UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS ÁREA DE METALOGÊNESE

VENISSA DE SOUZA LIMA

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

Dissertação/Tese apresentada ao Instituto de Geociências como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

redação final da tese defendir por Venissa de Sousa Lima e aprovada pata Confesão Julgado em 25/03/2003

CAMPINAS - SÃO PAULO

UNICAMP BIBLIOTECA CENTRAL SEÇÃO CIRCULANTE

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DO IG - UNICAMP

Lima, Venissa Souza

L628a

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 / Venissa Souza Lima.- Campinas, SP.: [s.n.], 2003.

Orientador: Carlos Roberto de Souza Filho

Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Processamento Digital de Imagens. 2. Espectroscopia. I.Souza Filho, Carlos Roberto de. II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. III. Título.

The section of the se
UNIDADE DE
Nº CHAMADA TIUN CAMP
L 6280
ADDRESS OF THE PROPERTY OF THE
V FX
Martine and the second of the second second second
ming natings of 1988 and approximation of a
PROC. 16-124103
c 🖂
PREÇO RS4100
DATA 9722/03
Nº CPD

Bib id 305147



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS ÁREA DE METALOGÊNESE

VENISSA DE SOUZA LIMA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Roberto Souza Filho

Aprovada em: <u>25 / 65 / 2003</u>

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Carlos Roberto Souza Filho

Prof. Dr. Washington J. S. da Franca Rocha

Prof. Dr. Álvaro Penteado Crosta

(Presidente)

Campinas, 25 de agosto de 2003.

"Ainda que eu tenha o dom de profetizar e conheça todos os mistérios e toda ciência, ainda que eu tenha tamanha fé, a ponto de transportar montes, se não tiver amor, nada serei" Epístola de São Paulo aos Coríntios

Dedico esta dissertação aos meus amores: meus pais, irmãos e ao Ricardo.

Agradecimentos

Palavras não são suficientes para expressar tamanha gratidão que tenho por todos, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

- Agradeço a Deus, pois tudo posso naquele que me fortalece.
- ➤ A Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro.
- ➤ Ao professor Beto pela orientação, pelas atitudes e pelos ensinamentos passados ao longo desses dois anos e meio, na busca pelo conhecimento científico.
- Ao professor Washington pela ajuda sempre cordial em todos os momentos, e pelas amostras gentilmente cedidas.
- Aos membros da banca de qualificação: professores Álvaro e Élson pelas críticas sempre construtivas e pelas sugestões.
- Aos amigos Barata e Solange: "O encanto da vida depende unicamente das boas amizades que cultivamos." Malba Taham. Obrigada pela ajuda irrestrita, pelo compartilhamento das dificuldades e pelas palavras sempre cheias de otimismo.
- A todos os amigos do IG, em especial ao Mário, Diego e Porpeta que através das discussões científicas e do apoio em todos os momentos difíceis e nos desafios enfrentados, me incentivaram e ajudaram durante todas as etapas deste trabalho.
- A minha família que sempre esteve presente, apesar da distância, agradeço pelo incentivo, pelas palavras de carinho e conforto nas horas difíceis. Em especial vovó Mercedes e vovô Iraci pelo exemplo de vida.
- A Aninha (querida cunhada), por toda a amizade.

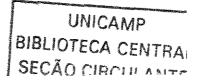
SUMÁRIO

D	edicatória		iv	
	Agradecimentos			
	Sumário			
	_	raselas		
	Resumo xvii			
A	bstract		xviii	
1.	1. CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO1			
	1.1. APR	ESENTAÇÃO	1	
	1.2. OBJJ	ETIVOS	3	
	1.3. ÁRE	A DE ESTUDO	3	
	1.3.1.	Vias de Acesso	3	
	1.4. BAS	E DE DADOS	5	
	1.4.1.	Dados Espectrais Coletados pelo Espectroradiômetro Fiedspec FR	5	
	1.4.2.	Imagens do sensor TM/Landsat – 5	6	
	1.4.3.	Imagens do sensor ASTER	6	
	1.5. MÉT	ODOS E ETAPAS DE TRABALHO	6	
2.	CAPÍTU	LO 2: CONTEXTO GEOLÓGICO E METALOGENÉTICO	9	
	2.1. INTR	RODUÇÃO	9	
	2.2. POSI	CIONAMENTO GEOTECTÔNICO	9	
	2.3. ESTF	RATIGRAFIA/GEOCRONOLOGIA – CHAPADA DIAMANTINA ORIEN	TAL11	
	2.3.1.	Grupo Paraguaçu	11	
	2.3.2.	Grupo Chapada Diamantina	12	
	2.3.3.	Grupo Una	12	
	2.3.4.	Coberturas Sedimentares Cenozóicas	16	
	2.4. DEFO	DRMAÇÃO E METAMORFISMO	16	
	2.5 ASPE	CTOS METALOGENÉTICOS	17	

	2.6. MINERALIZAÇÕES DA BACIA DE IRECÊ	18
	2.7. MINERALIZAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO	21
	2.8. PROCESSOS E MODELOS METALOGENÉTICOS	24
	2.8.1. Depósitos tipo SEDEX	24
	2.8.2. Depósitos do tipo Mississipi Valley	24
	2.9. FISIOGRAFIA DA BACIA DE IRECÊ	25
	2.9.1. Clima	25
	2.9.2. Hidrografia	25
	2.9.3. Aspectos Geomorfológicos	26
	2.9.4. Aspectos Pedológicos	27
	2.9.5. Vegetação	28
3.	CAPÍTULO 3: OS SENSORES THEMATIC MAPPER E ASTER & APLICAÇ EM ESTUDOS GEOLÓGICOS.	
	3.1. INTRODUÇÃO	29
	3.2. O PROGRAMA LANDSAT	31
	3.3. SENSOR ASTER - ADVANCED SPACEBORNE THERMAL EMISSION AND REFLECTION RADIOMETER	32
	3.4. APLICAÇÕES DE DADOS TM E ASTER EM ESTUDOS GEOLÓGICOS	36
	3.5. LIMITAÇÕES AO USO DE SENSORES REMOTOS NO MAPEAMENTO DE GOSSANS	38
4.	CAPÍTULO 4: CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE GOSSANS ASSOCIAD MINERALIZAÇÕES DE Pb-Zn-Ba NA BACIA DE IRECÊ (BA) ATRAVÉS ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA	S DE
	4.1. INTRODUÇÃO	39
	4.2. GOSSANS	40
	4.2.1. Aspectos macroscópicos	40
	4.2.2. Caracterização Mineralógica	41

	4.3. FUN	DAMENTAÇÃO TEÓRICA	41
	4.3.1.	Interação da radiação eletromagnética com minerais e rochas	42
	4.3.2.	Origem das feições espectrais	42
	4.3.3.	Espectroscopia de Reflectância	43
	4.3.4.	Fatores que afetam as determinações espectrais	44
	4.3.5.	Feições Espectrais Diagnósticas de Materiais Geológicos	45
	4.4. MAT	ERIAIS E MÉTODOS	46
	4.4.1.	Medidas Espectrais com o Espectrômetro FieldSpec Full Resolution - Parâmetros	
	4.4.2.	Classificação Espectro-Mineralógica	
	4.5. RESU	JLTADOS	51
	4.5.1.	Amostra Lapão Fazenda Ritmo	51
	4.5.2.	Amostra Irecê	53
	4.5.3.	Amostra Lapão 1	55
	4.5.4.	Amostra Lapão 2	58
	4.5.5.	Amostra Lapão 3	60
	4.6. DISC	USSÃO DOS RESULTADOS	62
		LARIDADES ESPECTRAIS DE GOSSANS E SUPERFÍCIES LATERÍTICAS ÉRICAS	64
5.	MINERA	LO 5: MAPEAMENTO DE GOSSANS ASSOCIADOS LIZAÇÕES DE Pb-Zn-Ba NA BACIA DE IRECÊ (BA) UTILIZANI DE SENSORIAMENTO REMOTO NO ESPECTRO REFLETIDO	
	5.1. INTR	ODUÇÃO	66
	5.2. ESTR	ATÉGIA DE PROCESSAMENTO DIGITAL	66
	5.3. PRÉ-l	PROCESSAMENTO	69
	5.3.1.	Correção Atmosférica	69
	532	Correção Geométrica	77

	5.4. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS - VNIR e SWIR	77
	5.4.1. Composições Coloridas	78
	5.4.2. Operações Aritméticas	84
	5.4.2.1. Razão de Bandas	84
	5.4.3. Análise por Principais Componentes	90
	5.5. DISCUSSÃO	101
	5.6. CLASSIFICAÇÃO ESPECTRAL	109
	5.6.1. INTRODUÇÃO	109
	5.6.2. ETAPAS DE PROCESSAMENTO	109
	5.6.2.1. Minimum Noise Fraction	110
	5.6.2.2. Índice de Pureza dos Pixels	110
	5.6.2.3. Spectral Angle Mapper (SAM)	111
	5.6.2.4. Mixture Tuned Matched filtering (MTMF)	113
6.	CAPÍTULO 6: MAPEAMENTO DE GOSSANS NA BACIA DE IRECÊ UTILIZANDO IMAGENS TERMAIS MULTIESPECTRAIS DO SENSOR ASTI	
	6.1. INTRODUÇÃO	115
	6.2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	116
	6.3. ESPECTROSCOPIA DE MINERAIS NO INFRAVERMELHO TERMAL	117
	6.4. IMAGENS MULTIESPECTRAIS TERMAIS DO SENSOR ASTER	120
	6.5. ESTRATÉGIA DE PROCESSAMENTO DIGITAL	121
	6.6. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS - TIR	123
	6.6.1. Composições Coloridas e Realce por Decorrelação	125
	6.6.2. Razões de bandas e Pseudo razões adapatadas	127
	6.6.3. Classificação Espectral	133
	6.7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	136



LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 -	Mapa de localização e principais vias de acesso à área de estudo 4
Figura 1.2 -	Espectrorradiômetro FieldSpec – FR
Figura 1.3 -	Fluxograma dos métodos e etapas realizadas no trabalho
Figura 2.1 -	O Cráton do São Francisco (Modificado de Alkmim, Brito Neves e Castro Alves 1993; Dominguez 1993)
Figura 2.2 -	Coluna estratigráfica da região da Chapada Diamantina (Modificada de Souza <i>et al.</i> 1993)
Figura 2.3 -	Mapa geológico da Bacia de Irecê (Misi 1979)
Figura 2.4 -	Coluna estratigráfica da Formação Salitre (Modificada de CBPM 2000) 15
 Figura 2.5 -	Mapa geológico e de distribuição espacial das mineralizações de Pb e Zb da área de estudo
Figura 3.1 -	Correlação entre as bandas dos sensores TM e ASTER, e seus principais intervalos espectrais(Modificado de Abrams <i>et al.</i> 2003)
Figura 4.1 -	Método da 'diferença do contínuo' testados para a extração das bandas de absorção (Modificado de Pontual <i>et al.</i> 1997)
Figura 4.2 -	Feições espectrais da Curva de reflectância da amostra Fazenda Ritmo extraídas pelo método da diferença do contínuo. Espectros de limonita, goethita tipo-3 e goethita tipo-4 da biblioteca de referência
Figura 4.3 -	Feições espectrais da Curva de reflectância da amostra Fazenda Ritmo extraídas pelo método da reflectância absoluta. Espectros de limonita, goethita tipo-3 e goethita tipo-4 da biblioteca de referência
Figura 4.4 -	Classificação espectro-mineralógica da curva de reflectância espectral da amostra Fazenda Ritmo, baseada no método de desmistura espectral
Figura 4.5 -	Proporções minerais obtidas para a amostra Fazenda Ritmo
Figura 4.6 -	Feições espectrais da Curva de reflectância da amostra Irecê extraídas pelo método da diferença do contínuo. Espectros de goethita tipo-3 e hematita tipo-2 da biblioteca de referência
Figura 4.7 -	Classificação espectro-mineralógica da curva de reflectância espectral da amostra Irecê, baseada no método de desmistura espectral
Figura 4.8 -	Proporções minerais obtidas para a amostra Irecê
Figura 4.9 -	Feições espectrais da Curva de reflectância da amostra Lapão 1 extraídas pelo método da diferença do contínuo. Espectros de limonita, goethita tipo-4 e hematita tipo-2 da biblioteca de referência
Figura 4.10 -	Feições espectrais da Curva de reflectância da amostra Lapão 1 extraídas pelo método da reflectância absoluta. Espectros de limonita, goethita tipo-4 e hematita tipo-2 da biblioteca de referência

Figura 4.11 -	Classificação espectro-mineralógica da curva de reflectância espectral da amostra Lapão 1, baseada no método de desmistura espectral
Figura 4.12 -	Proporções minerais obtidas para a amostra Lapão 1
Figura 4.13 -	Feições espectrais da Curva de reflectância da amostra Lapão 2 extraídas pelo método da diferença do contínuo. Espectros de limonita, goethita tipo-3 e goethita tipo-4 da biblioteca de referência
Figura 4.14 -	Feições espectrais da Curva de reflectância da amostra Lapão 2 extraídas pelo método da reflectância absoluta .Espectros de limonita, goethita tipo-3 e goethita tipo-4 da biblioteca de referência
Figura 4.15 -	Classificação espectro-mineralógica da curva de reflectância espectral da amostra Lapão 2, baseada no método de desmistura espectral
Figura 4.16 -	Proporções minerais obtidas par a amostra Lapão 2
Figura 4.17 -	Feições espectrais da Curva de reflectância da amostra Lapão 3 extraídas pelo método da reflectância absoluta .Espectros de limonita, goethita tipo-3, goethita tipo-4 e hematita tipo-2 da biblioteca de referência
Figura 4.18 -	Classificação espectro-mineralógica da curva de reflectância espectral da amostra Lapão 3, baseada no método de desmistura espectral
Figura 4.19 -	Proporções minerais obtidas par a amostra Lapão 3
Figura 4.20 -	Comparação entre as curvas espectrais das amostras de gossans da Bacia de Irecê.
Figura 4.21 -	Comparação entre amostras de gossans e lateritas genéricas
Figura 5.1 -	Curvas de reflectância espectral dos gossans coletados no campo medidas no FieldSpec FR. (b) Curvas re-amostradas para a resolução espectral do sensor TM . (c) curvas reamostradas para a resolução espectral do sensor ASTER 67
Figura 5.2 -	(a) Média das curvas de reflectância espectral dos gossans coletados no campo medidas no FieldSpec FR. (b) Média da curvas reamostradas para a resolução espectral do sensor TM. (c) Média da curvas re-amostradas para a resolução espectral do sensor ASTER
Figura 5.3 -	(a) Espectro de transmistância da atmosfera considerando o efeito de diferentes quantidades de vapor d'água. (b) Espectro de transmitância da atmosfera e efeitos causados pela absorção da radiação. (c) Espectro da radiância espalhada por partículas atmosféricas (d) Espectro da irradiação solar exo-atmosférica. (e) Radiação total que chega ao sensor na forma de energia refletida por um alvo terrestre, após sofrer os efeitos atmosféricos (adaptado de ACORN, 2002)71
Figura 5.4 -	Métodos e comparações de correções atmosféricas
Figura 5.5 -	Fluxograma do processamento digital das imagens ASTER e TM
Figura 5.6 -	Composição colorida TM541 (RGB)
Figura 5.7 -	Composição colorida TM431 (RGB)
Figura 5 8 -	Composição colorida TM321 (RGB) 81

Figura 5.9 -	Composição colorida AST721 (RGB)
Figura 5.10 -	Composição colorida AST971 (RGB)
Figura 5.11-	Composição colorida AST211 (RGB)
Figura 5.12 -	Gradientes representando os contrastes espectrais para o mapeamento da goethita
Figura 5.13 -	Razão TM3 / TM2
Figura 5.14 -	Composição colorida das razões TM3/TM2, TM5/TM2 e TM4/TM387
Figura 5.15 -	Razão AST7 / AST1
Figura 5.16 -	Composição colorida das razões AST7/AST1, AST3/AST2 e AST4/AST6 (RGB)
Figura 5.17 -	PC4 das bandas TM 2345 (imagem Fe)
Figura 5.18 -	Composição colorida Hy, Hy+Fe, Fe (RGB), obtida com a aplicação da Técnica Crosta aos dados TM
Figura 5.19 -	PC2 das bandas AST 1479 (imagem 'Fe')
Figura 5.20 -	Composição colorida Hy, Hy+Fe, Fe (RGB) obtida com a aplicação da Técnica Crosta adaptada aos dados ASTER
Figura 5.21 -	Composição colorida das PCs 4, 6 e 3, derivadas dos dados TM, para realce dos gossans presentes na área de estudo
Figura 5.22 -	Composição colorida das PCs 5, 4 e 3, derivadas dos dados ASTER, para realce dos gossans presentes na área de estudo
Figura 5.23 -	(a) – Curvas de reflectância espectral do falso gossan. (b) Curva reamostrada para a resolução espectral do sensor TM (c) Curva re-amostrada para a resolução espectral do sensor ASTER
Figura 5.24 -	Imagem de abundância (pseudocor) de óxidos/hidróxidos de ferro obtida a partir do processamento de dados ASTER
Figura 5.25 -	Imagem de abundância (pseudocor) de caulinita obtida a partir do processamento de dados ASTER
Figura 5.26 -	(a) Imagem falsa-cor ilustrando as superfícies ricas em (i) óxidos/hidróxidos de ferro e caulinita (b) mesma imagem, sobreposta a banda AST3107
Figura 5.27 -	Modelo digital do terreno
Figura 5.28 -	Gráfico dos auto-valores versus bandas transformadas pelo MNF 110
Figura 5.29 -	Imagem composta por duas bandas representada no espaço bidimensional112
Figura 5.30 -	Resultado da técnica SAM e MTMF
Figura 5.31 -	Diagrama de dispersão bidimensional (MF Score x Improbabilidade) 114
Figura 61 -	Estimativa de emissividade para o quartzo.

Figura 6.2 -	(a)Espectros de reflectância bicônica de quartzo e caulinita (Salisbury et al. 1991) (b) convertidos para emissividade utilizando a lei de Kirchhoff (b) 119
Figura 6.3 -	Assinaturas espectrais/emissividade dos principais minerais formadores de coberturas na Bcaia de Irecê: quartzo (a), caulinita (argilo-minerais) (b), goethita (c), carbonatos (d)
Figura 6.4 -	Espectros de emissividade do quartzo, caulinitas, carbonatos e goethita re- amostrados para a resolução espectral do sensor ASTER
Figura 6.5 -	Espectros de emissividade (quartzo, caulinita, calcita e goethita), extraídos da biblioteca JHP e re-amostrados para a resolução espectral do sensor ASTER
Figura 6.6 -	Ilustração dos complexos ruídos presentes nas bandas termais do ASTER da área de estudo
 Figura 6.7 -	(a) Composição colorida falsa cor das bandas AST13, AST12, AST10 em RGB.(b) Resultado da aplicação do realce por decorrelação ao triplete
Figura 6.8 -	Curvas de emissividade do quartzo, caulinita e misturas entre quartzo/caulinita na resolução espectral do sensor ASTER
Figura 6.9 -	(a) Composição colorida AST2, AST1, AST1 (RGB) (b) Resultado obtido com a técnica de pseudo-razão aplicada as bandas AST13 e AST14
Figura 6.10 -	Resultado obtido com a técnica de pseudo-razão aplicada as bandas AST11 e AST12, visando a detecção de sílica (quartzo), separadamente de argilo-minerais (caulinita)
Figura 6.11 -	Resultado obtido com a técnica de pseudo-razão aplicada às bandas AST13 e AST10, visando a detecção de caulinita e sílica
Figura 6.12 -	Componentes resultantes da transformação MNF
Figura 6.13 -	(a) Espectros de emissividade do quartzo, caulinita e carbonatos (b) Composição colorida das três bandas derivadas da transformação MNF - MNFb, MNFc, MNFa
Figura 6.14 -	Resultados da classificação espectral via SAMe MTMF, para o endmember quartzo.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Correlação das litofácies da formação Salitre, seus ciclos e ambiente de sedimentação encontradas na área de estudo, segundo Misi (1979) e Bomfim <i>et al</i> . (1985)
Tabela 2.2 -	fases de deformação reconhecidas na área, de acordo com Souza <i>et al.</i> (1993), Bomfim <i>et al.</i> (1995) e Chemale <u>et al.</u> (1991)
Tabela 2.3 -	Principais ocorrências minerais da Bacia de Irecê (Franca Rocha 2001) 20
Tabela 3.1 -	Principais características dos satélites do programa LANDSAT32
Tabela 3.2 -	Resoluções espectral, espacial e radiométrica do sensor LANDSAT-5 32
Tabela 3.3 -	Resoluções espectral, espacial e radiométrica do sensor ASTER34
Tabela 4.1 -	Localização das bandas de absorção diagnósticas dos principais óxidos e hidróxidos de ferro
Tabela 4.2 -	Localização das bandas de absorção diagnósticas dos íons OH, CO, H2O.45.
Tabela 4.3 -	Principais feições de absorção dos silicatos, carbonatos, óxidos/hidróxidos, hidroxila no infravermelho termal
Tabela 4.4 -	Principais caracterísiticas dos minerais selecionados para compor a biblioteca espectral específica
Tabela 5.1 -	Principais feições espectrais obtidas para a curva espectral média dos gossans na resolução espectral dos sensores ASTER e TM
Tabela 5.2 -	Matriz de correlação para as bandas TM (VNIR-SWIR)79
Tabela 5.3 -	Matriz de correlação para as bandas ASTER (VNIR-SWIR)79
Tabela 5.4-	Tripletes em RGB e coloração teórica para os gossans nas imagens TM e ASTER 80
Tabela 5.5 -	Razões de bandas propostas para o realce de superfícies ricas em ferro 85
Tabela 5.6 -	Composições coloridas envolvendo razões de bandas descritas na literatura86
Tabela 5.7 -	Autovetores obtidos para as bandas TM234594
Tabela 5.8 -	Autovetores obtidos para as bandas TM145794
Tabela 5.9 -	Autovetores obtidos as bandas AST1479
Tabela 5.10 -	Autovetores obtidos para as bandas AST134696
Tabela 5.11 -	Estatística expressa em auto-vetores para as bandas do sensor TM 98
Tabela 5.12 -	Estatística expressa em porcentagens para as bandas do sensor TM 99
Tabela 5.13 -	Estatística expressa em auto-vetores para as bandas do sensor ASTER 100
Tabela 5.14 -	Estatística expressa em porcentagens para as bandas do sensor ASTER 100

Tabela 5.15 -	Autovetores obtidos por principais componentes para as bandas AST147	` /
Tabela 5.16 -	Autovetores obtidos por principais componentes para as bandas (caulinita)	AST1467
Tabela 5.17 -	Etapas para a aplicação da técnica SAM e MTMF	109
Tabela 6.1 -	Matriz de correlação para as bandas termais do sensor ASTER	118

xvi



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS/ INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS ÁREA DE METALOGÊNESE

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

RESUMO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Venissa de Souza Lima

O objetivo desta dissertação foi o de desenvolver estratégias para a detecção de gossans associados a mineralizações de Pb-Zn-Ba na bacia de Irecê, bem como a sua separação de superficies lateríticas genéricas, com base em dados e técnicas de sensoriamento remoto. Amostras de gossans representativas das ocorrências de gossans na bacia foram analisadas por espectroscopia de reflectância, no intervalo entre 350nm-2500nm, com o espectrorradiômetro FieldSpec-FR. Os constituintes mineralógicos dos gossans, principalmente goethita, limonita e hematita, foram derivados a partir da interpretação interativa e automática das curvas de reflectância espectral, considerando as feições diagnósticas que esses minerais apresentam neste intervalo do espectro. Com base em dados disponíveis na literatura, integrados aos dados de reflectância espectral medidos em laboratório e re-amostrados para as resoluções dos sensores TM e ASTER, o comportamento espectral dos gossans genuínos e de superfícies lateríticas genéricas (falsos gossans) foram detectados nas bandas destes sensores. A partir desses dados espectrais, constatou-se que os gossans e lateritas diferem principalmente em função de uma feição de absorção em 2,2 μm (diagnóstica da ocorrência de caulinita) e de uma feição em torno de 10 um (relacionada à presenca de uma mistura de caulinita e sílica) — essas feições/minerais são característicos nas lateritas e ausentes nos gossans. Os principais intervalos espectrais abordados no processamento dos dados ASTER e TM para a detecção e separabilidade desses dois materiais foram assim definidos: 0,350-1,00 µm, cobrindo o espectro visível (VIS) e infravermelho próximo (NIR) para o mapeamento dos óxidos e hidróxidos de ferro: 1,00-2,50µm, cobrindo o espectro do infravermelho de ondas curtas (SWIR) para o mapeamento de caulinita; e 8,00-14,00µm, cobrindo o espectro infravermelho termal (TIR), para o mapeamento de superfícies ricas em caulinita e sílica (somente possível com dados ASTER). A detecção dos gossans, segundo o modelo concebido, foi feita por um critério de exclusão, ou seja, as superficies ricas em compostos de ferro somente, sem conteúdo significativo em caulinita e quartzo (típicos nas lateritas), devem corresponder aos gossans associado à mineralizações. O processamento das imagens adquiridas entre VIS e o SWIR incluiu um rigoroso procedimento de correção atmosférica a partir do software Atmospheric CORrection Now (ACORN). Foi utilizado, um modelo de transferência radiativa (MODTRAN) e dados calibrados dos sensores sob investigação. Para os dados coletados no espectro refletido foram testadas técnicas como composições coloridas e operações aritméticas (razão de bandas), análises por principais componentes (APC) e técnicas de processamento digital de dados hiperespectrais adaptadas aos dados multiespectrais, incluindo Spectral Angle Mapper (SAM) e Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF). Os dados TIR do ASTER foram convertidos para emissividade e processados através de composições coloridas com realce por decorrelação, pseudo-razões adaptadas, Minimum Noise Fraction e técnicas de classificação hiperespectral (SAM e MTMF). Os resultados obtidos, aliando-se os modelos empíricos de detecção às técnicas de processamento digital, foram extremamente positivos, principalmente no caso das imagens do sensor ASTER, nas quais os gossans genuínos puderam ser separados de todas as outras coberturas constatadas na bacia de Irecê. Isso demonstra o potencial do sensor ASTER para aplicações em exploração mineral, mesmo em condições de clima tropical.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS/ INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS ÁREA DE METALOGÊNESE

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

ABSTRACT

MASTER DISSERTATION

Venissa de Souza Lima

The aim of this work was to develop strategies for detection of gossans associated to Pb-Zn-Ba deposits in the Irece basin (BA), as well as their distinction from generic laterites, using remote sensing data and techniques. Samples of gossans collected in the study area were analysed by reflectance spectroscopy methods, using a high resolution FieldSpec FR spectrometer covering nanometric wavebands within the 350nm-2500nm interval. Goethite, limonite and hematite were identified by interactive and software-driven automatic interpretation as the gossan's main minerals, based on their diagnostic spectral features. Using data available in the literature combined with labmeasured reflectance data convolved to TM and ASTER sensors, it was possible to realize a spectral signature for both genuine and false gossans in terms of multispectral resolution. Using these data, gossans are clearly distinct from laterites by the lack of absorption bands around 2.2µm (linked to the presence of kaolinite) and by the lack of important emissivity features around 10 µm (akin to a mixture of kaolinite and silica). Using this notion, the main spectral intervals employed to detect and differentiate these two materials were defined as followed: 0,350-1,00µm, covering visible (VIS) and near-infrared (NIR) wavebands, to detect iron oxides and hydroxides; 1,00-2,50 µm, covering shortwave infrared (SWIR) wavebands to map kaolinites; and 8,00-14,00µm, covering the thermal infrared (TIR) to map kaolinite- and -silica-rich surfaces (only possible with ASTER thermal multispectral data). The detection of gossans, on the basis of the conceptual model, was made by 'exclusion' of variables not typically linked to these surfaces, using the following corollary: "iron-rich surfaces that are deficient in kaolinite and silica loads (typical of laterites), are probably genuine gossans, to which metal deposits are also potentially linked". Image processing techniques applied to data gathered in the VIS, NIR and SWIR portion of the spectrum comprised a rigorous procedure for atmospheric correction of the data using the Atmospheric CORrection Now (ACORN) software. A radiative transfer model (MODTRAN) was applied to ASTER and TM calibrated data. Several image processing techniques were functional for the VIS-SWIR data, including color composites, band ratios, principal component analyses and hyperspectral image processing techniques adapted to multispectral data, such as Spectral Angle Mapper (SAM) and Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF). ASTER TIR data were converted to emissivity and enhanced via color composites, decorrelation stretch, adapted pseudo-ratios, Minimum Noise Fraction and by hyperspectral image processing (SAM e MTMF) techniques. The integration of the conceptual model and image processing techniques tailored to detect genuine gossans, isolating them from other representative surfaces in the Irece basin, proved very successful and the results were substantial using ASTER imagery. These achievements using ASTER multispectral data in the Irece basin demonstrate these data can offer detailed mineralogical information, from which abundance maps of key mineral endmembers used in exploration for base-metal deposits can be derived, even under tropical conditions.

1.1 – APRESENTAÇÃO

O uso de sensores remotos em Geologia, desde o lançamento da primeira plataforma Landsat em 1972, tem gerado resultados importantes no que tange à identificação e mapeamento de diferentes tipos de rochas e minerais associados a múltiplas categorias de depósitos metálicos.

Vários sensores/plataformas orbitais, multiespectrais (< 10 bandas no espectro óptico, de largura micrométrica) são utilizados em exploração mineral. Dentre estes, destacam-se o Thematic Mapper (TM)/Landsat-5, o JERS-1 (Japan Earth Resources Satellite-1 - inativo), o Enhanced Thematic Mapper (ETM+)/Landsat-7 e, em menor escala, os sensores a bordo dos satélites da série SPOT (Drury 2001). Uma outra categoria de sensores, os espectrômetros imageadores (também conhecidos como sensores hiperespectrais), coletam dados em centenas de bandas espectrais muito estreitas, da ordem de nanômetros, entre as regiões do espectro óptico visível (VIS), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR). Esses sensores são utilizados com freqüência e sucesso na discriminação de minerais de alteração hidrotermal relacionados a depósitos metálicos (Clark et al 1990). Entre os espectrômetros imageadores, o sensor experimental aeroportado AVIRIS (Airborne Visual and Infra-Red Imaging Spectrometer), com 224 bandas espectrais no espectro refletido, é o que mais se destacou até hoje em aplicações geológicas desta natureza (Clark et al. 1990). Além do AVIRIS, existem ainda diversos espectrômetros imageadores aeroportados comerciais, de configuração similar, entre os quais podem ser citados os sensores AISA, CASI, DLR-DAIS7915, DLR-HYDICE, AAHIS, ROSIS, HYMAP, SEBASS, SHARP, LASH, entre (http://www.techexpo.com/WWW/opto-knowledge/IS resources.html). A partir de Novembro de 2000, com o lançamento do satélite Earth Observation-1 (EO-1) da NASA, imagens hiperespectrais (220 bandas no espectro refletido) passaram a ser obtidas, pela primeira vez na história ao nível orbital, pelo sensor Hyperion, com resultados preliminares já extremamente favoráveis em aplicações geológicas (http://eo1.gsfc.nasa.gov/).

Há numerosos trabalhos na literatura que reportam a utilização de toda essa gama de dados multiespectrais e hiperespectrais em exploração mineral e mapeamento geológico. Por exemplo:

- Spatz & Taranik (1988), discriminaram rochas vulcânicas associadas a depósitos de metais preciosos, usando dados do sensor TM/Landsat-5.
- Souza Filho & Drury (1998), mapearam rochas ofiolíticas, com potencial em platinóides, utilizando dados dos sensores JERS-1 e TM, no noroeste da África.
- Crósta *et al.* (1998), mapearam diversos minerais de alteração hidrotermal associados a depósitos de metais preciosos no distrito de Bodie, Califórnia, com dados do sensor AVIRIS.

Com o lançamento do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer*), em Dezembro de 1999, a bordo do satélite Terra, uma nova e promissora fase foi iniciada no sensoriamento remoto orbital de recursos terrestres. O sensor ASTER possui uma especificação diferenciada entre os clássicos sensores multiespectrais. Muitos materiais geológicos (e.g., gossans, argilo-minerais, carbonatos), de importância em exploração mineral, potencialmente podem ser detectados e diferenciados entre os comprimentos de onda cobertos pelas bandas deste sensor (Abrams 2000).

O mapeamento de gossans associados a mineralizações metálicas através de sensores remotos imageadores é um assunto que vem sendo abordado pela comunidade geológica desde a concepção do primeiro sensor multiespectral de recursos terrestres, o MultiSpectral Scanner (MSS). Várias técnicas de processamento de imagens têm sido testadas, buscando o mapeamento dessas coberturas (e.g., Crósta & Moore 1989). No entanto, muitas das técnicas propostas ainda apresentam limitações para mapear inequivocadamente a ocorrência de gossans genuínos e, adicionalmente, de gerar produtos que possam servir como uma base interpretável para o mapeamento geológico (Souza Filho & Drury 1997).

Ainda sobre a cartografia desses materiais geológicos por sensores remotos, questões básicas como vantagens e desvantagens do uso das faixas azul (0,38μm-0,5μm) e do infravermelho de ondas curtas (2,0-2,4μm) do espectro eletromagnético, ainda não foram respondidas. Assim, mesmo, a nova geração de sensores imageadores utilizam essas faixas do espectro de forma 'ambígua' - alguns sensores ainda utilizam a faixa do azul, mas não cobrem o intervalo 2,35μm – 2,40μm (e.g., *ETM*+), enquanto outros não imageam no azul, mas cobrem o extremo do infravermelho de ondas curtas (ASTER).

Com os crescentes avanços tecnológicos na área de sensoriamento remoto, como é o caso do sensor ASTER, e com surgimento de novas técnicas para o processamento de imagens de mais alta resolução espacial e espectral, problemas até então enfrentados no mapeamento remoto

de minerais talvez possam ser melhor equacionados. O sensor ASTER representa uma importante fonte de dados para atividades exploratórias, principalmente em função da disponibilidade de várias bandas no SWIR e no infravermelho termal. Essas bandas devem, a princípio, fornecer informações sobre a mineralogia associada aos depósitos minerais, além de permitirem uma análise mais precisa de estruturas, tais como lineamentos e falhamentos, também freqüentemente associados a mineralizações.

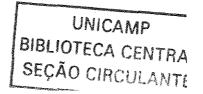
1.2 – OBJETIVOS

Este trabalho objetivou analisar, a partir de dados de espectroscopia de reflectância e dados dos sensores TM e ASTER, as assinaturas espectrais de superficies ricas em óxidos e hidróxidos de ferro relacionadas à ocorrência de mineralizações de chumbo, zinco e barita (gossans genuínos) na Bacia de Irecê-BA, buscando o desenvolvimento de estratégias para a detecção e discriminação desses materiais geológicos, de outros com assinatura espectral semelhante. A pesquisa teve também como objetivo testar e comparar o real potencial dos sensores TM e ASTER para o mapeamento remoto dessas superfícies e, desta forma, definir as técnicas de processamento digital de imagens que melhor identifiquem gossans associados a mineralizações de Pb, Zn e Ba na área de estudo. Ressalta-se que, além das bandas do VIS, NIR e SWIR, também foram investigadas, neste trabalho, as bandas termais do sensor ASTER, com o objetivo adicional de avaliar, aprimorar e difundir a aplicação destes dados para uso em aplicações geológicas.

1.3 – ÁREA DE ESTUDO

1.3.1- Vias de Acesso

A área de estudo localiza-se na Bacia Sedimentar de Irecê, aos arredores da cidade de Cafarnaum, região centro norte do estado da Bahia. O acesso à área pode ser feito pelas rodovias BA – 052 ou BR- 330 (Figura 1.1).



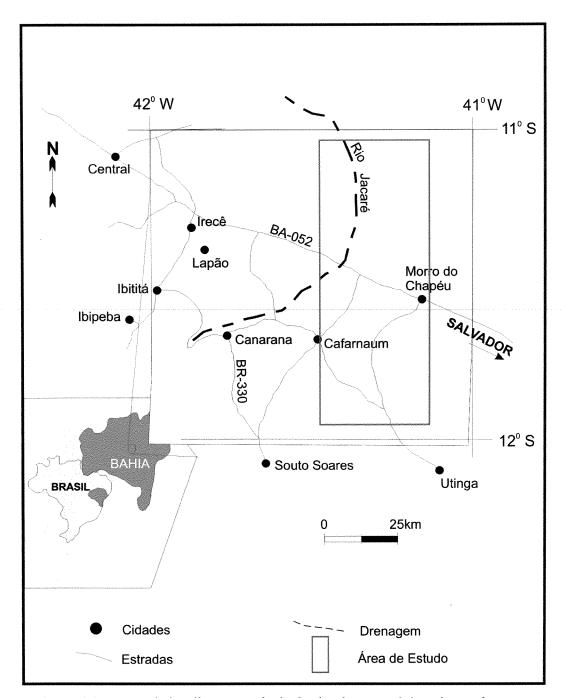


Figura 1.1 – Mapa de localização e principais vias de acesso à área de estudo

1.4 - BASE DE DADOS

A base de dados utilizada neste trabalho foi a seguinte:

1.4.1 – Dados Espectrais Coletados pelo Espectroradiômetro Fiedspec FR

O estudo de espectroscopia de reflectância foi realizado por meio do espectroradiômetro portátil FieldSpec Full Resolution, fabricado pela Analytical spectral Devices Inc., o qual pertence ao Laboratório de Espectroscopia de Reflectância do Instituto de Geociências da Unicamp.

Este aparelho contém um total de 3 detectores independentes, os quais cobrem o intervalo de 0,35μm (350nm) a 2,50μm (2500nm) do espectro eletromagnético. O primeiro detector é formado por um arranjo de fotodiodo de silício contendo 512 elementos e cobre o intervalo de 0,35μm a 1,00μm. Os outros dois detectores correspondem a scanners de alta velocidade de InGaAS, termoeletricamente refriados, e cobrem o intervalo de 1,00μm a 2,5μm.

A captação da radiação eletromagnética do material alvo se dá por meio de um cabo de fibra ótica, com comprimento de 1,2 m, utilizando frentes óticas, cada qual com lentes específicas (1°, 5° e 18°), o que permite a definição do campo de visada instantânea ou o tamanho da área de leitura dos espectros na amostra. O armazenamento e processamento dos dados foram realizados por meio de um computador Notebook e de um software controlador (FR), o qual transforma os espectros obtidos por cada detector, em uma curva contínua de 0,35 a 2,50 µm (Figura 1.2).

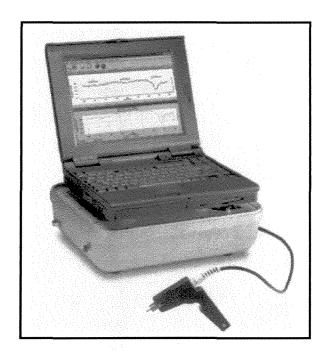


Figura 1.2- Espectrorradiômetro FieldSpec - FR

1.4.2 - Imagens do sensor Thematic Mapper

A imagem do sensor Thematic Mapper (TM), a bordo do satélite Landsat-5, utilizada neste trabalho, foi adquirida em 25 de agosto de 1998. O TM é um escaner de varredura do tipo 'across-track ' (whisk-broom), que capta radiação eletromagnética em 7 bandas espectrais individuais, com uma resolução espacial de 30m.

1.4.3 - Imagens do sensor ASTER

As imagens do sensor **ASTER** utilizadas neste estudo foram adquiridas em 30 de outubro de 2001. A bordo do satélite Terra, lançado em dezembro de 1999 como parte do *Earth Observing System* (EOS) da NASA, o ASTER é constituído por três sub-sistemas de imageamento independentes, os quais coletam dados em várias porções do espectro eletromagnético: a região do espectro VIS e NIR é coberta com 3 bandas espectrais, na resolução espacial de 15m; a região do espectro SWIR com 6 bandas, na resolução de 30m; e a região do espectro infravermelho termal (TIR) com 5 bandas, na resolução de 90m. Adicionalmente, o sistema VIS-NIR do ASTER conta com dois telescópios, um dos quais opera com retro-visada ao longo da órbita do satélite (com poucos segundos de diferença da visada NADIR), permitindo a geração de pares estereoscópicos, em comprimentos de onda do NIR.

1.5 - MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO

O cumprimento dos objetivos do projeto dependeu da integração dos dados obtidos em cada uma das seguintes etapas:

- ⇒ Levantamento bibliográfico visando a compilação das principais características geológicas de gossans associados a mineralizações de chumbo, zinco e bário, na área de estudo.
- ➡ Mensuração espectral das amostras de gossans coletadas na área de estudo (gentilmente cedidas pelo Prof. Washington Franca-Rocha, da UEFS-BA), para a definição da assinatura espectral desses materiais. Nesta etapa foram realizadas, em média, 30 medidas para cada amostra, e selecionadas as curvas espectrais representativas da variação espectral e mineralógica dos gossans da área.
- ⇒ Reamostragem das curvas de reflectância espectral dos gossans para a resolução espectral dos sensores TM e ASTER, e posterior caracterização dos principais intervalos espectrais onde tais características são detectáveis por sensoriamento remoto.

- ⇒ Processamento digital das imagens para a identificação das assinaturas espectrais típicas dos gossans. O processamento das imagens incluiu a aplicação de técnicas convencionais (composições coloridas, razões de bandas e análise por principais componentes), e técnicas de processamento de dados hiperespectrais, adaptadas aos dados multiespectrais sob investigação.
- ⇒ Interpretação e avaliação dos resultados. Nesta etapa foi feita a análise dos resultados e uma avaliação do real potencial dos sensores ASTER e TM na discriminação dos gossans.
- O fluxograma da Figura 1.3 sintetiza os principais métodos e etapas realizadas no trabalho.

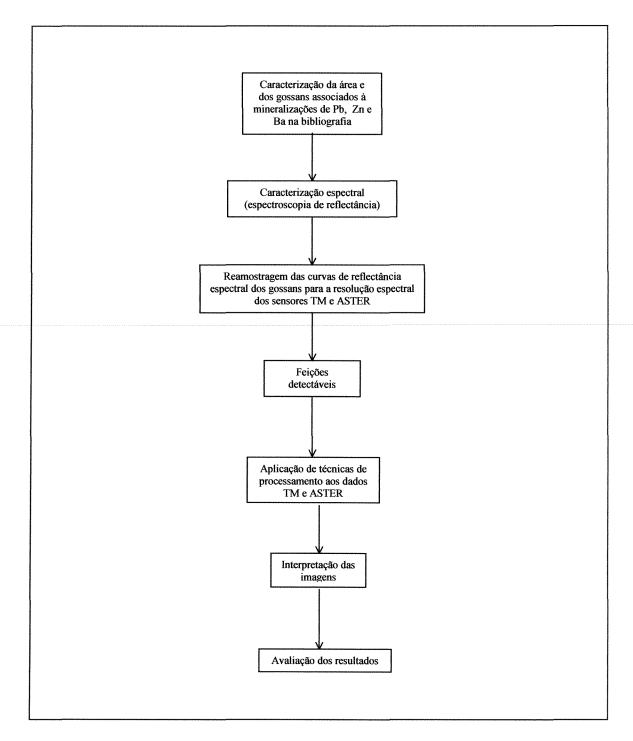


Figura 1.3 - Fluxograma dos métodos e etapas realizadas durante essa pesquisa.

2.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como enfoque a geologia, aspectos tectônicos e metalogenéticos das mineralizações presentes na área de estudo.

A maior parte do conhecimento geológico da região, principalmente no que diz respeito à sedimentologia e a estratigrafia, foi adquirido por meio de estudos sistemáticos realizados a partir de 1970. Entre estes estudos, destacam-se o projeto Letos (DNPM/CPRM/PROSPEC 1975 apud. Lagoeiro 1990), o mapeamento executado pela comissão da Carta Geológica do Brasil ao milionésimo (Bruni *et al.* 1976), o projeto Bahia-Bahia II- Sul da Bahia (Mascarenhas *et al.* 1979) e o projeto RadamBrasil.

2.2 - POSICIONAMENTO GEOTECTÔNICO

A área investigada nesta dissertação faz parte da Bacia de Irecê, localizada no Cráton São Francisco, e compreende as unidades sedimentares do Supergrupo São Francisco, no domínio geomorfológico e geotectônico da Chapada Diamantina Oriental (Inda & Barbosa 1978) (Figura 2.1).

O Cráton São Francisco é um extenso núcleo, estabilizado no final da orogênese Transamazônica, cujas regiões adjacentes foram submetidas a deformações e retrabalhamentos durante a orogênese Brasiliana (Danderfer 1990). Seu limite é marcado por zonas ou faixas de transição ou ainda por falhas marginais divergentes, adjacentes as faixas móveis brasilianas, que correspondem a sistemas de dobramento e empurrões, com transporte tectônico em direção à zona cratônica.

Na região da Chapada Diamantina, as deformações da orogênese Brasiliana são atribuídas ao desenvolvimento dos sistemas de dobramento Rio Preto e Riacho do Pontal, que delimitam o Cráton a noroeste e norte, respectivamente (Inda e Barbosa 1978).

A Bacia de Irecê (Figura 2.1) é uma bacia sedimentar de formato triangular e de pequena dimensão. É preenchida por sedimentos neoproterozóicos pertencentes ao Grupo Una, representados pelos sedimentos glaciogênicos da Formação Bebedouro e por uma sequência predominantemente carbonática da Formação Salitre.

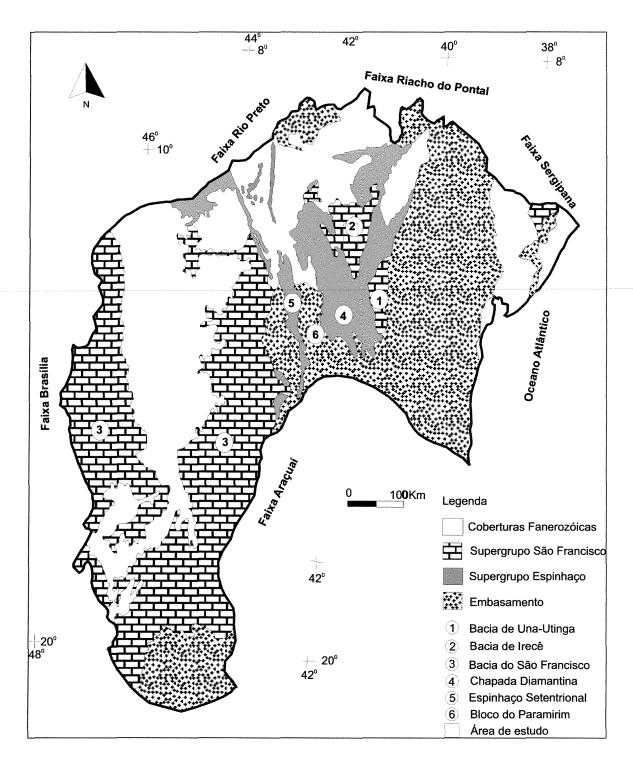


Figura 2.1 – O Cráton do São Francisco (modificado de Alkmim, Brito Neves & Castro Alves 1993; Dominguez 1993)

2.3 - ESTRATIGRAFIA/GEOCRONOLOGIA - CHAPADA DIAMANTINA ORIENTAL

No domínio da Chapada Diamantina Oriental afloram os litotipos siliciclásticos dos Grupos Paraguaçu e Chapada Diamantina (Supergrupo Espinhaço) e sedimentos glaciogênicos (Formação Bebedouro) e carbonatos (Formação Salitre) do Grupo Una (Supergrupo São Francisco), além de sedimentos cenozóicos (Figuras 2.1 e 2.2).

Com base na compilação de vários trabalhos existentes, será feita, a seguir, uma descrição sumária destas unidades.

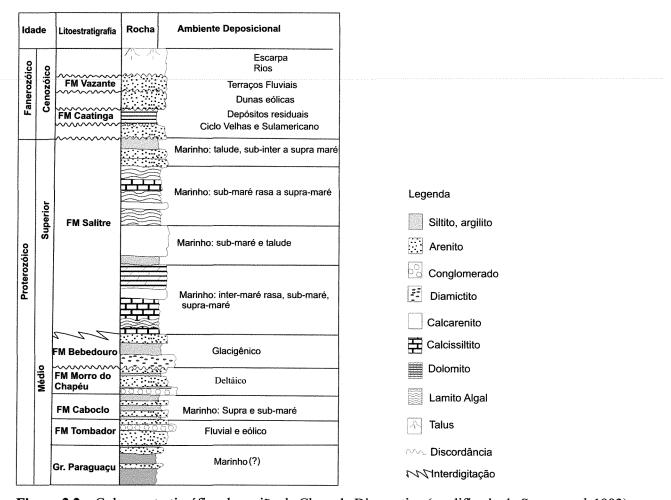


Figura 2.2 - Coluna estratigráfica da região da Chapada Diamantina (modificado de Souza et al. 1993).

2.3.1 - Grupo Paraguaçu

O Grupo Paraguaçu exibe uma seqüência dominantemente quartzítica, com metaconglomerados basais, níveis de ardósias e metassiltitos. Ocorre predominantemente na

porção ocidental da Chapada Diamantina e ocupa o núcleo anticlinal de Pai Inácio, na porção oriental da Chapada (Danderfer 1990).

2.3.2 - Grupo Chapada Diamantina

O Grupo Chapada Diamantina, proposto por Leal & Brito Neves (1968), foi definido como sendo constituído, da base para o topo, pelas Formações Tombador, Caboclo e Morro do Chapéu (Mascarenhas *et al.* 1979) (Figura 2.2). O Grupo Chapada Diamantina é datado do Mesoproterozóico (Brito Neves *et al.* 1980, Babinski *et al.* 1993) e constitui a parte superior do Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina.

A Formação Tombador (Branner 1910 apud Danderfer 1990) compreende uma seqüência arenosa com intercalações de níveis conglomeráticos e pelitícos, enquanto na Formação Caboclo (Branner 1911 *in* Danderfer 1990) predominam camadas pelíticas com pequeno aporte de sedimentos arenosos e, localmente, carbonáticos.

Segundo Brito Neves *et al.* (1980), a idade da Formação Caboclo é de 1290 M.a (idade Rb/Sr). Macedo e Bonhomme (1984), a partir de datações Rb-Sr e K-Ar, postulam uma idade mais jovem para a deposição desta formação, de 960 M.a. Babinski *et al.* (1993) realizaram datações pelo método Pb/Pb em calcários estromatolíticos do topo da Formação Caboclo, obtendo uma idade isocrônica de 1.140 ± M.a, a qual foi interpretada como sendo a idade mínima de deposição.

Encerrando a sedimentação do Grupo, a Formação Morro do Chapéu (Brito Neves 1967), é constituída por uma sequência arenosa, caracterizada por metarenitos de granulação grosseira, mal selecionados e com matriz argilosa, associados a níveis descontínuos de conglomerados e metarenitos conglomeráticos (Conceição Filho *et al.* 1993).

2.3.3 - Grupo Una

O Grupo Una, compreendido na Bacia de Irecê, é correlacionado ao Grupo Bambuí, em Minas Gerais, e caracterizado por uma seqüência carbonático-pelítica, neoproterozóica, depositada sobre os sedimentos do Supergrupo Espinhaço (Inda & Barbosa 1978). A deposição de seus sedimentos se deu em uma planície de maré, sob condições climáticas áridas, em uma bacia intermontana, tectonicamente estável, limitada à leste, sul e oeste pelas elevações do Grupo Chapada Diamantina (Misi 1976). Este Grupo é dividido nas Formações Bebedouro e Salitre

(Figura 2.2). A Formação Bebedouro ocorre na base do Grupo Una, aflorando nas bordas leste e oeste da Chapada Diamantina, e é caracterizada por uma associação de pelitos e paraconglomerados (tilitos) de origem glacial. Estudos geocronológicos realizados por Macedo & Bonhomme (1984) por meio de datações radiométricas Rb/Sr e K/Ar estimaram a idade de sua deposição em aproximadamente 900 M.a. A Formação Salitre foi inicialmente descrita por (Branner 1911 apud Danderfer 1990), e corresponde a uma seqüência de rochas carbonáticas, com poucos sedimentos terrígenos. A idade de deposição desta formação é estimada por Macedo & Bonhomme (1984) entre 900 M.a e 767 M.a. através de datações obtidas pelos métodos Rb-Sr e K-Ar.

Segundo Misi (1979), às fácies mapeadas para essa sequência carbonática caracterizam dois ciclos de sedimentação regressivos-transgressivos e são representadas pelas seguintes unidades litológicas: B e B1, caracterizadas por calcários cinza claros laminados, às vezes dolomíticos, dolarenitos, dololutitos e sílex (primeiro ciclo); A e A1, compostas de meta-argilitos calcíferos, siltitos, margas, calcilutitos pretos, calcários oolíticos a psolíticos e metasiltitos calcíferos (segundo ciclo). Localmente, a unidade dolomítica C separa a sedimentação glaciogênica da sedimentação plataformal (Figura 2.3).

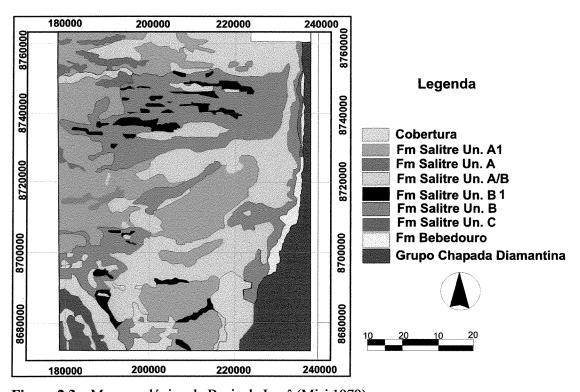


Figura 2.3 – Mapa geológico da Bacia de Irecê (Misi 1979)

Segundo Bomfim *et al.* (1985) e Pedreira *et al.* (1987), a Formação Salitre possui quatro unidades faciológicas denominadas, da base para o topo, de Nova América, Gabriel, Jussara e Irecê. A Tabela 2.1 mostra a correlação das litofácies da Formação Salitre, seus ciclos e ambiente de sedimentação, conforme descritas de Misi (1979) e Bomfim *et al.* (1985), na área de estudo.

Tabela 2.1 - Correlação das litofácies da formação Salitre, seus ciclos e ambiente de sedimentação encontradas na área de estudo, segundo Misi (1979) e Bomfim *et al.* (1985)

Unidades (1) Misi (1979)	Unidades (2) Bomfim et al. (1985)	Ambiente deposicional	Ciclos (1)	Ciclos (2)
Al	Irecê Jussara Superior Jussara Média Jussara Inferior	Intermarés	Regressivo	Transgressivo
A	Irecê Gabriel	Submarés	Transgressivo	Regressivo
B1	Lapão Nova América Sarandi	Supramarés	Regressivo	Regressivo
В	Irecê	Intermarés	Transgressivo	Transgressivo
С	-	Lacustre	Transgressivo	

Souza *et al.* (1993), estabeleceu uma nova divisão litoestratigráfica para as unidades e subunidades da Formação Salitre, dividindo-a nas unidades Nova América, Jussara e Irecê, sendo que a unidade Gabriel, descrita por Bomfim *et al.* (1985), foi incorporada na unidade Nova América (Figura 2.4).

De acordo com Souza *et al.* (*op.cit*), quatro ciclos de sedimentação podem ser descritos para a Formação Salitre. Os ciclos regressivos I e III compreendem a unidade Nova América, e os ciclos transgressivos II e IV, correspondem as Unidade Jussara e Irecê.

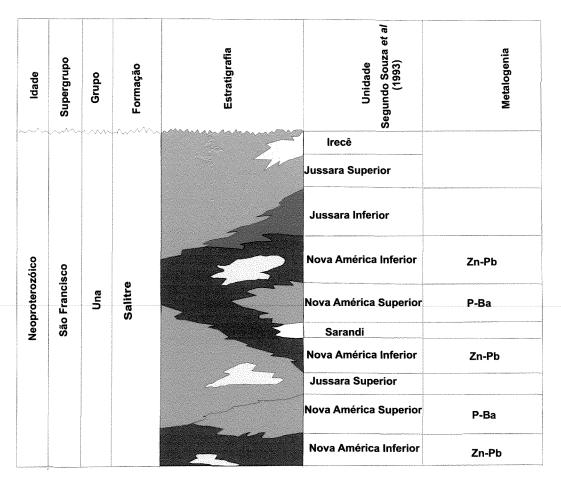


Figura 2.4 – Coluna estratigráfica da Formação Salitre (CBPM 2000)

Unidade Nova América – em ambos os ciclos regressivos (I e III) esta unidade foi dividida em duas subunidades: Nova América Inferior e Nova America Superior. No ciclo III também foi reconhecida a subunidade Sarandi (Pedreira *et al.* 1987). A subunidade Nova América Inferior é constituída por calcissiltitos, lamitos algais, calcarenitos, calcissiltitos e dolaneritos. Esta subunidade tem uma grande importância metalogenética, pois nela ocorrem gossans associados a altos teores de chumbo e zinco encontrados na Bacia de Irecê. A subunidade Nova América Superior é constituída por dolarenitos cinza-claros, dolarenitos e dolorruditos oolíticos e oncolíticos, enquanto a subunidade Sarandi é composta essencialmente de calcissiltitos e calcarenitos peloidais cinza-escuros, por vezes contendo oncólitos e intraclastos.

Unidade Jussara – esta unidade foi primeiramente reconhecida por Bomfim *et al.* (1985) e Pedreira *et al.* (1987). Foi dividida em duas subunidades distintas no ciclo IV: sub-unidade Jussara Inferior, representada por calcissiltitos, calcilutitos, calcarenitos oolíticos e/ou oncolíticos

e calcarenitos; e a subunidade Jussara Superior, composta essencialmente por calcarenitos finos, médios e grossos, oolíticos e/ou oncolíticos de granulação grossa. No ciclo II somente foi detectada a sub-unidade Jussara Superior.

Unidade Irecê – esta unidade, aflora em faixas estreitas ou em corpos alongados. Estes corpos encontram-se intercalados nas unidades Jussara e Nova América, sendo constituídos predominantemente por calcilutitos laminados e calcarenitos finos, intercalados com siltitos, margas, arenitos imaturos e sílex.

2.3.4 - Coberturas Sedimentares Cenozóicas

As coberturas sedimentares cenozóicas compreendem os depósitos relacionados à fase de agradação dos ciclos Velhas e Sul-Americano e as coberturas representadas pelas Formações Caatinga, Formação Vazante e aluviões (Souza *et al.* 1993). As coberturas do ciclo Velhas consistem de sedimentos areno-argilosos, contendo, na base, um nível conglomerático cimentado por óxido de ferro. As coberturas do ciclo Sul-Americano são caracterizadas por sedimentos arenosos ou areno-argilosos. A Formação Caatinga, refere-se a um carbonato branco, ocorre geralmente sob a forma de calcrete branco horizontal, contornando fragmentos de rocha original fresca. Esta Formação possui sua origem relacionada à descalcificação dos carbonatos da Formação Salitre (Lagoeiro 1990). A Formação Vazante consiste de depósitos eluvionares e colúvio-aluvionares.

2.4 - DEFORMAÇÃO E METAMORFISMO

Segundo Souza et al. (1993), dois domínios estruturais são distinguidos na Chapada diamantina Oriental. O primeiro ocupa as partes oeste, sul e leste da área, abrange os litotipos do Grupo Chapada Diamantina, e é caracterizado por dobramentos de eixo norte-sul. O metamorfismo neste domínio é identificado como sendo da fácies xisto verde. O segundo domínio ocupa a maior parte da área da Bacia de Irecê; é representado por dobramentos de eixo leste-oeste e abrange os litotipos do Grupo Una, os quais sofreram apenas anquimetamorfismo, o que possibilitou a preservação de diversas estruturas sedimentares. Souza et al. (1993) ainda identificou duas fases de deformação nas rochas do Grupo Una. A primeira fase resultou em dobras normais cujos eixos tem caimento para norte-nordeste ou sul-suldoeste. A segunda fase de

deformação é caracterizada por dobras com planos axiais verticais a subverticais, com orientação leste-oeste.

De acordo com Bomfim *et al.* (1995) e Chemale *et al.* (1991), duas fases de deformação afetam o Grupo Una. A primeira fase é caracterizada por falhas reversas e de empurrão, dobras abertas orientadas para NNW e com mergulho dos flancos para leste e para oeste. A segunda fase, tardia, é relacionada à orogênese Brasiliana, responsável por dobras com direção leste-oeste. A Tabela 2.2 sintetiza as duas fases de deformação reconhecidas na área, de acordo com os autores supracitados.

Tabela 2.2 - fases de deformação reconhecidas na área, de acordo com Souza *et a.l.* (1993), Bomfim *et al.* (1995) e Chemale *et al.* (1991)

		Bonfim et al. (1995) e	
	Souza et al. (1993)	Chemale <i>et al.</i> (1991)	
Primeira fase de deformação	dobras normais, com caimento	Falhas reversas, de	
	para N-NE ou S-SW	empurrão, dobras abertas	
Segunda fase de deformação	dobras com planos axiais	dobras com trend leste-	
	verticais a subverticais, com	oeste	
	orientação leste-oeste.		

2.5 – ASPECTOS METALOGENÉTICOS

As rochas carbonáticas de origem sedimentar têm uma importância estratégica para o Brasil, particularmente na Bacia de Irecê, Estado da Bahia, devido ao seu potencial metalogenético em Pb e Zn (Misi 1973).

Os primeiros estudos relativos à geologia econômica da Bacia de Irecê remontam a década de 70, quando houve o primeiro projeto de exploração na região, em busca de metais básicos, realizado pela compahia Rio Finex Mining. Posteriormente e em vista da potencialidade mineral da região, a Compahia Bahiana de Pesquisa Mineral (CBPM), detalhou este projeto de exploração, no qual resultou na descoberta de um depósito de 7M.t de chumbo e zinco, cuja proporção é de 7,6% de zinco e 1,4 % de chumbo (Fonte: CBPM).

Posteriormente objetivando complementar e integrar os dados já existentes e principalmente buscar e avaliar novas áreas-alvos potencialmente portadoras destas mineralizações, foi implantado pela CBPM o projeto Análise Faciológica e Metalogenética da Bacia de Irecê, concluído em 1991 (Souza *et al.* 1993).

Além das mineralizações de chumbo e zinco, as rochas sedimentares do Neoproterozóico na Bahia apresentam uma diversificada gama de depósitos minerais, economicamente exploráveis (Misi *et al.* 1993), dentre os quais destacam-se os depósitos de barita, fosfato e fluorita.

2.6 - MINERALIZAÇÕES DA BACIA DE IRECÊ

As mineralizações de chumbo, zinco, barita, fosfato e fluorita estão amplamente distribuídas em todas as áreas de ocorrência do Grupo Una e associadas aos sedimentos carbonáticos neoproterozóicos da Formação Salitre.

As mineralizações de chumbo, zinco e barita da Bacia de Irecê foram inicialmente descritas por Cassedane (1966), Misi (1973, 1978) e, mais recentemente, por Bomfim *et al.* (1985), Misi & Kyle (1992) e Souza *et al.* (1993). Nos depósitos de chumbo e zinco, todos sulfetados, as rochas hospedeiras da mineralizações são representadas por litofácies dolomíticas da seqüência carbonática, rica em estrututuras sedimentares indicativas de ambiente evaporítico (Misi, 1979). Os corpos mineralizados são estratiformes maciços e/ou disseminados, stratabound e venulares e, por vezes, podem ocorrer em micro-fraturas e cavidades isoladas. Segundo Misi *et al.* (1999), a principal característica dos depósitos minerais de chumbo e zinco da Bacia de Irecê é o seu controle estratigráfico, no topo da seqüência regressiva do primeiro ciclo.

Na Bacia de Irecê os depósitos com maiores concentrações de sulfetos são conhecidos na literatura sob a denominação Rufino e Três Irmãs (Misi & Silva 1996). O depósito de Três Irmãs foi descoberto através de um programa de sondagem executado pela CBPM para avaliação de depósitos de fosfato associados a estromatólitos. Este depósito é caracterizado como estratiforme (Souza *et al.* 1993) ou tipo 3 (Misi 1978), ou seja, apresenta-se como lentes irregulares, ou sob a forma de bolsões erráticos, ou ainda como sulfetos disseminados, geralmente concordantes com a estratificação das rochas carbonáticas (Souza *et al.* 1993). A zona sulfetada encontra-se a sete metros de profundidade, e a paragênese do minério é representada, em ordem decrescente de abundância, por pirita, esfalerita, galena, marcassita, jordanita,

tetraedrita e covelita (Souza *et al.* 1993). Os minerais de ganga mais comuns são dolomita, gipsita, quartzo e barita. Os depósitos minerais aflorantes apresentam-se alterados superficialmente, formando crostas limoníticas (gossans), que constituem excelentes guias para essas mineralizações.

As mineralizações de sulfeto da Fazenda Rufino foram descobertas pela RioFinex do Brasil em 1979, a partir da existência de gossans no local. As concentrações de sulfeto estão relacionadas às fácies dolomíticas da Unidade B1 (Misi 1979) e são principalmente estratiformes e "stratabound". Os sulfetos presentes, em ordem decrescente de abundância, são: pirita, esfarelita, galena, marcassita, jordanita, tetraedrita e covelita. A mineralização está normalmente associada à dolomita, calcita, quartzo fibroso, gipsita e barita (Misi & Silva 1996).

Os depósitos de barita da Bacia de Irecê foram cadastrados por Souza *et al.* (1993), e somam quartorze ocorrências, no total. Os depósitos são caracterizados como minérios rolados, estratifomes e filoneanos. O primeiro é representado por depósitos do tipo eluvionar, resultantes do intemperismo do minério "*in situ*". As mineralizações tipo estratiformes, são predominantes na área e ocorrem como lentes irregulares, ou sob a forma de bolsões erráticos, ou ainda como cristais ou agregados disseminados; As mineralizações filoneanas ocorrem preenchendo pequenas fraturas, formando veios lenticulares (Souza *et al.* 1993). Grande parte das ocorrências de barita na Bacia de Irecê estão também associadas a sulfetos (Misi & Silva 1996).

As mineralizações de fosfatos, nas proximidades das cidades de Irecê e Lapão, foram descobertas na década de 80 pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e foram estudadas primeiramente por Bomfim *et al.* (1985). As mineralizações podem ser de dois tipos: primária e secundária. A mineralização primária está contida em estromatólitos colunares da subunidade Nova América Superior e, mais raramente, em tapetes algais pertencentes à subunidade Nova América Inferior. A mineralização secundária é representada por extensas faixas de cascalho, presentes em solos residuais e relacionadas diretamente a estromatólitos colunares.

As ocorrências de fluorita estão normalmente associadas a veios de calcita branca, ou de quartzo, ou como pequenos cristais disseminados, associados a dolomitos (Misi & Souto 1975).

A Tabela 2.3 apresenta as principais ocorrências minerais da Bacia de Irecê, com suas designações e respectivas coordenadas (Modificado de Franca Rocha 2001).

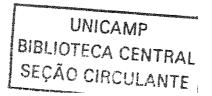


Tabela 2.3 - Principais ocorrências minerais da Bacia de Irecê.

Nome da ocorrência	UTM-L	UTM-L	Zn	Pb	Ba	Ρ	F
Faz Melancia - Cafarnaum	8709140	233492	-	х	-	-	-
Tanque do gringo - Irecê	8764216	238946	-	х		***	-
Faz. Alvino - Canarana	8687499	188551	-	×	-	ш.	-
Morro do Fernandez - Canarana	8692616	192741	-	×	-		-
Faz. Nova - Irecê	8756078	240074	_	×	_	+	_
Faz. Nova/Três Irmãs	8743835	194359	x	×	-	-	-
Faz. Nova/Faz. Santa Rosa	8744755	194046	×	х	_	-	-
Garapa Irecê	8758690	239902	_		х	ш	×
Faz. Teixeira	8717441	233421	-		×	-	-
Faz Lagoa do Cazuza1	8714060	233601	-		х	-	_
Faz. Lagoa do Cazuza2	8714359	232538	-	, m-	х		_
Faz.Oliveira1	8712514	232554	-		х	<u></u>	-
Faz.Oliveira2	8711587	231956	<u> </u>		x		_
Lambedor1	8710081	235605	-		х		-
Lambedor2	8710055	232575	_		x	-	-
Faz. Garapa	8754386	239936		····	-	-	x
Nova Conquista	8746945	197971	-		-	x	_
Lagedao2	8743865	197393	+	<u></u>		х	
Lagedao1	8742942	197341	-	**	+	х	==

Morrinhos	8742638	197708	_		-	x	-
Jacaré	8738289	193198	-	-	_	×	_
Três Irmãs	8740128	192574	-	-	-	x	-
Junco	8697054	222691	-	-	-	×	-
Faz. São Luiz - Irecê	8748200	193900	-		-	х	-
Faz. Recanto - Irecê	8745300	193100	-	-	-	х	-
Bela Vista - Irecê	8748000	192300	-			×	_
Morro Pelado - Lapão	8738300	192200	-	**	_	x	_
Lapão - Lapão	8738500	190600	_	-	-	х	-
Lapão - Irecê	8743800	193200	×	x	-	-	_
Rufino - Lapão	8743100	193700	-	***	-	х	_
Faz. Vista Alegre	8738267	224522	-	-	-	x	-
-	8745777	195786	-	_	-	×	-
Achado	8746078	196279	_		-	x	+
Bela Vista	8747849	192238	-		*	х	-
São Luis	8747949	193812	444		-	×	-
		<u> </u>	L.,	1	l	L	L

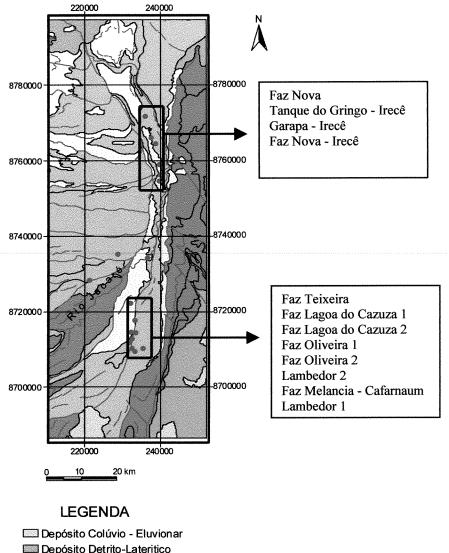
2.7 - MINERALIZAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO

As mineralizações de chumbo, zinco e bário inscritas na área de estudo possuem uma orientação preferencial N-S e estão distribuídas nas unidades carbonáticas da Formação Salitre (Figura 2.5). Ao norte da área, as mineralizações são denominadas de Fazenda Nova, Tanque do Gringo, Fazenda Nova – Irecê e Fazenda Garapa. Ao sul, recebem a denominação de Nova América, Fazenda Teixeira, Fazenda Lagoa do Cazuza 1, Fazenda Lagoa do Cazuza 2, Fazenda Oliveira 1, Fazenda Oliveira 2, Lambedor 2, Fazenda Melancias e Lambedor 1 (Figura 2.5).

Entre essas mineralizações, as mais importantes e com maiores citações na literatura são aquelas denominadas Tanque do Gringo e Melancias. A ocorrências de Tanque do Gringo situam-se as margens do Rio Jacaré, no município de Irecê. São caracterizadas como sendo do tipo filoneana (Souza *et al.* 1993) e constituídas, principalmente, de galena, com alguma fluorita e barita, associada à calcita em pequenas fraturas (Misi & Souto 1975, Souza *et al.* 1993).

Na Fazenda Melancias, as ocorrências localizam-se na porção sul da área e foram pesquisadas no final da década de 70 pela Serminas, empresa ligada ao Bureau dês Recherches Géologiques et Minières (BRGM), da França (Misi & Silva 1996). A mineralização é caracterizada como sendo do tipo estratiforme e corresponde a uma ou mais camadas subhorizontais de carbonato, muito fraturado, com espessura em torno de 1,5 m, superposto por calcarenitos com lamitos algais e estratificações plano paralelas (Souza *et al.* 1993). A mineralização é constituída principalmente por lentes e bolsões de barita, com galena associada, calcita e, subordinadamente, esfalerita, pirita, calcopirita e covelita (Misi & Souto 1975, Misi & Silva 1996).

Na área de estudo são observadas, além das mineralizações de chumbo e zinco, mineralizações de barita (Tabela 2.3).



Depósito Detrito-Lateritico
Formação Caatinga
Formação Salitre - Unidade Jussara Superior
Formação Salitre - Unidade Jussara Média e Inferior
Formação Salitre - Unidade Nova America Inferior
Formação Bebedouro
Formação Morro do Chapéu
Formação Caboclo
Depósitos
Lineamentos estrururais definidos
Drenagen

Figura 2.5 – Mapa geológico e de distribuição espacial das mineralizações da área de estudo.

2.8 - PROCESSOS E MODELOS METALOGENÉTICOS

Segundo Misi & Silva (1996), os dados disponíveis com relação as mineralizações de chumbo e zinco das coberturas Proterozóicas do Cráton de São Francisco, são perfeitamente compatíveis com os modelos metalogenéticos desenvolvidos para os depósitos do tipo SEDEX. Este modelo difere do proposto por Iyer *et al.* (1992), que classifica estes depósitos como sendo do tipo Mississipi Valley. A seguir será feita uma descrição sumária dos dois modelos propostos para a área de estudo.

2.8.1 - Depósitos tipo SEDEX

Estes depósitos constituem cerca de 60% das reservas mundiais de Pb e Zn. São definidos como estratiformes, associados a sedimentos e formados por processos de descarga de fluidos hidrotermais (Gustafson & willians 1981). Morfologicamente, estes depósitos mostram vários corpos lenticulares de sulfetos estratiformes, que podem ser distribuídos através de um largo intervalo estratigráfico, ou ao longo de um mesmo horizonte estratigráfico, ou em um único corpo de sulfeto maciço (Dardenne 1988). Em relação à distribuição temporal, estes depósitos ocorrem em maior quantidades no Fanerozóico e no Proterozóico (Gustafson & willians 1981).

Os principais sulfetos constituintes destes depósitos compreendem principalmente pirita, pirrotita, esfarelita, galena e em menor proporção calcopirita, arsenopirita (Godfellow *et al.* 1993).

Geralmente, estes depósitos mostram uma zonação característica, representada do centro para as bordas da seguinte forma Cu→Pb→Zn→Fe ou Cu→Pb→Zn→Ba (pouco ferro) (Gustafson & willians 1981, Dardenne 1988).

Dentre os exemplos descritos na literatura, destacam-se os depósitos de Perau e Canoas no Paraná (Daitx 1996), McArthur River e Mt. Isa na Austrália (Guilbert & Park 1986).

2.8.2 - Depósitos do tipo Mississipi Valley

Os depósitos do tipo Mississipi Valley são encontrados em sequências carbonáticas de bacias cratônicas. A mineralogia é composta essencialmente por galena e esfalerita em associação com outros minerais eventuais, como fluorita e/ou barita, pirita e calcopirita (Dardenne 1988).

São depósitos epigenéticos, formados a partir de soluções hidrotermais de baixa temperatura, que provocam a dolomitização e/ou silicificação das rochas encaixantes. Os elementos traços mais comuns são: prata, cádmio e o germânio (Dardene 1988).

Na literatura, os depósitos mais famosos que se enquadram neta categoria são: Viburnum Trend, Old Lead Belt, e Apalaches nos Estados Unidos (Hoagland 1976), dentre outros.

2.9 - FISIOGRAFIA DA BACIA DE IRECÊ

A possibilidade de uso de dados e técnicas de sensoriamento remoto em estudos geológicos é diretamente relacionada a fisiografia da área a ser analisada. Fatores como o clima e a vegetação são determinantes sobre o uso de sensoriamento em geologia, pois podem dificultar ou restringir a detecção de minerais e de outras variáveis geológicas relacionadas ao objeto sob investigação.

2.9.1 - Clima

Para definir o clima da região em estudo, foi utilizada a classificação climática de GAUSSEN, já que a classificação climática de Köppen, muito divulgada no Brasil pela sua fácil aplicação, não corresponde, de maneira muito satisfatória, à realidade do clima da área de estudo (PDRH 1995). De acordo com GAUSSEN, as regiões bioclimáticas nas quais se enquadra a área são 4bTh e 4aTh. Estas regiões bioclimáticas apresentam um período seco variando de 5 a 8 meses e índice xerotérmico entre 40 a 150.

O bioclima 4bTh é do tipo tropical quente de seca no inverno, na modalidade caráter médio. Apresenta índice xerotérmico entre 100 e 150 e período seco de 5 a 6 meses. O bioclima 4aTh é do tipo tropical quente de seca de inverno, na modalidade caráter acentuado. Apresenta índice xerotérmico entre 150 e 200 e período seco de 7 a 8 meses.

2.9.2 - Hidrografia

A hidrografia da região é representada pelos rios Verde e Jacaré, afluentes da margem direita do rio São Francisco. O rio Verde é perene, possuindo parte de seu curso em regime efluente e outra parte, correspondente ao médio e baixo curso, em regime influente. O rio Jacaré corre apenas algumas semanas da estação chuvosa, entretanto, o seu leito forma abaciados que

acumulam água durante todo o ano, sendo alguns permanentemente alimentados pelas águas de subsuperfície.

2.9.3 - Aspectos Geomorfológicos

A região, de uma maneira geral, apresenta-se como uma área central plana, limitada à leste, sul e oeste por uma faixa contínua, topograficamente elevada, correspondente aos metassedimentos dobrados do Grupo Chapada Diamantina. Esta área plana central, bordejada por serras, possui altimetria variando entre 800 e 400 metros, com a parte mais elevada ao sul, apresentando um caimento geral em patamares para norte e noroeste, em direção ao vale do rio São Francisco. A seguir são apresentadas as principais características da região em estudo, separadas em domínios e regiões com características distintas (PDRH 1995).

- Área Central Deprimida.

Compreende uma área plana, com topografia monótona, situada entre as elevações da Chapada Diamantina, correspondendo às áreas de afloramento das rochas do Grupo Una, sendo que mais ao norte essas rochas encontram-se parcialmente ou totalmente recobertas por sedimentos cenozóicos. É representada por planos com um caimento regional para norte e noroeste, em direção ao vale do São Francisco, chegando até às margens do lago de Sobradinho. A elevação nessa área varia de 800 metros, na parte mais ao sul, próximo às bordas da Chapada, a 400 metros ao norte, nas proximidades do lago da barragem de Sobradinho.

- Chapada de Irecê

Dominando toda porção sul da área, esta unidade representa o reverso setentrional dos Planaltos da Chapada Diamantina. Constitui uma Chapada descontínua em altitudes que variam de 600 a 800 metros, coincidente com as áreas de afloramento dos Calcários do Grupo Una, principalmente da Formação Salitre. Caracteriza-se por uma topografia levemente ondulada, com elevações suaves e sem a formação de escarpas, apesar de localmente apresentar amplitudes consideráveis de variação altimétrica entre o topo e a base.

- Áreas Elevadas do Planalto da Diamantina

Compreende uma região com relevo elevado, apresentando altitudes que variam de 750 a 1850 metros, com médias em torno de 1000 e 1200 metros. São áreas marcadas por importantes dobramentos em metassedimentos do Mesoproterozóico (Grupo Chapada Diamantina), representados por anticlinais escavados e sinclinais suspensos e vastas áreas intermediárias aplainadas.

2.9.4 - Aspectos Pedológicos

Os principais tipos de solos existentes na região pertencem as seguintes classes (RADAM BRASIL, 1981):

- Latossolo Vermelho Amarelo: compreende solos de coloração variando do vermelho ao amarelo e cores intermediárias. São comumente profundos a muito profundos, com boa porosidade, constituídos principalmente por minerais de argila (grupo da caolinita), quartzo e minerais altamente resistentes ao intemperismo.
- Latossolo Vermelho Escuro: compreende solos avermelhados, que são diferenciados dos solos da classe Latossolo Vermelho Amarelo por apresentarem normalmente maiores percentagens de F_2O_3 .
- Podzólico Vermelho Amarelo: compreende solos normalmente profundos, moderado a fortemente ácido e de baixa fertilidade natural. Esses solos aparecem na área em relevo plano, ondulado e montanhoso.
- Cambissolos: compreende em sua maioria solos desenvolvidos a partir de calcário e, em menor proporção, de gnaisses, granitos, granulitos, filitos e xistos.
- Solos Litólicos: compreendem solos pouco desenvolvidos, rasos ou muito rasos, possuindo apenas um horizonte A assentado diretamente sobre a rocha. Estão normalmente associados a um relevo que varia de suave, passando a ondulado e montanhoso.

- Solonetz Solodizado: compreende solos rasos a pouco profundos. O aproveitamento desses solos é feito principalmente com pecuária extensiva (notadamente de caprinos e ovinos), precariamente desenvolvida em meio à vegetação de caatinga. De um modo geral, são solos que se encontram em áreas com fortes limitações de uso, devido a falta d'água no período seco e algum excesso no período chuvoso, possuindo elevado teor de sódio nos horizontes subsuperficiais.
- Solos Aluviais: compreendem solos pouco desenvolvidos, resultantes de deposições fluviais recentes. São solos de grande potencialidade agrícola e são utilizados para o plantio de diversas culturas.

2.9.5 - Vegetação

A vegetação típica da área em estudo é bastante diversificada, abrangendo principalmente à caatinga, cerrado e matas ciliares/veredas. A caatinga na área de estudo é o ecossistema predominante, compreendendo uma vegetação espinhosa, com folhas pequenas, coriáceas e de casca grossa. As matas ciliares e veredas são comunidades vegetais típicas de terrenos aluvionares, que sofrem e refletem os efeitos das cheias dos cursos d'águas, em época chuvosas, ou então das depressões alagáveis durante o ano. Em alguns locais, como vales, a mata ciliar ou vereda é relativamente estreita, basicamente em decorrência da topografia, que reduz a planície de inundação dos rios.

Capítulo 3 – Os Sensores Thematic Mapper e ASTER & Aplicações em Estudos Geológicos

3.1 - INTRODUÇÃO

Os sensores *Thematic Mapper* (TM) e *Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer* (ASTER) geram informações em intervalos espectrais onde importantes bandas de absorção, devidas a fenômenos de transição eletrônica entre íons de ferro, principalmente efeito do campo cristalino e transferência de carga, podem ser detectadas (Hunt & Salisbury 1970, Hunt *et al.* 1971, Hunt 1977, Hunt 1979, Hunt & Ashley 1979). Tais bandas são diagnósticas sobre a presença de óxidos (hematita: 0,85μm; maghemita: 0,925μm; lepidocrocita: 0,98μm), hidróxidos (goethita: 0,65/0,90-0,94μm), sulfatos (jarosita: 0,43/0,90-0,94μm) e misturas de óxidos hidratados (limonita: 0,65/0,90-0,94μm) de ferro em rochas, solos e outros tipos de superfícies (Hunt & Salisbury 1970, Hunt *et al.* 1971, Hunt 1977, Hunt 1979, Hunt & Ashley 1979). Portanto, todos esses minerais são potencialmente detectáveis e, alguns discrimináveis entre si, a partir dos sensores em epígrafe. Esses minerais, tipicamente, são produtos intempéricos de mineralizações sulfetadas e formam os gossans (Oliveira 1993), os quais, por conseqüência, também podem ser determinados a partir desses sensores.

Os sensores ASTER e TM, além do potencial para a detecção de compostos com conteúdo em ferro, são importantes também na detecção de feições espectrais na região do infravermelho médio, originadas por vibrações moleculares, características de argilas (e.g., caulinita e montmorilonita) e carbonatos (e.g., calcita e dolomita) (Hunt & Salisbury 1970, Hunt et al. 1971, Hunt 1977, Hunt 1979, Hunt & Ashley 1979) (Figura 3.1).

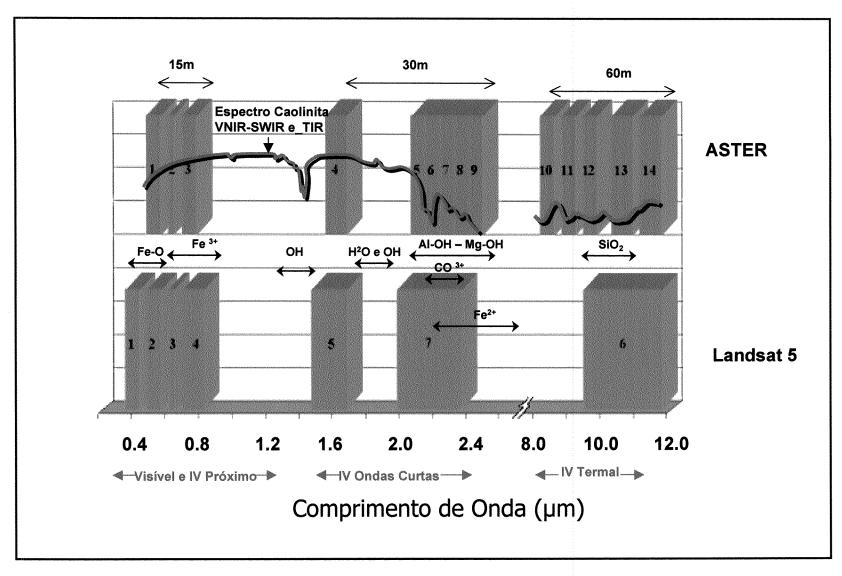


Figura 3.1 - Correlação entre as bandas dos sensores TM e ASTER, e seus principais intervalos espectrais para a discriminação de íons e moléculas (modificado de Abrams *et al.* 2003).

Neste capítulo, além de apresentar a principais características dos sensores ASTER e TM, pretende-se também expor uma síntese bibliográfica de trabalhos representativos sobre o uso destes sensores em exploração mineral.

3.2 – O PROGRAMA LANDSAT

O programa Landsat foi criado no final da década de 60, numa iniciativa conjunta da NASA e agências federais dos Estados Unidos. Este projeto destinou-se à aquisição de dados para monitoramento e estudo dos recursos terrestres, por meio da construção e lançamento de uma série de satélites, inicialmente denominados de *Earth Resource Technology Satellite* (ERTS). Em janeiro de 1975, o programa foi re-denominado de Landsat.

A primeira geração da série (Landsat 1, 2, 3), hoje desativada, operava com o sensor de varredura *MultieSpectral Scanner* (MSS) e a câmera *Return Beam Vidicon* (RBV). Esta última foi substituída, nas plataformas seguintes (Landsat 4, 5), pelo *Thematic Mapper* (TM), um sensor de varredura com maior resolução espacial e espectral (Sabins, 1997). Em 1993, foi lançado o Landsat-6 (com o sensor *Enhanced Thematic Mapper* - ETM), o qual não chegou a entrar na órbita terrestre por uma falha operacional e acabou sendo perdido.

Marcando o início da terceira geração do programa, em abril de 1999, foi lançado o Landsat 7, o mais recente satélite em operação do programa Landsat, financiado pelo governo americano. Entre os principais avanços técnicos desta nova plataforma, em comparação a sua antecessora, destacam-se:

- a substituição do sensor TM pelo sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), com melhorias nas características geométricas e radiométricas;
- a adição de uma banda pancromática (banda 8) com resolução de 15 m;
- o aumento da resolução espacial da banda termal para 60 m, que passou também a imagear com dois tipos de ganhos, alto e baixo (bandas 6-1 e 6-2).

Nas Tabelas 3.1 e 3.2 são apresentadas as principais características dos satélites que compõe o programa Landsat e as resoluções espectral e espacial do sensor TM/Landsat-5, utilizado nesta pesquisa.

Tabela 3.1 - Principais características dos satélites do programa LANDSAT.

Satélite	Lançamento	Sensores	Número de bandas e resolução espacial	Altitude (km)	Situação Operacional
1	1972	RBV/MSS	Bandas 1, 2 e 3 – 80m Bandas 4, 5 e 7 – 79m	900	desativado
2	1975	RBV/MSS	Bandas 1, 2 e 3 – 80m Bandas 4, 5 e 7 – 79m	900	desativado
3	1978	RBV/MSS	Banda 1 – 30m Banda 4, 5 e 7 – 79m	900	desativado
4	1982	MSS/TM	4, 5 e 7 – 82m 1, 2, 3, 4, 5 e 7 – 30m Banda 6 – 120m	705	Opera sob demanda/TM desativado
5	1984	MSS/TM	4, 5 e 7 – 82m 1, 2, 3, 4, 5 e 7 – 30m Banda 6 – 120m	705	operacional
7	1999	ETM+	1, 2, 3, 4, 5 e 7 – 30m Banda 6 – 60m Pan – 15m	705	operacional

Tabela 3.2 - Resoluções espectral, espacial e radiométrica do sensor TM/LANDSAT-5.

Faixas do EEM cobertas pelo TM		Espectro	Resolução espacial	Resolução radiométrica
Banda 1	0,45-0,52μm	Azul	30 m	8 bits*
Banda 2	0,52-0,60µm	verde	30 m	8 bits*
Banda 3	0,63-0,69µm	Vermelho	30 m	8 bits*
Banda 4	0,76-0,90µm	NIR	30 m	8 bits*
Banda 5	1,55-1,75μm	SWIR (1)	30 m	8 bits*
Banda 7	2,08-2,35μm	SWIR (2)	30 m	8 bits*
Banda 6	10,4-12,5mm	TIR	120 m	8 bits*
Largura da Faix	ka Imageada — 185km	1	*256 níveis de cinza	

3.3 - SENSOR ASTER ADVANCED SPACEBORNE THERMAL EMISSION AND REFLECTION RADIOMETER

O sensor ASTER foi lançado em Dezembro de 1999, a bordo da plataforma Terra, como parte do programa Earth Observing System (EOS). O projeto resultou de um esforço conjunto

entre a NASA dos Estados Unidos e o *Ministry of Economy Trade and Industry* (METI) do Japão, com a colaboração de organizações científicas e da indústria aeroespacial dos dois países (Abrams & Hook, 2003).

O ASTER é um dos poucos sensores orbitais em operação que agrupa várias características especiais, de interesse para aplicações geológicas (Hook 1999; Abrams 2000). O sensor é constituído por três sub-sistemas de imageamento independentes, os quais coletam dados em várias porções do espectro eletromagnético: a região do espectro VIS e NIR é coberta com 3 bandas espectrais, na resolução espacial de 15m; a região do espectro SWIR com 6 bandas, na resolução de 30m; e a região do espectro infravermelho termal (TIR) com 5 bandas, na resolução de 90m (Tabela 3.3). Adicionalmente, o sistema VIS-NIR do ASTER conta com dois telescópios, um dos quais opera com retro-visada ao longo da órbita do satélite (com poucos segundos de diferença da visada NADIR), permitindo a geração de pares estereoscópicos, em comprimentos de onda do NIR.

A resolução temporal (ou o ciclo de repetição de coleta de dados numa mesma área) do ASTER é de 16 dias ou inferior, considerando que os sub-sistemas de imageamento possuem espelhos móveis para aquisição de dados, em visada lateral, com até +/- 24 graus fora do NADIR. Cada cena ASTER cobre uma área de 60 x 60 km no terreno.

O sensor ASTER é capaz de fornecer dados sobre a reflectância, a emissividade, a temperatura e a elevação da superfície terrestre, os quais podem ser convertidos em informações detalhadas, na forma de mapas, sobre o meio físico, com múltiplas possibilidades de aplicação em Cartografia (geração de bases topográficas e modelos de elevação digital compatíveis com escalas 1:50.000 ou talvez até mais detalhadas) e em Geologia (mapeamento geológico e exploração mineral) (Souza Filho, C.R. 2003).

Tabela 3.3 - Resoluções espectral, espacial e radiométrica do sensor ASTER.

Faixas do EEM coberta	Espectro	Resolução	Resolução Radiométrica	
			Espacial	
Banda 1	0,52-0,60µm	VERDE	15 m	8 bits*
Banda 2	0,63-0,69µm	VERMELHO	15 m	8 bits*
Bandas 3B e 3N (estereopar)	0,76-0,86µm	NIR	15 m	8 bits*
Banda 4	1,60-1,70µm	SWIR(I)	30 m	8 bits*
Banda 5	2.145 - 2.185μm	SWIR(II)	30 m	8 bits*
Banda 6	2.185 - 2.225μm	SWIR(II)	30 m	8 bits*
Banda 7	2.235 - 2.285μm	SWIR(II)	30 m	8 bits*
Banda 8	2.295 - 2.365µm	SWIR(II)	30 m	8 bits*
Banda 9	2.360 - 2.430µm	SWIR(II)	30 m	8 bits*
Banda 10	8.125 - 8.475 μm	TIR	90 m	12 bits**
Banda 11	8.475 - 8.825 μm	TIR	90 m	12 bits**
Banda 12	8.925 - 9.275 μm	TIR	90 m	12 bits**
Banda 13	10.25 - 10.95 μm	TIR	90 m	12 bits**
Banda 14	10.95 - 11.65 μm	TIR	90 m	12 bits**
Largura da Faixa Imageada –	* 256 níveis de cinza			
	** 4096 níveis de cinza			

Vantagens

Se comparado a sensores orbitais multiespectrais "tradicionais" como o TM ou o ETM+, o ASTER apresenta, entre outras, as seguintes vantagens (Souza Filho, C.R. 2003):

- resolução espacial original de 15m nas bandas do VIS verde e vermelho (bandas ASTR1 e ASTR2) e na banda do NIR (banda ASTR3) (vs uma banda pancromática do ETM+ a banda 8). Essa resolução original permite uma melhor detecção do comportamento espectral de materiais com feições definidas neste intervalo do espectro. Embora com resolução espacial nominalmente igual a da banda pancromática (banda 8) do ETM+, a resolução de 15m do ASTER é na realidade superior, permitindo uma melhor definição geométrica e textural de feições no terreno.
- 6 bandas espectrais na região do infravermelho de ondas curtas (vs duas banda do ETM+ as bandas 5 e 7). Essa configuração foi particularmente especificada para caracterização de minerais presentes em solos e rochas, muitos dos quais considerados importantes para a exploração mineral e o mapeamento geológico. Além disso, essas bandas permitem a detecção de importantes compostos bioquímicos (proteínas, lignina, celulose) presentes na vegetação, os quais podem servir de guias para a detecção de anomalias geobotânicas (Almeida & Souza Filho 2000).

- 5 bandas espectrais na região do infravermelho termal (vs uma do ETM+ a banda 6). O ASTER é o primeiro sensor orbital capaz de proporcionar imageamento multiespectral termal (diurno e noturno). Essa novidade se reveste de importância na medida em que tais bandas propiciam a detecção de superfície ricas em determinados compostos com resposta na região termal, principalmente quartzo, carbonatos e vários outros silicatos.
- capacidade de estereoscopia, com possibilidade de geração de modelos digitais de elevação com precisão absoluta de até 7m (vertical e horizontal, com uso de pontos de controle no terreno) e precisão relativa de até 10m (vertical e horizontal, sem pontos de controle).
- O dados são fornecidos no formato *Hierarchical Data Format* (*.hdf), com informações completas sobre as características geométricas e radiométricas da cena imageada.

Limitações

Durante a revolução do satélite Terra em torno do globo terrestre, o ASTER não opera 100% do tempo adquirindo dados. O tempo de imageamento é compartilhado com os outros 4 sensores, entre os quais o mais 'popular' é o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectro-Radiometer*). Do período orbital total de cerca de 98 minutos da plataforma Terra, um máximo de 16 minutos é disponível à aquisição de dados ASTER. Mesmo com essa limitação, cerca de 750 cenas podem ser adquiridas diariamente pelo sensor. Considerando o tempo mínimo de 5 anos estimado para a missão, aproximadamente 1.7 milhões de cenas deverão ser adquiridas globalmente neste intervalo de tempo. Em 6 anos de missão, espera-se constituir um banco de dados de pares estereoscópicos ASTER cobrindo cerca de 80% da superfície terrestre (Souza Filho, C.R. 2003).

O ASTER também não é um sistema comercial, como o Landsat e o SPOT, mas sim experimental. A solicitação de imagens, além daquelas disponíveis em arquivo, é feita por meio de projetos de aplicação dos dados, os quais podem ser submetidos por qualquer pessoa, empresa ou instituição, junto ao ERSDAC (*Earth Remote Sensing Data Analysis Center*)-Japão ou JPL (*Jet Propulsion Lab*)-NASA-Estados Unidos (Souza Filho, C.R. 2003).

Níveis de Processamento

Os dados do ASTER podem ser obtidos em vários níveis de processamento (Souza Filho, C.R. 2003). Os dados no 'Nível 1A' são dados "brutos", não calibrados, contendo bandas não

registradas entre si e sem pré-processamento para correção de ruídos — para a maioria dos usuários, é um tipo de dado inadequado para uso, independente da aplicação. Os dados no 'Nível 1B' são dados calibrados geométrica e radiometricamente (pixels em radiância - W/ m⁻² /sr /μm), com as 14 bandas co-registradas entre si. Esse é o melhor produto para aplicações em Geologia. Os dados 'Nível 1B' são processados e convertidos a partir dos dados 1A somente no Japão (cerca de 330 cenas/dia) e enviados aos *EROS Data Centers* (EDCs) e *Distributed Active Archive Centers* (DAACs), nos Estados Unidos, para arquivamento, distribuição e geração de produtos mais avançados, do tipo 'Nível 2'. Os produtos 'Nível 2' são múltiplos, entre os quais destacam-se, por ordem de siglas, os seguintes: AST04-temperatura da superfície; AST05- emissividade da superfície; AST06- composições coloridas realçadas por decorrelação; AST07- reflectância na superfície; AST08- temperatura cinética; AST09- radiância na superfície. No 'Nível 3' são fornecidos produtos ainda mais sofisticados, como modelos digitais de elevação (AST14). Todos os produtos 'Níveis 2 e 3' podem ser solicitados e adquiridos sem custos, via Internet (http://edcdaac.usgs.gov/asterondemand/).

3.4 - APLICAÇÕES DE DADOS TM E ASTER EM ESTUDOS GEOLÓGICOS

A seguir serão descritos alguns trabalhos realizados com os sensores TM e ASTER no sentido de contextualizar e realçar a importância do sensoriamento remoto em aplicações geológicas de escala regional e de semi-detalhe com esses sensores, como por exemplo, no mapeamento litológico, estrutural, geomorfológico e em exploração mineral (Gupta & Raj 1989).

Os dados do sensor TM têm sido extensivamente aplicados no mapeamento de minerais associados a depósitos minerais e numerosas pesquisas vêm abordando esse tema há décadas (Abrams *et al.*1983, Goetz *et al.*1983, Drury & Hunt 1988, Kruse 1989, Harris *et al.* 1998; Sabine 1999).

Em regiões de clima árido, onde ocorre exposição total do substrato, imagens TM mostraram-se eficientes para caracterização de gossans associados a depósitos sulfetados na Eritréia (Abdelsalam *et al.* 2000) e na Arábia Saudita (Volesky 1999). O mesmo, porém com mais dificuldade, se aplica a regiões tropicais. Crósta & Moore (1989), utilizando a técnica FPCS (*Feature Oriented Principal Selection Component*) aplicada a imagens TM de Fortaleza de Minas, Minas Geras, identificaram e separaram solos ricos em ferro, derivados de rochas máficas

e ultramáficas, hospedeiras de mineralizações de platinóides, daqueles derivados de rochas gnáissicas. Crósta (1990) avaliou o potencial do sensor TM como uma fonte de dados para o mapeamento e exploração mineral, no sudoeste de Minas Gerais, onde técnicas de processamento de imagens foram usadas para identificar as características espectrais de óxidos de ferro, associados a produtos de intemperismo e mineralizações de sulfetos. Crósta & Rabelo (1993), aplicando a técnica FPCS identificaram com sucesso áreas com concentrações de filossilicatos e óxidos e hidróxidos de ferro na região de Paracatu, Minas Gerais.

Os dados multiespectrais do sensor ASTER, também têm sido utilizados com sucesso em estudos voltados à caracterização de minerais associados a depósitos metálicos e mapeamento geológico, como já antecipadamente previsto nas simulações do sensor, realizadas por Abrams & Hook (1995), no distrito mineiro de *Cuprite*, Nevada, e por Rowan (1998), em *Iron Hill*, Colorado. Outros estudos pioneiros sobre o ASTER, também baseados em simulações dos dados, demonstraram o potencial do sensor em discriminar minerais de alteração hidrotermal - alunita, caulinita, montimorilonita, calcita — por meio de índices espectrais (Yamaguch & Naito 1999). Yamaguchi & Takeda (2001), ratificaram a possibilidade de separação entre esses minerais, abordando dados reais do ASTER, através da mesma técnica, de índices espectrais.

Souza Filho *et al.* (2003), discriminaram zonas de alteração hidrotermal (argílica avançada e fílica) associadas a mineralizações de cobre no depósito de cobre-pórfiro de Quellaveco, no sul do Peru, utilizando técnicas de processamento hiperespectral, adaptadas a dados ASTER previamente convertidos para reflectância aparente.

Crósta *et al.* (2003), propuseram uma adequação da técnica FPCS para a resolução espectral do sensor ASTER e conseguiram mapear minerais de alteração hidrotermal (caulinita, dickite, alunita e ilita), intrinsicamente relacionados a mineralizações de ouro epitermal, no distrito mineiro de Los Menucos, Patagônia, Argentina.

Rowan & Mars (2003), analizaram dados VIS, NIR, SWIR e TIR do ASTER, adquiridos na região de *Mountain Pass* — Califórnia, e demonstraram que várias unidades litológicas podem ser mapeadas, separadamente, a partir do processamento de dados do sensor com técnicas de classificação espectral. Entre os resultados alcançados neste trabalho com os dados das bandas do espectro refletido, convertidos para reflectância aparente, destacam-se: (i) a separação entre rochas calcíticas e dolomíticas; (ii) a discrimição de minerais contidos em depósitos do tipo skarn; (iii) a distinção entre muscovitas ricas em ferro (rochas intrusivas) daquelas ricas em Al

(rochas granito-gnáissicas). Com base nas bandas do espectro emissivo, convertidas para emissividade, os autores mapearam rochas ricas em sílica e, de maneira geral, as unidades carbonáticas.

Muito embora, a literatura sobre aplicações do sensor ASTER para o estudo de depósitos minerais venha crescendo num ritmo acelerado, pouco ainda foi publicado sobre o uso destes dados em regiões tropicais para os mesmos fins. A literatura também carece de trabalhos com foco na caracterização de gossans. Um único trabalho, desenvolvido por Volesky *et al.* (2002), utilizou dados ASTER (composições coloridas AST621 (RGB) e razões de bandas AST4/2-4/5-5/6 (RGB)) para a caracterização de rochas e coberturas associadas a depósitos de sulfeto maciço, no distrito mineiro de Bidah Wadi, Arábia Saudita.

3.5 - LIMITAÇÕES AO USO DE SENSORES REMOTOS NO MAPEAMENTO DE GOSSANS

A utilização de dados e técnicas de sensoriamento remoto multiespectral no mapeamento de gossans depende da capacidade do sensor em determinar, pelo menos, feições espectrais diagnósticas de óxidos, hidróxidos e sulfatos de ferro. Além disso, fatores externos, tais como vegetação, clima, topografia, iluminação, espalhamento atmosférico, entre outros, devem ser considerados, pois são determinantes no processo de detecção.

Em áreas de clima tropical, onde existe uma densa cobertura vegetal e espesso manto de intemperismo, que mascaram as feições espectrais de interesse, é importante que alguns cuidados sejam tomados. A época de aquisição dos dados pode ser escolhida de forma a atenuar o efeito da vegetação; neste caso, os períodos de estação seca devem ser favorecidos. Na medida em que superfícies ricas em ferro sejam determinadas com base no processamento dos dados, alvos localizados em altos topográficos devem ser analisados preferencialmente, evitando ambigüidades causadas por solos transportados e depositados sobre materiais "in situ" (Almeida 2000).

Capítulo 4 — Caracterização Espectral de Gossans Associados a Mineralizações de Pb-Zn-Ba na Bacia de Irecê (BA) através de Espectroscopia de Reflectância

4.1 - INTRODUÇÃO

O mapeamento de uma rocha ou mineral específico, a partir de dados e técnicas de sensoriamento remoto, necessariamente deve envolver algum conhecimento sobre o comportamento espectral desses materiais (Souza Filho & Drury, 1998). O estudo da assinatura espectral de determinado alvo de interesse permite a seleção de intervalos de comprimento de onda onde tais alvos podem ser separados mais facilmente, dentro das limitações intrínsicas ao imageamento multiespectral convencional, que é de média-baixa resolução espectral.

A caracterização espectral de gossans relacionados a mineralizações metálicas, em específico, tem sido objeto de investigação de um número significativo de trabalhos.

Hunt *et al.*(1971) e Hunt & Ashley (1979) demonstraram que fenômenos de transição eletrônica entre íons de ferro, geram bandas de absorção amplas entre o visível e infravermelhopróximo (em torno de 0,43μm, 0,65μm, 0,85μm e 0,93μm), as quais podem ser utilizadas como diagnósticas de minerais ricos nesse íon.

Townsend (1987) realizou estudos de espectroscopia de reflectância em campo e laboratório, utilizando um espectrômetro com quatro canais (0.45-0.50μm, 0.52-0.60μm, 0.63-0.69μm, 0.76-0.90μm), para caracterizar as propriedades mineralógicas de amostras de rochas e solos, contendo hematita, goetita e jarosita. Neste estudo, foram confirmados os principais intervalos do espectro eletromagnético nos quais estes minerais podem ser identificados por sensoriamento remoto, incluindo a observação de que pequenas diferenças, quanto à posição no espectro, de mínimos de reflectância entre 0,850μm e 0,940μm, podem permitir a distinção entre goetita e hematita.

Raines *et al.* (1985), utilizando dados adquiridos por um espectrômetro Beckman 5270, complementados por análises de difratometria de Raio-X e microscopia eletrônica de varredura (MEV), compararam espectros de amostras de gossans genuínos do distrito de Shasta, na Califórnia (EUA), com amostras de limonita transportada ('gossans falsos'), de Queensland, na Austrália e de algumas localidades da Arábia Saudita. Muito embora os 'gossans falsos' e

gossans genuínos apresentem uma assinatura geoquímica similar, os autores demonstraram que existe uma significativa diferença espectral entre os mesmos, com feições marcantes no intervalo espectral próximo a 0,90μm, relacionadas ao predomínio de goetita nos gossans genuínos e nos intervalos espectrais próximos a 1,4 μm e 2,2μm relacionados ao predomínio de caulinita nos 'gossans falsos'.

Neste Capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos sobre a caracterização espectral, qualitativa e semi-quantitativa, das amostras de gossans associados a mineralizações de chumbo, zinco e barita na região de Lapão (BA). Estes resultados serão utilizados, nos capítulos subsequentes, como norteadores no estudo da viabilidade do uso do sensoriamento remoto e de técnicas de processamento digital de imagens para a detecção desses materiais de interesse.

4.2 - GOSSANS

Gossans são formações superficiais resultantes da alteração intempérica de mineralizações sulfetadas. É também denominado de "chapéu de ferro", termo este utilizado para designar o conjunto de formações residuais fortemente enriquecidas em ferro.

Os gossans da área de estudo afloram como corpos alongados, de direção aproximadamente N-S. Distinguem-se de crostas lateríticas genéricas por sua geometria, suas dimensões e por sua composição química. Os gossans geralmente apresentam altas concentrações de As, Sb, Ag, Zn, Cu, Pb e Bi, enquanto nas lateritas ocorrem principalmente concentrações de Al, Si, Cr, V, Ti, Mn e Ni (Oliveira *et al.* 1993).

4.2.1 - Aspectos macroscópicos

Segundo Oliveira *et al.* (1993), na região de Lapão e Irecê, é possível distinguir 4 diferentes fácies de gossans:

(1) Fácies ferruginosa orientada – é um tipo de gossan maciço, com relictos de rochas carbonáticas estratificadas, impregnadas por óxidos e hidróxidos de ferro. A porosidade é reduzida e geralmente situada na interface entre os estratos. Os poros podem estar vazios ou preenchidos por ferro.

- (2) Fácies ferruginosa maciça é um tipo de gossan mais rico em óxidos e hidróxidos de ferro, com porosidade pouco desenvolvida, podendo apresentar estruturas mamelonares na superfície.
- (3) Fácies ferruginosa porosa esses gossans apresentam estruturas do tipo "box-work" e estão geralmente associados a presença de barita.
- (4) Fácies pseudoconglomerática tratam-se de gossans formados por nódulos ferruginosos, de dimensões milimétricas a centimétricas, soldados por uma matriz carbonática. O núcleo dos nódulos pode conter goethita e hematita.

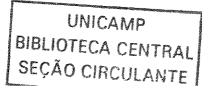
4.2.2 - Caracterização Mineralógica

Os principais constituintes secundários presentes nos gossans da área são a goetita e a hematita. A goethita é sempre presente e normalmente ocorre sobre a forma microcristalina e, mais raramente, fibrorradiada. A hematita ocorre em menor proporção, e sob a forma microcristalina e, por vezes, como revestimento das paredes dos "boxwork".

Como constituintes primários residuais ocorre principalmente quartzo e, subordinadamente, calcita, barita e apatita, e mais raramente algum sulfeto. O quartzo aparece de diversas formas, desde isolado ou em pequenos grupos ou sob a forma acicular. A calcita está normalmente associada aos gossans do tipo fácies ferruginosa orientada, podendo ocorrer também em veios milimétricos. Os sulfetos ocorrem normalmente associados ao quartzo e carbonatos, sob a forma de cubos esparsos ou agrupados em fileira.

4.3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Considerando os diversos aspectos relacionados à caracterização espectral de materiais geológicos, uma síntese da fundamentação teórica, com ênfase nos fenômenos relacionados à interação energia (radiação eletromagnética)-matéria e a técnica de aquisição de dados através de espectroscopia de reflectância, é fornecida a seguir.



4.3.1 - Interação da radiação eletromagnética com minerais e rochas

Pelo princípio da conservação de energia, a radiação eletromagnética (REM), com comprimento de onda específico, que incide sobre determinado alvo, será em parte refletida pela superfície, em parte absorvida pelos átomos e moléculas, podendo ser ainda transmitida, caso o material exiba alguma transparência. A soma desses três componentes é igual à intensidade da energia incidente (e.g., energia irradiada pela fonte de radiação). A relação entre a energia incidente no alvo e o tipo de fenômeno resultante da interação, pode fornecer os seguintes parâmetros espectrais (Drury, 2001):

Transmitância – razão entre a intensidade da REM transmitida por determinado alvo e a incidente.

Absorvância - razão entre a intensidade da REM absorvida por determinado alvo e a incidente. **Reflectância** - razão entre a intensidade da REM refletida por determinado alvo e a incidente.

A interação entre a energia eletromagnética e a matéria ocorre em dois níveis distintos: ao nível macroscópico e ao nível atômico/molecular. No caso especial das rochas, as medidas de reflectância são macroscopicamente controladas pela textura da superfície, granulometria, forma, estrutura dos minerais e geometria da iluminação. Neste nível, os principais fenômenos envolvidos são: reflexão, refração e espalhamento da radiação incidente. Ao nível microscópio as medidas de reflectância são dependentes da composição mineralógica do material. As interações microscópicas são responsáveis por determinadas feições de absorção espectral da radiação cujas características dependem do tipo de estrutura interna dos constituintes, do tamanho dos seus raios atômicos, das forças de ligação e das impurezas iônicas contidas no material. (Meneses 2001).

4.3.2 - Origem das feições espectrais

As feições espectrais de um determinado material correspondem às porções da curva de reflectância em determinado comprimento de onda, com intensidade e forma bem definidas e características do material. Essas feições espectrais são produzidas como conseqüências de processos eletrônicos (transições atômicas) e de processos vibracionais (transições moleculares) (Hunt e Salisbury 1970, Menezes 2001).

 Transições eletrônicas: ocorrem ao nível do átomo, em sólidos, líquidos e gases, são importantes principalmente para os metais de transição, tais como: ferro, cobre, níquel, cromo, cobalto, manganês, etc. Esse tipo de transição requer alta energia e ocorre essencialmente nas regiões correspondes às faixas do visível (VIS) ao infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Estes processos estão relacionados basicamente a: (i) efeitos do campo cristalino, que ocorre devido a transições atômicas envolvendo Ni, Cr, Co e principalmente Fe (Hunt 1977, Clark 1999, Hauff 1995); (iii) transferência de carga, o qual ocorre quando a energia absorvida pelo objeto causa a migração de elétrons entre íons vizinhos, ou entre íons e seus ligantes (Clark 1999); (iii) centro de cores, causado por irradiação (radiação solar ultravioleta) de um cristal impuro; (iv) bandas de condução, que se refere ao nível mais alto de energia ocupado pelo elétron.

• Transições vibracionais: ocorrem ao nível da molécula e resulta em vibrações ou pequenas mudanças na disposição dos átomos de componentes sólidos, líquidos ou gasosos. Esta transição predomina na região do infravermelho de ondas curtas e acima deste, está relacionada à presença dos íons OH, CO³, H2O (Hunt e Ashley 1979, Clark *et al.*1990) e depende de quantidades médias de energia. As feições de absorção envolvidas nestes processos são mais intensas, se comparadas àquelas geradas por processos eletrônicos.

4.3.3 - Espectroscopia de Reflectância

As feições de absorção de alguns íons e moléculas originadas pelos processos supracitados são diagnósticas de uma mineralogia específica e úteis na definição das características espectrais de minerais e rochas.

O comportamento espectral de um determinado alvo é diretamente relacionado às suas características físicos-químicas (Hunt 1977, 1980) e pode ser definido como a medida de reflectância do material. Esta medida de reflectância é representada por feições na forma de linhas, bandas, depressões ou mudanças de inclinação das curvas espectrais, cujas posições, formas e intensidade são uma conseqüência da constituição química do material e da geometria do arranjo de seus átomos (Hunt 1979).

A espectroscopia de reflectância (ou espectrorradiometria de reflectância) é uma técnica analítica que tem a função de medir, em diferentes comprimentos de onda, a REM refletida da superfície dos objetos e representá-la na forma de um gráfico, denominada curva de reflectância espectral. Essa curva relaciona a reflectância espectral do alvo (relativa a uma placa de referência padrão com reflectância conhecida) vs comprimento de onda, utilizando as regiões do

espectro visível (0,350μm – 0,700μm), infravermelho próximo (0,700μm – 1,00μm) e infravermelho de ondas curtas (1,00μm – 2,50μm) (Clark 1999, 1995). É um método rápido e não destrutivo, utilizado para a caracterização *in situ* das propriedades espectrais dos materiais, sendo ainda relevante para a interpretação mais precisa de imagens multiespectrais e hiperespectrais, obtidas por sensores remotos.

As principais características espectrais de diferentes alvos geológicos tem sido abordadas em vários trabalhos, dentre os quais destacam-se: Hunt & Salisbury (1970); Hunt (1977); Hunt & Ashley (1979) e Clark (1999).

4.3.4. – Fatores que afetam as determinações espectrais

Os principais fatores que afetam diretamente na determinação da composição mineralógica das rochas por espectroscopia por reflectância são: o tipo de superfície, granulometria e forma das partículas e geometria da iluminação (Meneses 2001):

- <u>Tipo de superfície</u>: quando a superfície é lisa ocorre a reflectância do tipo especular onde toda ou quase toda a energia incidente é refletida numa única direção, perpendicular a radiação incidente. Quando a superfície é rugosa, ocorre a difusão da radiação refletida em várias direções.
- Granulometria e forma dos minerais: uma diminuição no tamanho das partículas dos minerais da rocha ou do solo, quase que invariavelmente é acompanhada de um aumento de albedo (valor médio da reflectância medido num dado intervalo de comprimento de onda. Com relação à forma dos minerais, quanto maior a esfericidade das partículas, maior a quantidade de superfícies expostas. Este fato, provoca um maior número de reflexões entre as várias superfícies dos grãos, acompanhadas de perdas de energia, dificultando o escape da luz, e desta forma atenuando a radiação refletida.
- Geometria de iluminação: corresponde a relação geométrica relativa entre as posições da fonte de iluminação, objeto e sensor. Ao analisar a dependência angular entre a fonte de iluminação, conclui-se que os maiores valores de reflectância e de absortância ocorrem no intervalo angular entre 15° e 30° de iluminação.

4.3.5- Feições Espectrais Diagnósticas de Materiais Geológicos

As feições espectrais diagnósticas de rochas e minerais na região do VIS - NIR (0,350μm – 1,00μm) são originadas por transições eletrônicas e envolvem principalmente íons de Fe (Townsend 1987). A Tabela 4.1 apresenta um sumário dos pontos, intervalos ou bandas de absorção espectrais utilizadas como diagnósticas na caracterização de hidróxidos, óxidos e sulfatos que contém o íon Fe em sua estrutra (Hunt & Ashley 1979).

Tabela 4.1-Localização das bandas de absorção diagnósticas dos principais óxidos e hidróxidos de ferro.

Minerais	Principais bandas de absorção (μm)		
Goetita	0,650/0,900-0,940		
Hematita	0,850		
Jarosita	0,430/0,900-0,940		
Limonita	0,650/0,900-0,940		

As feições espectrais de interesse geológico na região do SWIR (1,00 μm – 2,5μm) são originadas por transições vibracionais relacionados à presença dos íons OH⁻, CO³⁻, H₂O (Hunt e Salisbury 1971, Hunt *et al.* 1971). A Tabela 4.2 apresenta as principais bandas de absorção relacionadas à presença desses íons em minerais.

Tabela 4.2 - as principais bandas de absorção, resultante de transições vibracionais, envolvendo os íons OH', CO^3 , H_2O .

Íons/moléculas	Principais bandas de absorção (μm)
CO ³⁻	1,900, 2,000, 2,160, 2,350 e 2,550
Mg-OH	2,300 e 2,400
Al-OH	2,200
H ₂ O	1,400 e 1,900
ОН	1,400 e 2,300

As feições diagnósticas na região do infravermelho termal (7μm - 14μm), são originadas por processos vibracionais e estão diretamente relacionadas à massa atômica, campos de força interatômicos e, particularmente, a geometria molecular (Salisbury *et al.* 1991).

Essa região do espectro é de grande interesse geológico, pois fornece informações sobre a composição das rochas, sendo muito utilizada para o mapeamento remoto de silicatos, que apresentam feições marcantes na janela atmosférica de 8μm - 12μm (Hook *et al.* 1999). A Tabela 4.3 sumariza as principais feições de absorção dos silicatos, carbonatos, óxidos/hidróxidos, hidroxila no infravermelho termal.

Tabela 4.3 - Principais feições de absorção dos silicatos, carbonatos, óxidos/hidróxidos, hidroxila no infravermelho termal.

Elementos	Principais bandas de absorção
Silicatos	8μm-12μm
Carbonatos	7 μm, 11.4 μm, 14.3 μm
Óxidos/hidróxidos	8.28 μm
OH	8.63 μm

4.4 – MATERIAIS E MÉTODOS

Cinco amostras superficiais de gossans foram coletadas nas proximidades das cidades de Lapão e Irecê, estando as mesmas posicionadas sobre rochas da Unidade Nova América Inferior, Formação Salitre (amostras coletadas e cedidas pelo Dr. Washington Rocha). As medições espectrais foram realizadas diretamente nessas amostras, sem nenhuma preparação prévia, sob condições controladas, em laboratório. Trinta leituras foram realizadas para cada amostra, das quais obteve-se a média aritmética, para posterior estudo das propriedades espectrais e mineralógicas dos gossans.

4.4.1. Medidas Espectrais com o Espectrômetro FieldSpec Full Resolution – Parâmetros

Nas análises em laboratório com o espectrômetro FieldSpec Full Resolution, foi utilizada uma lâmpada de halogênio de alta temperatura (opera a 3000° K), acoplada a um tripé montado a uma distância de 50 cm da amostra, como fonte de iluminação artificial estável. Esse arranjo permitiu a irradiação da amostra sob um ângulo de aproximadamente 30°. A fibra ótica, ligada diretamente ao espectrômetro, foi montada num suporte do tipo 'revolver' (que conecta as frentes óticas ao cabo de fibra ótica) e posicionada de modo a perfazer um ângulo também de 30° em relação ao alvo. Como obturador do campo instantâneo de visada, foi utilizada uma lente de

5°, colocada a uma distância de 20cm da amostra, o que proporcionou leituras num campo circular com diâmetro de aproximadamente 1,75cm. A calibração do aparelho foi realizada por meio de uma placa de referência constituída por um composto ótico sintético (*Spectralon*), que se comporta como uma superfície lambertiana quase ideal, capaz de refletir 100% da luz incidente.

4.4.2. Classificação Espectro-mineralógica

A classificação espectro-mineralógica das curvas de reflectância espectral, derivadas das amostras medidas com o FieldSpec FR, foi realizada com o auxílio dos programas SIMIS (Spectrometer Independent Mineral Identification Software) Field e Feature Search (Mackin, 1998).

Nas análises através do SIMIS, dois métodos foram testados para a extração das bandas de absorção dos espectros (Pontual *et al.* 1997): o método da 'reflectância absoluta' e o método da 'diferença do contínuo'.

No método da reflectância absoluta, a profundidade das feições é determinada a partir do valor de reflectância mais alto do espectro; a posição das feições de absorção, sejam essas mais amplas ou agudas, são analisadas tal qual originalmente medidas pelo espectrômetro.

O método da 'diferença do contínuo' (hull differences) é mais complexo. Num primeiro passo, o contínuo (linha base, de geometria convexa, que toca o máximo número possível de pontos da curva de reflectância espectral, sem cruza-la) é calculado (Figura 4.1). Em seguida, o valor da reflectância original para cada comprimento de onda do espectro é subtraído do valor de reflectância para os mesmos comprimentos de onda do contínuo. O valor resultante dessa subtração é então subtraído de 100 (ie., remoção do contínuo) (Figura 4.1). A principal vantagem deste método é que feições de absorção, tanto evidentes ou sutis, são extremamente realçadas, facilitando a sua extração automática. A desvantagem desse método é que feições mais amplas, como aquelas relacionadas aos íons de Fe, podem ser negligenciadas após a correção do contínuo. Isso pode ser notado na Figura 4.1 (espectro de fengita + siderita), onde o gradiente do espectro de reflectância entre 1,3μm e 1,6μm (um efeito relacionado à presença do íon Fe²⁺), aparece completamente removido após a correção. Outra desvantagem desse método é que o processo de correção pode implicar em pequenas mudanças da posição da feição de absorção, em termos do comprimento de onda original. Esse efeito é mais severo em situações onde o

gradiente do contínuo é alto e as feições são amplas e/ou rasas. Isso também pode ser notado na Figura 4.1, onde a feição de absorção em torno de 2,45µm é posicionada em 2,453µm na curva de reflectância espectral original, e em 2,448µm na curva com o contínuo removido.

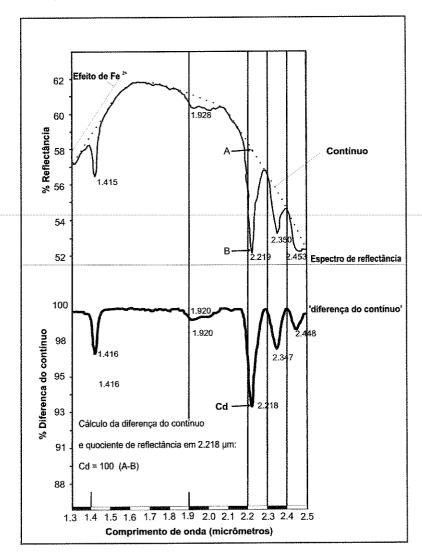


Figura 4.1 – Método da 'diferença do contínuo' testado para a extração das bandas de absorção (Pontual *et al.* 1997).

Para as análises e classificação espectro-mineralógica através do SIMIS, os seguintes parâmetros e rotinas foram utilizadas:

posição da feição de absorção: por meio deste procedimento a biblioteca espectral selecionada é convertida através de um algoritimo em feições espectrais. Esse algoritimo subtrai o contínuo dos espectros e extrai as 20 maiores feições de absorção, fornecendo informações sobre a posição, intensidade e largura das bandas de absorção.

- forma da curva espectral: nesse procedimento as curvas espectrais são normalizadas e, por meio de um algoritimo de correlação cruzada, os espectros são comparados com a biblioteca espectral de referência.
- desmistura espectral: nessa rotina, o espectro obtido por meio de funções lineares, ajustadas pelo método dos mínimos quadrados (Settle & Drake 1993), é modificado utilizando o algorítimo Generalised Linear Least Square. Em função de sua robustez e menor ambigüidade quanto aos resultados, esse método foi aquele preferencialmente adotado nessa pesquisa.

A blblioteca espectral de referência utilizada no ambiente do SIMIS para análise automática do conteúdo mineralógico das curvas espectrais foi a do *United States Geological Survey - USGS* (http://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html). Esta biblioteca contém espectros de 423 minerais, abrangendo a faixa entre 0,205μ - 2,976μm. Nove desses minerais foram selecionados para compor uma biblioteca específica, re-amostrada para o intervalo de comprimentos de onda coberto pelo FieldSpec FR (0,35 - 2,50μm), e voltada à análise das curvas espectrais das amostras de gossans coletadas na Bacia de Irecê. Os minerais inclusos nessa biblioteca foram: goetita (3 curvas espectrais), hematita (2 curvas espectrais), jarosita, limonita, magnetita, pirita (2 curvas espectrais), calcita, dolomita e siderita. As principais características destes minerais selecionados estão contidas na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Principais caracterísiticas dos minerais selecionados para compor a biblioteca espectral

Mineral	Fórmula	Localidade (Amostra)	Descrição da Amostra	Descrição microscópica	DRX
calcita	CaCO₃	Alligator ridge Mine (Nevada)	Formam séries com rodocrosita(MnCO ₃). Trimorfo com aragonita (CaCO ₃) e vaterita (CaCO ₃)	-	calcita, quartzo
dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	Grapevine Mountain	Formam séries com ankerita (CaCO ₃) e com kutnohorita Ca (Mn, Mg, Fe)(CO ₃)	-	dolomita, calcita
goethita 1	FeO(OH)	Biwabik, Minn		90% Vol. goethita fibrosa, 10% Vol. quartzo	
goethita 2	FeO(OH)	-	Polimorfo com alkaganeita FeO(OH), Feroxyhyta e lepidocrosita	50% Vol. limonita, cobrindo gãos de quartzo, 35% Vol. de limonita de granulometria fina, 15% Vol de limonita de granulometria grosseira	-
goethita 3	FeO(OH)	Kent (Connecticut)	Polimorfo com alkaganeita FeO(OH), Feroxyhyta e lepidocrosita	60% Vol. quartzo, 20% Vol, goethita de granulometria fina, 20% Vol goethita de granulometria grosseira	-
hematita 1			2% de hematite + 98% de cristais de quartzo putros	-	-
hematita 2	Fe ₂ O ₃	-	Dimorfo com maghemita (Fe ₂ O ₃)	-	hematita pura
jarosita	Fe ₂ O ₃	-	Amostra sintetizada a 200°C	-	
limonita	FeO(OH)nH ₂ O	Toscaloosa County (Alabama)	Mistura de lepidocrosita hidratada, goethita e hematita	-	_
magnetita	Fe ²⁺ (Fe ³⁺) ₂ O ₄	Ishpeming, Mich	Formam series com magnésio- ferrita e com jacobsita (MnFe ₂ O ₄)	_	-
pirita 1	FeS₂	Rico (Colorado)	Formam séries com cattierita (CoS ₂). Dimorfo com marcassita (FeS ₂)	_	us.
pirita 2	FeS₂	High Falls, ulster County, NY	Formam series com magnesita (MgCO ₃) e com rodocrosita	-	
siderita	FeCO₃	Roxburg (Connectcut)	Formam series com magnesita (MgCO ₃) e com rodocrosita	-	-

A classificação através do SIMIS, adicionalmente, proporciona três parâmetros críticos para a avaliação dos resultados: o ruído do espectro, a variação espectral e, o mais importante, o erro da mistura espectral formulada (com base nos espectros de referência/biblioteca) em relação à curva espectral das amostras. A porcentagem do erro de cada classificação é relacionada à qualidade do resultado, segundo a seguinte escala (Mackin, 1998): 0-5% - excelente; 5-10% - bom; 10-15% - razoável; 15-25% - questionável; 25-35% - ruim; $\geq 35\%$ - inaceitável

4.5 – RESULTADOS

As amostras analisadas possuem granulometria fina e são constituídas basicamente de óxidos e hidróxidos de ferro, os quais encontram-se distribuídos uniformemente nas amostras. Desta forma, embora em número reduzido, assume-se que as amostras aqui estudadas são representativas dos gossans presentes na área de estudo.

4.5.1 - Amostra Lapão Fazenda Ritmo

As curvas de reflectância obtidas em laboratório para esta amostra apresentam feições de absorção diagnósticas nos comprimentos de onda correspondentes ao VIS-NIR (0,350 – 1,00μm) e SWIR (1,00 – 2,5μm), feições estas originadas por transições eletrônicas e vibracionais (Hunt & Ashley 1979). Essas feições de absorção apresentam-se de forma distinta, decorrente principalmente da presença dos íons Fe³⁺, Fe²⁺, e OH⁻ na estrutura cristalina dos minerais.

No VIS-NIR, através do método da diferença do contínuo, duas feições de absorção pouco expressivas, centradas em 0,524μm e 0,702μm, foram detectadas (Figura 4.2). O método da reflectância absoluta, por sua vez, forneceu uma feição adicional, ampla e de relativa maior profundidade, em 0,983μm (Figura 4.3). A feição em 0,702μm é indicativa da goethita. As feições em 0,524μm e 0,983μm são indicativas da ocorrência simultânea de goethita e limonita.

As feições extraídas no SWIR através de ambos os métodos concentram-se nos seguintes intervalos ou pontos do espectro:1,419-1,432μm; 1,932μm e 2,203-2,207μm (Figuras 4.2 e 4.3). As feições em torno de 1,4μm e 1,9μm são amplas e suaves, ocorrem em todas as amostras de gossans analisadas e são típicas da presença de hidroxilas (OH) e moléculas de água (H₂O) (Hunt & Salisbury, 1971). A feição em 2,203μm é muito sutil e indicativa da ocorrência

do íon OH e da ligação Al-O-H na estrutura dos minerais (Hunt & Salisbury, 1970; Clark. *et al.*1990).

Na análise espectral, o SIMIS identificou os seguintes minerais: goetita tipo-4 (58,83%), limonita (31,84%) e goethita tipo-3 (9,33%). O erro de classificação para esta amostra foi de 11.02% (Figuras 4.4 e 4.5).

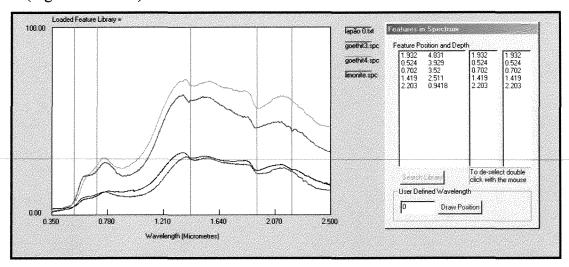


Figura 4.2. Curva de reflectância espectral da amostra Fazenda Ritmo (em preto). As curvas em azul, vermelho e verde são, respectivamente, espectros de limonita, goetita tipo-3 e goetita tipo-4 da biblioteca de referência. Note, no gráfico e na tabela à direita, as feições de absorção (posição e profundidade) extraídas pelo método da diferença do contínuo. Largura da busca = 5 nanômetros. Limiar de ruído = 0.5%.

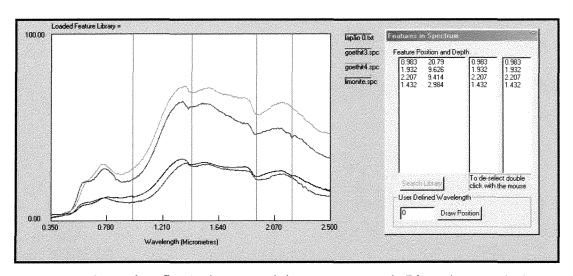
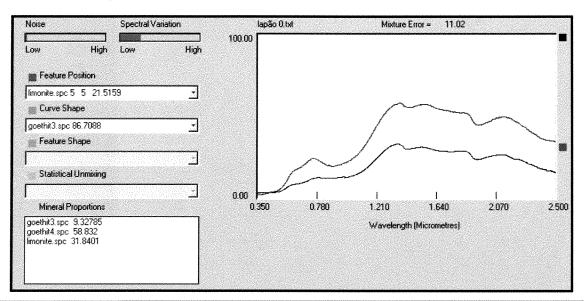


Figura 4.3. Curva de reflectância espectral da amostra Fazenda Ritmo (em preto). As curvas em azul, vermelho e verde são, respectivamente, espectros de limonita, goetita tipo-3 e goetita tipo-4 da biblioteca de referência. Note, no gráfico e na tabela à direita, as feições de absorção (posição e profundidade) extraídas pelo método da reflectância absoluta. Largura da busca = 5 nanômetros. Limiar de ruído = 0,5%.



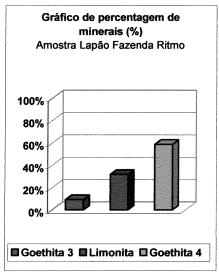


Figura 4.4. Classificação espectro-mineralógica da curva de reflectância espectral da amostra Fazenda Ritmo (em preto), baseada no método de desmistura espectral. A curva em azul corresponde à mistura espectral, constituída com base nos espectros disponíveis na biblioteca espectral de referência, que mais se aproxima da curva da amostra Fazenda Ritmo. Note que o erro da mistura é de 11% (ie., qualidade da classificação entre boa e razoável).

Figura 4.5. Proporções minerais obtidas através da classificação SIMIS na amostra Fazenda Ritmo.

4.5.2 - Amostra Irecê

As curvas espectrais analisadas para esta amostra apresentam feições de baixa reflectância no VIS-NIR, todas originadas por transições eletrônicas envolvendo principalmente o íon férrico (Fe³⁺). Estas feições, extraídas identicamente pelos métodos da reflectância absoluta e diferença do contínuo, estão posicionadas em 0,564μm e 0,913μm (Figura 4.6). Tais bandas de absorção são diagnósticas da presença de goethita e hematita. A feição em 0,913μm caracteriza bem a ocorrência dos dois minerais, pois de acordo com Hunt & Ashley (1979), quando ambos estão presentes em proporções similares, a combinação de suas feições nesta região produz uma banda de absorção mista entre 0,85 – 0,93μm.

Na região do SWIR, as principais feições de absorção estão centradas em 1,457μm e 1,932μm (Figura 4.6) e indicam a ocorrência de minerais portadores de hidroxilas (OH) e de moléculas de água (Hunt, 1977).

Nas análises e classificação mineralógica feitas através do SIMIS, foram identificados, como os principais componentes da amostra Irecê, a hematita tipo-2 (61,91%) e a goethita tipo-4 (38,09%) (Figura 4.7). O erro de classificação foi de 10.18% (Figura 4.8).

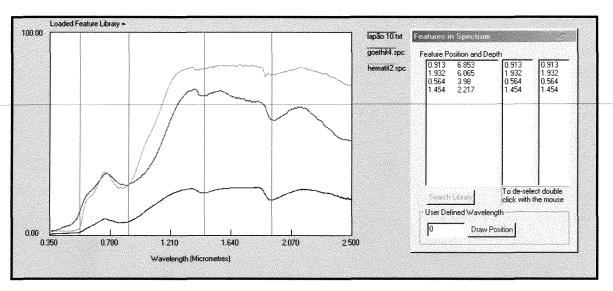
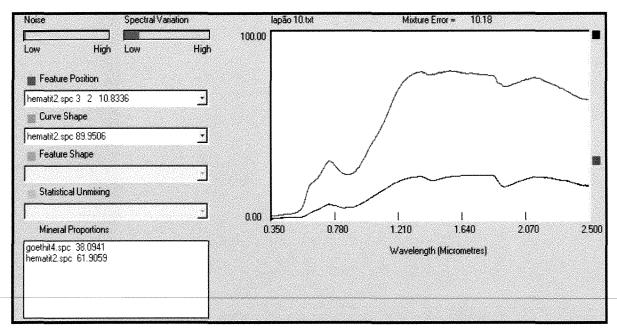


Figura 4.6. Curva de reflectância espectral da amostra Irecê (em preto). As curvas em vermelho e verde são, respectivamente, espectros de goetita tipo-4 e hematita tipo-2 da biblioteca de referência. Note, no gráfico e na tabela à direita, as feições de absorção (posição e profundidade) extraídas pelo método da diferença do contínuo. Largura da busca = 5 nanômetros. Limiar de ruído = 0,5%.



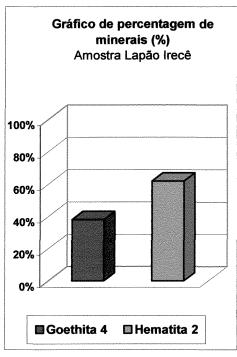


Figura 4.7. Classificação espectro-mineralógica da curva de reflectância espectral da amostra Irecê (em preto), baseada no método de desmistura espectral. A curva em azul corresponde à mistura espectral, constituída com base nos espectros disponíveis na biblioteca espectral de referência, que mais se aproxima da curva da amostra Irecê. Note que o erro da mistura é de 10% (ie., boa qualidade da classificação).

Figura 4.8. Proporções minerais obtidas através da classificação SIMIS na amostra Irecê.

4.5.3 - Amostra Lapão 1

As curvas da amostra Lapão 1 apresentam feições eletrônicas amplas e suaves na região do VIS-NIR, com centros posicionados em 0,538μm (Figura 4.9) e 0,885μm (Figura 4.10). A primeira feição reconhecida pelo método da diferença do contínuo é indicativa da ocorrência dos

três minerais: limonita, hematita e goethita. A feição em 0,885µm extraída pelo método da reflectância absoluta é associada à presença dos minerais hematita e goethita.

No SWIR (Figuras 4.9 e 4.10) a banda de absorção posicionada próximo a 1,4 μm e a feição entre 1,923-1,936μm são indicativas da presença do íon OH e da molécula de água . Já a feição entre 2,205-2,209μm está relacionada a presença de hidroxila (OH) e da ligação Al-O-H na estrutura cristalina dos minerais (Hunt e Ashley, 1979).

A mineralogia identificada, obtida a partir da comparação da curva espectral da amostra com a biblioteca espectral, foi a seguinte: limonita (57,96%), hematita tipo-2 (31,77%) goethita tipo-4 (10,27%).O erro de classificação para esta amostra foi de 5.89% (Figuras 4.11 e 4.12).

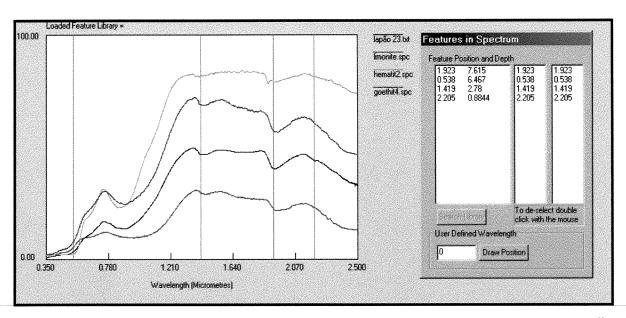
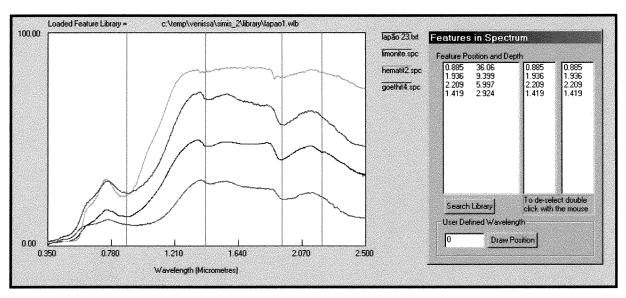
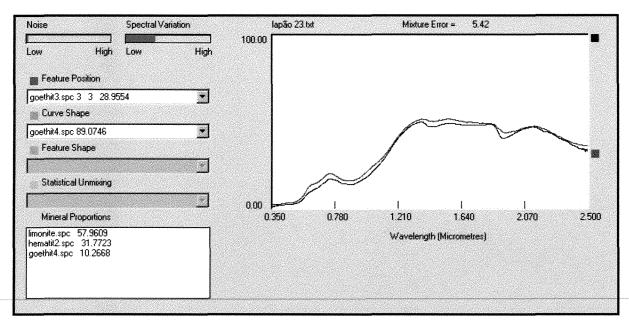


Figura 4.9. Curva de reflectância espectral da amostra Lapão 1 (em preto). As curvas em vermelho e verde são, respectivamente, espectros de limonita, goetita tipo-4 e hematita tipo-2 da biblioteca de referência. Note, no gráfico e na tabela à direita, as feições de absorção (posição e profundidade) extraídas pelo método da diferença do contínuo. Largura da busca = 5 nanômetros. Limiar de ruído = 0,5%.



Figuras 4.10. Curva de reflectância espectral da amostra Lapão 1 (em preto). em vermelho e verde são, respectivamente, espectros de limonita, goetita tipo-4 e hematita tipo-2 da biblioteca de referência. Note, no gráfico e na tabela à direita, as feições de absorção (posição e profundidade) extraídas pelo método da reflectância absoluta. Largura da busca = 5 nanômetros. Limiar de ruído = 0,5%.



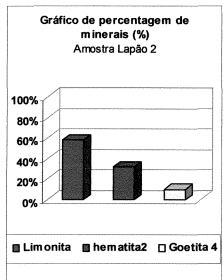


Figura 4.11. Classificação espectro-mineralógica da curva de reflectância espectral da amostra Lapão 1(em preto), baseada no método de desmistura espectral. A curva em azul corresponde à mistura espectral, constituída com base nos espectros disponíveis na biblioteca espectral de referência, que mais se aproxima da curva da amostra Lapão. Note que o erro da mistura é de 5,42% (ie., boa qualidade da classificação, próxima a excelente).

Figura 4.12. Proporções minerais obtidas através da classificação SIMIS na amostra Lapão 1.

4.5.4 - Amostra Lapão 2

Nas Figuras 4.13 e 4.14 são apresentados os espectros para a amostra Lapão 2. As feições de absorção posicionadas em 0,511 μm e 0,691 μm (Figura 4.13), estão relacionadas a presença dos minerais goethita e limonita (Hunt e Ashley 1979). A feição em 0,89μm (Figura 4.14) é indicativa da ocorrência de goethita na amostra.

No SWIR as feições de absorção em 1,417 e 1,931 μm (Figuras 4.13 e 4.14) são atribuídas a ocorrência de minerais na amostra contendo moléculas de hidroxila e água. Em 2,207μm, ocorre uma feição que é indicativa do íon OH e da ligação Al-O-H; entretanto, a

profundidade desta feição é muito rasa para que possa ser associada a um determinado mineral de argila, por exemplo.

O classificador SIMIS reconheceu como os principais constituintes da amostra os seguintes minerais: goethita tipo-4 (45,43%), limonita (40,79%) e goethita tipo-3 (13,78%). O erro de classificação foi de 4,91% (Figuras 4.15 e 4.16).

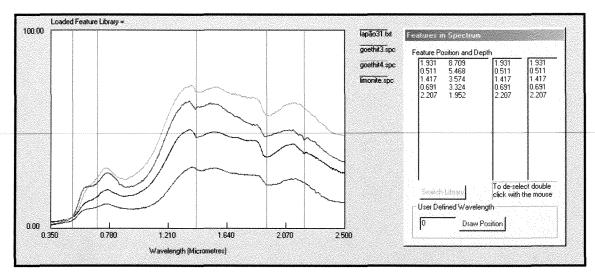


Figura 4.13. Curva de reflectância espectral da amostra Lapão 2 (em preto). As curvas em vermelho, verde e azul são, respectivamente, espectros de goetita tipo-3, goetita tipo-4 e limonita. Note, no gráfico e na tabela à direita, as feições de absorção (posição e profundidade) extraídas pelo método da diferença do contínuo. Largura da busca = 5 nanômetros. Limiar de ruído = 0,5%.

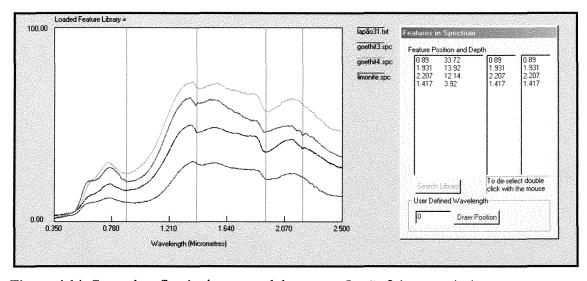
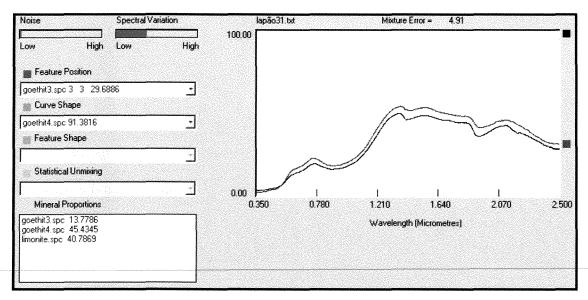


Figura 4.14. Curva de reflectância espectral da amostra Lapão 2 (em preto). As curvas em vermelho, verde e azul são, respectivamente, espectros de goetita tipo-3, goetita tipo-4 e limonita. Note, no gráfico e na tabela à direita, as feições de absorção (posição e profundidade) extraídas pelo método da reflectância absoluta. Largura da busca = 5 nanômetros. Limiar de ruído = 0,5%.



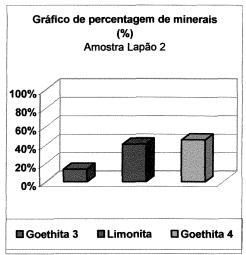


Figura 4.15. Classificação espectro-mineralógica da curva de reflectância espectral da amostra Lapão 2 (em preto), baseada no método de desmistura espectral. A curva em azul corresponde à mistura espectral constituída, com base nos espectros disponíveis na biblioteca espectral de referência, que mais se aproxima da curva da amostra Lapão 2. Note que o erro da mistura é de 4,9% (ie., excelente classificação).

Figura 4.16. Proporções minerais obtidas através da classificação SIMIS na amostra Lapão 2.

4.5.5 - Amostra Lapão 3

As curvas espectrais obtidas para a amostra Lapão 3 apresentam uma queda de reflectância em direção ao visível, principalmente entre 0,350μm-0,564μm, causada por uma transferência de carga entre os íons Fe³⁺ e Fe²⁺ (Figura 4.17) (Morris *et al.* 1985). As feições de absorção posicionadas em 0,52 μm e 0,670 μm são originadas por transições eletrônicas e indicativa da presença de limonita, goethita e hematita. A feição centrada em 1,04 μm é diagnóstica da presença de limonita.

As feições originadas por processos vibracionais estão posicionadas em 1,417, 1,926 e 2,205µm (Figura 4.17). A feições em 1,417 e 1,926µm apresentam-se bem marcadas e

relacionam-se a presença de minerais contendo hidroxila e água em sua estrutura cristalina. A feição em 2,205 µm, inexpressiva, está relacionada ao íon OH e a ligação Al-O-H.

A classificação espectro-mineralógica através do SIMIS revelou os seguintes minerais: limonita (61,95%) goethita tipo-4 (18,76%), hematita (11,09%) e goethita tipo-3 (8,20%). O erro de classificação calculado para essa amostra foi de 4,67% (Figura 4.18 e 4.19).

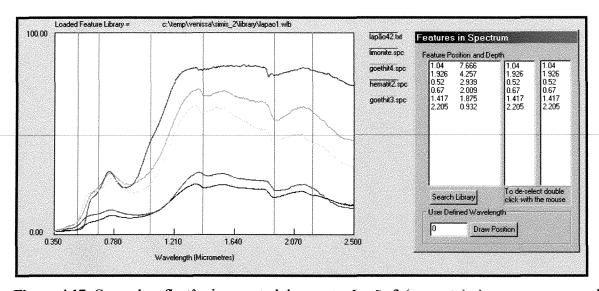
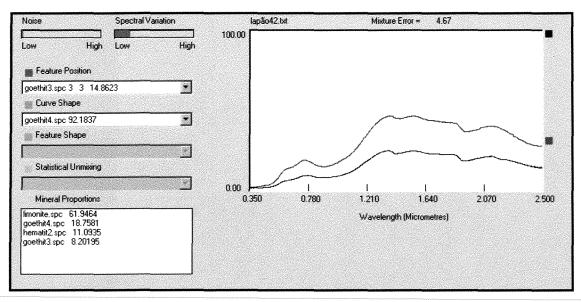


Figura 4.17. Curva de reflectância espectral da amostra Lapão 3 (em preto). As curvas em vermelho, amarelo, verde e são, respectivamente, espectros de limonita, goetita tipo-4, hematita2 e goetita tipo-3. Note ainda as feições de absorção (posição e profundidade) extraídas pelo método da diferença do contínuo. Largura da busca = 5 nanômetros. Limiar de ruído = 0,5%.



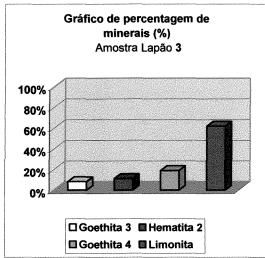


Figura 4.18. Classificação espectro-mineralógica da curva de reflectância espectral da amostra Lapão 3 (em preto), baseada no método de desmistura espectral. A curva em azul corresponde à mistura espectral, constituída com base nos espectros disponíveis na biblioteca espectral de referência, que mais se aproxima da curva da amostra Lapão 3. Note que o erro da mistura é de 4,6% (ie., excelente classificação)

Figura 4.19. Proporções minerais obtidas através da classificação SIMIS na amostra Lapão 3.

4.6 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As medidas espectrais e análises interpretativas realizadas nas cinco amostras de gossans, coletadas na Bacia de Irecê, forneceram informações valiosas acerca do comportamento espectral destes alvos, contribuindo para o estabelecimento de critérios para a sua possível detecção por sensoriamento remoto.

Na Figura 4.20, as curvas espectrais das amostras de gossans foram plotadas conjuntamente, com a finalidade de ressaltar suas diferenças e semelhanças com relação à forma da curva, intensidade e posição das bandas de absorção.

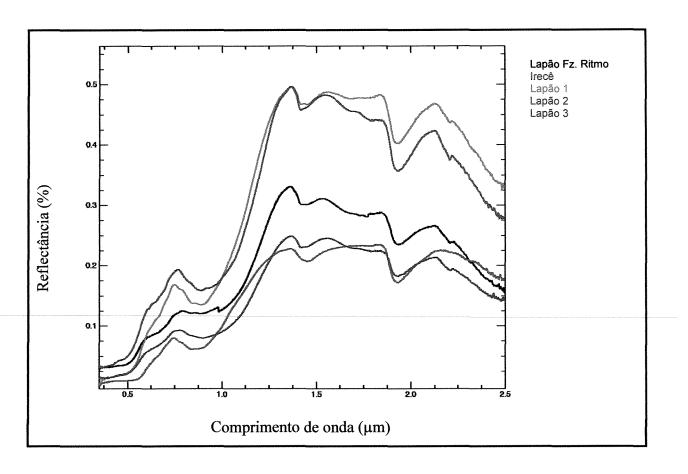


Figura 4.20 - Comparação entre as curvas espectrais das amostras de gossans da Bacia de Irecê.

Analisando as cinco curvas, foi possível concluir que as mesmas apresentam algumas variações espectrais. Em praticamente todos os espectros há variabilidade quanto à forma, intensidade e principalmente em relação à posição das feições. As principais feições de absorção, diagnósticas da presença do íon Fe³⁺, bem como aquelas típicas do íon OH⁻ e de moléculas de água, estão centradas, praticamente em todas as curvas, em comprimentos de onda diferentes (amostra Fz Ritmo – 0,524μm, 0,702μm, 0,983μm, 1,419-1,432μm, 1,932μm, 2,203-2,207μm; amostra Irecê - 0,564μm, 0,913μm, 1,457μm, 1,932μm; amostra Lapão 1 – 0,538μm, 0,885μm, 1,923μm-1,936μm, 1,419μm, 2,205-2,207μm; amostra Lapão 2 – 0,511μm, 0,691μm, 1,417μm, 1,931μm, 2,207μm; amostra Lapão 3 – 0,52μm, 0,670μm, 1,04μm, 1,417μm, 1,926μm, 2,205μm)

As curvas das amostras Lapão 1, Lapão 2 e Lapão 3 têm forma e intensidade similares. Um segundo conjunto de amostras que apresentam feições com formas semelhantes é representado pelos espectros Lapão Fazenda Ritmo e Lapão 3. Nestes espectros todas as feições do VNIR (0,4μm – 1,3μm) são amplas e suaves; no SWIR (1,3μm – 2,5μm), as feições centradas

próximas a 1,4μm apresentam a mesma forma e intensidade, e as feições posicionadas próximas a 1,9μm, em ambas as curvas, são bem definidas. A curva Irecê é a que apresenta a maior diferença quanto à forma das feições, se comparada com os espectros das outras amostras. Isso pode ser observado principalmente nas feições em 0,913μm e 1,457μm. Outra diferença identificada neste espectro é a ausência da feição em 2,2μm, que apesar de pouco expressiva, foi caracterizada em todas as outras curvas espectrais.

Um outro aspecto importante observado em todos os espectros se refere ao alto de reflectância bem definido, próximo a 0,65µm (região do vermelho do espectro eletromagnético), relacionado genericamente a presença de ferro nas amostras e a sua cor avermelhada.

4.7 – SIMILARIDADES ESPECTRAIS DE GOSSANS E SUPERFÍCIES LATERÍTICAS GENÉRICAS

Como não foram realizadas medidas espectrais de amostras de possíveis 'falsos gossans' na área de estudo, será feita uma comparação das curvas espectrais dos gossans genuínos da Bacia de Irecê, com as curvas espectrais de superfícies lateríticas genéricas, não associadas a mineralizações, documentadas na literatura. Para este estudo as curvas espectrais das lateritas foram extraídas do trabalho realizado por Raines *et al.* (1985).

Esta comparação tem como objetivo avaliar possíveis diferenças e similaridades de feições espectrais entre essas coberturas, as quais possam ser utilizadas na separação das mesmas por meio de sensores remotos imageadores.

Algumas diferenças importantes resultaram desta comparação (Figura 4.21). As lateritas são caracterizadas por um *doublet* centrado próximo a 1,4μm e 2,2μm, diagnósticos da ocorrência do mineral caulinita. Tanto nas feições dos gossans da Bacia de Irecê, quanto nas de laterita ("falsos gossans), ocorrem feições próximas a 1,9μm e 0,9μm, apenas com algumas diferenças sutis quanto à forma, posição e intensidade das feições (Figura 4.21). Assim, a presença de feições de absorção em torno de 2,2μm, relacionadas à presença de minerais de argila, em particular da caulinita, pode ser utilizada como fator discriminante entre os gossans genuínos e outras superfícies ferruginosas.

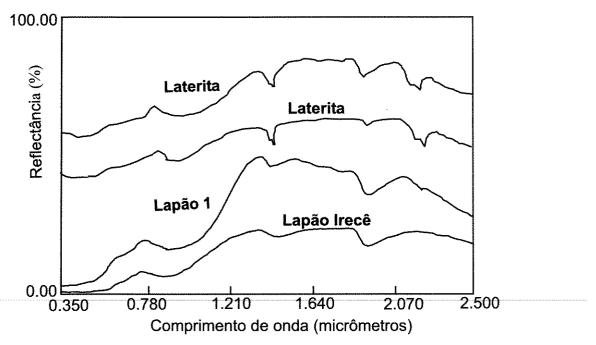


Figura 4.21 – Comparação entre amostras de gossans e lateritas genéricas.

Capítulo 5 – Mapeamento de Gossans Associados a Mineralizações de Pb-Zn-Ba na Bacia de Irecê (BA) Utilizando Dados de Sensoriamento Remoto no Espectro Refletido

5.1 – INTRODUÇÃO

Imagens de sensoriamento remoto são fontes de dados cada vez mais utilizadas e de grande importância para estudos geológicos, desde escalas regionais até de detalhe. A utilização de técnicas de processamento digital possibilita a identificação, extração e interpretação de informações contidas nessas imagens (Drury 2001), de forma rápida e precisa. Nesse capítulo serão aplicadas várias dessas técnicas de processamento a imagens dos sensores ASTER e TM, com critérios pré-estabelecidos para a distinção de superfícies ricas em óxidos e hidróxidos de ferro, com ocorrências de chumbo, zinco e bário associadas. Por meio de um estudo comparativo, será avaliado ainda o real potencial desses sensores na detecção desses materiais em superfície.

5.2 - ESTRATÉGIA DE PROCESSAMENTO DIGITAL

As principais feições espectrais dos gossans da Bacia de Irecê foram definidas com base no método de espectroscopia de reflectância, o qual permite o estudo do comportamento espectral de rochas e minerais, considerando curvas de reflectância espectral constituídas a partir de milhares de bandas posicionadas no espectro refletido, entre o visível (VIS), infravermelho próximo (NIR) e o infravermelho de ondas curtas (SWIR) (Clark & Roush 1984, Hauff 1995, Clark 1999). Visou-se, desta forma, estabelecer as assinaturas espectrais dos gossans, bem como distinguir seus minerais constituintes (Capítulo 4).

As curvas de reflectância espectral obtidas em laboratório para os gossans da Bacia de Irecê (Figuras 5.1a), bem como a sua média aritmética (Figura 5.2a) foram re-amostradas para a resolução espectral dos sensores TM (Figuras 5.1.b, 5.2.b) e ASTER (Figuras 5.1.c, 5.2.c), com o intuito de definir critérios para o mapeamento remoto deste tipo de cobertura através de técnicas de processamento digital aplicadas a dados multiespectrais.

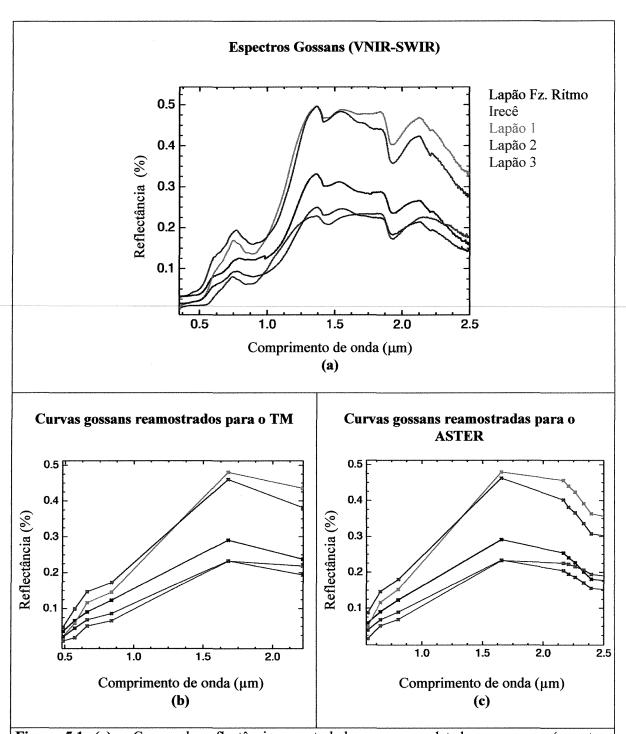


Figura 5.1. (a) — Curvas de reflectância espectral dos gossans coletados no campo (amostras Fazenda Ritmo, Irecê, Lapão 1, Lapão 2 e Lapão 3), medidas no FieldSpec FR. (b) Curvas reamostradas para a resolução espectral do sensor TM no espectro VIS, NIR. SWIR (6 bandas). (c) curvas reamostradas para a resolução espectral do sensor ASTER no espectro VIS, NIR. SWIR (9 bandas).

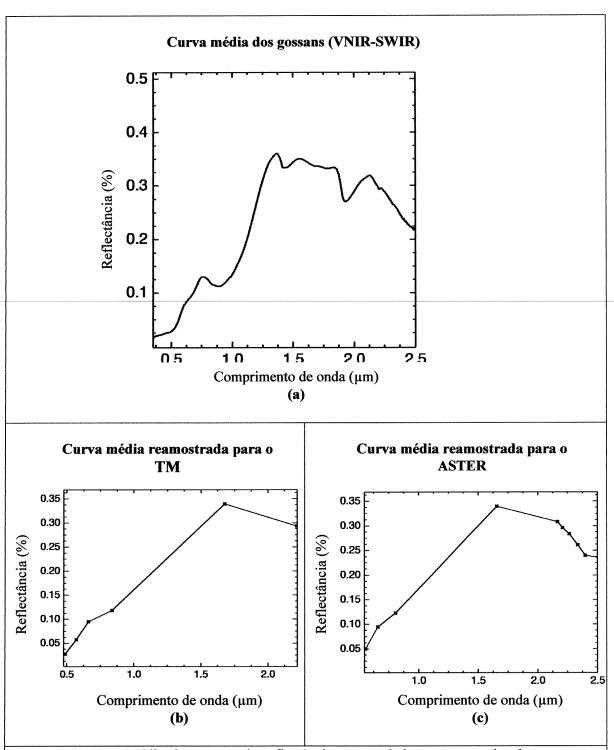


Figura 5.2. (a) — Média das curvas de reflectância espectral dos gossans coletados no campo (amostras Fazenda Ritmo, Irecê, Lapão 1, Lapão 2 e Lapão 3), medidas no FieldSpec FR. (b) Média das curvas reamostradas para a resolução espectral do sensor TM no espectro VIS, NIR. SWIR (6 bandas). (c) Média das curvas re-amostradas para a resolução espectral do sensor ASTER no espectro VIS, NIR. SWIR (9 bandas).

A partir da análise da curva média dos gossans, reamostradas para a resolução espectral dos sensores TM e ASTER, é possível selecionar os intervalos espectrais que permitem mapear feições direta ou indiretamente relacionáveis aos gossans.. As bandas TM3, TM5, AST2, AST4, AST5 e AST7 são caracterizadas por um alto de reflectância, ou seja, tais materiais refletem nestas regiões do espectro eletromagnético. Em contraposição, as bandas TM1 TM2, TM4, AST1, AST3, AST6, AST8 eAST9 são caracterizadas por feições de absorção. Portanto as relações entre esses altos e baixos de reflectância (Tabela 5.1) quando utilizadas em técnicas de processamento digital de imagens (composições coloridas e razões de bandas), são teoricamente capazes de realçar nas imagens os gossans em estudo.

Tabela 5.1 – Principais feições espectrais obtidas para a curva espectral média dos gossans da Bacia de Irecê, na resolução espectral dos sensores ASTER e TM.

	Alta reflectância	Baixa reflectância
Sensor ASTER	bandas 2, 4, 5, 7	bandas 1, 3, 6, 8, 9
Sensor TM	bandas 3,5	bandas 1, 2, 4

5.3 - PRÉ-PROCESSAMENTO

A etapa de pré-processamento dos dados multiespectrais utilizados nesse estudo incluiu a correção atmosférica e o georreferenciamento das imagens.

5.3.1 - Correção Atmosférica

- efeito dos gases e partículas atmosféricas nas imagens de sensoriamento remoto

Os gases e partículas (aerossóis) presentes na atmosfera são responsáveis pela absorção e espalhamento da radiação. Esses efeitos afetam a intensidade e composição espectral da radiação eletromagnética disponível para um determinado sensor, resultando na diminuição da qualidade da imagem e na modificação da resposta espectral dos alvos.

Existem cerca de 30 gases na atmosfera da Terra que interferem nas propriedades do sinal durante o caminho Sol ⇒ superfície da Terra ⇒ sensor. Entretanto, nem todos esses gases absorvem radiação entre 0.40–2.50µm. Somente sete gases produzem feições observáveis: vapor

- d'água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), ozônio (O₃), oxigênio(O₂), óxido nítrico (N₂O), monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) (Gao *et al.* 1993):
- Vapor d'agua: é o que mais absorve radiação. As mais importantes bandas de absorção devidas à sua presença ocorrem em torno de 0.94μm, 1.14μm, 1.38μm e 1.88μm. A concentração de vapor d'água decresce rapidamente com a altitude e sua distribuição espacial e densidade pode variar abruptamente. A depender dessa variação, as bandas de absorção são mais ou menos intensas e podem bloquear totalmente a transmitância de radiação (Figura 5.3a).
- Dióxido de carbono: possui fortes bandas próximo de 2.00μm (1.96μm, 2.01μm, 2.08μm), além de outras subordinadas no SWIR (Figura 5.3b). O dióxido de carbono, assim como o oxigênio, metano e óxido nítrico, são uniformemente misturados na tropoesfera.
- Oxigênio: possui várias bandas emtre 0.60μm e 1.30μm.
- **Metano:** possui uma banda próximo a 2.350nm (Figura 5.3.b), com uma absorção média de até 20%.
- Ozônio: possui uma banda em torno de 0.60μm, com uma absorção média de 10% (Figura 5.3b). Aproximadamente 90% da concentração de ozônio ocorre na estratoesfera, com um pico de concentração próximo de 25 km.

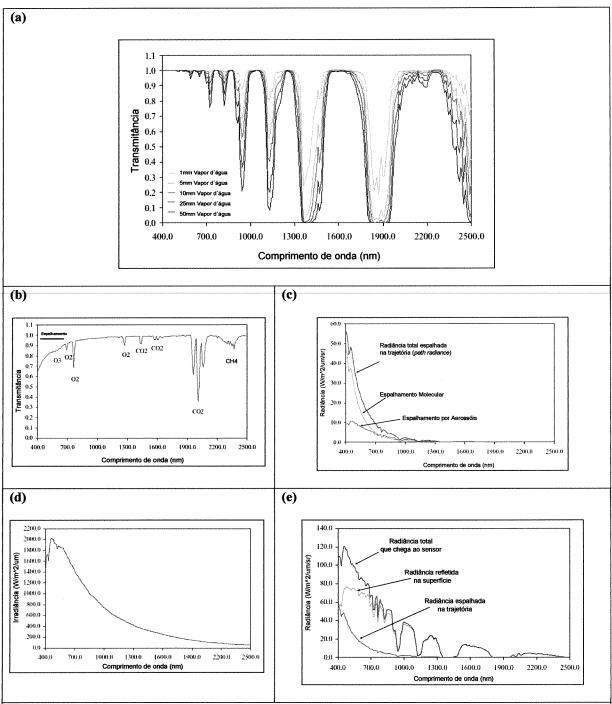


Figura 5.3. (a) Espectro de transmistância da atmosfera considerando o efeito de diferentes quantidades de vapor d'água. O aumento do vapor d'agua pode levar ao bloqueio total da radiação em algumas faixas do espectro (e.g., em torno de 1.4μm e 1.9μm (b) Espectro de transmitância da atmosfera e efeitos causados pela absorção da radiação devido à presença de moléculas de dióxido de carbono, oxigênio, metano e ozônio e pelo espalhamento molecular e de aerossóis. (c) Espectro da radiância espalhada por partículas atmosféricas na sua trajetória descendente e dirigida diretamente ao sensor, sem informações sobre alvos terrestres (path radiance). (d) Espectro da irradiação solar exo-atmosférica. (e) Radiação total que chega ao sensor na forma de energia refletida por um alvo terrestre (com 25% de reflectância), após sofrer os efeitos atmosféricos (adaptado de ACORN, 2002).

Os gases e aerossóis atmosféricos promovem o espalhamento da radiação solar (Figura 5.3b) (Zullo, 1994). O efeito do espalhamento dos gases, denominado de espalhamento molecular ou Rayleigh, afeta principalmente os comprimentos de onda do visível, sendo que seu efeito é muito pequeno acima de 1,00µm. Esse espalhamento é função da pressão, da temperatura, da densidade de vapor d'água e da densidade de ozônio presente na atmosfera. O espalhamento por aerossóis é mais complexo e importante. Aerossóis são partículas com raio variando de 01 a 10µm e incluem compostos solúveis (poeira) e não-solúveis em água, compostos oceânicos (sal marinho) e compostos orgânicos (fuligem) (Zullo, 1994). O espalhamento por aerossóis decresce rapidamente com o aumento do comprimento da onda e seu efeito é negligenciável acima de 1µm. A concentração de aerossóis pode ser estimada a partir da visibilidade horizontal ou através da espessura ótica da atmosfera para comprimentos de onda do espectro visível verde (Zullo, 1994).

Além dos efeitos causados pelos gases e aerossóis na transmissão atmosférica da radiação solar, parte da energia espalhada pode ser dirigida diretamente ao sensor, sem que tenha interagido com alvos na superfície terrestre. Isso causa um efeito aditivo no sinal detectado pelo sensor (Figura 5.3c), sem significado espectral e denominado de 'radiância da trajetória' (*path radiance*) (Drury, 2001) (Figura 5.3.c).

A energia irradiada pelo Sol, que no topo da atmosfera apresenta o espectro típico ilustrado na Figura 5.3d, ao passar pela atmosfera, sofrerá todos os seus efeitos, para então atingir um alvo terrestre. A interação da radiação solar com o alvo produz um sinal, parte do qual pode ser registrado por um sensor (Figura 5.3e). Uma outra parte do sinal, também registrada pelo sensor, é formada pelo conjunto da radiação espalhada na sua trajetória pela atmosfera e dirigida ao sensor (path radiance) — essa fração, cuja intensidade é controlada principalmente pela presença de aerossóis e gases na atmosfera, contribui substancialmente no sinal (Figura 5.3e). Portanto, a radiância registrada por um sensor pode ser descrita como a soma de dois termos, considerando os alvos terrestres como superfícies Lambertianas (Chandrasekhar, 1960; apud Souza Filho & Yamaguchi, em prep.):

 $R_t = R_s + R_e$, onde:

 R_t = radiância total que chega ao sensor

 R_s = radiância da superficie (alvo)

R_e = radiância do espalhamento durante a trajetória da radiação na atmosfera.

- correção dos efeitos atmosféricos em imagens de sensoriamento remoto

Os efeitos de absorção e espalhamento dos gases e partículas atmosféricas apresentados acima, como visto, são mais perceptíveis nos comprimentos de onda do visível e infra-vermelho. Tais efeitos podem ser corrigidos ou minimizados por meio de técnicas de processamento digital de imagens (Green *et al.* 1993). Essa correção é um passo fundamental para a classificação espectral dos alvos, permitindo comparar os valores de reflectância dos pixels das imagens com os espectros de reflectância medidos na superfície.

Para a correção atmosférica dos dados do ASTER e TM, foi utilizado o software ACORN (*Atmospheric CORrection Now*). Este software oferece uma série de estratégias para a correção atmosférica de imagens hiperespectrais e multiespectrais, que incluem métodos baseados em códigos de transferência empírica e radiativa (ACORN 2002).

Neste trabalho foi utilizado o método baseado no código de transferência radiativa (MODTRAN – *Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model* - versão 4), que corresponde à forma mais avançada de correção atmosférica oferecida pelo software ACORN. Esse método fornece parâmetros para se obter um modelo de absorção e espalhamento atmosférico, incluindo modelos atmosféricos específicos para regiões tropicais e para regiões localizadas em latitudes médias (inverno e verão), além de possibilitar a conversão dos dados de radiância para reflectância aparente.

Por se tratar de uma novidade, um exemplo da correção atmosférica e conversão dos dados de radiância para reflectância, será apresentado a seguir para os dados ASTER utilizados nesta pesquisa. Esses procedimentos e sua descrição foram baseados na metodologia estabelecida por Souza Filho & Yamaguchi (em prep.). Os mesmos procedimentos podem ser também seguidos para correção de dados de qualquer sensor multiespectral (TM, SPOT, etc) através do ACORN.

Na Figura 5.4a é apresentada uma composição colorida falsa cor utilizando as bandas ASTER 3,2,1 (RGB), num recorte de 400 x 400 pixels extraído da imagem completa da área de estudo. No centro da imagem, aparece um campo com vegetação fotossinteticamente ativa que reflete fortemente na banda AST3, a qual cobre o intervalo do infravermelho próximo. Essa área com vegetação, foi adotada como um alvo de referência para avaliação dos resultados da correção atmosférica.

O gráfico da Figura 5.4b corresponde a um espectro construído a partir da média de 9 pixels, retirados da região central da área vegetada, dos dados ASTER obtidos com nível de

processamento 1B, brutos. Esses dados representam o comportamento espectral da vegetação na forma de DNs, e contém os efeitos da iluminação solar, da transmissão e do espalhamento atmosférico descendente (Sol ⇒ superfície) e ascendente (superfície ⇒ sensor), assim como da reflectância da vegetação. Neste formato, é praticamente impossível relacionar a assinatura espectral dos pixels da imagem com alvos conhecidos.

Para que essa relação possa ser estabelecida, num primeiro passo, os dados são convertidos para radiância, através da aplicação, para cada banda do ASTER, de seus respectivos coeficientes de conversão radiométrica (armazenados nos cabeçalhos da cena). Com os dados em radiância, é possível então submetê-los ao processamento no ambiente do ACORN para realização da correção atmosférica. O conhecimento sobre algumas variáveis, relacionadas aos dados, e outras relacionadas às condições atmosféricas no momento da aquisição da cena ASTER, são fundamentais para o sucesso da transformação. Sobre os dados, é necessário, conhecer as funções de resposta espectral, o ganho e o 'off-set' espectral para cada banda. Sobre as condições de imageamento, é necessário indicar (i) a altitude da plataforma; (ii) a elevação média da região de estudo; (iii) a hora/dia/mês/ano da aquisição; (iv) as coordenadas da área; (v) a visibilidade atmosférica (km); (vi) uma quantidade fixa de vapor d'agua presente na atmosfera (em milímetros) e, (vii) o modelo atmosférico - que no caso deste estudo, necessariamente é o tropical. Além do modelo, as informações sobre o vapor d'água e a visibilidade que serão utilizadas no modelo, respectivamente, para estimar a quantidade de radiação absorvida e espalhada pela atmosfera, são críticos. O uso de informações 'aleatórias', sem nenhum tipo de referência, pode levar a resultados inferiores (Souza Filho & Yamaguchi, em prep.). Isso pode ser demonstrado comparando-se os espectros da Figura 5.4c (que corresponde ao espectro de uma amostra de vegetação típica, extraída da biblioteca espectral do USGS e convertida para a resolução espectral do ASTER) ao da Figura 5.4d (que corresponde aos dados ASTER convertidos para reflectância, utilizando-se, nos cálculos do modelo, uma quantidade de 20mm de vapor d'água e visibilidade de 50km (o que reflete condições mais ou menos nubladas e/ou com bruma e particulados). Note que a vegetação na banda 9 do ASTER (Figura 5.4d), por exemplo, reflete cerca de 20-30% a mais do que deveria. Na Figura 5.4e é apresentado o espectro relativo aos mesmos pixels da vegetação, mas extraídos de uma imagem convertida para reflectância, no âmbito da linha de processamento dos dados ASTER no EROS Data Center nos Estados Unidos (http://edcdaac.usgs.gov/asterondemand/) (produto AST-07). Neste caso, os dados sobre vapor

d'água e aerossóis foram estimados por modelos climatológicos, os quais, conforme ilustrado na figura, também conduzem a uma correção insuficiente nas bandas do SWIR.

Duas alternativas ou uma combinação das duas podem auxiliar numa melhor estimativa das variáveis atmosféricas (Souza Filho e Yamagushi, em prep.): (i) compilar informações climatológicas disponíveis para a data da aquisição das imagens, a partir de sítios na Internet especializados no assunto (http://www.cptec.inpe.br/); (ii) utilizar dados adquiridos por sensores com condições de fornecer informações atmosféricas, como MODIS (http://edcdaac.usgs.gov/modis/dataprod.html). Utilizando-se essas duas alternativas, estimou-se um valor em torno de 5mm para a quantidade de vapor d'agua e de 200km de visibilidade como condições atmosféricas no horário/data de aquisição da cena ASTER sob investigação. correção feita via ACORN com base nesses valores para os mesmos pixels da vegetação é apresentada na Figura 5.4f. Note que o espectro derivado se compara ao espectro real da vegetação em reflectância (Figura 5.4c), o que sugere o sucesso da transformação dos dados e da estratégia de correção atmosférica adotada.

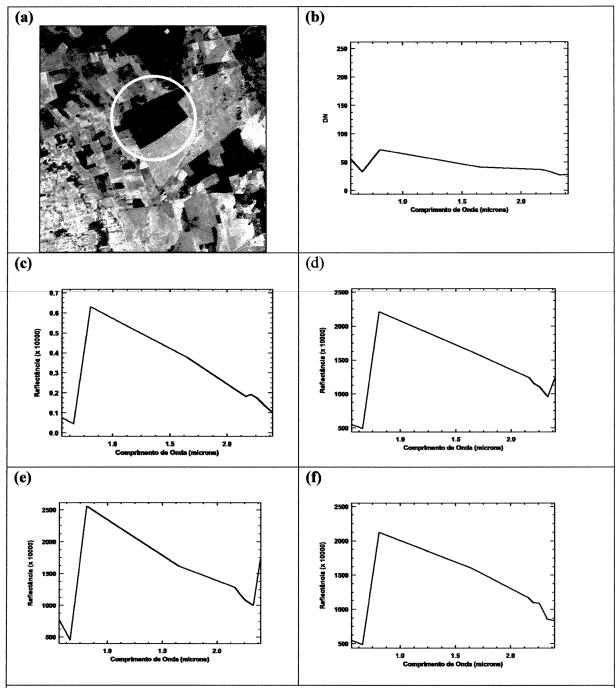


Figura 5.4. (a) Recorte de 400 x 400 pixels (6 x 6 km) da cena ASTER utilizada neste estudo, com as bandas AST3,2,1 em RGB. A vegetação fotossinteticamente ativa, utilizada como referência para avaliação dos resultados de correção atmosférica, aparece em vermelho intenso nessa imagem. (b) Espectro da vegetação (média de 9 pixels, retirados da região central da área vegetada), sem correção atmosférica. Os pixels estão em valores de DN. (c) Espectro característico da vegetação verde, extraído da biblioteca do USGS e interpolado para as bandas do ASTER. (d) Espectro da vegetação extraído de uma imagem com correção atmosférica através do software ACORN, utilizando dados aleatórios sobre a visibilidade e o vapor d'agua no modelo atmosférico. (e) Espectro da vegetação extraído da imagem convertida para reflectância no EDC – produto padrão AST-07. (f) Espectro da vegetação extraído da imagem ASTER convertida para reflectância através do ACORN, utilizando-se dados atmosféricos derivados de dados do MODIS e climatológicos.

5.3.2 - Correção Geométrica

O georreferenciamento das imagens ASTER e TM - previamente cortadas para incluir somente a área de estudo - consistiu na correção de seus respectivos pixels segundo os sistemas de coordenadas UTM e Geográfica, de modo que assumissem propriedades de escala e precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos objetos e superfícies nelas representados (Crósta1992).

Muito embora as imagens ASTER nível 1B já venham georreferenciadas com base em parâmetros orbitais, o grau de precisão da correção é baixo, da ordem de 2%. Assim sendo, essas imagens foram novamente georreferenciadas com base em pontos de controle, obtidos na superfície do terreno.

5.4 - PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS - VNIR e SWIR

O processamento dos dados ASTER e TM foi dividido em três etapas distintas (Figura 5.5). A primeira, destinada ao realce e discriminação litológica, incluiu técnicas como composições coloridas e operações aritméticas (razão de bandas) (Drury 2001). Numa segunda etapa, técnicas de processamento digital mais robustas, considerando variações da análise por principais componentes (APC), foram testadas e aplicadas aos dados. A terceira etapa envolveu o uso de técnicas de processamento digital (classificadores) de dados hiperespectrais (Spectral Angle Mapper (SAM) – Kruse *et al.* 1993; Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF) - Boardman *et al.* 1995), adaptadas para o processamento de dados multiespectrais, visando à identificação remota de minerais específicos associados aos gossans.

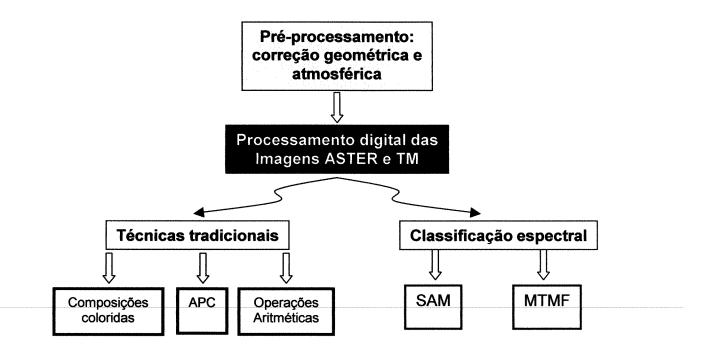


Figura 5.5. Fluxograma do processamento digital das imagens ASTER e TM.

5.4.1 - Composições Coloridas

A composição colorida é uma ferramenta importante em sensoriamento remoto, de fácil implementação e eficaz no reconhecimento das informações espectrais de três diferentes bandas em uma única imagem. Para a utilização de composições coloridas é necessário que se tenha um conhecimento a priori das características espectrais dos alvos a serem estudados, bem como, do sensor a ser utilizado.

Para a escolha das bandas espectrais é relevante que se faça uma seleção cuidadosa das mesmas, sempre levando em consideração o comportamento espectral dos alvos, para que a combinação de três bandas contenha a informação realmente desejada. Para esse estudo, a seleção das bandas foi feita com base nas curvas de reflectância espectral dos gossans, interpoladas para a resolução espectral dos sensores TM e ASTER (Figuras 5.1b, 5.1c, 5.2b e 5.2c). A relação entre altos e baixos de reflectância no espectro refletido (gradientes espectrais) foi um dos parâmetros utilizados para a seleção dos melhores tripletes. Adicionalmente, a escolha dos tripletes também foi baseada em medidas de redundância estatística, através do cálculo e análise da matriz de correlação para as bandas TM e ASTER (Tabelas 5.2 e 5.3).

Tabela 5.2 – Matriz de correlação para as bandas TM (VNIR-SWIR)

				100			
	1	2	3	4	5	7	
1	1.000	0.839	0.668	0.602	0.495	0.510	
2	0.839	1.000	0.935	0.847	0.809	0.809	
3	0.668	0.935	1.000	0.851	0.926	0.931	
4	0.602	0.847	0.851	1.000	0.774	0.757	
5	0.495	0.809	0.926	0.774	1.000	0.976	
7	0.510	0.809	0.931	0.757	0.976	1.000	

Tabela 5.3 – Matriz de correlação para as bandas ASTER (VNIR-SWIR)

#2000 PER COLOR SALES COLOR SA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.000	0.567	0.866	0.667	0.611	0.616	0.597	0.608	0.585
2	0.567	1.000	0.510	0.445	0.326	0.312	0.350	0.344	0.295
3	0.866	0.510	1.000	0.868	0.822	0.816	0.826	0.835	0.800
4	0.667	0.445	0.868	1.000	0.949	0.936	0.944	0.944	0.909
5	0.611	0.326	0.822	0.949	1.000	0.985	0.967	0.975	0.969
6	0.616	0.312	0.816	0.936	0.985	1.000	0.956	0.967	0.960
7	0.597	0.350	0.826	0.944	0.967	0.956	1.000	0.985	0.958
8	0.608	0.344	0.835	0.944	0.975	0.967	0.985	1.000	0.971
9	0.585	0.295	0.800	0.909	0.969	0.960	0.958	0.971	1.000

A análise da matriz de correlação possibilitou a distinção das bandas menos correlacionadas entre si, das quais destacam-se, (i) para os dados TM, as composições TM751, TM541, TM531, TM521, TM741, TM731, TM721, TM431, em RGB, e (ii) para os dados ASTER, as composições AST962, AST952, AST982, AST972, AST942, AST932, AST921, AST921, AST721, AST821, AST521, AST621, AST421 e AST971, também em RGB. Destes tripleles, foram selecionados para interpretação os que melhor individualizaram os gossans nas imagems TM e ASTER. Esses são os seguintes:

> TM: 541, 431 e 321 (RGB)

➤ ASTER: 721 e 971 (RGB)

Conhecendo-se o comportamento espectral dos gossans na resolução dos sensores TM (Figuras 51b e 5.2b) e ASTER (Figuras 5.1c e 5.2c), é possível estimar as cores em que essas coberturas devem ocorrer nas composições coloridas supracitadas. A tabela 5.4 mostra esta simulação empírica, com base nos dados obtidos com os espectros dos gossans.

Tabela 5.4 - Tripletes em RGB e coloração teórica para detecção de gossans nas imagens TM e ASTER

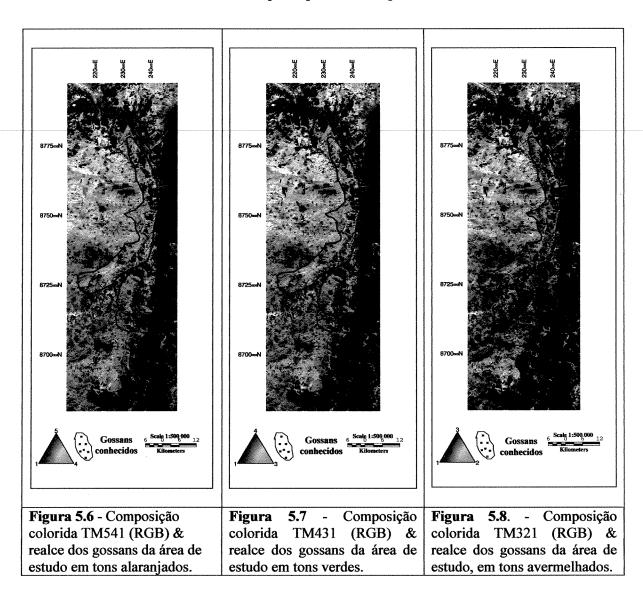
R		TM5	TM4	TM3	AST7	AST9
G		TM4	TM3	TM2	AST2	AST7
В		TM1	TM1	TM1	AST1	AST1
Cobertura	gossans					

Nas Figuras 5.6 a 5.8 são apresentadas as composições coloridas acima selecionadas para os dados TM, já convertidos para refletância espectral aparente. Sobre essas composições, foram plotados os pontos das principais ocorrências de gossans associados a mineralizações de Pb, Zn e Ba, além das áreas de abrangência de todos os gossans conhecidos na região de estudo.

Na composição com as bandas TM 541 (RGB) (Figura 5.6) a vegetação fotosinteticamente ativa aparece em verde e as áreas onde estão localizados as superfícies ricas em óxidos e hidróxidos de ferro estão realçadas em tonalidades alaranjadas, indicando a presença de solos e rochas com alta reflectância, simultaneamente, nas bandas TM5 (maior) e TM4 (menor).

A composição colorida das bandas 431 (RGB) (Figura 5.7) realça a vegetação em vermelho e superfícies ricas em óxidos/hidróxidos de ferro em verde-amarelados, incluindo gossans genuínos, solos e rochas ricas nesses compostos. Essas respostas na composição colorida ocorrem devido à alta reflectância que esses materiais ferruginosos apresentam na região do vermelho do espectro eletromagnético, coberta pela banda TM3, a qual foi alocada na cor verde no triplete.

Em que pese a alta correlação existente entre as bandas TM 3, 2 e 1 (Tabela 5.2), compreendidas na porção do visível do espectro eletromagnético, o resultado obtido pela composição colorida 'cor real' TM321 (RGB) (Figura 5.8) foi bastante satisfatório, individualizando, em tons de vermelho, os gossans da área de estudo. Dentre as várias composições testadas, essa a TM 321 é um ótimo produto para a caracterização de solos e rochas ricos em óxidos e hidróxidos, desde que expostos em superfície.



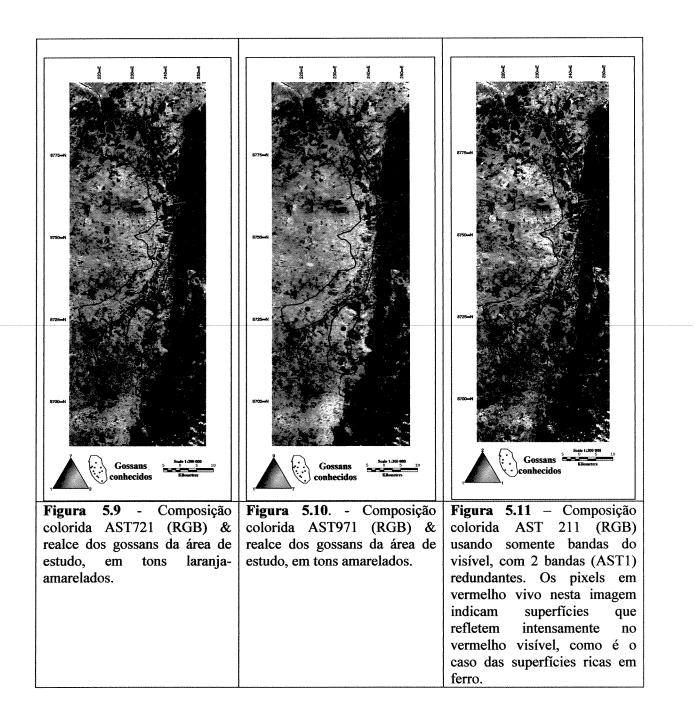
Nas Figuras 5.9 e 5.10 são apresentadas as composições coloridas selecionadas em epígrafe para os dados ASTER, já convertidos para refletância espectral aparente. Assim como para o TM, sobre essas composições, também foram plotados os pontos das principais

ocorrências de gossans associados a mineralizações de Pb, Zn e Ba, e áreas de abrangência de todos os gossans conhecidos na região de estudo.

Na composição colorida ASTER 721 (RGB) (Figura 5.9), as áreas de ocorrência dos gossans aparecem destacadas em tons laranja-amarelados, indicando a presença de materiais com alta reflectância, simultaneamente, nas bandas AST7 (maior) e AST2 (menor).

A composição colorida ASTER 971 (RGB) (Figura 5.10) realçou as superfícies ricas em óxidos e hidróxidos de ferro em tons amarelos, significando que esses materiais tem uma resposta espectral com contribuição proporcional e, de relativa alta reflectância, das bandas AST9 e AST7.

Na Figura 5.11 é apresentada uma composição colorida real 'sintética', utilizando somente as bandas do visível (bandas AST1 e AST2) do sensor ASTER. Nesta composição a banda 2 foi alocada ao canal vermelho e a banda 1 foi alocada simultaneamente aos canais verde e azul. Como qualquer superfície rica em ferro possui um alto de reflectância na região do vermelho do espectro-eletromagnético e um baixo de reflectância nas regiões do azul e verde (Figuras 5.1b, 5.1c, 5.2b e 5.2c), consequentemente, nesta composição, tais coberturas serão mapeadas em vermelho intenso.



Dentre as composições coloridas dos dados ASTER e TM, as que apresentaram a melhor correlação entre o previsto e o obtido para o realce dos gossans foram as seguintes (em RGB): TM431, TM321, AST721. Entretanto, na prática, essas composições não foram suficientes para separar nas imagens os gossans de outras superfícies ferruginosas genéricas. As áreas situadas na porção sul da imagem, que refletem intensamente no espectro vermelho (TM – Figura 5.8;

ASTER – Figura 5.11), não hospedam ocorrências de gossans e sulfetos conhecidas e, muito provavelmente, correspondem a lateritas sem nenhuma associação a depósitos minerais.

5.4.2 - Operações Aritméticas

As operações aritméticas são técnicas utilizadas para combinar duas ou mais imagens de sensoriamento remoto, reduzindo a dimensionalidade dos dados originais (Drury, 2001). As operações aritméticas mais utilizadas em exploração mineral são a razão e a subtração de imagens, onde os contrastes espectrais entre as bandas são melhor realçados.

5.4.2.1 - Razão de Bandas

A razão de bandas é usada para realçar o contraste espectral entre um par de bandas de um sensor. Utilizando curvas espectrais dos minerais de interesse, localiza-se um par de bandas espectrais que tenha alto contraste, entre um mínimo de absorção e um máximo de reflexão, para o mineral, aplicando-se uma operação simples de divisão entre as duas imagens. A correta aplicação desta técnica depende da remoção dos efeitos atmosféricos das bandas a serem operadas — ou seja, previamente à divisão, as imagens devem ser convertidas para reflectância espectral aparente. A noção da técnica de razão de bandas é ilustrada na Figura 5.12, para o mapeamento de goethita.

As razões de bandas aqui utilizadas foram selecionadas de forma criteriosa, no sentido de obter resultados satisfatórios e que caracterizem o comportamento espectral dos materiais geológicos analisados. Com base nas curvas espectrais dos gossans, re-amostradas para a resolução espectral dos sensores TM e ASTER, buscou-se localizar pares de bandas espectrais que possuem o mesmo tipo de alto contraste ilustrado na Figura 5.12. Para o sensor TM, dez razões foram selecionadas: 3/1, 3/2, 4/3, 5/1, 5/2, 5/4, 5/7, 7/1, 7/2 e 7/4. A maioria destas razões são encontradas na literatura, sendo consideradas clássicas para o mapeamento remoto de superfícies ricas em ferro, em imagens TM (Tabela 5.5).

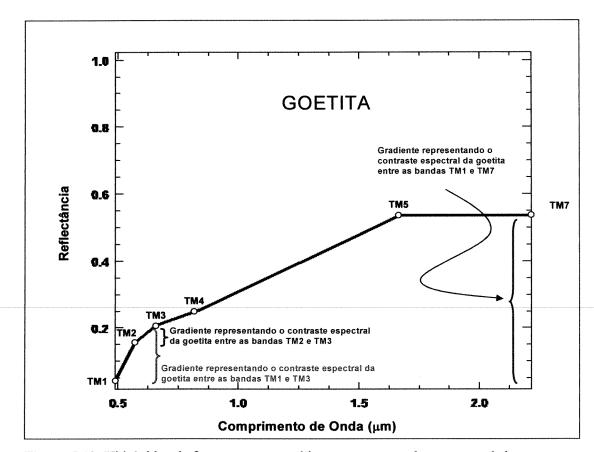


Figura 5.12. Hidróxidos de ferro, como a goethita, possuem um alto e característico contraste espectral na região do visível, entre o azul e o vermelho, compreendendo as bandas 1, 2 e 3 do Landsat-TM. Esse mesmo contraste ocorre entre o infravermelho de ondas curtas (bandas 5 e 7) e o visível. Assim, as imagens resultantes de divisões, como por exemplo, das bandas TM3 / TM2, TM3/ TM1 ou TM7 / TM1 deverão mostrar, em tons claros, os pixels que possuem esse mineral.

Tabela 5.5 - Razões de bandas propostas para o realce de superfícies ricas em ferro.

Razões de bandas (TM)	Proponente
3/1, 3/2, 4/2, 5/4 e 5/1	Abrams et al. (1983)
5/1, 5/4, 7/1 e 7/4	Kaufmann (1988) apud Crósta 1990
3/1	Abrams et al. (1983)

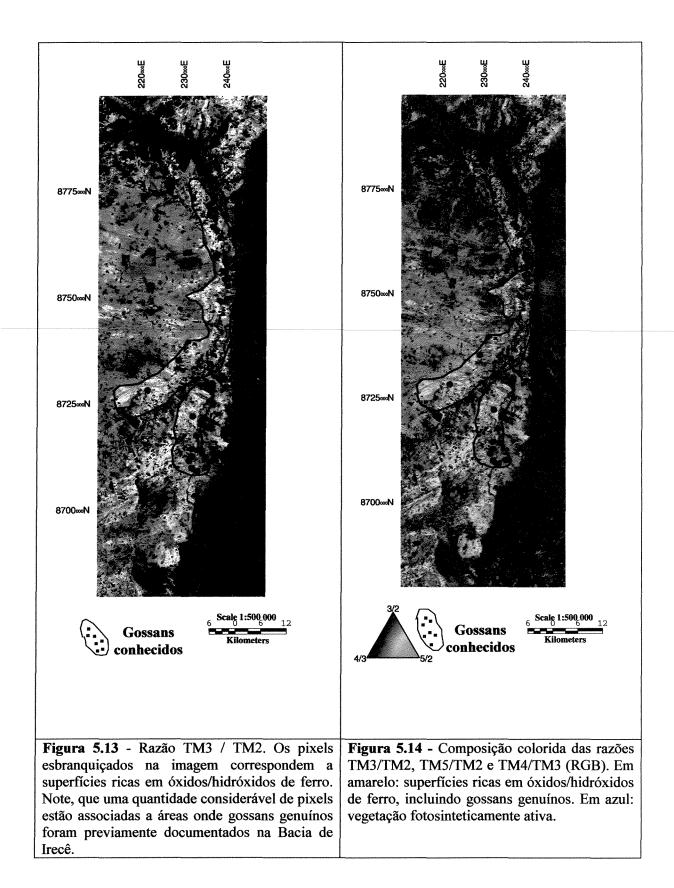
Para a discriminação de superfícies ricas em ferro, algumas composições coloridas com razões de bandas do Landsat-TM também foram propostas na literatura (Tabela 5.6.).

Tabela 5.6 - Composições coloridas envolvendo razões de bandas descritas na literatura

proponente		
Crósta (1990)		
Crósta (1990)		
Volesky (1999)		
Abrams et al. (1983)		

Dentre as várias razões testadas, aquela entre as bandas TM3/ TM2 foi a que melhor realçou os gossans da área de estudo, muito embora essas bandas não compreendam o principal gradiente espectral observado nas curvas de reflectância dos gossans amostrados para a resolução do TM (Figura 5.1 a 5.2). A Figura 5.13 ilustra o resultado desta divisão, onde os pixels em tonalidades esbranquiçadas indicam as áreas com maiores concentrações em óxidos/hidróxidos de ferro. Outras razões, como por exemplo, a TM5 / TM2 e a TM7 / TM2, também apresentaram bons resultados, porém, ligeiramente inferiores àquele obtido com a razão TM3/ TM2.

Para o realce dos gossans através de composições coloridas, todos os tripletes propostos na Tabela 5.6 foram testados, mas os resultados foram considerados insatisfatórios. Desta forma, outras simulações de tripletes, envolvendo as razões de bandas expostas neste trabalho, foram investigadas. Deste estudo, a composição colorida das razões TM3/TM2, TM5/TM2 e TM4/TM3 foi a que apresentou o melhor resultado. As razões TM3/TM2 e TM5/TM2 foram alocadas aos canais vermelho e verde, respectivamente, para caracterizar as superfícies com concentrações de hidróxidos de ferro (goethita), e a razão 4/3, alocada ao canal azul, foi usada para avaliar a influência da vegetação na imagem. Conforme pode ser verificado na Figura 5.14, as áreas na imagem nas quais os gossans conhecidos estão inscritos foram mapeadas em amarelo.



Para o sensor ASTER dezessete razões de bandas foram selecionadas: AST2/AST1, AST3/AST2, AST4/AST1, AST4/AST2, AST4/AST3, AST4/AST3, AST4/AST6, AST4/AST7, AST4/AST8, AST5/AST1, AST5/AST2, AST5/AST3, AST6/AST2, AST7/AST1, AST7/AST3, AST9/AST2, AST9/AST4 e AST9/AST5. Dentre todas essas razões testadas, a razão AST 7/ AST1 foi a que melhor realçou os gossans (Figura 5.15), que aparecem, nesta imagem, em tonalidades que vão de cinza claro ao branco. Essa razão foi adequada para o mapeamento dos gossans considerando que os mesmos tem, empiricamente, uma alta reflectância na banda AST7, situada na região do infravermelho de ondas curtas, e uma baixa reflectância na banda AST1, situada na região do visível verde. As razões AST4/AST1 e AST5/AST1 também apresentaram bons resultados, similares àqueles obtidos com a razão AST7/AST1.

Para a discriminação dos gossans via tripletes ASTER, a composição colorida AST4/AST2, AST4/AST5 e AST5/AST6 (RGB), utilizada por Volesky *et al.* (2002), foi testada, mas sem sucesso. Outras simulações, envolvendo composições coloridas com as razões de bandas aqui propostas foram investigadas; a que gerou os melhores resultados foi a composição com as razões AST7/AST1, AST3/AST2 e AST4/AST6, em RGB (Figura 5.16), onde as superfícies de interesse aparecem em vermelho intenso.

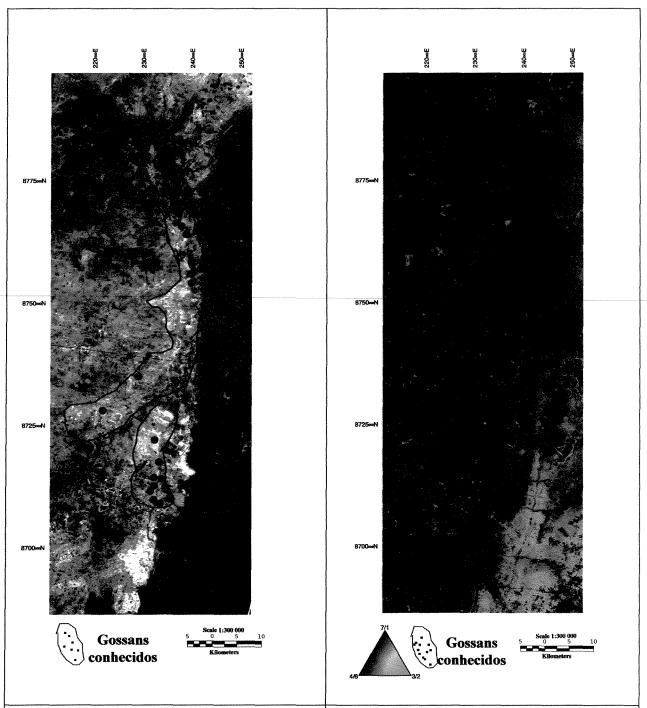


Figura 5.15 — Razão AST7 / AST1. Os pixels esbranquiçados na imagem correspondem a superfícies ricas em óxidos/ hidróxidos de ferro, incluindo gossans genuínos previamente documentados na Bacia de Irecê.

Figura 5.16 - Composição colorida das razões AST7/AST1, AST3/AST2 e AST4/AST6 (RGB). Em vermelho intenso: superfícies ricas em óxidos/hidróxidos de ferro, incluindo áreas contendo gossans genuínos.

5.4.3 - Análise por Principais Componentes

A Análise por Principais Componentes (APC) é uma valiosa função de processamento de imagens digitais, sendo considerada uma importante ferramenta para análises de dados geológicos (Drury 2001). A APC é uma técnica estatística multivariada usada para selecionar combinações lineares de variáveis não correlacionadas, fazendo com que a variância ou grau de correlação de cada combinação linear extraída seja, sucessivamente, menor entre si (Singh e Harrison 1985). A variância estatística em imagens multiespectrais e hiperespectrais está relacionada ao comportamento espectral dos alvos e a dimensionalidade estatística dos dados da imagem.

Várias técnicas de mapeamento mineral com base em APC já foram propostas, entre as quais destacam-se: PC Direcionada (*Directed Principal Components* (DPC) - Fraser & Green 1987), PC Seletiva (*Selective Principal Component Analysis* (SPCA) - Chavez & Kwarteng 1989); PC Orientada por Feições/Técnica Crósta (Feature-Oriented Principal Component Selection (FPCS) - Crósta e Moore 1989, Loughlin, 1991; e Pseudo-razões Adaptadas (*Mineral Mapping Rendition* (MMR) - Souza Filho e Drury 1998).

A técnica *Directed Principal Component* (Fraser & Green 1987) utiliza uma operação seqüencial envolvendo duas imagens previamente produzidas por razão de bandas, que são submetidas a APC. O objetivo da técnica é o de separar a contribuição espectral devida a minerais daquela devida à vegetação, tanto no VNIR quanto no SWIR. Para os dados TM, as razões TM4/TM1 e TM3/TM1 são submetidas a APC, sendo que a informação que é comum a ambas (vegetação) irá se concentrar na PC1, enquanto a PC2 conterá a informação espectral que é distinta, ou seja, aquela relativa aos óxidos/hidróxidos de ferro. O mesmo se aplica para a separação de minerais hidroxilados e carbonatos, utilizando as razões TM5/TM7. Adaptada para os dados do ASTER, as razões a serem submetidas a APC são: AST2/AST1 (ou AST7/AST1) e AST3/AST1 (ou AST3/AST2) para o mapeamento dos óxidos/hidróxidos de ferro; AST4/AST5 (ou AST7/AST6) e AST3/AST1 para o mapeamento de argilas; e AST6/AST8 (ou AST9/AST8) e AST3/AST1 para o mapeamento de carbonatos.

A técnica "Selective Principal Component Analysis" (Chavez & Kwarteng, 1989) funciona de forma similar à subtração e razão de bandas, porém utilizando a APC. Sua aplicação no mapeamento de óxidos/hidróxidos de ferro, para os dados TM, consiste em submeter às bandas TM1 e TM3 à APC. Assim, a PC1 irá conter a informação comum a ambas as bandas

(sombreamento topográfico e albedo), ao passo que a PC2 irá representar a informação que é espectralmente diferente (ou contrastante) entre elas, neste caso os compostos de ferro. No caso do mapeamento de minerais com OHT e carbonatos, aplica-se a APC às bandas TM5 e TM7, usando a PC2 para identificar as áreas portadoras desses minerais. Uma adaptação desta técnica para os dados do ASTER compreende a aplicação da APC, separadamente, nas bandas AST2/AST1, AST4/AST5 e AST6/AST8 visando o mapeamento, respectivamente, de óxidos/hidróxidos de ferro, minerais de argila e carbonatos. Entretanto, é importante ressaltar que para os dados ASTER, essa técnica pode ser aplicada de forma mais específica para vários tipos de minerais de argila, micas, clorita, anfibólios e carbonatos, considerando a múltiplas bandas do sensor no SWIR e a existência de diferentes gradientes para cada mineral.

Souza Filho & Drury (1997, 1998) adaptaram a técnica de PCs Seletivas para dados TM e JERS-1, utilizando duas bandas para rastrear as feições de absorção dos materiais de interesse e a matriz de correlação no cálculo dos autovetores da APC - ao invés da matriz de covariância, utilizada em todas as técnicas propostas anteriormente. Segundo os autores, o uso da matriz de correlação e de pares de bandas proporcionou, respectivamente, a eliminação dos efeitos de ganho e 'off-set' e a redução do ruído nos produtos finais, os quais foram combinados segundo o esquema de cores proposto por Loughlin (1991).

A técnica Feature-Oriented Principal Component Selection (FPCS) foi proposta por Crósta & Moore (1989) para o realce espectral de óxidos/hidróxidos de Fe, visando o mapeamento de gossans associados a corpos de sulfeto maciço em terrenos granito-greenstone laterizados do SW de Minas Gerais (Fortaleza de Minas). Diferentemente das técnicas anteriores, em que apenas 2 bandas espectrais são utilizadas, na FPCS, da forma como foi originalmente formulada para os dados TM, todas as bandas são submetidas à APC. Com isso, segundo os autores da técnica, a assinatura espectral dos minerais de interesse fica melhor caracterizada, separando-os de outros materiais superficiais. Após a aplicação da APC, é feita uma análise dos coeficientes dos auto-vetores da imagem, os quais são comparados com a curva espectral dos de óxidos/hidróxidos de ferro. Como cada imagem PC é uma adição, ponderada pelo respectivo coeficiente da matriz de auto-vetores das bandas originais do sensor, por meio desta comparação, pode-se prever quais as PCs irão concentrar a informação espectral do alvo, e com que tonalidade (clara ou escura).

A técnica "Crósta", proposta por Loughlin (1991), foi baseada na concepção da técnica FPCS, mas com o objetivo de mapear dois conjuntos de minerais - portadores da molécula OH e do íon férrico - associados, respectivamente, a argilo-minerais de alteração hidrotermal e óxidos/hidróxidos de ferro derivados do intemperimo de sulfetos em depósitos auríferos epitermais do norte de Nevada (EUA). Utilizando dados TM, o autor propôs aplicar a APC não em todas as 6 bandas, como na FPCS, mas sim sobre dois conjuntos de bandas independentes. O primeiro conjunto, composto pelas bandas TM1, TM3, TM4 e TM5, foi selecionado de forma a cobrir regiões de máximo (reflexão) e mínimo (absorção) da curva espectral dos óxidos/hidróxidos de ferro. O segundo conjunto, composto pelas bandas TM1, TM4, TM5 e TM7, foi selecionado de forma a cobrir regiões de máximo (reflexão) e mínimo (absorção) da curva espectral de argilas contendo moléculas de OHT (o mesmo conjunto pode também ser aplicado no mapeamento de carbonatos – Souza Filho & Drury, 1998). A seguir, cada um desses dois conjuntos de bandas é submetido a APC e a matriz de auto-vetores resultante analisada, determinando-se a contribuição individual de cada uma das 4 bandas para cada PC. No conjunto das bandas TM1, TM3, TM4 e TM5, a PC de interesse é aquela que apresenta os maiores valores de auto-vetores para as bandas TM1 e TM3 (contraste espectral do Fe), porém com sinais (+ e -) invertidos. Nessa PC, caso os sinais sejam negativo para a contribuição da banda TM1 (feição de absorção do Fe – baixo de reflectância espectral) e positivo para a contribuição da banda TM3 (feição de reflexão do Fe – alto de reflectância espectral), então as superfícies ricas em ferro aparecerão em tons claros na imagem. Caso contrário, a PC deverá ser 'negada' (multiplicada por -1), para que os pixels correspondentes às superfícies ricas em ferro sejam destacados em tons claros. Essa imagem é então denominada de "Fe". No conjunto das bandas TM1, TM4, TM5 e TM7, a PC de interesse é aquela com os maiores valores de auto-vetores para as bandas TM5 e TM7 (contraste espectral de argilas com OH⁻), porém com sinais (+ e -) invertidos. Nessa PC, caso os sinais sejam positivo para a contribuição da banda TM5 (feição de reflexão das hidroxilas alto de reflectância espectral) e negativo para a contribuição da banda TM7 (feição de absorção de hidroxilas - baixo de reflectância espectral), então as superfícies ricas em argilas aparecerão em tons claros na imagem. Caso contrário, a PC deverá ser 'negada' (multiplicada por -1), para que os pixels de interesse sejam destacados em tons claros. Essa imagem é então denominada de "Hy". O último passo consiste em obter uma terceira imagem, representada pela soma aritmética das imagens Fe e Hy, para produzir uma composição colorida com a seguinte alocação de cores:

Hy, Hy+Fe e Fe em RGB. Nesta composição, as áreas ricas em argilo-minerais aparecerão em vermelho, as ricas em óxidos/hidróxidos de ferro em azul e as áreas onde ocorrerem conjuntamente esses dois grupos de minerais aparecerão em tons esbranquiçados.

As técnicas Crósta e FPCS têm sido aplicadas ao longo da última década com bastante êxito em diversas regiões do mundo, principalmente para fins de exploração mineral. Seu sucesso se deve à facilidade de aplicação e de interpretação e ao fato de dispensar qualquer tipo de correção ou pré-processamento.

Assim sendo, no processamento das imagens TM e ASTER da área de estudo, dentre as variações apresentadas em epígrafe do uso da APC, uma maior ênfase será dada às aplicações da técnica Crósta e da técnica FPCS, as quais serão também adaptadas especificamente para uso com os dados do sensor ASTER.

Técnica Crósta

Para o sensor TM, dois conjuntos de quatro bandas foram submetidos a APC: TM2345, e TM1457, os quais devem realçar, respectivamente, óxidos/hidróxidos de ferro e argilas e/ou carbonatos. Aqui o conjunto 'tradicional' das bandas TM1345 (Loughlin, 1991) não foi utilizado para destacar as superficies ricas em ferro, pois o mesmo mostrou resultados inferiores.

Nas Tabelas 5.7 e 5.8, são apresentadas as matrizes de auto-vetores para esses dois conjuntos de bandas e indicadas as PCs que contém a informação espectral relacionada aos óxidos/ hidróxidos de ferro e aos argilo-minerais e/ou carbonatos. Na Tabela 5.7, a PC com os maiores índices de auto-valores para as bandas TM2 e TM3 e maior contraste espectral (sinais invertidos), é a PC4. Desta forma, na imagem correspondente a essa PC (denominada imagem 'Fe'), os pixels que contém maior conteúdo de óxidos/hidróxidos de ferro deverão aparecer com altos valores de níveis de cinza, ou seja, em tons claros (Figura 5.17).

Tabela 5.7 - Autovetores obtidos por principais componentes para as bandas TM2345

Covariância de auto-vetor							
	PC1	PC2	PC3	PC4			
TM 2	0.071	0.687	-0.430	-0.581			
TM 3	0.203	0.522	-0.215	0.800			
TM 4	0.840	-0.382	-0.381	-0.066			
TM 5	0.499	0.790	-0.393	-0.131			

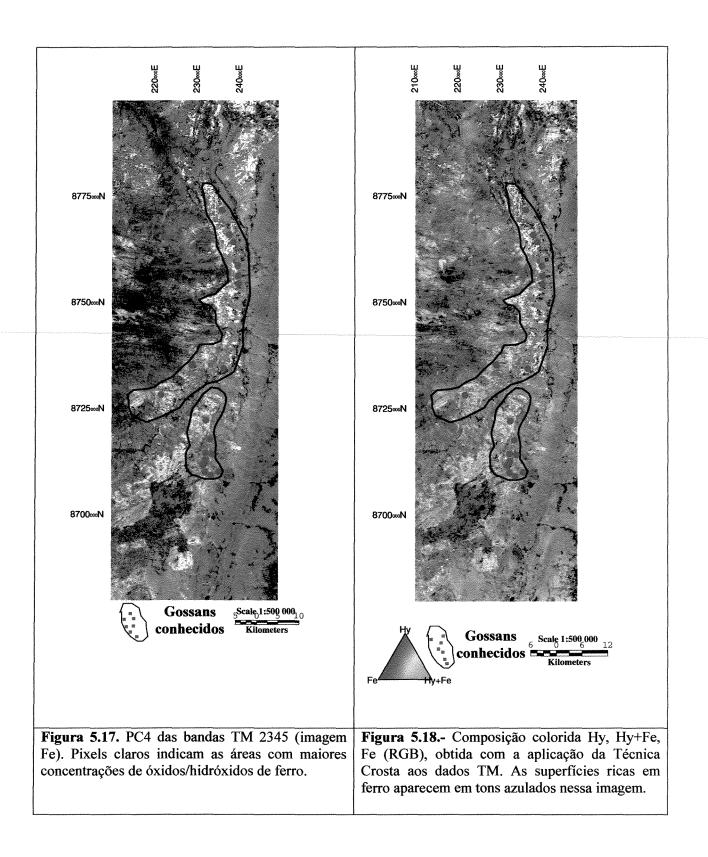
Seguindo o mesmo raciocínio, para o conjunto de bandas TM1457, nota-se que os maiores valores de auto-vetores para as bandas TM5 e TM7, com sinais opostos, estão contidos na PC2 (Tabela 5.8). Esta imagem, denominada 'Hy', a princípio deve discriminar as áreas, na imagem, com predomínio de argilo-minerais e/ou carbonatos.

Tabela 5. 8 - Autovetores obtidos por principais componentes para as bandas TM1457

	Co	variância de auto-v	etor	
	PC1	PC2	PC3	PC4
TM 1	0.067	0.228	0.866	0.438
TM 4	0.624	0.748	-0.207	-0.076
TM 5	0.756	0.611	0.014	-0.231
TM 7	0.181	-0.113	0.454	-0.864

Caracterizadas as PCs que concentram a informação de interesse, o procedimento final compreendeu a confecção da composição, em RGB, que integra os componentes ricos em óxidos e hidróxidos de ferro e componentes ricos em hidroxila/carbonato (**Figura 5.18**). Isso foi feito da seguinte forma:

- a PC2 das bandas TM1457 (realce da hidroxila/carbonato, imagem Hy) foi alocada ao vermelho
- a soma das imagens Hy e Fe foi alocada ao verde
- a PC4 das bandas TM2345 (realce de óxidos e hidróxidos de ferro, imagem Fe) foi alocada ao azul.



UNICAMP BIBLIOTECA CENTRAL SEÇÃO CIRCULANTE Para os dados do sensor ASTER foram selecionados os seguintes conjuntos de quatro bandas para aplicação da técnica Crosta: AST1479 e AST1346. Esses conjuntos visaram a separação, respectivamente, de superfícies ricas em ferro e superfícies ricas em argilas e carbonatos. Além do conjunto de bandas AST1479, outros foram utilizados para o realce de óxidos/hidróixidos de Fe, entre os quais destacam-se: AST1459, AST1478, AST1479, e AST1579, todos apresentando resultados similares ao conjunto AST1479. A estatística dos conjuntos AST1479 e AST1346 é apresentada nas Tabelas 5.9 e 5.10.

Tabela 5.9 – Autovetores obtidos por principais componentes para as bandas AST1479

	Covariância de auto-vetor									
	PC1	PC2	PC3	PC4						
AST 1	0.421	-0.905	-0.049	0.036						
AST 4	0.645	0.257	0.711	-0.115						
AST 7	0.549	0.307	-0.514	0.583						
AST 9	0.325	0.145	-0.477	-0.803						

Tabela 5.10 - Autovetores obtidos por principais componentes para as bandas AST1346

	Covariância de auto-vetor									
	PC1	PC2	PC3	PC4						
AST 1	0.434	-0.332	0.833	-0.088						
AST 3	0.197	-0.865	-0.430	0.164						
AST 4	0.677	0.204	-0.337	-0.621						
AST 6	0.560	0.315	-0.087	0.761						

Através da avaliação dos valores e sinais para os autovetores obtidos para o conjunto de bandas AST1479, nota-se que a PC2 é a que apresenta os maiores valores e sinais opostos, denotando contraste espectral para as bandas 1 e 4, selecionadas para o mapeamento de feições espectrais contendo óxidos e hidróxidos de ferro (Tabela 5.9). Já para o conjunto de bandas AST1346, a PC que contém os maiores valores e sinais opostos para as bandas 4 e 6, selecionadas para o mapeamento de feições relacionadas a hidroxila e/ou carbonatos, é a PC4 (Tabela 5.10).

As imagens resultantes deste processamento, denominadas 'Fe' (Figura 5.19) e 'Hy', foram combinadas, em cores (Figura 5.20), similarmente ao esquema apresentado anteriormente para os dados TM, onde:

- a PC4 das bandas ASTER1346 (realce da hidroxila, imagem Hy) foi alocada ao vermelho
- a soma das imagens Hy e Fe foi alocada ao verde
- a PC2 das bandas TM1479 (realce de óxidos/ hidróxidos de ferro, imagem Fe) foi alocada ao azul.

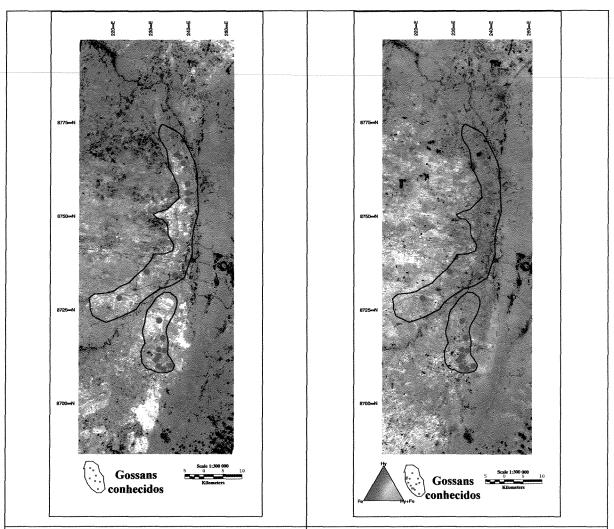


Figura 5.19 - PC2 das bandas AST 1479 (imagem 'Fe'). Pixels claros indicam áreas com maiores concentrações de compostos de ferro.

Figura 5.20 - Composição colorida Hy, Hy+Fe, Fe (RGB) obtida com a aplicação da Técnica Crosta adaptada aos dados ASTER. Superfícies mais ricas em ferro ⇒ tons azulados.

Técnica Feature-Oriented Principal Component Selection (FPCS)

A técnica FPCS foi também aplicada aos dados TM e ASTER da área em estudo, utilizando-se todas as bandas originais referentes ao VNIR e SWIR do espectro-eletromagnético. Desta forma, foram submetidas a APC as seguintes bandas: TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 e TM7 para o sensor TM, e AST1, AST2, AST3, AST4, AST5, AST6, AST7, AST8 e AST9 para o sensor ASTER.

As Tabelas 5.11 e 5.12 apresentam, respectivamente, as estatísticas expressas como auto-vetor e em porcentagem, para todas as bandas do sensor TM. Uma análise detalhada da estatística revela que informações sobre os óxidos/hidróxidos de ferro estão contidas principalmente na PC3 e PC4. Essas PCs apresentam auto-vetores com valores altos e sinais positivos—para—as bandas—TM3—(PC3→25.30%; PC4→30.53%)—e—TM5—(PC3→27.94%; PC4→6.48%) e um auto-vetor com valor negativo para a banda TM1 (PC3→ -7.59%; PC4→ -22.42%). Como os gossans possuem um alto de reflectância nas bandas TM3 e TM5 e um baixo de reflectância na banda TM1, esses serão mapeados nas PCs 3 e 4 com altos valores de cinza. A PC6 compreende auto-vetores negativos para as bandas TM3 (-5.93%) e TM5 (-1,88%) e um auto-vetor positivo para as bandas TM1(32.02%) e TM2 (48.06%). Considerando que os gossans apresentam feições de absorção nas bandas TM1 e TM2, neste caso os mesmos serão mapeados com baixos valores de DN. Conseqüentemente, uma composição colorida contendo a PC4, PC6 e PC3, em RGB, calculadas a partir das seis bandas originais referentes ao espectro refletido, deverão mapear os gossans em tons magenta (PC3+PC4), o que é demonstrado na Figura 5.21.

Tabela 5.11 - Autovetores obtidos por principais componentes para as bandas do sensor TM.

	Covariância de auto-vetor										
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6					
TM1	-0.042	-0.488	-0.156	-0.467	0.470	0.545					
TM2	0.009	-0.485	0.095	0.193	0.221	0.818					
TM3	0.268	-0.372	0.520	0.636	0.324	-0.101					
TM4	0.112	-0.569	-0.114	0.092	-0.790	-0.134					
TM5	0.807	0.024	0.574	0.135	0.005	-0.032					
TM7	0.512	0.251	-0.596	0.560	0.031	0.072					

Tabela 5.12 – Autovetores obtidos por principais componentes para as bandas do sensor TM, expressos

em porcentagem.

Covariância de auto-vetor (%)										
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6				
TM1	2,4	-22.29	-7.59	-22.42	25.53	32.02				
TM2	0.52	-22.16	4.62	9.27	12.00	48.06				
TM3	15.31	-16.99	25.30	30.53	17.60	-5.93				
TM4	6.4	-25.99	-5.55	4.42	-42.91	-7.87				
TM5	46.11	1.1	27.94	6.48	0.28	-1.88				
TM7	29.26	11.47	-29.00	26.88	1.68	4.24				

As Tabelas 5.13 e 5.14 apresentam, respectivamente, as estatísticas expressas como autovetor e em porcentagem, para todas as bandas do sensor ASTER.

Para a imagem ASTER, a análise estatística revela que a maioria das informações referentes aos gossans estão contidas nas PCs 5 e 3. Estas PC's possuem auto- vetores positivos para as bandas AST2 (PC3→17.70%; PC5→21.79%) e AST4(PC3→10.39%; PC5→24.71%) e um auto-vetor negativo (PC3→ -24.72%; PC4→ -18.66%) para a banda AST1. Como os óxidos e hidróxidos de ferro apresentam um baixo de reflectância na banda AST1 e um alto de reflectância nas bandas AST2 e AST4, eles serão mapeados com valores altos de DN's. Similarmente a PC4 compreende 15.10% de AST1, -18.40% de AST2 e −21.83% de AST4, mostrando óxidos e hidróxidos de ferro com baixos valores de DN's. Desta forma a composição colorida das 3 PC's calculadas anteriormente a partir das sete bandas originais (VIS-SWIR) ASTER, de Lapão- Irecê, mostrará os gossans em magenta (PC5 + PC3) (Figura 5.22), considerando que: R − PC5; G − PC4; B − PC3

Tabela 5.13 - Autovetores obtidos por principais componentes para as bandas do sensor ASTER

	Covariância de auto-vetor											
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9			
AST1	0.264	-0.434	-0.571	0.401	-0.453	0.211	0.066	0.035	0.015			
AST2	0.426	-0.306	0.409	-0.489	0.529	-0.185	-0.066	-0.004	0.006			
AST3	0.106	-0.749	0.630	-0.135	-0.060	-0.088	-0.020	0.002	-0.004			
AST4	0.431	0.093	0.240	-0.580	0.600	0.165	-0.102	-0.115	-0.020			
AST5	0.331	0.185	0.074	-0.181	0.074	-0.339	-0.238	0.663	-0.448			
AST6	0.362	0.205	0.037	-0.319	0.076	-0.639	0.028	-0.516	0.204			
AST7	0.378	0.180	0.160	-0.108	-0.160	0.196	0.568	0.379	0.507			
AST8	0.349	0.153	0.120	-0.198	-0.265	0.433	0.207	-0.367	-0.605			
AST9	0.216	0.124	0.069	-0.246	-0.211	0.369	-0.746	-0.026	0.367			

Tabela 5.14 - Autovetores obtidos por principais componentes para as bandas do sensor ASTER, expressos em porcentagem.

Covariância de auto-vetor (%)											
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9		
AST1	9.22	-17.87	-24.72	15.10	-18.66	8.04	3.23	1.66	0.69		
AST2	14.88	-12.60	17.70	-18.40	21.79	-7.04	-3.23	-0.19	0.28		
AST3	3.7	-30.83	27.27	-5.09	-2.47	-3.36	-0.99	0.09	-0.18		
AST4	15.06	3.83	10.39	-21.83	24.71	6.28	-5.00	-5.46	0.92		
AST5	11.56	7.61	3.20	-6.81	3.05	-12.91	-11.66	31.47	-20.59		
AST6	12.64	8.44	1.61	-12.00	3.13	-24.34	1.37	-24.49	9.37		
AST7	13.20	7.42	6.92	-4.06	-6.59	7.48	27.83	17.99	23.30		
AST8	12.19	6.30	5.20	-7.45	-10.91	16.49	10.14	-17.42	-27.80		
AST9	7.55	5.10	2.99	-9.26	-8.69	14.06	-36.55	-1.23	16.87		

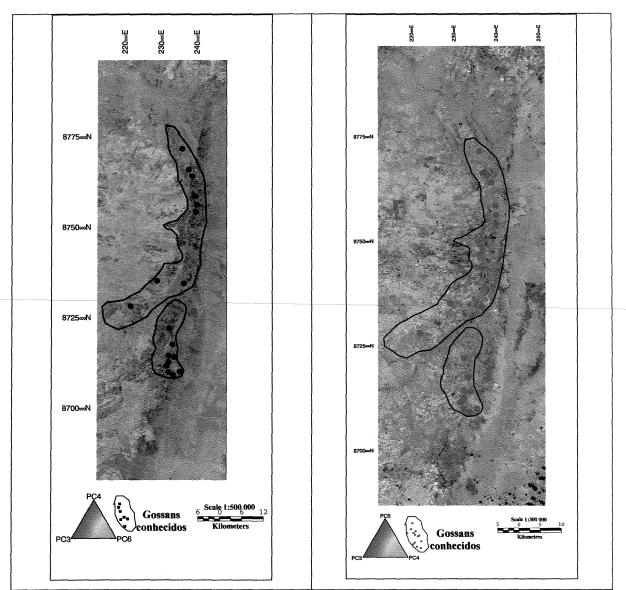


Figura 5.21- Composição colorida das PCs 4, 6 e 3, derivadas dos dados TM, para realce dos gossans presentes na área de estudo.

Figura 5.22- Composição colorida das PCs 5, 4 e 3, derivadas dos dados ASTER, para realce dos gossans presentes na área de estudo.

5.5. DISCUSSÃO

Praticamente todas as técnicas disponíveis na literatura para o processamento convencional de dados multiespectrais foram testadas para os dados TM e adaptadas aos dados ASTER visando o mapeamento dos gossans documentados na Bacia de Irecê. Apesar de resultados relativamente mais positivos com a aplicação de variações da técnica APC, áreas significativamente amplas na Bacia, onde nenhuma ocorrência de Pb-Zn-Ba foi registrada em

levantamentos sistemáticos, também foram caracterizadas como gossans, mas provavelmente tratam-se de 'falsos gossans'.

Com base no estudo de Raynes *et al.* (1985) (Capítulo 4), existe uma importante diferença entre os gossans genuínos e falsos. Com o objetivo de estudar as possíveis diferenças espectrais entre essas duas coberturas em dados TM e ASTER, a assinatura do falso gossan de Raynes *et al.* (1985) foi re-amostrada para a resolução espectral desses sensores (Figura 5.23b e 5.23c). A comparação entre a curva média dos gossans de Lapão (Figura 5.2) e a curva de um falso gossan permite uma constatação importante e que ratifica a análise concebida anteriormente. Os gossans genuínos são distintos de coberturas ferruginosas genéricas por não apresentarem feições em torno de 2,2µm, típicas dos falsos gossans e associadas à presença de caulinita. Essas feições não são bem marcadas nos dados TM (cf. Figuras 5.2b e 5.23b), mas são evidentes nos dados ASTER (Figuras 5.2c e 5.23c). Na região do VIS-NIR também há uma pequena diferença entre os gradientes espectrais interbandas, mas nada tão significativo quanto no SWIR. Com base nessa análise, torna-se empiricamente possível que essas superfícies sejam separadas senão com dados TM, mas certamente com dados ASTER. A resolução espectral deste sensor deve ser mais do que suficiente para proporcionar alguma separabilidade entre gossans genuínos e falsos, baseados em suas diferenças composicionais.

Outro ponto que merece reflexão é que toda investigação baseada em trabalhos prévios é voltada para mapear diretamente as feições relacionadas aos gossans, algo que não alcançou um resultado satisfatório na Bacia de Irecê. Uma alternativa a ser testada é basear a estratégia de processamento dos dados na premissa estabelecida em epígrafe sobre a separabilidade dos gossans verdadeiros dos falsos, mas utilizando o critério de detecção do alvo por exclusão (ou negação), ou seja: "entre todas as superficies ricas em ferro, aquelas nas quais as feições espectrais relacionadas a argilo-minerais (caulinita) são <u>ausentes</u>, provavelmente representam gossans genuínos".

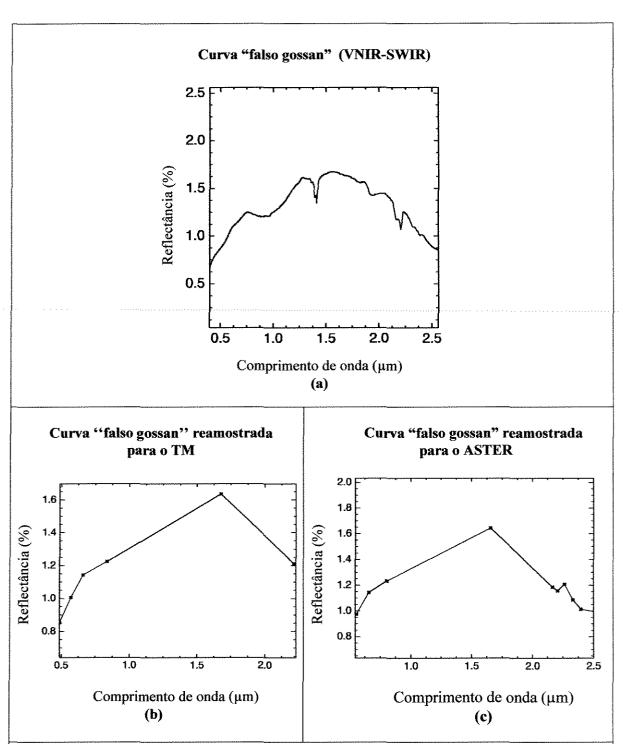


Figura 5.23. (a) — Curvas de reflectância espectral do falso gossan. (b) Curva reamostrada para a resolução espectral do sensor TM no espectro VIS, NIR. SWIR (6 bandas). (c) Curva re-amostrada para a resolução espectral do sensor ASTER no espectro VIS, NIR. SWIR (9 bandas).

Com base nessa relação, os dados do sensor ASTER foram processados novamente segundo a APC adaptada. As bandas utilizadas na APC para o realce dos gossans genuínos foram selecionadas a partir dos espectros dos materiais coletados em campo e re-amostrados para o sensor ASTER (Figuras 5.1c e 5.2c), enquanto a seleção das bandas ideais ao realce dos falsos gossans foi feita com base na curva espectral do falso gossan de Raynes *et al.* (1985), também re-amostrada para o sensor ASTER (Figura 5.23c). Assim, dois conjuntos de bandas foram selecionados: AST1478, para realce de óxidos/hidróxidos de ferro; e AST1467, para realce da caulinita. No conjunto AST1478, às superfícies ricas em minerais contendo ferro em sua estrutura teoricamente devem apresentar máximos (reflexão) nas bandas AST4 e AST7 e mínimos (absorção) nas bandas AST1 e AST8. No conjunto AST1467, as superfícies ricas em caulinita devem apresentar máximos nas bandas AST4 e AST7 e mínimos nas bandas AST1 e

Analisando-se as matrizes de auto-vetores derivadas da APC aplicada a esses conjuntos de bandas (Tabelas 5.15 e 5.16), nota-se que as superfícies ricas em ferro serão realçadas na PC2, ao passo que as superfícies ricas em caulinitas serão realçadas na PC4.

Tabela 5.15 – Autovetores obtidos por principais componentes para as bandas AST1478 (ferro)

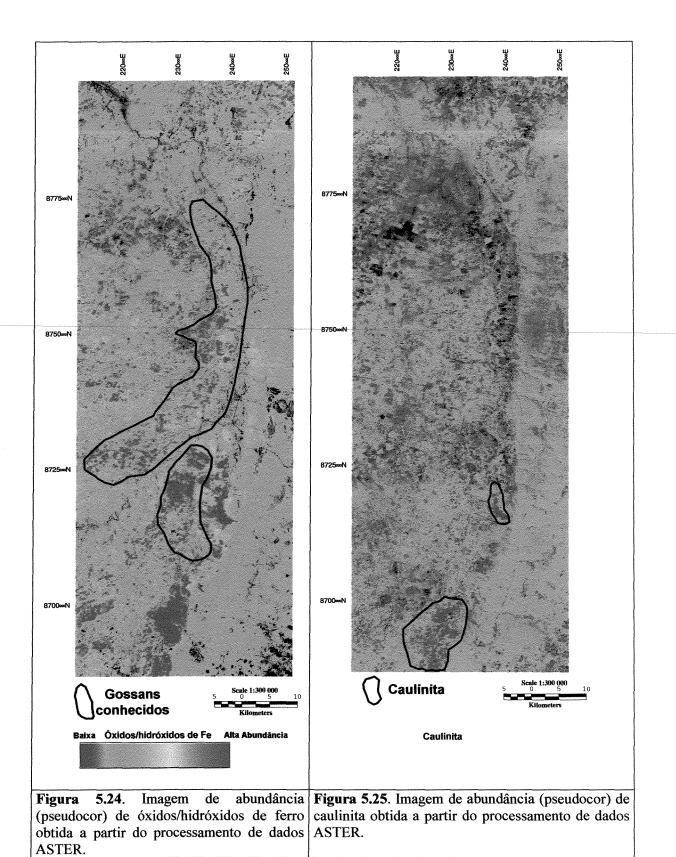
	C	lovariância de auto-v	etor	
	PC1	PC2	PC3	PC4
AST 1	0.362	-0.931	-0.039	0.030
AST 4	0.600	0.198	0.772	-0.066
AST 7	0.524	0.244	-0.409	0.706
AST 8	0.484	0.186	-0.484	-0.704

Tabela 5.16 – Autovetores obtidos por principais componentes para as bandas 1467 (caulinita)

Covariância de auto-vetor								
	PC1	PC2	PC3	PC4				
AST 1	0.354	-0.934	0.033	0.041				
AST 4	0.595	0.190	-0.754	-0.204				
AST 6	0.500	0.185	0.602	-0.594				
AST 7	0.520	0.240	0.261	0.777				

Nas imagens correspondentes a PC2 (ferro) e PC4 (caulinita), os pixels que contém maior conteúdo de óxidos/hidróxidos de ferro e caulinita deverão aparecer em tons de cinza mais claros. Essas imagens em tons de cinza podem ser apresentadas em pseudocor, como mapas de abundância mineral, onde as cores 'quentes' representam maior abundância, e as cores 'frias', menor abundância. Utilizando essa forma de representação, nas Figuras 5.24 e 5.25, as áreas com maior abundância em óxidos/hidróxidos de ferro e caulinita aparecem em tons de vermelho, enquanto as áreas em tons de verde e azul correspondem àquelas muito pobres ou sem conteúdo nesses materiais. Os mapas de abundância mineral mostram claramente que foi possível separar, entre as superfícies mais ricas em ferro, aquelas sem nenhum conteúdo de caulinita e outras com conteúdo simultâneo de caulinita e compostos de ferro.

Na Figura 5.26a, a PC2 do conjunto AST1478 (ferro) e a PC4 do conjunto AST1467 (caulinita) foram submetidas, numa primeira etapa, a um aumento de contraste independente, para realce dos pixels com maior abundância nos materiais de interesse; em seguida, a PC2 e a PC4, já com os histogramas ajustados, foram alocadas aos canais vermelho e verde e, posteriormente, filtradas com um filtro do tipo passa-baixas (ou de suavização – Crósta 1993), para minimização de ruídos e de pixels isolados, incoerentes. Esse produto mostra áreas exclusivamente ricas em óxidos/hidróxidos em vermelho, áreas ricas em caulinita em verde, e áreas com concentração simultânea nestes dois materiais, em amarelo. Na Figura 5.26b, essa mesma composição foi sobreposta a banda AST3, através de uma transformação IHS (Crósta 1993), facilitando a contextualização da distribuição espacial dos materiais discriminados. Considerando a premissa adotada para o processamento dos dados, as áreas em vermelho e amarelo nestas imagens correspondem, respectivamente, aos gossans genuínos (principalmente compostos por goethita) e falsos (compostos por uma mistura de goethita e caulinita). Praticamente todas as áreas indicadas como gossans genuínos são coincidentes ou próximas às ocorrências de gossans conhecidos.



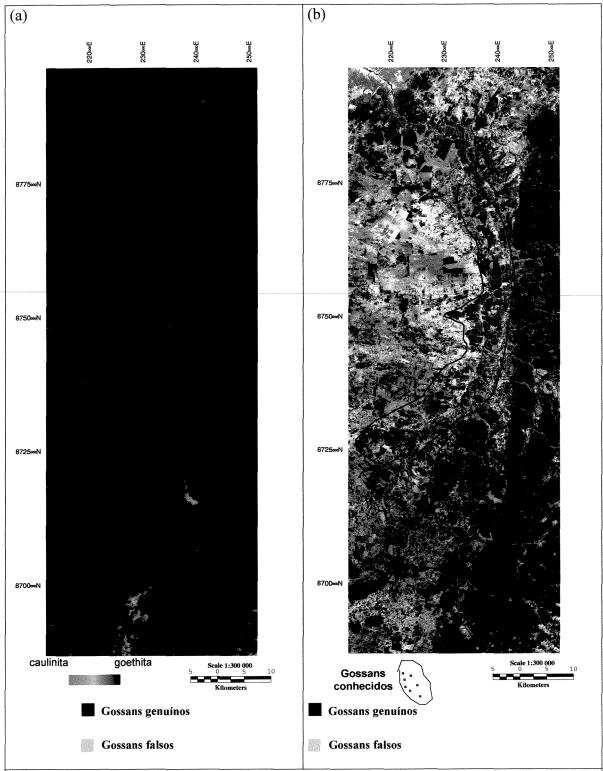


Figura 5.26. (a) Imagem falsa-cor ilustrando as superfícies ricas em (i) óxidos/hidróxidos de ferrovermelho, (ii) caulinita – verde; (iii) e uma mistura entre esses dois materiais – amarelo. Considerando o modelo de detecção adotado nesta investigação, os gossans genuínos e falsos estão localizados, respectivamente, em setores com dominância de pixels vermelhos e amarelos. (b) mesma imagem, sobreposta a banda AST3.

A Figura 5.27 ilustra o mapa apresentado na Figura 5.26 superposto a um modelo de elevação digital gerado a partir das bandas estereoscópicas (3B e 3N) do ASTER no ambiente do software AsterDTM® (www.sulsoft.com.br). Nesta figura é possível notar que além das diferenças composicionais, as áreas indicadas como sendo de gossans falsos aparecem em setores com relevo mais aplainado (possivelmente relacionados a planícies de inundação dos rios que cruzam a área), enquanto muitas das superfícies relacionadas aos gossans genuínos ocupam porções de relevo correspondentes a ligeiros altos topográficos na paisagem. Isso demonstra que os modelos digitais de terreno podem também ser uma ferramenta útil na delimitação de gossans associados a mineralizações, conforme também verificado por Almeida (2000).

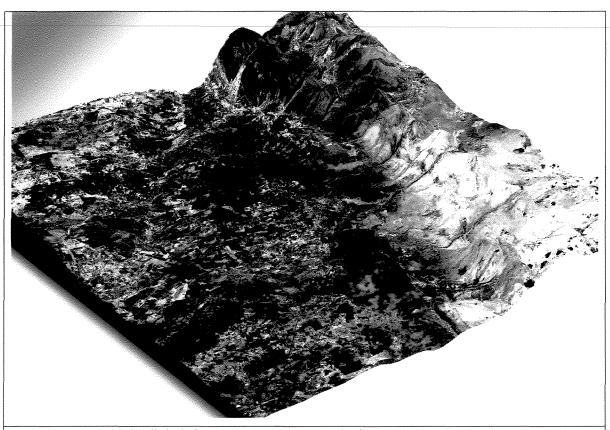


Figura 5.27. Modelo digital de terreno gerado a partir das bandas 3N e 3B do sensor ASTER através do software AsterDTM. Exagero vertical = 26 vezes.

5.6 - CLASSIFICAÇÃO ESPECTRAL

5.6.1 – Introdução

Duas metodologias foram aplicadas aos dados ASTER visando o mapeamento espectromineralógico das coberturas presentes na área de estudo: o: *Spectral Angle Mapper* (SAM) (Kruse *et al* 1993) e o *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF) (Boardman 1995).

Estes métodos de classificação espectral estão baseados na comparação entre a assinatura espectral dos pixels de composição desconhecida, que constituem a imagem, e a assinatura espectral dos materiais de referência (*endmembers*), podendo estes incluir (i) espectros de minerais puros, (ii) misturas de alguns minerais, (iii) pixels da própria imagem, cuja composição é conhecida.

Neste trabalho, a curva espectral média dos gossans genuínos da bacia de Irecê, reamostrada para a resolução espectral do ASTER, foi utilizada como material de referência para a classificação espectral por ambos os métodos.

5.6.2 - Etapas do Processamento

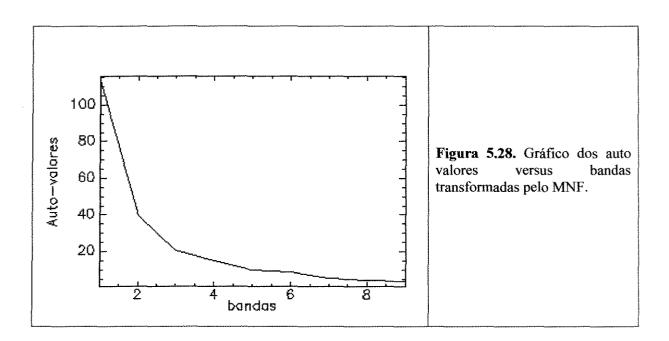
O processamento com técnicas de processamento de dados hiperespectrais, adaptadas aos dados multiespectrais do sensor ASTER, foi feito utilizando o *Spectral Mapping Wizard*, disponível no software ENVI. A sequência de etapas relevantes à aplicação de técnicas hiperespectrais utilizadas neste estudo encontram-se detalhadas na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Etapas para a aplicação de técnicas de processamento hiperespetral.

	Etapas
1	Correção atmosférica – conversão dos dados de DN para reflectância aparente
2	Criação da biblioteca espectral
3	Aplicação da técnica Minimum Noise Fraction (MNF)
4	Cálculo do Pixel Purity Index (PPI) – Seleção de pixels puros (visualização n dimensional)
5	Aplicação da técnica Spectral Angle Mapper (SAM)
6	Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF)

5.6.2.1 - Etapa 3 - Minimum Noise Fraction

A técnica *Minimum Noise Fraction* (MNF) (Green *et al.* 1988; Boardman & Kruse 1994), é usada para determinar a dimensionalidade verdadeira dos dados e remover o ruído dos mesmos, e consequentemente reduzir do número de bandas, para ser processadas em etapas posteriores. Consiste de duas transformações por principais componentes (APC): A primeira tem como objetivo remover a correlação interbandas e a segunda permite eliminar os ruídos. As imagens originadas deste processo são selecionadas para a aplicação de técnicas posteriores, onde a seleção das imagens é feita com base no exame dos auto valores. A Figura 5.28 mostra o gráfico dos auto valores versus bandas transformadas pelo MNF. A análise do gráfico permite concluir que a totalidade das informações estão contidas nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e nas bandas 6, 7, 8 e 9 estão concentrados os ruídos.



5.6.2.2 - Etapa 4 - Pixel Purity Index (PPI) (Índice de Pureza de Pixels)

A técnica do índice de pureza dos pixels é, segundo Boardman *et al* (1995), usada para determinar, nas imagens selecionadas na etapa anterior, os pixels que representam materiais puros em relação a misturas espectrais.

A identificação dos pixels espectralmente puros pode ser feita de forma interativa pelo usuário, onde o programa ENVI fornece um diagrama de dispersão multidimensional, no qual

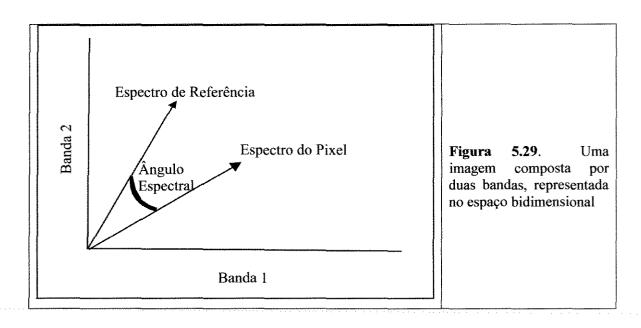
estes pixels estão projetados nas extremidades deste diagrama e podem ser interativamente marcados pelo usuário. Esta seleção de pixels puros é feita por meio de algumas interações, utilizando-se as várias combinações multidimensionais das bandas selecionadas pelo processo MNF. Ao final desta etapa são caracterizados, como pixels puros, aqueles que apresentam um maior números de registros como pixels puros durante o processo de interação.

5.6.2.3 - Etapa 5 - Spectral Angle Mapper (SAM)

O Spectral Angle Mapper é uma técnica de classificação supervisionada, utilizada para comparar os espectros de cada pixel da imagem com os espectros individuais, provenientes de bibliotecas espectrais (http:// speclab.cr.usgs.gov) ou espectros de amostras medidos em campo ou laboratório, com base numa medida de similaridade denominada ângulo espectral (Kruse *et al.* 1993).

O SAM foi originalmente desenvolvido para a classificação espectral de dados hiperespectrais (Clark 1999; Boardman 1991; Crosta *et al* 1998), tem sido tentativamente adaptado para uso com dados multiespectrais, mas com resultados limitados (Tapia 2002, Almeida 2000, Swalf 2000).

Nesta técnica os espectros da imagem e os espectros de referência são considerados como vetores, cuja dimensionalidade é igual ao número de bandas do sensor (Figura 5.29). O ângulo entre o espectro de referência e o pixel da imagem é dado em radianos; quanto menor for o ângulo entre os dois vetores, maior será a similaridade entre o pixel da imagem e o material de referência.



Uma das limitações deste processo é que somente a direção é considerada para os espectros e não o seu comprimento, o que torna o método insensível a fatores de ganho e a todas as possíveis diferenças de iluminação da cena. Os pixels escuros cairão sempre próximos a origem do espaço n-dimensional (Figura 5.29).

Aplicando-se a técnica SAM, por meio do *Spectral Mapping Wizard* dois resultados são apresentados: O primeiro refere-se a um conjunto de imagens, denominadas de *Rule Images*. Neste caso para cada espectro de referência utilizado, será gerada uma imagem *Rule*, onde cada pixel possui valor igual ao ângulo espectral. Nas imagens *Rules* os pixels originalmente mais escuros apresentam um menor valor para o ângulo entre os espectros e conseqüentemente uma maior similaridade entre os mesmos. Desta forma, por uma questão visual, é necessário que os histogramas referentes às estas imagens passem por um cuidadoso ajuste, de modo que os pixels originalmente escuros, assumam valores próximos a 255.

O segundo resultado apresentado é caracterizado por um mapa de classificação final. Este resultado está baseado na similaridade espectral dos pixels da imagem com os materiais de referência selecionados pelo usuário. Cada classe espectral apresentada no mapa final é representada por uma cor, designada automaticamente pelo programa.

A Figura 5.30a apresenta o resultado deste mapa de classificação SAM para a curva média dos gossans na bacia de Irecê. , do qual se obteve o melhor resultado na aplicação desta técnica. Como pode ser observado, ás áreas com ocorrências de assinaturas espectrais próximas tanto dos gossans verdadeiros quanto daqueles falsos (Figura 5.26) foram confundidas pelo

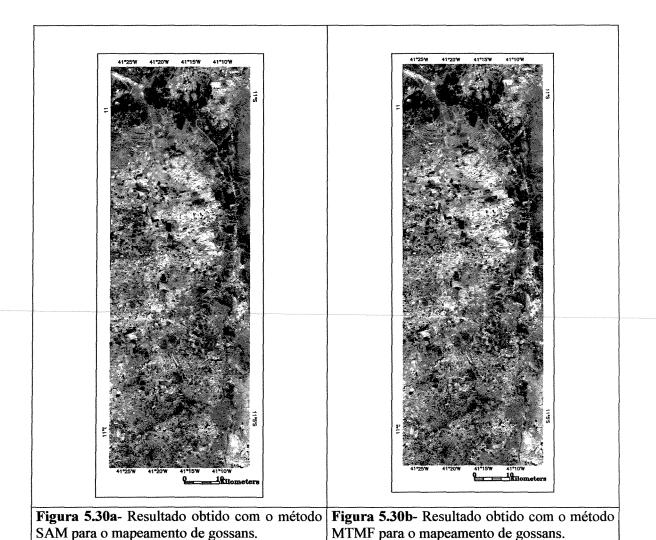
classificador. Desta forma,o método não mostrou-se sensível o suficiente para separar as áreas mineralizadas de áreas estéreis.

5.6.2.4 - Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF)

O MTMF é uma técnica desenvolvida para classificação espectral, utilizada para mapear a distribuição e abundância de endmembers específicos à escala de sub-pixel (Chen and Reed, 1987). Esta técnica utiliza o filtro de ajuste (*Matched Filter*), o qual maximiza a resposta do endmember a ser mapeado. A utilização deste filtro possibilita o mapeamento eficaz de materiais específicos, baseado no ajuste de espectros de bibliotecas ou espectros da própria imagem.

Os resultados obtidos por meio desta técnica são representados por uma serie de imagens em escala de cinza, compreendendo duas imagens para cada *endmember* selecionado (Imagem *MF Score* e Imagem *Infeasibility* — ou de improbabilidade). A imagem de improbabilidade é adicionada aos resultados para reduzir o número de "falsos positivos" (pixels que não se ajustam aos endmembers selecionados). Os falsos positivos caracterizados por esta técnica apresentam altos valores de improbabilidade, enquanto os pixels corretamente mapeados são caracterizados por altos valores de *MF Score* e baixos valores de improbabilidade. A seleção dos pixels de interesse é feita de forma interativa pelo usuário, por meio de um diagrama de dispersão bidimensional (*MF Score* x Improbabilidade) (Figura 5.31). A Figura 5.30b ilustra o resultado desta técnica onde os pixels com assinatura mais similar aos espectro médio dos gossans foram mapeados em vermelho.

Conforme pode ser observado na Figuras 5.30a e 5.30b, os resultados obtidos pelas duas técnicas, SAM e MTMF, não foram positivos quanto à separação entre gossans genuínos e outras superfícies ferruginosas presentes na área de estudo.



42.51 Figura 5.31 -**31.**91 "falsos positivos" Diagrama de dispersão 2D MF Score x Pixels Infeasibility 21,30 corretamente mapeados ("improbabilidade") utilizado para separar os falsos positivos dos 10.69 pixels verdadeiramente relacionados ao alvo de interesse. 0.09 -0.01 **MF** Score

Capítulo 6 – Mapeamento de Gossans na Bacia de Irecê (BA) Utilizando Imagens Termais Multiespectrais do Sensor ASTER

6.1 - INTRODUÇÃO

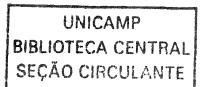
Minerais contendo moléculas de Fe, OH⁻, H₂O, SO₄ e CO₃ em sua composição caracteristicamente apresentam feições espectrais na região entre 0.4-2.5μm, resultado de processos eletrônicos e transições vibracionais (Hunt, 1980). Em contraste, os silicatos, entre os quais o quartzo, exibem feições espectrais típicas no infravermelho termal, na janela atmosférica compreendida entre 8 e 12μm (Hook *et al.* 1999).

Imagens multiespectrais adquiridas em comprimentos de onda infravermelho termal (thermal infrared – TIR) têm sido usadas com sucesso em mapeamento geológico e exploração mineral, principalmente a partir da década de 80, quando vários novos sensores aeroportados foram construídos para comportar múltiplas bandas nessa região (Sabine *et al* 1994, Agar 1994, Penteado 1999).

Com o advento do sensor ASTER, pela primeira vez na história do sensoriamento remoto orbital, é possível o acesso a dados multiespectrais termais, com cobertura global. As imagens termais do ASTER devem proporcionar avanços significativos no mapeamento remoto de vários silicatos, visto que estas imagens são extremamente sensíveis para a detecção das características de emissividade espectral da ligação Si-O, além de carbonatos e outros minerais associados a depósitos metálicos (Sabine *et al.* 1994).

Os dados multiespectrais termais do sensor ASTER, apesar da resolução espacial limitada a 90m, já começaram a proporcionar resultados promissores em aplicações geológicas. Rowan & Mars (2003) analizaram dados TIR do ASTER na região de *Mountain Pass* – Califórnia, e demonstraram que pelo menos cinco conjuntos litológicos puderam ser mapeados através destes dados, incluindo unidades quartzíticas, carbonáticas, granúticas, granodioríticas e máficas.

Neste Capítulo, os dados termais do sensor ASTER serão avaliados quanto ao seu potencial para a caracterização de coberturas da Bacia de Irecê, com ênfase na distinção entre os gossans genuínos, associados às mineralizações de Pb-Zn-Ba da bacia, e os gossans falsos, correspondentes a superfícies lateríticas genéricas.



6.2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A energia térmica é um tipo de energia cinética relacionada ao movimento aleatório de partículas. Esse movimento aleatório resulta na colisão de partículas, o que pode causar mudanças no orbital do elétron ou movimentos vibracionais e rotacionais de átomos ou moléculas (Hook *et al.* 1999). A mudança de estados de energia de mais baixos para mais altos resulta na emissão de radiação eletromagnética, fazendo com que a energia térmica seja convertida em energia radiante.

Um material hipotético capaz de transformar, numa taxa máxima, a energia térmica em energia radiante é denominado de corpo negro (Drury 2001) A formula derivada por Max Planck para quantificar a excitância espectral de um corpo negro é a seguinte:

$$M_{\lambda} = C_1 / \lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]$$
, onde:

 M_{λ} : excitância espectral do corpo negro (W . m⁻³)

λ: comprimento de onda (m)

T: temperatura absoluta (K)

 C_1 : primeira constante de radiação (3,74151 x 10-16⁻¹⁶ W . m²)

C₂: segunda constante de radiação (0,0143879 (m.K)

Um corpo negro verdadeiro é um radiador Lambertiano, onde a relação entre radiância espectral e a excitância espectral é dada pela seguinte formula (Suits 1983; in Hook *et al.* 1999):

$$L_{\lambda} = M_{\lambda} / \pi (W. m^{-3} Sr^{-1})$$

Entretanto, os materiais não funcionam como corpos negros, mas sim emitem radiação de acordo com suas características próprias. A capacidade de um material de emitir radiação é definida como emissividade espectral (ϵ_{λ}), a qual pode ser expressa como a razão entre a radiância espectral do material ($L_{\lambda material}$) e a radiância espectral de um corpo negro ($L_{\lambda corpo_negro}$) (Figura 6.1), ou seja:

 $\epsilon_{\lambda} = L_{\lambda (material)} / L_{\lambda (corpo\ negro)} \Rightarrow$ para uma dada temperatura e comprimento de onda

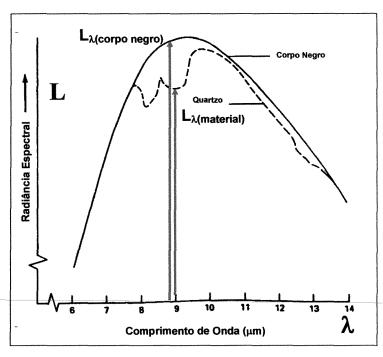


Figura 6.1. Estimativa de emissividade de materiais, com exemplo para o quartzo.

Na medida em que esses materiais reais estejam em equilíbrio termal com a sua vizinhança, a lei de Kirchhoff estabelece que a absortância espectral é igual à emissividade espectral. Essa importante relação pode ser usada para determinar a emissividade (ε_{λ}) de um material através da medida de sua reflectância hemisférica (R), assumindo que: ε_{λ} =1-R (Hook et al. 1999).

6.3- ESPECTROSCOPIA DE MINERAIS NO INFRAVERMELHO TERMAL

Salisbury *et al.* (1991, 1994) apresentaram uma extensa documentação sobre o comportamento espectral de minerais no infravermelho termal. As feições de absorção mais intensas de todos os silicatos ocorrem em torno de 10µm, porção do espectro conhecida como a região de estiramento da ligação Si-O (ou banda 'reststrahlen').

Para o estudo do comportamento espectral termal teórico dos minerais associados direta ou indiretamente aos gossans da Bacia de Irecê, utilizou-se a biblioteca espectral da John Hopkins University (JHU). Esta biblioteca, publicada a partir de 1991 (Salisbury *et al.* 1991), compreende dados de reflectância bidirecional/bicônica de mais de 300 amostras de minerais medidos no intervalo entre 2,0 e 25µm. Tal biblioteca foi especificamente utilizada visto que o espectrorradiômetro FieldSpec FR não cobre o intervalo do espectro termal, nem tampouco a

biblioteca clássica do USGS, além do que a biblioteca da JHU é uma das raras de domínio público que proporcionam dados de reflectância acima de 2,5μm. Embora contenha um acervo formidável, os espectros dessas biblioteca não devem ser utilizados para estimativas quantitativas de emissividade, visto que somente dados de reflectância hemisférica (R – medidas com uma esfera integradora) podem ser convertidos e utilizados desta forma (conforme apontado em epígrafe). Entretanto, segundo (Salisbury *et al.* 1991), os espectros de emissividade convertidos a partir dos dados de reflectância bicônica da biblioteca JHP, mantém a forma e a posição das feições espectrais e, portanto, podem ser utilizados qualitativamente em aplicações de sensoriamento remoto.

Assim, os dados em reflectância bicônica da biblioteca JHP foram convertidos para emissividade através da aplicação da lei de Kirchhoff, passando a ter um significado mais direto do ponto de vista físico. Um exemplo desta conversão é apresentado na Figura 6.2, que ilustra espectros de reflectância e espectros calculados de emissividade para quartzo e caulinita.

A maior parte dos materiais naturais apresentam emissividade entre 0.9 e 1.0 na região entre 8μm e 12μm (Salisbury *et al.* 1991). Entretanto, alguns materiais comuns, como o quartzo e a caulinita (além de vários metais), apresentam emissividades bem mais baixas nessa região (Figura 6.2), podendo chegar até cerca de 0.55 (Hook *et al.* 1999).

Na Figura 6.3 são apresentados espectros de emissividade para quatro materiais com ocorrências superficiais registradas ou inferidas (Capítulos 2, 3 e 4) na bacia de Irecê: quartzo, caulinita, calcita e goethita.

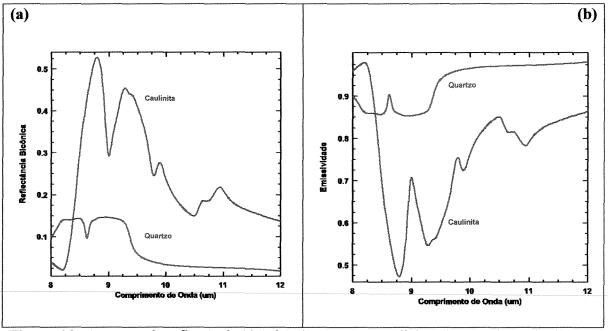


Figura 6.2. Espectros de reflectância bicônica de quartzo e caulinita (a) (granulometria de 125-500μm - Salisbury *et al.* 1991) convertidos para emissividade utilizando a lei de Kirchhoff (b).

Para maior parte dos silicatos ordinários, incluindo o quartzo (Figura 6.3a), os mínimos de emissividade ocorrem em comprimentos de onda relativamente mais curtos, em torno de 8.5μm, e são devidos a vibrações envolvendo modos de estiramento da ligação Si-O-Si (Salisbury *et al.* 1991). A única outra feição importante entre 8.5-12μm relacionada aos silicatos ocorre devido à ligação H-O-Al, em torno de 11μm, que é característica de silicatos básicos de alumínio do grupo dos minerais argilosos (Salisbury *et al.* 1991), como é o caso da caulinita (Figura 6.3b).

Nos carbonatos, os mínimos de emissividade, em geral agudos, são devidos a vibrações moleculares internas envolvendo o íon CO^{3-} e ocorrem centrados em torno de 11.2µm (Salisbury *et al.*1991) (Figura 6.3c). Essa feição se desloca para comprimentos de onda ligeiramente mais longos na medida em que o peso atômico do cátion aumenta (dolomita $[CaMg(CO_3)_2] \Rightarrow$ calcita $[CaCO_3]$) \Rightarrow rodocrosita $[MnCO_3]$) \Rightarrow Whiterita $[BaCO_3]$) \Rightarrow Cerussita $[PbCO_3]$) (Lyon and Green, 1975; in Hook *et al.* 1999).

Nos hidróxidos de ferro (goethita - Figura 6.3d), o mínimo de emissividade ocorre variavelmente entre 11 e 11.5µm e é devido à ligação Fe-OH. (Salisbury *et al.* 1991).

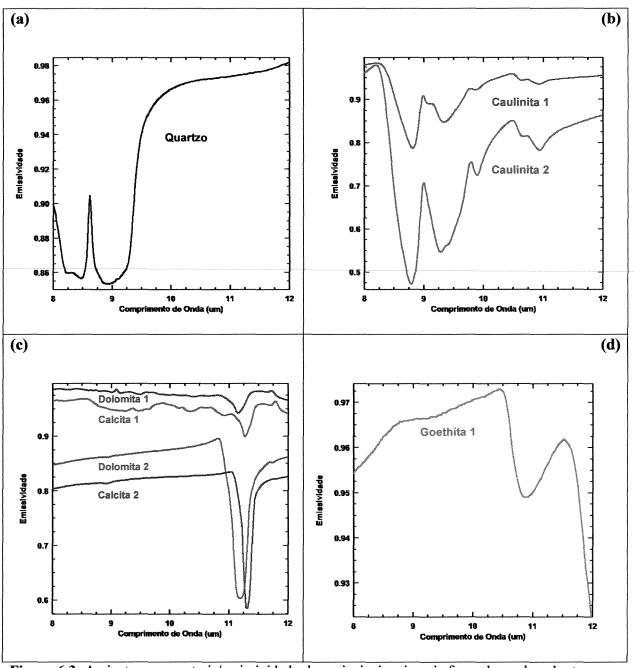


Figura 6.3. Assinaturas espectrais/emissividade dos principais minerais formadores de coberturas na Bcaia de Irecê: quartzo (a), caulinita (argilo-minerais) (b), goethita (c), carbonatos (d).

6.4 - IMAGENS MULTIESPECTRAIS TERMAIS DO SENSOR ASTER

Neste estudo, os dados termais do sensor ASTER foram adquiridos junto ao *Eros Data Center* (EDC - EUA) com nível de processamento 1B, na sua forma bruta, ou seja, em variações de DNs entre os 4096 níveis possíveis (12 bits), na resolução espacial de 90m. Adicionalmente,

produtos ASTER com nível de processamento superior (nível 2) também foram adquiridos, incluindo dados nível 1B convertidos para emissividade na superfície (produto padrão AST-05 - surface emissivity). Esse é um produto validado dentro do programa ASTER e pode ser utilizado, sem objeções, em publicações científicas. Detalhes sobre como esse produto é gerado podem ser encontrados em Abrams et al. (2003).

6.5 – ESTRATÉGIA DE PROCESSAMENTO DIGITAL

Os espectros de emissividade calculados a partir da biblioteca da JHU para os principais materiais com ocorrências superficiais na bacia de Irecê foram re-amostrados para a resolução espectral do sensor ASTER (Figuras 6.4 e 6.5), através da convolução dos espectros pelos filtros de resposta espectral das bandas termais. Este procedimento foi feito no sentido de proporcionar subsídios para a definição de critérios para o mapeamento remoto de concentrações superficiais desses minerais, através de técnicas de processamento digital aplicadas aos dados multiespectrais termais do ASTER.

A análise das Figuras 6.4 e 6.5 sugere que embora os quatro minerais sob investigação – quartzo, caulinita, carbonatos e goethita - tenham respostas espectrais no espectro termal, a goethita apresenta uma variação de emissividade muito baixa, geralmente entre 0.9 e 1 (Figura 6.4). Esse fato praticamente elimina as chances de que esse mineral possa ser diferenciado da maior parte dos materias naturais nesse intervalo do espectro. Conseqüentemente, os gossans genuínos, com relação mais estreita às concentrações de goethita, não podem ser mapeados diretamente a partir de dados termais.

A caolinita e o quartzo, além dos carbonatos, têm suas feições diagnósticas preservadas na resolução espectral dos dados termais do ASTER (Figuras 6.4 e 6.5). A possibilidade de detecção destes minerais é interessante no contexto da área de estudo. Conforme verificado na literatura (Capítulo 4), os gossans da bacia de Irecê distinguem-se de crostas lateríticas genéricas por sua composição química. Embora ambos sejam ricos em Fe, os gossans apresentam altas concentrações de As, Sb, Ag, Zn, Cu, Pb e Bi, enquanto nas lateritas ocorrem principalmente concentrações de Al, Cr, V, Ti, Mn, Ni e sílica (Oliveira 1993). A presença de caulinita (Al₂Si₂O₅ (OH)₄) associada aos falsos gossans da bacia de Irecê foi indicada a partir do processamento de dados ASTER no espectro refletido (Capítulo 5). Considerando que o quartzo (SiO₂) é um mineral consistentemente detectável no espectro termal (Hook *et al.* 1999), sua presença em

determinada área na bacia de Irecê pode ser também utilizada para marcar potenciais gossans falsos e, principalmente, para 'filtra-los' daqueles verdadeiros.

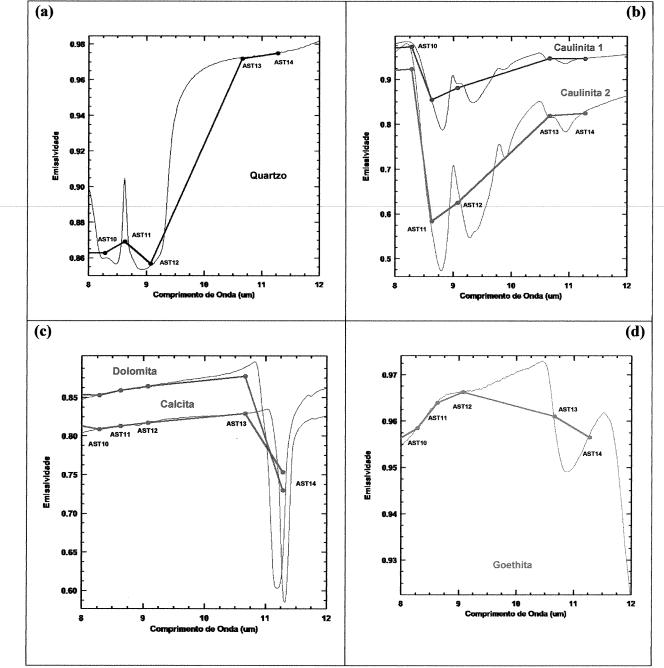


Figura 6.4. Espectros de emissividade do quartzo, caulinitas, carbonatos e goethita reamostrados para a resolução espectral do sensor ASTER.

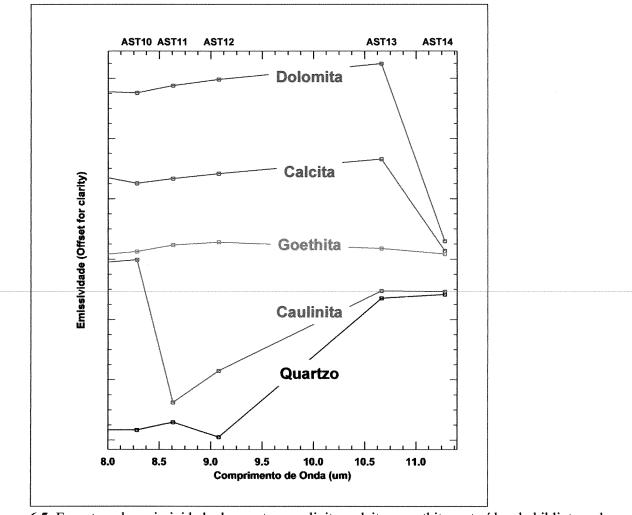


Figura 6.5. Espectros de emissividade do quartzo, caulinita, calcita e goethita, extraídos da biblioteca da JHP e re-amostrados para a resolução espectral do sensor ASTER.

Assim, a estratégia do processamento digital dos dados termais foi voltada para a determinação de coberturas ricas em sílica e caulinita existentes na área. A possibilidade de mapeamento da concentração desses minerais, simultaneamente presentes nas áreas de abrangência de gossans verdadeiros ricos em goethita, poderá ser utilizada também como critério de negação ou exclusão das áreas ricas exclusivamente em goethita, marcadora dos gossans genuínos e, portanto, de potenciais depósitos de Pb-Zn-Ba.

6.6. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS - TIR

A qualidade dos dados ASTER no nível 2, convertidos para emissividade, é praticamente idêntica aos dados originais, em DN, nível 1B. Ambos os produtos apresentam ruídos, os quais

não são específicos de uma determinada cena, mas típicos de qualquer cena adquirida pelo subsistema termal do ASTER (Abrams et al. 1993). Para efeito de ilustração, nas Figuras 6.6a e 6.6b são apresentados, respectivamente, (i) a componente resultante do processamento *Minumum Noise Fraction* (MNF) (Green *et al.* 1988) que agrega a maior quantidade de ruídos entre as cinco bandas termais e; (ii) uma composição colorida da imagem da magnitude do espectro Fourier (Souza Filho *et al.* 1996) extraído das 3 componentes MNF mais ruidosas. Nota-se que os ruídos são importantes e complexos, sendo que os múltiplos ruídos horizontais (Figura 6.6a) aparecem como 'faixas' de interferência seqüenciais, verticais e de mais alta freqüência nas imagens Fourier (Figura 6.6b). Esses ruídos são de difícil correção, embora testes com filtros mais sofisticados, como o *Zonal Notch Filter* (Souza Filho *et al.* 1996), venham mostrando resultados positivos (Souza Filho & Steinmayer, em preparação).

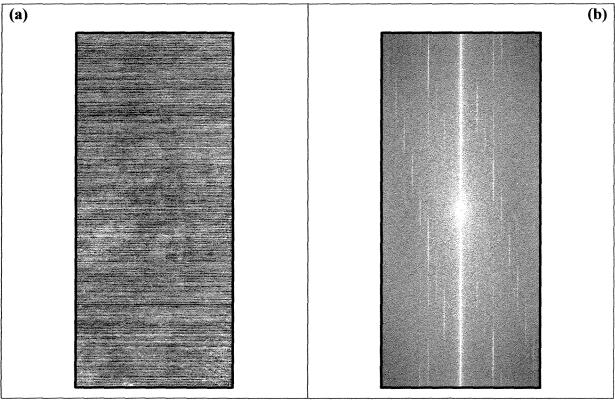


Figura 6.6. Ilustração dos complexos ruídos presentes nas bandas termais do ASTER da área de estudo. (a) imagem MNF onde para onde as componentes de ruído, decorrelacionadas entre as 5 bandas termais, foram segregadas. (b) composição colorida das imagens de magnitude obtidas a partir da aplicação de uma Transformada Fourier às bandas MNF mais ruidosas (as três últimas, para usuários do software ENVI), entre as cinco calculadas.

Independente desses ruídos, a vantagem de se trabalhar com os dados convertidos para emissividade é que esses são diretamente comparáveis aos espectros de emissividade discutidos nos tópicos anteriores, o que é crítico para a estratégia de processamento aqui pretendida. Assim, serão apresentados a seguir somente os resultados do processamento de dados previamente convertidos para emissividade.

Para o processamento das imagens termais foram utilizadas técnicas de processamento digital tais como composições coloridas, realce por decorrelação, razão de bandas, técnicas que se utilizam da Análise por Principais Componentes (APC) e técnicas de processamento de dados hiperespectrais adaptadas aos dados do ASTER.

6.6.1. Composições Coloridas e Realce por Decorrelação

Os dados adquiridas por sensores imageadores no infravermelho termal apresentam, tipicamente, um alto grau de correlação (Kahle & Rowan 1980). Isso se aplica também às imagens termais adquiridas pelo sensor ASTER sobre da área de estudo (Tabela 6.1). Mesmo a mais clássica composição colorida utilizada para separação de materiais no espectro termal (Hook et al 1999), como aquela cobrindo as regiões centradas em 10.5µm (~AST13), 9.1µm (AST12) e 8.3 µm (AST10) (Figura 6.5), aparece sem contraste espectral (desprovida de cor) (Figura 6.7a). Isso ocorre devido à distribuição/concentração preferencial da nuvem de pixels ao longo do eixo acromático no espaço RGB, o que pode ser resolvido através da aplicação da técnica de realce por decorrelação (Soha & Schwartz 1978). Gillespie *et al.* (1984) utilizou esta técnica em dados TIMS (*Thermal Infrared Multispectral Scanner* – aeroportado), constatando que além de realçar a distribuição de cores, através da eliminação da correlação entre bandas, o realce por decorrelação suprime de efeitos de temperatura de superfície dos dados e promove o realce de feições espectrais sutis, relacionadas a variações de emissividade.

A Figura 6.7b apresenta o resultado obtido no realce por decorrelação aplicado a uma composição colorida das bandas AST13, AST12, AST10 (RGB). Classicamente nesta composição realçada, segundo Hook *et al.* (1999 & referencias ali citadas sobre o uso de dados termais na região do Death Valley – EUA), pixels em vermelho estão associados a colúvios ricos em quartzo; pixels em verde algumas vezes estão associados a carbonatos (mas também podem incluir solos ricos em argila fina, cobertos por vegetação seca) e pixels arroxeados podem estar associados a áreas ricas em argilas e micas.

Tabela 6.1 - Matriz de correlação para as bandas do sensor ASTER no infravermelho termal

	Matriz de correlação para as bandas termais do ASTER									
	AST10	AST11	AST12	AST13	AST14					
AST10	1.000									
AST11	0.995724	1.000								
AST12	0.994029	0.997553	1.000							
AST13	0.993944	0.991081	0.987447	1.000	1.000					
AST14	0.990590	0.983630	0.979424	0.996967	1.000					

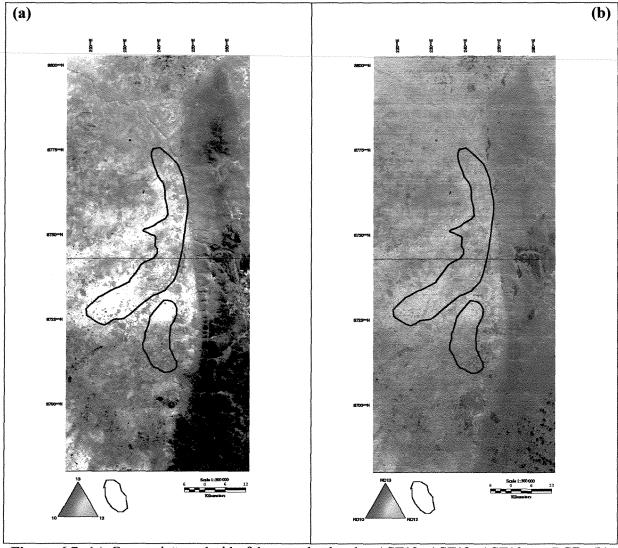


Figura 6.7. (a) Composição colorida falsa cor das bandas AST13, AST12, AST10 em RGB. (b) Resultado da aplicação do realce por decorrelação ao triplete (a). Polígonos = áreas de gossans conhecidos na bacia de Irecê.

Coincidentemente, do ponto de vista das cores, na Figura 6.7b, aparecem: (i) duas áreas principais em vermelho intenso, na porção sul da imagem, (ii) uma área em tons de magenta, na porção centro-leste da iamgem. (iii) uma grande área em verde mais vivo e dinâmico, na porção centro-oeste da imagem; (vi) e uma área ao norte em verde mais escuro, onde os ruídos horizontais dominam o sinal e controlam a variação tonal. A interpretação preliminar desta composição colorida, tendo como base as relações de Hook et al. (1999), é de que as áreas em tons de vermelho e magenta são ricas em sílica. As áreas em vermelho intenso, na porção sul da imagem, são coincidentes com as áreas indicadas a partir dos dados ASTER no VNIR-SWIR (Capítulo 5) como possivelmente ricas em argilo-minerais e relacionadas aos gossans falsos.

6.6.2. Razões de Banda e Pseudo-Razões Adaptadas

Entre algumas vantagens dos dados termais em relação a outros dados, uma importante é que no processo de aquisição dos mesmos a influência do relevo e, portanto, do sombreamento da cena, são bem menores do que no espectro refletido. Isso suprime a necessidade de correção atmosférica da cena para realização de algumas operações interbandas como, por exemplo, a razão de bandas, em contraste ao exigido no processamento de dados adquiridos na região VNIR-SWIR.

Analisando-se os espectros de emissividade das Figuras 6.4, 6.5 e 6.8 é possível estabelecer-se algumas razões de bandas objetivando a discriminação dos materiais sob investigação:

• o quartzo pode ser separado da caulinita na razão **AST11/AST12.** Na Figura 6.8 foram plotados os espectros de emissividade do quartzo e da caulinita, re-amostrados para a resolução do ASTER, tanto como minerais puros quanto na forma de misturas, variando de 10% a 90% em proporção. Essas proporções foram geradas matematicamente, segundo um modelo linear de mistura. Nota-se nesse gráfico que o gradiente entre a banda AST11 e a banda AST12 para os dois minerais puros são opostos. A caulinita permanece com seu comportamento espectral característico (emissividade mais baixa na AST11 e mais alta na AST12) para misturas com conteúdo de até cerca de 40% de caulinita e 60% de quartzo. Acima deste patamar, o comportamento típico do quartzo (emissividade mais alta na AST11 e mais baixa na AST12) passa a dominar. Isso significa que o quartzo precisa

dominar amplamente a mistura para aparecer destacado e com exclusividade na razão AST11/AST12.

- a caulinita pode ser separada do quartzo na razão AST10/AST11. Considerando o gradiente entre as bandas AST10 e AST11 na Figura 6.8, o comportamento da caulinita neste intervalo é predominante para misturas com até 20% de caulinita e 80% de quartzo.
- o quartzo e a caulinita podem ser mapeados, como misturas, através das seguintes razões:
 AST13/AST12 e.AST13/AST10.
- o carbonato pode ser mapeado através da razão AST13/AST14.

Obviamente, a performance das razões sugeridas acima são dependentes e vulneráveis ao nível de ruídos no sinal e ao tipo de cenário geológico e fisiográfico. Em função da quantidade de ruídos e considerando testes preliminares comparativos, as razões absolutas foram substituídas por pseudo-razões adaptadas (Souza Filho & Drury, 1998). A técnica basicamente consiste na aplicação na APC a um par de bandas, mas utilizando a matriz de correlação interbandas, ao invés da matriz de covariância – segundo os autores, isso força o eixo da PC1 na origem, elimina uma parte substancial dos efeitos de ruídos, ganho e off-set e concentra a informação de interesse na PC2.

A Figura 6.9a mostra, para efeito de contextualização dos resultados numa imagem do espectro visível, uma composição colorida (AST2, AST1 e AST1 em RGB) de toda a área de estudo e as áreas indicadas como mais interessantes na Figura 6.7b. A pseudo-razão AST13-AST14, após o ajuste do histograma da imagem (para o realce dos pixels mais puros) e da aplicação de um filtro de mediana de 5x5 pixels (para minimização de ruídos) (Figura 6.9b), obteve um bom desempenho na separação de áreas mais provavelmente ricas em carbonatos, que aparecem em verde intenso na Figura 6.7b.

A pseudo-razão AST11-AST12 (Figura 6.10a), também submetida a ajuste de histogramas e filtragens, indicou as áreas em magenta na Figura 6.7b como sendo portadoras de coberturas exclusivamente ricas em quartzo. Analisando-se as imagens das Figuras 6.10b e 6.10c, em relação às concentrações de sílica apontadas por essa pseudo-razão, nota-se que as áreas assinaladas correspondem a exposições de quartzitos do Supergrupo Espinhaço, que aparecem como áreas esbranquiçadas ao longo da porção centro-leste das imagens. O resultado da pseudo-razão parece compatível, embora necessite ser validado no campo.

A pseudo-razão AST10-AST11 (assim como a razão simples AST10/AST11) não foi eficiente para separar nenhum tipo de cobertura específica, nem mesmo aquelas ricas em caulinita, conforme previsto a partir da análise dos espectros de emissividade. A operação resultou numa imagem muito ruidosa e com muito pouco sinal residual. Isso provavelmente está associado ao nível de ruídos presente nas bandas AST10 e AST11, que é maior em relação as outras bandas nas imagens da área de estudo.

As pseudo-razões AST13-AST12 e AST13-AST10 apontaram as áreas em vermelho e magenta na Figura 6.7b, como contendo uma mistura de quartzo e caulinita. A pseudo-razão AST13-AST10, entretanto, realça muito mais as áreas em vermelho da Figura 6.7b, do que as em cor magenta (Figura 6.11a), relacionadas às exposições de quartzito do Supergrupo Espinhaço. Isso-pode-significar que a caulinita está sendo mapeada, com um pouco de separabilidade de sílica mais pura, nesta pseudo-razão.

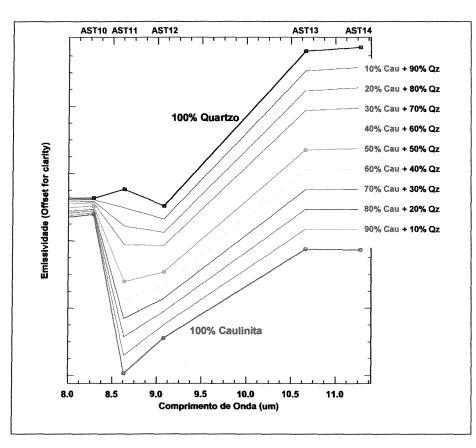
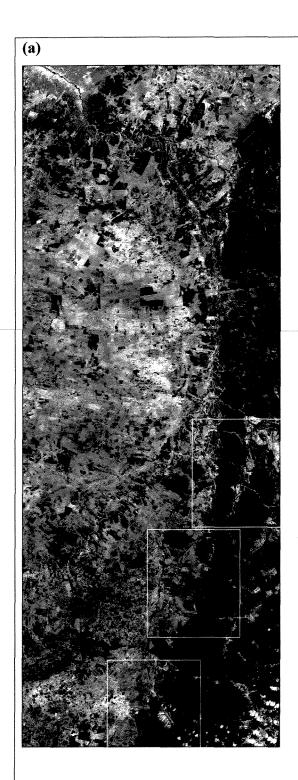
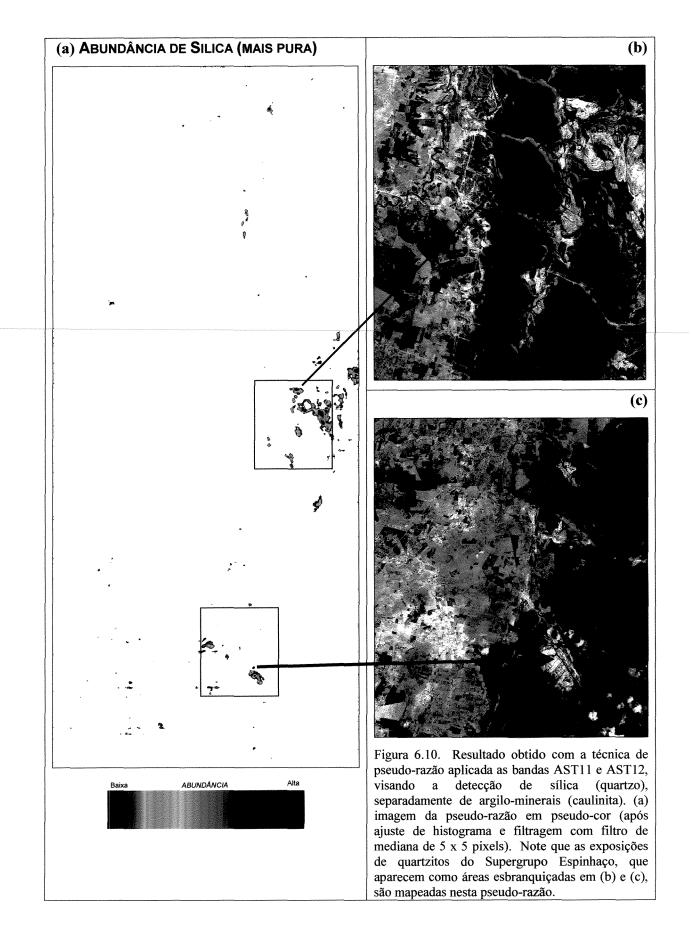


Figura 6.8. Curvas de emissividade do quartzo, caulinita e misturas entre quartzo/caulinita na resolução espectral do sensor ASTER.



(b) ABUNDÂNCIA DE CARBONATOS ABUNDÂNCIA

Figura 6.9. (a) Composição colorida AST2, AST1, AST1 (RGB), onde são destacadas três áreas com respostas entre às cores vermelho e magenta na Figura 6.7b. As áreas em detalhe têm cerca de 8,5km de largura. (b) Resultado obtido com a técnica de pseudo-razão aplicada às bandas AST13 e AST14, visando a detecção de carbonatos. A pseudo-razão é exibida em pseudo-cor, após ter passado por um ajuste interativo do histograma e filtragem com filtro de mediana de 5 x 5 pixels.



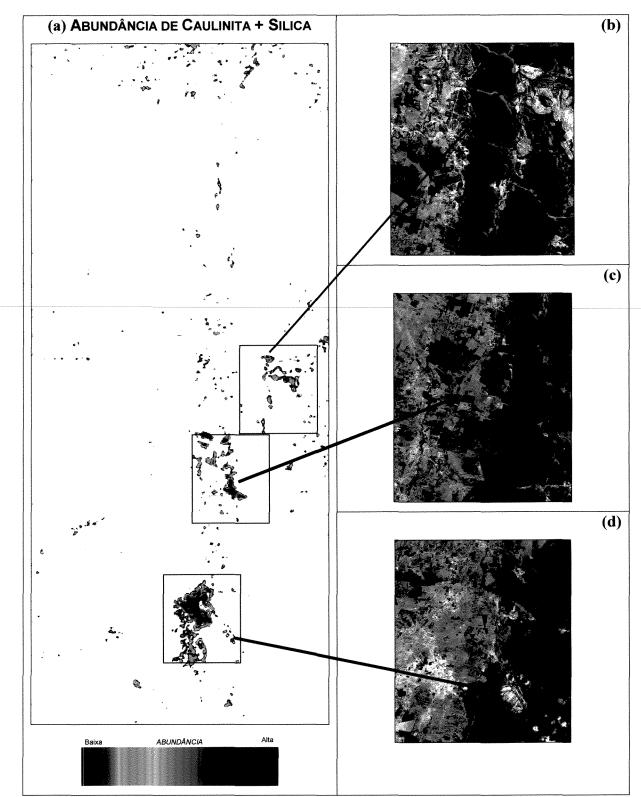


Figura 6.11. Resultado obtido com a técnica de pseudo-razão aplicada às bandas AST13 e AST10, visando a detecção de argilo-minerais (caulinita) e sílica (quartzo). (a) imagem da pseudo-razão em pseudocor (após ajuste de histograma e filtragem com filtro de mediana de 5 x 5 pixels). Em (b), (c) e (d), detalhes das áreas com abundância em caulinita e quartzo, com maior destaque, em tons de vermelho, para as áreas provavelmente mais ricas no argilo-mineral.

6.6.3 - Classificação Espectral

As mesmas técnicas de processamento de dados hiperespectrais adaptadas para o processamento dos dados do sensor ASTER no espectro VNIR-SWIR (Capítulo 5), serão aplicadas neste Capítulo aos dados termais convertidos para emissividade, da área de estudo.

Em função da quantidade de ruídos presentes nas imagens, o *Minumum Noise Fraction* (MNF) (Green *et al.* 1988) é um dos métodos mais adequados para uso com as imagens termais visto que, simultaneamente, é capaz de: (i) determinar a dimensionalidade verdadeira dos dados, definindo o número de materiais distintos presentes numa cena (o que pode ser entendido também como o número de *endmembers*); (ii) reduzir o número de bandas necessárias em processamentos subseqüentes; (iii) e oferecer a opção adicional de minimizar os ruídos dos dados.

A transformação MNF aplicada aos dados termais do ASTER, após o descarte da principal componente de ruídos (Figura 6.6a), resultou em 3 bandas MNF com informações relevantes, não-redundantes (Figura 6.12). Como pode observado nessas componentes MNFs, houve uma separação excelente dos *endmembers* presentes na cena, os quais são coerentes e superiores aos resultados obtidos com pseudo-razões, principalmente no que diz respeito a separação, aparentemente sem ambigüidades, das superfícies provavelmente compostas somente por silica (quartzitos do Supergrupo Espinhaço) e das superfícies ricas numa provável mistura de caulinita e sílica, ou seja, os denominados gossans falsos.

O cálculo do *Pixel Purity Index* (PPI) (Boardman et al., 1995), realizado sobre as componentes MNFs, foi testado no sentido de verificar a possibilidade de se mapear pixels mais puros (menos misturados) na imagem. O PPI se baseia na noção de que quando dados são lançados num 'escatergrama', os pixels puros sempre se concentrarão nos extremos e os pixels mistos no centro do gráfico. Vários testes foram feitos, variando-se a quantidade de interações e o limiar do PPI; 32.000 interações proporcionaram os melhores resultados, ou seja, após esta quantidade de interações, praticamente mais nenhum pixel foi considerado puro pelo algoritmo do PPI. Como resultado do PPI, foi obtido uma série de pixels, cujos valores de DN correspondem ao número de vezes que determinado pixel foi registrado como extremo. Os pixels com maiores valores foram então analisados no visualizador n-dimensional e selecionados para o processo de *clustering* estatístico.

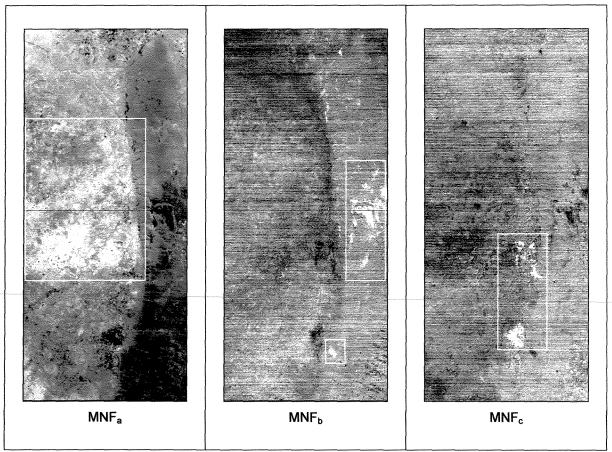
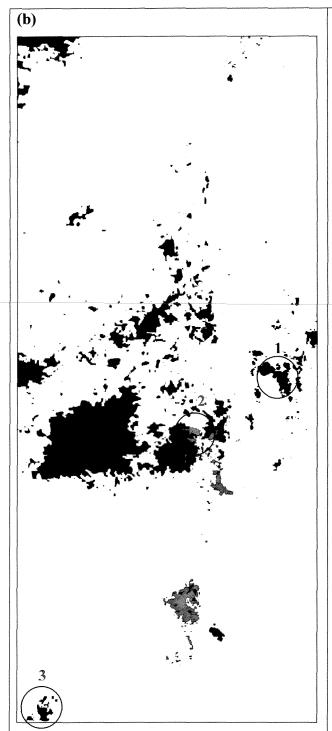
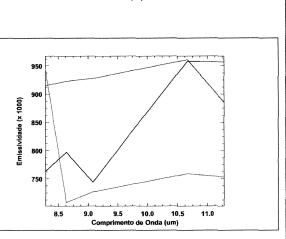


Figura 6.12. Componentes resultantes da transformação MNF. Note que a transformação foi bastante eficiente no sentido de gerar dados sem correlação e de separar 3 *endmembers*. Apesar da separação entre os materiais presentes na cena, a transformação, mesmo com o descarte de parte significativa do ruído decorrelacionado entre as imagens, ainda preserva muito destes artefatos.

Deste processo de separação por *clustering*, três *endmembers* foram discriminados nos dados termais da bacia de Irecê, na forma de espectros de emissividade individuais (Figura 6.13a). Esses *endmembers*, se comparados aos espectros de emissividade derivados da bilioteca JHU (Figuras 6.4 e 6.5), são impressionantemente equivalentes aqueles de quartzo, caulinita e carbonatos. Deve-se ressaltar, entretanto, que esses pixels mais puros são raros, principalmente para caulinita e carbonatos. Na Figura 6.13b, as três componentes derivadas das transformação MNF (MNFa,b,c – Figura 6.12), são representadas na forma de uma composição colorida, onde a MNFb foi alocada ao canal vermelho, a MNFc ao canal verde e a MNFa ao canal azul. Adicionalmente, essa composição passou por um fino ajuste de histograma e foi filtrada por um filtro de mediana de 5x5 pixels de dimensão.





(a)

Figura 6.13. (a) Endmembers (espectros de emissividade) derivados da aplicação, aos dados do ASTER, convertidos para emissividade, das técnicas MNF, PPI, visualização n-dimensional e separação por clustering. Esses espectros são extremamente análogos aos de quartzo (vermelho), caulinita (verde) e carbonatos (azul) derivados na biblioteca JHU (cf. Figuras 6.4 e 6.5). (b) Composição colorida (com histograma ajustado e filtragem com filtro de mediana de 5 x 5 pixels) das três bandas derivadas da transformação MNF - MNFb, MNFc, MNFa da Figura 6.12 em RGB. Os círculos nesta imagem marcam setores onde vários pixels mais puros de quartzo (1), alguns de carbonatos (3) e raros de caulinita (2) foram detectados pelos métodos utilizados.

O passo seguinte foi testar dois métodos de classificação espectral semi-automática: o Spectral Angle Mapper (SAM) de Kruse et al (1993) e Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF) de Boardman et al. (1995).

Considerando a similaridade entre os espectros de emissividade dos minerais de interesse extraídos da biblioteca JHU em relação aos espectros dos *endmembers*, derivados no processo de *clustering*, esses últimos foram utilizados como a biblioteca espectral para o processamento via SAM. Os resultados deste procedimento não foram muito satisfatórios. Somente uma classe, que apresenta uma relação mais próxima com a curva de emissividade do quartzo, foi detectada (Figura 6.4a), além de raros pixels coerentes com a caulinita. Porém, os ângulos entre os pixels e o espectro de referência da biblioteca espectral, necessários para atingir esse resultado, foram muito amplos, o que torna o produto de classificação duvidoso.

Da mesma forma, utilizando-se os mesmos *endmembers* no processo de classificação espectral via o MTMF, os resultados foram aparentemente bons para o mapeamento da sílica. Os setores provavelmente com maior conteúdo em quartzo puro foram mapeados de forma mais refinada por esse método (Figura 6.14b), com alto *score* e baixo *infeasibility* ('improbabilidade') (Boardman et al, 1995). Os resultados obtidos para a caulinita e carbonatos, no entanto, foram muito inferiores, principalmente devido a falta de uma maior quantidade de pixels puros relacionados a esses minerais na cena.

6.7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E COMENTÁRIOS FINAIS

Os dados termais do sensor ASTER proporcionaram resultados, quanto à detecção e discriminação de materiais geológicos na área de estudo, muito acima do esperado, principalmente considerando a sua resolução espacial limitada, de 90m. Um dos fatores fundamentais para o sucesso da aplicação destes dados foi a sua conversão, da forma bruta em DN, para emissividade. Essa conversão, feita pela equipe do *Eros Data Center* (EDC) nos Estados Unidos, permitiu que os dados termais pudessem ser processados segundo estratégias concebidas com base em espectros de emissividade dos materiais de interesse, calculados a partir dos dados de reflectância bicônica da biblioteca da John Hopkins University (JHU).

A goethita, mineral diretamente relacionado aos gossans, não apresenta feições no espectro emissivo que permitam separá-la da maioria dos minerais comuns e, portanto, não pôde ser utilizada para a indicação direta da presença de gossans nos dados termais. Entretanto, (i) a

favorabilidade dos dados termais para a detecção de quartzo, e (ii) a indicação de que os falsos gossans podem apresentar conteúdo em quartzo muito superior ao dos gossans genuínos (Oliveira, 1983), permitiu a introdução de uma segunda variável ao "corolário de exclusão" estabelecido para filtrar os gossans verdadeiros dos falsos, a partir dos dados do VNIR-SWIR, ou seja: "entre todas as superficies ricas em ferro, aquelas nas quais as feições espectrais relacionadas a argilo-minerais (caulinita) e sílica são ausentes, provavelmente representam gossans genuínos". O estudo dos espectros de emissividade de vários minerais, re-amostrados para a resolução do ASTER, mostrou ainda que a caulinita e o carbonato podem ser detectados e facilmente separados do quartzo e entre si, através dos dados termais do ASTER.

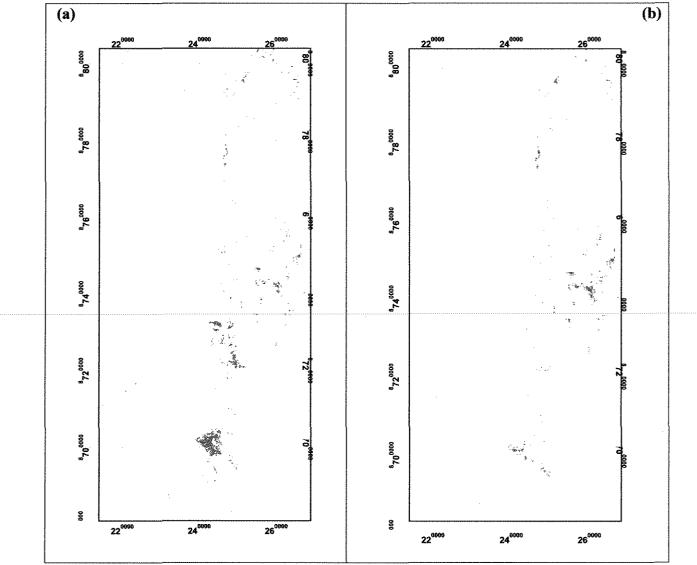


Figura 6.14. Resultados da classificação espectral via SAM (a) e MTMF (b), para o endmember quartzo puro.

Utilizando-se técnicas simples, como pseudo-razões de bandas adaptadas e a transformação *Minimum Noise Fraction (MNF)*, ambas orientadas pelo modelo teórico de detecção dos *endmembers* quartzo, caulinita e carbonato, foi possível obter imagens de abundância de sílica, de uma aparente mistura entre sílica e caulinita (com predomínio de caulinita) e de carbonatos. Destaca-se que a transformação MNF é muito adequada ao processamento dos dados termais do ASTER, pois pode ser adaptada para diminuir o efeito dos ruídos, caracteristicamente presentes nestas imagens.

Os pixels considerados como mais puros na imagem pelo método *Pure Pixel Index* (PPI) e selecionados como *endmembers* pelo *clustering* (agrupamento) estatístico, tem assinaturas

idênticas aos espectros de emissividade do quartzo, caulinita e carbonatos, calculados a partir da biblioteca da JHU. Esse resultado foi considerado extraordinário, principalmente pela quantidade de ruídos originalmente presentes nesses dados. Ressalta-se, entretanto, que poucos pixels puros foram encontrados para caulinita e carbonato, muito provavelmente pela interferência de misturas ou mesmo em função dos ruídos. De qualquer forma, os resultados obtidos indicam que à correção e transformação dos dados para emissividade, feita através dos procedimentos do EDC, é de muito boa qualidade.

Entre os métodos de classificação espectral investigados, o MTMF foi o que demonstrou maior capacidade de mapear, de forma bastante precisa, as ocorrências de sílica. Entretanto, o método não foi adequado para determinação das coberturas ricas em caulinita e carbonato, principalmente em função da ausência de uma quantidade significativa de pixels nas imagens considerados como puros e contendo as assinaturas desses minerais, pelo método PPI.

As áreas indicadas e interpretadas como de sílica mais pura nos produtos derivados das bandas termais do ASTER, aparentemente correspondem a exposições de quartzitos do Supergrupo Espinhaço. As áreas apontadas como sendo constituídas da mistura sílica e caulinita coincidem com as áreas de gossans falsos, também determinadas como ricas em caulinita, a partir dos dados ASTER no VNIR-SWIR. Esses resultados com os dados termais, extremamente positivos, têm duas implicações importantes: (i) em primeiro lugar, fica demonstrado, talvez pela primeira vez numa pesquisa, que os dados termais do sensor ASTER tem qualidade e resolução suficiente para resolver e mapear a presença de concentrações de minerais específicos e de importância em exploração mineral, e não somente, como apontado na literatura, para auxiliar no mapeamento geológico de rochas com variações no conteúdo de sílica e ricas em carbonatos (Rowan & Mars, 2003); (ii) em segundo lugar, ressalta-se que a estratégia de processamento e os métodos aqui concebidos, utilizando a presença de sílica como indicativo da ausência de gossans, aparentemente também foi bem sucedida.

Capítulo 7- Conclusões

A partir dos resultados obtidos nesse estudo, as seguintes conclusões e comentários podem ser delineados:

Gerais:

⇒ os dados do sensor ASTER proporcionaram, na prática, resultados muito superiores àqueles obtidos a partir do sensor TM para a detecção e discriminação entre gossans genuínos (associados a mineralizações de Pb-Zn-Ba conhecidas), gossans falsos e outras coberturas existentes na bacia de Irecê;

⇒ o fato do sensor ASTER não possuir uma banda posicionada na região do espectro visível azul não teve nenhuma influência na detecção de superfícies ricas em ferro, que refletem mais intensamente na região do visível vermelho e menos na região do visível azul. Muito embora a ausência de uma banda posicionada no azul impeça a geração de uma composição colorida real (como é possível com as bandas TM3 (R), TM2 (G) e TM1 (B) do sensor TM), isso não evita, entretanto, que se 'enxergue' somente no visível com dados multiespectrais do ASTER. Uma alternativa para contornar esse problema, proposta neste estudo, é a de combinar mais de uma banda do visível no triplete, gerando composições coloridas reais 'sintéticas'. Isso pode ser atingido, por exemplo, formando um triplete entre as bandas AST2 (R), AST1 (G) e AST1(B), que ressalta muito mais, em tons de vermelho mais puro e intenso, a alta reflectância associada à presença de compostos de ferro. Uma outra possibilidade, é a de criar uma nova banda de fato, no espectro visível amarelo, a partir da soma das bandas AST1 e AST2, combinando-as em RGB. Considerando os fortes efeitos atmosféricos (espalhamernto Rayleigh) que afetam a região do azul e a complexidade para a correta correção dos mesmos, esse estudo proporcionou uma indicação adicional (Souza Filho & Drury, 1998), de que a cobertura multiespectral do azul não é essencial para uso em aplicações geológicas.

⇒ a cobertura do sensor ASTER na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR), entre 2,145μm e 2,430μm, proporcionou ganhos importantíssimos na detecção de argilo-

minerais, com a possibilidade adicional, muito superior em relação ao TM, de discriminação entre tipos de argilo-minerais. No caso desse estudo, a maior abrangência no espectro SWIR e a maior resolução espectral do sensor ASTER foram fatores críticos para o mapeamento dos gossans e de outras coberturas na bacia de Irecê.

Caracterização Espectro-Mineralógica de Gossans:

⇒ a caracterização espectral de amostras representantivas dos gossans da bacia de Irecê foram feitas por meio de medidas de reflectância espectral no espectrorradiômetro FieldSpec FR e de interpretação visual e automática das curvas de reflectância através do software SIMIS. Como produto desta caracterização, constatou-se que os gossans associados as mineralizações de Pb-Zn-Ba da bacia são dominantemente compostos por goethita e limonita e, mais restritamente, por hematita. Muito embora tenham sido observadas, nas curvas de reflectância espectral dos gossans, pequenas variações de intensidade, forma e posição das feições espectrais e, portanto, ligeiras variações na sua composição, essas informações foram normalizadas no processo de conversão das curvas espectrais para a resolução espectral dos sensores ASTER e TM. Isso significa que o uso do comportamento espectral médio dos gossans pode ser considerado como adequado para servir como suporte ao estabelecimento de estratégias de sensoriamento remoto e processamento digital, visando a detecção deste tipo de cobertura na bacia de Irecê, através de sensores multiespectrais.

Dados Multiespectrais no Espectro Refletido:

⇒ a possibilidade de caracterizar, em detalhe, o comportamento espectral de materiais alvo fica sem sentido, em modernas aplicações de sensoriamento remoto, caso esse comportamento não possa ser comparado diretamente à assinatura espectral dos pixels nas imagens. Para que isso seja possível de fato, conforme demonstrado nesse estudo, é necessário que se tenha pleno conhecimento dos fatores atmosféricos envolvidos e, de preferência, das condições atmosféricas no momento da aquisição dos dados. A correção dos dados TM e, principalmente, ASTER foi aqui atingida com sucesso, através do software *Atmospheric CoRrection Now* (ACORN), utilizando a opção pelo método baseado no código de transferência radiativa (MODTRAN). Os melhores resultados,

realmente compatíveis com materiais de referência com comportamento espectral conhecido (e.g., vegetação), foram obtidos com a utilização de informações atmosféricas (principalmente vapor d'água), derivadas de levantamentos metereológicos e de estimativas feitas a partir de dados do sensor MODIS. Essas informações foram utilizadas como input no modelo atmosférico do tipo tropical, compatível com o clima da área de estudo, resultando na conversão dos dados, pré-calibrados em radiância, para reflectância aparente.

⇒ várias estratégias e técnicas disponíveis na literatura para o processamento convencional de dados multiespectrais foram testadas para os dados TM e adaptadas aos dados ASTER, visando o mapeamento dos gossans documentados na bacia de Irecê. Apesar de resultados relativamente mais positivos com a aplicação de variações da técnica Análise por Principais Componentes, áreas significativamente amplas na bacia, onde nenhuma ocorrência de Pb-Zn-Ba foi registrada em levantamentos sistemáticos, também foram caracterizadas erroneamente como gossans – embora devam tratar-se de gossans falsos, que constituem superfícies lateríticas ou ferruginosas genéricas, sem nenhuma relação com mineralizações de metais.

sos gossans genuínos são distintos de coberturas ferruginosas genéricas por não apresentarem feições em torno de 2,2μm, típicas dos falsos gossans e associadas à presença de caulinita (Raynes et al. 1985). A verificação da existência de gossans genuínos e falsos na área de estudo levou ao estabelecimento de uma estratégia de processamento de imagens voltadas à caracterização da presença simultânea de óxidos/hidróxidos de ferro (goethita) e argilo-minerais (caulinita), com base em imagens adquiridas pelo ASTER no espectro refletido. Essa mistura, de caulinita e goethita, pôde ser usada como um "corolário de exclusão" para o mapeamento de gossans genuínos, ou seja: "entre todas as superficies ricas em ferro, aquelas nas quais as feições espectrais relacionadas a argilo-minerais (caulinita) são ausentes, provavelmente representam gossans genuínos". Na tentativa de testar essa hipótese, a APC foi aplicada aos conjuntos de bandas ASTER AST1-4-7-8 e AST1-4-6-7, obtendo-se, respectivamente, imagens de abundância de goethita e caulinita. A fusão dessas imagens mostrou a variação entre áreas ricas exclusivamente em goethita, em caulinita e, simultaneamente, em caulinita e goethita. As áreas ricas nessa mistura

coincidem com setores onde nenhum gossan e/ou ocorrência de Pb-Zn-Ba foram documentadas na bacia de Irecê, ao passo que as áreas ricas somente em goethita, têm uma relação direta com os gossans conhecidos. Esses resultados demonstram que a estratégia de processamento e os métodos adotados neste estudo atingiram um dos objetivos centrais da pesquisa, que foi o de mapear as ocorrências de gossans genuínos.

⇒ a princípio, os métodos de classificação espectral de dados hiperespectrais (SAM; MTMF) são vantajosos em relação aos métodos convencionais (operações aritméticas, APC e etc), pois utilizam, em uma mesma análise, todas as porções do espectro cobertas pelo sensor, o que consequentemente deveria aumentar a capacidade de detecção de feições espectrais mais sutis, até mesmo em imagens de baixa resolução espectral, como as do TM e ASTER. Uma segunda vantagem desses métodos é que os mesmos não dependem da estatística da cena na qual são aplicados, já que teoricamente cada alvo tem uma assinatura espectral característica, que pode ser relacionada linearmente a dados de imagens multiespectrais convertidos para reflectância aparente. Para que todas essas noções possam ter chances de sucesso, entretanto, a 'pureza' dos pixels das imagens é um fator fundamental. Pixels espectralmente puros em imagens multiespectrais, principalmente aquelas adquiridas em terrenos expostos ao clima tropical, são raros e o mesmo se aplica aos dados TM e ASTER da bacia de Irecê. Isso provavelmente explica o insucesso obtido com a aplicação destas técnicas robustas de classificação espectral, para a separação entre os gossans genuínos e falsos existentes na área de estudo.

Dados Multiespectrais no Espectro Emissivo:

- ⇒ os dados termais do sensor ASTER proporcionaram resultados excelentes nesta pesquisa, principalmente considerando a sua resolução espacial limitada, de 90m, e a baixa razão sinal/ruido dos dados.
- ⇒ a goethita, mineral índice dos gossans de Irecê, não apresenta feições no espectro emissivo que permitam separá-la da maioria dos minerais comuns e, portanto, não pôde ser utilizada para a indicação direta da presença de gossans nas imagens termais da área de estudo. Entretanto, a favorabilidade dos dados termais para a detecção de quartzo e a sua

íntima associação aos falsos gossans, permitiu a introdução de uma segunda variável ao "corolário de exclusão" estabelecido para filtrar os gossans verdadeiros dos falsos, ou seja: "entre todas as superfícies ricas em ferro, aquelas nas quais as feições espectrais relacionadas a <u>argilo-minerais</u> (caulinita) e <u>sílica</u> são ausentes, provavelmente representam gossans genuínos".

⇒ utilizando-se técnicas como pseudo-razões e a transformação *Minimum Noise Fraction* (MNF), ambas orientadas pelo modelo teórico de detecção dos *endmembers* quartzo, caulinita e carbonato, foi possível obter imagens de abundância de sílica, de uma aparente mistura entre sílica e caulinita (com predomínio de caulinita) e de carbonatos.

⇒ os pixels considerados como mais puros da imagem pelo método *Pure Pixel Index* (PPI) e selecionados como *endmembers* pelo *clustering* (agrupamento) estatístico, tem assinaturas idênticas aos espectros de emissividade do quartzo, caulinita e carbonatos, calculados a partir da biblioteca da JHU.

⇒ entre os métodos de classificação espectral investigados, o MTMF foi o que demonstrou maior capacidade de mapear as ocorrências de sílica.

⇒ as áreas indicadas e interpretadas como de sílica mais pura nos produtos derivados das bandas termais do ASTER parecem corresponder a exposições de quartzitos do Supergrupo Espinhaço. As áreas apontadas como sendo constituídas da mistura sílica e caulinita coincidem com as áreas de gossans falsos, também determinadas como ricas em caulinita, a partir dos dados ASTER no VNIR-SWIR.

Síntese & Guias de Prospecção de Mineralizações de Pb-Zn-Ba:

⇒ no conjunto deste estudo, as áreas indicadas, a partir dos diversos produtos obtidos com o processamento digital dos dados ASTER, como ricas em goethita (VNIR), caulinita (SWIR e TIR) e sílica (TIR), não contém nenhum gossan e/ou ocorrência de Pb-Zn-Ba importante, documentada na bacia de Irecê. Todas as áreas detectadas como ricas em hidróxidos e óxidos de ferro, com base em produtos derivados dos dados ASTER, mas sem

a presença de materiais espectralmente correlacionáveis à argilas e sílica, tem relação direta com vários dos gossans conhecidos.

⇒ os resultados e interpretações realizadas com base na resposta espectral dos alvos de interesse aparentam coerência e têm suporte na geologia e ocorrências de gossans previamente documentados na bacia de Irecê. Entretanto, muitas das interpretações são ainda especulativas. Novos trabalhos de campo ou aporte de informações mais detalhadas, a partir de estudiosos da geologia da área, deverão ser incorporados à pesquisa no futuro, no sentido de autenticar os modelos de prospecção baseados em dados de sensoriamento remoto concebidos nesta dissertação.

Referências Bibliográficas

Abdelsalam M. G., Stern R. J., Berhane W. G. 2000. Mapping gossans in arid regions with Landsat TM and SIR-C images: the Beddaho Alteration Zone in northern Eritrea. *Journal of African Earth Sciences.*, **30**:903-916.

Abrans M. 2000. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote Sensing.*, 21:847-859.

Abrams A. & Hook S. 1995. Simulated ASTER data for geologic studies, IEEE. *Transactions on Geosciences and Remote Sensing.*, **33**:692-699.

Abrams A. & Hook S. 2003. Aster User Handbook version 2. Jet Propulsion Laboratory,

Abrams M. J., Brown D., Lepley L., Sadowski R. 1983. Remote sensing for porphyry copper deposits in southern Arizona. *Economic Geology.*, n.4, 78:591-604.

Abrams, M., Hook, S, Ramachandran, B., 2003, ASTER User Handbook (version 2.0), NASA-JPL, 118p.

ACORN 2002. ACORN 4.0 Tutorial, 2002 Edition, AGI- Colorado, EUA, 109p.

Agar R. A. 1994. Geoscan Airborne Multi-Spectral Scanner as applied to exploration for Western Australian diamond and gold deposits. In: ERIM TENTH THEMATIC Conference on Geology Remote Sensing, San Antonio, texas.

Alkmim F. F., Brito Neves B. B., Alves J. A. C. 1993. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco: uma revisão. *In*: J. M. L. Dominguez & A. Misi (eds.) *O Cráton do São Francisco*. Salvador, SBG BA-SE/SGM/CNPq, pp.: 45-62.

Almeida T.2000. Modelos exploratórios para a prospecção de Pb/Zn utilizando dados de sensoriamento remoto: estudo de caso do prospecto Salobro (Porteirinha –MG). Instituto de Geociências, Unicamp, Campinas, Dissertação de Mestrado, 132p.

Almeida T.I.R & Souza Filho C.R. 2000. Feature-oriented band-ratios coupled with principal components applied to tropical vegetation mapping: results using hyperspectral data in central Brazil. *In*: 14th International Conference on Geologic Remote Sensing, Las Vegas, v. 1, p.288-288.

Babinski S. M., Van Schmus W. R., Chemale F. Jr., Kawashita K. 1993. Evolução geológica da porção sul da bacia do São Francisco baseada na geoquímica isotópica de Pb em rochas carbonáticas. *In*: SBG/SGM, II Simpósio sobre o Cráton do São Francisco: evolução tectônica e metalogenética do cráton do São Francisco, Salvador, BA, *Anais*, p.182-185.

Bomfim L. F. C., Rocha A. J. D., Pedreira A. J., Morais Filho J. C. de., Guimarães J. T., Tesch N. A. 1985. Projeto Bacia de Irecê. Salvador, CPRM, Convênio CPRM-SME, relatório final.

Boardman J.W., Kruse F.A., and Green R.O. 1995. Mapping target signatures via partical unmixing of AVIRIS data: *In*: Summaries, Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication 95-1, v. 1, p.23-26.

Brito Neves B. B. 1967. Geologia das Folhas de Upamirim e Morro do Chapéu. Conesp, Relatório nº.17, 53p.

Brito Neves B. B., Cordani V. G., Torquato J. R. 1980. Evolução geocronológica do précambriano do estado da Bahia. *In*: H. A. V. Inda & F. B. Duarte (Eds.) *Geologia e recursos minerais do estado da Bahia*. Salvador, textos básicos, v.1, pp.: 1-101

Bruni M. A. L. de et alli.1976. Carta geológica do Brasil ao milionésimo, folha Rio São Francisco (SV.23), Brasília, DNPM, 56p.

Cassedane J., 1966, Métallogenie du plomb et du zinc dans 1' État de Bahia. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v.38 (3/4) p.465-474.

Chavez P. S. & Kwarteng. 1989. Selective Principal Component Analysi.., Photogram. Eng. Rem. Sens., v. 55, n. 3.

Chemale F. Jr., Alkmim F. F., Endo I. 1991. Late Proterozoic tectonism in the interior of the São Francisco cráton. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, relatório, 24p.

Chen J. Y., and Reed I. S., 1987. A detection algorithm for optical targets in clutter, IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst., vol. AES-23, no. 1.

Clark R. N. 1995. About reflectance spectroscopy. http://speclab.cr.usgs.gov/aboutrefl.htm.

Clark R. N. 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. *In:* John Wiley and Sons, Inc.A Rencz (eds) *Manual of remote sensing*. New York.

Clark R. N. & Roush T. L. 1984. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal Geophysics Research.*, **89**:6329-6340.

Clark R. N., King T. V., Klejwa M., Swayse G. A., Vergo, N. 1990. Hight Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals. *Journal of Geophysical Research.*, **95** (B8): 12.653-12.680.

Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM)., 2000, Lead, zinc and phosphate, Irecê carbonate basin. 6p.

Conceição Filho V. M., Monteiro M. D., Carvalho M. P., Souza W. S. T. 1993. Geologia e potencialidade para mineralizações de cobre, chumbo, zinco e prata da borda norte da Chapada Diamantina, Bahia. Salvador, CBPM, Série Arquivos Abertos n°1, 24p.

- Crósta A. P. 1990. Mapping of residual soils by remote sensing for mineral exploration in SW Minas Gerais state, Brazil. Tese de doutourado, Imperial College, University of London, 452p. Crósta A. P. 1992. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas, Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, 170p.
- Crósta A. P. 1993. Caracterização espectral de minerais de interesse à prospecção mineral e sua utilização em processamento digital de imagens. *In*: VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, *Anais*, 2:202-210.
- Crósta A. P. & Moore J. 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain. *In*: 7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary, Canada, Proceedings, 2: 1173-1187.
- Crósta A. P. & Rabelo A. 1993. Assenssing Landsat TM for hydrotermal alteration mapping in central-western Brazil. *In*: ERIM, 7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, *Proceedings*, 2:1053-1187.
- Crósta A.P., Sabine C., Taranik, J.V. 1998. Hydrothermal Alteration Mapping at Bodie, California, :Using AVIRIS Hyperspectral data. *Remote Sensing of the Environment.*, **65**: 309-319.
- Crósta A.P., Souza Filho C.R., Diego F. Ducart. 2003. Alteration Mapping for Gold Exploration in Patagonia, Argentina, using Aster Imagery. *In*: Proceedings of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) 2003 Annual Conference: "Tecnology: Converging at the Top of the World, p. 1-12 (em CD-ROM).
- Daitx E. C. 1996. Origem e evolução dos depósitos sulfetados tipo Perau (Pb-Zn-Ag) com base nas jazidas Canoas e Perau, Vale do Ribeira, PR, Tese de Doutourado, Instituto de Geociências e Ciências exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 431p.

Danderfer Filho A. 1990. Análise estrutural descritiva e cinemática do Supergrupo espinhaço na região da Chapada diamantina, Ba. Dissertação de mestrado, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, 119p.

Dardenne M. A 1988. Geologia do Chumbo e Zinco. *In*: Principais depósitos minerais do Brasil, DNPM, Brasília v.3 – Metais básicos não ferrosos, ouro e alumínio, pp.:83-90.

Dominguez J. M. L. 1993. As coberuras do Cráton do São Francisco: uma abordagem do ponto de vista da análise de bacias. *In*: J. M. L. Dominguez & A. Misi (eds.) *O Cráton do São Francisco*. Salvador, SBG BA-SE/SGM/CPRM, p.137-159.

Drury S.A. 2001. Image Interpretation in Geology. London. 3 ed, London, 290pp.

Drury S. A. & Hunt G. A. 1988. Remote sensing of laterized archean greenstone terrain: Marshall Pool area, northern yilgarn block, western Australia. *Journal Photogrammetric Engineering Remote Sensing.*, 54:1717-1725.

- Franca Rocha W. J. S. 2001. Modelagem metalogenética na Bacia de Irecê (Ba) através de sistema de informações geográficas SIG. Universidade Federal da Bahia, Salvador, Tese de Doutourado.
- Fraser S. J. & Green A. A. 1987. A software defoliant for geological analysis of band ratios. *International Journal Remote Sensing.*, **8**(3):525-532.
- Gao B.C., Hdeidebrecht K.B., Goetz A.F.H. 1993. Derivation of scaled surface reflectances fro AVIRIS data. *Remote Sensing Environment.*, N.44, pp.165-178.
- Gillespie R., Kahle A. B., Palluconi F. D. 1984. Mapping Alluvial Fans in Death Valley, California, Using Multiespectral Thermal Infrared Images. Geophisycal Research Letters., 11(11):1153-1156.
- Goetz A. F. H., Rock B. N., Rowan L. C. 1983. Remote sensing for exploration: an overview. *Economic Geology.*, **78**:573-590.
- Gooddfellow W. D., Lyndon J. W., Turner R. J. W. 1993. Geology and genesis of stratiform sediment hosted (SEDEX) zinc-lead-silver sulphide deposits. *In*: Kirkhan R. V., Sinclair W. D., Thorpe R. I., Duke J. M (eds.) *Mineral deposits modeling*. Canada, Geological association of Canada, Special Paper, v. 40, pp.: 201-251.
- Green A. A., Berman M., Switzer P., and Craig M. D. 1988. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 26, no. 1, p. 65-74.
- Guilbert J. M., Park C. F. 1986. Deposits related to submarine volcanism and sedimentation. *In*: Freeman and Company (eds.) The Geology of Ore Deposits. New York, pp.: 660-675.
- Gupta A. K. & Raj K. G. 1989. Requirements of remote sensing data for geological applications. Earth observation system Indian space research organization, Bangalore, India, 2p.
- Gustafson L. B., Williams N. 1981. Sediment-hosted stratiform deposits of cooper, lead, and zinc. *Economic Geology.*, 75 th Anniversary:139-178.
- Harris J. R., Rencz A. N., Ballantyne B., Sherldon C. 1998. Mapping altered rocks using Landsat TM and lithogeochemical data: Sulphurets-Brucejack Lake district, British Columbia, Canada. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.*, **64**:309-322.
- Hauff P. L. 1995. Introduction to applied reflectance spectroscopy. In: Strategies for exploration: Application of infrared spectroscopy and remote sensing to the investigation of precious metal deposits alteration systems. Santiago, Chile.
- Hoagland A. D. 1976. Appalachian zinc-lead deposits. *In*: K. H. Wolf (ed.) Handbook of stratabound and stratiform ore deposits. Elsevier, vol.6, pp.: 495-534.

- Hook S. J., Abbott E. A., Grove C., Kahle A. B., Palluconi F. 1999. Use of multiespectral thermal infrared data in geological studies. *In*: N.R. Andrew (ed.) Remote sensing for earth sciences: *Manual of remote sensing*. California, vol.3, pp.: 59-110.
- Hunt G. R. 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible near-infrared. *Geophysics.*, **42**(3): 501-513.
- Hunt G. R. 1979. Near-infrared spectra of alteration minerals: Potential for use in remote sensing. *Geophysics.*, **42**:501-513.
- Hunt G. R. 1980. Eletromagnetic radiation. In: Siegal B. S. & Gillespie A.R (eds) *Remote sensing in geology*. Wiley, New York.
- Hunt G. R. & Ashley R. P. 1979. Spectra of altered rocks in the visible and near-infrared. *Economic Geology.*, 74:1613-1629.
- Hunt G. R. & Salisbury J. W. 1970. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I Silicate Minerals. *Modern Geology.*, 1:283-300.
- Hunt G. R. & Salisbury J. W. 1971. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: II Carbonates. *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 hydroxides. *Modern Geology.*, 2:195-205.
- Inda H. A. V. & Barbosa J. F. 1978. Texto explicativo para o mapa geológico do Estado da Bahia. Salvador, CPM., escala 1:1000.000.
- Iyer S. S. Hoefs J., Krouse H. R. 1992. Sulfur and lead isotope geochemistry of galenas fron the Bambuí Group, Minas Gerais, Brazil: implications for ore genesis. *Econ. Geol.*, 87:.437-443.
- Kahle A. B. & Rowan L. C. 1980. Evaluation of Multiespectral Infrared Aircraft Images for Lithologic mapping in the East Tintic Moutains. Utha Geology., 3:234-239.
- Kruse F. A. 1989. Spectral mapping with Landsat Thematic Mapper and imaging spectroscopy for precious metals exploration. *In*: 7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary, Canada, Proceedings, p.17-28.
- Kruse F. A., Lefkoff A. B., Boardman J. B., Heidebrecht K. B., Shapiro A. T., Barloon P. J., and Goetz A. F. H. 1993. The Spectral Image Processing System (SIPS) Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data: *Remote Sensing of Environment.*, Special issue on AVIRIS, May-June 1993, v. 44, pp. 145 163.
- Lagoeiro L. E. 1990. Estudo da deformação nas sequências carbonáticas do Grupo Una na região de Irecê, BA. Dissertação de mestrado, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, 105p.

Leal A. F., Brito Neves B. B. 1968. Elementos da estratigrafia do médio São Francisco. In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, Recife, Resumo das comunicações, p. 17-19.

Loughlin W. P. 1991. Principal Component analysis for alteration mapping. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing., 57(9):1163-1169.

Macedo M. H. F., Bonhome M. G. 1984. Contribuição a cronoestratigrafia das formações Caboclo, Bebedouro e Salitre da Chapada Diamantina (Ba), pelos métodos Rb-Sr e K-Ar. *Revista Brasileira de Geociências.*, 14:153-163.

Mackin S.1998. Simis-Field Version 2.8 – Spectrometer Independent Mineral Identification Software. *In: User Manual* Veersion 2.8.

Mascarenhas J. F., Pedreira A. J., Gil C. A., Neves J. P., Oliveira J. E., Silva Filho M. A., Marinho M. M.. 1979. Geologia da região Centro Oriental da Bahia, Bahia II, Sul da Bahia. Brasília, DNPM, relatório integrado.

Meneses R. P., Netto M. S. J., Moraes L. M. E., Ponzoni J. F., Junior F. G. L., Galvão S. L. (ed) 2001. Sensoriamento remoto, reflectância dos alvos naturais. 1 ed, 262p.

Misi A. 1973. As mineralizações de Pb-Zn-F-Ba do Vale do rio Jacaré e seu contexto Geológico. Tese para concurso de Prof. Assistente, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 87p.

Misi A. 1976. As sequências Bambuí no Estado da Bahia e as mineralizações de chumbo e zinco associadas. Tese para concurso de Livre Docencia, Universidade Federal da Bahia, 80p.

Misi A. 1978. Ciclos de sedimentação e mineralizações de Pb-Zn nas sequências Bambuí (Supergrupo São Francisco), estado da Bahia. *In*: Congresso Bras. de Geologia, Recife, *Anais*, v.4, p.2548-2561.

Misi A. 1979. O Grupo Bambuí no estado da Bahia. *In*: H. A.V. Inda (Ed) *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia*. Salvador, SME/CPM, textos básicos, v.1, p.120-154.

Misi A. & Kyle J. R. 1992. Dados isotópicos de enxofre em sulfetos e sulfatos da bacia de Irecê: Contribuição ao conhecimento da gênese das concentrações de sulfetos. *In*: Simpósio Regional de Geologia Bahia-Sergipe. Salvador, 1, *Anais*, p.150-154.

Misi A. & Silva M. G. 1996. Chapada Diamantina Oriental, Bahia, Geologia e Recursos Minerais. Superintendência de Geologia, Universidade Federal da Bahia, 194p.

Misi A. & Souto P.G. 1975. Controle estratigráfico das mineralizações de Pb-Zn-F-Ba do Grupo Bambuí, parte leste da Chapada de Irecê, Bahia. *Revista Brasileira de Geociências*, **5**(1):30-45.

Misi A., Iyer S. S., Tassinari C. G., Kyle J. R., Coelho C. E. S., Franca Rocha W., Gomes A. S. R., Cunha I. A., Carvalho I. G. 1999. Geological and isotopic constraints on the metallogenic evolution of the Proterozoic sediment-hosted Pb-Zn(Ag) deposits of Brazil. Gondwana Research, v.2, n.1, p.47-65.

Misi A., Viveiros Sá P. V. S., Lobato L. M., Pedrosa Soares A.C. 1993. Os depósitos minerais do Cráton do São Francisco e seu contexto geotectônico. In: J. M. L. Dominguez & A. Misi (eds.) O Cráton do São Francisco. Salvador, BA, SBG BA-SE/SGM/CNPq, pp.: 187-215.

Morris R. V., Lauer H. V., Lawson C. A., Gibson E. K., Nace G. A., Stewart C. 1985. Spectral and other physiochemical properties of submicron powders of hematite (α-Fe₂O₃), maghemite (γ-Fe₂O₃), magnetite (Fe₃O₄), goethite(α-FeOOH) and lepidocrosite (γ-FeOOH). *Journal Geophysics Research.*, 90:3126-3144.

Oliveira S.M.B. DE., Magat P., Blot A. 1993. O gossan Lapão-Irecê (BA). Geochimica Brasiliensis, 7(2):131-149.

PDRH 1995. www.hidricos.mg.gov.br/Verdjac/sumario.htm

Pedreira A. J., Rocha A. J. D., Costa I.V. G. da., Morais Filho J. C. de. 1987. Projeto Bacia de Irecê II. Salvador, CPRM, relatório final.

Penteado A. H. D. G. 1999. Avaliação do conteúdo espectral das bandas Geoscan (MKII) no auxílio a pesquisa aurífera na porção sul do Greenstone Belt do Rio Itapicuru, Bahia. Instituto de Geociências, Unicamp, Campinas, Dissertação de Mestrado, 109p.

Pontual S., Merry N., Gamson P. 1997. GMEX – Spectral Interpretation Field Manual. AusSpec International Pty. Vol. 169p.

Projeto RADAMBRASIL.1981. Levantamento de Recursos Naturais, folha SD.24, Salvador, v.24, p9-608.

Raines G.L., McGee L.C., Sutley S.J. 1985. Near infrared spectra of West Shasta gossans compared with true and false gossans from Australia and Saudi Arabia. *Economic Geology.*, **80**: 2230-2239.

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.

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), p. 350-366.

Sabine C.1999. Remote sensing for exoloration. Manual of remote sensing. 3rd Edition, Manuscripit.

Sabins F. F. 1997. Remote Sensing – Principles and Interpretation, 3rd edn, W.H Freeman, New York, NY, 494p.

Sabine C., Realmuto V. J., Taranik J. V.1994. Quantitative estimation of granitoid composition form thermal infrared multiespectral scanner (TIMS) data, desolation Wilderness, Northern Sierra Nevada, California. *In*:Journal of Geophisycal Research., 99(3):4261-4271.

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 pp.

Salisbury J. W., Wald A., and D'Aria D. M. 1994. Thermal-infrared remote sensing and Kirchhoff's law 1. Laboratory measurements. *Jour. of Geophysical Research.*, **99**:11,897-11,911.

Settle J. J. & Drake N. A. 1993. Linerar Mixing and the Estimation of Ground Cover Proportion. *International Journal Remote Sensing.*, **14**(6):1159-1177.

Souza Filho C.R. 2003. "Aster à Vista". Revista InfoGEO., Ano 5, No. 29, p. 40-43.

Singh A. & Harrison A. 1985. Standardized Principal Componentes. *International Journal Remote Sensing.*, **6**(6):883-896.

Souza filho C.R. & Drury S. A. 1997. Remote Sensing Strategies for Lithological Mapping of Pan African Assemblages in Arid Environments: a Case Study in Eritrea, NE Africa. *Bol.IG-USP*, Sér.Cient, **28**:1-22.

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.

Souza Filho & Steinmayer, M., em preparação, Suppression of Complex Noisy Structures in Visible, Shortwave and Thermal Infrared ASTER data Using Zonal Notch Filters.

Souza Filho C.R. & Yamaguchi Y., (em preparação). Atmospheric Correction Models and Spectro-mineral Mapping Image Processing Techniques Applied to ASTER data: A Study Case in Cuprite, EUA.

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-Copper Deposit, Southern Peru. *In*: Proceedings of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) 2003 Annual Conference: "Tecnology: Converging at the Top of the World, p. 1-12 (em CD-ROM).

Souza Filho C.R., Drury S.A., Denniss, A.M., RotheryD.A., Carlton R.W. 1996. Restoration of Noise-Corrupted Optical Fuyo-1 (JERS-1) Data Using Frequency Domain Techniques. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.*, **62**(9): 1037-1047.

Souza S. L., Brito P. C. R., Silva R. W. S. 1993. Estratigrafia, sedimentologia e recursos minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia. Salvador, CBPM, Série Arquivos Abertos, n.2, 36p.

- Spatz D. M. & Taranik J.V. 1988. Identification and mapping of volcanic lithologies genetically or spatially associated with precious metal deposits of the western U.S, using Landsat TM imagery. *In*: Proceed, 6th Thematic conference on Remote Sensing, Houston, p. 577 590.
- Swalf S. P. 2000. Modelo exploratório para depósitos auriferos do tipo Morro do Ouro com base em dados e técnicas de sensoriamento remoto. Dissietaçãod e Mestrado, Instituto de Geociências, Unicamp, 118p.
- Tápia C. C. H. 2002. Estudo de mineralizações do tipo Cu-pórfiro do sul do Peru por meio de sensoriamento remoto e aeromagnetometria. Tese de Doutourado, Instituto de Geociências, Unicamp, 185p.
- Townsend T. E. 1987. Discrimination of iron alteration minerals in visible and near-infrared reflectance data. *Journal of Geophysical Research.*, **92**:1441-1454.
- Volesky J. 1999. Remote sensing of gossans in the Wadi Bidah Mining District, southwestern Arabian Shield, Saudi Arabia. Proposal submitted to the Faculty of the Geosciences Department, The University of Texas at Dallas, in partial fulfilment of the requirements for the degree of doctor of Philosophy in Geosciences.
- Volesky J. C., Stern R. J., Abdelsalam M. G. 2002. Mineral exploration using ASTER and Landsat ETM+Data Wadi Bidah Mineral District, Saudi Arabia. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.*, p.1-14.
- Yamaguchi Y. & Naito C. 1999. Spectral indices for lithologic discrimination using the ASTER SWIR bands. *In*: 13th International Conference on Applied Geologic Remote Sensing, Vancouver, British Columbia, Canada, p. 151-158.
- Yamaguchi Y. & Takeda I. 2001. Mineralogical Mapping by ASTER in Cuprite, Nevada, U.S.A *Asian Journal of Geoinformatics.*, p. 1-6.
- Zullo, J.J., 1994, Correção Atmosférica de Imagens de Satélite e Aplicações. Tese de Doutorado, IEEC-UNICAMP, Inédito, 191pp.