que tratam-se análises de fração total, o quartzo é o mineral predominante, seguido de illita-montmorilonita.

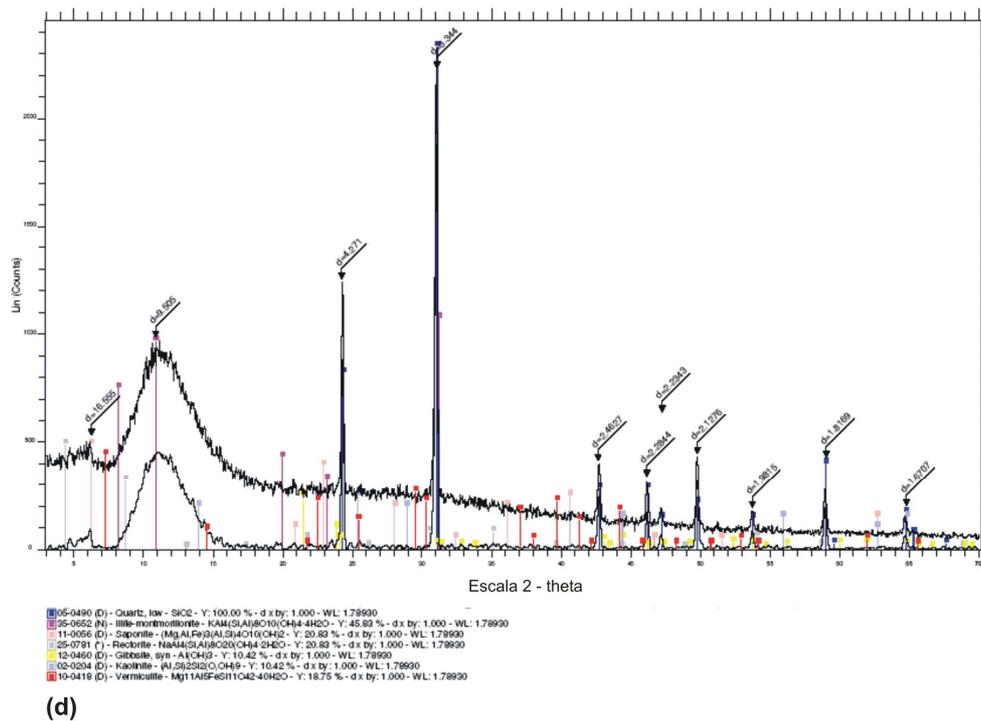
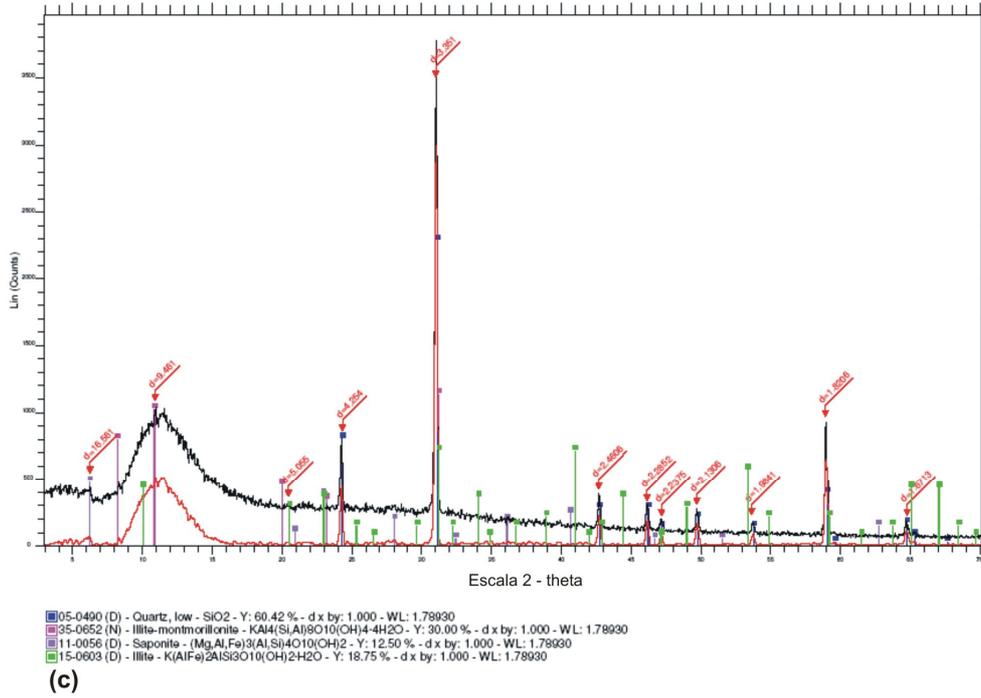
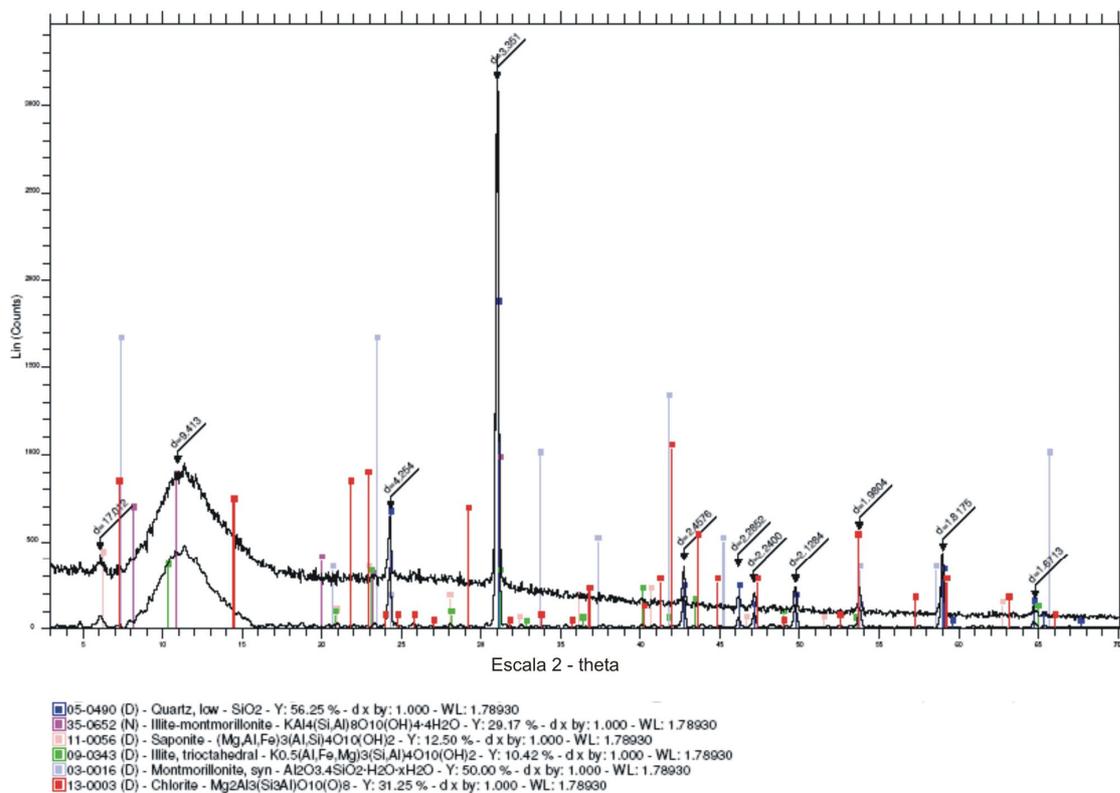


Figura 5.4. Diagramas derivados das análises por difratometria de Raio X realizadas nas amostras de solos na área de estudo, considerando-se a localização das principais formações de areais. Em ambas as amostras (c e d) predominam o quartzo e a illita-montmorillonita, porém com pequenas quantidades de kaolinita e gibbsita, entre outros minerais.



(e)

Figura 5.5. Diagramas derivados das análises por difratometria de Raio X realizadas nas amostras de solos na área de estudo, considerando-se a localização das principais formações de areais. Nessas amostras, é possível observar uma variedade maior de minerais em relação as demais amostras, porém, com pouca significância quantitativa.

Nas análises por DRX, o quartzo (SiO<sub>2</sub>) foi detectado como o mineral mais abundante, o que é corroborado pelas análises granulométricas, visto que se trata de um solo eminentemente arenoso (Fig. 5.2 - tabela1). No caso dos argilominerais, a montmorilonita interestratificada com uma mica (illita) (KAl<sub>4</sub>(Si, Al)<sub>8</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>4-4</sub>H<sub>2</sub>O) foi detectada em todos os pontos. Caulinita (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>) e saponita ((Mg, Al, Fe)<sub>3</sub>(Al, Si)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>) foram determinadas em apenas um dos pontos de controle e em pequena quantidade. Também foram detectados argilo-minerais do tipo 2:1, de ocorrência menos comum, como a clorita (Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>(Si<sub>3</sub>Al)O<sub>10</sub>(O)<sub>8</sub>-); vermiculita (Mg<sub>11</sub>A<sub>15</sub>FeSi<sub>11</sub>O<sub>42-40</sub>H<sub>2</sub>O); rectorita (NaA<sub>14</sub>(Si, Al)<sub>8020</sub>(OH)<sub>4-2</sub>H<sub>2</sub>O) e um hidróxido, no caso a gibbsita (Al(OH)<sub>3</sub>Al(OH)<sub>3</sub>). A não detecção de óxidos e hidróxidos de ferro, como hematita (F<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e goethita (FeOOH), pela DRX, pode significar não apenas uma quantidade reduzida desses minerais, como também, uma disposição dos mesmos em pequenos agregados, pseudo-

partículas ou concreções, sendo que essa disposição e quantidade, constitui outros indicadores da compleição arenosa dos solos da área de estudo, (Figuras 5.2 a 5.5).

### 5.3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 5.3.1. ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA DE MINERAIS NO INFRAVERMELHO TERMAL

Como referência do comportamento espectral dos minerais no infravermelho termal reconhecidos em campo, foi utilizada a biblioteca espectral da *John Hopkins University* (JHU) (Salisbury *et al.*, 1991). Essa biblioteca possui um amplo acervo de assinaturas espectrais em reflectância bidirecional/bicônica no intervalo de 2,0 a 25  $\mu\text{m}$ , as quais podem ser utilizadas como referência qualitativa para o estudo de feições diagnósticas, visto que conservam sua forma e posição. Porém, por não se tratarem de dados em reflectância hemisférica (R) (medidas por meio de uma esfera integradora), não é possível o seu uso para estimativas quantitativas de emissividade, e, sim, como referencial teórico (Salisbury *et al.*, 1991; Korb *et al.*, 1996). Dessa forma, por meio da aplicação da lei de Kirchhoff, os espectros foram convertidos para emissividade ( $\epsilon = 1 - R$ ), viabilizando uma análise mais intrínseca ao comportamento espectral dos minerais considerados neste trabalho (Fig. 5.6).

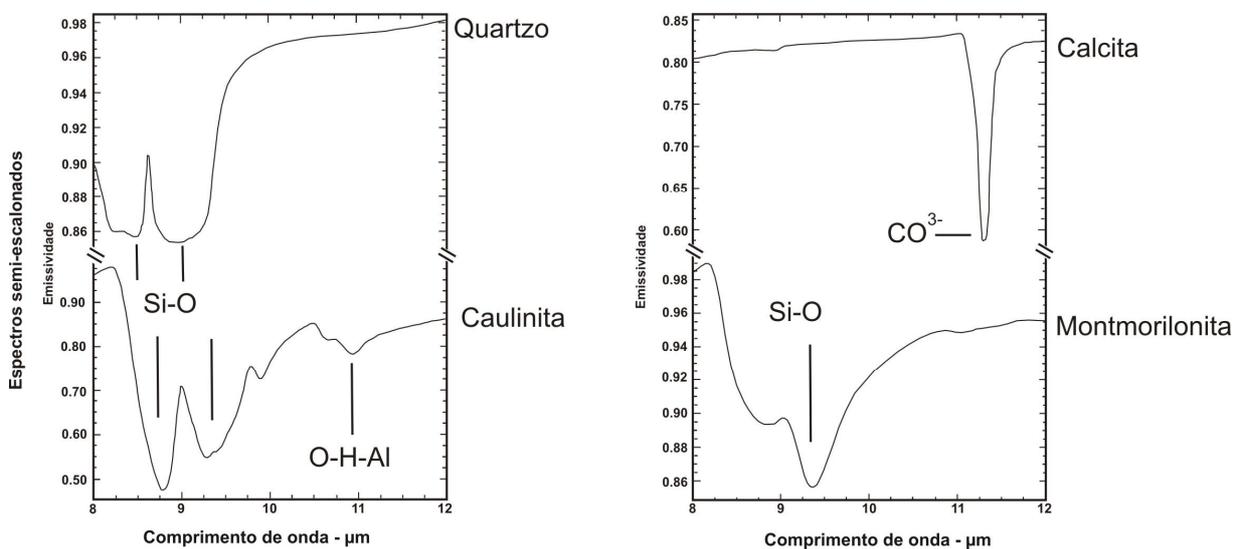


Figura 5.6. Assinaturas espectrais corrigidas para emissividade ( $\epsilon = 1 - R$ ) dos principais minerais sob investigação na área de estudo (USGSLib).

O comportamento de minerais no TIR apresenta particularidades principalmente em relação aos silicatos, visto que suas principais feições de absorção ocorrem na faixa centrada em 10  $\mu\text{m}$  (Salisbury *et al.*, 1991). Essas feições estão relacionadas à ligação Si-O, a qual apresenta a mínima emissividade e máxima reflectância ("banda *reststrahlen*") nos modos de estiramento de ondas mais curtas para ondas mais longas, definidas por ligações tetraédricas na estrutura cristalina do mineral. Esse comportamento pode ser verificado em silicatos ordinários como o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), que apresenta feições em torno de 8.2 e 9.3  $\mu\text{m}$  (Fig. 5.6), bem como em silicatos de compleição argilosa, como a caulinita e a montmorilonita, (Salisbury *et al.*, 1991; Hook *et al.*, 1999) (Fig. 5.6).

Os carbonatos não foram encontrados nas DRX da área de estudo, porém representam um importante grupo de minerais presentes em solos tropicais úmidos e que auxiliam na estimativa de estabilidade em processos de degradação de terras, e, portanto, serão considerados neste trabalho. As menores emissividades deste tipo de mineral ocorrem em torno de 11.3  $\mu\text{m}$ , devido a modos de vibração molecular do íon ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) (Hook *et al.*, 1999), como pode ser observado no exemplo da calcita (Fig. 5.6). Esse mesmo tipo de vibração iônica de ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) resulta num deslocamento da feição diagnóstica (baixas emissividades) em comprimentos de ondas mais longos, devido a substituições catiônicas (Salisbury *et al.*, 1991; White, 1974).

### **5.3.2. ESTRATÉGIA DE PROCESSAMENTO DOS DADOS TERMAIS**

Processos de arenização têm como base o retrabalhamento de depósitos areníticos não consolidados (Suertegaray *et al.*, 2001). Dessa forma, os processamentos utilizados neste trabalho objetivam não apenas identificar, mas também quantificar a participação de grupos de minerais nestes depósitos areníticos. Para tanto, foi mapeada a presença e abundância de argilominerais e carbonatos em relação ao quartzo (áreas ricas em sílica), como forma de estimar os níveis de estabilidade e fragilidade do conjunto de terras no que se refere ao processo de arenização.

Os métodos sumarizados no fluxograma da figura 5.7 têm como base a correção atmosférica e conversão de dados para radiância do sensor (reflectância aparente) (Ninomya, 2005; Gillespie *et al.*, 1999). Essas etapas são de fundamental importância, considerando uma maior influência de *background* como os da vegetação e umidade em regiões tropicais úmidas, bem como os níveis de mistura dos pixels relativos aos componentes de solo. Numa segunda

etapa, foram utilizados, concomitantemente, 2 métodos de processamento com base em parâmetros espaciais e espectrais da imagem (Smith *et al.*, 1990; Sabol *et al.*, 1992). No que se refere aos parâmetros espaciais, foram utilizados o realce por decorrelação (i) e a razão de bandas (ii). Este tipo de classificação foi aplicado diretamente sobre as imagens corrigidas para a radiância do sensor, e baseia-se na correlação dos valores matemáticos, e não de emissividade, entre pixels. Para tanto, opera-se por meio de filtros de convolução e ajustes de histograma para redução de ruídos, considerando os principais gradientes entre as feições diagnósticas dos minerais mapeados (Vaughan *et al.*, 2005; Lima, 2003) (Fig. 5.7).

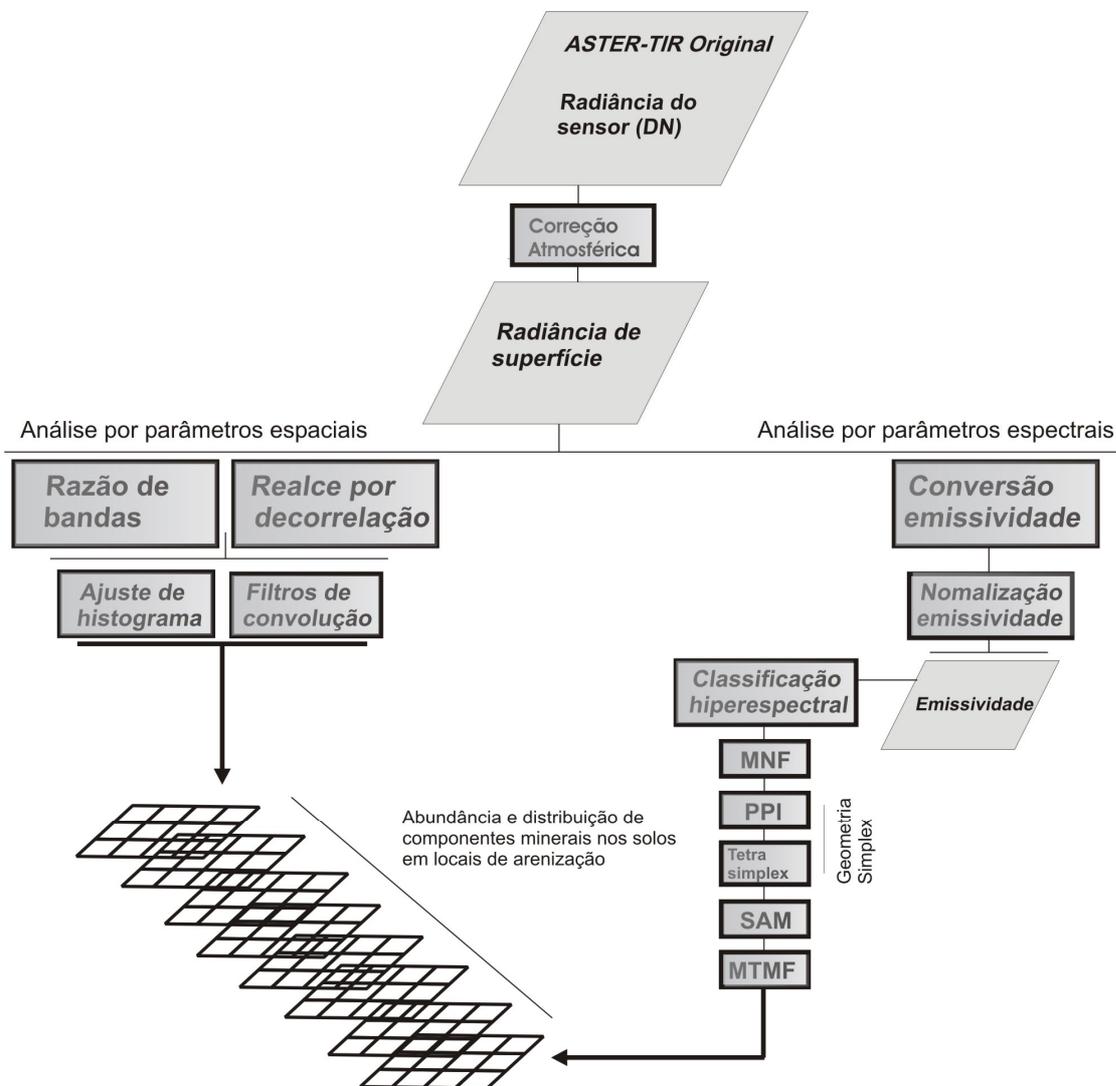


Figura 5.7. Fluxograma de etapas de processamento das imagens termais do ASTER.

O segundo conjunto de procedimentos baseia-se em propriedades espectrais da imagem e utiliza análise de mistura espectral (*Spectral Mixture Analysis* - SMA), tendo como referência o comportamento do mineral puro definido como membro extremo (*endmembers*) (Adams *et al.* 1986; Smith *et al.*; 1990, Small, 2004; Gillespie, *et al.*, 1990). Neste trabalho, em particular, foram utilizados os algoritmos de classificação hiperespectral SAM (*Spectral Angle Mapper*) (Kruse *et al.*, 1993) e MTMF (*Mixture Tuned Matched Filtering*) (Kruse *et al.*, 1993; Chen e Reed, 1987, Harsanyi & Chang, 1994), aplicados aos dados termais do ASTER convertidos para emissividade espectral, por meio da separação entre temperatura e emissividade (Gillespie *et al.*, 1998) (Fig. 5.7).

### 5.3.2.1. Correção atmosférica e conversão à emissividade dos dados termais

Em busca da otimização máxima dos parâmetros de correção, optou-se pela realização de todas as etapas dos processos de correção atmosférica e conversão à emissividade, visto que a utilização de algoritmos para geração de correções em série pode gerar efeitos residuais sobre as imagens ASTER, acarretando variações relativas a leituras de campo (Steissberg, 2005). Para tanto, foram utilizadas imagens ASTER nas bandas AST10 a AST14 do infravermelho termal (TIR) no nível 1B de processamento, com correções geométricas e radiométricas aplicadas na versão V003, que implica ajustes adicionais de correção realizados a partir de Abril de 2006. Para cobertura integral da área de estudo foi realizado um mosaico de duas cenas, ambas adquiridas em 12/01/2004.

A primeira etapa de correção envolve a conversão dos dados em DN (*digital numbers*) para radiância do sensor ( $Wm^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$ ). Nas imagens ASTER-TIR nível 1B ( $i$ ) cada conjunto de DN correspondente as bandas TIR é multiplicado pelo seu coeficiente de calibração, como demonstrado a seguir:

$$L_{sen}^i = coef^i \times (DN^i - 1), \text{ onde } coef^{i0}=0.006882, coef^{i1}=0,006780, coef^{i2}=0,006590, coef^{i3}=0,005693 \text{ e } coef^{i4}=0,005225 \text{ (equação 5.1).}$$

Portanto, o valor de radiância do sensor ( $L_{sen}$ ) está relacionado à radiância que deixa a superfície ( $L_{sup}$ ), à transmissividade da atmosfera ( $\tau$ ) e ao trajeto da radiância na atmosfera ( $L_A \uparrow$ ), definidos na equação  $L_{sen} = L_{sup} * \tau + L_A \uparrow$  (Ninomya, 2005).

A radiância da superfície ( $L_{sup}$ ), por sua vez, está relacionada a radiação emitida por um corpo negro ( $L_{CN}$ ) (definida pela equação de Planck<sup>2</sup>), a irradiação proporcionada pela atmosfera  $E_{A\downarrow}$  (*downwelling irradiance* ou irradiância descendente), a emissividade de superfície ( $\epsilon$ ), e a reflectância de superfície ( $\rho$ ), definida na equação:  $L_{sup} = L_{CN}^{*\epsilon} + \frac{E_{A\downarrow} \cdot \rho}{\pi}$  (equação 5.2). Observa-se, portanto, que a emissividade ( $\epsilon$ ) relaciona-se aos valores de radiância de superfície ( $L_{\lambda sup}$ ) (radiância do material), os quais são definidos por meio da equivalência lambertiana, entre a razão da radiância de superfície ( $L_{\lambda sup}$ ) e da radiância do corpo negro ( $L_{\lambda CN}$ ), definidos na equação ( $\epsilon_{\lambda}$ ) =  $\frac{L_{\lambda sup}}{L_{\lambda CN}}$ , onde  $\lambda$  = comprimento de onda (Hook *et al.*, 1999; Ninomya, 2005). O cálculo de emissividade também considera as variações da energia emitida por cada material em equilíbrio termal com o seu entorno, por meio dos valores de reflectância hemisférica (R). Esses princípios são definidos na lei de Kirchhoff, segundo a qual os valores de absorvância e emissividade ( $\epsilon$ ) são iguais, sendo expressos na equação:  $\epsilon = 1 - R$  (Hook *et al.*, 1999). No caso dos dados termais do ASTER, no nível 1B, os valores de reflectância de superfície ( $\rho$ ) também são obtidos segundo os princípios descritos acima, por meio da equação  $\rho = 1 - \epsilon$  (Ninomya, 2005) (equações 5.3).

Considerando-se essas premissas, sobre as imagens 1B, foi aplicado o algoritmo de *normalização da emissividade*, o qual utiliza um valor de emissividade fixo para o cálculo da temperatura de cada pixel em cada banda, sendo consideradas as temperaturas mais altas para o cálculo de emissividade (lei de Planck) (Hook *et al.*, 1992; Gillespie *et al.*, 1998). Para a minimização dos efeitos da atmosfera foi aplicado, sobre os dados convertidos para radiância do sensor, o algoritmo de compensação atmosférica com base em dados da cena (*In-Scene Atmospheric Compensation - ISAC*), o qual assume que a atmosfera é uniforme sobre toda a

---

<sup>2</sup> A lei de Planck utiliza o modelo de Corpo Negro (CN) definido como material ideal que se comporta como um radiador lambertiano, o qual transforma, numa taxa máxima, toda a energia térmica recebida em energia radiante. Esse modelo define parâmetros para medida de emissividade, entendida como a capacidade de um determinado material em emitir radiação em diferentes comprimentos de onda, por meio do cálculo de excitância espectral definido na equação:  $M_{\lambda} = C_1/\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]$ , onde  $M_{\lambda}$  = excitância espectral do corpo negro ( $W.m^3$ ),  $\lambda$  = comprimento de onda (m), T = temperatura absoluta (K),  $C_1 = 1^a$  constante de radiação ( $3,74151 \cdot 10^{-16} W.m^2$ ) e  $C_2 = 2^a$  constante de radiação (0,0143879(m.K) (Hook, et al., 1999).

cena, tendo como referência o comportamento de um corpo negro inserido na mesma (Jonhson & Young, 1998).

## **5.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.4.1. RAZÃO DE BANDAS**

Diferentemente de dados provenientes do VNIR-SWIR (0.4-2.5  $\mu\text{m}$ ), a região do infravermelho termal (TIR) (8-12  $\mu\text{m}$ ) é favorecida pela menor influência da atmosfera e do relevo no processo de aquisição das imagens (Kahle et al., 1993). Essas características aumentam a precisão de processamentos simples, como as razões de bandas ou pseudo-razões sobre imagens não corrigidas para os efeitos da atmosfera (Souza Filho & Drury, 1998). Porém, neste trabalho as operações de bandas são utilizadas em imagens corrigidas para reflectância aparente, como parte da avaliação do processo de correção empregado, bem como da validação das mesmas para o mapeamento de solos. As razões aqui utilizadas foram formuladas com base em Lima (2003).

Destaca-se, no conjunto de razões utilizadas, a possibilidade de separação do (i) quartzo, em relação à caulinita, por meio da razão AST11 (8.63 $\mu\text{m}$ )/AST12 (9.07 $\mu\text{m}$ ) (Fig. 5.8e), a separação da (ii) caulinita em relação ao quartzo na razão AST10/AST11 (Fig. 5.8f), a (iii) mistura de quartzo e caulinita nas razões AST13(10.6 $\mu\text{m}$ )/AST10(8.2 $\mu\text{m}$ ) e AST13(10.6 $\mu\text{m}$ )/AST12(9.07 $\mu\text{m}$ ) (Fig. 5.8h), e a detecção de (iv) carbonatos na razão AST13(10.6 $\mu\text{m}$ )/AST14(11.28 $\mu\text{m}$ ) (Fig. 5.8g). Para o realce dos pixels mais puros foi realizado um ajuste interativo de histograma em alto contraste e aplicado um filtro de mediana (5x5pixels) (Fig. 5.8a,b,c).

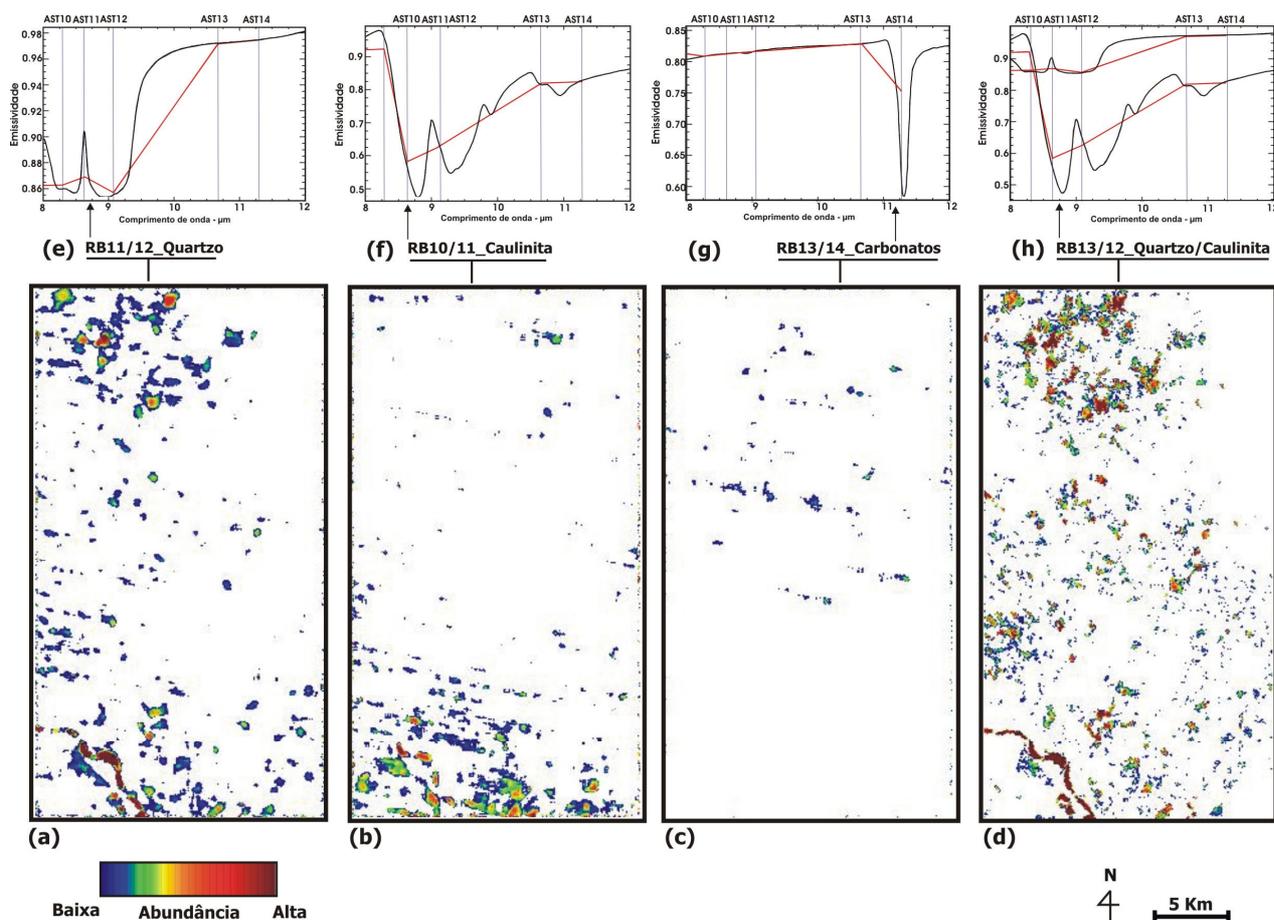


Figura 5.8. Assinaturas espectrais de quartzo, caulinita, calcita e mistura caulinita-quartzo, corrigidas para emissividade e reamostradas para resolução espectral do sensor ASTER-TIR (8-12 $\mu$ m) (Figuras e, f, g e h). Nas figuras a, b, c, d, é possível observar os resultados das razões de bandas, com base nas principais feições diagnósticas dos minerais citados anteriormente, com ajuste de histograma e aplicação de filtro de mediana (5x5).

A partir da referência do principal areial, na porção noroeste da Figura 5.8a observa-se o mapeamento de amplas áreas ricas em quartzo a partir da razão de bandas do ASTER. Destaca-se que essas áreas de grande abundância de quartzo coincidem com o mapeamento original de focos de arenização (SECP, 2001). É observada uma relação inversa na figura 5.8b, no que se refere à abundância de caulinita, com sua maior presença ao sul, mas também em pontos isolados na porção central associados a Latossolos (LEa). Os carbonatos aparecem em baixa concentração nas áreas centrais, em locais distintos dos pontos de coleta de amostras. Sua presença, possivelmente associada aos solos litólicos e Latossolos (Re, Rd, LEa) descritos na região, ainda requer verificação de campo mais detalhada (Fig. 5.8c).

A eficácia dos resultados alcançados deve-se principalmente à cobertura do centro das bandas dos minerais mapeados na resolução espectral ASTER-TIR, notadamente nas feições diagnósticas do quartzo na AST12 e da caulinita na AST11 (Fig. 5.8a, b). Outro aspecto a ser considerado trata-se do comportamento inversamente proporcional destas bandas relativo a esses dois minerais. Esse comportamento propicia uma quantificação direta da participação relativa de ambos variando entre 10 e 90%, o que pode ser demonstrado por sua decomposição num modelo linear de mistura espectral (Fig. 5.9a). Dessa forma, o quartzo pode ser quantificado em relação à caulinita (e/ou outros argilo-minerais) e vice-versa, na forma de mistura, por meio das alterações de profundidade das bandas AST11-AST12 (Fig. 5.9b). Essa relação não ocorre no VNIR-SWIR, onde a alta reflectância do quartzo, aliada à ausência de feições, inviabiliza a determinação de sua abundância, como visto no capítulo 2.

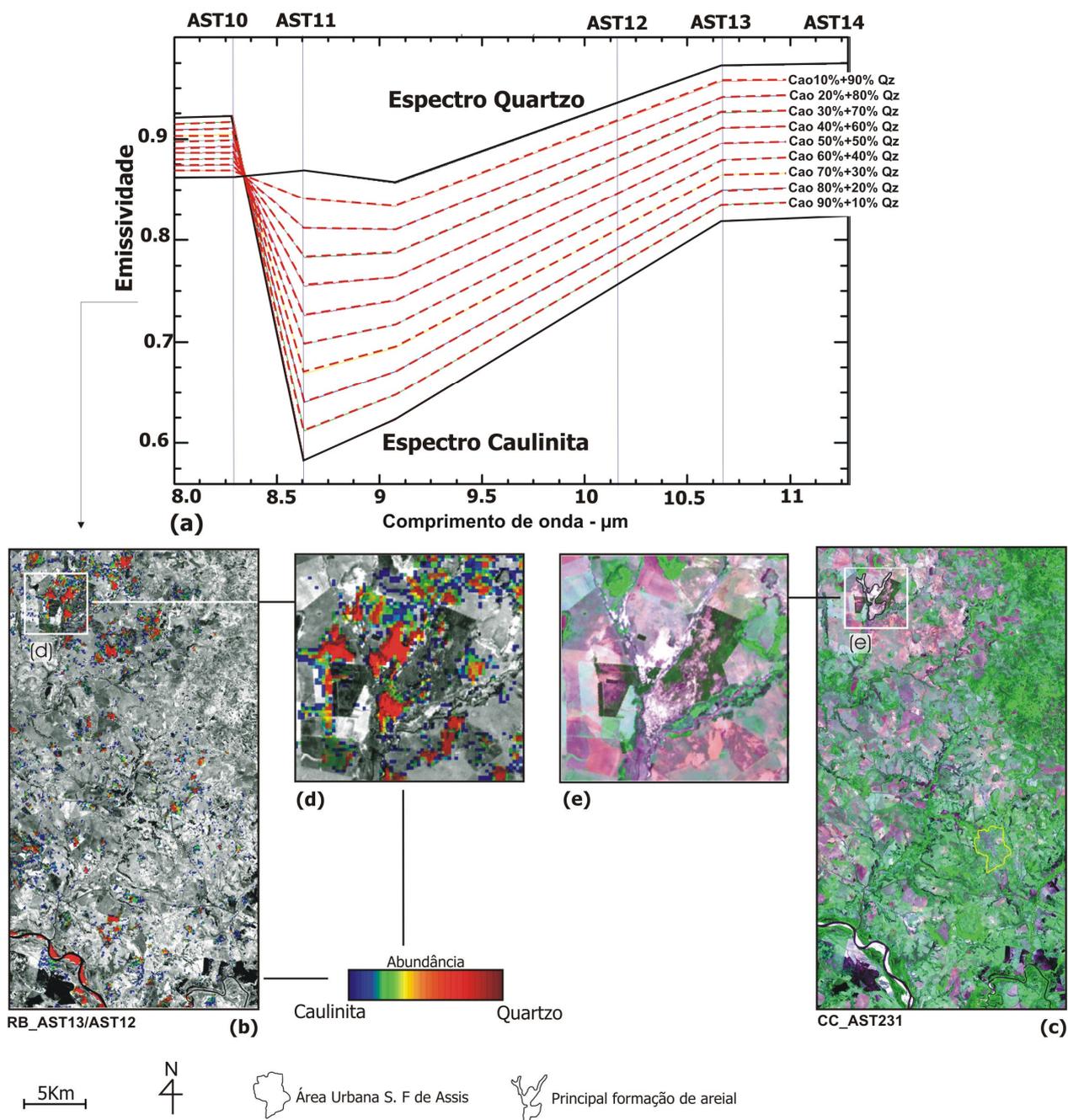


Figura 5.9. Modelo linear de mistura espectral para separação de quartzo e caulinita. A figura (a) demonstra a separação entre quartzo e caulinita por meio da inversão típica de suas feições diagnósticas nas bandas AST10 e 11 mediante a aplicação de modelo linear de mistura espectral. As figuras b e c comparam o resultado da razão de bandas AST13/AST12, sobreposta a banda AST3, com uma composição colorida (CC) AST231. Para melhor visualização da principal formação de areial, ambas as imagens (b,c) estão em escala detalhada nas figura d,e, com os locais de maior abundância de quartzo em vermelho.

O resultado da razão AST13/AST12 foi sobreposto à banda AST3 (NIR) para facilitar visualização (Figura 5.9 b,d). Composição colorida (CC) das bandas AST231 (VNIR) em RGB para áreas equivalentes são ilustradas nas figuras 5.9c,e. Comparando-se as imagens, é possível verificar que na principal formação de areial, mesmo em áreas muito ricas em quartzo, ocorre presença simultânea de caulinita. Essas áreas correspondem a pixels mais claros na imagem CC\_AST231 (Fig. 5.9 e), visto que a areia apresenta alta reflectância e em quantidades proporcionais em todos os comprimentos do VNIR. Isso não ocorre nas razões AST10/AST11 e AST11/AST12 (Fig. 5.9 a, b), visto que dificilmente encontram-se áreas em magenta (extremo de abundância de quartzo), mas sim pixels vermelhos, onde se pode inferir misturas da ordem de 80-20% (quartzo-caulinita) (Fig. 5.9 b,d). Há ainda locais mapeados em tons verdes, indicando misturas de 30-70% entre quartzo e caulinita, além de setores ricos em pixels em tons de azul, que indicam a predominância de caulinita (Fig. 5.9d). Na CC\_AST231 na figura 5.9e, nota-se a separação de áreas vegetadas (pixels em verde).

#### **5.4.2. REALCE POR DECORRELAÇÃO**

O realce por decorrelação (RDC) é um método clássico de processamento de dados termais, tendo sido amplamente usado em sensores como o TIMS (*Thermal Infrared Multispectral Scanner*). É um método eficiente para o aumento da decorrelação interbandas, que diminui a alta correlação típica dos dados TIR (Gillespie *et al.*, 1984; Ramsey *et al.*, 1999; Kahle *et al.*, 1988; Hook *et al.*, 1998). O alto grau de correlação entre bandas em dados termais deve-se ao fato de que os valores de radiância de superfície são função direta da temperatura e emissividade da superfície (Vaughan *et al.*, 2005). Essa relação entre os dados gera valores baixos de radiância, os quais são localizados muito próximos na nuvem de pixels numa disposição RGB padrão, acarretando baixo contraste e, por conseguinte, pouca variação de matizes entre os canais de cores (Gillespie *et al.*, 1984). Dessa forma, o RDC aumenta o contraste da nuvem de dados, mostrando as variações de emissividade como diferenças de cor, e diferenças de temperatura como variações no brilho. Os valores de emissividade relacionam-se com as características dos alvos e os valores de temperatura dizem respeito, principalmente, a variações do relevo, como sombras topográficas (Gillespie *et al.*, 1999).

Na figura 5.10a pode-se observar o resultado da composição colorida (CC) AST13/AST12/AST10 (RGB), utilizando-se dados corrigidos para radiância de superfície (L<sub>sup</sub>).

A figura 5.10b apresenta o resultado da aplicação do RDC nas bandas AST13/AST12/AST10 (RGB). Nessa imagem realçada é possível notar que o pretendido aumento de contraste é generalizado, potencializando também o aparecimento de ruídos contidos na imagem ASTER-TIR. Para supressão dos mesmos optou-se primeiramente pela segregação da informação nos pixels mais claros, por meio do ajuste de histograma, seguido da aplicação de um filtro de convolução de mediana (5x5pixels). O resultado obtido desse procedimento é ilustrado na figura 5.10c.

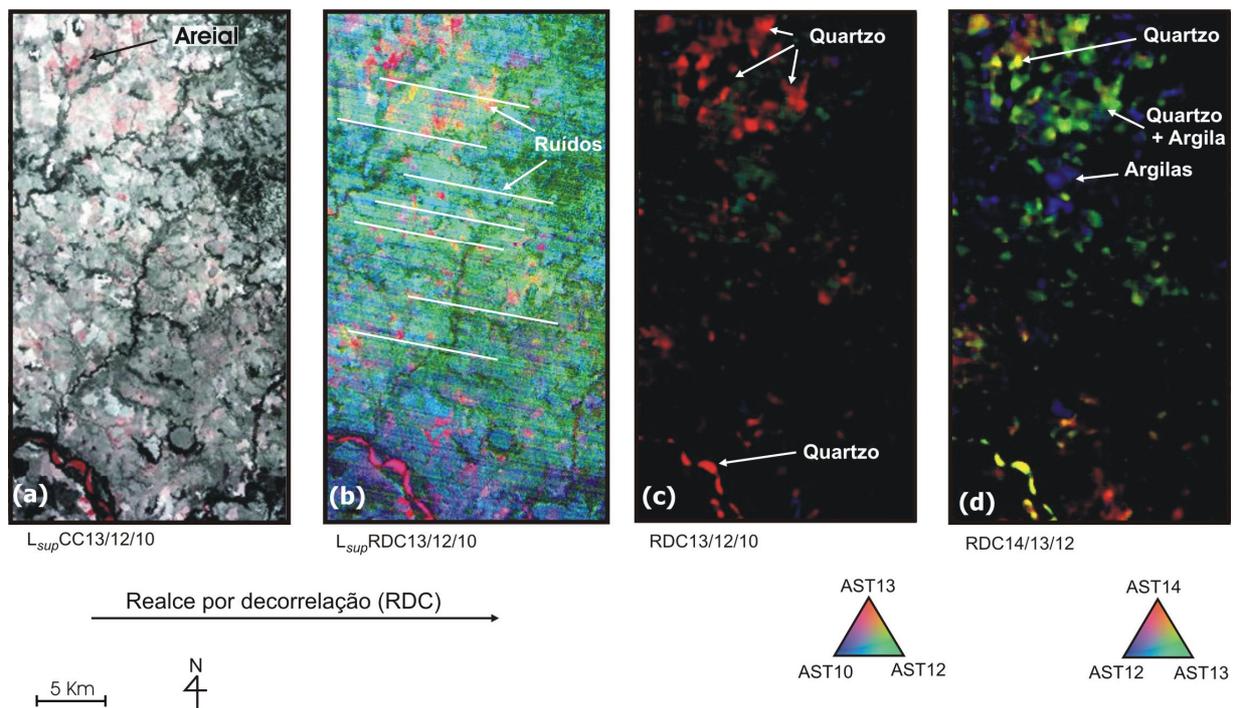


Figura 5.10. Realce por decorrelação (RDC) aplicado às imagens ASTER-TIR. (a) composição colorida das bandas AST13/12/10 em RGB. (b) RDC aplicado a composição colorida AST13/12/10. (c) imagem RDC com ajuste de histograma e filtro de mediana (5x5), com destaque, em vermelho, para áreas muito ricas em quartzo. (d) RDC aplicado à composição colorida AST14/12/10, com histograma ajustado e filtro de mediana (5x5),

A composição AST13/AST12/AST10 (RGB) é clássica e oferece uma ampla cobertura de minerais (Fig. 5.10c). Nessa composição, as bandas AST12 (9.07  $\mu\text{m}$ ) e AST10 (8.2  $\mu\text{m}$ ), alocadas, respectivamente, nas cores verde e azul, compreendem as faixas espectrais onde a emissividade do quartzo é baixa, em contraposição às altas emissividades deste mineral na banda AST13 (10.6 $\mu\text{m}$ ), alocada à cor vermelha. Dessa forma, essa combinação identifica áreas ricas em quartzo com pixels em vermelho; locais que apresentam misturas entre sílica e argila são

identificadas por pixels em tons de roxo, pixels verdes podem estar associados tanto a carbonatos quanto a solos ricos em argila cobertos com vegetação (Fig. 5.10c).

A CC AST14/AST13/AST12 oferece uma melhor discriminação de áreas ricas em quartzo, mapeadas em pixels amarelos, visto que atribui os canais vermelho e azul para as bandas AST14 e AST13, ambas cobrindo regiões de baixa emissividade do quartzo em torno de 11 $\mu$ m. Essa combinação favorece a separação entre quartzo e argila, visto que o canal azul é atribuído à banda AST12, que cobre uma região do espectro ( $\sim$  9 $\mu$ m) com baixa emissividade do quartzo e alta emissividade de minerais como, por exemplo, a caulinita e montmorilonita (Vaughan *et al.*, 2005). Nessa composição, a identificação da mistura entre quartzo e argila é evidenciada por meio de pixels verdes (Fig. 5.10d).

Comparando-se os resultados da RDC da composição colorida AST13/AST12/AST10 sobre a banda AST3, com a CC\_AST231 (VNIR), referentes à principal mancha de areial (detalhes – Fig. 5.11f), pode se observar a separação de áreas em vermelho intenso associadas ao quartzo e que apresentam correlação com pixels mais claros na CC\_AST231 (detalhes – Fig. 5.11c). Porém, áreas adjacentes, com leve coloração vermelha na CC\_AST231, que podem estar associadas à presença de argila, encontram-se entremeadas por vegetação rasteira em ambos os detalhes nas figuras 5.11c e 5.11b. Essas mesmas manchas estão associadas a pixels verdes nas figuras 5.11i e 4.11g, conforme explicitado anteriormente. Embora a vegetação mais densa, identificada por pixels de verde intenso nas CC\_AST231 (figuras 5.11a, c, b), não seja destacada no produto derivado do RDC (pixels escuros nas figuras 5.10 d, e, f), a associação de argilas à vegetação rasteira torna sua identificação, para pequenas áreas, um tanto genérica.

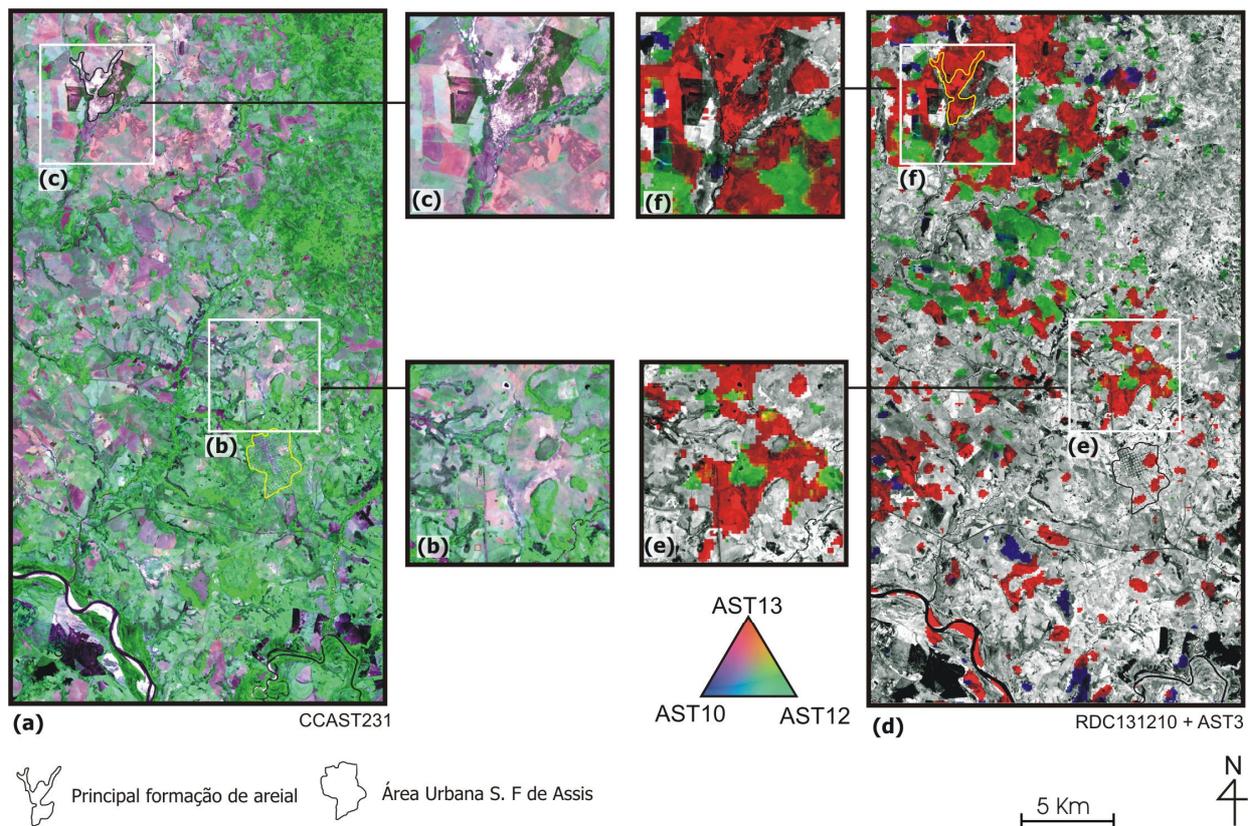


Figura 5.11. Comparação do produto gerado a partir do RDC das bandas AST13/12/10 com a CC\_AST231 (Fig. a,d). Por meio das figuras b,c,e,f é possível observar detalhes de ambas as imagens, com ênfase em áreas ricas em quartzo e sua separação das argilas.

### 5.4.3. CLASSIFICAÇÃO HIPERESPECTRAL

A classificação hiperespectral tem como base a utilização de análise de mistura espectral (spectral mixture analysis – SMA) (Adams *et al.* 1986; Smith *et al.*, 1985; Adams & Adams, 1984), e apresenta algumas vantagens no que se refere aos métodos utilizados anteriormente, considerando o processamento de dados termais. Este tipo de abordagem oferece uma série de procedimentos para redução de dimensionalidade dos dados e identificação de membros extremos (*endmembers*), os quais pressupõem as seguintes etapas: (i) *minimum noise fraction* (MNF), (ii) *pixel purity index* (PPI), (i) visualização n-dimensional (tetrahedro simplex) (iii) classificação espectral utilizando os algoritmos SAM e MTMF (detalhes descritos no capítulo 2).

#### 5.4.3.1. TRANSFORMAÇÃO *MINIMUM NOISE FRACTION*

Como enfatizado anteriormente no item 4.2, as imagens termais possuem ruídos inerentes e generalizados, e que também se encontram presentes nos dados do sensor ASTER-TIR (Abrams

*et al.*, 2003). Esses ruídos podem ser minimizados por diferentes técnicas sem o comprometimento da informação relacionada aos alvos (Souza Filho *et al.*, 1996). Neste caso, a MNF aplicada às bandas AST10 a AST14 foi capaz de segregar o ruído para as imagens MNF finais, conservando a informação espectral de interesse nas primeiras bandas. Esse procedimento assegurou uma melhoria considerável na qualidade dos dados, principalmente no que se refere ao seu uso convertido para emissividade, reduzindo sua dimensionalidade e, por conseguinte, aumentando a decorrelação entre alvos, ou seja, discriminando diferentes materiais (prováveis membros extremos) (Fig. 5.12).

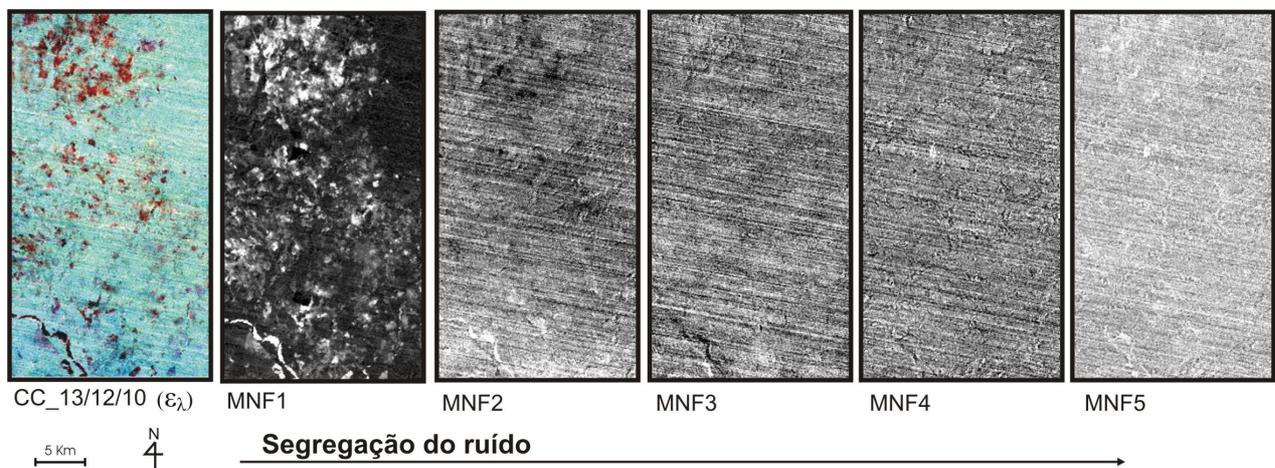


Figura 5.12. Aplicação da transformação MNF nos dados ASTER-TIR. Ao comparar-se a cena original da área de estudo corrigida para emissividade (CC13/12/10) com as bandas MNF, é possível observar a gradativa concentração dos ruídos nas MNF finais, sendo que a melhor decorrelação entre materiais concentrou-se quase que totalmente na MNF1.

#### 5.4.3.2. DETECÇÃO DE MEMBROS EXTREMOS: *PIXEL PURITY INDEX*

A aplicação do PPI tem como objetivo a separação de pixels mais puros (membros extremos), que são aqueles que contêm o menor índice de mistura de materiais e que conservam características intrínsecas ao alvo, capazes de discriminá-lo. Esse método baseia-se na dispersão da nuvem de dados num gráfico bidimensional, cujo conjunto de bandas MNF é contraposto nos eixos x e y, de forma que os valores médios ocupem o centro, e os valores extremos as regiões de borda da nuvem. Esse procedimento é repetido  $n$  vezes, sendo estabelecido pelo número de interações desejadas (Boardman & Kruse, 1994). Aqui foram utilizadas 25.000 interações, visto que acima disso o algoritmo não conseguiu identificar novos membros extremos. Baseado no

mesmo conceito foi empregada a visualização n-dimensional, na qual os dados são dispostos num gráfico de dispersão, não apenas em dois eixos (x,y), mas em 3 (tetraedro simplex), os quais podem ser diferentemente projetados sobre a nuvem de dados, fornecendo maior possibilidade de separação dos alvos (Boardman & Kruse, 1994).

Dessa forma, obteve-se um membro extremo da imagem com níveis de reflectância e feições diagnósticas análogos aos do quartzo (Fig. 5.13). A não obtenção de mais membros extremos no processamento pode ser atribuída à predominância de solos arenosos, e também devido à grande mistura de materiais na área de estudo, principalmente em se tratando de suas características pedológicas. Essa afirmação é corroborada pela pouca presença da caulinita e carbonatos mapeados nas etapas anteriores, sendo que mesmo testes com outro membro extremo derivado do PPI e bastante similar à montmorilonita resultaram em identificações de trechos de vegetação.

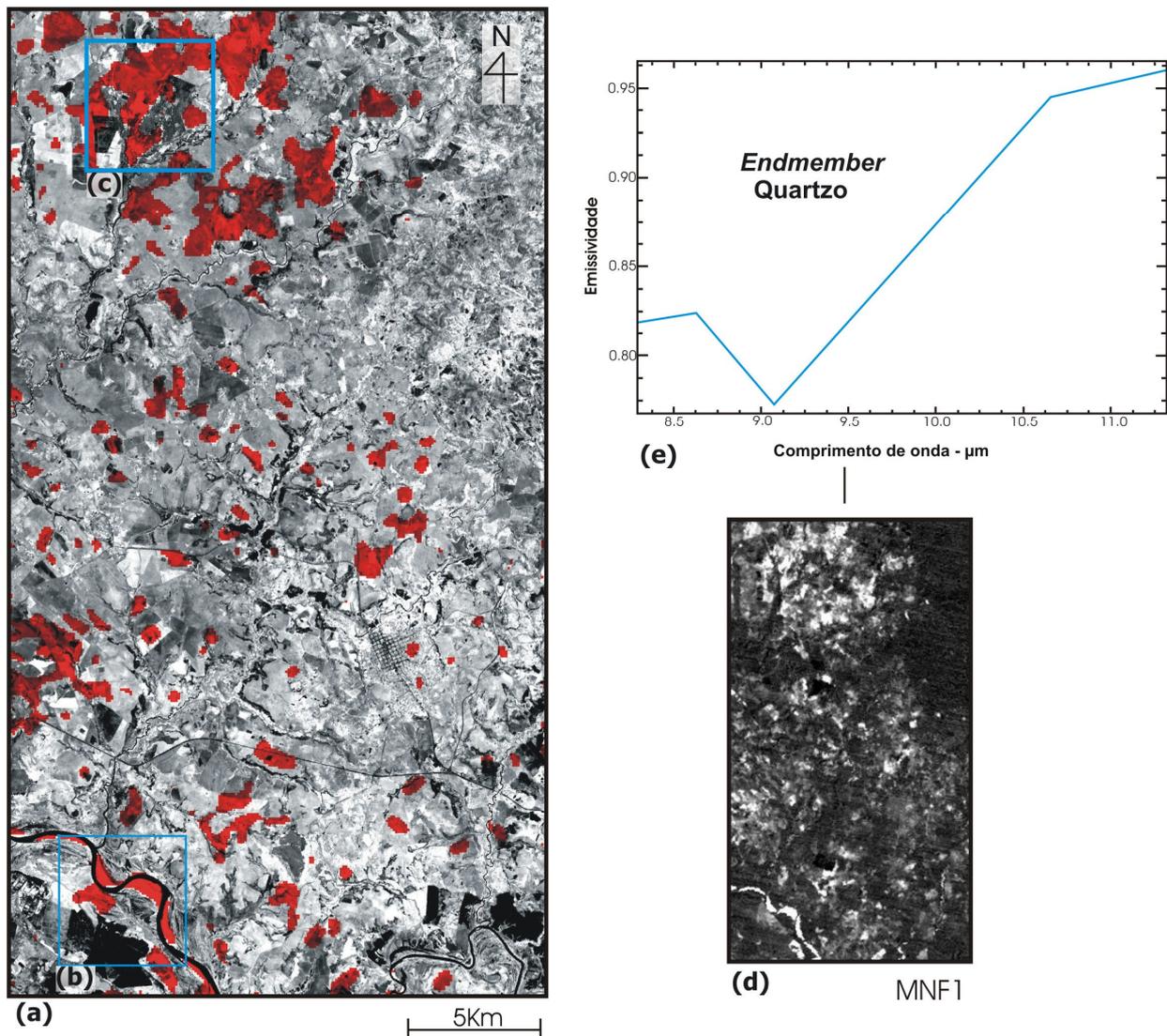


Figura 5.13. Membro extremo de quartzo. A figura (a) mostra em vermelho pixels ricos em quartzo na imagem corrigida para emissividade, dentre os quais foram identificados membros extremos (pixels puros), por meio dos métodos: (i) transformação MNF (fig. d), (ii) PPI e (iii) visualização n-dimensional. A figura (e) mostra um exemplo dos membros extremos de quartzo selecionados nas áreas destacadas em azul (detalhes b,c), com comportamento espectral equivalente aos espectros usados como referência teórica provenientes da biblioteca espectral JHU.

#### 5.4.3.3. Classificações SAM (Spectral Angle Mapper) e MTFM (Mixture Tuned Matched Filtering)

A classificação SAM (Kruse *et al.*, 1993) foi descrita em detalhes no capítulo 2 e apresenta a vantagem de se poder estimar, com base nas características espectrais do membro extremo, sua relação de abundância na cena. Consideram-se, dessa forma, não apenas seus principais gradientes espectrais (importante para razões de banda, por exemplo), mas todo o conjunto de bandas coberto pelo sensor. Pode-se observar na figura 5.14 que foi possível um aumento da

precisão no que se refere ao mapeamento de áreas ricas em quartzo, mantendo-se a capacidade de estimativa de abundância.

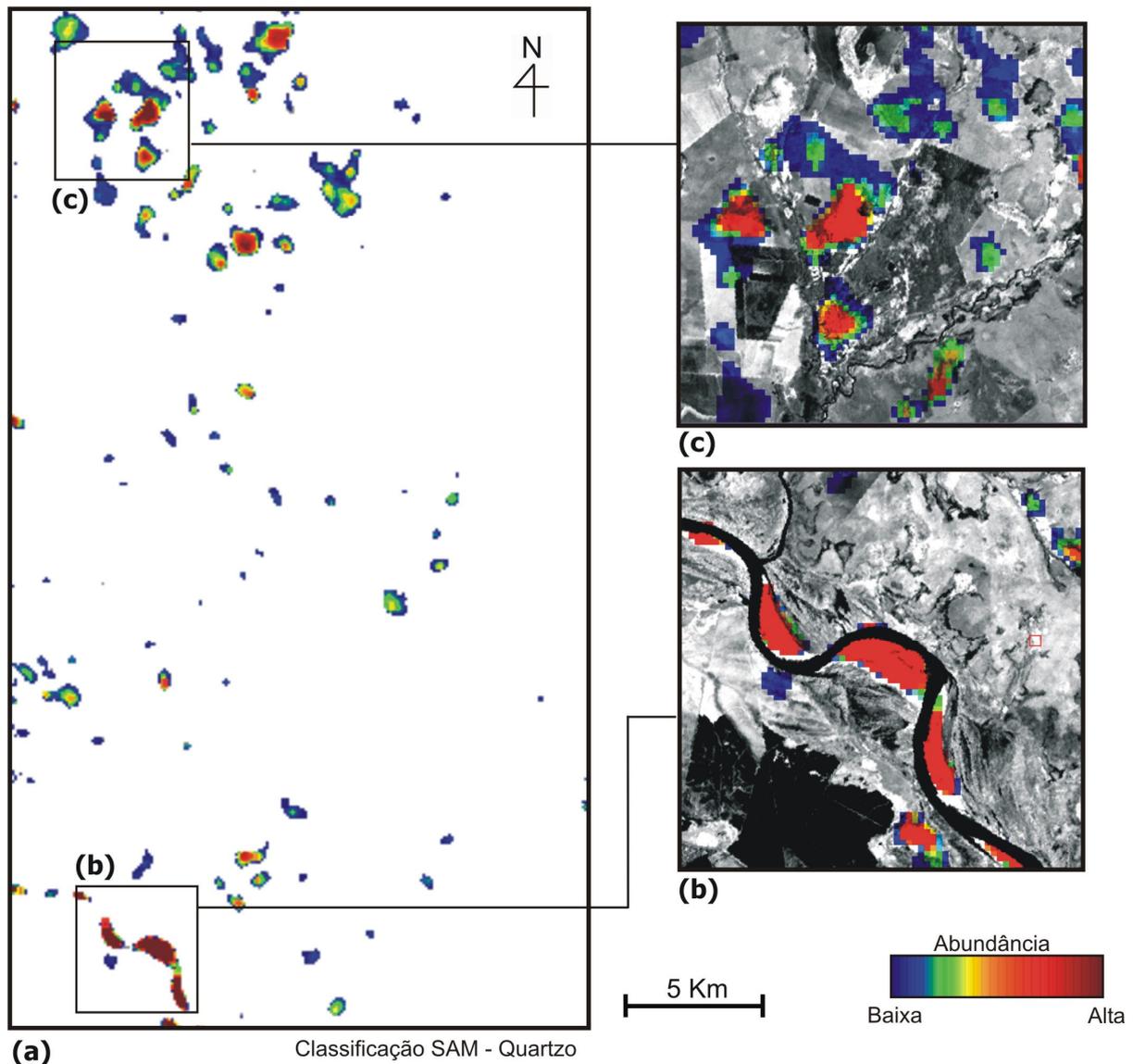


Figura 5.14. (a) Resultado na classificação SAM utilizando membro extremo de quartzo. Nas figuras (b) e (c) encontram-se, em escala de detalhe e sobrepostas a banda AST3, mapas de classificação SAM de duas áreas com abundância de quartzo entremeadas por pequenas faixas de transição referentes a locais com baixa abundância deste mineral.

Nas figuras 5.14b e 5.14c, encontram-se mapeadas, em detalhe, as principais áreas de arenização, muito ricas em quartzo. Em comparação aos métodos anteriores, os resultados

obtidos pelo método SAM são aparentemente mais precisos para a quantificação entre áreas de maior e menor abundância de quartzo.

No caso da classificação MTMF, um dos principais aspectos a serem destacados é sua capacidade de mapeamento em escala de sub-pixel (Kruse *et al.*, 1993; Chen e Reed, 1987; Harsanyi & Chang, 1994). Essa característica exige um maior cuidado com os membros extremos, visto que sua capacidade de decomposição de mistura é da ordem de até 4% para a quantidade de um material dentro do pixel. Assim, a precisão deste algoritmo mostra-se de extrema ajuda no mapeamento de processos de arenização, visto que é possível localizar pequenos focos iniciais de degradação de terras, como visto no capítulo 2. É possível confirmar tais características observando os resultados na figura 5.15, onde fica evidente que a disposição das formações de areiais é mantida; porém, foram destacados apenas pixels com maior nível de concentração de quartzo, considerando-se a sua máxima presença. No detalhe das figuras 5.15b e 4.15c, é possível observar que nem todas as áreas com alta reflectância (albedo) foram mapeadas como portadoras de quartzo por esta técnica. As áreas cobertas por pixels representados em vermelho nessas figuras provavelmente correspondem àquelas com abundância de quartzo mais puro, onde sua assinatura específica nas 5 bandas do ASTER foi verificada. Em contraste, outras áreas de alto albedo, onde o quartzo não foi mapeado, representam áreas com alguma mistura ou assinatura distinta daquela do quartzo puro.

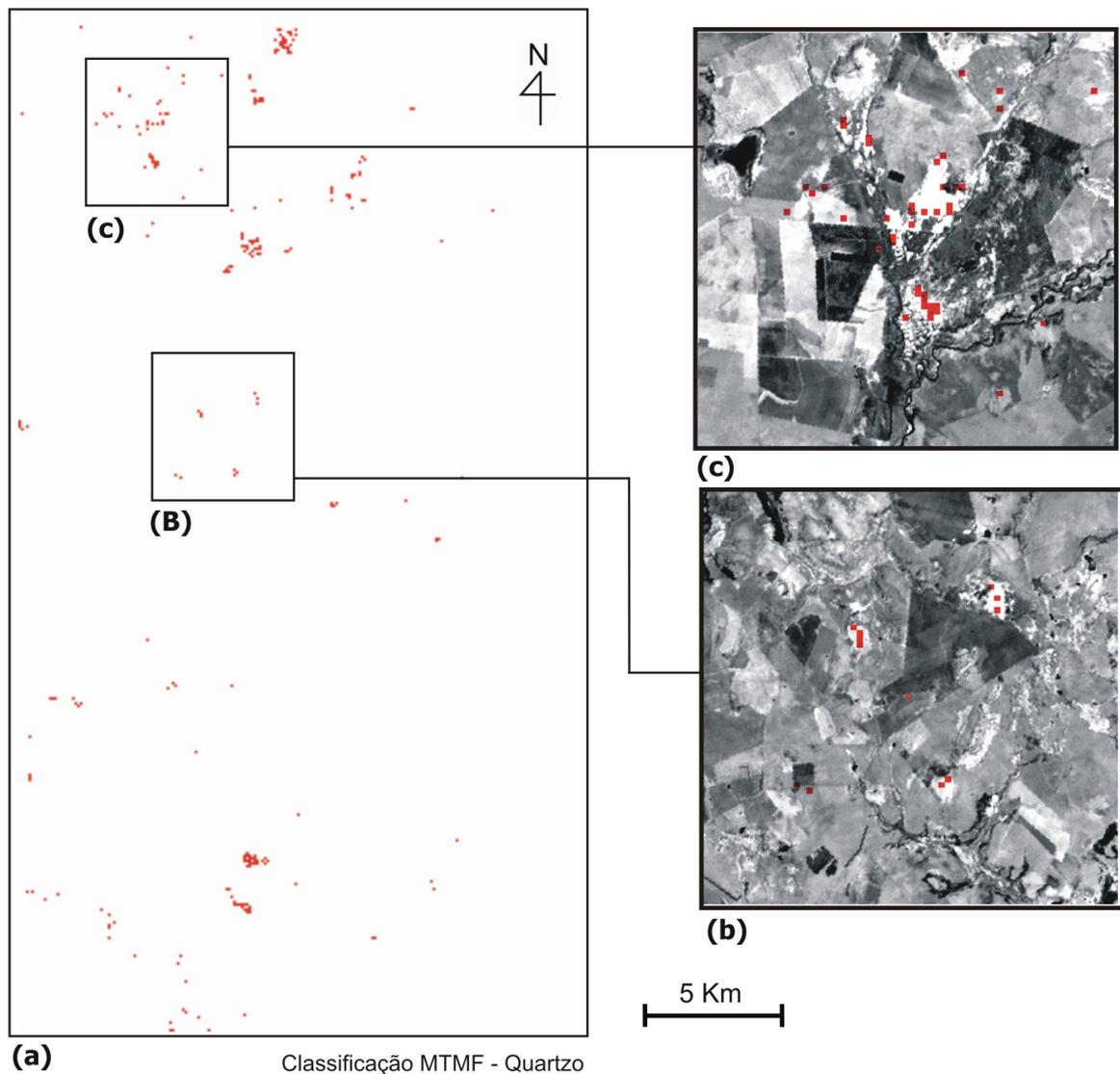


Figura 5.15. Classificação MTMF utilizando membro extremo de quartzo. No detalhe (c) encontra-se o principal foco de arenização, e no (b) o mapeamento de locais com altos teores de sílica em meio a outros pontos isolados, ambos estão sobrepostos a banda AST3 para melhor visualização.

## 5.5. COCLUSÕES

A utilização de dados do sensor ASTER-TIR possibilitou obter resultados satisfatórios no que se refere ao mapeamento da distribuição e abundância de componentes minerais nos solos. As técnicas aplicadas demonstraram variações de precisão, porém, de maneira equânime, conseguiram extrair informações relevantes para a compreensão dos processos de arenização. Foi possível a contraposição e estimativa de quantidades do principal elemento deste processo de degradação de terras, no caso a areia, na forma da variação de teores de quartzo, em relação à

minerais menos friáveis, como as argilas. Parte dessa eficiência tem base nos processos utilizados para correção atmosférica e conversão à emissividade, os quais atribuíram aos dados valores intrínsecos de seu comportamento espectral. Dessa forma, mesmo com resoluções espaciais de 90m deste sensor, foi possível a discriminação de um importante conjunto de alvos, minimizando os efeitos típicos da atmosfera em ambiente tropical.

As razões de bandas (RB), bem como o realce por decorrelação (RDC) - procedimentos tradicionais utilizados no processamento de dados termais foram aplicados com sucesso às imagens ASTER-TIR, com um satisfatório ganho informacional. Essas técnicas são baseadas em noções matemáticas e processamento digital simples, sendo acessíveis a um número maior de pesquisadores e planejadores, o que as torna eficientes para uso em mapeamento da cobertura com base em dados termais.

No caso da classificação hiperespectral, a precisão alcançada no mapeamento de áreas ricas em quartzo superou as expectativas, visto que as imagens termais contém uma quantidade considerável de ruídos, que é típica de qualquer dado termal. Esses ruídos foram minimizados por meio da aplicação da técnica Minimum Noise Fraction (MNF).

Mesmo com a grande mistura de materiais envolvendo ambientes de degradação e uso intenso da terra, foi possível o reconhecimento do principal membro extremo relacionada ao quartzo nas imagens corrigidas para emissividade. Esse fato atesta a eficiência dos procedimentos de extração de membros extremos em imagens ASTER-TIR, particularmente em solos tropicais, corroborando inclusive a grande quantidade de materiais e suas pequenas dimensões reconhecidas nas etapas de RB e RDC. Considerando-se o acesso restrito à espectrorradiômetros com cobertura na região do TIR, as técnicas de análise espectral com base no conceito do simplex (PPI, visualização n-dimensional) são de grande importância para o processamento desse tipo de dado. Essas técnicas viabilizam a identificação de materiais puros na imagem, os quais podem ser utilizados como validação reversa de campo para reconhecimento de alvos, comparando-se seu comportamento em ambientes distintos.

## **5.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ACORN 2002. *ACORN 4.0 tutorial*. (2002). EUA, AGI-Colorado, 109p.

- Abrams, M., & Hook, S. J. (2002). *Aster User Handbook: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*. USA: NASA/Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2, 135p.
- Abrams, M.; Hook, S., & Ramachandran, B. (2003). *Aster user handbook (version 2.0)* NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), 135 p.
- Adams, J. B., & Adams, J. (1984). Geologic Mapping using LANDSAT MSS and TM images. Removing vegetation by modeling spectral mixtures. In: *Third Thematic Conf. Remote Sensing for Expl. Geol.*, ERIM, Colorado Springs, CO, Vol. 2: 615-622.
- Adams, J. B.; Smith, M. O., & Johnson, P. E. (1986). Spectral mixture modeling a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander I site. *Journal of Geophysical Research*, 91: 8098-8112.
- Azevedo, A. C., & Kaminski, J. (1995). Considerações sobre os solos dos campos de areia no Rio Grande do Sul. *Ciência e Ambiente*, 11: 65-79.
- Boardman, J. W., & Kruse, F. A. (1994). Automated spectral analysis: A geologic example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada. In: ERIM Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 10. *Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI. Proceedings*, v. 1, p. 407-418.
- Brady, N. C. (1989). *Natureza e propriedades dos solos*. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 878 p.
- Chen, J. Y., & Reed, I. S. (1987). A detection algorithm for optical targets in clutter. *IEEE Transactions on Aerosp. Electron. Syst.*, v. AES-23, n. 1.
- Cudahy, T. J.; Whitbourn, L. B.; Connor, P.; Mason, P., & Philips, R. N. (1999). Mapping surface mineralogy and scattering behaviour using backscattered reflectance from a hyperspectral midinfrared airborne CO<sub>2</sub> laser system (MIRACO2LAS). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37: 2019-2034.
- Cudahy, T. J.; Okada, K.; Yamato, Y.; Huntington, J. F., & Hackwell, J. A. (2000). Mapping skarn alteration mineralogy at Yerington, Nevada, using airborne hyperspectral TIR SEBASS imaging data. *ERIM Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Applied Geologic Remote Sensing*, p:70-79.
- Galvão, L. S.; Vitorello, I., & Almeida Filho, R. (1999). Effects of band positioning and bandwidth on NDVI measurements of tropical savannas. *Remote Sensing of Environment*, 67: 181-193.

- Galvão, L. S.; Almeida-Filho, R., & Ícaro, V. (2005). Spectral discrimination of hidrotermally altered materials using ASTER short-wave infrared bands: Evaluation in a tropical savannah environment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7: 107-114.
- Gillespie, R.; Kahle, A. B., & Palluconi, F. D. (1984) Mapping alluvial fans in death valley California, using multispectral thermal. Infrared images. *Geophysical Research Letters*, 11(11):1153-1156.
- Gillespie, A. R.; Smith, M. O.; Adams, J. B.; Willis, S. C.; Fischer, A. F. III, & Sabol, D. E. (1990). Interpretation of residual images: Spectral mixture analysis of AVIRIS images, Owens Valley, California. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop. Pasadena, CA, NASA Jet Propulsion Laboratory.
- Gillespie, A. R.; Rokugawa, S.; Matsunaga, T.; Cothorn, J. S.; Hook, S. J., & Kahle, A. B. (1998). A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1113-1126.
- Gillespie, A. R.; Rokugawa, S.; Matsunaga, T.; Cothorn, J. S.; Hook, S. J., & Kahle, A. B. (1999). *Temperature/emissivity separation algorithm theoretical basis document, version 2.4*. USA: National Aeronautics and Space Administration (NASA), 64 p.
- Hales, K.; Neelin, J. D., & Zeng, N. (2004). Sensitivity of tropical land climate to leaf area index: role of surface conductance versus albedo. *American Meteorological Society*, 17: 1459-1473.
- Hanan, N. P.; Prevost, Y.; Diouf, A., & Diallo, O. (1991). Assesment of desertification around deep wells in the Sahel using satellite imagery. *The journal of applied ecology*, 28(1): 173-186.
- Harsanyi, J. C., & Chang, C. (1994). Hyperspectral image classification and dimensionality reduction: an orthogonal subspace projection approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32: 779-785.
- Hewson, R.D.; Cudahy, T. J.; Mizuhiko, S.; Ueda, K., & Mauger, A. J. (2005). Seamless geological map generation using ASTER in the Broke-Hill Curnamona provice of Australia. *Remote Sensing of Environment*, 99: 159-172.

- Hook, S. J.; Gabell A. R.; Green A. A., & Kealy, P. S. (1992). A comparison of techniques for extracting emissivity information from thermal infrared data for geologic studies. *Remote Sensing of Environment*, 42: 123-135.
- Hook, S. J.; Cudahy, T. J., Kahle, A. B., & Whitbourn, L. B. (1998). Synergy of active and passive airborne thermal infrared systems for surface compositional mapping. *Journal of Geophysical Research*, 103, 18, 269-276.
- Hook, S. J.; Abbot, E. A.; Grove, C.; Kahle, A. B., & Palluconi, F. D. (1999). *Use of multispectral thermal infrared data in geological studies*. In: A. N. Rencz (Ed.), *Remote sensing of earth sciences: Manual of remote sensing*, v.3, (3<sup>rd</sup> ed.), p. 59-110. New York: John Wiley and Sons.
- Hook, S. J.; Dmochowski, J. E.; Howard, K. A.; Rowan, L. C.; Karlstron, K. E., & Stock, J. M. (2005). Mapping variations in weight percent silica measured from multispectral thermal infrared imagery – Examples from the Hiller Mountains, Nevada, USA and the Tres Virgenes – La Reforma, Baja California Sur, Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 95: 273-289.
- Houghton, R. A. (1994). The worldwide extent of land-use change. *Bioscience*: 44: 305-313.
- Hulme, M., & Kelly, M. (1993). Exploring de links between desertification and climate change. *Academic Research Library: Environment*, 35 (6): 4-45.
- Huete, A. R.; Liu, H.; Lira, G. R.; Batchily, K., & Escadafal, R. (1994). A soil color index to adjust for soil and litter noise and vegetation index imagery of arid regions. *IEEE*, 1042-1043.
- Hunt, G. R., & Salisbury, J. W. (1970). Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: II Carbonate. *Modern Geology*, 2: 23-30.
- International Painel of Climate Change (IPCC). (2003). Good practice guindance for land use, land-use change and forestry. In: *IPCC National Greenhouse Gás inventories*, Hayama, Japan. Programmme, 295 pp.
- Johnson, B. R., & Young, S. J. (1998). "In-Scene Atmospheric Compensation: Application to SEBASS Data Collected at the ARM Site", Technical Report, *Space and Environment Technology Center, The Aerospace Corporation*.
- Kahle, A. B.; Madura, D. p., & Soha, J.M. (1980). Middle infrared multispectral aircraft scanner data: Analysis for geological applications. *Applied Optics*, 19: 2279-2290.

- Kahle, A. B., & Goetz, A. F. H. (1983). Mineralogic information from a new thermal infrared multispectral scanner. *Science*, 222: 24-27.
- Kahle, A. B.; Gillespie, A. R.; Abbot, E. A.; Abrams, M. J.; Walker, R. E., & Hoover, G. (1988). Relative dating of Hawaiian lava flows using multispectral thermal infrared images: A new tool for geologic mapping of young volcanic terrains. *Journal of Geophysical Research*, 93(B12), 15239-15251.
- Kahle, A. B.; Palluconi, F. D., & Cristensen, P. R. (1993). Thermal emission spectroscopy: application to Earth and Mars. In: C. M. Pieters, & P. A. J. Englert (Eds), *Topics in Remote Sensing 4 – remote geochemical analysis: Elemental and mineralogical composition* (p. 99-120). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Kassas, M. (1995). Desertification: A general review. *J. Arid Environment*, 30, 115-128.
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. W., Heidebrechet, K. B.; Shapiro, A.T., Barloon, P. J., & Goetz, A. F. H. (1993). The spectral image processing system (SIPS) – Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment*, 44: 145-163.
- Korb, A. R., Dybwad, P., Wadsworth, W., & Salisbury, J. W. (1996). Portable FTIR spectrometer for field measurements of radiance and emissivity: *Applied Optics*, v. 35, pp. 1679-1692.
- Latz, K., Weismiller, R. A.; Van Scoyoc, G. E., & Baumgardner, M. F. (1984). Characteristic variation in spectral reflectance of selected Alfisols. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 48:1130-1134.
- Lima, V. S. *Assinaturas espectrais de gossans associados a mineralizações de Pb-Zn-Ba na bacia de Irecê (BA): um estudo baseado em dados dos sensores TM e ASTER*. (2003). Dissertação de mestrado (Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 154 p.
- Moreno, J. A. (1961). O clima do Rio Grande do Sul. *Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul. Porto Alegre*, ano 6, v. 11, p.134.
- Nimer, E. (1977). Clima. In: *Geografia do Brasil: Região Sul*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, p.35-79.
- Ninomiya, Y.; Fu, B., & Cudahy, T. J. (2005). Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared. *Remote Sensing of Environment*, 99: 127-139.

- Ramsey, M.S.; Christensen P.R., Lancaster, N., & Howard, D.A. (1999). Identification of sand Sources and transport pathways at the Kelso Dunes, California using thermal infrared Remote Sensing, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 111: 646-662.
- Rio Grande do Sul, Secretaria da Agricultura e Abastecimento/Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2003). Mapa Geológico 1 : 250 000 – folhas SH.21-X-D e SH.21-Z-B.
- Rio Grande do Sul, Secretaria da Agricultura e Abastecimento/Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2003). Mapa Geomorfológico 1 : 250 000 – folhas SH.21-X-D e SH.21-Z-B.
- Rio Grande do Sul, Secretaria da Agricultura e Abastecimento/Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2003). Mapa Pedológico 1 : 250 000 – folhas SH.21-X-D e SH.21-Z-B.
- Robinove, C. J.; Chavez, P.S.; Gehring, D., & Holmgren, R. (1981). Arid land monitoring using Landstat albedo difference images. *Remote Sensing of Environment*, 11:133-156.
- Sabol, D. E. JR.; Adams, J. B., & Smith, M. O. (1992). Quantitative subpixel spectral targets in multirespectral images. *Journal of Geophysical Research*, 97, 2.659-2.672.
- Sala, O. E.; Stuart Chaplin III, F.; Arnesto, J. J.; Berlow, E.; Bloomfield, J.; Dirzo, R.; Huber-Sanwald, E.; Huenneke, L. F.; Jackson, R. B.; Kinzig, A.; Leemans, R.; Lodge, D. M.; Mooney, H. A.; Oesterheld, M.; Poff, N. L.; Sykes, M. T.; Wlaker, B. H.; Walker, M., & Wall, D. H. (2000) Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287: 1770-1774.
- Salisbury, J. W.; Walter, L. S.; Vergo, N., & D'Aria, D. M. (1991). *Infrared (2.1- 25 micrometers) Spectra of Minerals*. USA: Johns Hopkins University Press, 294 p.
- Schlesinger, W. H.; Reynolds, J. R.; Cunningham, G. L.; Huenneke, L. F.; Jarrel, W. M.; F.; Virginia, R. A., & Whitford, W. G. (1990). Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 247: 1043-1048.
- Schumge, T.; French, A.; Ritchie, J. C.; Rango, A., & Pelgrum, H. (2002). Temperature and emissivity separation from multispectral thermal infrared observations. *Remote Sensing Environment*, 79: 189-198.
- Skarpe, C. (1991). Impact of grazing in savanna ecosystems. *Ambio*, 20: 351-356.
- Small, C. (2004). The Landsat ETM<sup>+</sup> spectral mixing space. *Remote Sensing of Environment*. 93: 1-17

- Smith, M. O.; Jonhson, P. E., & Adams, J. B. (1985). Quantitative determination of mineral types and abundances from reflectance spectra using principal components analysis. In: Proc. 15<sup>th</sup> Lunar Planet Science Conference. *J. Geophys Res.*, 80 Suppl., Part 2, C797-C804.
- Smith, M. O.; Ustin, S. L.; Adams, J. B., & Gillespie, A. R. (1990). Vegetation in Deserts: I. A Regional Measure of abundance from Multispectral Images. *Remote Sensing of Environment*, 31: 1-26.
- Souza Filho, C. R., Drury, S. A., Dennis, A.M., Rothery, D. A., Carlton, R. W. (1996) Restoration of noise-corrupted optical Fuyo-1 (JERS-1) data using frequency domain techniques. *Photogrametry Engineering & Remote Sensing*, 62(9), 1037-1047.
- Souza Filho C. R., & Drury, S. A. (1998). Evaluation of JERS-1 (FUYO-1) OPS and Landsat TM images for mapping of gneissic rocks in arid areas. *Int. J. Remote Sensing*, 19(18), 3569-3594.
- Steissberg, T. E.; Hook, S. J., & Schladow, S. G. (2005). Characterizing partial upwellings and surface circulation at Lake Tahoe, California – Nevada, USA with thermal Infrared images. *Remote Sensing of Environment*, 99: 2-15.
- Suertegaray, D. M. A.; Guasseli, L. A. & Verdum, R. (org.). (2001). *Atlas da Arenização: sudoeste do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Rio Grande do Sul, Secretaria Estadual de Coordenação e Planejamento, 84 p.
- Tilman, D. (1999). Global environmental impacts of agricultural expansion: The need of sustainable and efficient practices. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. Colloquium paper, 96: 5995-6000.
- Tilman, D.; Fargione, J.; Wolff, B.; D'Antonio, C.; Dobson, A.; Howarth, R.; Schindler, D.; Schlesinger, W. H., & Simberloff, D. Swackhammer, D. (2001). Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science*, 292: 281-284.
- Van de Koppel, J., Rietkerk, M., & Weissing, F. J. (1997). Catastrophic vegetation shifts and soil degradation in terrestrial grazing systems. *Trends Ecol. Evol.* 12, 352-356.
- Vaughan , R. G.; Hook, S. J.; Calvin, W. M. Taranik, J. V. (2005). Surface mineral mapping at Steamboat Springs, Nevada, USA, multi-wavelength thermal infrared images. *Remote Sensing Environment*, 99: 140-158.

- Verdum, R. *Approche Géographique des “déserts” dans les communes de São Francisco de Assis et Manuel Viana, État du Rio Grande do Sul, Brésil*. Tese de Doutorado. Université de Toulouse Le Mirail. Toulouse. 1997.
- Verstraete, M. M., & Schwartz, S. A. (1991). Desertification and global change. *Vegetation*, 91: 3-13.
- Vicente, L. E.; Souza Filho, C. R., & Perez Filho, A. (2005). Mapeamento de formações arenosas em fragmentos de Cerrado utilizando dados e produtos do sensor ASTER. In: *Simp. Bras. de Sens. Rem.*, Goiânia, INPE/SELASR. 12: 3419-3426. <<http://www.ltid.inpe.br/sbsr2005>>
- Vitousek, P. M.; Mooney, H. A. & Melillo, J. M. (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277: 494-499.
- Wackernagel, M.; Schulz N. B; Deumling, D.; Linares, C. A.; Jenkins, M.; Kapos, V.; Monfreda, C.; Loh, J.; Myers, N.; Norgaard, R. & Randers, J. (2002). Tracking the ecological overshoot of the human economy. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 99 (14).
- Wessman, C. (1991). Remote sensing of soil processes. *Agric. Ecosys. Envir.*, 34:479-493.
- White, W. B. (1974). The carbonate minerals. In: V. C. Farmer (Ed). *The infrared spectra of minerals. Mineralogical Society Monograph*, v.4. London: Mineralogical Society.
- Woodruff, D. S. (2001). Declines of biomes and biotas and the future of evolution. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 98, n.10: 5471-5476.

## ***CAPÍTULO 6***

### ***CONCLUSÕES GERAIS***

#### ***(i) Quanto ao uso dos dados ASTER***

A utilização dos dados ASTER em três localidades e épocas diferentes propiciou uma avaliação consistente de suas características de cobertura espacial e espectral. A validação de componentes espectrais de solo realizadas no capítulo 3 é um exemplo dessa afirmação, visto que foi possível estabelecer valores de correlação entre dados das imagens ASTER e espectros medidos em amostras de campo. Esse resultado mostrou-se extremamente satisfatório, principalmente considerando-se o intenso uso da terra registrado em todas as áreas estudadas, conjuntamente com a acentuada atuação do intemperismo químico próprio de climas tropicais úmidos, fatores que contribuem para o aumento dos níveis de mistura espectral nos pixels. Outro importante aspecto a ser destacado em relação ao ASTER diz respeito à sua característica hiperspectral (cobertura semi-contínua de bandas) na região do SWIR (AST5-AST9). Essa particularidade foi fundamental na identificação de fitofisionomias, visto que nessa região do espectro eletromagnético encontram-se importantes feições diagnósticas relativas a componentes da vegetação, como lignina, celulose e amido. Essa relação de bandas no SWIR também abrange importantes componentes químicos relacionados aos minerais como, por exemplo, as hidroxilas (OH), o que propiciou excelentes resultados na discriminação de minerais como caulinita, montmorilonita, gibbsita, como constatado no capítulo 3. No que se refere à detecção de óxidos e hidróxidos de ferro, a ausência de uma banda posicionada no intervalo espectral do azul (VIS) não inviabilizou a detecção destes componentes, sendo possível o mapeamento de sua abundância nos solos no capítulo 3. A capacidade de imageamento relativa ao subsensor do ASTER, cobrindo a região do TIR (*Thermal Infrared*), mostrou resultados excelentes referentes ao mapeamento de abundância e distribuição de componentes minerais de solo no capítulo 4, especificamente argilominerais, como a caulinita, e silicatos como o quartzo. Esse resultado, em particular, demonstra a viabilidade dessa região do espectro para o estudo de solos, considerando-se o ineditismo dessa aplicação para esse tipo de análise.

**(ii) QUANTO AO USO DA CLASSIFICAÇÃO HIPERESPECTRAL E ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA.**

Os métodos de classificação hiperespectral utilizados neste trabalho mostraram-se extremamente precisos, com destaque para a possibilidade do estabelecimento de zonas de transição e identificação de fragmentos vegetacionais, obtidas no capítulo 2. Neste estudo em particular a utilização integrada do SAM, em conjunto com o MTMF, possibilitou a identificação em escala de detalhe, de remanescentes florestais, bem como de faixas de transição entre os mesmos e diferentes usos da terra. Considerando-se os períodos e áreas distintas abrangidas por cada cena ASTER, neste trabalho, as correções atmosféricas empreendidas com base em parâmetros locais (MODTRANS/ACORN), somadas à minimização da dimensionalidade espectral e espacial dos dados (MNF, PPI), foram de fundamental importância, principalmente considerando a forte influência climática em regiões tropicais. Esse tipo de procedimento propiciou, em todas as etapas, a geração de um conjunto preciso de dados espectrais de forma isonômica, ou seja, com características intrínsecas ao material mapeado e possuindo padrões que podem ser generalizados para outras áreas (imagens). Neste sentido, o uso de espectroscopia de reflectância foi importante na medida da compreensão do comportamento espectral dos materiais sob investigação, servindo de base teórica e aplicada na reamostragem de feições diagnósticas para a resolução de bandas do sensor ASTER.

**(iii) QUANTO À PROPOSTA DE ANÁLISE SISTÊMICA ALIADA AO PROCESSAMENTO DE DADOS MULTIESPECTRAIS.**

Considerando-se o teor quantitativo inerente aos dados multiespectrais, a proposta de integração da análise sistêmica ensejada neste trabalho mostrou-se apta a fornecer subsídios para uma abordagem qualitativa de sistemas ambientais, no que se refere à avaliação dos seus processos de transformação. Em todos os capítulos, conceitos como escala e estabilidade (resiliência, resistência) estiveram subjacentes aos mapeamentos propostos. Exemplo dessa afirmação pôde ser encontrado nos processos de degradação de terras no Rio Grande do Sul, onde a detecção da presença e abundância de quartzo, constitui-se num dos principais deflagadores de alterações de grande escala. A análise sistêmica também envolve o questionamento da gênese de alguns processos, como foi o caso do comportamento de fragmentos vegetacionais remanescentes na Região de Itirapina – SP. A pergunta que se fez neste caso é porque algumas áreas apresentam capacidade de regeneração (resiliência) e outras simplesmente não voltam ao estado original. Isso foi demonstrado em glebas abandonadas de eucalipto que voltaram a ser ocupadas pela vegetação

original de cerrado. Mais uma vez, o conceito de escala esteve presente ao nortear a detecção de componentes minerais de solos, visto que pequenas variações texturais e mineralógicas em escalas micro, podem determinar todo um novo conjunto de reações frente perturbações de ordem macro, como suscetibilidade erosiva ou capacidade de cultivo.

# ***ANEXOS***

**ANEXO 1. RESULTADOS DOS DADOS DE GRANULOMETRIA DE SOLOS****ÁREA DE ESTUDO: SÃO FRANCISCO DE ASSIS****Faculdade de Engenharia Agrícola****Laboratório de Solos**

Análise: Granulometria (Método da pipeta)

Amostra	AREIA						ARGILA	SILTE
	Muito Grossa	Grossa	Média	Fina	Muito Fina	AREIA TOTAL		
	g/kg							
A1 0-20	0	4	408	491	57	960	33	7
80-100	1	5	420	466	54	946	41	13
180-200	0	7	407	465	71	950	39	11
A2 0-20	1	14	517	387	44	963	31	6
80-100	0	21	411	391	78	901	61	38
180-200	1	18	374	376	72	841	104	55
P1 0-20	2	22	384	428	66	902	61	37
80-100	5	26	344	365	67	807	132	61
180-200	4	30	394	305	73	806	104	90
P2 0-20	3	7	230	521	131	892	62	46
80-100	2	7	228	518	118	873	66	61
180-200	0	4	255	566	59	884	83	33
P3 0-20	8	23	414	375	60	880	73	47
80-100	0	33	408	426	66	933	56	11
180-200	4	40	493	346	32	915	57	28
C1 0-20	2	7	238	476	179	902	52	46
80-100	0	10	289	438	148	885	60	55
180-200	3	16	293	438	148	898	49	53
C2 0-20	6	14	298	472	120	910	54	36
80-100	2	11	274	442	136	865	83	52
180-200	2	16	288	416	138	860	87	53
C3 0-20	0	12	375	462	88	937	42	21
80-100	0	24	380	406	87	897	62	41
180-200	1	21	345	415	102	884	72	44
C4 0-20	1	16	387	451	80	935	41	24
80-100	3	18	414	402	69	906	54	40
180-200	1	26	421	381	65	894	59	47
C5 0-20	5	19	423	428	58	933	39	28
80-100	2	24	394	396	67	883	69	48
180-200	2	31	413	369	61	876	31	93
C6 0-20	5	27	434	401	43	910	53	37

80-100	2	33	382	391	50	858	87	55	
180-200	5	25	392	368	49	839	103	58	
C7 0-20	4	24	393	421	59	901	56	43	
80-100	2	25	386	363	57	833	110	57	
180-200	5	23	340	358	62	788	141	71	
Peso do Dispersante						becker	tara	tara+disper	disp.
						g			
BRANCO (a1 à c1 0-20)						79	13.812	13.8257	0.0137
BRANCO (c1 80-100 à c7)						72	13.7473	13.7617	0.0144

Areia grossa: fração da TFSA entre 2,0 mm e 0,25mm (obtida por tamisagem)

Areia fina: fração da TFSA entre 0,25mm e 0,053mm (obtida por tamisagem)

Silte: fração da TFSA entre 0,053mm e 0,002mm (obtida por diferença)

Argila: fração da TFSA < 0,002mm (obtida por pipetagem)

Referência do método: EMBRAPA, 1997.

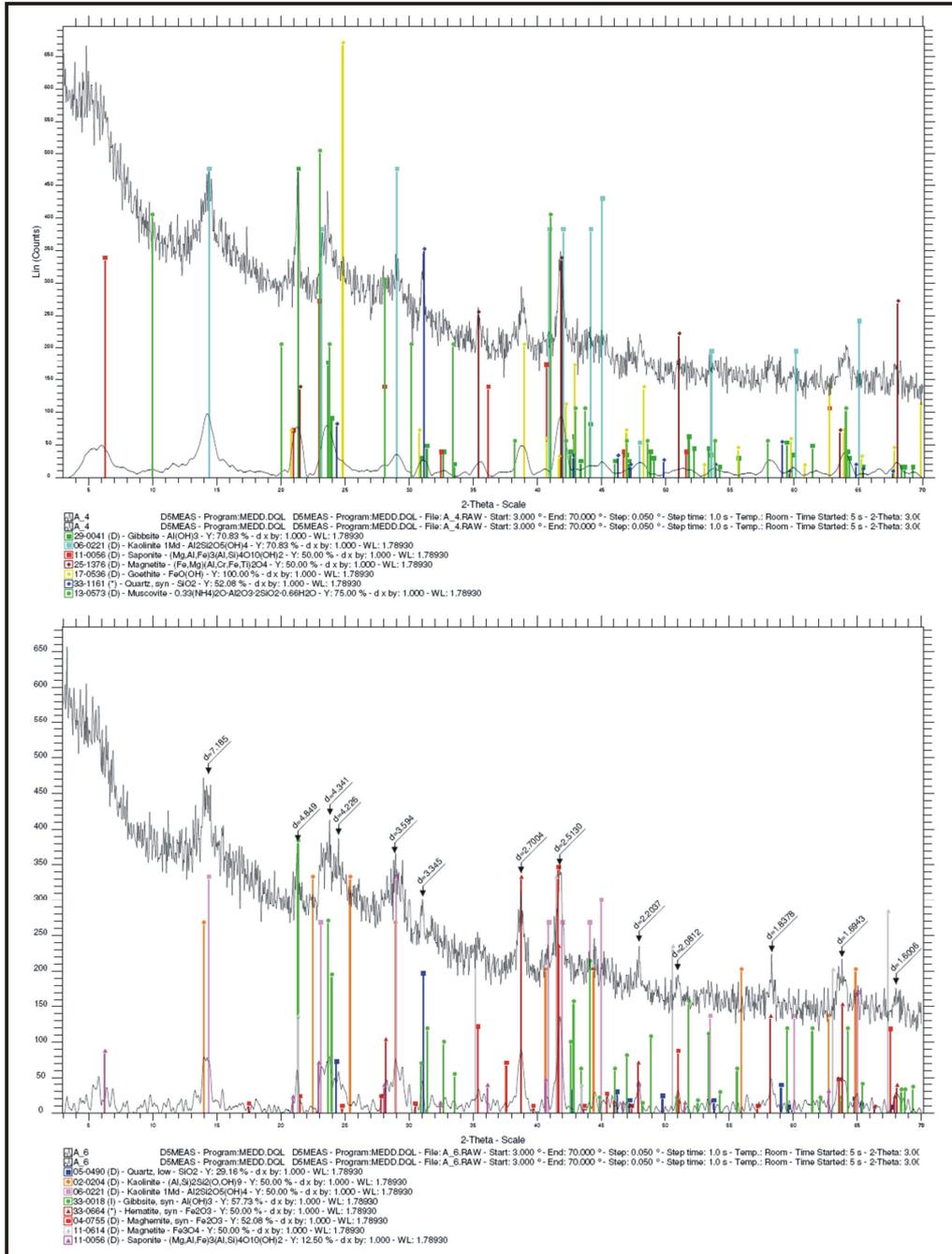
#### ÁREA DE ESTUDO: ITIRAPINA

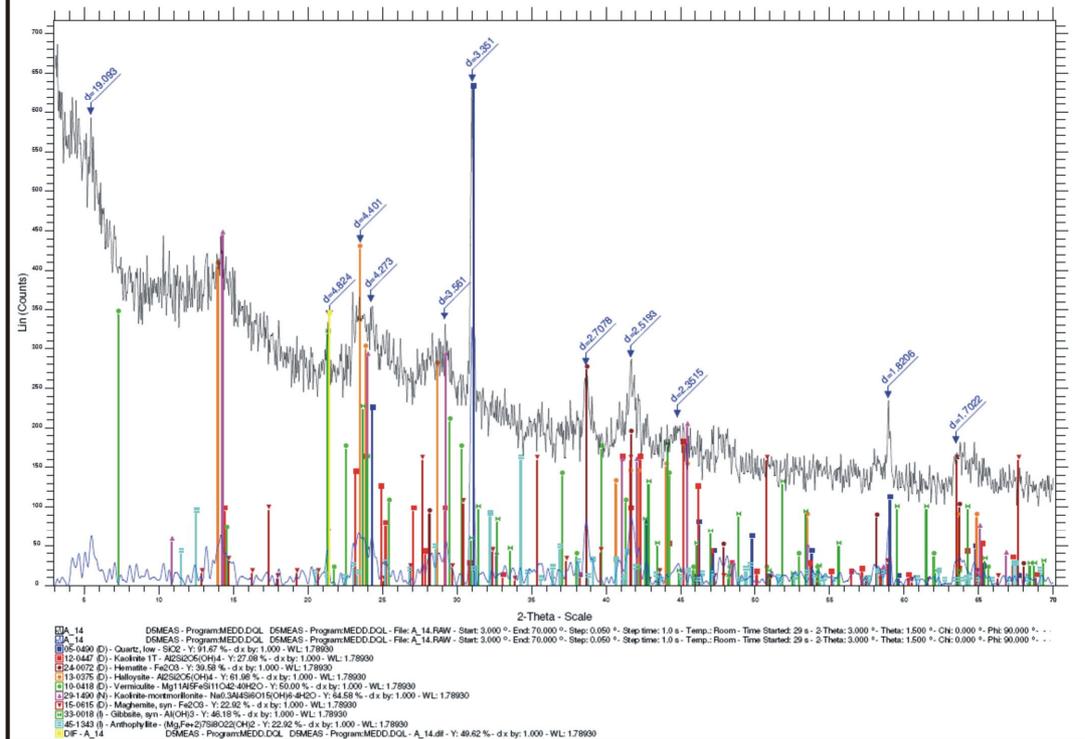
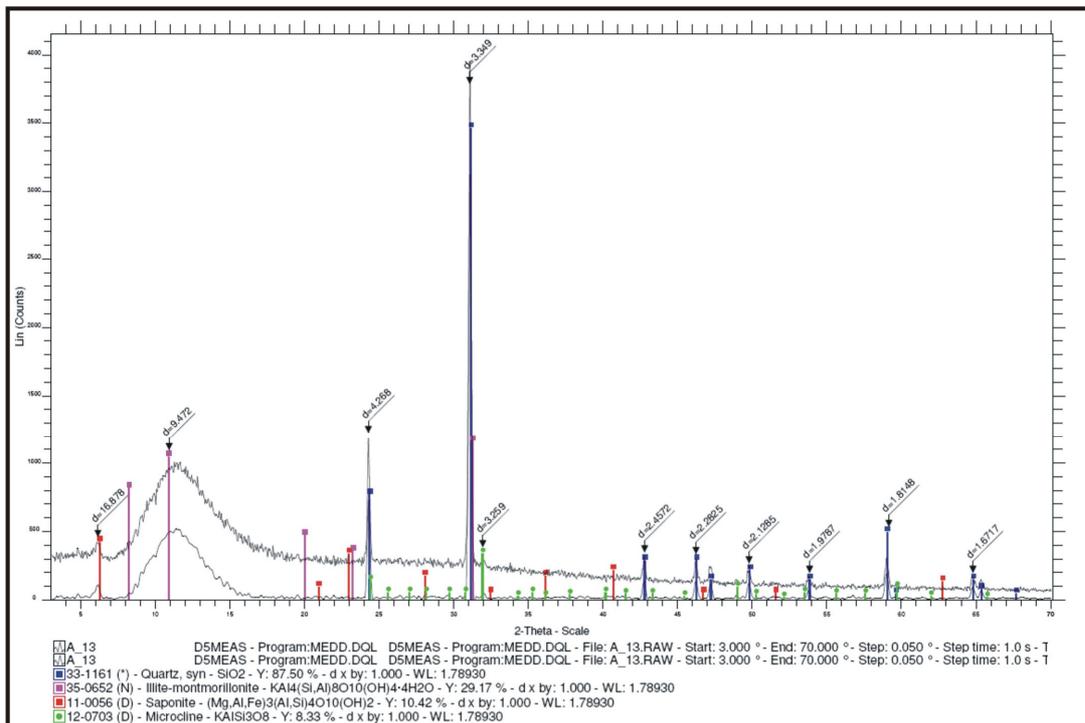
Topo 1	AREIA					AREIA	ARGILA	SILTE
	Muito	Grossa	Média	Fina	Muito			
Amostra	Grossa				Fina	TOTAL		
Horizontes	<b>g/kg</b>							
A1 0-20	24	162	433	236	48	903	77	20
80-100	20	147	410	229	59	865	122	13
180-200	10	97	396	271	75	849	129	22
A2 0-20	16	136	449	263	49	913	76	11
80-100	20	127	406	234	86	873	121	6
180-200	26	122	403	241	63	855	122	23
A3 0-20	10	95	409	304	79	897	89	14
80-100	7	90	431	264	63	855	121	24
180-200	14	100	389	270	78	851	123	26
A4 0-20	11	100	350	356	84	901	83	16
80-100	17	114	385	283	76	875	106	19
180-200	12	96	334	316	101	859	120	21
A5 0-20	23	161	398	299	46	927	60	13
80-100	42	172	340	257	70	881	98	21
180-200	19	163	370	257	72	881	98	21
A6 0-20	22	113	405	327	68	935	53	12
80-100	18	105	398	295	78	894	86	20
180-200	48	147	361	260	79	895	87	18
A7 0-20	16	112	472	284	62	946	43	11
80-100	17	162	426	237	73	915	72	13
180-200	14	118	409	282	80	903	80	17
A8 0-20	4	48	432	378	87	949	42	9
80-100	3	43	375	372	118	911	64	25
180-200	3	60	372	339	129	903	72	25

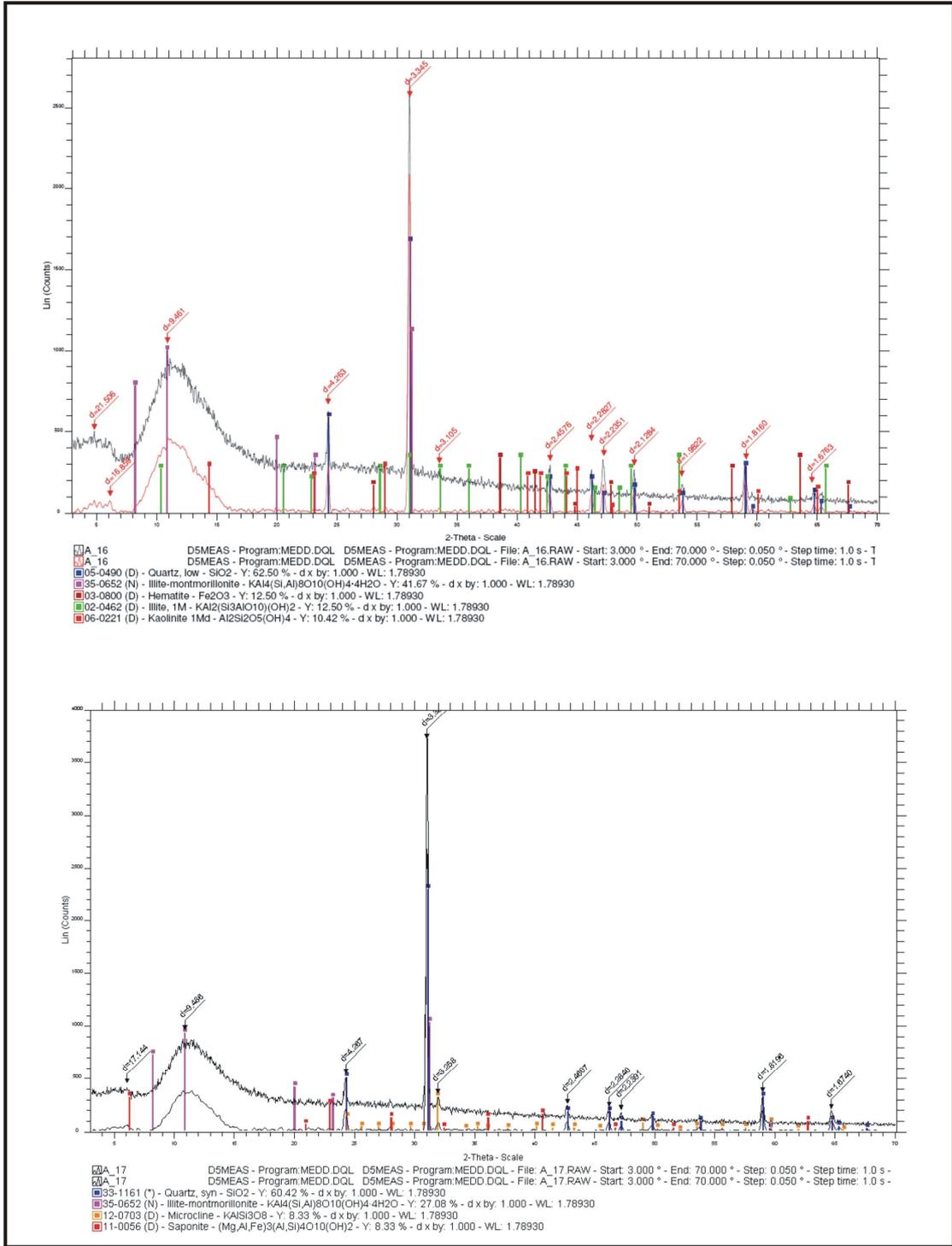
A9 0-20	4	48	394	369	126	941	40	19
80-100	6	66	407	333	108	920	57	23
180-200	5	41	301	357	178	882	82	36
Topo 2	AREIA							
	Muito	Grossa	Média	Fina	Muito	AREIA	ARGILA	SILTE
Amostra	Grossa				Fina	TOTAL		
Horizontes	<b>g/kg</b>							
C2 0-20	5	51	270	417	174	917	56	27
80-100	21	97	318	327	116	879	88	33
180-200	10	56	233	367	200	866	93	41
C3 0-20	13	63	322	375	142	915	64	21
80-100	6	52	297	361	161	877	93	30
180-200	18	62	271	331	183	865	107	28
C4 0-20	8	73	332	369	136	918	60	22
80-100	10	73	315	322	164	884	95	21
180-200	14	79	330	307	146	876	96	28
C5 0-20	13	70	319	368	146	916	65	19
80-100	6	58	273	348	186	871	93	36
180-200	13	74	323	324	147	881	94	25
C6 0-20	14	46	284	422	161	927	56	17
80-100	14	68	320	325	151	878	91	31
180-200	8	45	302	359	166	880	96	24
C7 0-20	11	60	323	380	144	918	56	26
80-100	21	82	303	319	165	890	86	24
180-200	27	79	291	313	172	882	95	23
C8 0-20	11	50	342	399	135	937	47	16
80-100	11	55	327	373	174	940	42	18
180-200	10	47	321	363	165	906	78	16
C9 0-20	3	37	338	404	180	962	35	3
80-100	7	43	276	370	208	904	76	20
180-200	4	51	338	360	179	932	53	15
C10 0-20	4	37	302	441	182	966	27	7
80-100	6	41	321	398	181	947	40	13
180-200	3	24	267	437	208	939	48	13
C11 0-20	2	17	231	504	213	967	27	6
80-100	2	17	234	467	228	948	40	12
180-200	1	17	244	445	230	937	47	16

## ANEXO 2. RESULTADOS DOS DADOS DE DIFRATOMETRIAS DE RAIOS X

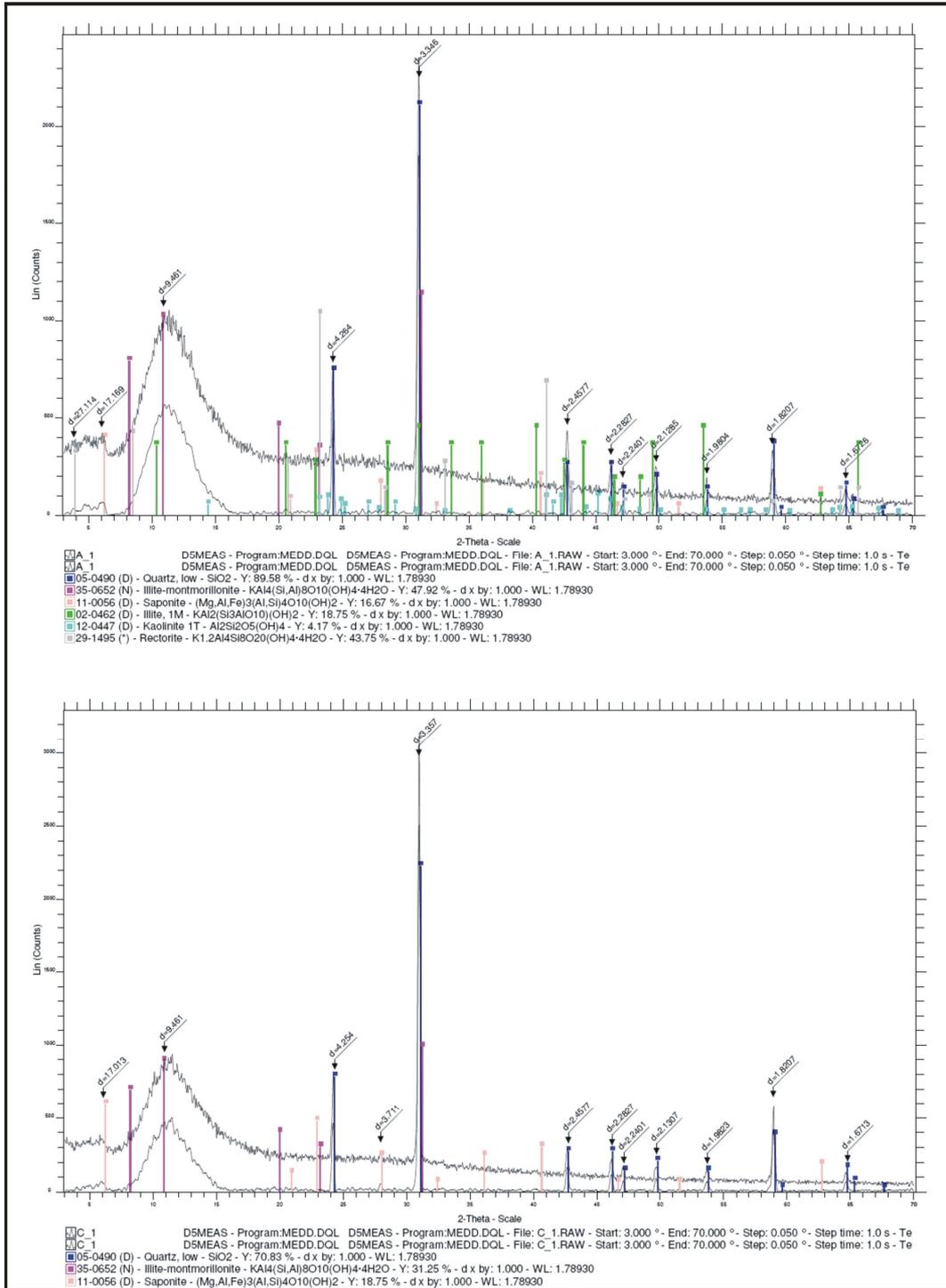
### ÁREA DE ESTUDO: ASSIS

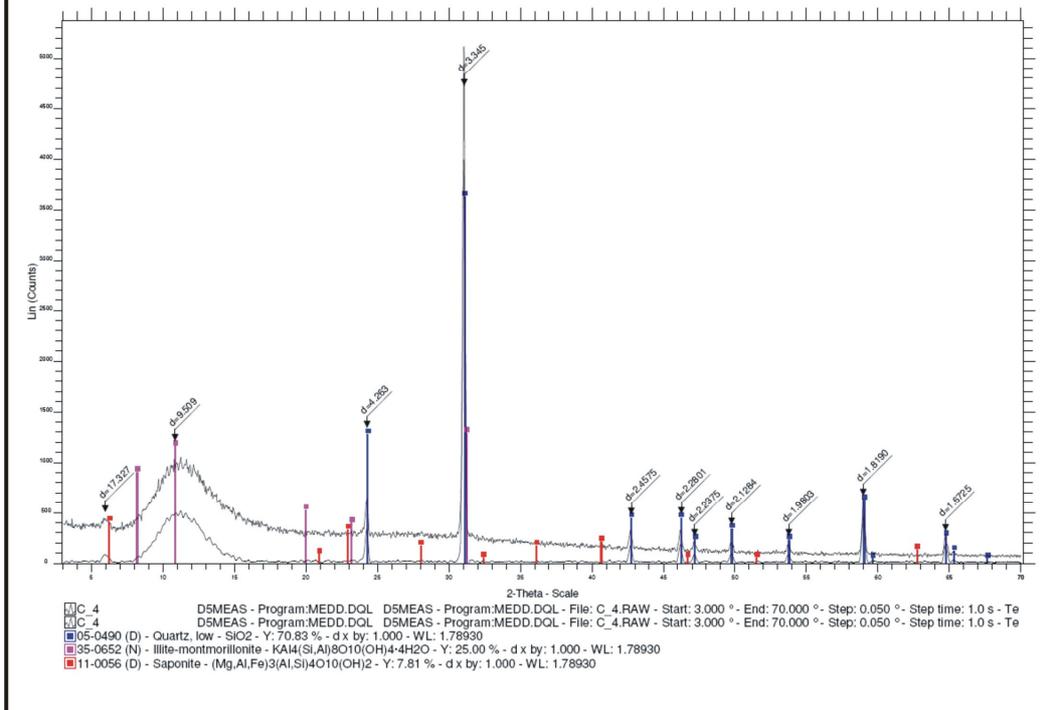
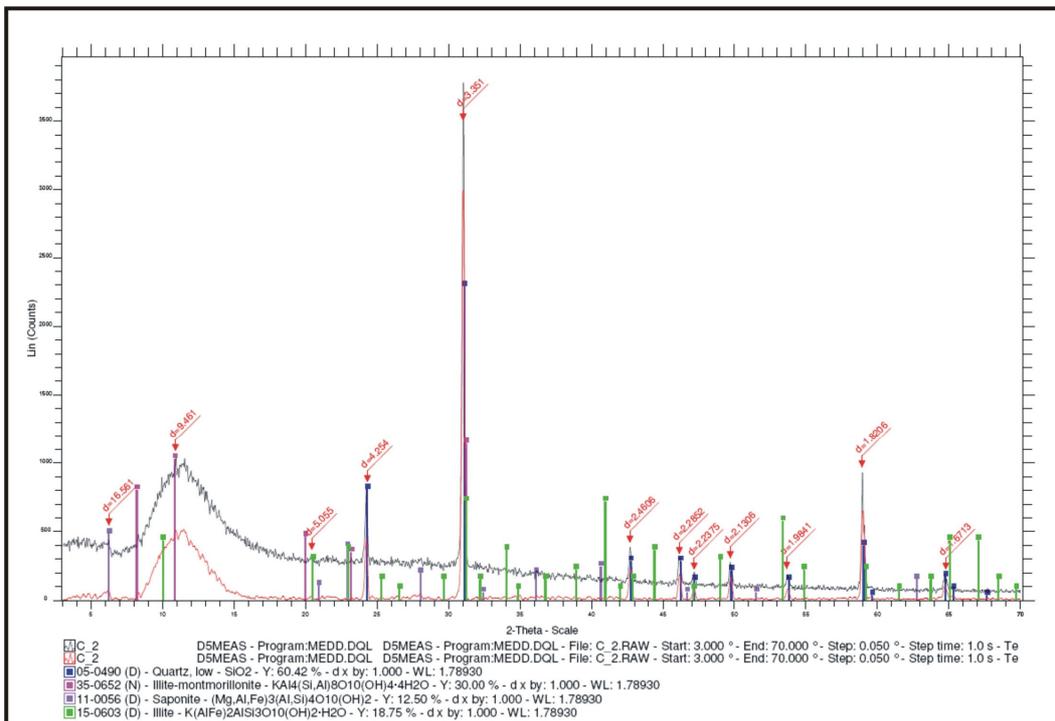


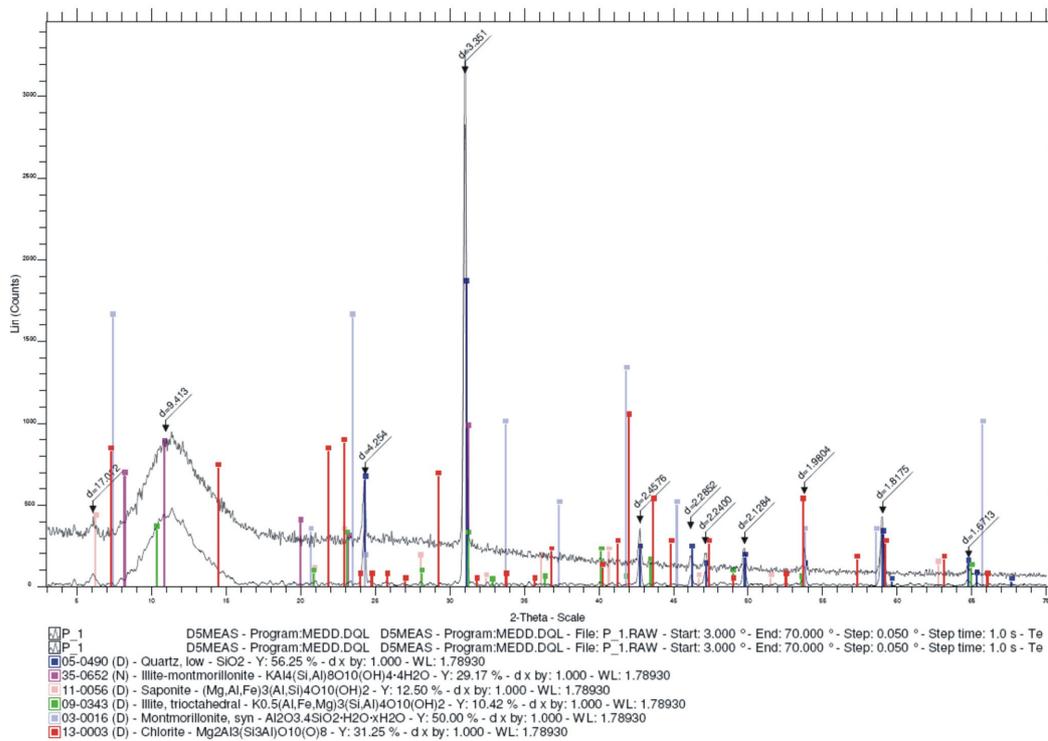
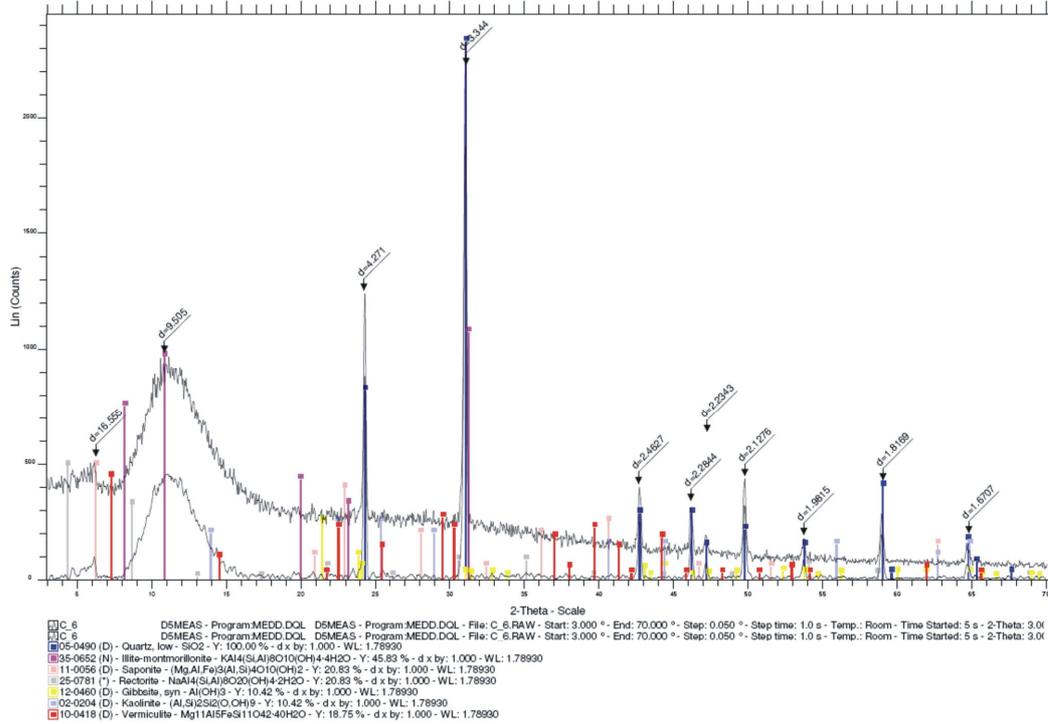




ÁREA DE ESTUDO: SÃO FRANCISCO DE ASSIS







### **ANEXO 3. ANÁLISE SISTÊMICA: CONTEXTO HISTÓRICO**

O desafio ensejado pela análise sistêmica é o do entendimento da complexidade do todo. Tal necessidade encontra-se não apenas no seio da ciência moderna, como foco de superação dos mosaicos mecânicos da ciência clássica, mas, também como vimos aqui, no cerne de uma nova demanda sócio-cultural. Se a complexidade da natureza não foi reduzida a comportamentos lineares, muito menos o será quando encarada sob uma perspectiva ambiental, ou seja, da qual o Homem é parte integrante.

Foram diversas as contribuições da aplicação dos conceitos sistêmicos a ciência de maneira geral e, através dela, para os estudos de ordem ambiental, dentre as quais Vicente & Perez Filho (2001) destaca:

- a constituição de um método unificador para os estudos ambientais;
- a apreensão das estruturas da superfície terrestre de forma integrada;
- o aprimoramento de uma proposta de trabalho científico multidisciplinar;
- o desenvolvimento de técnicas e métodos estatísticos e cartográficos voltados à análise espacial;
- o aprimoramento dos conceitos de gestão e planejamento territoriais sob uma perspectiva ambiental.

Insere-se, nesse contexto, o que muitos chamam de paradigma sistêmico, discussão essa nada recente, mas que, a todo momento, nos traz novas nuances e possibilidades, de onde conclui-se que, o paradigma é sobretudo uma nova forma de encarar o meio em que vivemos, e constituiu-se no próprio desafio da intervenção analítica sobre o complexo ambiental voltado para o planejamento e gestão (diagnose/prognose), através da evolução e interação de seus componentes ambientais, priorizando suas relações muito mais do que suas particularidades, expressas em sua dinâmica temporal e na sua organização espacial.

Essa reflexão está conjugada à reavaliação de abordagens quantitativas/qualitativas, de escalas e estruturas, na discriminação e apresentação de resultados e indicadores factíveis que sirvam de parâmetro para uma epistemologia coadunada com a complexidade da relação sociedade/natureza. Dessa forma torna-se vital conhecer tais conceitos e discuti-los com vistas a

sua superação. Foi assim com o Geossistema, o Ecossistema, e será assim sempre para quem assumir a responsabilidade da superação, que pode ser alcançada somente de maneira aplicada, num processo de retroavaliação constante, entre ciência, tecnologia e filosofia, sob uma perspectiva interdisciplinar.

### **3.1. O PARADIGMA DA COMPLEXIDADE**

A busca de superação do mecanicismo científico fundamentado na ciência clássica, reverbera através da criação de um novo escopo de entendimento da realidade, o qual abrange campos dicotomizados da especialização acadêmica, transcendendo as esferas física, biológica e antropológica, ao que denomina-se paradigma da complexidade (Morin, 2002). O entendimento da superação deste paradigma possui um viés aplicado que materializa-se através do conceito de sistemas, o qual constitui-se num *modelo* que vem sendo refinado e concatenado por diversos ramos da ciência. Enquanto modelo o mesmo apresenta-se como uma aproximação pragmaticamente necessária que pode ser desdobrada, quantificada e analisada, porém, que não traz, per se, a explicação análoga dos fenômenos complexos. Este novo paradigma procura ir além de explicações finalistas e dicotômicas próprias de modelos acabados, na medida que assume a dinâmica das diferenças através dos paradoxos e antagonismos inerentes a realidade (Morin, 2002).

O modelo sistêmico representa o desdobramento filosófico/científico do conceito de complexidade, viabilizando sua implementação, mas não a ponto de impedir sua auto-avaliação e evolução. Atende, portanto, de maneira paradoxal ao desafio da necessidade científica da diagnose/prognose, na busca de padrões e respostas que possam ser amplamente aplicadas (Figura 3.1).

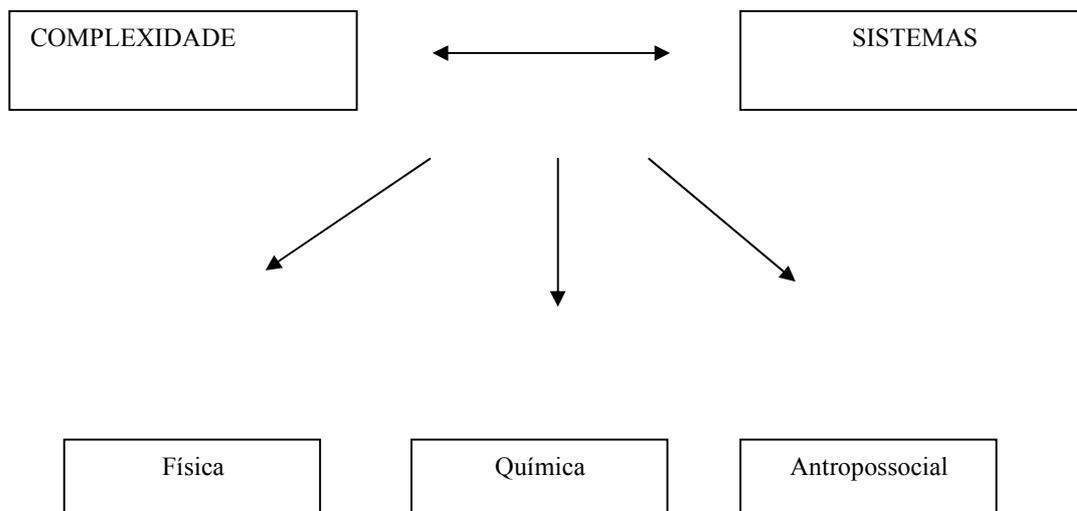


Figura 3.1. Esquema de complexidade e sistemas na ciência (adaptado de Morin, 2002).

Identificar e analisar um sistema pressupõe entender num primeiro momento sua organização/funcionalidade, sendo que para tanto, aplicam-se a esse tipo de estudo conceitos subjacentes que vem sendo re-trabalhados de acordo com cada área do conhecimento, como: auto-organização, retro-alimentação, estabilidade e hierarquia, por exemplo.

De maneira simplificada um sistema pode ser aberto ou fechado, mediante sua relação com o meio. Essa relação dá-se através de fluxos de matéria e energia, os quais oscilam segundo níveis de entropia (quantidade de energia disponível para geração de transformações), podendo ocorrer num ambiente de ciclos controlados com trocas tão somente de energia, caracterizando um sistema fechado. No caso de sistemas abertos essa troca dá-se em níveis mais elevados, incluindo a transformação de energia/matéria de maneira contínua com o ambiente externo, que nada mais são do que outros sistemas em escalas diversas. Diferentemente de sistemas fechados, os sistemas abertos mantêm-se longe do equilíbrio termodinâmico e não podem ser entendidos unicamente por essas leis, estando sempre em re-organização num jogo de funcionalidade/disfuncionalidade através de sua retroalimentação e estruturas dissipativas, as quais ajudam na organização deste sistema.

Dessa forma, o comportamento de sistemas abertos é essencialmente dinâmico e não-linear, sendo caótico por sua imprevisibilidade aparente ao não corresponder à busca de padrões da ciência moderna, tornando-os essencialmente complexos. Essa condição aplica-se aos sistemas

encontrados na natureza enquanto *sistemas ambientais* em escalas macroscópicas, ou seja, ao alcance da percepção humana.

#### **4.2. A FORMAÇÃO DA CIÊNCIA DO CAOS**

Se o conceito de sistemas pressupõe um todo organizado e funcional o qual descreve genericamente todos os fenômenos na natureza, onde está a complexidade dos mesmos? Pode-se dizer que esta resposta reside numa nova abordagem do tempo e do espaço, base para o entendimento da dinâmica não-linear inerente a sistemas complexos, a qual começou ser forjada nos extremos do universo (macro e micro), tanto no frio do espaço, quanto no calor das partículas elementares. Filosofia e ciência nunca andaram tão juntas quanto na história desse paradigma, esse fato resulta numa dificuldade em contextualizá-lo de maneira fidedigna. Comumente derivações teórico-conceituais muito difundidas atualmente, nos privam da fundamentação prática desse novo pensamento enquanto ciência, reduzindo-o a tratados metafóricos de fundo tautológico e carga retórica. Cada novo conceito desse campo foi fruto de profundos questionamentos próprios da filosofia, porém, todos eles faziam par com a mais criteriosa aplicação científica.

Uma das primeiras demonstrações dessa afirmação encontra-se no novo enfoque dado as leis gerais de gravitação de Newton, apresentada no campo da mecânica celeste, pelo matemático Henri Poincaré por volta de 1880 através do problema dos três corpos, o qual consistia na questão de *quais são os comportamentos possíveis de um sistema constituído por três corpos que interagem entre si através de uma força gravitacional newtoniana?* (Buescu *apud* Gleick, 1989).

Uma proposição simples aflorava desse pleito: ao considerar-se mais que dois corpos utilizando as equações diferenciais newtonianas, esse sistema ruiria. Mesmo considerando que as leis de Newton fossem a descrição absoluta e acabada do Universo não era possível realizar tais cálculos utilizando o seu modelo básico para o entendimento do mundo real. Porém, o sistema solar existe e obviamente possui bem mais que dois corpos. Como então explicar a estabilidade das órbitas frente a perturbações de pequeno e grande porte?

Não tratava-se, portanto, apenas da ampliação do número de elementos e sim de uma nova forma de abordagem de equações não-lineares, uma maneira não mais quantitativa, mas sim qualitativa e geométrica no campo das equações diferenciais. Poincaré vislumbrara o estudo dos *sistemas dinâmicos* (Buescu *apud* Gleick, 1989), observando a possibilidade de comportamentos

irregulares e a-periódicos a partir das órbitas regulares entre dois corpos. (bifurcação de órbitas homocíclicas). Encontrava-se ali a própria quebra do paradigma do universo mecânico de Newton através da demonstração aplicada da existência de uma lacuna entre a explicação do comportamento solitário de um elemento, e desse elemento como parte de um conjunto, vide a célebre acertativa de que *a soma de todas as partes é maior que o próprio todo* (Bertalanffy, 1973).

O aprofundamento dos estudos em sistemas dinâmicos começa a partir de meados do século XIX, através de uma maior inserção nas ciências exatas pelos experimentos de Jean-Joseph Fourier no ano de 1811, com a chamada *Ciência do Calor*, seguido posteriormente por Sadi Carnot em 1824 e James Prescott Joule em 1847 (Prigogine, 1984).

A tentativa de compreensão do desperdício de energia contido em processos térmicos, própria da necessidade de otimização de máquinas à vapor durante a revolução industrial, acabou por constituir-se num novo ramo da Física, onde se estuda processos de conservação, dissipação e transformação de energia/matéria. Ao modelarem fenômenos térmicos, esses cientistas depararam-se com comportamentos de conjunto, próprios de sistemas, os quais não mais encontravam respaldo conceitual na Física Newtoniana, o que acabou por fornecer as bases para a *Termodinâmica*.

### **3.2.1. A TERMODINÂMICA: A DESCOBERTA DO TEMPO/ESPAÇO E SUAS FORMAS CONTÍNUAS**

Ao contrário das interações mecânicas previstas na lei de gravitação dos corpos de Newton, a propagação do calor é progressivamente caótica tendendo a homogeneização das quantidades de energia através de sua dissipação. James Prescott Joule define, em 1847, uma relação de equivalência geral entre o trabalho mecânico necessário para a elevação de um grau de temperatura de uma determinada quantidade de água, vislumbrando a própria energia presente em processos dinâmicos, envolvendo transformações físicas, químicas e mecânicas. Essa abordagem expõe o fio condutor de processos concernentes à própria natureza, ou seja, sistemas abertos inerentemente complexos (Gondolo, 1999).

“Com efeito, os fenômenos materiais, sejam mecânicos, químicos ou vitais, constituem-se quase exclusivamente em uma conversão de atração através do espaço, da força viva (energia cinética) e do calor de um sobre os outros. É assim que a ordem do Universo é mantida – nada é perturbado, nunca se perde nada, mas toda a maquinaria, por mais

complicada que seja, funciona com calma e harmonia” (Joule, 1884 *apud* Prigogine, 1984).

A peculiaridade dos estudos em Termodinâmica insere uma nova perspectiva de análise de processos contínuos, onde o tempo estabelece-se como um dos principais elementos de compreensão dos fenômenos. Prigogine (1997) destaca tal mudança de concepção como fundamental para a ciência, tratando-a como o surgimento da *flecha do tempo* na Física. Dessa forma, cada elemento para ser compreendido deve ser inter-relacionado, considerando suas relações, conexões e processos, concebidos em sua extensão no tempo/espaço, estabelecendo duração, flutuação e *estados de equilíbrio*.

“Estudar o comportamento físico ligado ao calor é definir um sistema não como na dinâmica, pela posição e velocidade dos seus constituintes (...), mas por um conjunto de parâmetros macroscópicos. Esses parâmetros definem a composição do sistema e também **(condições aos limites)** suas relações com o resto do mundo desde logo definido como *meio*. (grifo e comentário nosso) (Prigogine & Stengers, 1997)

Dessa maneira, estabelece-se uma relação direta entre fenômenos de diversas ordens, conhecida como a *primeira lei da termodinâmica* (Gondolo, 1999), que trata da conservação e transformação universal de energia/matéria, sendo justamente esse novo *jogo* físico-químico, abordado pela Termodinâmica, de interesse para a ciência de maneira geral como um novo modelo de apreensão do meio. Constitui-se, assim, uma perspectiva baseada em conexões de processos conservativos e transformativos que transcendem escalas, com ênfase na interdependência de elementos. Explicá-los, e a seus fenômenos correlatos, significa entendê-los como um todo, delineando assim a própria complexidade através de uma maior aproximação modelar, considerando inter-relações em processos multi-escalares e *espaço/temporais*.

Sob essa perspectiva, a lógica de processos contínuos de energia/matéria demonstra a necessidade de concepções e modelos que incorporem o tempo e seus desdobramentos espaciais. A consideração conjunta dos conceitos *espaço/tempo* insere-se como uma questão fundamental e paradigmática para os estudos do meio, visto que, a dinâmica e a complexidade dos fenômenos espaciais exige uma discussão teórico-conceitual de formas de representação e análise.

Coloca-se, portanto, a seguinte questão - se os estudos em bases sistêmicas como método teórico conceitual, comportam o entendimento da complexidade e da dinâmica temporal enquanto parte integrante dos fenômenos espaciais, então, como realizar o caminho inverso e transportá-los para modelos de análise espacial?

Num contexto histórico pode-se afirmar que se a quantidade de informação vinculada a um tema é indicador de sua complexidade, a prova disso está nas novas demandas sócio-políticas surgidas após a Segunda Guerra Mundial, as quais culminam com a aplicação mais efetiva do conceito de sistemas. O mundo conhecido expandira-se, e a efervescência social e tecnológica lembrava à todos que o planeta funcionava numa prerrogativa de conjunto. Parte dessa efetivação encontra-se no advento da *ciência da informação* e no surgimento dos primeiros computadores, os quais tornariam o processo de modelagem matemática de sistemas mais preciso, abrindo um amplo campo de novas possibilidades (Vicente & Perez Filho, 2001).

Neste sentido, diversas contribuições foram realizadas à partir da década de 1950 pelo grupo oriundo da *Escola de Termodinâmica e Mecânica Estatística de Bruxelas*, liderados por Illya Prigogine. Prigogine e seus colaboradores, num esforço transdisciplinar, foram além da micro-escala e do escopo das reações químicas em sistemas fechados, explorando os meandros da termodinâmica no que tange aos efeitos do tempo em sistemas abertos, abarcando sistemas de transportes; comportamento social de insetos e estados de equilíbrio (Gondolo, 1999).

A exatidão e poder de cálculo da informática ajudaram a demonstrar que equações lineares em bases simples podem descrever comportamentos complexos. Isso foi verificado por Edward Lorenz (1963), o qual modelou a evolução de um conjunto de variáveis atmosféricas, reconhecendo neste processo que flutuações mínimas levam gradativamente a comportamentos aparentemente caóticos. O estudo de sistemas lineares até então desconsiderava o erro proveniente das aproximações, como se os mesmos fossem manter-se constantes ao longo do tempo. Dada algumas condições iniciais a propagação do erro tornava-se parte do sistema, gerando comportamento criativo e aleatório, o que estabelecia novos patamares para o princípio da *eqüifinalidade*<sup>3</sup>, nascia a *Teoria do Caos*.

Uma pequena aproximação de casas decimais no início, que representariam a direção e intensidade dos ventos, por exemplo, poderiam significar um ciclone ao longo do tempo. Lorenz chamou isso de *dependência sensível das condições iniciais* (Lorenz, 1963), mais tarde

---

<sup>3</sup> Conceito aprimorado pela termodinâmica, onde as condições iniciais de um fenômeno estabeleceriam suas condições finais.

conhecido como *Efeito Borboleta*, numa alusão ao deslocamento de ar do bater de asas de uma borboleta no Brasil, podendo causar um furacão no Texas, em seu artigo de 1979 *Predictability: Does The Flap of a Butterfly's Wings in Brazil Set Off a Tornado in Texas?* (Gleick, 1989).

Ao mesmo tempo que a constatação de Lorenz descrendeciava a previsibilidade simulatória em sistemas não-lineares ao vislumbrar a própria complexidade, respondia ao estigma da previsibilidade científica, na medida que fornecia uma nova forma de busca de padrões através da identificação da repetição de ciclos, *a ordem em meio ao caos*. Surgia o conceito de *atratores*<sup>4</sup> o qual foi desenvolvido e aplicado por autores como Hénon (1976), Grebogi, Ott e Yorke (1987), como sendo o comportamento uniforme de um conjunto de elementos do sistema, o qual pode ser descrito graficamente ao longo do tempo e representa um padrão de equilíbrio do mesmo. A busca de *atratores*, assim como a definição de *estabilidade* em sistemas complexos, torna-se fruto de pesquisas em diferentes campos.

Em meados do século XX, ocorre um desdobramento sintomático de tais conceitos que, em maior ou menor grau, alcançam outros campos da ciência, permeando novas teorias que trabalham de maneira geral, não com a redução e análise estática, mas sim, com a integração e a perspectiva de espaço/tempo relativizados.

A Física tradicional passa a receber contribuições significativas de matemáticos como Steven Smale, que analisa experimentos clássicos como osciladores, sob a ótica dos sistemas dinâmicos, da topologia e do emprego de equações diferenciais. Smale observa oscilações e turbulências onde se via a simplicidade linear do comportamento de um pêndulo (Gleick, 1989).

Na década de 1970, Biologia e Matemática contribuem no campo do estudo de populações. Nomes como Robert May e James Yorke, abordam o assunto enquanto sistemas dinâmicos, perfazendo um novo aporte para a Ecologia, onde a não-linearidade de fato encontrada na natureza é simulada através da releitura de equações simples que podem conter oscilações evolutivas, próprias de populações reais (May, 1976).

A teoria da informação criada por Claude Shannon (1949), que inicialmente seria a medida do nível de ruído e redundância numa carga comunicativa, aos poucos, torna-se um eficiente instrumento conceitual para o estudo da organização de sistemas, abrangendo a inter-relação de diversas variáveis. Exemplo disso é o trabalho de Robert Shawn (1981), que sob a luz dos conceitos de entropia e atratores, exalta a teoria da informação como um medidor de complexidade em sistemas, um leitor de probabilidades entremeadas na linguagem dos bits (*binary digit*).

---

<sup>4</sup> O conceito de atrator pode ser simplificado como a expressão gráfica de áreas com maior concentração de elementos de mesmo comportamento (homogeneidade) num sistema, podendo significar tendências de evolução ou estabilidade. Representado usualmente num gráfico n-dimensional de um espaço fase, onde delinea-se o comportamento dinâmico de um sistema.

”Para Robert Shaw, os atratores estranhos eram motores de informação (...) Os atratores estranhos misturando ordem e desordem, davam um novo alento a questão da medição de entropia de um sistema. Os atratores estranhos serviam de misturadores eficientes, criavam imprevisibilidade, aumentavam a entropia. E, como pensava Shawn, criavam informação onde não existia nenhuma. (Gleick, 1989)”

Outra importante contribuição dá-se pelo estudo das formas livres que resultam de processos à-periodicos não-lineares. Nada é tão complexo quanto a expressão do conteúdo em sua forma, diga-se o esforço da Topologia em explicar relações morfológicas e decodificá-las de suas componentes numéricas. Libchaber e Maurer verificaram a repetição escalar de formas em experimentos relacionados a dinâmica de fluídos. Uma relação de fluxo, tempo e períodos que apresentava lógica em meio ao caos (Gleick, 1989).

Nesse campo, talvez a contribuição mais notória tenha sido de Mandelbrot, Hubbard e Barnsley, sendo o primeiro o mais conhecido. As formas livres aqui constituem-se na antítese do pensamento cartesiano através dos *Fractais*, em contraposição as formas inteiras da Geometria Euclidiana. O termo *fractal* foi dado por Mandelbrot (1983), e vem do latim *fractus* (quebrado). Uma denominação adequada para um novo conceito que considerava irregularidades, rugosidades, fragmentos e descontinuidades, ou seja, mais próximo das formas da natureza (Gleick, 1989).

De maneira geral as novas concepções práticas de ciências como a Física, Matemática e Biologia, geraram todo um novo aporte conceitual que influenciou diretamente autores teóricos voltados a aspectos filosóficos, como: Capra, Maturana e Morin, entre outros, assim como as ciências como um todo.

Atualmente identifica-se uma ampla discussão de tais conceitos com base em diferentes releituras desse paradigma, as quais podem representar armadilhas editoriais, na medida que alijam o entendimento dos sistemas complexos do seu íterim aplicado, seja na sua gênese histórica pelo binômio filosofia/ciência, ou em seus desdobramentos contemporâneos.

Dessa forma, esse trabalho objetiva o desdobramento desses conceitos num campo específico de aplicação, utilizando a reflexão pragmática empreendida pelos pesquisadores do caos de maneira aplicada, pois concorda-se aqui que seu enriquecimento e viabilidade estão na sua epistemologia (teoria e prática), muito mais que na repetição de termos consagrados sem o bem vindo esforço da *práxis*.

### **3.3. COMPLEXIDADE E ANÁLISE ESPACIAL**

A adaptação de conceitos referentes a sistemas complexos em diferentes campos do conhecimento tem rendido uma série de abordagens diferenciadas e produtivas, na medida em que discutem novas possibilidades de entendimento de diversos objetos de estudo de maneira integrada. Porém, muitos desses trabalhos contribuem através de um levantamento bibliográfico da ciência dos complexos, ou dos princípios do caos, não avançando numa possível conurbação de tais conceitos em suas áreas afins, privando-se do estudo de novas epistemologias, as quais só podem ser alcançadas de maneira aplicada.

No que se refere a análise espacial, entendida aqui como o campo teórico metodológico subjacente as disciplinas que lidam com o mapeamento das expressões morfológicas de diferentes fenômenos, essa tentativa de aproximação de conceitos desenvolvidos à partir do estudo de sistemas não-lineares ainda é incipiente, principalmente no que se refere a um dos seus principais desafios que é o da análise de sistemas ambientais.

### **3.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Bertalanffy, Ludwig. von. (1973). *Teoria geral dos sistemas*. Petrópolis: Vozes, 351p.
- Gleick, J. (1989). *Caos: a construção de uma nova ciência*. Lisboa: Gadiva, 420p.
- Gondolo, G. C. F. (1999). *Desafios de um sistema complexo à gestão ambiental: bacia do Guarapiranga, região metropolitana de São Paulo*. São Paulo: Annablume, 162p.
- Grebogi, C.; Ott, E., & Yorke, J. A. (1987). Chaos, strange attractors, and fractal basin boundaries in non-linear dynamics. *Science*, 238, 632-638. In: BAI-LIN, H. *CHAOS II*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., p. 256-262, 1990, 737p.
- Hénon, M. (1976). A two dimensional mapping with a strange attractor. *Communications in Mathematical Physics*. Springer-Verlag, 50, 69-77. In: BAI-LIN, H. *CHAOS II*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. p.235-243, 1990, 737p.
- Lorenz, E. N.. (1963). Deterministic non periodic flow. *Journal of the atmospheric Sciences*, v. 20, n.2, p. 130-141 In: BAI-LIN, H. *CHAOS II*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. p. 244-255, 1990, 737p.
- Mandelbrot, B. B. (1983). *The fractal geometry of Nature*. Nova Iorque: W. H. Freeman and Company, 458 p.

- May, R. M. (1976). Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, v. 261, 459-467. In: BAI-LIN, H. *CHAOS II*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. p. 151-159, 1990, 737p.
- Morin, E. (2002). *O método 1: a natureza da natureza*. Porto Alegre: Ed. Sulina, 479 p.
- Prigogine, I.; Stengers, I. (1984). *A nova aliança, a metamorfose da ciência*. Brasília: Editora UNB.
- Prigogine, I.; Stengers, I. (1997). *A nova aliança*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 3ª ed., 247 p.
- Shannon, C., & WEAVER, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. Urbana: University of Illinois Press.
- Shaw, R. S. *Strange Attractors, chaotic behavior, and information flow*. Z. (1981) *Naturforsch*, 36a, 80.
- Vicente, L. E., & Perez Filho, A. (2003). Abordagem Sistêmica e Geografia. *Revista de Geografia – UNESP Rio Claro*, 3(28): 323-344.

*“Muitas vezes a impressão que nos causa a vista da natureza, deve-se menos ao próprio caráter da região do que ao dia em que nos aparecem as montanhas e planuras aclaradas pelo azul transparente dos céus, ou veladas pelas nuvens que flutuam perto da superfície da terra. Do mesmo modo as descrições da natureza impressionam-nos tanto mais vivamente, quanto mais em harmonia com a nossa sensibilidade; porque o mundo físico se reflete no mais íntimo do nosso ser, em toda a sua verdade. Tudo quanto dá caráter individual a uma paisagem: contorno das montanhas que limitam o horizonte num longínquo indeciso, a escuridão dos bosques de pinheiros, a corrente que se escapa de entre as selvas e bate com estrépito nas rochas suspensas, cada uma dessas coisas tem existido, em todos os tempos, em misteriosas relações com a vida íntima do homem.”*

*Alexander Von Humboldt*