



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Pós-Graduação em Geociências  
Área de Metalogênese

PATRICIA SEARA SWALF

MODELO EXPLORATÓRIO PARA DEPÓSITOS AURÍFEROS  
DO TIPO MORRO DO OURO COM BASE EM DADOS E TÉCNICAS DE  
SENSORIAMENTO REMOTO

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Penteadó Crósta

Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

revisado  
por Patricia S. Swalf  
e ap.  
em 10 03 2000  
ORIENTADOR

CAMPINAS - SÃO PAULO

Março - 2000





**UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Pós-Graduação em Geociências  
Área de Metalogênese**

**PATRICIA SEARA SWALF**

**MODELO EXPLORATÓRIO PARA DEPÓSITOS AURÍFEROS  
DO TIPO MORRO DO OURO COM BASE EM DADOS E TÉCNICAS DE  
SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências na Área de Metalogênese.

**Orientador:** Prof. Dr. Álvaro Penteado Crósta

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

**CAMPINAS - SÃO PAULO**

Março – 2000

201733

UNIDADE BC  
N.º CHAMADA:  
T/UNICAMP  
Sw16m  
V. 46073  
ED. 16-392/01  
PREÇO R\$ 11,00  
DATA 16-08-01  
N.º CPO

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA  
PELA BIBLIOTECA I.G. – UNICAMP

CM00158628-7

Swalf, Patricia Seara  
Sw16m Modelo exploratório para depósitos auríferos do tipo Morro do Ouro com base em dados e técnicas de sensoriamento remoto / Patricia Seara Swalf.- Campinas, SP.: [s.n.], 2000.

**Orientador: Álvaro Penteado Crósta, Carlos Roberto de Souza Filho**

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

1. Processamento de Imagem – Técnicas Digitais. 2. Espectroscopia. 3. Ouro. I. Crósta, Álvaro Penteado. II. Souza Filho, Carlos Roberto. II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. III. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS  
ÁREA DE METALOGÊNESE

PATRICIA SEARA SWALF

MODELO EXPLORATÓRIO PARA DEPÓSITOS AURÍFEROS DO TIPO MORRO DO  
OURO COM BASE EM DADOS E TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO

ORIENTADOR: Prof. Dr. Álvaro Penteado Crósta

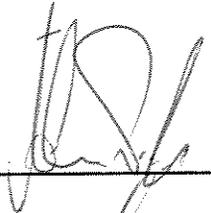
CO- ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

PRESIDENTE: Prof. Dr. Álvaro Penteado Crósta

EXAMINADORES:

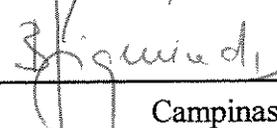
Prof. Prof. Dr. Álvaro Penteado Crósta

  
\_\_\_\_\_  
- Presidente

Prof. Dr. Paulo Roberto Meneses

  
\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Bernardino Ribeiro de Figueiredo

  
\_\_\_\_\_

Campinas, de de 2000

“...A espantosa realidade das cousas  
É a minha descoberta de todos os dias.  
Cada cousa é o que é,  
E é difícil explicar a alguém quanto isso me alegra,  
E quanto isso me basta.

Basta existir para ser completo...”

**Fernando Pessoa - 7/11/1915**

*Dedico esta dissertação aos meus pais  
Regina C.S. Swalf e Sydney Swalf*

## Agradecimentos

*Gostaria de ter palavras suficientes e exatas para expressar a imensa gratidão que tenho por aquelas pessoas que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.*

- *A Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro na forma de bolsa de mestrado;*
- *Aos professores Álvaro e Beto pela orientação sempre precisa, pelas palavras e atitudes que me incentivaram à busca pelo conhecimento científico durante estes dois anos;*
- *A Rio Paracatu Mineração (RPM) na pessoa do geólogo Marcelo Batelochi, por viabilizar os dados e o acesso à Mina de Morro do Ouro;*
- *Ao geólogo Yassuo Akiti pelo apoio e discussões durante a etapa de campo;*
- *Ao Dr. Jurandir Zullo Jr. (CEPAGRI) pela correção atmosférica implementada na imagem TM;*
- *Aos membros da banca de qualificação, professores Gilberto Amaral (in memoriam) e Bernardino Figueiredo pelas críticas e sugestões, sempre bem-vindas;*
- *Ao amigo Carlos Tapia, pela ajuda irrestrita (e sempre com muita paciência) durante todas as etapas deste trabalho e pelas discussões científicas e a Tati com quem compartilhei muitas das dificuldades e desafios enfrentados durante a realização deste trabalho. Pelas palavras sempre cheias de otimismo;*
- *A Sylvania pela enorme ajuda nas análises por difratometria de raios-x;*
- *A todos os amigos do IG, em especial a Rigoberto, Alessandro (Frangão), Mary Anne, Alexandre, Analuiza, Luis Cesar, Mercedes, Irian, Jorge e Hector, pela convivência e troca de experiência;*
- *Aos analistas de sistema Moacir Cornetti, Ricardo Passanezzi e Paulo Ferreira, sem os quais... bom, é melhor nem pensar...*
- *Aos professores do DMG pelos ensinamentos passados ao longo destes anos;*
- *Ao professor Benjamin Bley e D. Berenice pelas palavras de incentivo, pelo apoio e pela recepção sempre calorosa;*
- *A Cynthia pela amizade e pela convivência cheia de momentos de alegria e a Monica e Naohiro, pelo carinho, amizade e é claro... pelas pizzas!*
- *A minha família e aos amigos do RJ, que sempre se fizeram presentes (apesar da distância). Agradeço em especial a Frédéric, Jean e Yocie Valentin, pelo incentivo não só durante o mestrado, pelas palavras sempre precisas nas horas de dificuldade e, pelo exemplo de competência e determinação que representam;*
- *Aos funcionários do IG Val, Creuza, Juarez, Maurícia, Davison, Dorinha e Marcia da biblioteca, pela ajuda sempre cordial em todos os momentos;*
- *Finalmente dedico esta tese também à memória do professor Gilberto Amaral. Ficam as saudades e o extenso e valioso legado científico...*

## SUMÁRIO

Dedicatória	i
Agradecimentos	ii
Sumário	iii
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	viii
Resumo	ix
Abstract	x

### **CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS** **1**

1.1-) INTRODUÇÃO	1
1.2-) OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO	3
1.3-) MATERIAIS	4
1.3.1-) ESPECTRORADIÔMETRO FIELDSPEC-FR	4
1.3.2-) IMAGEM LANDSAT5-TM	6
1.3.3-) OUTROS MATERIAIS	6
1.4-) METODOLOGIA GERAL	6
1.5-) LOCALIZAÇÃO E ACESSOS	8
1.6-) ASPECTOS FISIOGRAFICOS CONDICIONANTES À UTILIZAÇÃO DE DADOS MULTIESPECTRAIS NAS REGIÕES DE PARACATU E LUZIÂNIA	8
1.6.1-) CLIMA	10
1.6.2-) INTEMPERISMO	10
1.6.3-) HIDROGRAFIA	10
1.6.4-) RELEVO, ASPECTOS PEDOLÓGICOS E VEGETAÇÃO	11
1.6.5-) IMPLICAÇÕES AO USO DE SENSORES REMOTOS	12

### **CAPÍTULO 2 - GEOLOGIA E ASPECTOS METALOGENÉTICOS** **14**

2.1-) INTRODUÇÃO	14
2.2-) GEOLOGIA REGIONAL - ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO-GEOTECTÔNICO	14
2.3-) GEOLOGIA E ASPECTOS METALOGENÉTICOS DAS REGIÕES DE PARACATU E LUZIÂNIA	17
2.3.1-) GEOLOGIA DA REGIÃO DE PARACATU	17
2.3.2-) GEOLOGIA DA REGIÃO DE LUZIÂNIA	19

2.3.3-)	ASPECTOS METALOGENÉTICOS DAS OCORRÊNCIAS AURÍFERAS	20
2.3.3.1-)	Alteração hidrotermal	23
2.3.3.2-)	Modelo genético	24
<b><u>CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÕES ESPECTRAIS E MINERALÓGICAS</u></b>		<b>27</b>
3.1-)	APRESENTAÇÃO	27
3.2-)	METODOLOGIA	28
3.2.1-)	ANÁLISE PETROGRÁFICA MICRO E MACROSCÓPICA	30
3.2.2-)	ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA	30
3.2.2.1-)	Fundamentação teórica	31
3.2.2.2-)	Obtenção dos dados	32
3.2.2.3-)	Análise dos dados espectrais	33
3.2.2.4 -)	Variabilidade espectral entre as amostras analisadas	34
3.3-)	RESULTADOS	36
3.3.1-)	FILITOS MEMBRO MORRO DO OURO	36
3.3.1.1-)	Fazenda Lavras - Paracatu	36
3.3.1.2-)	Mina Morro do Ouro - Paracatu	39
3.3.2-)	FILITOS SERRA DA ANTA	47
3.3.2.1-)	Alvo Santa Maria	47
3.3.2.2-)	Alvo Rosário	49
3.3.2.3-)	Alvo São Bartolomeu	51
3.3.2.4-)	Alvo Cabeça Seca	52
3.3.2.5-)	Amostra "Paracatu"	54
3.4-)	ANÁLISE INTEGRADA DAS FEIÇÕES ESPECTRAIS ATRAVÉS DAS INTENSIDADES E POSIÇÕES DE ABSORÇÃO - ABORDAGENS QUANTITATIVA E QUALITATIVA	56
3.4.1-)	REMOÇÃO DO CONTÍNUO	58
3.4.2-)	SELEÇÃO DAS BANDAS – ETAPA ANALÍTICA	59
3.5-)	DISCUSSÃO	63
<b><u>CAPÍTULO 4 – INTEGRAÇÃO DAS INFORMACÕES GEOLÓGICAS E ESPECTRAIS – MODELO EXPLORATÓRIO</u></b>		<b>66</b>
4.1-)	APRESENTAÇÃO	66

4.2 -) CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE ÁREAS PARA DTMO COM BASE EM DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO	66
4.2.1 -) FEIÇÕES FÍSICAS E SEU SIGNIFICADO GENÉTICO	67
4.2.2 -) EXTENSÃO AREAL VS RESOLUÇÃO ESPACIAL	69
4.2.3 -) ASSEMBLÉIAS MINERAIS VS RESOLUÇÃO ESPECTRAL	70
4.2.4-) ESCOLHA DOS SENSORES PARA AVALIAÇÃO	71
4.2.5-) MODELAMENTO ESPECTRAL	71
4.3-) INTEGRAÇÃO DOS DADOS: FEIÇÕES OBSERVÁVEIS VS FEIÇÕES DETECTÁVEIS POR SENSORES REMOTOS	75
<b><u>CAPÍTULO 5 - PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM: APLICAÇÃO PRÁTICA DO MODELO EXPLORATÓRIO PARA DTMO</u></b>	<b>78</b>
5.1-) INTRODUÇÃO	78
5.2-) METODOLOGIA	79
5.2.1-) CORREÇÃO ATMOSFÉRICA - CONVERSÃO DOS DADOS TM DE DN PARA REFLECTÂNCIA APARENTE	80
5.2.2-) CORREÇÃO GEOMÉTRICA	81
5.2.3-) SELEÇÃO DOS ENDMEMBERS	81
5.2.4-) ETAPA I - DISCRIMINAÇÃO LITOLÓGICA NA CENA PARACATU	82
<b>5.2.4.1-) Realce de contraste</b>	<b>82</b>
<b>5.2.4.2-) Composições coloridas</b>	<b>84</b>
<b>5.2.4.3-) Operações aritméticas</b>	<b>85</b>
<b>5.3.2.4-) Análise por principais componentes</b>	<b>92</b>
5.3.3-) ETAPA II – IDENTIFICAÇÃO DA UNIDADE MEMBRO MORRO DO OURO	95
<b>5.3.3.1-) Mapeamento espacial da distribuição litológica – classificação espectral</b>	<b>97</b>
5.3.4-) REALCE DAS ESTRUTURAS	103
5.4-) DISCUSSÃO	105
<b><u>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u></b>	<b>106</b>
<b><u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u></b>	<b>110</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Espectrorradiômetro FieldSpec-FR	5
Figura 1.2 - Organização das etapas de trabalho e capítulos que compõem esta dissertação.	7
Figura 1.3 - Mapa de localização dos estados de Minas Gerais e Goiás (a) e da área de estudo no contexto regional (b) e no contexto local (c)	9
Figura 1.4- Seção típica da região centro-oeste. A vegetação desenvolve raízes profundas, em função do nível d'água. A espessura do solo atinge um máximo de 10 m (extraído de Amaral, 1984)	12
Figura 2.1 - Mapa geológico simplificado da Província Estrutural Tocantins (modificado de Marini et al., 1984; Fuck et al., 1993) apud Blum & Pires (1996).	15
Figura 2.2 - Coluna estratigráfica proposta para a região de Paracatu, segundo Freitas-Silva (1996).	18
Figura 2.3 - Vista aérea da Jazida de Morro do Ouro - dimensões da frente de lavra	21
Figura 2.4 - Perfil esquemático proposto para a Mina de Morro do Ouro (Freitas-Silva, 1996)	22
Figura 2.5 - Mapa local para a Mina de Morro do Ouro (Freitas-Silva, 1996)	22
Figura 3.1 - Mapa de localização das amostras coletadas para análise	29
Figura 3.2 - Curvas espectrais típicas para as amostras Laterita, MOC e Paracatu. Exemplos da pequena variabilidade entre as curvas espectrais obtidas para as amostras típicas dos Membros Morro do Ouro e Serra da Anta	35
Figura 3.3 - Amostra da unidade C, coletada na porção superficial do depósito aurífero de Morro do Ouro	37
Figura 3.4 - Assinatura espectral de rocha e veio provenientes da Mina Fazenda Lavras (Paracatu-MG)	37
Figura 3.5 - Laterita proveniente da Mina de Morro do Ouro	39
Figura 3.6 - Assinatura espectral da laterita proveniente da Mina Morro do Ouro (Paracatu-MG)	40
Figura 3.7 - Amostra da unidade MOC, coletada na porção superficial do depósito aurífero de Morro do Ouro (Paracatu)	41
Figura 3.8 - Assinatura espectral da Unidade MOC - Mina Morro do Ouro (Paracatu-MG)	42
Figura 3.9 - Unidades MOB2 e MOB1 (transição marcada pelo nível carbonoso e por intensa venulação)	44
Figura 3.10 - Assinatura Espectral da Unidade MOB1 - Mina Morro do Ouro (Paracatu-MG)	44
Figura 3.11 - Amostra - testemunho de sondagem (Mina Morro do Ouro)	45
Figura 3.12 Assinatura espectral da Unidade MOB2 - Mina Morro do Ouro (Paracatu-MG)	46
Figura 3.13 - Classificação Espectral para filitos do Membro Morro do Ouro. No gráfico são apresentadas as proporções minerais extraídas através da classificação espectral baseada nos parâmetros "Forma da Curva" e "Posição da Feição", disponíveis no SIMIS. Notar que apenas aquelas amostras com ausência de matéria carbonácea puderam ser classificadas.	46
Figura 3.14 - Superfície de oxidação do filitos carbonosos (Mb. Serra da Anta) aflorante no Alvo Santa Maria (Luziânia/GO)	48
Figura 3.15 - Assinatura espectral do sericita filito proveniente do Alvo Santa Maria	48
Figura 3.16- Afloramento de Sericita filito no Alvo Rosário (Luziânia/GO)	49
Figura 3.17 - Assinatura espectral do sericita filito proveniente do Alvo Rosário (Luziânia-GO)	50
Figura 3.18 - Amostra de Sericita filito proveniente do Alvo São Bartolomeu	51
Figura 3.19 - Assinatura espectral do sericita filito proveniente do Alvo São Bartolomeu	52
Figura 3.20 - Assinatura espectral da laterita proveniente do Alvo Cabeça Seca (Luziânia/GO)	53
Figura 3.21 - Superfície de oxidação do quartzo-sericita filito (Membro Serra da Anta) aflorante próximo de Paracatu (MG)	54
Figura 3.22- Curva espectral obtida para o quartzo-sericita filito do Membro Serra da Anta, proveniente de uma área exposta, sem mineralização aurífera conhecida.	55
Figura 3.23 - Classificação Espectral para filitos do Membro Serra da Anta. No gráfico são apresentadas as proporções minerais extraídas através da classificação espectral baseada nos parâmetros "Forma da Curva" e "Posição da Feição", disponíveis no SIMIS.	56
Figura 3.24 - Constituintes do espectro - contínuo ou curva de background e feição de absorção típica do mineral caulinita (Modificado de ENVI, 1997)	58
Figura 3.25 - Relação entre as intensidades de absorção relativas a presença de OH e Fe <sup>3+</sup> nas amostras. Os pontos relativos às intensidades destas bandas na amostra proveniente do Alvo Rosário não devem ser interpretados como "anomalias" em relação às amostras provenientes das demais localidades,	

	<i>considerando a pequena dimensionalidade (poucas amostras) destes dados. Esta consideração é válida para os demais gráficos de dispersão.</i>	61
Figura 3.26 -	<i>Gráfico de dispersão relacionando as profundidades de absorção devidas à presença de minerais do grupo OH</i>	61
Figura 3.27 -	<i>Gráfico de dispersão relacionando as profundidades de absorção devidas à presença de elementos de transição</i>	62
Figura 4.1 -	<i>Critérios que serão analisados e integrados de modo a compor o modelo exploratório para DTMO com base em dados de sensores remotos (nos itens subsequentes, estes critérios serão detalhados)</i>	67
Figura 4.2 -	<i>Comparação entre as curvas reamostradas para a resolução dos sensores multiespectrais ASTER e TM</i>	73
Figura 5.1 -	<i>Estratégia utilizada no processamento dos dados TM (Sendo APC = Análise por principais componentes; FPCS = Feature-Oriented Principal Component Selection; SAM = Spectral Angle Mapper; SFF = Spectral Feature Fitting). As descrições de cada etapa encontram-se no texto a seguir.</i>	79
Figura 5.2 -	<i>Curvas espectrais dos endmembers (interpoladas para a resolução do TM) selecionados para análise através de técnicas de processamento digital de imagens.</i>	82
Figura 5.3 -	<i>Localização na imagem TM dos ponto de coleta de amostras</i>	83
Figura 5.4 -	<i>Composição colorida RGB TM751 Para Realce dos Filitos Carbonosos do Membro Morro do Ouro (Lilás)</i>	86
Figura 5.5 -	<i>Gráficos polares das respostas espectrais simuladas para a resolução do TM, expressas como razões de bandas (amostras superficiais).</i>	88
Figura 5.6 -	<i>Composição colorida RGB 5/2, 5, 3/1 para realce dos filitos carbonosos do Membro Morro do Ouro (em verde escuro na imagem)</i>	90
Figura 5.7 -	<i>Gráficos polares das respostas espectrais simuladas para a resolução do TM, expressas como diferenças entre bandas (amostras superficiais)</i>	91
Figura 5.8 -	<i>Composição colorida RGB TM 5-2, 5, 3-1 para realce dos filitos carbonosos pertencentes ao Membro Morro do Ouro (em azul na imagem)</i>	93
Figura 5.9 -	<i>Composição Colorida RGB Hy, Hy+Fe, Fe (Técnica Crósta) para realce dos filitos carbonosos pertencentes ao Membro do Ouro</i>	96
Figura 5.10 -	<i>Uma imagem composta por duas bandas, representada no espaço bi-dimensional.</i>	98
Figura 5.11 -	<i>Classificação espectral obtida através do SAM, onde as três imagens são apresentadas numa composição colorida RGB, sendo em vermelho a laterita; verde a unidade MOC; e em azul o FL_Rocha (Escala 1:250.000).</i>	100
Figura 5.12 -	<i>Gráfico de dispersão utilizado na determinação de classes, representadas por valores baixos para RMS e altos para a imagem SCALE (abundância do material analisado)</i>	101
Figura 5.13 -	<i>Imagem RGB resultante do método de classificação SFF, onde alocou-se o endmember Laterita em vermelho, MOC em verde e FL_Rocha em azul (Escala 1:250.000).</i>	102
Figura 5.14 -	<i>Imagem em níveis de cinza (banda TM5) com traços de fraturas</i>	104

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 - Características estruturais das fases de deformação (mod. Freitas-Silva, 1996).</i>	19
<i>Tabela 2.2 - Eventos de deformação e principais estruturas identificadas na região de Luziânia (modificado de Hagemann, 1992)</i>	20
<i>Tabela 2.3 - Perfil estratigráfico local para a Mina de Morro do Ouro</i>	22
<i>Tabela 2.4 - Modos de ocorrência do ouro</i>	23
<i>Tabela 2.5 - Tabela comparativa entre as características metalogênicas dos depósitos de Paracatu e Luziânia, segundo os diversos autores citados.</i>	26
<i>Tabela 3.1 - Proveniência e denominação das amostras analisadas</i>	28
<i>Tabela 4.1 - Características geológico-exploratórias de depósitos do Tipo Morro do Ouro</i>	68
<i>Tabela 4.2 - Feições descritivas X explicação genética de DTMO</i>	69
<i>Tabela 4.3 - Etapas de exploração vs resolução espacial adequada à identificação de depósitos minerais (Spatz, 1996)</i>	70
<i>Tabela 4.4 - Critérios de seleção de áreas para diferentes escalas de trabalho/resoluções espaciais. Procurou-se também correlacionar a importância dos diferentes critérios com o tamanho do alvo durante as diferentes etapas de exploração (modificado de Hodgson et al., 1982).</i>	70
<i>Tabela 4.5- Feições típicas de DTMO detectáveis nas regiões do VNIR e SWIR (baseado em Spatz, 1996)</i>	71
<i>Tabela 4.6 - Especificação de alguns sensores comerciais multiespectrais e de um hiperespectral, e a etapa de exploração a qual se destinam.</i>	72
<i>Tabela 4.7 - Feições espectrais e minerais presentes na paragênese dos filitos carbonosos pertencentes aos Membros Morro do Ouro e Serra da Anta, potencialmente detectáveis através do sensor ASTER.</i>	75
<i>Tabela 4.8- Requerimentos espectrais e espaciais para a detecção de DTMO através de sensores remotos (baseado em Spatz, 1996)</i>	77
<i>Tabela 5.1 - Coordenadas UTM dos pontos superior esquerdo e inferior direito que limitam a cena Paracatu</i>	81
<i>Tabela 5.2 - Endmembers selecionados, contidos na imagem Landsat-TM</i>	82
<i>Tabela 5.3 - Estatística da Cena Paracatu 2938x3808 TM</i>	84
<i>Tabela 5.4 - Matriz de correlação para as bandas TM obtidas a partir da análise espectral</i>	85
<i>Tabela 5.5 - Tabela de valores estatísticos obtidos para razões de bandas TM, através dos espectros interpolados (amostras superficiais)</i>	88
<i>Tabela 5.6 - Razões de bandas TM importantes no mapeamento dos filitos (carbonosos) pertencentes ao Grupo Canastra.</i>	89
<i>Tabela 5.7 - Tabela de valores estatísticos obtidos para diferenças entre bandas TM (amostras superficiais)</i>	91
<i>Tabela 5.8a - APC para mapeamento de óxidos e hidróxidos de ferro</i>	94
<i>Tabela 5.8b - APC para mapeamento de hidroxila</i>	94



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS/  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS/DMG

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS - ÁREA DE  
METALOGÊNESE

## MODELO EXPLORATÓRIO PARA DEPÓSITOS AURÍFEROS DO TIPO MORRO DO OURO COM BASE EM DADOS E TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO

### RESUMO

### DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Patricia Seara Swalf

Uma metodologia para a detecção dos metalotectos de depósitos auríferos do tipo Morro do Ouro (DTMO) através de sensores remotos é proposta nesta dissertação. Amostras destes depósitos localizados na regiões de Paracatu (MG) e Luziânia (GO) e de áreas adjacentes foram caracterizadas através da espectroscopia de reflectância, no intervalo entre 0,35 e 2,5  $\mu\text{m}$ . A assembléia mineral constituinte das rochas foi reconhecida através de uma rotina de classificação semi-automática e da análise quantitativa, baseada na intensidade de absorção de algumas bandas espectrais. Concluiu-se que óxidos e hidróxidos de ferro, matéria orgânica, filosilicatos (principalmente muscovita e os argilominerais esmectita, caulinita e illita), são os principais constituintes responsáveis pela resposta espectral dos filitos Morro do Ouro e Serra da Anta e que o agrupamento destas unidades é principalmente uma função da variação na intensidade de absorção em 2,2  $\mu\text{m}$ . Sensores remotos com bandas centradas neste comprimento de onda constituem as melhores escolhas para o mapeamento destas unidades.

Os dados geológicos disponíveis em bibliografia foram integrados com os dados espectrais, constituindo a base para elaboração de um modelo exploratório. As dimensões dos metalotectos determinaram sua detectabilidade através dos diferentes sensores remotos, em função das respectivas resoluções espaciais. As resoluções espectrais necessárias à detecção destes atributos foram estimadas para as diferentes escalas de mapeamento. Como subsídio à análise, as curvas espectrais foram modeladas para as resoluções espectrais dos sensores ASTER e TM, onde se concluiu que a discriminação das amostras depende das variações do albedo e da forma de seus espectros. Nesse sentido, o ASTER é um sensor potencialmente importante no mapeamento das diferentes unidades, por apresentar maior resolução espectral na região do SWIR.

O modelo exploratório foi testado através de uma cena TM, utilizando-se rotinas de processamento de imagens. Composições coloridas de razões e subtrações de bandas, métodos baseados na análise por principais componentes e os classificadores espectrais SAM e SFF foram utilizados para o mapeamento da unidade Mb. Morro do Ouro e para a extração dos principais lineamentos. Para o mapeamento das assinaturas espectrais típicas das unidades mais superficiais, os métodos de classificação são os mais indicados.

A formulação e utilização do modelo exploratório para DTMO com base em dados de sensores remotos, apesar de apresentar um caráter determinístico, permitiu identificar o tipo de sensor remoto mais adequado aos objetivos de cada campanha exploratória, prever a detectabilidade de estruturas e paragêneses minerais associadas à mineralização aurífera e delinear uma estratégia de processamento digital mais adequada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS/  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS/DMG

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS - ÁREA DE  
METALOGÊNESE

**REMOTE SENSING EXPLORATION MODEL FOR  
MORRO DO OURO-TYPE GOLD DEPOSITS**

**ABSTRACT**

**MASTER OF SCIENCE**

**Patricia Seara Swalf**

A method for the identification of metallotects related to Morro do Ouro-type gold deposits (DTMO) is proposed, based on remote sensing data and techniques. Samples from this type of deposit, collected at Paracatu (Minas Gerais State) and Luziânia (Goiás State), were studied through reflectance spectroscopy and petrography. The results showed that iron oxides and hydroxides, organic matter, phyllosilicates (mainly muscovite and clay minerals, such as smectite, kaolinite and illite) are the main constituents, responsible for the spectral signature of the phyllites which host the mineralization (Morro do Ouro and Serra da Anta units) and also that these two units can be mapped as a function of the intensity variation in the 2.2  $\mu\text{m}$  spectral absorption feature. Remote sensors with bands located at this wavelength region are therefore the best choice for exploration of this type of deposit.

Available geological data were integrated with spectral data, forming the basis for the exploration model. The spatial dimensions of metallotects and spectral resolution of the sensors were also taken into account in the model. Spectral curves of the samples were modeled according to the spectral resolution of Landsat/TM and ASTER. This latter sensor showed to be potentially important for the detection of DTMO metallotects, due to its better spectral resolution than TM.

The exploration model was tested on a TM scene of the Paracatu region, using image processing techniques. Color composites of band ratios and band subtractions, principal component analysis and spectral classification routines such as SAM and SFF were used for enhancing spectral and spatial attributes related to the Morro do Ouro unit.

The conception and application of the remote sensing exploration model for DTMO allowed the identification of the most suitable sensor for the task, to predict the detectability of structures and minerals assemblages associated with the mineralization and to establish an appropriate image processing strategy.

# ***CAPÍTULO I - CONSIDERAÇÕES INICIAIS***

---

## **1.1-) INTRODUÇÃO**

Os sensores remotos constituem uma importante ferramenta para a exploração mineral, auxiliando na identificação, mapeamento e avaliação dos diferentes tipos de depósitos minerais. A viabilidade na aquisição de dados a um custo relativamente baixo e da obtenção de informações da superfície terrestre, num curto intervalo de tempo e com confiabilidade, representam critérios importantes para sua utilização.

Desde o lançamento do satélite ERTS-1 (Landsat-1) em 1972 e de trabalhos de pesquisa sobre o comportamento espectral de materiais geológicos, os sensores multiespectrais têm sido projetados com várias bandas espectrais, cada vez melhor posicionadas no espectro eletromagnético, e com resoluções espaciais maiores. Atualmente, os principais sensores orbitais utilizados em exploração mineral são o Landsat *Thematic Mapper* (TM), os sensores da série SPOT e o japonês Fuyo-1 *Optical Sensor* (OPS). O recém-lançado sensor nipo-americano ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), a bordo do satélite TERRA (EOS-1), também deverá representar uma importante fonte de dados para atividades exploratórias.

Um passo futuro no uso de sensoriamento remoto orbital em exploração mineral é a utilização de espectrômetros imageadores (sensores hiperespectrais), com até centenas de bandas espectrais estreitas cobrindo as regiões do espectro do VNIR ao SWIR. Um exemplo deste tipo de sensor é o AVIRIS (*Airborne Visual and Infra-Red Imaging Spectrometer*), portado pela aeronave ER-2 da NASA, utilizado com frequência no mapeamento de minerais de alteração hidrotermal (Clark *et al.*, 1990, 1991; Kruse *et al.*, 1993 e Crósta *et al.*, 1998).

A utilização destes sensores remotos na exploração mineral tem como objetivo detectar os atributos físicos (metalotectos) associados a diferentes depósitos minerais, tais como assinaturas espectrais de rochas e minerais de alteração hidrotermal e suas dimensões, bem como o delineamento de estruturas, expressas em superfície na forma de lineamentos. Neste sentido, diversos trabalhos vêm sendo propostos com o intuito de desenvolver aplicações do

sensoriamento remoto na exploração mineral (e.g. Taranik, 1988; Kruse, 1989; Sabine, 1999; Vane & Goetz, 1993; Hungtinton & Green, 1988, dentre outros). Estes trabalhos abordam aspectos específicos, tais como o desenvolvimento de novas tecnologias para o processamento e a análise dos dados multi e hiperespectrais e os benefícios da melhoria nas resoluções espectrais e espaciais.

As técnicas convencionais de processamento e análise, utilizadas ao longo destas duas últimas décadas, podem ser aplicadas na maioria dos projetos de exploração mineral. Por outro lado, face ao advento de sensores remotos com resoluções espectrais e espaciais cada vez maiores, cresce a necessidade de se desenvolver novas estratégias de uso destes dados, que melhor aproveitem estes avanços.

Spatz (1997) propõe a utilização de modelos físicos, de caráter determinístico, como base para a utilização de dados e técnicas de sensoriamento em exploração mineral. Sabine (1999) destaca a importância na elaboração de uma estratégia de trabalho voltada à exploração mineral através do sensoriamento remoto, baseada no método científico clássico. Neste método, as deduções são elaboradas a partir de hipóteses baseadas nos dados físicos de determinado tipo de depósito, testadas a seguir através da experimentação.

Hodgson (1993) define um modelo exploratório para um depósito como um padrão conceitual e/ou empírico, que engloba tanto suas feições descritivas, quanto uma explicação destas feições em termos de processos geológicos. Esta definição relaciona-se perfeitamente com os objetivos da utilização de sensores remotos na exploração mineral, qual seja, a de identificar e delinear os atributos físicos (ou descritivos) do depósito avaliado.

Os depósitos minerais de origem hidrotermal, por seu valor econômico, sempre despertaram um interesse particular em empresas de mineração e têm sido alvo de muitos estudos usando sensoriamento remoto. Eles são convenientemente subdivididos em tipologias próprias, em função de suas singularidades metalogenéticas. Os depósitos auríferos do tipo Morro do Ouro (DTMO) representam uma tipologia particular, definida por Freitas-Silva (1996) ao estudar a Mina de Morro do Ouro, localizada em Paracatu no noroeste de Minas Gerais. Antes dele, Zini *et al.* (1988) descreveram em detalhe o posicionamento geotectônico e a geologia regional e local deste depósito. Hagemann *et al.* (1992, 1988) estudaram os aspectos metalogenéticos de

similaridade genética com a Mina de Morro do Ouro, foram incorporadas por aqueles autores nessa mesma tipologia.

O comportamento espectral e radiométrico dos filitos carbonosos, que representam as rochas hospedeiras da mineralização aurífera de Morro do Ouro e Luziânia, bem como de seus produtos de alteração hidrotermal, foi estudado por alguns autores, dentre os quais Meneses *et al.* (1993), Freitas-Silva *et al.* (1993) e Pontara (1998). Este autores reconheceram que a presença de matéria carbonácea nos filitos é o principal fator responsável pelo comportamento espectral destas rochas, causando uma sensível redução da reflectância e do albedo no intervalo entre o visível e o infravermelho próximo. Concluíram também que graças ao intemperismo, seus efeitos são suprimidos.

Também em trabalhos prévios, a utilização de imagens Landsat/TM teve como objetivo mapear as rochas carbonáceas hospedeiras da mineralização aurífera e as possíveis zonas de alteração hidrotermal, além de delinear os principais *trends* estruturais. Para isto, Meneses (*op.cit*) utilizaram a composição colorida RGB 5/2 e Pontara (*op.cit*) a composição colorida RGB 5/2, 5, 7/2. Já Crósta & Rabelo (1993) obtiveram sucesso na aplicação da técnica FPCS (*Feature-Oriented Principal Component Selection*) para identificação de áreas de concentrações anômalas em filossilicatos e óxidos/hidróxidos, coincidentes com as áreas de ocorrências destas rochas.

O potencial de uso do sensoriamento remoto no reconhecimento dos principais metalotectos das mineralizações auríferas da região de Paracatu, atestada nos trabalhos supracitados, bem como a existência de estudos de cunho metalogenéticos para esta região, constituem o ponto de partida para o desenvolvimento desta pesquisa.

## **1.2-) OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO**

Este trabalho tem por objetivos:

- (i) elaborar e aplicar uma biblioteca espectral de referência própria para a área;
- (ii) testar rotinas de classificação espectral para o mapeamento de assinaturas espectrais das rochas hospedeiras da mineralização aurífera, em diferentes resoluções;

- (iii) elaborar um modelo de exploração mineral para depósitos do tipo Morro do Ouro, com base em dados e técnicas de sensoriamento remoto e;
- (iv) aplicar o modelo no estudo de depósito de Morro do Ouro, integrando os dados espectrais obtidos através da espectroscopia de reflectância e os atributos físicos dos DTMO como critérios para a seleção do sensor remoto mais adequado à pesquisa mineral em diferentes escalas.

A seleção destas áreas para estudo foi motivada:

- (i) pela singularidade do ponto de vista metalogenético dos DTMO situados nas regiões de Paracatu (MG) e Luziânia (GO);
- (ii) pelo grande número de dados disponíveis na bibliografia para estas regiões;
- (iii) pela necessidade de um trabalho de abordagem destas informações com objetivos exploratórios através da utilização de técnicas de sensoriamento remoto.

Estima-se, que através destes procedimentos, seja possível prever as potencialidades dos futuros sensores remotos no mapeamento de outras áreas geologicamente semelhantes, bem como definir as técnicas de processamento digital de imagens que melhor se apliquem na identificação dos metalotectos da mineralização aurífera.

### **1.3-) MATERIAIS**

#### ***1.3.1-) ESPECTRORADIÔMETRO FIELDSPEC-FR***

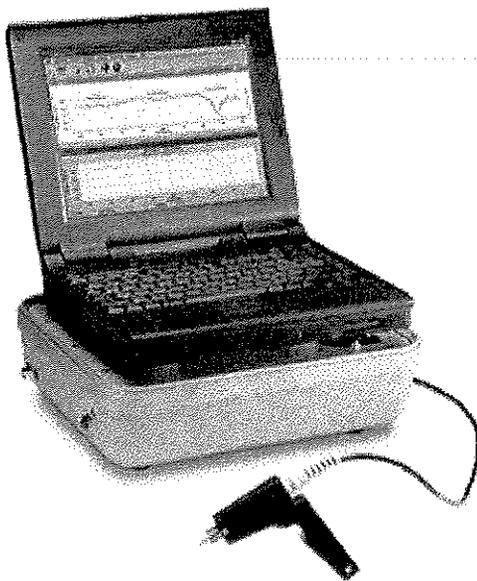
O instrumento utilizado para as análises espectroradiométricas foi o espectroradiômetro portátil FieldSpec-FR (*Full Resolution*) fabricado pela Analytical Spectral Devices Inc., pertencente ao Laboratório de Espectroscopia de Reflexão (LER) do Instituto de Geociências da Unicamp.

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos com o uso de uma placa de referência difusa “spectralon” (reflectância absoluta em torno de 100%).

O FieldSpec-FR é composto por três detetores independentes, cobrindo a porção refletida do espectro de 0,35 – 2,50  $\mu\text{m}$ , que utilizam uma grade holográfica côncava com elementos de dispersão do comprimento de onda. O primeiro espectrômetro é formado por um arranjo de fotodiodos de silício de 512 elementos e cobre o intervalo espectral de 0,35 a 1,00  $\mu\text{m}$  (UV/VNIR), enquanto os outros dois detetores são fotodiodos de InGaAs termoeletricamente resfriados, constituídos por escaners de alta velocidade que fazem uma cobertura do intervalo de comprimento de onda de 1,00 a 2,50  $\mu\text{m}$  (SWIR 1 e 2).

A entrada da luz nos espectrômetros FieldSpec se dá através de um cabo de fibra ótica, com comprimento de 1,2 m. Numa das extremidades do cabo são acoplados diferentes elementos óticos (frentes óticas), cada qual com uma lente que determina o ângulo de abertura do campo a ser amostrado (*Field-of-view* - FOV), permitindo a leitura dos espectros referentes a áreas de diferentes dimensões.

O instrumento é acoplado a um computador *Notebook* (figura 1.1), em cuja memória principal são armazenados os dados espectrais. Um *software* controlador reúne os espectros obtidos por cada espectrômetro, transformando-os numa curva contínua de 0,35 a 2,50  $\mu\text{m}$ .



**Figura 1.1 - Espectrorradiômetro FieldSpec-FR**

### ***1.3.2-) IMAGEM LANDSAT5-TM***

A imagem usada neste estudo foi adquirida pelo Landsat TM-5 em 30 de agosto de 1998, na órbita 220/72 (WRS). Esta imagem é referente ao período sêco, motivo pelo qual foi escolhida para análise, no sentido de amenizar problemas como coberturas de nuvens e vegetação.

O sensor TM opera com seis bandas espectrais posicionadas na região do espectro refletido entre 0,45 e 2,35  $\mu\text{m}$ , com resolução espacial de 30 m. Possui uma banda referente à porção infravermelho termal do espectro emitido, com resolução espacial de 120 m, posicionada entre os comprimentos de onda de 10,4 e 12,5  $\mu\text{m}$ . Cada cena TM cobre aproximadamente 34.225  $\text{Km}^2$ . Nesta dissertação, a imagem foi cortada e, a área analisada apresenta aproximadamente 7.600  $\text{Km}^2$ .

### ***1.3.3-) OUTROS MATERIAIS***

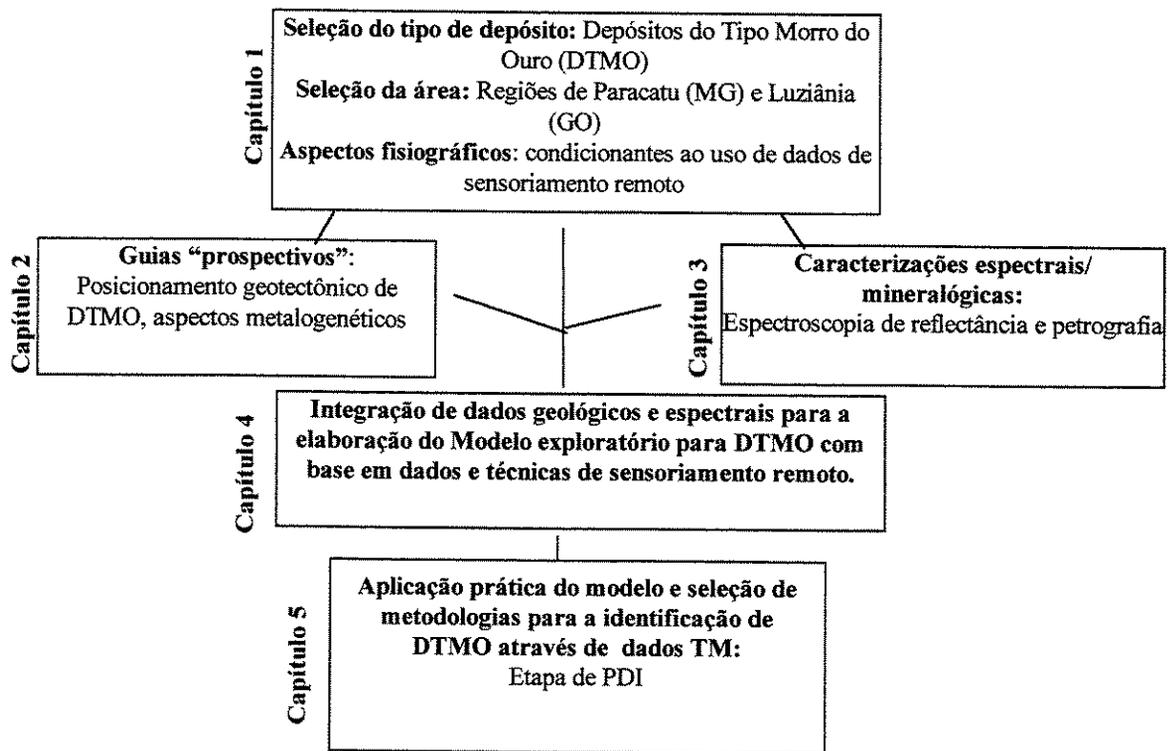
- Mapa Topográfico (Folha Paracatu SE.23-V-C-III - Ministério do Exército, escala 1:100.000);
- GPS Garmin (modelo 45XLII);
- Microscópio ótico.

### **1.4-) METODOLOGIA GERAL**

Para alcançar os objetivos anteriormente definidos, esta dissertação foi dividida em cinco etapas (Figura 1.2):

A metodologia de trabalho utilizada durante estas quatro etapas de pesquisa, envolveu:

- 1-) Levantamento dos dados bibliográficos com objetivo de selecionar a área de estudo;
- 2-) Etapa de campo: reconhecimento da área (aspectos fisiográficos, geologia), caracterização em campo dos diferentes materiais (rocha e solo) através de análises espectrorradiométricas e coleta de amostras para análise espectral em laboratório;
- 3-) Análise de amostras de materiais superficiais (rocha e solo) e de amostras de



**Figura 1.2 - Organização das etapas de trabalho e capítulos que compõem esta dissertação.**

testemunhos de sondagem da mina de Morro do Ouro (Paracatu), através de espectroscopia de reflectância e petrografia.

A metodologia utilizada incluiu a estimativa da composição mineralógica das amostras através da utilização de métodos de classificação espectral. A petrografia ótica foi empregada na caracterização dos parâmetros físicos que caracterizam a rocha, tais como granulometria e forma dos grãos dos minerais, bem como na identificação da paragênese mineral que a compõem;

4-) Integração dos dados geológicos, levantados durante a etapa de revisão bibliográfica, e dos resultados obtidos a partir da caracterização espectral - elaboração do modelo exploratório previsual;

5-) Teste do modelo exploratório: processamento digital de imagens para identificação das assinaturas espectrais típicas das unidades litológicas e modelamento espectral. O processamento dos dados digitais incluiu a aplicação de técnicas convencionais de composições coloridas de bandas e operações aritméticas entre bandas (razão e subtração), e de metodologias destinadas a

classificação espectral como o método *Spectral Angle Mapper* (SAM) e o *Spectral Feature Fitting* (SFF) ambos contidos no programa ENVI®.

Em cada um dos capítulos que compõem esta dissertação, são descritos em detalhe os métodos utilizados e sua fundamentação teórica, bem como os resultados e discussões preliminares.

### **1.5-) LOCALIZAÇÃO E ACESSOS**

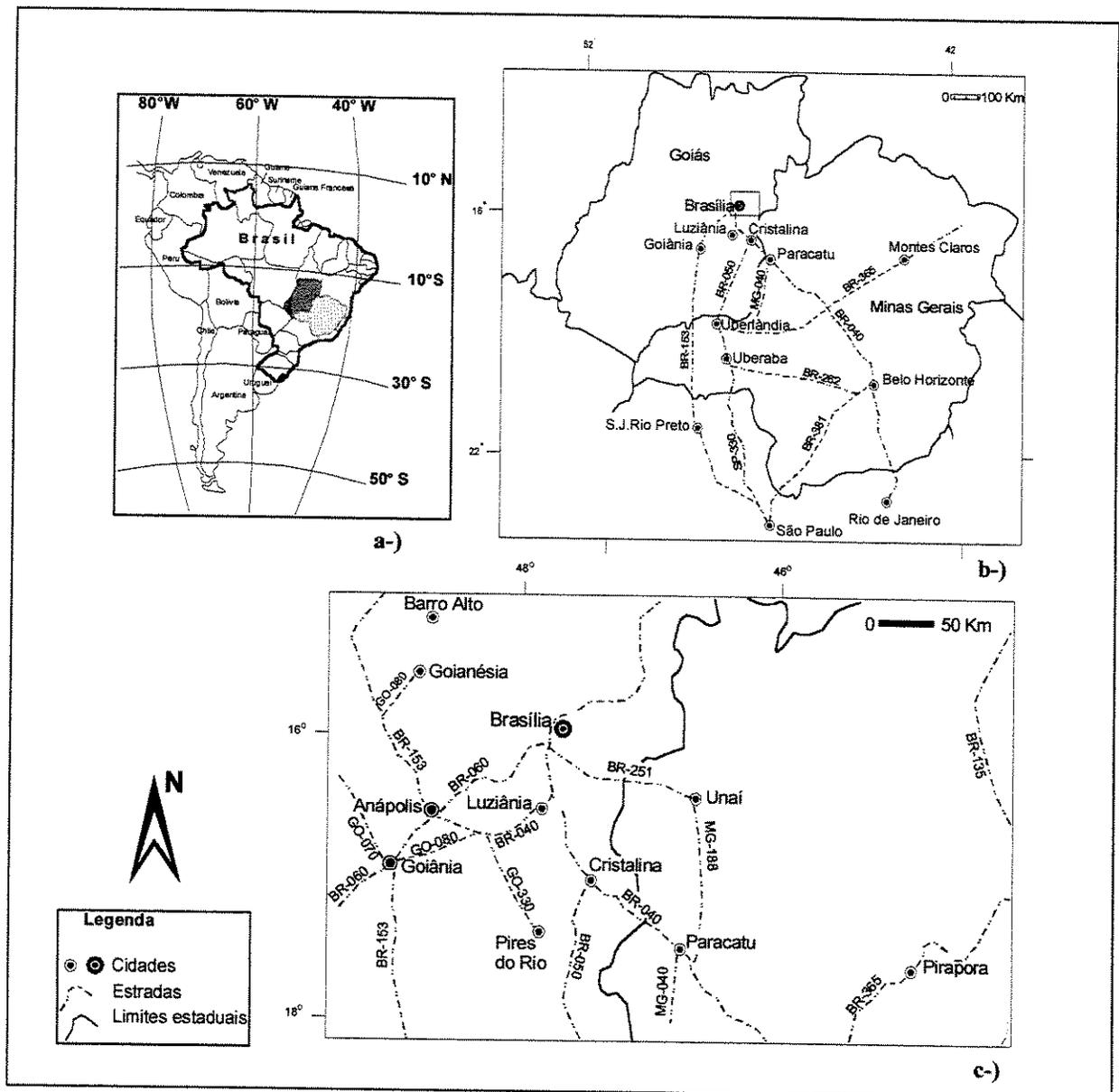
A área abordada nesta dissertação localiza-se na região central do Brasil, entre os paralelos 17° e 18° S e os meridianos 46° e 48° W, englobando parte dos estados de Goiás e Minas Gerais.

As cidades de Luziânia (sul de Goiás) e Paracatu (noroeste de Minas Gerais) representam os pontos geográficos de referência (Figura 1.3). Estas cidades podem ser acessadas através das rodovias federais BR-040, BR-050, BR-251 e BR-060 e das estaduais GO-080, GO-330, MG-181, MG-188 e MG-040. Opcionalmente, o acesso à cidade de Paracatu pode ser feito por via aérea.

### **1.6-) ASPECTOS FISIAGRÁFICOS CONDICIONANTES À UTILIZAÇÃO DE DADOS MULTIESPECTRAIS NAS REGIÕES DE PARACATU E LUZIÂNIA**

Os sensores remotos obtêm informações composicionais e texturais de superfície, alcançando profundidades da ordem de microns (Buckingham & Sommer, 1983). Desta forma, as condições fisiográficas (principalmente o clima e a vegetação) constituem fatores que influenciam e muitas vezes restringem o uso de técnicas de sensoriamento remoto, já que mascaram informações relativas à mineralogia primária e constituem elementos condicionantes à escolha da melhor época do ano para a aquisição da imagem.

As condições fisiográficas típicas para a região centro-oeste são muito importantes à interpretação de imagens de sensores remotos. De acordo com Amaral (1984), observa-se uma íntima relação entre rocha, solo, vegetação e morfologia, onde o tipo de vegetação



**Figura 1.3 - Mapa de localização dos estados de Minas Gerais e Goiás (a) e da área de estudo no contexto regional (b) e no contexto local (c)**

(cerrado) é bastante sensível à mudanças nas características dos solos.

Nos itens subsequentes, serão abordados os aspectos fisiográficos, como clima, vegetação, relevo e aspectos pedológicos que caracterizam a paisagem observada na região centro-oeste do Brasil. Logo a seguir e ao longo dos capítulos que compõem esta dissertação, serão comentadas suas implicações à utilização de sensores remotos, como subsídio ao mapeamento geológico.

### **1.6.1-) CLIMA**

Segundo a classificação de Köpen, o clima predominante na região central do Brasil é do tipo tropical de altitude (categoria Avv), caracterizado pela presença de duas estações bem definidas: a estação seca, correspondente ao inverno (de julho a setembro) e a estação chuvosa, englobando a primavera e o verão (outubro a março).

As temperaturas médias são de 18°C no inverno e 23°C no verão, com a precipitação média anual de 1350 mm.

### **1.6.2-) INTEMPERISMO**

Nas regiões de Paracatu e Luziânia, os efeitos do intemperismo são responsáveis pela formação de um perfil de oxidação que chega a alcançar 40 m de profundidade, culminando com a formação de crostas lateríticas espessas no topo. A exposição destas superfícies de oxidação é de 40 a 50 % da área total, aproximadamente, dependendo da época do ano.

A expressão superficial das unidades litológicas que ocorrem nestas regiões, relaciona-se à presença de uma paragênese mineral representada por minerais do grupo dos óxidos, hidróxidos e argilo-minerais. A área mineralizada, por condicionar-se a uma extensa zona de falha, apresenta uma concentração anômala de sulfetos e de filossilicatos, devido à maior permeabilidade das rochas nestas áreas. Estes sulfetos, quando oxidados dão lugar aos óxidos e hidróxidos de ferro (transformação de pirita em goetita, hematita, lepidocrosita e maghemita), ao passo que os filossilicatos são transformados por processos de argilização (geração de caulinita e transformação de muscovita em illita).

### **1.6.3-) HIDROGRAFIA**

A hidrografia da região é composta pelo rio Paracatu e seus afluentes, pertencentes à Bacia do São Francisco e pelo Rio São Marcos e seus afluentes pertencentes à Bacia do Prata -

A rede hidrográfica apresenta padrão dendrítico, orientada preferencialmente nas direções NS e NW. Sua geometria condiciona-se às estruturas e às características reológicas contrastantes das rochas.

#### ***1.6.4-) RELEVO, ASPECTOS PEDOLÓGICOS E VEGETAÇÃO***

O relevo é constituído por superfícies de aplainamento (chapadas) e por áreas de relevo dissecado. Martins (1991) delimitou quatro superfícies aplainadas: A primeira corresponde às porções mais elevadas e planas do relevo, onde se localiza a jazida de Morro do Ouro. Os horizontes mais superficiais desta superfície são marcados pela presença abundante dos argilominerais caulinita e illita na paragênese dos filitos pertencentes ao Membro Morro do Ouro (Formação Paracatu). A segunda superfície é definida por quebras no relevo e pela formação pervasiva de capas lateríticas sobre o substrato rochoso. A terceira é representada por lateritos cavernosos, nodulares e crostas subsuperficiais (filito ferruginoso), além de pediplanos, apresentando colúvios e alúvios lateritizados. O nível de base atual da região corresponde à quarta superfície e é formado por solos pertencentes aos grupos dos latossolos vermelho-escuro e litossólicos.

Os latossolos vermelho-escuros são profundos, ácidos, com texturas médias e argilosas, fertilidade baixa, porosos e acentuadamente drenados. De modo geral, ocorrem em área cujo relevo é de plano a ondulado.

Os solos litossólicos são pouco desenvolvidos e suas características estão diretamente associadas às rochas com resistência à desagregação mecânica. Ao contrário dos latossolos, são solos rasos, com textura média, quase sempre cascalhentos e apresentam alta saturação de alumínio. Sua ocorrência está associada a um relevo que varia de suave, passando a ondulado e a montanhoso, com cobertura vegetal semelhante à dos latossolos.

De acordo com Amaral (1984), existe uma íntima relação entre o tipo de cobertura vegetal e o tipo de solo formado. Em locais onde a profundidade dos níveis freáticos é grande as espécies vegetais desenvolvem raízes longas e penetrantes. Nestes locais, há um aumento na espessura do solo, como esquematizado na Figura 1.4.

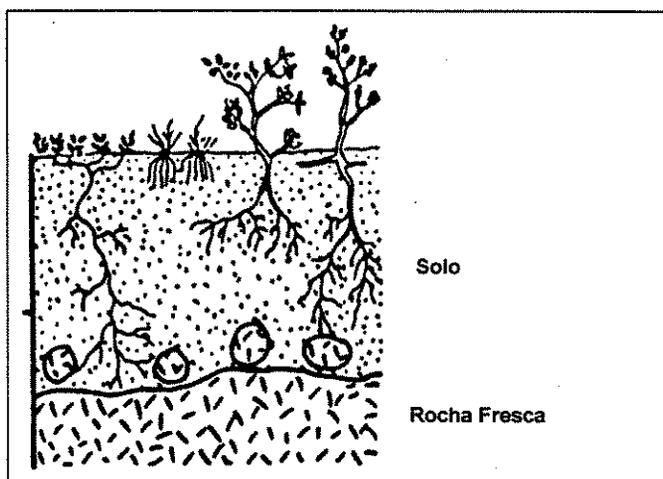


Figura 1.4- Seção típica da região centro-oeste. A vegetação desenvolve raízes profundas, em função do nível d'água. A espessura do solo atinge um máximo de 10 m (extraído de Amaral, 1984)

A vegetação típica da região centro-oeste do Brasil apresenta-se com fisionomia diversificada, abrangendo o cerrado, campo cerrado e o campo limpo, com predominância do cerrado. Apresentam também como inclusões as formações florestais (matas ciliares, cerradões) e as veredas

As fases do campo cerrado e campo limpo, ocorrem geralmente em topografia plana e ondulada (nas encostas) onde o solo se apresenta mais raso e com menor fertilidade. O cerrado aparece nas regiões mais aplainadas dos vales, onde os solos são mais desenvolvidos. As matas ciliares são vistas ao longo das drenagens

O campo limpo mostra uma flora predominantemente herbácea, com a presença de arbustos disseminados sobre um tapete formado por gramíneas. O campo cerrado, apresenta-se com extrato arbóreo e arbustivo pouco denso, com árvores esparsas. O cerrado possui um extrato arbóreo mais desenvolvidos e sua densidade é variável, dependendo principalmente das condições edáficas. A mata ciliar apresenta árvores com altura de, até, 15 metros. Sua composição é variada, tendo espécies mais características.

#### **1.6.5 -) IMPLICAÇÕES AO USO DE SENSORES REMOTOS**

A partir das informações apresentadas e dos dados levantados em campo pode-se observar que nas regiões de estudo, a área de rocha exposta é bastante reduzida, limitando-se às frentes de lavras abertas nas minas de Morro do Ouro e Fazenda Lavras. Nas demais regiões, as feições

superficiais relacionam-se aos solos e à cobertura vegetal, mesmo que esparsa. Através de sensores remotos, apenas as assinaturas espectrais relacionadas à mineralogia secundária são passíveis de identificação, dadas as condições de oxidação típicas do clima ao qual a área está submetida.

Considerando-se que, ao longo das drenagens, a vegetação torna-se mais densa, o delineamento da geometria da rede hidrográfica, através de sensores remotos, pode ser feito através da inspeção de bandas posicionadas em comprimentos de onda próximos a  $0,7 \mu\text{m}$  (p.ex. bandas 5 e 6 do Landsat MSS, banda 4 do Landsat 5 TM).

Observa-se também que apesar da vegetação ser mais densa apenas ao longo das drenagens, nas demais regiões ela é aberta o suficiente para permitir a exposição do substrato (rochas e solos), o que não representa um impecilho ao uso de sensores remotos na investigação dos aspectos geológicos das áreas de estudo.

## ***CAPÍTULO 2 - GEOLOGIA E ASPECTOS METALOGENÉTICOS***

---

### **2.1-) INTRODUÇÃO**

Neste capítulo são abordados os principais aspectos das mineralizações auríferas do Tipo Morro do Ouro (DTMO) tais como a geologia, contexto geotectônico e aspectos metalogenéticos dos distritos auríferos.

Estas informações encontram-se sintetizadas na tabela 2.5, apresentada ao final deste capítulo.

### **2.2-) GEOLOGIA REGIONAL - ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO-GEOTECTÔNICO**

A área investigada está inserida no contexto tectônico centro-oriental da Faixa de Dobramentos e Cavalgamentos Brasília. Abrange os metassedimentos carbonosos e sequências siliciclásticas da Formação Paracatu (unidade intermediária do Grupo Canastra) e as sequências argilo-dolomíticas com estromatólitos da Formação Vazante.

A Faixa Brasília ocupa a margem oeste do Cráton do São Francisco e, juntamente com o Maciço Mediano de Goiás e com outras Faixas metassedimentares proterozóicas (Faixas Araguaia e Uruaçu), integra a Província Estrutural Tocantins. Constitui um extenso sistema de empurrões e dobramentos neoproterozóicos, composto por rochas sedimentares, típicas de ambiente de margem passiva, com metamorfismo e deformação crescentes de leste para oeste (Figura 2.1).

O acervo geocronológico disponível indica que a evolução tectono-metamórfica da Faixa culminou por volta de 600 Ma., tendo havido dois eventos termo-tectônicos, um há aproximadamente 790 Ma. e outro posterior, entre 630 e 600 Ma. (Pimentel *et al.*, 1991, 1992; Ferreira Filho *et al.*, 1994; Suita *et al.*, 1994).

Estruturalmente, a Faixa Brasília caracteriza-se pelo imbricamento de mega-escamas de empurrão com orientação NNW e vergência para o Cráton do São Francisco (Strieder & Nilson, 1992; Fuck *et al.*, 1993). Estas escamas definem um complexo zoneamento longitudinal,

subdivido por Fuck (1994) em compartimentos tectônicos denominados “Zona Cratônica”, “Zona Externa” e “Zona Interna”.

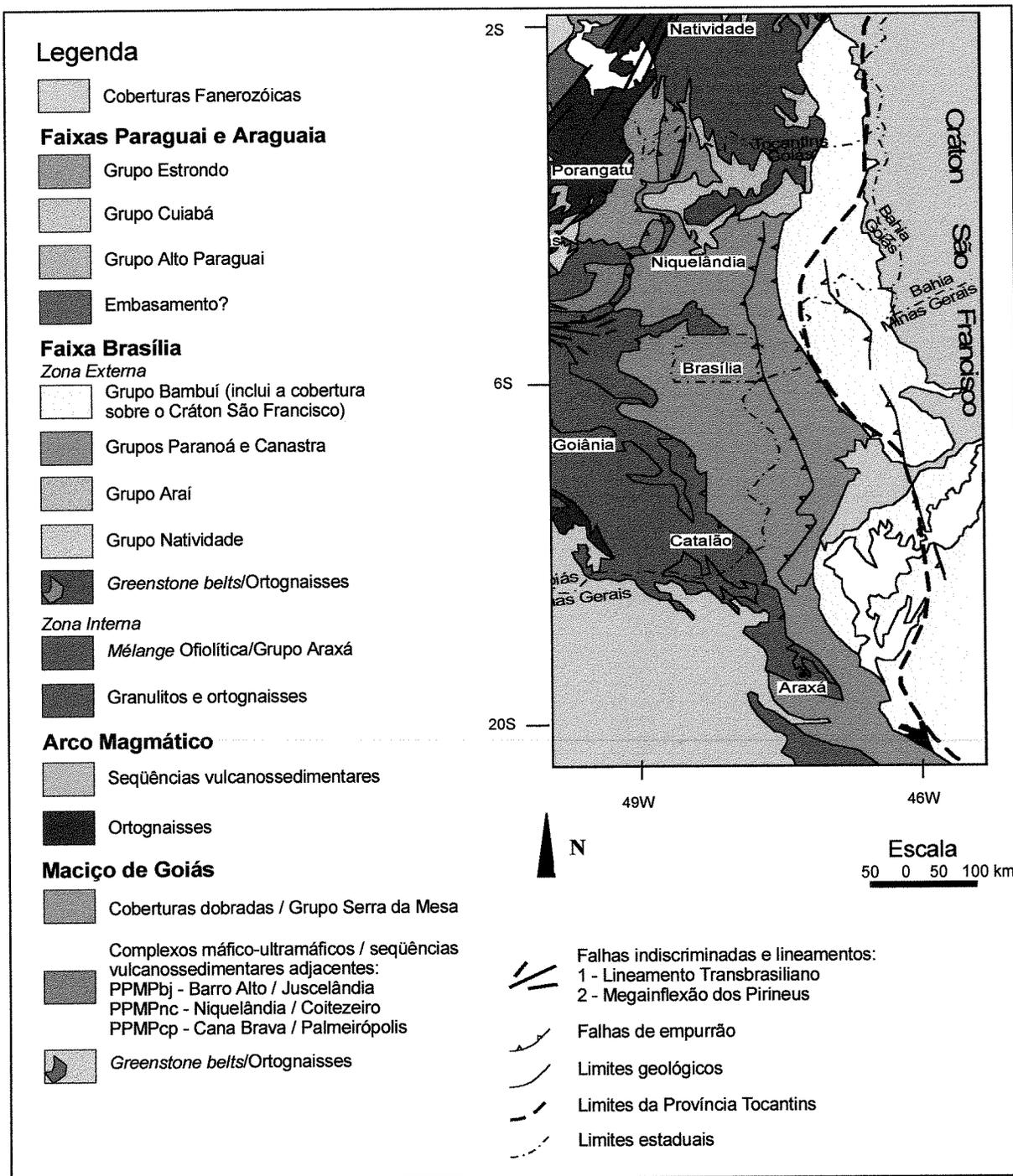


Figura 2.1 - Mapa geológico simplificado da Província Estrutural Tocantins (modificado de Marini *et al.*, 1984; Fuck *et al.*, 1993) *apud* Blum & Pires (1996).

As áreas de estudo localizam-se na zona externa da Faixa Brasília, no domínio de ocorrência dos metassedimentos do Grupo Canastra – calcifilitos, ritmitos, quartzitos, arcóseos, grauvacas, conglomerados, xistos e filitos e das rochas carbonáticas da Formação Vazante. Estas áreas vêm despertando um especial interesse do ponto de vista econômico por abrigarem diversas ocorrências auríferas, exploradas em épocas passadas, além de jazidas em exploração. Como exemplo, pode-se citar as ocorrências de Luziânia (alvos Santa Maria, Rosário, Japonês e Cabeça Seca) e os depósitos de Paracatu (Morro do Ouro → 109 Mt @ 0,60 g/t Au; Fazenda Lavras → sem informações). Além das ocorrências localizadas na área de estudo, a Faixa Brasília hospeda mais quatro ocorrências auríferas: Retiro do Garimpo (elúvio/colúvio rico em quartzo, sobre xisto sericítico do Grupo Canastra), Niquelândia e Minaçu (veios/vênulas de quartzo sulfetados em sedimentos do Grupo Paranoá) e Abadia dos Dourados (pequenos aluviões sobre milonitos carbonosos - Grupo Araxá).

O Grupo Canastra estende-se por mais de 650 Km na direção norte-sul, desde o sudoeste de Minas Gerais, no extremo sul da Faixa Brasília, até a região sudeste de Goiás e sul do Distrito Federal, porção centro norte desta Faixa. Freitas-Silva & Dardenne (1994), e posteriormente Freitas-Silva (1996), propuseram a seguinte subdivisão formal para o Grupo Canastra, no noroeste mineiro e sudeste de Goiás, da base para o topo:

◆ **Formação Serra do Landim** - ocorre na região do Alto Rio Grande, no Distrito Federal, estando exposta continuamente, desde o sul de Luziânia até o sudoeste de Cristalina (GO). É composta predominantemente por calcita-dolomita-clorita-sericita-(margarita-quartzo) filito, em geral ritmicamente bandado (níveis ricos em clorita ± mica branca e níveis com predomínio de carbonato ± quartzo ± feldspatos)

◆ **Formação Paracatu** – sua ocorrência estende-se da região de Paracatu (MG) até o Distrito Federal; subdividida nos membros Morro do Ouro e Serra da Anta, é composta predominantemente por metarritmitos (quartzo-sericita-clorita filitos, carbonosos ou não, representados por bandas quartzosas intercaladas com bandas de sericita e matéria carbonácea, quando presente) e ortoquartzitos brancos;

◆ **Formação Chapada dos Pilões** - estende-se desde a região do Alto Rio Grande, até aproximadamente o paralelo 17° Sul; é composta por quartzo-sericita-clorita

filitos e quartzitos variados; representa uma sedimentação imatura, com grauvacas de caráter *flyschóide*, indicativa de um ambiente de sedimentação sin-orogênico.

### **2.3-) GEOLOGIA E ASPECTOS METALOGENÉTICOS DAS REGIÕES DE PARACATU E LUZIÂNIA**

O potencial metalogenético para ouro das regiões de Paracatu e Luziânia é reconhecido desde o século XVIII, sendo que as mesmas foram alvo da ação garimpeiros até o século XIX. Só na década de 80 as empresas mineradoras começaram suas pesquisas em busca de áreas economicamente viáveis à exploração em escala. Precisamente em 1987 iniciou-se a exploração na região de Paracatu, com a abertura da cava da mina de Morro do Ouro. Ao contrário da maioria das jazidas, a economicidade da Mina de Morro do Ouro se dá pela facilidade de extração do ouro e pela sua alta tonelagem, pois o teor médio de 0,5 g/t é considerado muito baixo.

#### **2.3.1-) GEOLOGIA DA REGIÃO DE PARACATU**

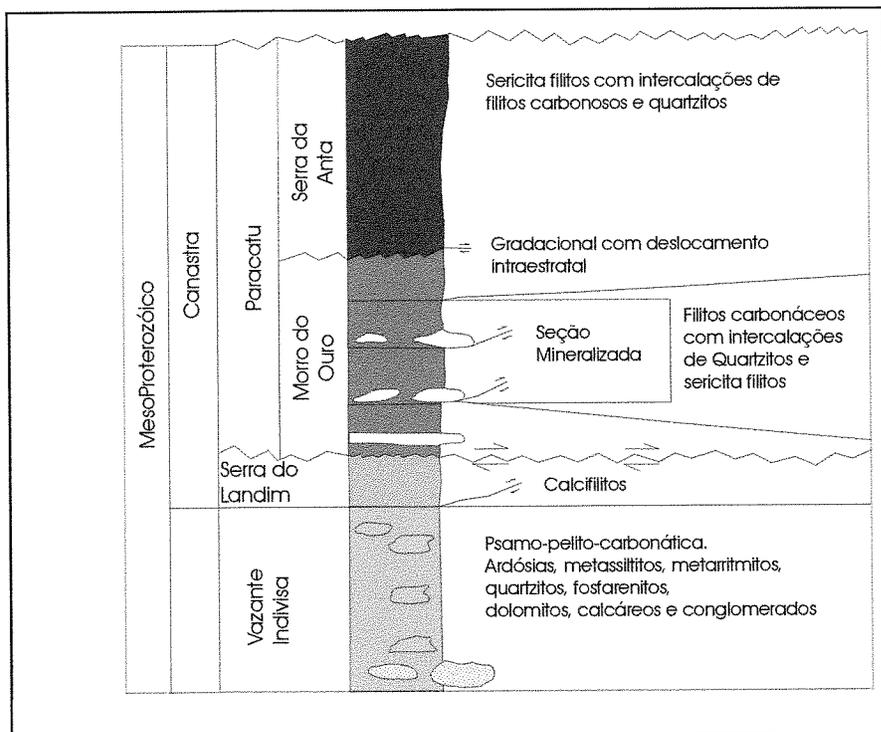
As características estruturais e metalogenéticas desta região, expostas a seguir, são baseadas nos trabalhos desenvolvidos por Freitas-Silva (1991, 1996).

A região de Paracatu é constituída por sequências argilosas e argilo-dolomíticas com estromatólitos, pertencentes à Formação Vazante, e por filitos (carbonosos) e sequências siliciclásticas pertencentes às Formações Paracatu e Serra do Landim (Grupo Canastra) (Freitas-Silva, 1991).

O contato entre estas unidades é tectônico e se dá ao longo de uma falha de empurrão (Falha Paracatu-Vazante) que se estende por aproximadamente 150 Km na direção NW. Sua expressão é marcante e confere à topografia da região um aspecto acidentado, sendo conhecida localmente por “Chapada de Paracatu”.

A tectono-estratigrafia da região (Figura 2.2), inicia-se com a Formação Vazante na base, seguida por filitos carbonosos ritmicamente alternados com quartzitos, seguidos por sericiticlorita filitos rítmicos, com intercalações de filito carbonoso, culminando com uma predominância

de unidades quartzíticas com intercalações subordinadas de sericita-clorita filito (Formações Serra do Landim e Paracatu).



**Figura 2.2 - Coluna estratigráfica proposta para a região de Paracatu, segundo Freitas-Silva (1996).**

Estruturalmente a Formação Paracatu é caracterizada por elementos planares de baixo ângulo (foliações e falhas de cavalgamentos), dobras de cisalhamento intrafoliares, de dimensão milimétrica a centimétrica, geradas em nível crustal médio. Elas contrastam e não apresentam qualquer evidência de transição com os estilos presentes na Formação Vazante. A deformação impressa nas unidades da Formação Vazante é caracterizada por elementos planares (foliações e falhas inversas) de alto ângulo, desde a escala micro até megascópica, com transposição fraca a moderada de estruturas sedimentares primárias.

Freitas-Silva (1996) reconheceu na região quatro fases de deformação progressivas, geradas durante um único evento de deformação (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Características estruturais das fases de deformação (mod. Freitas-Silva, 1996).

FASE (F <sub>n</sub> )	ESTRUTURAS		
	Características	Formação Paracatu	Formação Vazante
F <sub>1</sub>	Apresenta caráter regional. É representada por uma foliação S <sub>1c</sub> // ao bandamento metamórfico. A componente de deformação principal é o cisalhamento simples. Geração da foliação de fluxo de baixo ângulo S <sub>s</sub> durante o encurtamento e espessamento tectônico.	Apresenta mergulho suave, com atitudes N0-10W/10-15SW. Em Morro do Ouro, S <sub>1c</sub> representa a anisotropia mais evidente. Nas zonas mineralizadas, S <sub>1c</sub> apresenta textura milonítica a ultramilonítica/ ortomilonítica, com atitude geral subhorizontal. Foliação S <sub>s</sub> - Constitui uma foliação penetrativa ao longo de todo o pacote mineralizado, o que caracteriza a zona mineralizada como uma zona de cisalhamento.	A deformação apresenta um estilo característico das zonas externas dos <i>fronts</i> de cavalgamento. É marcada por uma cristalização incipiente dos filossilicatos (// a S <sub>0</sub> ), que define o cisalhamento intraestratal de flancos de dobras flexurais. Presença de falhamentos inversos, dobras em <i>chevron</i> assimétricas e simétricas. A foliação S <sub>s</sub> representa uma foliação plano axial de dobramentos flexurais que pode estar ausente em rochas mais competentes.
F <sub>2</sub> e F <sub>3</sub>	A componente de deformação principal é o cisalhamento puro. Presença de dobramentos suaves e monoclinais	S/ informação	S/ informação
F <sub>4</sub>	Sistemas de diáclases e juntas, além de falhas normais de pequeno rejeito	Em Morro do Ouro, os sistemas de fraturamento apresentam uma geometria ortorrômbica	S/ informação

### 2.3.2-) GEOLOGIA DA REGIÃO DE LUZIÂNIA

As características geológico-estruturais e metalogenéticas da região de Luziânia são apresentadas nos trabalhos de Hagemann (1988; 1989) e Hagemann *et al.* (1988, 1992).

Na região de Luziânia afloram as unidades metassedimentares pertencentes ao Grupo Canastra (quartzo-muscovita filitos e quartzitos), incluídas por Freitas-Silva (1996) no Membro Serra da Anta.

Pelo menos três eventos de deformação ocorreram nesta região, conforme apresentado na Tabela 2.2:

**Tabela 2.2 - Eventos de deformação e principais estruturas identificadas na região de Luziânia (modificado de Hagemann *et al.*, 1992)**

Estruturas D1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Associadas ao evento termo-tectônico Brasileiro;</li> <li>• Foliação regional bem desenvolvida, com <i>strike</i> nordeste e mergulho moderado para noroeste;</li> <li>• Localmente, dobras similares-cilíndricas simétricas;</li> <li>• Crenulações curvadas e abertas ;</li> <li>• Subsequente ou sincronicamente a este evento, as litologias foram submetidas a um metamorfismo de grau baixo (fácies xisto verde).</li> </ul>
Estruturas D2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Associadas ao sistema de empurrões epidérmicos (<i>Thin-skinned thrusting</i>) imbricados do Grupo Canastra (evento termo-tectônico Brasileiro??);</li> <li>• Formação de zonas miloníticas e zonas de cisalhamento reversas-dextrais, de caráter dútil-rúptil (foliação milonítica, clivagem de crenulação, dobras em bainha, dobras de crenulação assimétricas);</li> <li>• Colocação de veios de quartzo;</li> <li>• Dobramento subsequente e boudinagem dos veios de quartzo.</li> </ul>
Estruturas D3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Associadas a um provável soerguimento;</li> <li>• Falhas de alto ângulo com sentido de movimento desconhecido;</li> </ul>

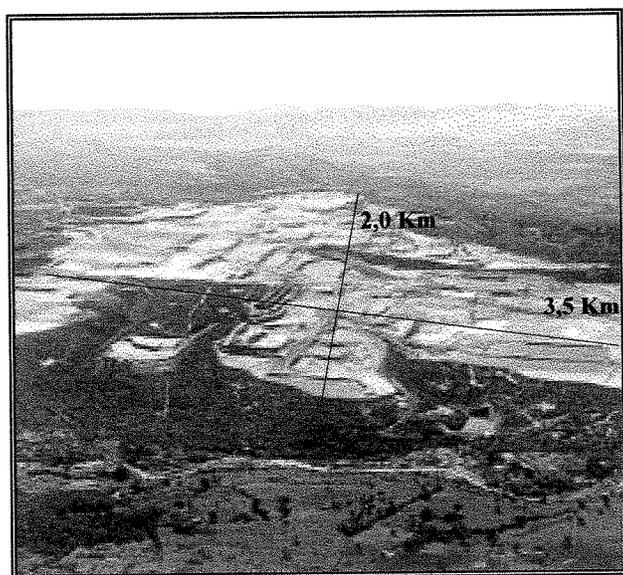
### 2.3.3-) ASPECTOS METALOGENÉTICOS DAS OCORRÊNCIAS AURÍFERAS

Os depósitos de Paracatu (Morro do Ouro e Fazenda Lavras) e as ocorrências de Luziânia encontram-se encaixados em uma sequência de arenitos carbonáceos, folhelhos e arenitos impuros, todos deformados e fracamente metamorfisados (fácies xisto-verde). Os sedimentos hospedeiros da mineralização são filitos carbonosos e quartzitos argilosos do Grupo Canastra (em Paracatu, no Membro Morro do Ouro e em Luziânia, no Membro Serra da Anta - Formação Paracatu), com veios e *boudins* de quartzo associados.

A mineralização aurífera é controlada estruturalmente por falhas de baixo ângulo (falhas de empurrão) associadas a sistemas transcorrentes.

Os depósitos de Paracatu (Morro do Ouro e Fazenda Lavras) estão espacialmente associados à Falha Paracatu-Vazante. Associadas a esta estrutura, zonas de cisalhamento dextrais-reversas perfazem um *trend* estrutural NE, com mergulho suave para NW (Hagemann *et al.*, 1992).

A jazida de Morro do Ouro dista 1,5 Km na direção norte de Paracatu, apresenta dimensões da ordem de 7 Km<sup>2</sup> (3,5 x 2,0 Km, sendo o eixo de maior comprimento SW-NE) (Figura 2.3) e apesar de seu baixo teor médio (0,50 g/t Au), sua economicidade é dada pela alta tonelagem (109 Mt) e por alto grau de beneficiamento a um baixo custo.

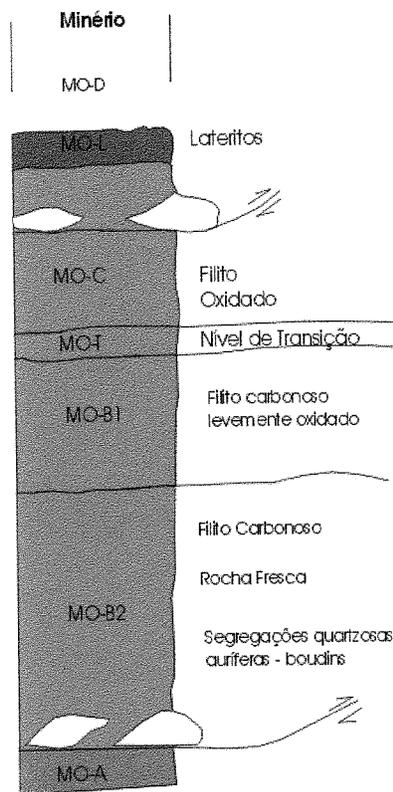


**Figura 2.3 - Vista aérea da Jazida de Morro do Ouro - dimensões da frente de lavra**

O perfil estratigráfico local para a mina de Morro do Ouro foi definido, principalmente, em função do grau de intemperismo. Este perfil está sumarizado na Tabela 2.3 e na Figura 2.4. A distribuição espacial destas unidades em mapa, é apresentada na Figura 2.5.

Segundo Costa Jr. (1997), a viabilidade econômica do depósito de Morro do Ouro é devida principalmente à ação de processos exógenos que atuaram na região, condicionados aos fatores lito-estruturais. A oxidação atingiu aproximadamente 40 m de profundidade e o minério lavrado é um saprólito fino, resultante de um intemperismo imaturo, responsável pela pouca geração de caulinita e pela transformação de muscovita em illita.

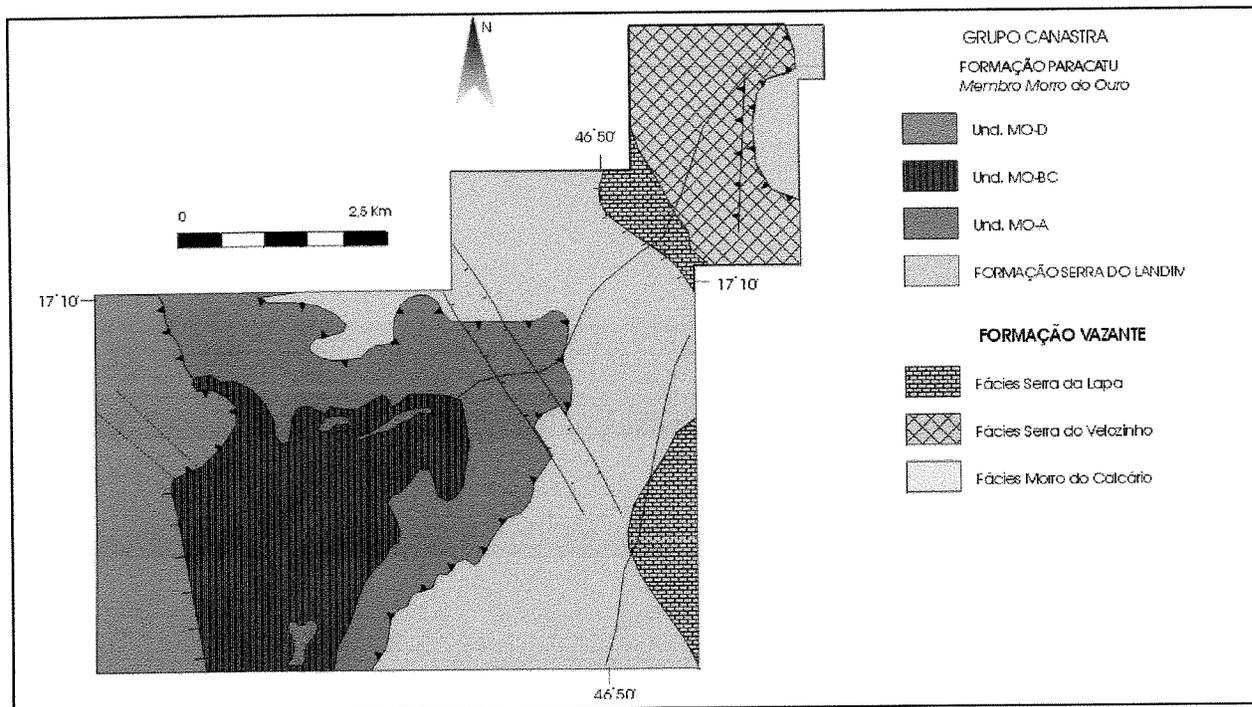
Em termos mineralógicos, os filitos do Grupo Canastra são compostos predominantemente por quartzo (30 - 60%) e mica branca (30 - 60%). Apresentam, como acessórios, magnetita e esfalerita, com pirrotita, arsenopirita e pirita subordinadas (em sua maioria, como minerais pós-tectônicos), turmalina, plagioclásio e por vezes, carbonato. A matéria orgânica apresenta teor variável, em torno de 2%.



**Tabela 2.3 - Perfil estratigráfico local para a Mina de Morro do Ouro**

UNIDADE	CARACTERÍSTICAS	MINERALOGIA
MO - D (capa)	Apresenta uma textura mais homogênea que a unidade A.	não difere da MO-A
MO-L	Representada por lateritos ferrosiálicos (Thomas, 1974 <i>apud</i> Freitas-Silva, 1996)	Goetita+Maghemita+lepidocrosit a+hematita±caulinita±ilita
MO - C	Apresenta aspecto mais esbranquiçado que as demais unidades, devido à decomposição da matéria orgânica. É a unidade mais rica do depósito (teor médio de 0,58 g/t).	Mica branca (ilita±muscovita) + quartzo + hidróxido de ferro + turmalina + ilmenita (traço)
MO - B	Subdividido em zona não oxidada (B2) e oxidada (B1). Representado por filitos carbonosos e sulfetos frescos. Teor médio: B2 = 0,49 g/t Au. B1 = 0,52 g/t.	Sericita + quartzo + ferri-ilmenita + magnetita + siderita + ankerita ± ferro-ripidolita ± rutilo ± matéria orgânica ± arsenopirita ± pirrotita ± esfalerita ± pirita ± turmalina ± albita
MO - A (lapa)	Apresenta teores abaixo de 0,1 g/t Au, não sendo sua exploração economicamente viável.	MO-A - sericita + quartzo + ferro-ripidolita + ferri-ilmenita + magnetita ± rutilo ± matéria orgânica ± pirrotita ± esfalerita ± pirita ± turmalina ± albita ± siderita/ankerita

**Figura 2.4 - Perfil esquemático proposto para a Mina de Morro do Ouro(Freitas-Silva, 1996)**



**Figura 2.5 - Mapa local para a Mina de Morro do Ouro (Freitas-Silva, 1996)**

O ouro contendo prata apresenta granulometria entre 1 e 800 microns e restringe-se à zonas de ocorrência de segregações quartzosas e à pirita e arsenopirita disseminadas nos filitos. Os padrões de distribuição originais foram modificados por processos de remobilização metamórfica, hidrotermal e supergênica. Assim, o ouro ocorre sob as seguintes formas: **ouro livre** (cerca de 95% no filito e nos *boudins* de quartzo), **ouro residual** (resultante da decomposição de sulfetos), **ouro em sulfetos** (em pirita e arsenopirita) e **ouro supergênico** (em perfis lateríticos, tendo sido transportado e depositado como resultado da atuação de química coloidal). A Tabela 2.4 apresenta um resumo dos modos de ocorrência do ouro.

**Tabela 2.4 - Modos de ocorrência do ouro**

MODOS DE OCORRÊNCIA	CARACTERÍSTICAS GERAIS
Livre, disseminado em segregações de quartzo ( <i>boudins</i> )	Estes <i>boudins</i> apresentam formato sigmoidal. São ricos em sulfetos (pirita, arsenopirita, esfalerita, galena e mais raramente, calcopirita e pirrotita), sericita e carbonato. Mais de 90% do ouro localiza-se nestas segregações que por sua vez, correspondem a 20-25% do volume total (Zini <i>et al.</i> , 1988). As segregações quartzosas possuem um teor médio de 2,50 ppm de ouro. As maiores concentrações auríferas ocorrem na presença de sulfetos.
Disseminado em filito "anômalo"	Esta unidade é de ocorrência rara, sob a forma de bolsões lenticulares de dimensões decimétricas a métricas. Apresentam teores bastante elevados (de 4 a 40 ppm). Neste litotipo, denominado hidrotermalito, o ouro ocorre ou finamente disseminado ou presente na estrutura molecular de sulfetos (Michel <i>et al.</i> , 1994).
Em perfis de intemperismo	A concentração de ouro no minério aumenta com a evolução do perfil de intemperismo. As carapaças lateríticas chegam a atingir 3 metros de espessura

### 2.3.3.1-) ALTERAÇÃO HIDROTERMAL

Ao longo da falha Paracatu-Vazante ocorrem feições de alteração hidrotermal associadas a uma maior deformação, mas mascaradas por extensos platôs lateríticos. Estas feições apresentam a mesma assinatura geoquímica de Au, As, Pb (Marques *et al.*, 1996) e são caracterizadas por uma intensa venulação de quartzo em zonas de cisalhamento dúcteis-rúpteis.

Nas ocorrências de Luziânia e em Paracatu, a alteração é caracterizada pela grande quantidade de pirita, sericita e clorita e, subordinadamente, carbonatos (processo de sulfetação, sericitização e carbonatação) associada aos veios de quartzo. Ocorrem quantidades variáveis de K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> e SiO<sub>2</sub>, além de altas quantidades de As e Pb e baixas de Cu, Zn e Ni.

Os envelopes de rocha visivelmente alterada apresentam em geral, poucos centímetros (da ordem de dezenas) de espessura e acompanham a geometria dos veios de quartzo. Em regiões

onde há uma grande concentração de segregações quartzosas, os envelopes hidrotermais se interceptam, atingindo dimensões métricas (Hagemann *et al.*, 1992).

### 2.3.3.2-) MODELO GENÉTICO

Em Morro do Ouro a mineralização está condicionada a zonas de cisalhamento que, de acordo com Freitas-Silva (1996), foram geradas durante um processo de cavalgamento interno do Membro MOB2. Este cavalgamento culminou com a formação de uma estrutura em duplex. A mineralização aurífera condiciona-se aos patamares horizontalizados (zonas transtensivas), onde o processo de deformação é do tipo “deformação total”, com duas componentes: de cisalhamento simples intraestratal e de cisalhamento puro, normal aos planos de deslizamento.

Esta feição estrutural do tipo duplex representa um dos principais controles estruturais dos depósitos do Tipo Morro do Ouro. Foi também observada no depósito de Fazenda Lavras (Luziânia) e nas ocorrências de Luziânia (Santa Maria, Igrejinha, Córrego Falcão, Lavadeiras, Rosário e Cabeça Seca) (Freitas-Silva, *op.cit.*).

Hagemann *et al.* (1992) associa a mineralização aurífera na região de Luziânia a um processo de tectônica compressional do tipo *thin skinned* (ou epidérmica), durante a qual os fluidos mineralizantes foram conduzidos por planos de cavalgamentos concentrando-se em zonas de cisalhamento dextrais-reversas de comportamento dúctil-rúptil. Estas zonas constituem um *trend* estrutural NW/SE.

Estudos radiométricos e isotópicos indicam que os fluidos mineralizantes foram gerados durante o evento termo-tectônico Brasileiro e são provenientes da própria pilha sedimentar. Os filitos carbonosos foram a principal fonte dos metais, inclusive do ouro, enxofre e arsênio para a solução mineralizante. O transporte de metais ocorreu principalmente na forma de complexos de enxofre (Freitas-Silva, 1996). O ouro foi depositado em condições de equilíbrio com as rochas encaixantes, o que de acordo com Freitas-Silva, 1996 explica em parte a ausência de uma zona de alteração hidrotermal pervasiva.

De acordo com Freitas-Silva (*op.cit.*), a caracterização metalogenética estabelece uma mineralização primária mesotermal e define três controles fundamentais:

**I-) Litoestratigráfico:** as mineralizações de grande volume estão condicionadas ao protominério, Membro Morro do Ouro (Formação Paracatu - Grupo Canastra). As mineralizações de menor volume condicionam-se ao Membro Serra da Anta;

**II-) Estrutural:** os depósitos estão condicionados às lascas de cavalgamentos, sendo localizados em estruturas transtensivas horizontalizadas, representadas pelos patamares do duplex;

**III-) Metamorfogênico:** os depósitos são restritos ao fácies xisto verde baixo e associados à percolação de fluidos metamórficos de origem endógena (gerados pelo metamorfismo dos filitos carbonosos) e sua concentração/desestabilização nos “traps” estruturais. A razão fluido/rocha (0,25) atingida neste sistema restringe as mineralizações a depósitos de baixos teores, entretanto, de grandes volumes.

As características metalogenéticas dos depósitos de Paracatu e Luziânia são comparadas na Tabela 2.5.

**Tabela 2.5 - Tabela comparativa entre as características metalogenéticas dos depósitos de Paracatu e Luziânia, segundo os diversos autores citados.**

<b>Luziânia (Hagemann <i>et al.</i>, 1992)</b>		<b>Paracatu (Freitas-Silva, 1991, 1996; Marques <i>et al.</i>, 1996)</b>							
Idade da mineralização	Brasiliano	Brasiliano							
Alteração hidrotermal	Escala de veio → dezenas de centímetros ao redor de veios e <i>boudins</i> de quartzo. Localmente, os envelopes se interceptam. Paragênese → ser + py + carb. Padrão químico → enriquecimento relativo de As e Pb e depleção de Cu, Zn e Ni	Escala de veio → Sericitização e sulfetação. Assinatura geoquímica → Au, As, Pb (define um alinhamento SE-NW)							
Paragênese das rochas hospedeiras	Qtz + ser + chl + py + cpy + aspy + gal + au + tetra + rut	Ser (70%) + qtz (25%) + carb (sid) + plag + turm + leuco + epd + opacos (5% - py + aspy + po + tetra + gn + sph + Cpy+ au + magn + ilm + hm							
Paragênese de minério	Idem às rochas hospedeiras	Idem às rochas hospedeiras							
Metalotectos estruturais	Zonas de cisalhamento dúcteis-rúpteis, dextrais-reversas, associadas ao empurrão epidérmico regional ( <i>thin-skinned Thrust</i> )	Zonas transtensivas → patamares horizontalizados de zonas de cisalhamento estruturadas em duplex (localmente)							
Metalotectos litológicos	Filitos hidrotermalmente alterados do Membro Serra da Anta (Formação Paracatu - Grupo Canastra)	Filitos carbonosos do Membro Morro do Ouro ( <i>fácies</i> aurífero da Formação Paracatu - Grupo Canastra)							
Metamorfismo	Fácies xisto-verde	Fácies xisto-verde baixa							
Tipo de fluido	Metamórfico (ou magmático)	Metamórfico (endógeno)							
Características do fluido	Baixa salinidade ( $\leq 7$ eq.wt% NaCl), moderadamente denso. Composição: H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> ± CH <sub>4</sub>	Baixa salinidade ( $\approx 2$ eq.wt% NaCl). Composição: H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> , ± NaCl, traços de HS/H <sub>2</sub> S							
Temperatura e pressão de formação dos veios auríferos	T = 300° ± 75 °C P = entre 1,5 e 3 Kb	T $\approx$ 370 °C P = entre 2 e 3 Kb							
Modelo genético	Dois tipos de mineralização aurífera, em dois processos diferentes: Enriquecimento inicial durante o <i>overthrusting</i> , com a percolação de fluidos hidrotermais enriquecidos em ouro ao longo de planos de falha; Enriquecimento supergênico secundário, resultante da percolação de águas meteóricas na superfícies atual	A formação do depósito é devida ao gradiente de pressão normal ao longo de uma estrutura em duplex. Enriquecimento secundário favorecido pela pervasiva laterização.							
<b>LEGENDA DAS ABREVIACÕES</b>									
Aspy	Arsenopirita	Cpy	Calcopirita	Ilm	Ilmenita	Py	Pirita	Qtz	Quartzo
Au	Ouro	Epd	Epidoto	Leuco	Leucoxênio	Ser	Sericita	Rut	Rutilo
Sph	Esfalerita	Gn	Galena	Magn	Magnetita	Tetra	Tetraedrita	Carb	Carbonato
Chl	Clorita	Hm	Hematita	Po	Pirrotita	Turm	Turmalina	Plag	Plagioclásio
Sid	Siderita								

### **3.1.-) APRESENTAÇÃO**

As aplicações de técnicas de sensoriamento remoto em exploração mineral baseiam-se na análise qualitativa e quantitativa da radiância refletida pelo alvo na superfície. Considerando-se o crescente desenvolvimento de tecnologias para a aquisição de informações a partir de sensores remotos orbitais ou aerotransportados, é essencial que as propriedades radiométricas do terreno imageado sejam conhecidas.

Uma imagem multiespectral representa pictoricamente o comportamento espectral de seus constituintes ou seja, os mecanismos de interação da energia radiante com o alvo. A resposta espectral de um alvo depende das propriedades químicas (como composição química e/ou mineralógica e estrutura cristalina) e físicas (como rugosidade e declividade) de sua superfície, assim como da geometria de aquisição dos dados (posição angular fonte-alvo-sensor) (Galvão, 1994). Neste sentido, a espectroscopia de campo é utilizada como ferramenta para o desenvolvimento de estudos a respeito da viabilidade do uso do sensoriamento remoto para a detecção dos materiais de interesse. Esta técnica permite determinar a resolução espectral e espacial requerida para a análise, através da obtenção de um maior número de espectros de reflectância com melhor resolução espectral ao longo da faixa que inclui o VNIR e o SWIR, tornando possível reconstituir feições de absorção importantes para a discriminação dos diversos tipos de coberturas e sua identificação através de imagens multiespectrais.

A análise através da espectroscopia de reflectância foi conduzida para amostras de rocha e testemunhos de sondagem obtidos nas regiões de Paracatu e Luziânia, como ponto inicial para a aplicação de técnicas de processamento digital de imagem, onde os espectros obtidos foram analisados em função de seu conteúdo mineral, tanto do ponto de vista quantitativo quanto qualitativo.

Neste capítulo pretende-se (i) identificar os diferentes tipos de materiais em função de suas características mineralógicas, (ii) reconhecer os processos responsáveis pela formação desta paragênese e (iii) elaborar uma caracterização espectral detalhada para os diferentes tipos de

materiais, principalmente aqueles superficiais, que são potencialmente detectáveis através de sensores hiper e multiespectrais.

### 3.2-) METODOLOGIA

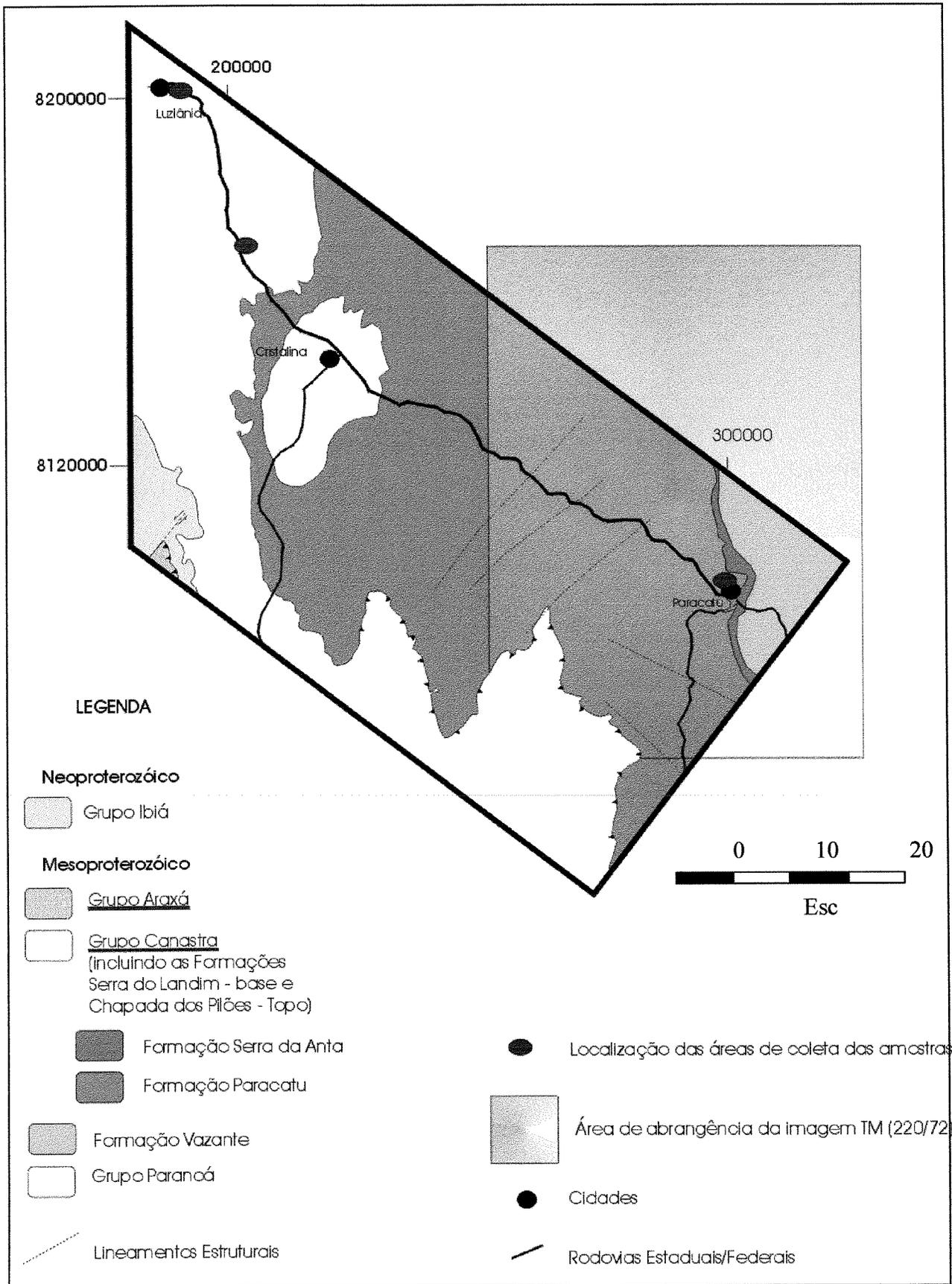
Aproximadamente cem (100) amostras foram coletadas (i) nas áreas dos depósitos auríferos de Fazenda Lavras e Morro do Ouro, posicionados estratigraficamente no Membro Morro do Ouro; (ii) em alvos antigamente prospectados também para ouro em Luziânia, posicionados estratigraficamente no Membro Serra da Anta e (iii) em locais sem mineralização aurífera documentada, mas estratigraficamente posicionados no Membro Serra da Anta. Na Tabela 3.1 e na Figura 3.1 as áreas de coleta de amostras são apresentadas, assim como seu contexto geológico.

As amostras foram denominadas de acordo com o local onde foram coletadas:

**Tabela 3.1 - Proveniência e denominação das amostras analisadas**

NUMERAÇÃO NO MAPA	PROVENIÊNCIA	DENOMINAÇÃO DAS AMOSTRAS
1	Mina de ouro de Morro do Ouro	MOB2, MOB1, MOC, LATERITA (diferentes níveis intempéricos)
1	Mina de ouro de Fazenda Lavras	FL-Rocha (amostra do filito que ocorre nesta localidade), FL-Veio (amostra típica da alteração hidrotermal que ocorre em DTMO)
1	Próximo de Paracatu ("filito estéril")	PARACATU
2	São Bartolomeu (antigo alvo para ouro)	SÃO BARTOLOMEU
3	Alvos para ouro em Luziânia	LUR (proveniente do alvo Rosário), LUSM (proveniente do alvo Santa Maria), CABEÇA SECA

As amostras individuais foram escolhidas de forma que representassem as propriedades espectrais características das diferentes unidades litológicas, ou mesmo possíveis variações composicionais dentro de cada unidade. Numa primeira etapa, as análises foram realizadas em amostras "brutas" (da forma como afloram no campo). Numa segunda etapa, algumas amostras foram trituradas a 200 mesh (para que o tamanho dos grãos fossem homogeneizados, fazendo com que as diferenças em granulometria não influenciassem nas medições), tendo sido medidas espectralmente..



**Figura 3.1 - Mapa de localização das amostras coletadas para análise**

Utilizou-se como métodos para análise mineralógica das amostras, a microscopia ótica e a espectroscopia de reflectância. Esta última técnica será aqui abordada com maior ênfase e detalhamento, devido à sua aplicabilidade direta na análise dos dados através do sensoriamento remoto.

Será apresentado a seguir um breve levantamento dos princípios em que cada método aplicado se baseia, assim como a metodologia empregada para obtenção dos resultados.

### ***3.2.1-) ANÁLISE PETROGRÁFICA MICRO E MACROSCÓPICA***

As amostras coletadas na região foram descritas inicialmente em campo, na forma como afloram, tendo sido levantados aspectos como tipo de alteração (primária e secundária), coloração e modo de ocorrência no campo. Para ilustrar esta descrição, foram selecionadas as amostras que melhor representassem os litotipos analisados (e dentro deles, variações devidas aos processos supergênicos).

Foi feita também uma análise através da microscopia ótica para a identificação da paragênese mineral e de alguns aspectos como os texturais, a granulometria e a forma dos grãos, que são parâmetros que devem ser levados em consideração quando da análise através da espectroscopia de reflectância. Foram então confeccionadas e descritas lâminas delgadas (15) e delgadas polidas (03), permitindo a identificação de minerais transparentes, translúcidos e opacos.

### ***3.2.2-) ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA***

Durante os estudos realizados na área, foram feitas medidas de reflectância espectral em campo e em laboratório, nas amostras coletadas. Objetivou-se com este estudo caracterizar o comportamento espectral dos filitos (carbonosos ou não), pertencentes aos Membros Serra da Anta e Morro do Ouro (Formação Paracatu - Grupo Canastra), da forma como ocorrem no campo.

### 3.2.2.1-) FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A espectroscopia de reflectância é a ciência destinada à medição da distribuição espectral da energia de fótons (como comprimento de onda ou frequência), associada à radiação, que pode ser variavelmente transmitida, refletida, emitida ou absorvida por um determinado material (Short, 1998). Representa um método rápido, relativamente barato e não destrutivo para detectar modificações sutis na estrutura e quimismo dos minerais, além de constituir uma das formas mais eficientes para a otimização e detalhamento das informações extraídas a partir de imagens multiespectrais.

Os resultados obtidos com estas medições fornecem uma série de informações úteis para a exploração mineral, como escala de trabalho e resoluções espaciais e espectrais necessárias para a detecção das assinaturas espectrais dos diferentes materiais superficiais, e para a pesquisa científica, como diferenciação entre politipos minerais e caracterização destes politipos em termos de ordenamento estrutural (Hauff *et al.*, 1991; Kruse & Hauff, 1991; Masinter & Lyon, 1991; Martinez-Alonso *et al.*, 1997; Duba & Williams-Jones, 1983).

As assinaturas espectrais de fases minerais distintas são resultantes de diferentes mecanismos, que resultam em **feições de absorção** (depressões em relação ao *background* ou *continuum*) posicionadas em **comprimentos de onda** característicos. Através da análise da profundidade, forma e posição das feições de absorção, é possível obter importantes informações a respeito da composição química dos diferentes materiais. A interação da energia radiante com a superfície de rochas e solos, ocorre em dois níveis que definem o comportamento espectral dos alvos: um macroscópico e outro microscópico.

A nível macroscópico, os fenômenos envolvidos são a refração, difração, espalhamento e absorção. Estes efeitos podem (e devem) ser quantificados através da caracterização das superfícies de rochas e solos, que são compostas por partículas minerais intimamente misturadas, de granulometria, posição (micro e macro variações topográficas), forma e compactação diferentes. Como atestado em diversos trabalhos (Hovis, 1965; Hovis Jr. & Calahan, 1966; Vincent & Hunt, 1968; Hunt & Vincent, 1968; Pieters, 1983, dentre os principais), a reflectância total de uma rocha está diretamente relacionada à granulometria e opacidade dos minerais que a compõem. Para minerais opacos, como óxidos e hidróxidos, a diminuição na granulometria

causa um aumento no albedo resultante, ao contrário do que ocorre para minerais transparentes, como os silicatos, para os quais quanto maior a granulometria do mineral, menor será o albedo.

Ao nível microscópico, a interação da energia eletromagnética com rochas e solos se dá através de mecanismos quânticos. As absorções são devidas primariamente à PROCESSOS ELETRÔNICOS em íons de metais de transição ( $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Cr}^{+2}$ , etc.), tais como efeitos de campo do cristal (transições a nível atômico) e transferência de carga (transições eletrônicas inter-elemento), que ocorrem na região do visível-infravermelho próximo (VNIR - *visible-near infrared*) e à PROCESSOS VIBRACIONAIS envolvendo moléculas e íons ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{OH}^-$  e  $\text{CO}_3^{-2}$ ), que ocorrem na região do infravermelho de ondas curvas (SWIR - *short wave infrared*). A posição, forma e intensidade das feições de absorção são controladas pela estrutura particular do cristal (Burns, 1970 *apud* Galvão, 1994; Hunt & Salisbury, 1970; Hunt *et al.*, 1971; Adams, 1975, Goetz *et al.*, 1982; Rowan *et al.*, 1984) e pela abundância relativa de cada grupo mineral.

### 3.2.2.2-) OBTENÇÃO DOS DADOS

Em campo, as medições foram realizadas durante o mês de maio, correspondente ao período seco sob condições de iluminação natural, onde a luz solar corresponde à fonte de iluminação direta e dominante, o espalhamento atmosférico como fonte de iluminação difusa e outras fontes de iluminação devidas ao espalhamento da luz em objetos vizinhos (Passos, 1999). Utilizou-se um campo de visada de 43 cm (lente de 25°), a uma distância de 1,5 m do alvo. Desta forma, foram obtidas 32 curvas espectrais para os diversos materiais superficiais contidos no FOV do instrumento: solos, superfície de oxidação das rochas e vegetação. Quando possível (principalmente em garimpos abandonados, onde diversas trincheiras foram abertas), os diferentes níveis de intemperismo foram caracterizados.

Em laboratório, utilizou-se como fonte de iluminação artificial estável uma lâmpada halógena de 3000° K de temperatura, acoplada a um tripé montado a uma distância de 50 cm da bancada, cujo foco atinge o alvo a um ângulo de 30°. O revólver do espectrômetro (suporte de mão que conecta as frentes óticas ao cabo de fibra ótica) foi montado de modo a perfazer um ângulo também de 30° em relação ao alvo. Utilizou-se uma lente de 1°, a uma distância de 0,5 m do alvo. Foram obtidas 600 curvas espectrais para os diversos materiais superficiais. As

medições foram feitas perpendicular e paralelamente ao bandamento metamórfico, em diversos pontos das amostras.

### 3.2.2.3-) ANÁLISE DOS DADOS ESPECTRAIS

A análise dos espectros de reflectância foi feita através do *software* de classificação **SIMIS** (*Spectrometer Independent Mineral Identification Software*) *Field* e **SIMIS** *Feature Search*.

O *software* SIMIS (Mackin, 1998) foi desenvolvido para aplicações diretas na análise e interpretação de dados obtidos por espectrômetros de campo. A análise através de algoritmos de classificação baseados em diferentes rotinas, a seguir descritas, constitui um meio rápido para a identificação das misturas minerais que compõem as amostras de rocha analisadas nesta dissertação.

As rotinas de classificação utilizadas baseiam-se nos seguintes parâmetros:

- Posição da Feição: através deste procedimento, a biblioteca espectral selecionada é convertida em feições espectrais, obtidas através da utilização de um algoritmo que subtrai o continuum dos espectros. Desta forma, as 20 maiores feições são extraídas, fornecendo informações a respeito da posição, intensidade e largura das bandas de absorção;
- Forma da Curva: os espectros são normalizados e, através de um algoritmo de correlação cruzada, são comparados com a biblioteca espectral de referência;
- Desmistura Estatística: utiliza um algoritmo denominado *Generalised Linear Least Square* para modelar o espectro obtido através de funções lineares, ajustadas através do método dos mínimos quadrados (vide Settle & Drake, 1993 para maiores detalhes).

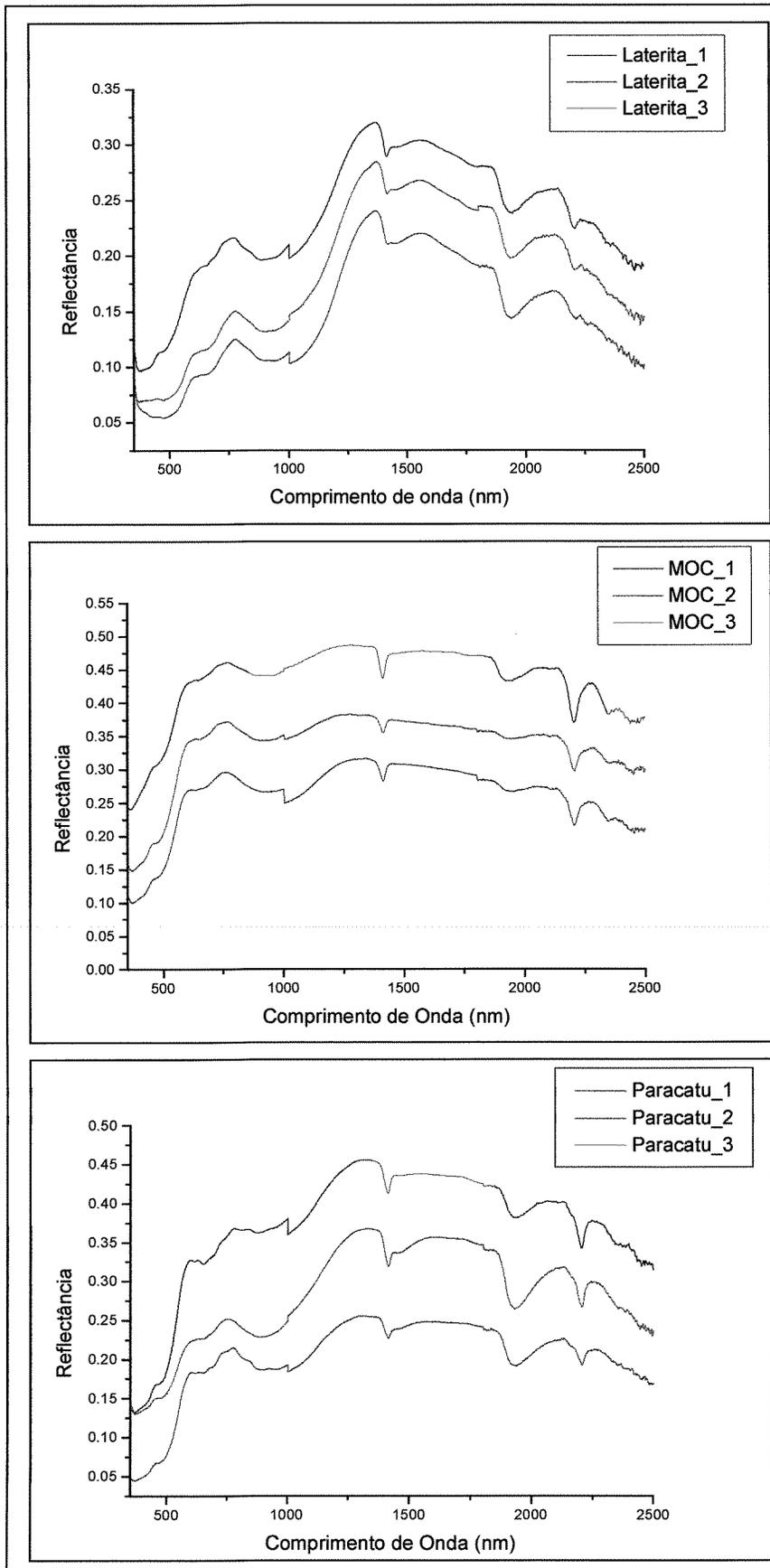
Inicialmente elaborou-se uma biblioteca espectral composta por 16 curvas espectrais de espécies minerais puras, extraídas da biblioteca espectral do USGS. Os minerais (*endmembers*) da biblioteca espectral constituem os dados de entrada para os algoritmos de classificação, disponíveis no *Software* SIMIS.

#### 3.2.2.4 –) VARIABILIDADE ESPECTRAL ENTRE AS AMOSTRAS ANALISADAS

A análise foi conduzida nas cem amostras coletadas nas áreas selecionadas para estudo. As medições foram feitas em diferentes faces das amostras, tanto paralelo quanto perpendicularmente ao bandamento metamórfico. Para uma mesma amostra foram feitas em média seis medições. O grande número de medições permite que possíveis anisotropias composicionais (concentrações minerais anômalas que ocorrem localmente) não cheguem a interferir na caracterização espectral.

A análise destas curvas para cada grupo de amostra permitiu concluir que não foram detectadas variações espectrais significativas, ou seja as curvas obtidas apresentam feições de absorção posicionadas nos mesmos comprimentos de onda e, sua intensidade apresenta pequena variabilidade. Não é de se estranhar que as curvas espectrais obtidas para o tipo de rocha analisada (filito), que apresenta grãos finos e bem distribuídos, não apresentem grande variabilidade, dada a homogeneidade composicional deste tipo litológico. Na Figura 3.2, pode-se observar que, para o espaço amostral composto por três curvas espectrais obtidas para a mesma unidade, a variabilidade entre as curvas é praticamente nula.

Desta forma, optou-se por apresentar apenas uma curva espectral para cada grupo de amostras analisadas facilitando assim a interpretação dos dados. É oportuno observar que as curvas espectrais apresentadas referem-se àquelas obtidas em laboratório.



**Figura 3.2 - Curvas espectrais típicas para as amostras Laterita, MOC e Paracatu. Exemplos da pequena variabilidade entre as curvas espectrais obtidas para as amostras típicas dos Membros Morro do Ouro e Serra da Anta**

### 3.3-) RESULTADOS

#### 3.3.1-) FILITOS MEMBRO MORRO DO OURO

As rochas que compõem esta unidade são quartzo-sericita-(clorita) filitos carbonosos. Quando frescos, apresentam tonalidade cinza escura e aspecto sedoso, características típicas da presença de matéria carbonácea. Já sob condições oxidantes, apresentam um aspecto mais esbranquiçado, já que a matéria carbonácea é quase que totalmente consumida.

Em lâmina, apresentam textura granolepidoblástica, granulação muito fina, aproximadamente equigranular, onde se observa uma alternância de níveis mais quartzosos com níveis mais pelíticos. A proporção entre os minerais constituintes das amostras analisadas é variável. Isto ocorre principalmente em função das mudanças do ponto de vista químico que os minerais sofrem ao longo do perfil de intemperismo.

Os resultados obtidos através da classificação espectral são apresentados na Figura 3.13, ao final deste sub-ítem.

##### 3.3.1.1-) FAZENDA LAVRAS - PARACATU

Na área da cava da mina de Fazenda Lavras foram coletadas amostras do sericita filito e de veios nele encaixados (Figura 3.3). Os sericita filitos apresentam tonalidade marrom clara, com porções acinzentadas com foliação marcada pela intercalação com níveis mais quartzosos. Já os veios de quartzo (*boudins*) são de ocorrência pervasiva neste depósito.

As curvas espectrais obtidas em laboratório para amostras de veios (FL-568) e de sericita filitos intemperizados (FL-574) que ocorrem na mina de Fazenda Lavras (Figura 3.4), apresentam feições de absorção distintas. No caso dos veios compostos predominantemente por quartzo leitoso, encaixados no sericita filito carbonoso, a assembléia mineralógica é composta predominantemente por minerais do grupo das hidroxilas e, subordinadamente por minerais portadores do íon férrico, presente na estrutura dos hidróxidos. Esta amostra é típica da alteração do tipo filica que ocorre em DTMO (quartzo, sericita e sulfetos). A curva espectral obtida para o

filito intemperizado é caracterizada pelo aparecimento dos argilominerais e daqueles minerais resultantes da oxidação dos sulfetos (de origem hidrotermal ou metamórfica).

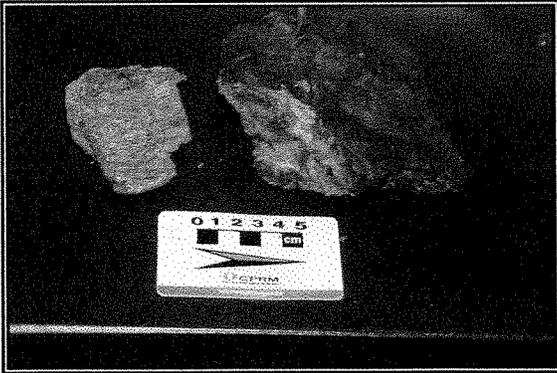
**AMOSTRA FAZENDA LAVRAS (FL\_VEIO E FL\_ROCHA)**

**PROVENIÊNCIA:** Mina de Fazenda Lavras  
(Paracatu/MG)

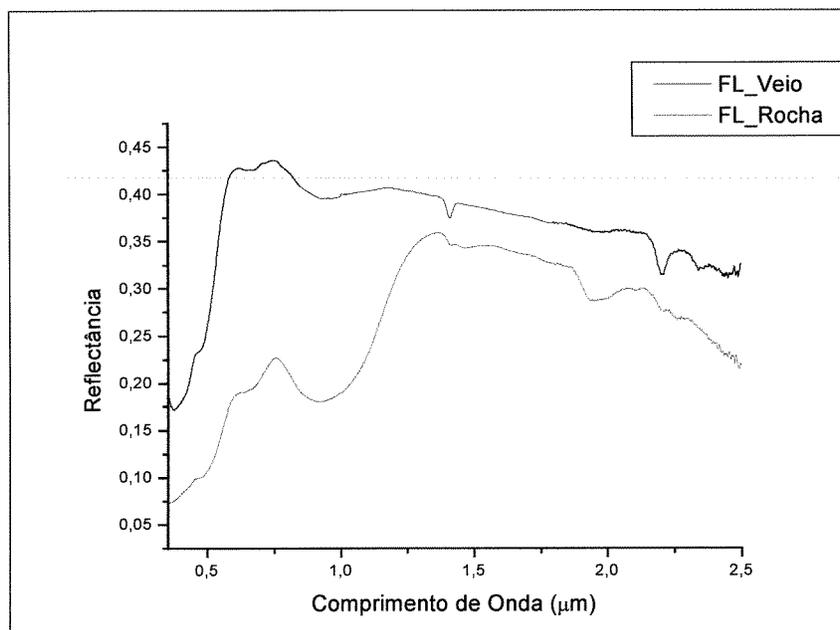
**LOCALIZAÇÃO:** 295748E  
8110645N

**DESCRIÇÃO:** filito cinza claro, com tons esbranquiçados. Presença de intensa venulação. Composto por sericita, óxidos/hidróxidos de ferro, argilo-minerais, quartzo em menor quantidade.

**ALTERAÇÃO**      **TIPO:** filica e argílica  
                         **ESTILO:** pervasiva  
                         **INTENSIDADE:** Intensa



**Figura 3.3 - Amostra da unidade C, coletada na porção superficial do depósito aurífero de Morro do Ouro**



**Figura 3.4 - Assinatura espectral de rocha e veio provenientes da Mina Fazenda Lavras (Paracatu-MG)**

#### **a-) AMOSTRA DE VEIO**

Na região do VNIR, os picos de absorção são pouco intensos, e apresentam centros posicionados em 0,485; 0,425; 0,670 e 0,924  $\mu\text{m}$  (Figura 3.4A). As duas últimas feições são diagnósticas da ocorrência de goetita.

As feições de absorção na região do SWIR são bem marcadas e indicam a presença de espécies minerais que apresentam o íon hidroxila em sua estrutura cristalina. Posicionam-se em 1,412; 2,202; 2,341; 2,431  $\mu\text{m}$ . A banda posicionada em 1,9  $\mu\text{m}$  ocorre como uma pequena “ondulação”, indicando a pequena quantidade de água molecular na amostra. A presença de hidroxila é indicada pela existência de uma banda em 1,412  $\mu\text{m}$ , enquanto as feições em 2,202  $\mu\text{m}$  e subordinadamente em 2,341  $\mu\text{m}$  são típicas da ligação Al-OH, que ocorrem nas moléculas dos minerais. Atribui-se estas feições à presença dos minerais ilita e muscovita, de ocorrência relacionada ao veio. As informações a respeito do grau de cristalinidade das argilas podem ser obtidas através da análise da intensidade e simetria das feições de absorção nos comprimentos de onda de 1,4; 1,9 e 2,2  $\mu\text{m}$ .

A classificação espectral através do SIMIS resultou na seguinte mistura mineral para a amostra: jarosita, muscovita, montmorilonita e ilita. Este resultado não é considerado satisfatório pois a percentagem de erro de mistura apontada é muito alta. As razões para este alto percentual podem estar atribuídas ao alto conteúdo de ruídos entre 2,3 e 2,5  $\mu\text{m}$  e à seleção inadequada dos *endmembers* a partir da biblioteca espectral.

#### **b-) AMOSTRA DE ROCHA**

Foi coletada na porção mais superficial da mina, sendo desta forma possível prever a existência de feições de absorção mais intensas para os minerais dos grupos dos óxidos e hidróxidos de ferro (Figura 3.4 - curva B).

De fato, na região do VNIR, as feições eletrônicas aparecem mais bem marcadas do que as vibracionais no SWIR.

Os ombros das feições de absorção que ocorrem na porção visível do espectro indicam feições típicas da goetita em 0,67 e 0,924  $\mu\text{m}$ . Esta última feição pode ser também indicativa de limonita .

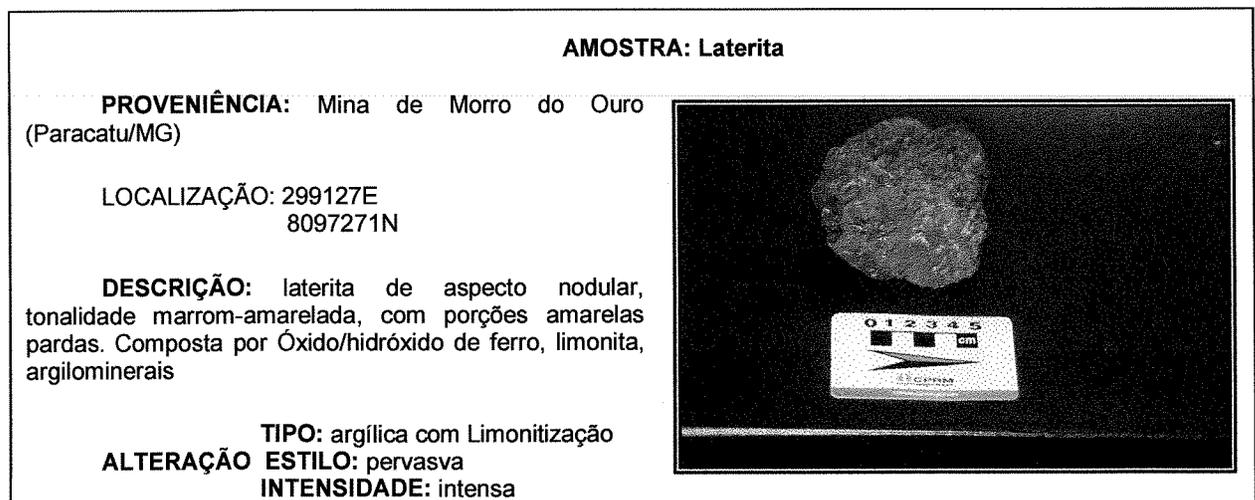
Na região do SWIR, a feição de absorção em 1,937  $\mu\text{m}$  típica de água molecular apresenta-se larga e bem marcada. Bandas posicionadas em 1,415; 2,204; 2,261; 2,411  $\mu\text{m}$  relacionam-se à minerais do grupo  $\text{OH}^-$ , contendo Al e Mg (?) na ligação.

A classificação espectral através do SIMIS resultou na seguinte mistura: ilita, limonita e goetita, condizente com os dados petrográficos.

### 3.3.1.2-) MINA MORRO DO OURO - PARACATU

#### a-) LATERITA

Antes da abertura do pit, a Mina de Morro do Ouro era recoberta por uma carapaça laterítica, hoje escassa, dado o avanço das frentes de lavra. Por representar a porção mais superficial dos DTMO, sua caracterização espectral oferece informações importantes para a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto em regiões de clima tropical a sub-tropical. A amostra de laterita analisada é do tipo nodular, de tonalidade marrom-avermelhada com porções ocre (Figura 3.5).



**Figura 3.5 – Laterita proveniente da Mina de Morro do Ouro**

As feições eletrônicas típicas do íon férrico estão bem expressas na curva espectral (Figura 3.6). São devidas à transferência de carga responsável pela queda generalizada da

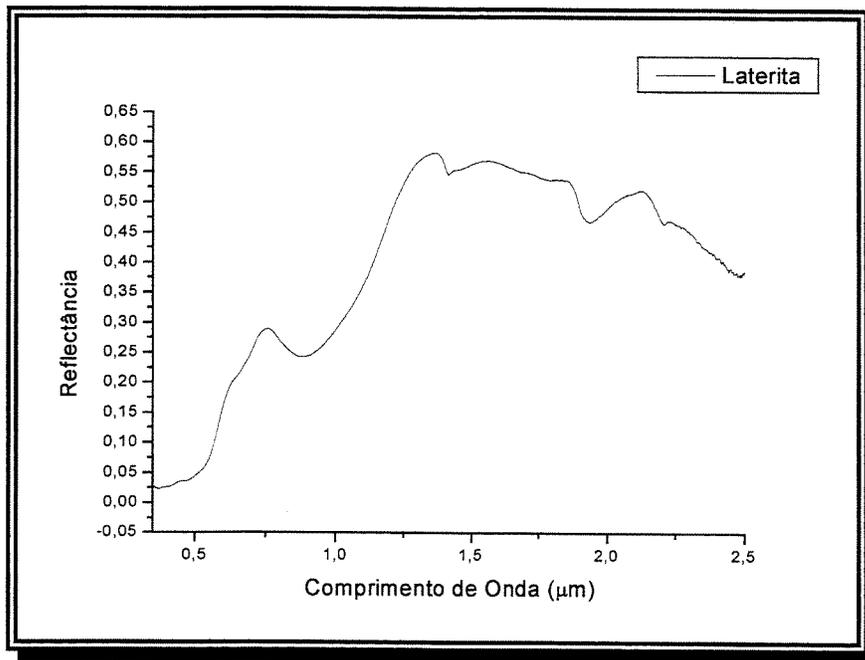


Figura 3.6 - Assinatura espectral da laterita proveniente da Mina Morro do Ouro (Paracatu-MG)

reflectância em direção à região do VIS (mais acentuadamente entre 0,40 e 0,60 µm) e pelas feições de campo cristalino, que produzem as duas feições de absorção em 0,954 µm e em 0,535 µm. Estes ombros das feições de absorção são devidos à mistura de minerais do grupo dos óxidos e dos hidróxidos, espécies minerais predominantes nas lateritas.

No SWIR, as bandas de absorção posicionam-se em 1,414; 1,784; 1,934; 2,209; 2,398 e 2,476 µm. Esta última feição é devida à vibrações fundamentais envolvendo o íon OH<sup>-</sup> (Hunt, 1977). A feição posicionada em 1,784 µm é ampla e suave. De acordo com Hunt & Salisbury (1970), alguns minerais, como jarosita e gipso apresentam esta banda de absorção bem marcada, resultante da combinação do estiramento fundamental com o primeiro *overtone* da ligação Al-O-H. No espectro aqui analisado, a intensidade desta feição é pequena, quando comparada com a das espécies minerais puras analisadas pelos autores supracitados. No entanto, pode ser diagnóstica da presença de jarosita nesta amostra, em pequena quantidade. As demais feições

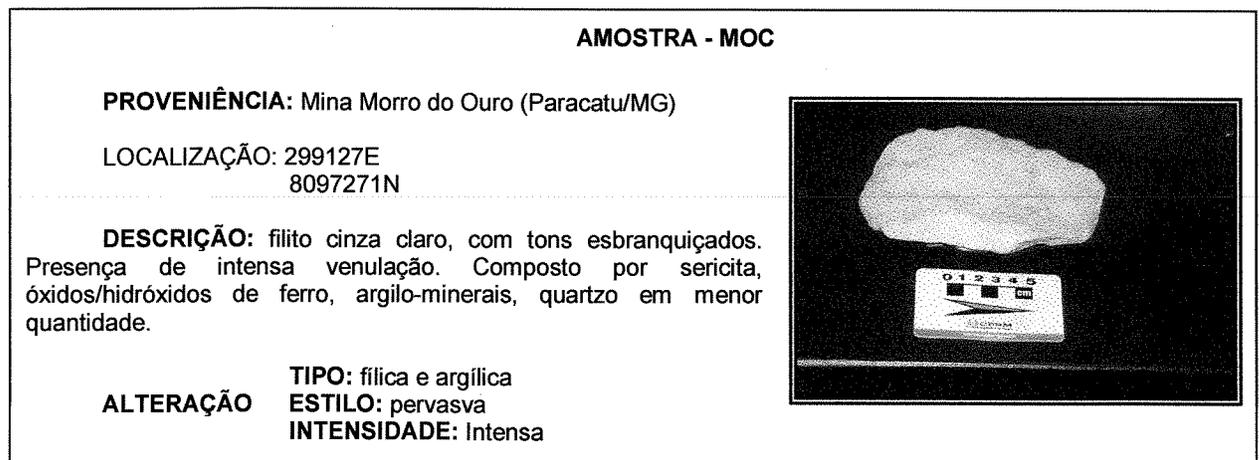
estão relacionadas aos processos vibracionais envolvendo o íon OH<sup>-</sup>, que ocorre na estrutura cristalina de ilitas e muscovitas.

A classificação espectral obtida através do SIMIS foi considerada excelente para as amostras de laterita analisadas, onde os minerais hematita, esmectita, montmorilonita e goetita foram devidamente identificados e quantificados.

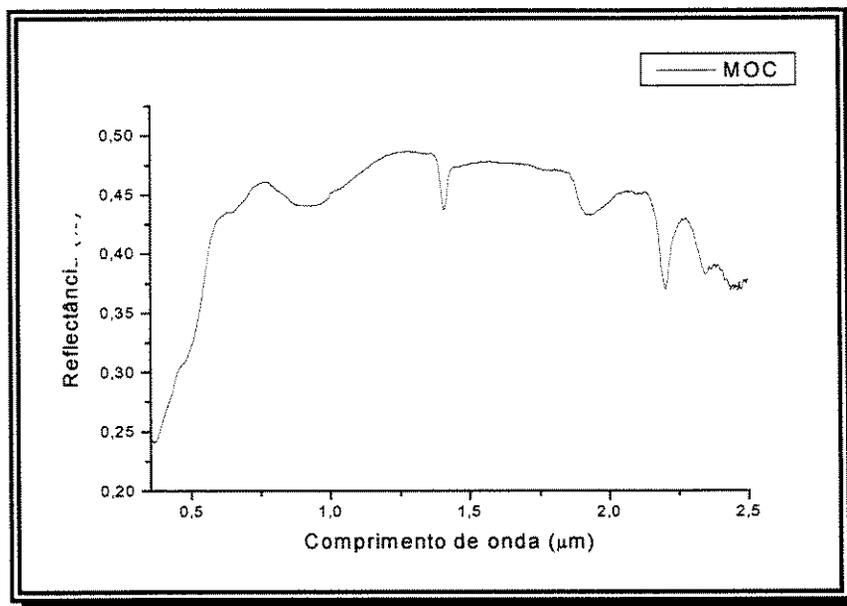
### **b-) MOC**

Quando intemperizado, o filito carbonoso típico de DTMO apresenta um tom esbranquiçado, com total ausência de matéria carbonácea (Figura 3.7).

A assinatura espectral para esta unidade é caracterizada por feições de absorção pronunciadas na região do SWIR e subordinadas na porção VNIR, marcando o predomínio das hidroxilas sobre os óxidos e hidróxidos de ferro (Figura 3.8).



**Figura 3.7 – Amostra da unidade MOC, coletada na porção superficial do depósito aurífero de Morro do Ouro (Paracatu)**



**Figura 3.8 - Assinatura espectral da Unidade MOC - Mina Morro do Ouro (Paracatu-MG)**

As feições de absorção devidas aos processos eletrônicos situam-se em 0,505; 0,654 e 0,962  $\mu\text{m}$ . O primeiro pico de absorção, o menos intenso, está relacionado à processos de transição de  $\text{Fe}^{+2}$  (Hunt & Ashley, 1979). Os demais, mais expressivos, são típicos de goetita.

Na região do SWIR, os picos de absorção conspícuos em 1,412 e 1,204  $\mu\text{m}$  podem ser atribuídos a abundância de minerais compostos pelo íon hidroxila em sua estrutura cristalina.

Dois outros picos secundários ocorrem em 2,347  $\mu\text{m}$  e em 2,450  $\mu\text{m}$ . Estas feições devem-se à mistura entre muscovita e ilita na amostra. Segundo Clark *et al.* (1990), a feição em 2,450  $\mu\text{m}$  relaciona-se tanto à presença de muscovita (neste caso, o pico de absorção estaria bem definido) e de ilita (nesta posição, a feição de absorção seria mal definida). Já a feição em 2,347  $\mu\text{m}$  é provavelmente resultante de uma mistura entre muscovita (cuja feição em amostra pura é localizada em 2,35  $\mu\text{m}$ ) e ilita (a banda de absorção para espécie pura localiza-se em 2,34  $\mu\text{m}$ ). Este dado é consoante com os dados bibliográficos disponíveis (Freitas-Silva, 1996). Segundo este mesmo autor, a ilita seria produto direto da transformação de grande parte da sericita. A proporção modal entre estes dois minerais é da ordem de 50 a 70%.

De acordo com Kruse & Hauff (1991), bandas de absorção bem marcadas em 1,40, 1,90 e 2,20  $\mu\text{m}$  e entre 2,30 e 2,50  $\mu\text{m}$  em espectros de ilitas/muscovitas podem diferenciar água

interplanar, água estrutural (OH) e algumas características dos níveis octaédrais que ela ocupa, ou seja podem indicar um maior ou menor grau de ordenamento estrutural, ou de cristalinidade dos minerais. No caso da amostra representante da unidade MOC, muito provavelmente as ílitas foram formadas sob condições de maior temperatura.

A classificação espectral através do SIMIS forneceu a seguinte mistura mineral: caosmectita, montmorilonita, ílita, goetita e muscovita, condizente com a análise petrográfica.

### **c-) MOB1**

Esta unidade marca o início da ação intempérica que afeta os carbonatos e parcialmente os sulfetos (Freitas-Silva, 1996) presentes na paragênese metamórfica. Apresenta tonalidade cinza, com porções amarelo pardas. Apresenta uma leve oxidação dos sulfetos evidenciada macroscopicamente por manchas avermelhadas, típicas de seus produtos (Figura 3.9).

Através da curva espectral apresentada na Figura 3.10, pode-se observar que as feições atribuídas à presença de  $Fe^{+3}$  na estrutura dos minerais são bastante rasas, indicando sua pequena quantidade e os efeitos relativos a presença de matéria carbonácea, que obliteram as feições de absorção. São feições em 0,671 e 0,922  $\mu m$ , típicas da goetita. Os filossilicatos apresentam feições de absorção em 1,412; 2,202; 2,34 e 2,462  $\mu m$ .

Pela presença de sulfetos quase totalmente preservados dos efeitos intempéricos e pela ocorrência de matéria carbonácea também preservada, esta assinatura espectral era prevista. Estes minerais caracteristicamente não apresentam feições de absorção pronunciadas.

A classificação espectral obtida através do SIMIS não foi considerada satisfatória. Obteve-se para a curva espectral analisada a mistura dos minerais albita e caulismectita. A alta percentagem de erro de mistura resultante está relacionada ao percentual de matéria carbonácea na amostra, que tipicamente oblitera as feições de absorção da curva espectral, ressaltando o ruído eletrônico do aparelho.

**AMOSTRA - Sericita filito carbonoso (Membro Morro do Ouro)**

**PROVENIÊNCIA:** Mina Morro do Ouro (Paracatu/MG)

**LOCALIZAÇÃO:** 299288E  
8097514N

**MOB1**

**DESCRIÇÃO:** filito cinza claro, com tons amarelos, levemente esverdeado em alguns locais. Porções localmente mais oxidadas e presença de intensa venulação. Composto por sericita, matéria carbonácea, óxidos/hidróxidos de ferro, argilo-minerais, quartzo.

**ALTERAÇÃO** TIPO: filica e argílica  
ESTILO: pervasiva seletiva  
INTENSIDADE: moderada a intensa

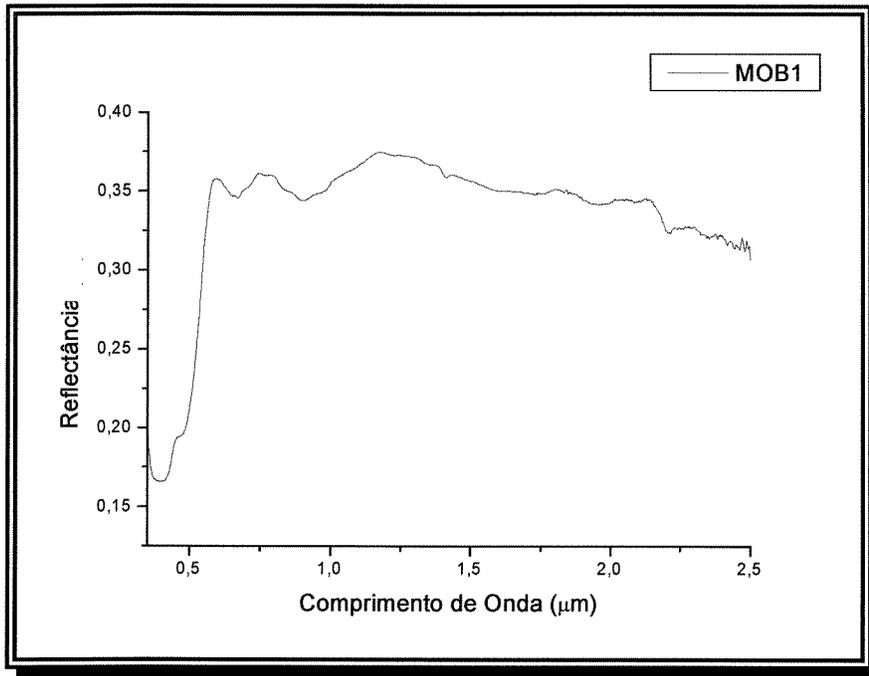
**MOB2**

**DESCRIÇÃO:** filito cinza (prateado) à amarelado, com aspecto sedoso. Composto por sericita, matéria carbonácea, limonita, argilominerais.

TIPO: filica e argílica com limonita em forma de bolsões (manchas)  
**ALTERAÇÃO** ESTILO: pervasiva seletiva  
INTENSIDADE: moderada a intensa



**Figura 3.9 - Unidades MOB2 e MOB1 (transição marcada pelo nível carbonoso e por intensa venulação)**



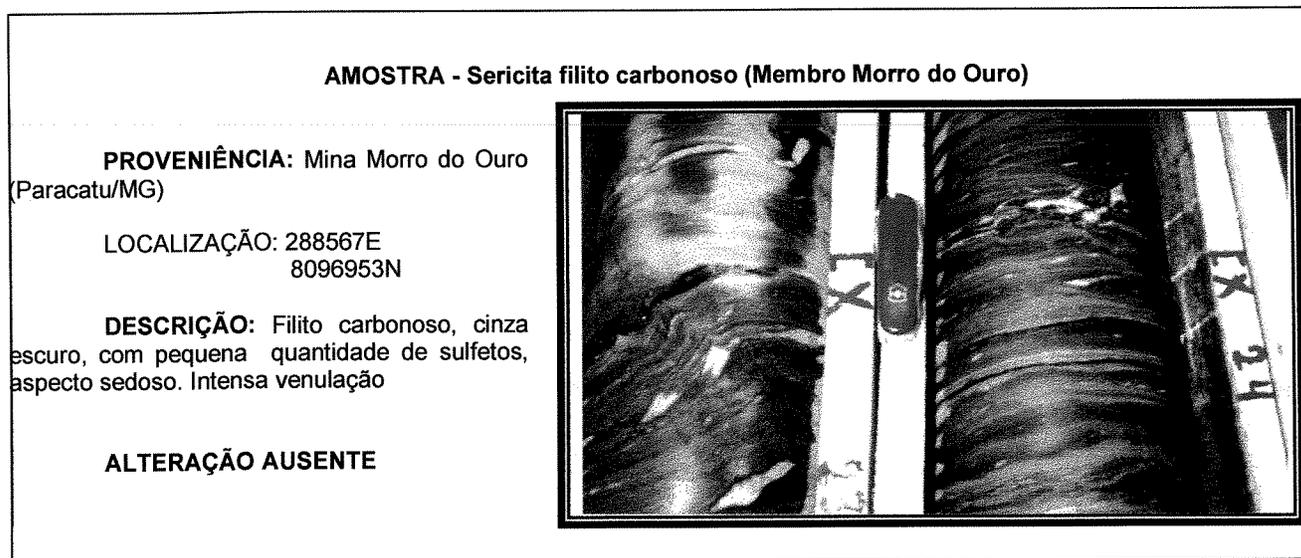
**Figura 3.10 - Assinatura Espectral da Unidade MOB1 - Mina Morro do Ouro (Paracatu-MG)**

#### d-) MOB2

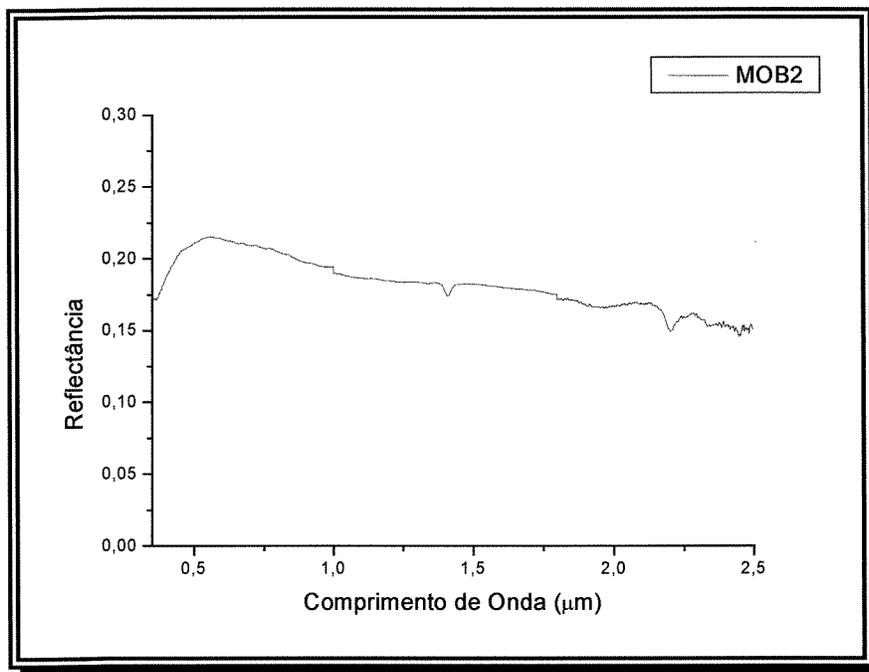
A paragênese mineral que compõe as amostras típicas do minério MOB2 é caracterizada pela pervasiva ocorrência de sulfetos, quartzo, sericita, carbonatos e clorita (em quantidade subordinada). A matéria carbonácea ocorre em proporções elevadas, como observado macroscopicamente (Figura 3.11).

A ausência de feições bem definidas para este tipo litológico é devida a presença da matéria carbonácea, responsável pela obliteração ou redução quase total das intensidades dos picos de absorção (Salisbury & Hunt, 1974). Como observado na curva espectral (Figura 3.12), há um gradiente positivo de reflectância em direção à região do VNIR (a reflectância decresce em direção ao SWIR), também atribuído à presença de matéria carbonácea.

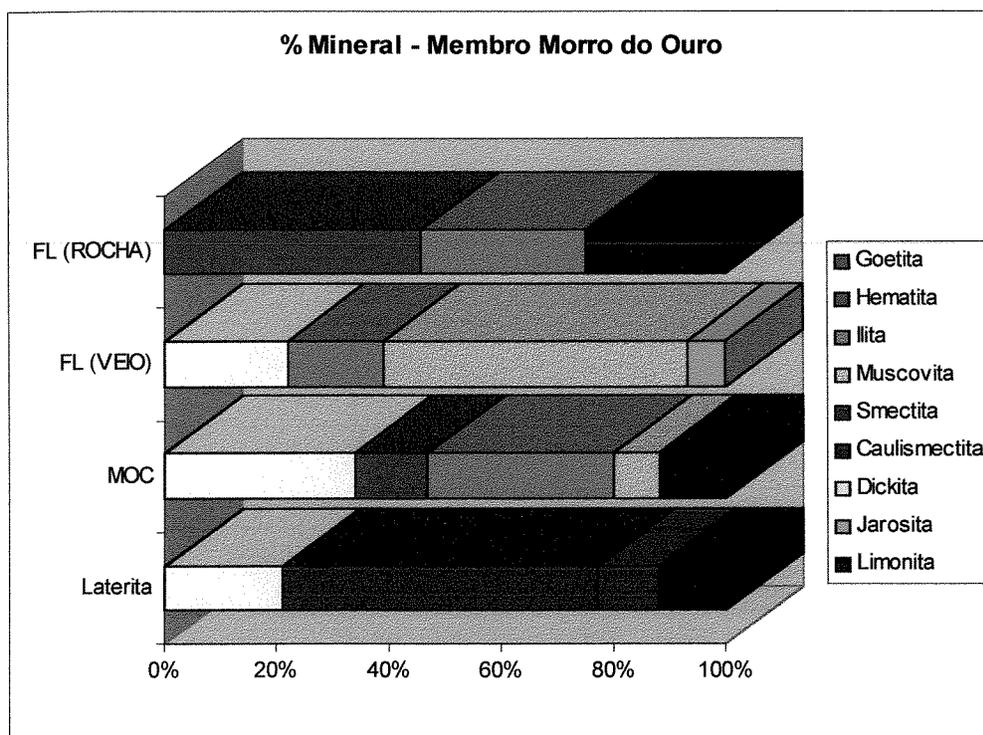
A classificação espectral através do SIMIS permitiu a detecção de matéria carbonácea que constitui aproximadamente 5% das rochas analisadas, mas não foi eficaz na classificação dos minerais do grupo das hidroxilas (principalmente aqueles ricos em Al na sua estrutura cristalina, como a illita e a muscovita).



**Figura 3.11 - Amostra - testemunho de sondagem (Mina Morro do Ouro)**



**Figura 3.12**  
Assinatura  
espectral da  
Unidade MOB2 -  
Mina Morro do  
Ouro (Paracatu-  
MG)



**Figura 3.13 - Classificação Espectral para filitos do Membro Morro do Ouro. No gráfico são apresentadas as proporções minerais extraídas através da classificação espectral baseada nos parâmetros “Forma da Curva” e “Posição da Feição”, disponíveis no SIMIS. Notar que apenas aquelas amostras com ausência de matéria carbonácea puderam ser classificadas.**

### 3.3.2-) FILITOS SERRA DA ANTA

As amostras analisadas a seguir, referem-se aos filitos carbonosos ou não, pertencente ao Membro Serra da Anta. Do ponto de vista composicional, não diferem muito daqueles filitos pertencentes ao Membro Morro do Ouro, a não ser pela menor quantidade de matéria carbonácea e maior de quartzo presente nas rochas.

Os quartzo-sericita-clorita filitos do Membro Serra da Anta contém quantidades variáveis de veios e *boudins* de quartzo cinza. Quando frescos, estes tipos litológicos são compostos essencialmente por quartzo, sericita, clorita, carbonato e como acessórios, pirita, calcopirita, arsenopirita, galena, tetraedrita e rutilo. A paragênese relacionada a alteração hidrotermal em escala de veio, é associada a processos de sulfetação e sericitização. Há também um incremento na quantidade de clorita e carbonato, relacionados à entrada de maiores quantidades de  $K_2O$ ,  $TiO_2$  e  $SiO_2$ .

As amostras características desta unidade foram coletadas em localidades exploradas em tempos passados para ouro (Alvo Rosário, Alvo Santa Maria e Alvo Cabeça Seca) e em áreas sem ocorrências auríferas conhecidas (próximo ao povoado de São Bartolomeu<sup>1</sup> e numa área a oeste da cidade de Paracatu, identificada previamente através da imagem TM)

Os resultados obtidos através da classificação espectral são apresentados na Figura 3.23.

#### 3.3.2.1-) ALVO SANTA MARIA

A amostra analisada é referente a um sericita filito de coloração cinza escuro, com porções avermelhadas e amareladas pardas, bastante intemperizado, coletado numa trincheira (Figura 3.14)

---

<sup>1</sup> Selecionadas através de informações obtidas em Pontara (1998).

**AMOSTRA - Sericita filito carbonoso (Membro Serra da Anta)**

**PROVENIÊNCIA:** Alvo Santa Maria  
(Luziânia/GO)

**LOCALIZAÇÃO:** 217096E  
820192N

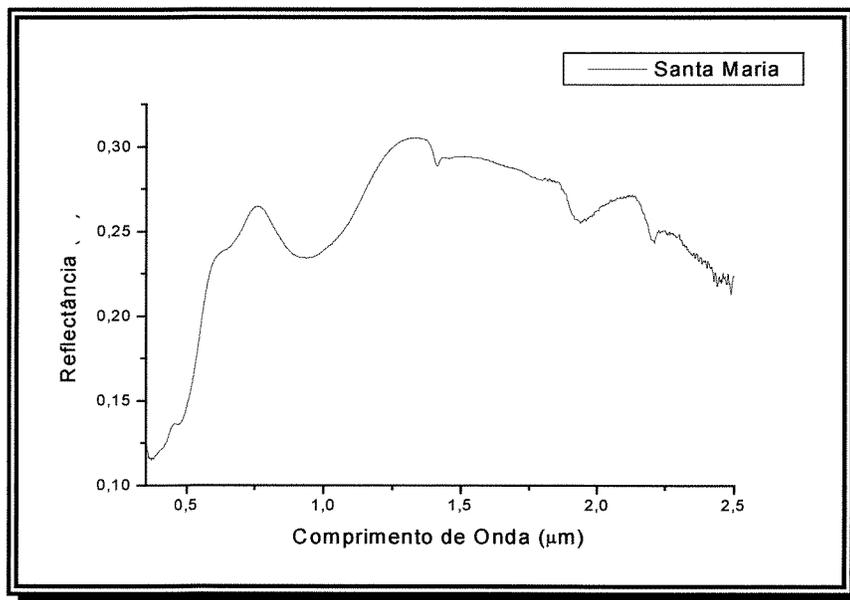
**DESCRIÇÃO:** porção superficial do filito cinza escuro, com porções avermelhadas e amareladas. Composto por sericita, óxido de ferro, argilominerais e quartzo.

**ALTERAÇÃO** TIPO: filica e argílica  
ESTILO: pervasiva seletiva  
INTENSIDADE: moderada a intensa



**Figura 3.14 - Superfície de oxidação do filitos carbonosos (Mb. Serra da Anta) aflorante no Alvo Santa Maria (Luziânia/GO)**

A curva espectral obtida para amostras provenientes do Alvo Santa Maria (Figura 3.15) mostra que os picos de absorção na região do VNIR apresentam centros posicionados em 0,488  $\mu\text{m}$ , 0,667  $\mu\text{m}$  e 0,97  $\mu\text{m}$ , indicativos da presença de  $\text{Fe}^{+3}$ . Estes ocorrem como bandas largas, sendo típicos da presença de goethita.



**Figura 3.15 - Assinatura espectral do sericita filito proveniente do Alvo Santa Maria**

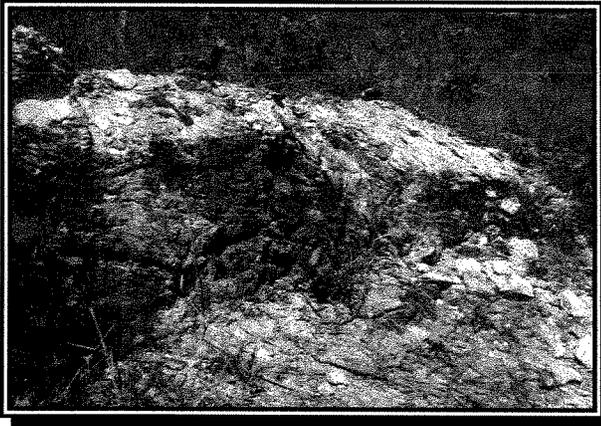
Na região do SWIR, as feições de absorção são bem marcadas em 1,412  $\mu\text{m}$  e 2,21  $\mu\text{m}$  e indicam a presença do íon hidroxila e da ligação Al-OH na estrutura dos minerais. A feição de absorção em 1,938  $\mu\text{m}$  devida à água na estrutura dos minerais é suave, relacionada à presença de micas ou argilominerais (ilita) na rocha, como identificado petrograficamente.

A classificação espectral da amostra apontou a presença de hematita, montmorilonita e muscovita, tendo sido considerada satisfatória. O erro de mistura foi de 27%.

### 3.3.2.2-) ALVO ROSÁRIO

A amostra analisada apresenta tonalidade cinza claro, de aspecto sedoso. Contém argilominerais (coloração amarela parda característica) e óxidos/hidróxidos de ferro (tons avermelhados) (Figura 3.16).

<b>AMOSTRA - quartzo-sericita filito carbonoso (Membro Serra da Anta)</b>	
<b>PROVENIÊNCIA:</b> (Luziânia/GO)	Alvo Rosário
<b>LOCALIZAÇÃO:</b>	185420E 8201505N
<b>DESCRIÇÃO:</b>	filito cinza claro, de aspecto sedoso, encaixando veio de quartzo cinza. Representado pela alternância de porções mais amareladas, outras tendendo ao rosa, Composto por quartzo cinza, argilominerais, sericita, óxido/hidróxidos de ferro
<b>ALTERAÇÃO</b>	TIPO: filica e argílica ESTILO: relacionada a veio INTENSIDADE: Moderada a intensa



**Figura 3.16- Afloramento de Sericita filito no Alvo Rosário (Luziânia/GO)**

A curva espectral obtida para o filito proveniente deste alvo (Figura 3.17) apresenta feições de absorção na região do VIS, típicas da presença de goetita ( $0,668 \mu\text{m}$  e  $0,94 \mu\text{m}$ ), resultante de processos de oxidação dos sulfetos.

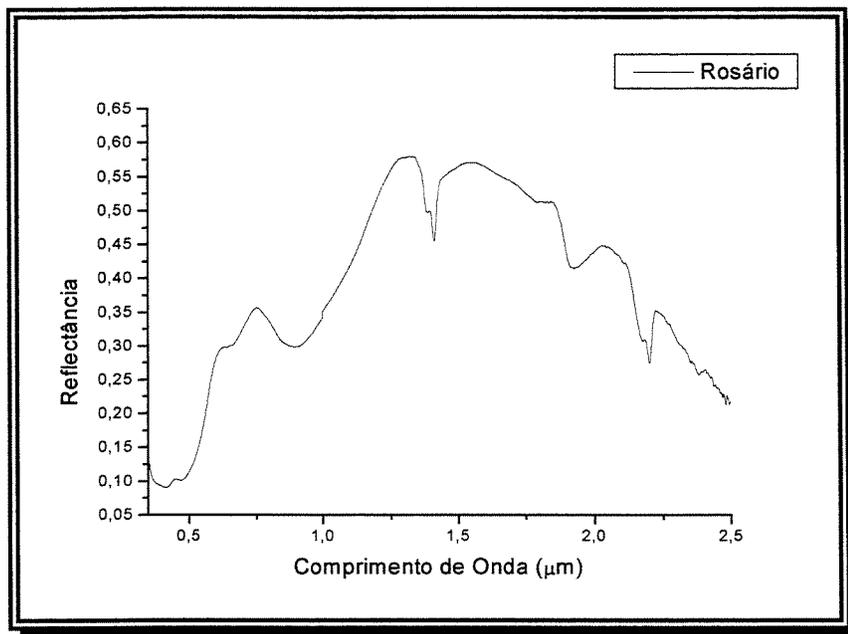


Figura 3.17 - Assinatura espectral do sericita filito proveniente do Alvo Rosário (Luziânia-GO)

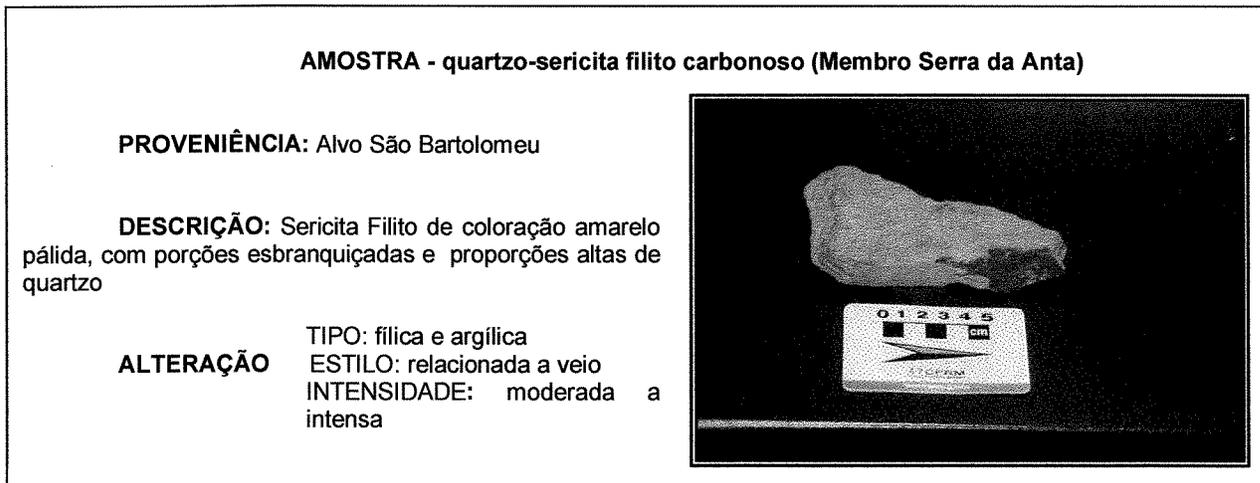
Na região do SWIR, dois *doublets* marcam a presença distintiva de minerais do grupo da caulinita (caulinita, dickita ou haloisita) em  $1,413 \mu\text{m}$  e  $2,203 \mu\text{m}$ . Em ambos os *doublets*, o primeiro pico de absorção é menos intenso e mais suave o que, muito provavelmente indica a presença de caulinita. As feições secundárias em  $2,351$  e  $2,382 \mu\text{m}$  são também típicas destes argilo-minerais.

A presença de outros argilominerais, como a ilita, ou de filossilicatos, como a sericita, pode estar mascarada pelas feições de absorção da caulinita. A identificação destes minerais em lâmina ou através da difração de raios-x é muito difícil, pois são espécies minerais extremamente semelhantes. A espectroscopia de reflexão seria o método mais adequado à sua distinção.

O resultado obtido com a classificação espectral foi considerado satisfatório, mesmo com um erro de mistura alto para esta amostra (30,7%). Foram reconhecidos os seguintes minerais/mistura: goetita e dickita.

### 3.3.2.3-) ALVO SÃO BARTOLOMEU

Esta amostra foi coletada num alvo com potencialidade aurífera conhecida, denominado nesta dissertação Alvo São Bartolomeu. Trata-se de um quartzo-sericita filito alterado, com tonalidade amarelo-pálida, evidenciando os processos de argilização de ocorrência pervasiva, devido aos processos exógenos (Figura 3.18).

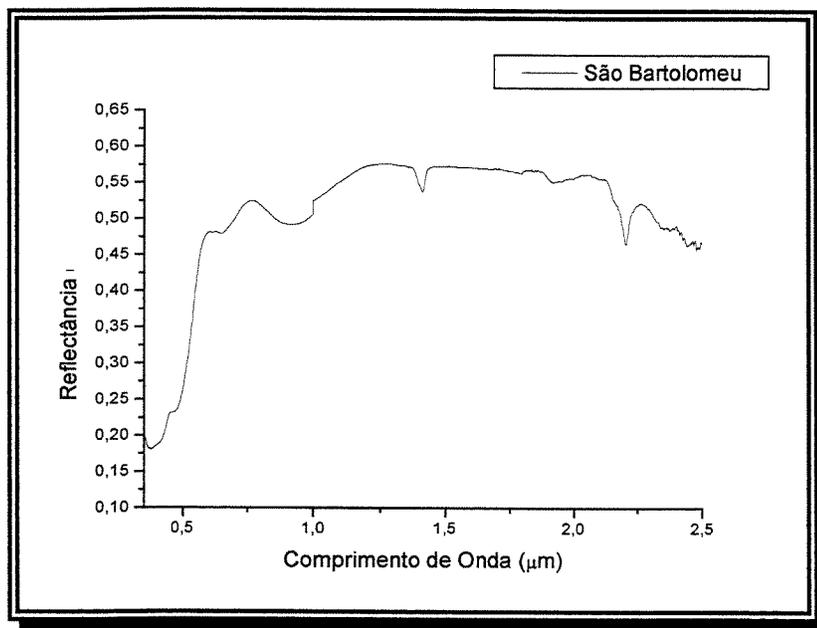


**Figura 3.18 - Amostra de Sericita filito proveniente do Alvo São Bartolomeu**

No espectro obtido para a amostra do filito intemperizado (Figura 3.19), os mínimos da reflectância na região do VNIR ocorrem principalmente em 0,426  $\mu\text{m}$ , 0,659  $\mu\text{m}$  e 0,945  $\mu\text{m}$ , todos resultantes dos processos de transição de campo de cristal que ocorrem nesta porção do espectro. A presença de uma banda próxima a 0,43  $\mu\text{m}$  pode ser indício ou da presença do íon  $\text{Fe}^{+3}$  ou de  $\text{Fe}^{+2}$  (jarosita?) na estrutura do mineral. Outras feições (0,659  $\mu\text{m}$  e 0,945  $\mu\text{m}$ ) nesta porção do espectro associam-se a presença de goetita.

Para a região do SWIR, a presença de feições simples de absorção em 1,413  $\mu\text{m}$  (primeiro *overtone*) e 1,92  $\mu\text{m}$  relaciona-se respectivamente à ocorrência de hidroxilas e água na estrutura do cristal. As feições de absorção conspícuas em 2,206 e largas em 2,342  $\mu\text{m}$ , secundariamente, estão relacionadas à presença de minerais contendo a ligação Al-OH.

Os resultados obtidos com a classificação da mistura mineral presente neste espectro apontam a presença de jarosita, montmorilonita, caulismectita, illita e muscovita.

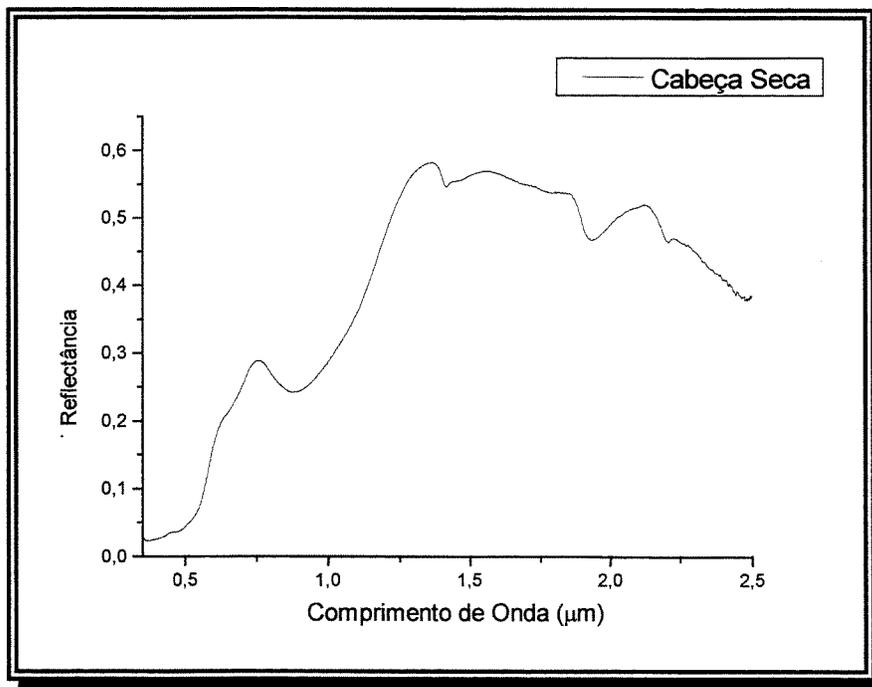


**Figura 3.19 - Assinatura espectral do sericita filito proveniente do Alvo São Bartolomeu**

#### 3.3.2.4-) ALVO CABEÇA SECA

A amostra obtida nesta região refere-se à porção mais oxidada da superfície (crosta laterítica). Macroscopicamente, esta crosta apresenta coloração vermelho-amarronzada, aspecto terroso e nodular, típico indício da presença de uma paragênese mineral rica em  $Fe^{3+}$

O espectro apresentado na Figura 3.20 apresenta para comprimentos de onda posicionados na região do visível, uma queda nas intensidades da reflectância em relação àqueles posicionados no SWIR. A amostra apresenta um ombro, centrado em  $0,684 \mu m$ , e uma feição de absorção mais larga em  $1,006 \mu m$ . De acordo com Hunt & Ashley (1979), estas feições são resultantes de transições de campo de cristal e, nestas posições, são típicas da presença de limonita com predomínio de goetita, como indicado pela percentagem de mistura mineral obtida através da classificação espectral.



**Figura 3.20 -Assinatura espectral da laterita proveniente do Alvo Cabeça Seca (Luziânia/GO)**

Na região do SWIR, a feição de absorção centrada em 2,197  $\mu\text{m}$  é indicativa da presença da ligação OH-Al. A presença de bandas com valores mínimos centrados entre 2,16 e 2,23  $\mu\text{m}$  é uma feição também indicativa da presença de filossilicatos e argilo-minerais (Hunt & Ashley, *op.cit.*). Picos de absorção nesta região do espectro também são observados em comprimentos de onda maiores que 2,4  $\mu\text{m}$  (2,414; 2,436, 2,456  $\mu\text{m}$ ) e são atribuídos à vibrações envolvendo os modos de estiramento de OH e da ligação metal-OH (Hunt & Ashley, *op.cit.*).

### 3.3.2.5-) AMOSTRA “PARACATU”

Esta amostra foi coletada numa área de exposição de rocha próxima à Mina de Morro do Ouro. Este alvo foi selecionado, por situar-se estratigraficamente na mesma unidade lito-estratigráfica portadora das ocorrências de ouro das regiões de São Bartolomeu e Luziânia. A análise das rochas deste alvo objetivou comparar suas características espectrais com aquelas típicas das rochas coletadas em regiões com reconhecida potencialidade aurífera.

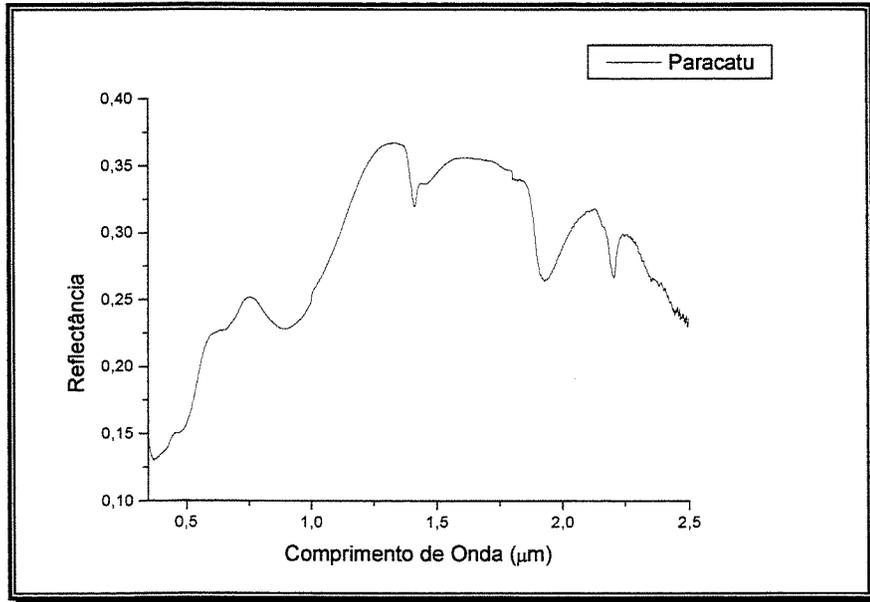
Trata-se de um quartzo-sericita filito de tonalidade bege claro, intemperizado, o que imprime um aspecto escuro à sua expressão mais superficial (Figura 3.21).

AMOSTRA - Quartzo-sericita filito (Membro Serra da Anta)	
PROVENIÊNCIA:	Paracatu (MG)
LOCALIZAÇÃO:	291637E 8108354N
DESCRIÇÃO:	Quartzo-sericita filito de coloração cinza claro, esbranquiçado
ALTERAÇÃO	TIPO: filica e argílica ESTILO: pervasiva <b>seletiva</b> INTENSIDADE: Moderada



**Figura 3.21 - Superfície de oxidação do quartzo-sericita filito (Membro Serra da Anta) aflora próximo de Paracatu (MG)**

A curva espectral obtida para este litotipo encontra-se plotada na figura 3.22.

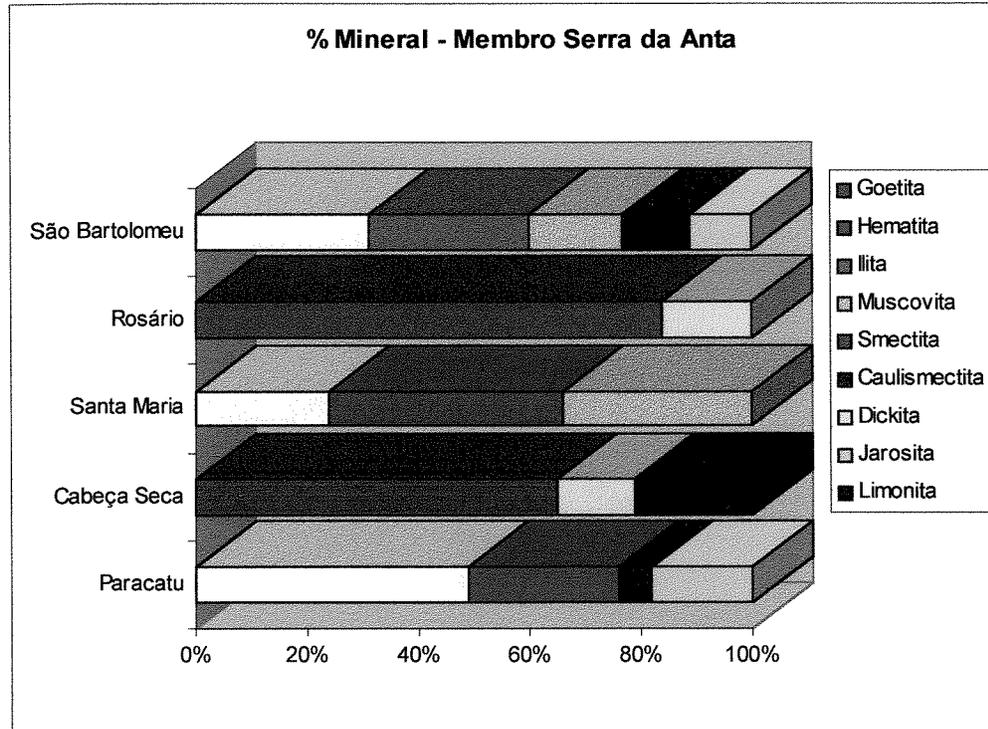


**Figura 3.22- Curva espectral obtida para o quartzo-sericita filito do Membro Serra da Anta, proveniente de uma área exposta, sem mineralização aurífera conhecida.**

Na região do visível, as feições de absorção encontram-se em 0,49, 0,66 e 1,00 µm. Estas feições são devidas à presença dos óxidos e hidróxidos de ferro que compõem a alteração supergênica, presente nas amostras analisadas.

Na região do infravermelho próximo, o pico de absorção de maior intensidade ocorre em 2,20 µm, acompanhado por um ombro bem definido, atribuído a Al-OH, representado pela muscovita e ilita. A outra feição de absorção mais evidente ocorre em 1,41 µm, atribuída ao íon hidroxila nestes minerais.

Os minerais hematita, jarosita, montmorilonita e cauliesmectita foram identificados através da classificação espectral. Os resultados obtidos foram considerados bastante satisfatórios, apesar da percentagem de erro da mistura ter sido alta, talvez em consequência do alto conteúdo de ruído entre 2,3 e 2,5 µm.



**Figura 3.23 - Classificação Espectral para filitos do Membro Serra da Anta. No gráfico são apresentadas as proporções minerais extraídas através da classificação espectral baseada nos parâmetros “Forma da Curva” e “Posição da Feição”, disponíveis no SIMIS.**

### **3.4-) ANÁLISE INTEGRADA DAS FEIÇÕES ESPECTRAIS ATRAVÉS DAS INTENSIDADES E POSIÇÕES DE ABSORÇÃO - ABORDAGENS QUANTITATIVA E QUALITATIVA**

Os espectros de reflectância obtidos por espectrorradiômetros de alta resolução, neste caso específico o espectrorradiômetro FieldSpec-FR, são compostos por mais de 1500 pontos espectrais distribuídos no intervalo do espectro eletromagnético entre 0,35 e 2,50  $\mu\text{m}$ . A alta dimensionalidade deste conjunto de dados forneceu informações valiosas e com um alto grau de detalhe, a respeito do comportamento espectral das rochas analisadas. Por outro lado, uma quantidade apreciável de informação redundante está contida neste conjunto de dados, o que dificulta a análise qualitativa das assinaturas espectrais, principalmente através de dados multiespectrais, que apresentam resolução mais reduzida. Neste caso, a redução do número de

amostras, ou de bandas, constitui uma forma de comparar os conjuntos de dados, onde podem ser selecionadas aquelas bandas que correspondam aos centros de bandas de determinados sensores, o que permite uma análise mais criteriosa, na medida em que permite a escolha adequada do tipo de sensor (principalmente em função da resolução espectral) para a detecção da feição de interesse.

Abordagens do ponto de vista quantitativo têm sido propostas com o objetivo de otimizar a análise espectral e principalmente de caracterizar e individualizar grupos de amostras em função de sua assinatura espectral. Através da aplicação de técnicas de estatística multivariada (cálculo de principais componentes, análise de agrupamento e discriminante) e da análise de feições de absorção associadas a espectros de rochas e solos, Galvão (1994) obteve resultados bastante satisfatórios quanto à correlação entre unidades estratigráficas distintas e à análise do comportamento espectral de solos. A análise das bandas de absorção pelo uso do contínuo confirmou os resultados obtidos a partir do segundo e terceiro eixos principais componentes de espectros escalados (Galvão, *op.cit.*)

Pontara (1998) analisou pela técnica de principais componentes os dados espectrais obtidos para filitos carbonosos provenientes das regiões de Paracatu, Luziânia e redondezas.

Através de métodos estatísticos é possível, de fato, reduzir a dimensionalidade dos dados e eliminar a redundância contida nos espectros. Por outro lado, não é possível estabelecer critérios de reconhecimento para cada grupo de amostras através de suas assinaturas espectrais típicas (através da seleção de bandas que melhor as definam), pois os resultados são apresentados em forma de escores de componentes principais. Não torna-se também possível a identificação daquelas bandas que melhor diferenciem as espécies minerais entre si. Este ponto é bastante relevante para a pesquisa desenvolvida nesta dissertação já que, a identificação (ou eleição) destes comprimentos de onda viabiliza a escolha do sensor remoto mais adequado para a detecção de algumas assinaturas espectrais.

Propõe-se então analisar as assinaturas espectrais através de suas feições de absorção. Isto é possível através da remoção dos efeitos de *background* (análise do contínuo) e da consequente quantificação destas feições. Este método é bastante utilizado na interpretação de espectros de reflectância (p.ex. Clark & Roush, 1984 e referências ali citadas) e foi anteriormente implementado automaticamente durante a classificação espectral através do SIMIS.

Considerando a sua relevância, a seguir serão descritos os aspectos envolvidos na remoção do contínuo e na seleção das bandas para análise.

### 3.4.1-) REMOÇÃO DO CONTÍNUO

Algoritmos de remoção do contínuo são frequentemente calculados com o objetivo de remover a declividade de *background* dos espectros, permitindo isolar e quantificar as intensidades das feições de absorção, incluindo aquelas sob influência da absorção atmosférica. O contínuo apresenta causas físicas pouco compreendidas, sendo frequentemente considerado como resultante da combinação de fenômenos que incluem a reflectância de primeira superfície, espalhamento múltiplo, *wings* de absorção intensos na região do ultravioleta, e absorções de materiais com assinaturas espectrais constantes (Burns, 1970; Gaffey, 1986; Pieters, 1983; Clark & Roush, 1984; Huguenin & Jones, 1986; Yon & Pieters, 1988). Conceitualmente, um contínuo pode ser descrito como uma linha reta traçada ao longo da curva espectral, que “tange” cada pico de reflectância (Figura 3.24).

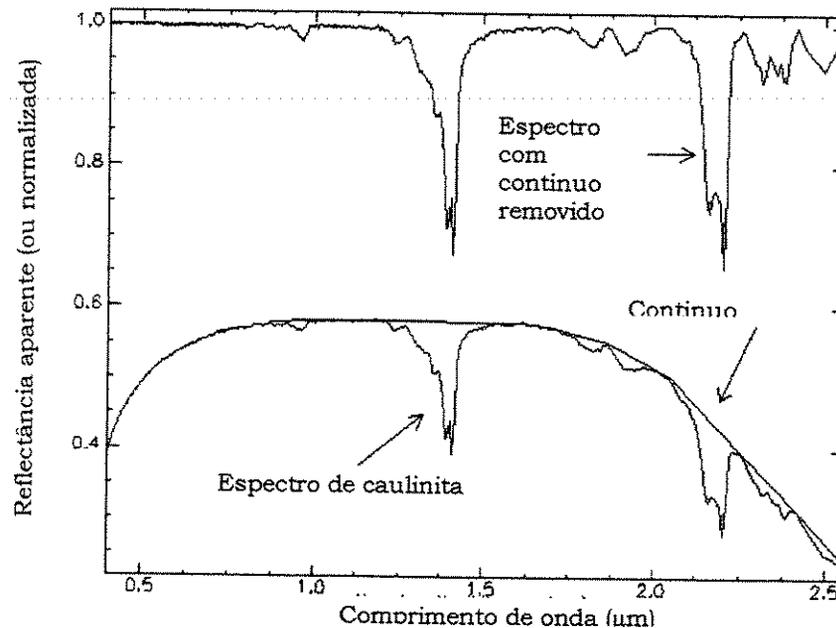


Figura 3.24 - Constituintes do espectro - contínuo ou curva de *background* e feição de absorção típica do mineral caulinita (Modificado de ENVI, 1997)

Durante este processo de remoção dos efeitos de *background*, as posições dos mínimos de reflectância dos minerais podem ser levemente deslocadas e suas intensidades podem ser quantificadas através da profundidade destas bandas, segundo a fórmula (Clark & Roush, 1984):

$$D = 1 - R_b/R_c$$

onde  $R_b$  é a reflectância no centro da banda e  $R_c$  a reflectância do contínuo, no mesmo comprimento de onda que  $R_b$ .

A profundidade pode estar relacionada à abundância do grão absorvedor, ao seu tamanho, e também à seus parâmetros de ordenamento estrutural (neste caso, a largura da banda e a forma da feição devem ser analisados em conjunto).

A maioria dos *software* destinados à análise e classificação espectral contém um módulo (algoritmo) que faz a remoção do contínuo, seja através de métodos subtrativos seja através de métodos que utilizem a razão entre o espectro e seu contínuo. De acordo com Clark (1999), em se trabalhando em reflectância ou emitância, o contínuo deveria ser removido por divisão. No caso de se utilizar apenas os coeficientes de absorção, o contínuo poderia ser removido por subtração.

Os valores das feições de reflectância dos minerais medidos pelo espectrorradiômetro FieldSpec-FR são relativos à placa de sulfato de bário (placa de referência). Desta forma, os valores de absorção obtidos são coeficientes (em percentagem, sendo 100%, a reflectância absoluta da placa), resultantes da razão reflectância da amostra/ reflectância da placa (100). A remoção do contínuo é feita portanto através de operações de subtração, como descrito anteriormente.

### **3.4.2-) SELEÇÃO DAS BANDAS – ETAPA ANALÍTICA**

As feições de absorção posicionadas próximas aos comprimentos de onda 2,2  $\mu\text{m}$  e 1,4  $\mu\text{m}$  estão presentes em todas as amostras analisadas. Estas feições são diagnósticas da presença do íon hidroxila na estrutura cristalina de alguns minerais e, sua maior ou menor intensidade está relacionada à quantidade destes minerais, no caso específico os filossilicatos. Na região do VNIR, bandas de absorção próximas a 0,6  $\mu\text{m}$  e 0,9  $\mu\text{m}$  estão presentes também em quase todas

as amostras analisadas e respondem pela presença de minerais do grupo dos hidróxidos e óxidos Hunt (1977).

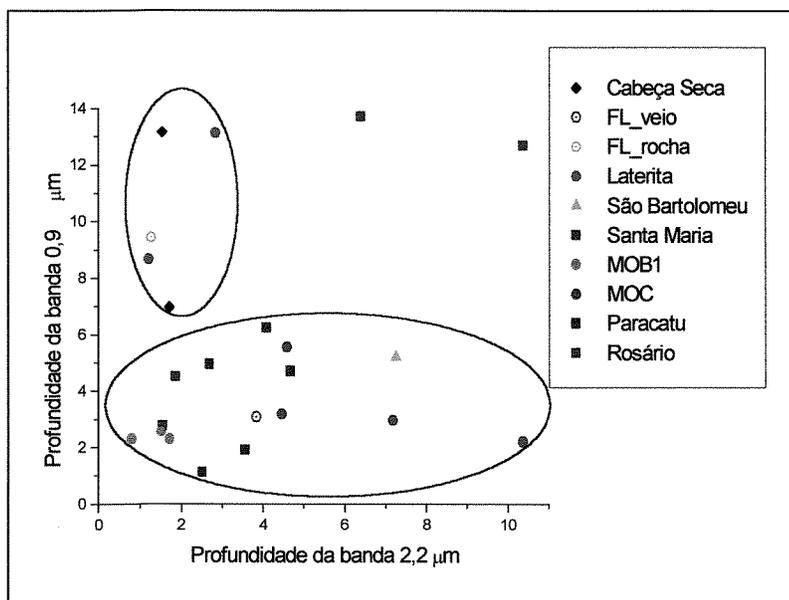
Em termos de forma das curvas espectrais características para as amostras analisadas, podem ser individualizados dois grupos: um representado pelas lateritas e outro pelas demais unidades. Considerando-se a similaridade na forma geral das curvas espectrais intergrupos, procurou-se aplicar uma metodologia que estabeleça um critério de caracterização das amostras com base nas suas intensidades de absorção em regiões específicas do espectro.

Em geral o agrupamento espectral de litologia é feito também em função de variações (deslocamentos) no comprimento de onda relativo ao centro da absorção. Se o conjunto de amostras aqui analisado contivesse litologias composicionalmente distintas, como os arenitos e folhelhos analisados por Lang *et al.* (1990), este critério deveria ser cuidadosamente analisado. No caso das amostras analisadas neste trabalho, não ocorrem variações composicionais que justifiquem a consideração deste critério como decisivo, já que apesar de haver um deslocamento discreto (da ordem de 0,009  $\mu\text{m}$ ) nas feições de absorção das amostras analisadas, em relação a 0,9  $\mu\text{m}$  e 2,2  $\mu\text{m}$ , estes deslocamentos não são típicos para nenhum conjunto de amostras.

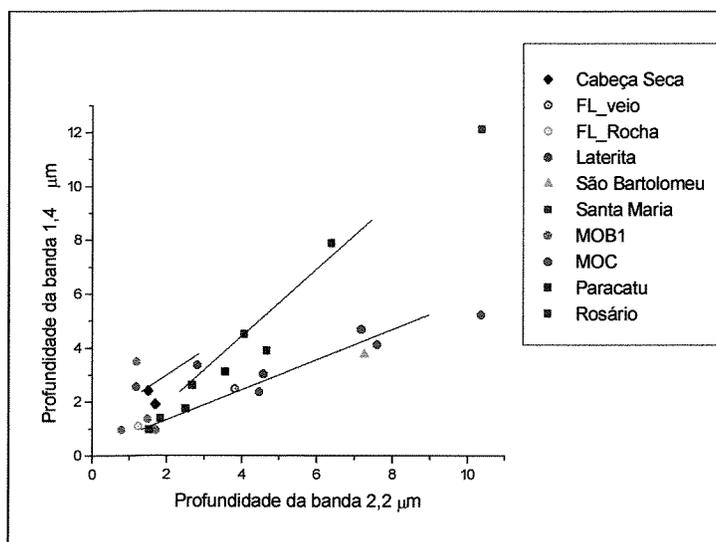
Inicialmente, estes dois grupos foram analisados através de um gráfico de dispersão XY, sendo X a profundidade de absorção da banda 2,2  $\mu\text{m}$  e Y a profundidade de absorção da banda 0,9  $\mu\text{m}$  (Figura 3.25). Dentre as combinações de bandas utilizadas (bandas 0,6  $\mu\text{m}$ , 0,9  $\mu\text{m}$ , 1,4  $\mu\text{m}$  e 2,2  $\mu\text{m}$ ), este conjunto foi o que melhor diferenciou as amostras analisadas em função de seu conteúdo em  $\text{OH}^-$  e  $\text{Fe}^{+3}$ . A banda 2,2  $\mu\text{m}$ , se substituída pela 1,4  $\mu\text{m}$ , não implicou em modificações na distribuição dos pontos no gráfico final.

Como observado na figura 3.25, as relações das profundidades das bandas em 0,9  $\mu\text{m}$  e em 2,2  $\mu\text{m}$  implica na possibilidade de separação dos grupos através da inspeção da distribuição do espaço de amostras. Para as lateritas, a intensidade das feições de absorção posicionadas em 0,9  $\mu\text{m}$  é bem maior do que aquelas posicionadas em 2,2  $\mu\text{m}$ , enquanto nas demais amostras a intensidade da feição em 0,9  $\mu\text{m}$  é bem baixa e não varia muito. Já a intensidade da feição em 2,2  $\mu\text{m}$  é variável entre as amostras, o que pode vir a constituir um critério importante para a seleção de bandas espectrais mais indicadas à individualização dos filitos analisados.

Uma segunda análise visou individualizar as amostras em função de seu conteúdo em hidroxila. Para tal, um gráfico de dispersão foi gerado, sendo X a profundidade da banda 2,2  $\mu\text{m}$  e Y a profundidade da banda 1,4  $\mu\text{m}$  (Figura 3.26).



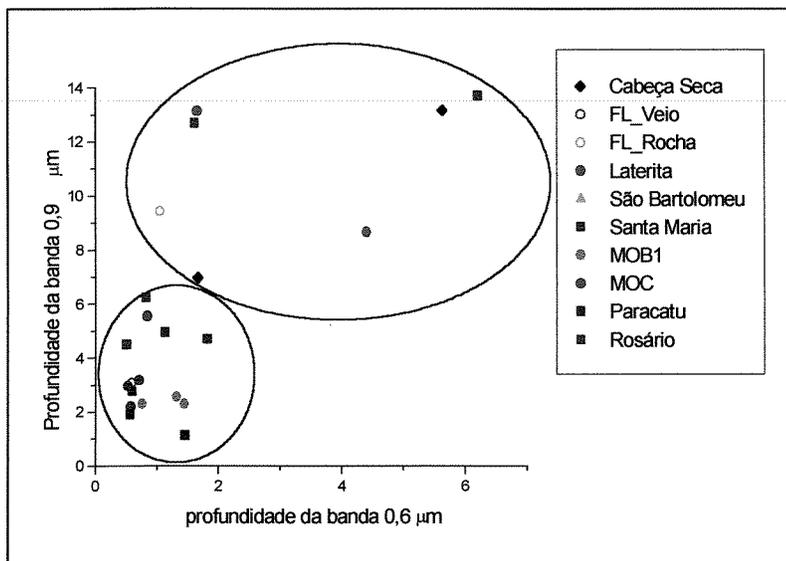
**Figura 3.25 - Relação entre as intensidades de absorção relativas a presença de  $\text{OH}^-$  e  $\text{Fe}^{+3}$  nas amostras. Os pontos relativos às intensidades destas bandas na amostra proveniente do Alvo Rosário não devem ser interpretados como “anomalias” em relação às amostras provenientes das demais localidades, considerando a pequena dimensionalidade (poucas amostras) destes dados. Esta consideração é válida para os demais gráficos de dispersão.**



**Figura 3.26 - Gráfico de dispersão relacionando as profundidades de absorção devidas à presença de minerais do grupo  $\text{OH}^-$ . As retas indicam o agrupamento das amostras.**

Três grandes grupos foram visualmente identificados quanto à quantidade de minerais contendo o íon OH<sup>-</sup>. O primeiro, com menores intensidades de absorção em 1,4 e 2,2 μm, é representado pelas capas lateríticas. O segundo grupo apresenta uma tendência linear de aumento na quantidade de argilo-minerais e filossilicatos, sendo característico para as amostras de rocha (filitos provenientes dos alvos Santa Maria, Paracatu e Fazenda Lavras). Já um terceiro grupo apresenta valores para a intensidade de absorção da banda 2,2 μm superiores àqueles obtidos para a banda 1,4 μm. Este terceiro grupo engloba as amostras de MOC e de veios provenientes da mina Fazenda Lavras.

Uma terceira análise foi conduzida para a individualização das amostras em função de seu conteúdo em minerais ricos em ferro férrico e ferro ferroso. Todas as amostras apresentam feições de absorção localizadas em 0,6 μm e 0,9 μm, indicativas da presença de óxidos e hidróxidos de ferro. Por este motivo, estas bandas foram consideradas ideais para a análise integrada das intensidades de absorção na porção VNIR do espectro. Um gráfico de dispersão foi gerado, sendo X a profundidade da banda 0,6 μm e Y a profundidade da banda 0,9 μm (Figura 3.27).



**Figura 3.27 - Gráfico de dispersão relacionando as profundidades de absorção devidas à presença de elementos de transição**

As intensidades de absorção na região do VNIR, mais especificamente para as bandas 0,6 e 0,9  $\mu\text{m}$ , são bem mais intensas para as lateritas do que para as demais amostras, devido ao seu conteúdo elevado de hidróxidos e óxidos de ferro. A única ressalva fica para a amostra proveniente do Alvo Rosário. Como observado anteriormente, além de apresentar altas quantidades de minerais do grupo  $\text{OH}^-$ , apresenta também proporções elevadas de minerais ricos em  $\text{Fe}^{+2}$  e  $\text{Fe}^{+3}$ , mas que não podem ser consideradas evidências para uma “anomalia”, dado o reduzido número de amostras.

### 3.5-) DISCUSSÃO

Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos em condição ideal (em laboratório). Em situações naturais em que se objective utilizar dados obtidos a partir de sensores remotos há que se considerar apenas as amostras coletadas em níveis mais superficiais (sua expressão superficial e assinatura espectral)

A presença de capas lateríticas características para os DTMO é o primeiro indício para a detecção deste tipo de depósito a partir de sensores remotos. Por representarem o nível de oxidação da rocha mais superficial, sua caracterização espectral torna-se bastante importante. Neste tipo de depósito, os processos lateríticos, apesar de serem de ocorrência pervasiva, ocorrem mais intensamente ao longo da zona de falha (Falha Paracatu-Vazante) que controla a mineralização aurífera de DTMO. Ao longo desta estrutura, a percolação de fluido foi mais intensa, primeiro pela maior porosidade da rocha e segundo pelo contraste no comportamento reológico das unidades lito-estratigráficas justapostas por esta estrutura (Formação Paracatu e Formação Vazante). Isto implica num aumento na proporção de sulfetos, carbonatos e filossilicatos, associados ou não à mineralização aurífera.

Uma assinatura espectral semelhante às das lateritas provenientes da Mina de Morro do Ouro foi também reconhecida na amostra proveniente do Alvo Cabeça Seca. A anomalia Cabeça Seca é controlada por uma zona de falha (na verdade, localiza-se na interseção de três *trends* estruturais NE, NW e NS) e apresenta teores altos para Au, Pb, Zn e Ag. Esta assinatura espectral pode ser considerada como um guia prospectivo para a detecção de DTMO através de

imagens de sensores remotos, pois está intimamente relacionada a atuação do intemperismo no protólito (filitos carbonosos pertencentes à Formação Paracatu).

As segregações quartzosas (*boudins*), intimamente associadas a mineralização aurífera em DTMO são caracterizadas por estreitos envelopes de alteração são constituídos por uma paragênese mineral composta por ilita, sericita, carbonato (dolomita), sulfetos (principalmente pirita), cujos produtos de alteração secundária puderam ser reconhecidos através da microscopia e da espectroscopia de reflectância. Esta paragênese, apesar de confundir-se com aquela de origem metamórfica, pode ser individualizada através da espectroscopia de reflectância, como testado nesta dissertação, com base em pequenos deslocamentos das feições de absorção próximas a 2,2  $\mu\text{m}$ . No entanto, não detectou-se nas amostras analisadas deslocamentos que individualizassem as espécies minerais em função de suas condições de formação. Em função disto, utilizou-se como parâmetro para análise, as intensidades de absorção em determinados comprimentos de onda na tentativa de individualizar grupos de amostras em função de seu conteúdo relativo de minerais dos grupo dos óxidos e hidróxidos de ferro, filossilicatos e argilominerais.

Através da análise da intensidade de absorção em 1,4  $\mu\text{m}$  e 2,2  $\mu\text{m}$  para as amostras de rocha foi possível observar que os maiores valores foram obtidos em amostras de sericita filito da Unidade C, proveniente da Mina de Morro do Ouro. Estes valores podem indicar não só variações no conteúdo de minerais hidratados, resultante dos processos diagenéticos, como também um elevado grau de cristalinidade da ilita, possível apenas sob condições de mais alta temperatura (i.e. origem hidrotermal). A análise do comportamento espectral das ilitas, principalmente em pesquisa mineral, é importante na medida que este argilo-mineral é indicativo das condições ambientais de formação de minérios. Além disto, o grau de cristalinidade deste mineral é modificado em função da temperatura, o que pode indicar a proximidade de fluidos hipo ou supergênicos (Kruse & Hauff, 1991). Sugere-se para trabalhos futuros, um detalhamento das respostas espectrais de determinadas espécies minerais que ocorrem em DTMO, como por exemplo a ilita.

É importante ainda considerar que a Unidade C posiciona-se naqueles níveis mais superficiais da Mina de Morro do Ouro, onde atuaram processos exógenos, com geração de caulinita e da ilita em detrimento de muscovita. Por este motivo, a unidade mais promissora para este tipo de análise espectral seria a Unidade MOB.

A principal implicação para a exploração mineral através de sensores remotos é a possibilidade de separar as assinaturas espectrais das unidades litológicas analisadas basicamente em função de variações na intensidade de absorção próximas a 2,2  $\mu\text{m}$ . A escolha do sensor mais adequado deve então obedecer a condição de possuir uma banda espectral com centro posicionado em 2,2  $\mu\text{m}$ .

Com relação aos resultados obtidos através da classificação espectral, observou-se que a acurácia na classificação espectral está diretamente relacionada a uma seleção adequada dos *endmembers*, que compõem a biblioteca espectral de referência, e à rotina de classificação aplicada. A implementação, nesta dissertação, de diferentes métodos de classificação espectral baseados em parâmetros distintos (estatístico - *Linear Least Square* e com base na forma da curva e intensidade da absorção) permitiu concluir que os melhores resultados foram obtidos através do segundo método (forma da curva e intensidade da absorção). O método desenvolvido por Settle & Drake (1993) foi concebido para classificações espectrais em imagens multiespectrais de baixa resolução, onde cada pixel é representado por uma mistura linear de *endmembers*. No caso de amostras de rocha ou mesmo de superfícies, compostas por diferentes tipos de materiais, a questão do tipo de mistura envolvida é mais complexa, pois não só misturas lineares estão presentes, como também aquelas íntimas. Pela questão da complexidade envolvida na classificação espectral, não é recomendável a utilização de apenas um método, mesmo que este apresente resultados aproximados e intimamente relacionados à seleção dos *endmembers*.

## ***CAPÍTULO 4 – INTEGRAÇÃO DAS INFORMAÇÕES GEOLÓGICAS E ESPECTRAIS – MODELO EXPLORATÓRIO***

---

### **4.1- APRESENTAÇÃO**

Neste capítulo serão abordados os seguintes tópicos: (i) os aspectos descritivos dos DTMO, (ii) a disponibilidade dos sensores remotos para a área e suas características (resoluções), (iii) o modelamento espectral como fonte de informação (modelamento previewal das características espectrais de rochas associadas a DTMO para diferentes resoluções) e (iv) os aspectos restritivos à utilização de sensores remotos nas regiões de Paracatu e Luziânia.

Estas informações foram obtidas através dos dados bibliográficos levantados para as áreas de Luziânia e Paracatu e dos resultados das análises espectrais apresentadas no Capítulo 3.

### **4.2 -) CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE ÁREAS PARA DTMO COM BASE EM DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Em exploração mineral, a seleção de alvos potencialmente mineralizados é condicionada a presença de feições geológicas específicas, geralmente com efeitos na superfície. Tratam-se de critérios objetivos e concretos, baseados em feições que podem ser convenientemente delineadas e medidas, não apenas conceituadas. No caso do uso de sensores remotos como ferramenta para a exploração mineral, alguns critérios, apresentados ao longo do fluxograma da Figura 4.1 tornam-se importantes, senão indispensáveis, à detecção de sítios mineralizados.

Nos itens subsequentes, estes critérios serão detalhados, tendo como estudo de caso o depósito aurífero de Morro do Ouro.

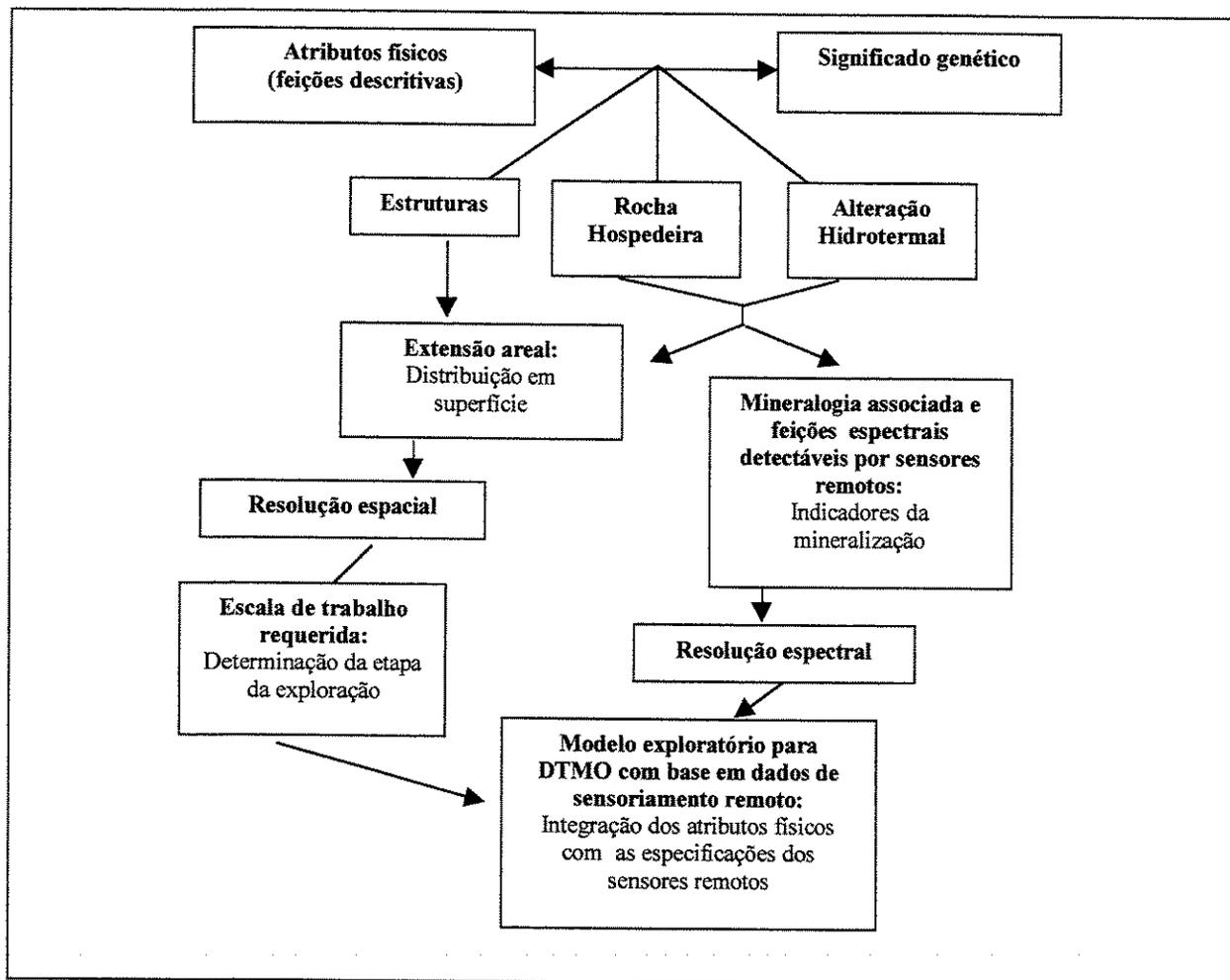


Figura 4.1 – Critérios que serão analisados e integrados de modo a compor o modelo exploratório para DTMO com base em dados de sensores remotos (nos ítems subsequentes, estes critérios serão detalhados)

#### 4.2.1 -) FEIÇÕES FÍSICAS E SEU SIGNIFICADO GENÉTICO

Para DTMO, os metalotectos da mineralização são os filitos carbonosos pertencentes a Formação Paracatu (principalmente os pertencentes ao Membro Morro do Ouro) e zonas de cisalhamento estruturadas em duplex em cujos patamares, os fluidos mineralizantes são trapeados. Num contexto mais regional, estas zonas de cisalhamento associam-se a um *trend* de estruturas (falhas de empurrão, com componente transcorrente) NW/SE denominado Falha Paracatu-Vazante, que apresenta extensão quilométrica (aproximadamente 150 Km). Além destes metalotectos, uma importante característica deste tipo de depósito é a presença de zonas de alteração hidrotermal pouco extensas, da ordem de centímetros e restritas a escala de veio. Estes

elementos geológicos são reflexo de processos genéticos gerados durante uma tectônica compressional, tendo como fonte dos fluidos a própria rocha hospedeira, cujo protólito foi identificado como sendo um folhelho negro metalífero. A ausência de alteração hidrotermal pervasiva é explicada pela questão da composição dos fluidos, quimicamente em equilíbrio com a rocha hospedeira. É importante também considerar o contexto tectônico (Faixa de dobramentos Brasília), o grau metamórfico ( fácies xisto-verde) a idade da mineralização (concomitante ao ciclo Brasileiro). Além destes aspectos é importante considerar para a exploração mineral as assinaturas geoquímicas, evidências para a detecção de áreas potenciais para ouro. Todas estas feições descritivas de DTMO de interesse a exploração mineral são apresentadas, de uma forma simplificada na Tabela 4.1

Para o sensoriamento remoto a questão mais relevante é a expressão destas feições geológicas em superfície e, para a exploração mineral, sua associação direta ou indireta com a mineralização aurífera. A integração destas informações constitui um critério-chave para o delineamento da estratégia de trabalho e da previsibilidade dos resultados que podem ser obtidos.

As feições descritivas, potencialmente detectáveis por sensores remotos, bem como os processos genéticos ao qual elas estão relacionadas são apresentados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.1 - Características geológico-exploratórias de depósitos do Tipo Morro do Ouro**

Depósitos do Tipo Morro do Ouro - Critérios exploratórios
Baixos teores médios ( $\approx 0,6$ g/t); Alta tonelagem ( $\approx 109$ Mt); Altas razões Au/Ag; Ausência de vulcanismo associado Guias exploratórios regionais: - Sedimentos ricos em matéria carbonácea (siltitos/filitos/arenitos); - Tectônica convergente (falhas de empurrão); - Faixas móveis de dobramento Guias exploratórios locais: - Rochas hidrotermalmente alteradas (assembléia sericita - quartzo - sulfetos - carbonatos); - Estruturas menores relacionadas a uma deformação mais intensa ao longo da zona de falha; - Ocorrência generalizada de <i>boudins</i> de quartzo; - Teores anômalos de As + (Ag + Cu + Pb + Zn); - Crostas e/ou solos lateríticos auríferos;

**Tabela 4.2 - Feições descritivas X explicação genética de DTMO**

FEIÇÃO	SIGNIFICADO GENÉTICO
<b>Rochas</b>	
- Quartzo-sericita filitos carbonosos (protólito: Folhelho negro metelífero)	- Fonte dos fluidos mineralizantes
<b>Estruturas</b>	
- Falhas de baixo ângulo	- Conduitos dos fluidos
<b>Mineralização e alteração</b>	
- Disseminada (em filito “anômalo” e nos boudins de quartzo)	- Ouro contido na rocha e remobilizado através de processos hidrotermais
- Ao longo do perfil de intemperismo	- Enriquecimento secundário

#### **4.2.2 -) EXTENSÃO AREAL vs RESOLUÇÃO ESPACIAL**

A escala de exploração relaciona-se à cobertura areal oferecida pelo sensor, à expressão superficial das feições físicas do depósito e ao nível de detalhamento da geologia da área. Para DTMO objetiva-se analisar a extensão areal da unidade litológica hospedeira da mineralização, das estruturas relacionadas e das zonas de alteração hidrotermal.

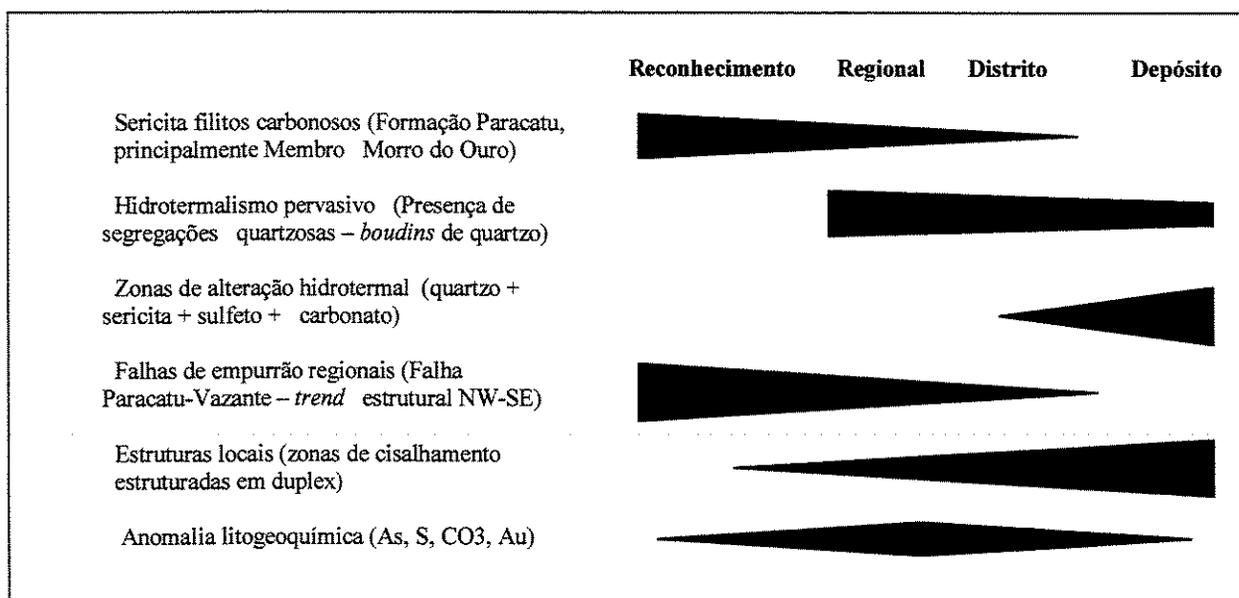
Spatz (1996) subdividiu as etapas de exploração em quatro categorias em função da escala de trabalho, correlacionando-as à resolução espacial requerida para o sensor (Tabela 4.3): (i) etapa de reconhecimento (resolução espacial entre 20 e 80 m); (ii) etapa regional (resolução espacial entre 10 e 30 m), (iii) etapa de distrito ou local (resolução espacial entre 6 e 10 m), e (iv) etapa de depósito/prospecto (resolução espacial entre 3 e 7 m).

Em Hodgson *et al.* (1982) os critérios de seleção de áreas para depósitos auríferos na Província Superior do Canadá foram relacionados à escala de exploração. Baseando-se nesta proposta e nas resoluções espaciais definidas por Spatz (*op.cit*), na Tabela 4.4 são apresentados critérios de seleção de áreas potenciais para mineralizações auríferas do tipo Morro do Ouro, em termos da escala de trabalho requerida (escalas regional, de distrito e de depósito) e da resolução espacial adequada.

**Tabela 4.3 - Etapas de exploração vs resolução espacial adequada à identificação de depósitos minerais (Spatz,1996)**

Etapas	Descrição	Cobertura areal (Km <sup>2</sup> )	Escala	Resolução Espacial
Reconhecimento	Exploração expedita numa área vasta	5.000 – 20.000	Pequena 1:100.000 – 250.000	20 - 80
Regional	Exploração numa província mineral conhecida	500 – 5.000	Intermediária 1:24.000	10 – 30
Distrito	Exploração e mapeamento num distrito mineiro ou centro hidrotermal	10 – 500	Grande 1:12.000	6 – 10
Depósito	Mapeamento de detalhe (durante a fase de pesquisa)	0,1 - 10	Muito grande 1:1.200 - 2.400	3 - 7

**Tabela 4.4 - Critérios de seleção de áreas para diferentes escalas de trabalho/resoluções espaciais. Procurou-se também correlacionar a importância dos diferentes critérios com o tamanho do alvo durante as diferentes etapas de exploração (modificado de Hodgson *et al.*, 1982).**



#### 4.2.3 -) ASSEMBLÉIAS MINERAIS vs RESOLUÇÃO ESPECTRAL

A posição das bandas e as resoluções espectrais dos sensores são considerações importantes quando da elaboração da estratégia de trabalho e da seleção dos métodos de análise dos dados (Spatz, 1996). De modo geral, quanto menor a área e maior o nível de detalhe requerido para sua investigação, maiores serão os requerimentos em termos de resolução espectral do sensor.

Na Tabela 4.5 são apresentadas as feições mais superficiais associadas a DTMO e os intervalos espectrais adequados à sua detecção.

**Tabela 4.5- Feições típicas de DTMO detectáveis nas regiões do VNIR e SWIR (baseado em Spatz, 1996)**

	Intervalo Espectral ( $\mu\text{m}$ )	Feições detectáveis	Aplicações para depósitos auríferos do Tipo Morro do Ouro
Visível	0,40 - 0,50	Água	Realça os <i>pits</i> das minas e os traços de falhas
	0,50 - 0,60	Água, vegetação	Realça os <i>pits</i> das minas e os traços de falhas
	0,60 - 0,70	Óxidos e hidróxidos de ferro; individualiza solos de rochas; Lineamentos	Goetita e hematita (laterita) resultantes do intemperismo dos sulfetos (em grande parte pirita), comum nos veios de quartzo e na paragênese metamórfica das rochas hospedeiras. Áreas de ocupação humana (cidades e atividades agrícolas); estruturas ( <i>trends</i> de estruturas NW, NE).
Infravermelho Próximo	0,70 - 0,80	Vegetação	Não apresenta relações com a mineralização aurífera
	0,80 - 1,10	Vegetação e hidróxidos de ferro	Neste intervalo espectral, a feição de absorção relacionada à presença de minerais do grupo dos hidróxidos de ferro será mascarada pela presença de vegetação
Infravermelho de ondas curtas	1,50 - 1,80	Estruturas	<i>Trends</i> de estruturas NW, NE
	2,10 - 2,20	Caulinita (com mistura de esmectita)	Alteração argílica, típico de níveis mais avançados de intemperismo.
	2,20 - 2,30	Sericita, ilita	Alteração hidrotermal associada aos veios de quartzo (em zonas de cisalhamento), alteração argílica supergênica.
	2,30 - 2,40	Muscovita + ilita	Representa a desestabilização da muscovita, presente na paragênese metamórfica em detrimento do argilo-mineral ilita, ao longo do perfil de intemperismo
Termal	8,75 - 9,3	Quartzito, sílica	Identifica zonas de silicificação, sedimentos silicosos e quartzitos.

#### **4.2.4-) ESCOLHA DOS SENSORES PARA AVALIAÇÃO**

Na Tabela 4.6 são apresentadas as especificações de alguns sensores comerciais multiespectrais orbitais e de um hiperespectral. Encontram-se também relacionadas as etapas de exploração adequadas para cada tipo de sensor.

#### **4.2.5-) MODELAMENTO ESPECTRAL**

O modelamento das características espectrais de rochas para diferentes resoluções é útil para a comparação entre as diferentes respostas espectrais de sensores destinados à etapas distintas de exploração mineral. Este procedimento é realizado através de funções de filtro, calculadas a partir das curvas de respostas dos diferentes sensores, seguidas pela normalização

**Tabela 4.6 - Especificação de alguns sensores comerciais multispectrais e de um hiperespectral, e a etapa de exploração a qual se destinam.**

Sensor	Resoluções		Etapa de Exploração
	Espectral	Espacial	
TM	4 bandas no VNIR 2 bandas no SWIR 1 banda no TIR	30 m no VNIR e SWIR 120 m no TIR	Reconhecimento e Regional
SPOT	4 bandas no VNIR	20 m 10 m na banda pancromática	Regional e Distrito
ASTER	3 bandas no VNIR 6 bandas no SWIR 5 bandas no TIR	15 m no VNIR 30 m no SWIR 90 m no TIR	Reconhecimento e Regional
AVIRIS	224 no VNIR e SWIR	20 m	Regional e Distrito (levando-se em consideração a resolução espectral)

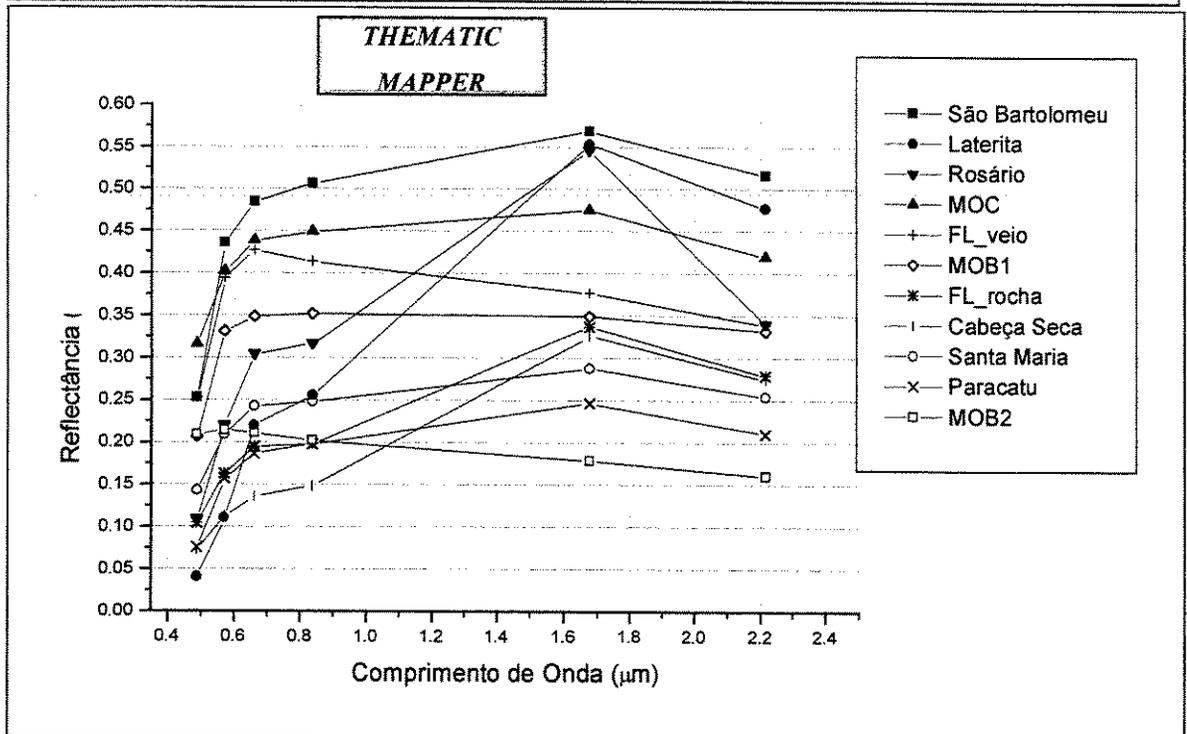
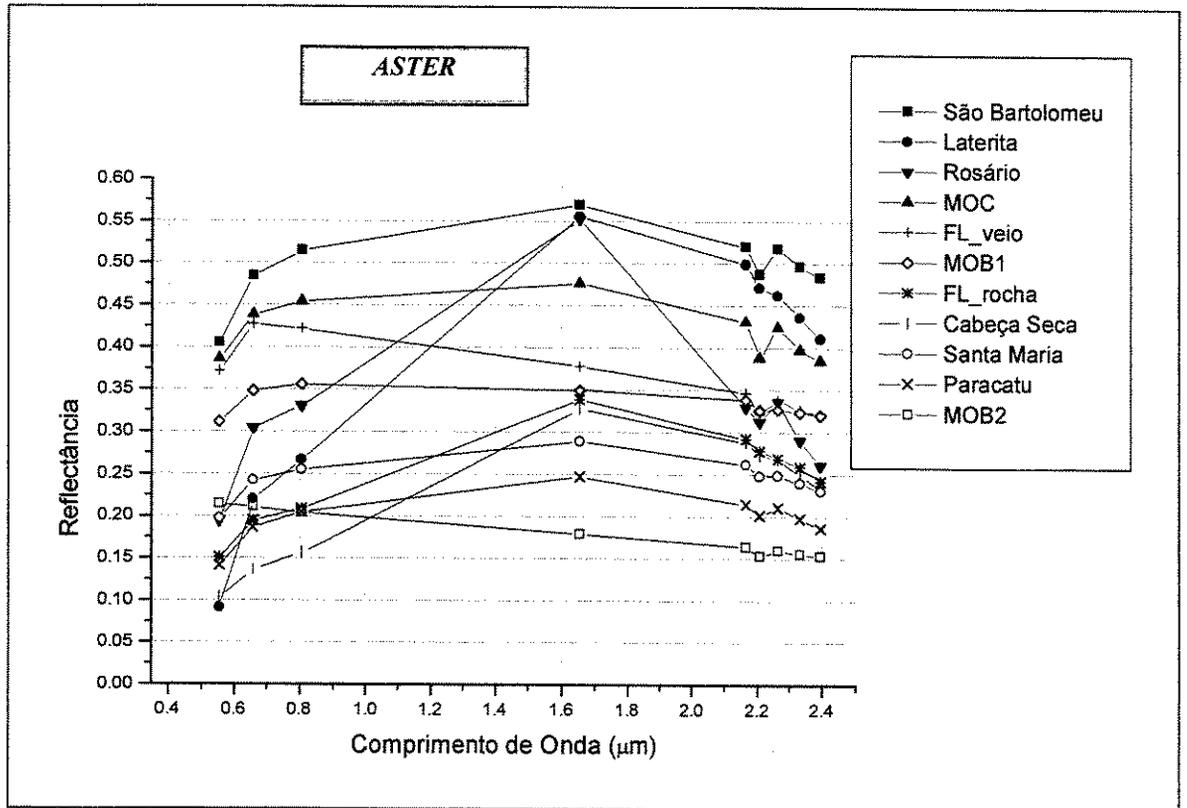
forma, os valores de reflectância recalculados para as diferentes resoluções não são absolutos. Denomina-se de pseudo-espectro a curva espectral “teórica” modelada.

Este procedimento é realizado através de cálculos matemáticos, onde a espessura de banda é resultante da soma dos quadrados das espessuras da feição e do espectrômetro:

$$E_m = (E_f^2 + E_s^2)^{0,5}$$

onde,  $E_m$  é a espessura da banda medida;  $E_f$ , a espessura da feição e  $E_s$  a espessura da banda do espectrômetro.

Na Figura 4.2 são apresentadas as curvas espectrais das amostras de filitos pertencentes à Formação Paracatu (provenientes de diferentes localidades), interpoladas para as resoluções espectrais dos sensores ASTER e TM. Apesar deste procedimento reduzir sobremaneira a separabilidade dos espectros, há uma pequena variação em termos de percentagem relativa de reflectância e de intensidade de algumas bandas espectrais, o que permite a discriminação entre as unidades em função de seu conteúdo mineral, até mesmo através de sensores de baixa resolução espectral, como o TM.



**Figura 4.2 - Comparação entre as curvas reamostradas para a resolução dos sensores multiespectrais ASTER e TM**

Nota-se que apesar de composicionalmente semelhantes, as amostras apresentam diferenças espectrais bem marcadas, relacionadas às variações em termos de proporções relativas das espécies minerais (à sua frequência relativa de ocorrência) e às diferenças no albedo, que serão expressas como valores de brilho dos pixels da cena.

O maior número e o melhor posicionamento das bandas TM na região do VNIR em relação às do ASTER permite mapear aquelas feições espectrais típicas de minerais do grupo dos óxidos e hidróxidos. Por outro lado, na região do SWIR, o sensor ASTER apresenta uma melhor resolução espectral, com seis bandas, capazes de distinguir entre espécies minerais como os argilominerais, os filossilicatos e os sulfatos. A distinção entre estes grupos e entre os minerais que os constituem torna-se bastante importante para a prospecção de DTMO, considerando-se que as proporções entre os argilominerais e os filossilicatos neste tipo de depósito são muito altas e destoam do contexto geológico regional. A distinção entre as unidades analisadas nesta dissertação através do ASTER é viável, como observado na figura 4.2, em função não só das feições de absorção como também daquelas de reflectância. Neste último caso, a alta reflectância na banda 4 (centro posicionado em 1,65  $\mu\text{m}$ ) é típica para as lateritas e rochas mais superficiais. A individualização destes dois grupos é possível a partir de operações aritméticas de razão ou diferença entre esta banda e a banda 1, por exemplo. Os maiores valores são relativos às lateritas.

Quanto às feições de absorção que são detectadas através do sensor ASTER, pode-se individualizar quatro bandas espectrais, capazes de diferenciar/mapear as unidades analisadas (Tabela 4.7).

As feições absorção mais sutis podem ser realçadas através de operações aritméticas, conforme o interesse da pesquisa.

Ao contrário do sensor ASTER, através do sensor TM não é viável a detecção das feições espectrais de absorção diagnósticas para os filitos Morro do Ouro e Serra da Anta, principalmente pela ausência de uma banda bem definida próxima a 2,2  $\mu\text{m}$ . Esta restrição indica que o melhor critério para o mapeamento destas rochas através do TM é a forma da curva, onde todas as feições espectrais e as variações de albedo presentes podem ser detectadas. Da mesma forma que para o ASTER, observa-se nas curvas espectrais interpoladas para a resolução TM uma alta reflectância na banda 5 para as lateritas e para os filitos posicionados em níveis mais superficiais.

**Tabela 4.7 - Feições espectrais e minerais presentes na paragênese dos filitos carbonosos pertencentes aos Membros Morro do Ouro e Serra da Anta, potencialmente detectáveis através do sensor ASTER.**

<b>Bandas / Centros das bandas (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Minerais típicos de DTMO que podem ser detectados</b>	<b>Aplicação na individualização das unidades analisadas</b>
B03 – 0,82	Limonita, goetita, hematita	Rochas mais superficiais e as laterita apresentam uma feição de absorção nesta banda.
B06 – 2,205	Minerais com a ligação Al-OH em sua estrutura cristalina: Muscovita, montmorilonita, caulinita	Diferenciação entre os filitos (em função do nível intempérico) Morro do Ouro e Serra da Anta e entre eles e as lateritas.
B08 – 2,33	Minerais com a ligação Fe-OH em sua estrutura cristalina: Ilita com ferro, jarosita	Filitos (não há distinção entre os membros) e laterita
B09 – 2,395	Mistura entre muscovita e ilita	As rochas com maior quantidade de minerais de ferro e as lateritas apresentam uma queda de reflectância mais pronunciada da banda 7 em direção a banda 9, em comparação com aquelas unidades mais preservadas dos efeitos intempéricos.

#### **4.3-) INTEGRAÇÃO DOS DADOS: FEIÇÕES OBSERVÁVEIS vs FEIÇÕES DETECTÁVEIS POR SENSORES REMOTOS**

Para o caso específico de DTMO, sensores multiespectrais como o Landsat-TM são potencialmente capazes de (i) identificar as estruturas regionais (como a Falha Paracatu-Vazante e *trends* de estruturas NE e NW), (ii) individualizar a porção mineralizada em ouro da Formação Paracatu e (iii) detectar feições espectrais associadas à processos supergênicos (capas lateríticas e presença de quantidades anômalas de argilo-minerais). Sensores com melhor resolução espectral no SWIR, principalmente aqueles com bandas estreitas na região do espectro em torno de 2,2  $\mu\text{m}$  (como o ASTER e FUYO) oferecem subsídios à distinção entre os filitos em função da quantidade relativa de argilominerais e filossilicatos. Já sensores hiperespectrais (como o AVIRIS) alcançariam um alto nível de detalhamento, permitindo mapear as distribuições de minerais distintos, inclusive seus polimorfos. Sensores com bandas espectrais posicionadas na região do infravermelho termal oferecem subsídios ao mapeamento de zonas com maior concentração de veios de quartzo (hidrotermalismo pervasivo), feição típica de DTMO.

Sensores com melhor resolução, tanto espectral quanto espacial, ofereceriam portanto a possibilidade de um maior detalhamento quanto à distribuição espacial das unidades denominadas A, B, C e D<sup>1</sup>, na mina de Morro do Ouro.

---

<sup>1</sup> Sendo B e C, o minério lavrável a teores da ordem de 0,5 g/t

Na Tabela 4.8 são listadas as feições geológicas superficiais de DTMO, por intervalo espectral (nas regiões do VNIR e SWIR), potencialmente detectáveis através de sensores remotos.

Tabela 4.8- Requerimentos espectrais e espaciais para a detecção de DTMO através de sensores remotos (baseado em Spatz, 1996)

CARACTERÍSTICA	DESCRIÇÃO	INTERVALO ESPECTRAL (µm)				RESOLUÇÃO ESPACIAL (metros)	
		MULTIESPECTRAL		HIPERESPEC	RECONHEC.	ESCALA DE DEP.	
		TODOS	ASTER (BANDA)				TM (BANDA)
Alteração Primária (*)	Sulfetos (pirita), sericita e (pouco) carbonato associados a veios de quartzo estreitos, mas de grande extensão	2,15 - 2,35; 9,5 - 10,5	6	5, 7	2,20; 9,7	10 - 30	3 - 7
Alteração Secundária	Laterização, formação de argilominerais (caulinita, illita e smectita)	0,5 - 0,7; 0,8 - 1,0; 2,2 - 2,5	1, 2, 3, 6, 7, 8, 9	1, 2, 3, 5, 7	0,5; 0,6; 0,85 0,95; 2,20; 2,35, 2,45	10 - 30	3 - 7
Rochas Hospedeiras	(quartzo)-sericita filitos carbonosos (*)	2,2 - 2,5	Banda que melhor distingue entre os litotipos: 6	5, 7	0,67 - 0,9	20 - 80	3 - 7
Zoneamento (**)	Ateração filica, propilítica (ilita com maior grau de cristalinidade - illita menos ordenada)	2,2 - 2,5	6, 7, 8, 9	5, 7	2,20	10 - 30	3 - 7
Estrutura	Falhas de empurrão constituindo <i>trends</i> NW e NE. Zonas estruturadas em duplex (**)	SWIR, TIR, VNIR, microondas	Todas	Todas (em especial 3, 5)	TIR	20 - 80	5 - 8
Vegetação	Não há relação espacial entre o tipo de vegetação e o tipo de mineralização.						

(\*) A alteração é pouco intensa e de extensão areal limitada. As anomalias são sutis e demandam aplicação de técnicas de realce mais sofisticadas além da utilização de múltiplos indicadores para sua detecção

(\*\*) Escala de depósito

(\*) Rocha oxidada

(\*\*\*) A relação espacial entre os minerais de alteração não está bem definida

## ***CAPÍTULO 5 - PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM: APLICAÇÃO PRÁTICA DO MODELO EXPLORATÓRIO PARA DTMO***

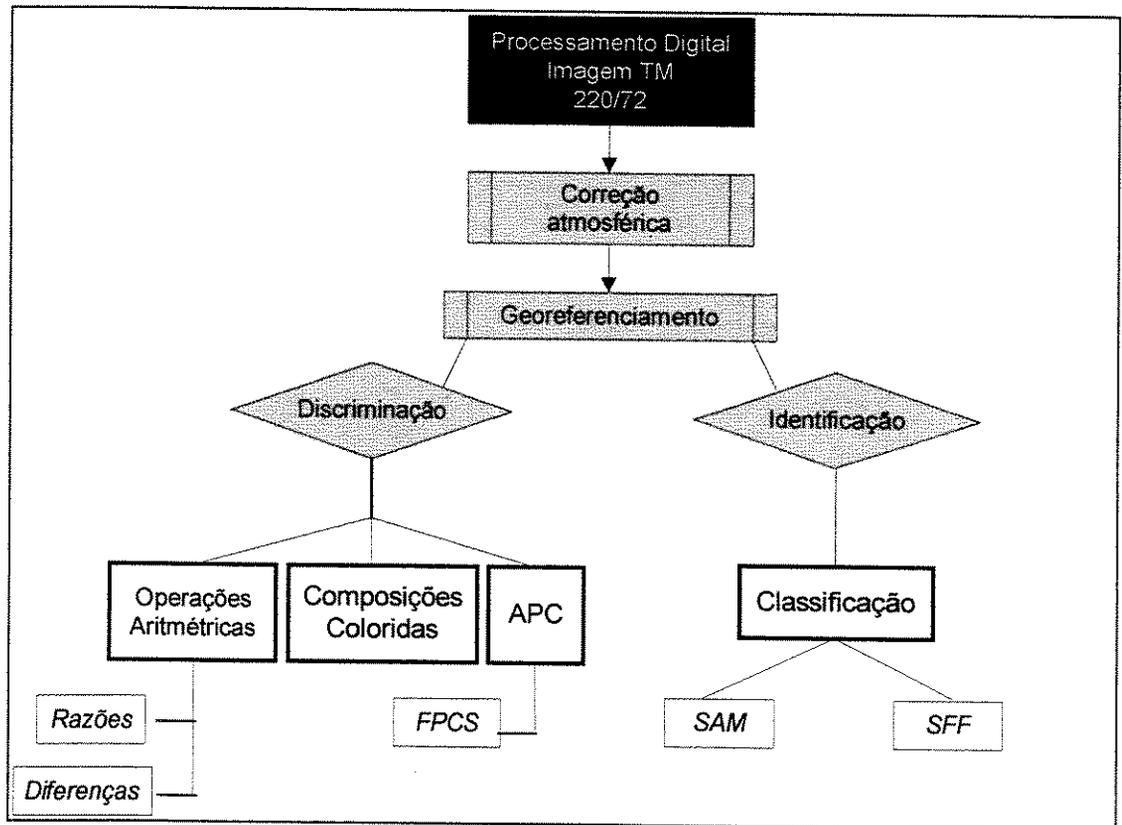
---

### **5.1-) INTRODUÇÃO**

A utilização de técnicas de processamento digital de imagens permite a análise de extensas áreas e a obtenção de resultados rápidos e precisos. Os dados orbitais oferecem uma cobertura sinóptica e repetitiva da superfície terrestre, numa escala regional ou global. A integração de dados espectrais, obtidos através de espectrorradiômetros de campo, com os dados orbitais obtidos pelo sensor TM, constitui uma importante fonte de informação. Este procedimento vem sendo utilizado não só com o intuito de aumentar a capacidade de detecção das assinaturas espectrais dos diferentes materiais superficiais que compõem os pixels da imagem, como também de caracterizar em detalhe estas assinaturas.

Neste capítulo, serão utilizados os critérios espectrais estabelecidos para a prospecção de DTMO com base no modelo exploratório descrito anteriormente

O tratamento dos dados TM foi implementado em etapas distintas (Figura 5.1). Após as etapas de pré-processamento, que incluíram a correção atmosférica e o georreferenciamento da imagem, foram aplicadas metodologias destinadas ao realce e discriminação litológica (seleção de atributos, composições coloridas, operações aritméticas entre bandas e análise por principais componentes). Numa etapa posterior, foram aplicadas metodologias destinadas a classificação espectral da imagem, com base nas assinaturas espectrais das rochas analisadas (*endmembers*) e a desmistura espectral dos pixels da imagem. Os resultados obtidos através destes diferentes procedimentos, implementados nas duas etapas de processamento, serão comparados com o intuito de testar a credibilidade, eficácia e vantagens de cada método no reconhecimento de atributos físicos relacionados à DTMO.



**Figura 5.1-** Estratégia utilizada no processamento dos dados TM (Sendo APC = Análise por principais componentes; FPCS = Feature-Oriented Principal Component Selection; SAM = Spectral Angle Mapper; SFF = Spectral Feature Fitting). As descrições de cada etapa encontram-se no texto a seguir.

## 5.2-) METODOLOGIA

As etapas iniciais de processamento dos dados espectrais da cena consistem em corrigir distorções e interferências que podem estar presentes nos dados digitais. Estas imperfeições podem ser causadas por variações na altitude, velocidade da plataforma do sensor e por fatores como distorção panorâmica, curvatura da Terra, efeitos atmosféricos, problemas de calibração dos detetores, dentre outras.

A seguir serão apresentadas os aspectos teóricos envolvendo apenas os métodos de correção atmosférica e geométrica, que foram aplicados na imagem TM utilizada neste estudo.

A estratégia de processamento das imagens digitais iniciou-se com técnicas de realce simples (composições coloridas, operações aritméticas de bandas) e de realce de diferenças

espectrais mais sutis (técnicas envolvendo principais componentes) tendo sido estendida para métodos mais sofisticados, envolvendo a classificação espectral.

O objetivo foi o de dividir o processamento digital em duas etapas básicas: discriminação e identificação litológica (Swalf *et.al.* 1999).

### **5.2.1-) CORREÇÃO ATMOSFÉRICA - CONVERSÃO DOS DADOS TM DE DN PARA REFLECTÂNCIA REAL**

Os padrões de resposta espectral são influenciados tanto por efeitos temporais e espaciais quanto pela atmosfera. A atmosfera modifica a radiação solar refletida pela superfície da Terra de várias formas. Ela acrescenta um sinal independente da superfície (*path radiance*) e absorve alguma fração da radiação por ela refletida.. O espalhamento atmosférico (do tipo Rayleigh e aerosols) modifica a radiação de áreas adjacentes, com diferentes reflectâncias (efeito adjacente).

Aproximadamente metade da região do espectro refletido entre 0,4 e 2,5  $\mu\text{m}$  é afetada por absorções de gases atmosféricos. Desta forma, a implementação da correção atmosférica permite comparar os valores de reflectância extraídos dos pixels da imagem com espectros de reflectância medidos na superfície. Além disso, permite suprimir os dados espúrios, que muitas vezes podem mascarar possíveis anomalias.

A correção atmosférica da imagem Landsat-TM foi realizada utilizando-se o algoritmo SCORADIS (Sistema de Correção Radiométrica de Imagem de Satélite) (Zullo, 1996). Este algoritmo baseia-se no modelo 5S (*Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire*) de transferência radiativa da atmosfera de Tanré *et al.* (1990), para a correção de imagens compostas por bandas espectrais situadas entre 0,35 e 2,5  $\mu\text{m}$ .

O programa SCORADIS faz a estimativa e o cálculo da radiação difusa e da atmosfera. Os parâmetros utilizados pelo modelo neste trabalho foram: dados de entrada referentes ao modelo atmosférico de componentes gasosos (o conteúdo de ozônio foi obtido a partir da tabela proposta por London *et al.*,1976), ao tipo e concentração de aerosols (continental, na região de Paracatu), além de outros dados internos no sistema (tais como condições espectrais das bandas do satélite e os coeficientes de calibração). O programa calcula também as condições geométricas de iluminação e de observação pelo satélite.

### 5.2.2-) CORREÇÃO GEOMÉTRICA

Este procedimento destina-se ao georeferenciamento dos pixels da imagem para uma projeção cartográfica condizente com a base cartográfica utilizada. A correção é efetuada através da identificação de pontos de controle no terreno extraídos desta base.

Inicialmente efetuou-se o corte da imagem TM e, em seguida as seis bandas do espectro refletido foram georreferenciadas utilizando-se 30 pontos de controle (*Ground Control Points - GCPs*) obtidos na superfície do terreno, a partir da Folha Paracatu, através do método do vizinho mais próximo (*Nearest Neighbour*).

A imagem final, denominada “Cena Paracatu”, contém a mina de Morro do Ouro em sua porção sudeste, estando limitada pelas coordenadas UTM descritas na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1 - Coordenadas UTM dos pontos superior esquerdo e inferior direito que limitam a cena Paracatu**

Coord UTM	Ponto Superior Esquerdo	Ponto Inferior Direito
	253091,26 E	310752,16 E
	8184956,01 N	8071061,46 N

### 5.2.3-) SELEÇÃO DOS ENDMEMBERS

A análise dos espectros de laboratório resultou na seleção de dez *endmembers* (cinco para o Membro Morro do Ouro e cinco para o Membro Serra da Anta). Estes *endmembers* representam as curvas espectrais (assinaturas espectrais) dos filitos sericíticos e carbonosos destas unidades, sob condições que vão desde a ausência de intemperismo a um intenso processo de laterização (auge do intemperismo). Destes dez *endmembers*, sete estão contidos na cena Paracatu e, destes sete, apenas cinco representam a expressão destas unidades em superfície (Tabela 5.2 e Figura 5.2), motivo pelo qual foram selecionados para fins de análise através do sensor TM.

A metodologia apresentada a seguir para o processamento da imagem procurou então realçar, discriminar e identificar as assinaturas espectrais das rochas analisadas que podem ser reconhecidas na imagem TM 220/072 (Figura 5.3).

IMAGEM TM 220/072	
ENDMEMBERS SELECIONADOS	
	MOC
	LATERITA
	PARACATU
	FAZENDA LAVRAS (ROCHA)
	FAZENDA LAVRAS (VEIO)

Tabela 5.2 - Endmembers selecionados, contidos na imagem Landsat-TM

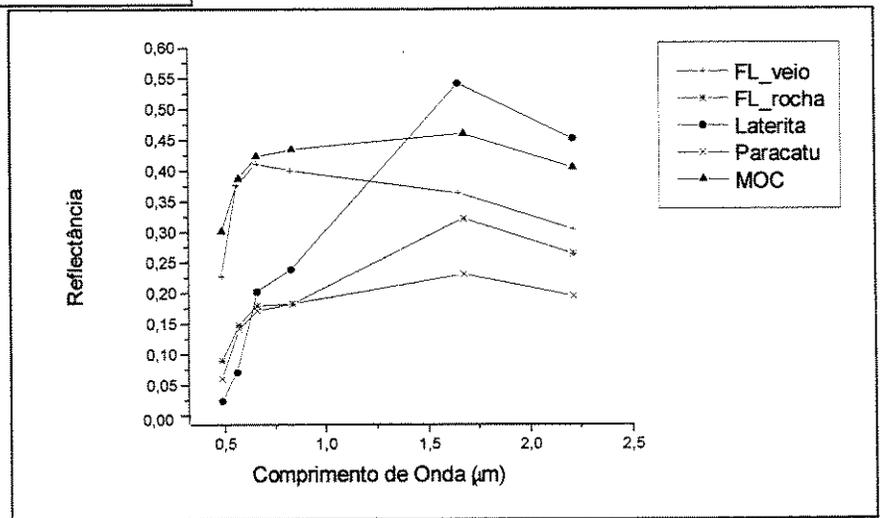
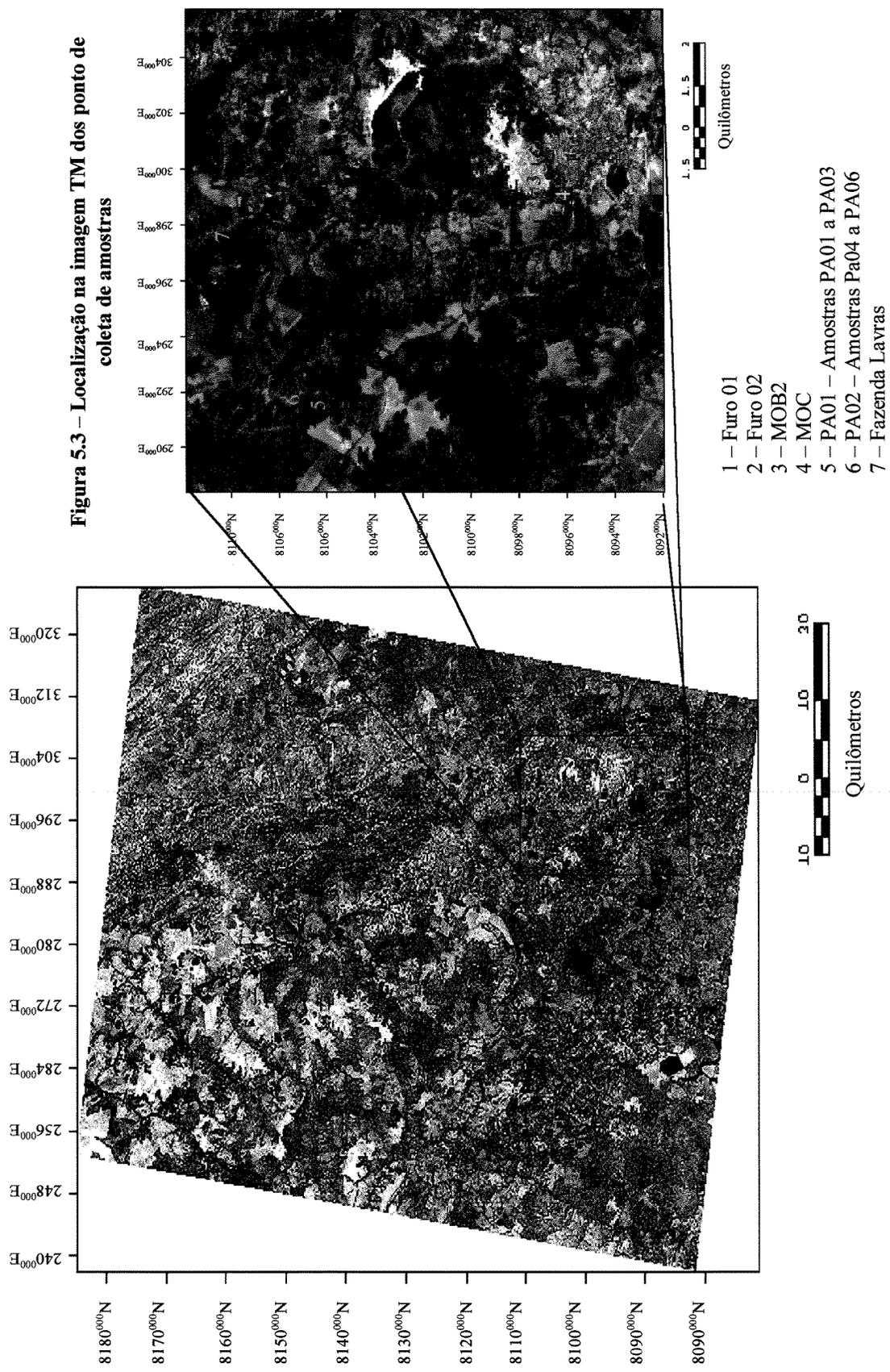


Figura 5.2 - Curvas espectrais dos endmembers (interpoladas para a resolução do TM) selecionados para análise através de técnicas de processamento digital de imagens.

#### 5.2.4-) ETAPA I - DISCRIMINAÇÃO LITOLÓGICA NA CENA PARACATU

##### 5.2.4.1-) REALCE DE CONTRASTE

Inicialmente, as seis bandas TM foram submetidas a um realce de contraste através da técnica BCET (*Balance Contrast Enhancement Technique* - Guo, 1991). Este contraste é definido por uma função parabólica ou cúbica capaz de equalizar os intervalos de valores e de médias para quaisquer conjuntos de bandas multiespectrais, sem que as formas básicas dos histogramas das imagens sejam alterados. A tabela 5.3 apresenta os valores estatísticos obtidos para a imagem TM, antes e depois da aplicação da BCET.



**Tabela 5.3 - Estatística da Cena Paracatu 2938x3808 TM**

Banda	Imagem de entrada					Imagem de Saída				
	Mín	Máx	Média	DP		Mín	Máx	Média	DP	
1	0,031	1	0,271	0,019		0,027	1	0,430	0,206	
2	0,035	1	0,129	0,018		0,023	1	0,429	0,208	
3	0,047	0,984	0,179	0,044		0,015	1	0,430	0,214	
4	0,031	0,549	0,206	0,035		0,004	1	0,442	0,182	
5	0,003	1	0,468	0,119		0,008	1	0,442	0,204	
7	0,003	1	0,158	0,055		0,012	1	0,439	0,210	

#### 5.2.4.2-) COMPOSIÇÕES COLORIDAS

A confecção de imagens resultantes de composições coloridas de três bandas constitui um procedimento fácil de ser implementado e eficaz no reconhecimento de assinaturas espectrais indicativas da presença de vegetação, solos e rochas. Apesar de simples, este procedimento necessita de um conhecimento preliminar das características espectrais das feições superficiais, assim como das especificações do sensor utilizado.

A escolha das bandas espectrais a serem utilizadas em composições coloridas pode ser feita qualitativamente, com base nas propriedades de reflectância espectral conhecidas das rochas e solos em função das bandas TM ou quantitativamente, através de métodos estatísticos baseados na correlação entre bandas. Neste estudo a análise foi conduzida da seguinte forma: as bandas foram selecionadas com base nas propriedades espectrais das rochas pertencentes à Formação Paracatu, analisadas no Capítulo 3. Os valores dos picos de reflectância e absorção foram extraídos da curva espectral interpolada para a resolução do TM. A seguir, foram escolhidos os tripletes compostos por bandas posicionadas no SWIR e no VNIR, permitindo mapear feições tanto de origem eletrônica como vibracional. Para evitar informações redundantes, uma matriz de correlação foi calculada para todas as bandas TM, a partir das “curvas modeladas” (Tabela 5.4).

A matriz de correlação indica que as bandas TM1, TM2 e TM3, na porção visível do espectro, são altamente correlacionadas, sendo sua informação redundante. As bandas TM5 e TM7 apresentam a correlação mais alta do conjunto de dados (99%). A menor correlação foi obtida entre as bandas TM5 e TM2 (11%), TM5 e TM1 (18%) e TM7 e TM2 (19%).

Com base nestas informações, os tripletes RGB752 e RGB751 foram selecionados. A composição RGB751 apresentou um resultado final bastante satisfatório no mapeamento das unidades carbonosas pertencentes ao Membro Morro do Ouro (Figura 5.4). Meneses *et al.* (1993)

utilizaram a composição colorida RGB572 para a mesma cena, e também consideraram seus resultados como satisfatórios no realce dos filitos pertencentes ao Membro Morro do Ouro.

**Tabela 5.4 - Matriz de correlação para as bandas TM obtidas a partir da análise espectral**

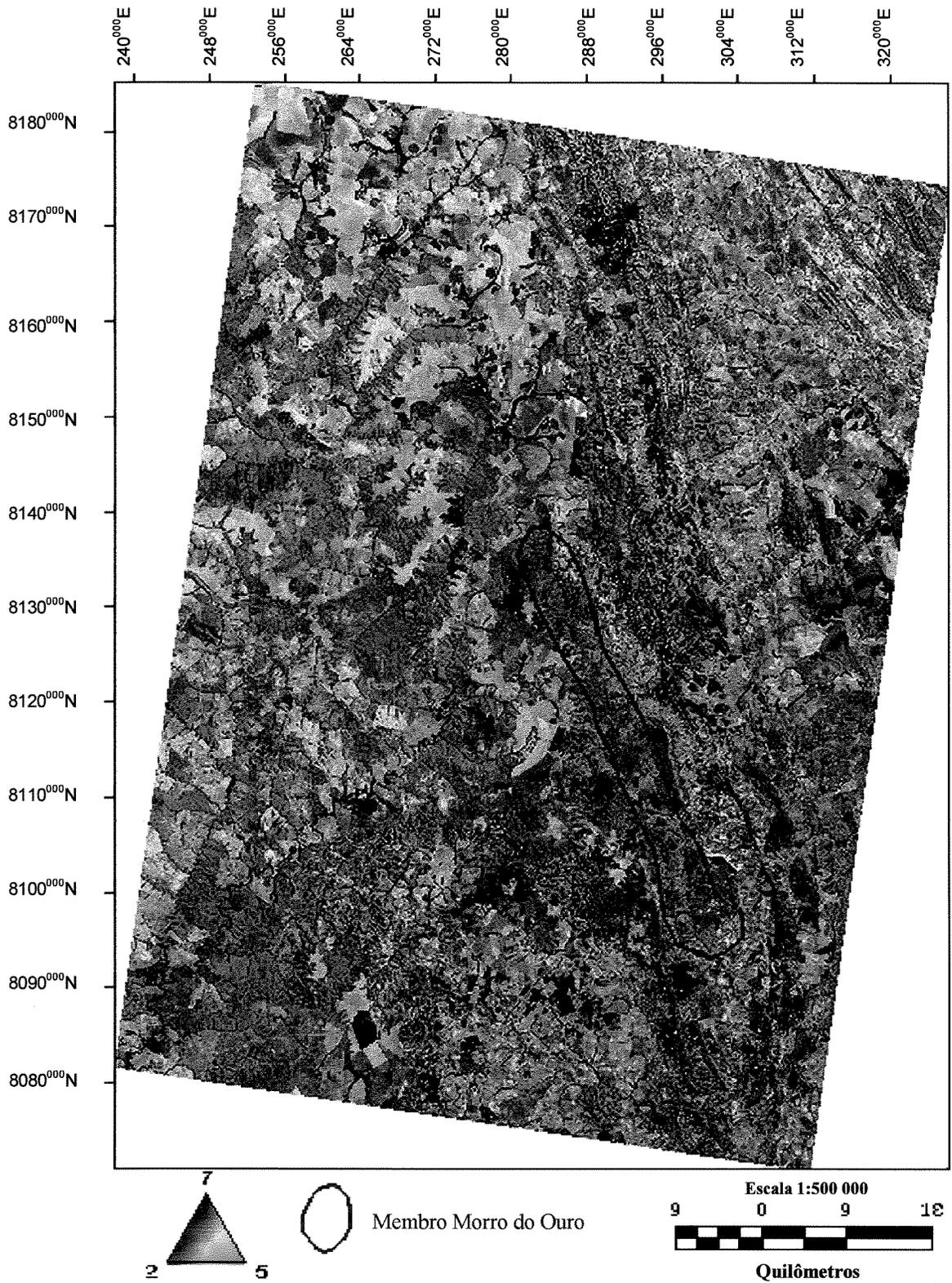
Amostras superficiais contidas na cena Paracatu						
	1	2	3	4	5	7
1	1	0,99441086	0,95461761	0,91079001	0,18848892	0,26504052
2	0,99441086	1	0,9387721	0,89302374	0,11594998	0,19761071
3	0,95461761	0,9387721	1	0,99229437	0,44701925	0,52138907
4	0,91079001	0,89302374	0,99229437	1	0,53397182	0,60656328
5	0,18848892	0,11594998	0,44701925	0,53397182	1	0,99542559
7	0,26504052	0,19761071	0,52138907	0,60656328	0,99542559	1

A composição colorida RGB751 realçou em **lilás** os filitos pertencentes ao Membro Morro do Ouro (Figura 5.4). A mina de Morro do Ouro aparece em tom **azul**, mas com uma pequena área em **rosa**, indicando a presença de rochas com altas reflectâncias nas bandas TM7 e TM2. As demais áreas aparecem em verde, indicando que estas apresentam valores altos de reflectância para a banda 5, típicos de lateritas (vide curva de reflectância espectral – Figura 5.2).

#### 5.2.4.3-) OPERAÇÕES ARITMÉTICAS

Os contrastes espectrais entre bandas são melhor realçados quando os espectros interpolados são expressos na forma de razões ou diferenças de bandas.

Seguindo um método de análise descrito em Souza Filho & Drury (1998), as permutações de operações aritméticas entre as bandas TM foram representadas como gráficos polares para cada unidade “litológica” (Figuras 5.5 e 5.7). Nos gráficos onde a ligação entre as amostras gera



**Figura 5.4 - Composição colorida RGB TM751 Para Realce dos Filitos Carbonosos do Membro Morro do Ouro (Lilás)**

uma figura aproximadamente quadrada (considerando-se apenas quatro *endmembers*), a discriminação entre as unidades é baixa. Os gráficos que apresentam picos distintos indicam razões/diferenças onde a discriminação é alta.

Para a seleção das melhores combinações de imagens obtidas por razões e diferenças de bandas utilizou-se também parâmetros estatísticos, no sentido de complementar a análise (Tabelas 5.5 e 5.7). Variância e desvio-padrão foram calculados para dois conjuntos de dados: um composto por todas as amostras e, um segundo composto apenas pelas amostras de rocha. A laterita foi eliminada, dado seu reconhecido contraste espectral com as demais unidades.

#### **a.) RAZÕES ENTRE BANDAS**

Onze razões de banda foram selecionadas a partir dos espectros interpolados na tentativa de diferenciar as unidades litológicas aflorantes e contidas na imagem TM. A razão 5/1 é a que apresenta os maiores valores de desvio padrão para todas as amostras, significando que a maior parte da informação referente às unidades litológicas está contida nesta banda. Já a razão 4/3 é a que contém menos informação, já que não foram obtidas medidas espectrais para vegetação, que tradicionalmente é mapeada através desta razão.

A partir desta análise, as seguintes razões foram selecionadas para o mapeamento de assinaturas espectrais associadas a presença de filitos carbonosos (ou não) pertencentes ao Membro Morro do Ouro: 5/1, 5/2, 5/4 e 3/1. Assim, a aplicação destas razões para DTMO é apresentada na Tabela 5.5.

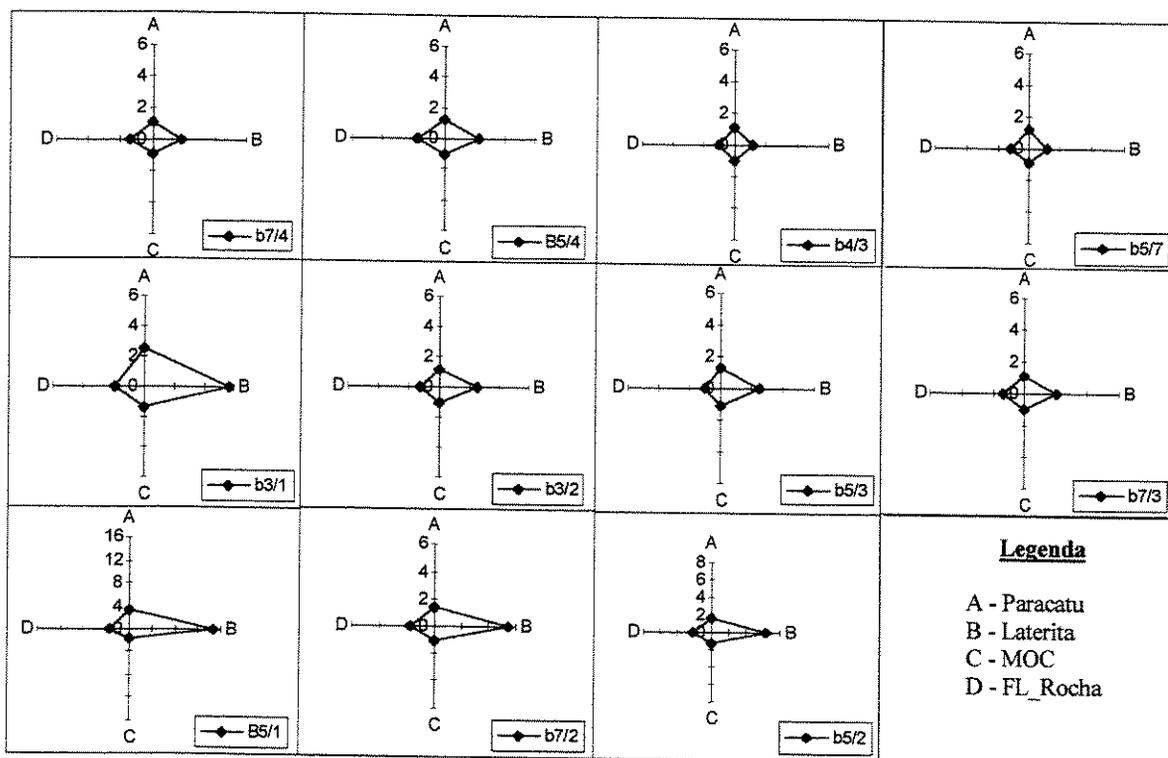


Figura 5.5- Gráficos polares das respostas espectrais simuladas para a resolução do TM, expressas como razões de bandas (amostras superficiais).

Tabela 5.5 - Tabela de valores estatísticos obtidos para razões de bandas TM, através dos espectros interpolados (amostras superficiais)

	Paracatu	Laterita	MOC	FL (rocha)	DP	DP entre rochas(*)	Variância	Variância entre rochas(*)
b5/3	1,32	2,55	1,09	1,01	0,72	0,16	0,51	0,03
b7/4	1,06	1,84	0,93	1,39	0,41	0,24	0,16	0,06
B5/1	3,28	14,50	1,52	3,32	5,96	1,02	35,47	1,05
B5/4	1,24	2,19	1,06	1,71	0,51	0,34	0,26	0,11
b4/3	1,06	1,16	1,03	1,00	0,07	0,03	0,00	0,00
b5/7	1,17	1,19	0,88	1,23	0,16	0,19	0,03	0,03
b3/1	2,49	5,69	1,40	1,94	1,93	0,55	3,71	0,30
b3/2	1,19	2,52	1,10	1,27	0,67	0,08	0,45	0,01
b7/3	1,13	2,14	0,96	1,39	0,52	0,22	0,27	0,05
b7/2	1,34	5,38	1,05	1,76	2,02	0,36	4,07	0,13
b5/2	1,56	6,41	1,20	2,17	2,42	0,49	5,86	0,24

(\*) entre as amostras Paracatu, MOC e FL(rocha)

**Tabela 5.6 - Razões de bandas TM importantes no mapeamento dos filitos (carbonosos) pertencentes ao Grupo Canastra.**

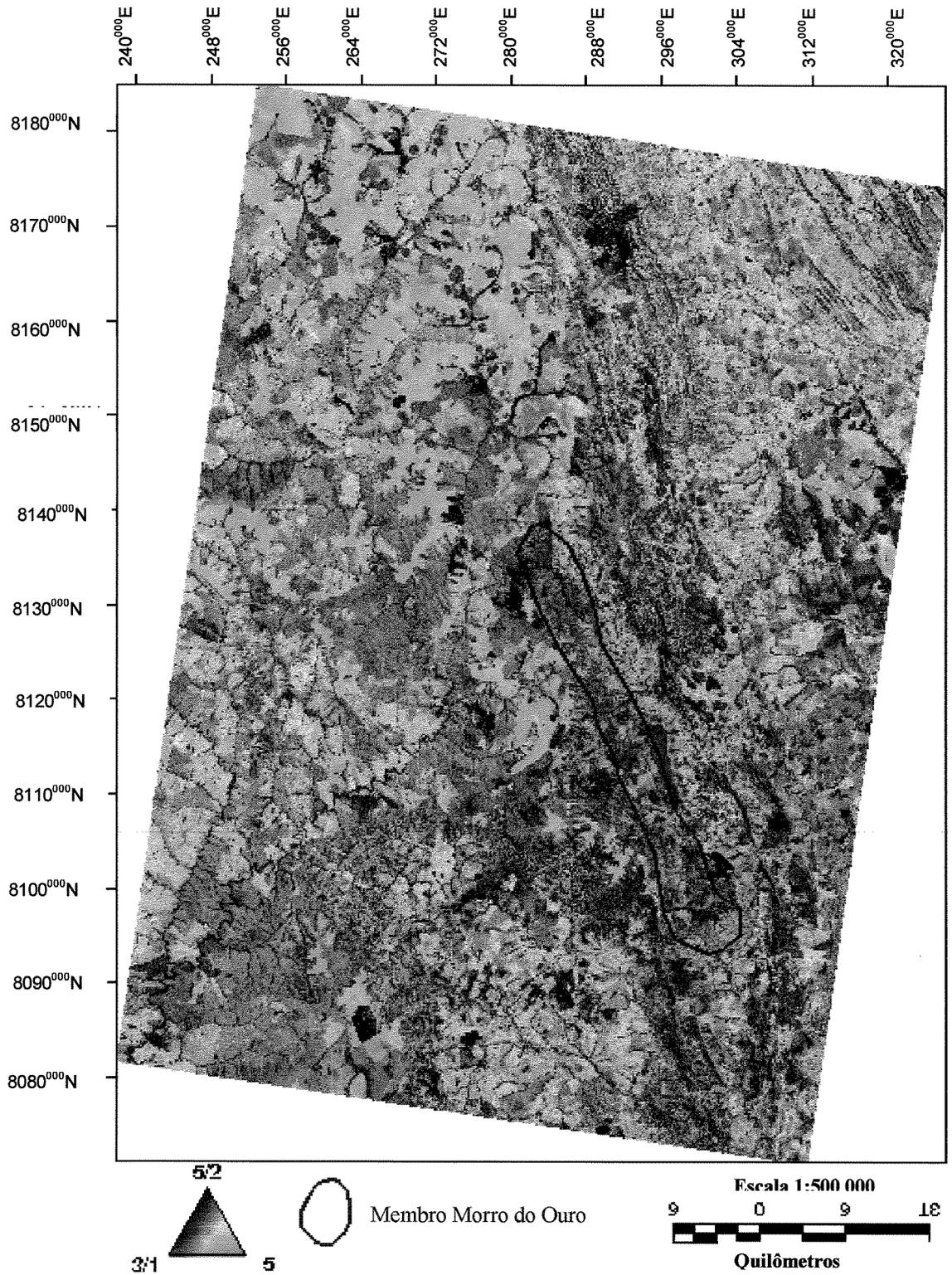
<b>Razão TM</b>	<b>Aplicação</b>
5/1	Fe <sup>+3</sup> + Fe <sup>+2</sup> vs. ausência de Fe
5/2	Fe <sup>+3</sup> + Fe <sup>+2</sup> vs. ausência de Fe
5/4	OH <sup>-</sup> vs. Fe <sup>+3</sup> + vegetação
3/1	Fe <sup>+2</sup> vs. ausência de Fe <sup>+2</sup>

Com base nestes critérios de seleção de razões de bandas, estabelecidos a partir dos parâmetros estatísticos, gerou-se uma composição colorida RGB, onde atribuiu-se o **vermelho** para a razão 5/2, o **verde** para a razão 5/4 e o **azul** para a razão 3/1. O resultado final não foi considerado satisfatório. A composição colorida das razões acima descritas não foi capaz de realçar as feições espectrais associadas a presença dos filitos carbonosos do Membro Morro do Ouro.

Considerando-se a influência da vegetação na estatística da cena, que não pode ser prevista a partir das curvas modeladas, optou-se por substituir a razão 5/4, pela banda 5, já que os valores de reflectância para esta banda nas amostras analisadas é alto e varia em função do conteúdo de óxidos e hidróxidos de ferro nas amostras. Como apresentado na Figura 5.6, a imagem não apresenta um resultado visual de fácil interpretação - em tons verde escuro pode-se distinguir a distribuição espacial dos filitos Morro do Ouro das demais litologias. A utilização da razão 5/1 em substituição à 5/2 resultou numa imagem final idêntica à composição colorida apresentada.

#### **b.) DIFERENÇAS ENTRE BANDAS**

Da mesma forma como implementado para operações aritméticas envolvendo razões de bandas, foram gerados gráficos polares representando onze diferenças entre bandas selecionadas a partir da análise dos espectros dos *endmembers* Laterita, Paracatu, MOC e Fazenda Lavras (resolução TM) (Figura 5.7).



**Figura 5.6 - Composição colorida RGB 5/2, 5, 3/1 para realce dos filitos carbonosos do Membro Morro do Ouro (em verde escuro na imagem)**

Na análise estatística, nota-se que a diferença 5-1 é a que apresenta maiores valores de desvio-padrão (Tabela 5.6), contendo portanto a maior parte da informação espectral das litologias sob estudo.

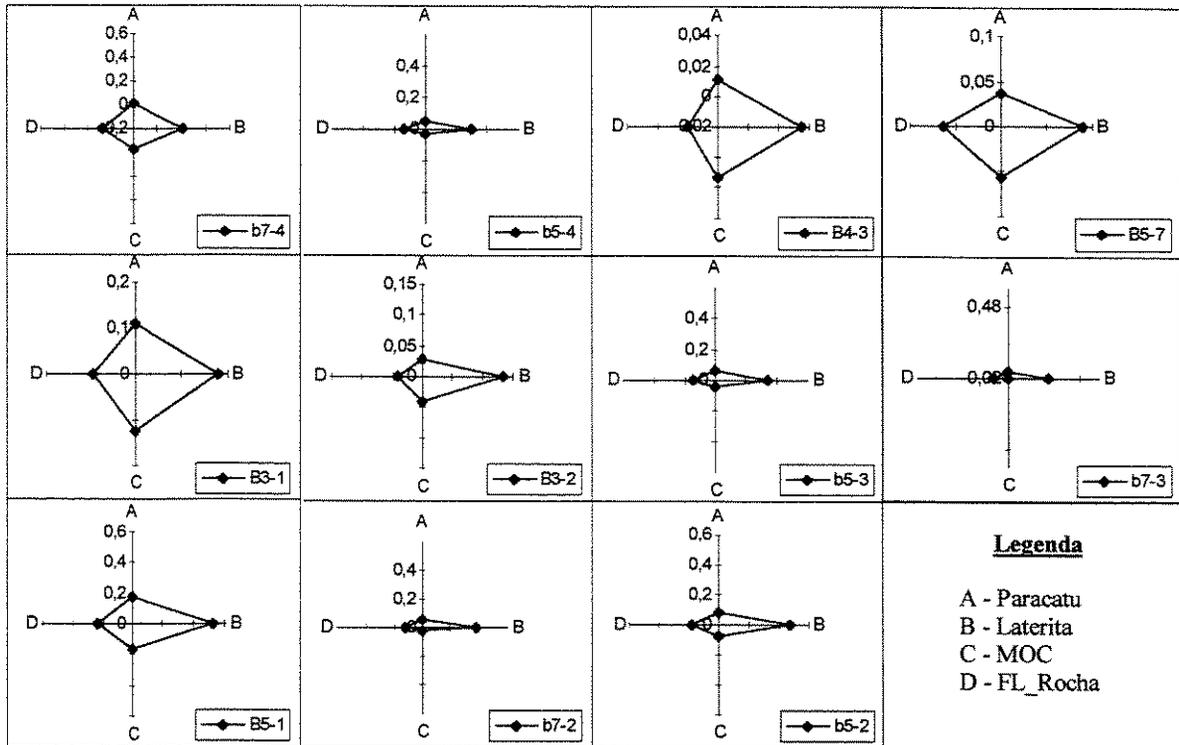


Figura 5.7- Gráficos polares das respostas espectrais simuladas para a resolução do TM, expressas como diferenças entre bandas (amostras superficiais)

Tabela 5.7 - Tabela de valores estatísticos obtidos para diferenças entre bandas TM (amostras superficiais)

	Paracatu	Laterita	MOC	FL(rocha)	DP	DP entre rochas(*)	Variância	Variância entre rochas(*)
b5-3	0,34	0,06	0,04	0,14	0,14	0,15	0,02	0,02
b7-4	0,21	0,01	-0,03	0,08	0,11	0,12	0,01	0,01
B5-1	0,52	0,17	0,16	0,24	0,17	0,19	0,03	0,04
B5-4	0,30	0,05	0,03	0,14	0,13	0,14	0,02	0,02
b4-3	0,04	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00
b5-7	0,09	0,04	0,06	0,06	0,02	0,02	0,00	0,00
b3-1	0,18	0,11	0,12	0,10	0,04	0,04	0,00	0,00
b3-2	0,13	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,00	0,00
b7-3	0,38	0,05	0,02	0,12	0,16	0,19	0,03	0,03
b7-2	0,25	0,02	-0,02	0,08	0,12	0,13	0,01	0,02
b5-2	0,47	0,09	0,08	0,18	0,18	0,20	0,03	0,04

(\*) entre as amostras Paracatu, MOC e FL(rocha)

Uma composição colorida RGB combinando a imagem resultante da diferença entre as bandas TM5-TM1, a banda TM5 e a imagem da diferença entre as bandas TM3-TM1 foi confeccionada (Figura 5.8). Nesta composição, as rochas carbonáceas pertencentes ao Membro Morro do Ouro foram mapeadas em azul com grande destaque. Da mesma forma que para razões, a utilização da diferença 5-1 em substituição à 5-2 resultou numa imagem final idêntica à composição colorida apresentada.

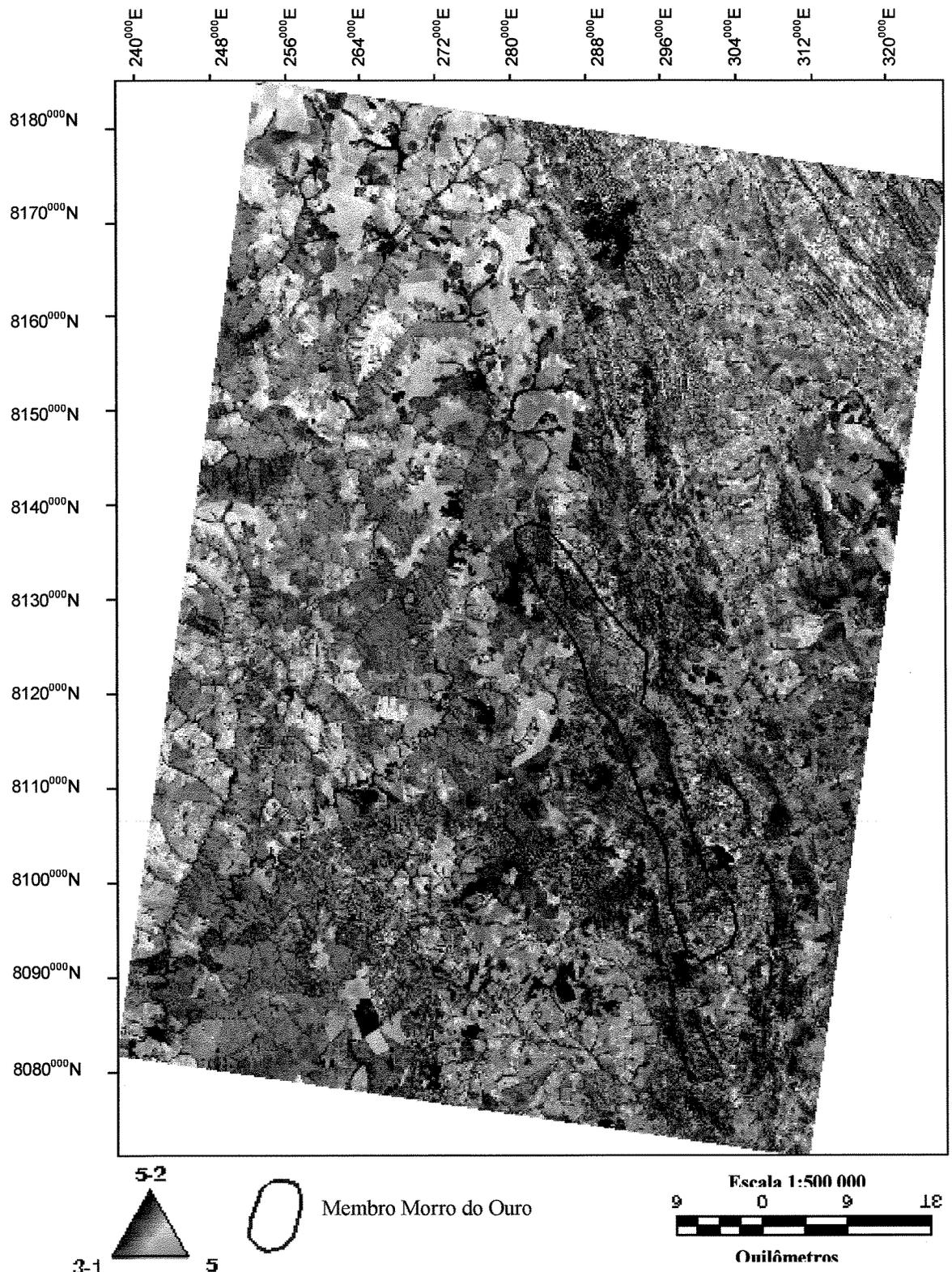
#### 5.3.2.4-) ANÁLISE POR PRINCIPAIS COMPONENTES

A Análise por Principais Componentes (APC) é uma técnica estatística multivariada utilizada para a selecionar combinações lineares de variáveis não correlacionadas, de modo que cada combinação linear extraída sucessivamente, ou principal componente, tenha uma variância menor (Singh & Harrison, 1985). A variância estatística em imagens multiespectrais relaciona-se à resposta espectral de vários materiais superficiais, assim como à dimensionalidade estatística dos dados da imagem.

A grande vantagem de métodos que utilizam-se de cálculos de principais componentes é a possibilidade de supressão dos efeitos da vegetação, já que sua participação na estatística da cena pode ser mapeada e individualizada.

Das técnicas baseadas na análise por principais componentes aplicou-se a Técnica FPCS (*Feature Oriented Principal Component Selection* - Crósta & Moore, 1989).

Esta técnica foi escolhida para mapeamento de minerais dos grupos das hidroxilas e diferenciação entre estas assembléias torna-se inviável. A distinção entre paragêneses iguais, mas de origem diversa, é possível somente através do uso de sensores com maiores resoluções espectrais.



**Figura 5.8 - Composição colorida RGB TM 5-2, 5, 3-1 para realce dos filitos carbonosos pertencentes ao Membro Morro do Ouro (em azul na imagem)**

### a.) TÉCNICA FPCCS

Este método desenvolvido por Crósta & Moore (1989), permite a discriminação entre os diversos tipos de coberturas através da análise de matrizes de autovetores utilizadas no cálculo das principais componentes. Desta forma, os valores dos autovetores são utilizados para prever qual imagem PC concentrará a informação diretamente relacionada às assinaturas espectrais teóricas do alvo. O ordenamento das PCs é influenciado tanto pela abundância espacial de pixels representantes dos vários alvos geológicos, quanto pelo desvio padrão (variância) de cada banda.

Originalmente, este método utilizava um conjunto de seis bandas, onde as componentes principais contendo maior informação a respeito dos grupo de minerais de interesse (no caso, os óxidos/hidróxidos de ferro e as hidroxilas) seriam selecionadas. Loughlin (1991) propôs uma adaptação desta técnica, denominando-a de Técnica Crósta, onde ao invés de seis bandas, dois conjuntos de quatro bandas são submetidos à APC: 1457 e 1345. Estes conjuntos realçam respectivamente minerais do grupo das hidroxilas e dos óxidos/hidróxidos, os quais estão muito frequentemente associados à paragêneses de alteração hidrotermal.

A estatística multivariada da cena Paracatu para os dois sub-conjuntos de bandas (TM1345 e TM1457) é apresentada nas Tabelas 5.8a e 5.8b:

**Tabela 5.8a - APC para mapeamento de óxidos e hidróxidos de ferro**

	TM1	TM3	TM4	TM5
Covariância de auto-vetor				
PC1	0,119	0,314	0,060	0,940
PC2	-0,029	-0,088	-0,991	0,096
PC3	-0,346	-0,871	0,119	0,327
PC4	-0,930	0,367	-0,005	-0,005

**Tabela 5.8b - APC para mapeamento de hidroxila**

	TM1	TM4	TM5	TM7
Covariância de auto-vetor				
PC1	+0,112	+0,050	+0,905	+0,407
PC2	-0,024	-0,979	-0,033	+0,200
PC3	-0,428	-0,164	+0,416	-0,786
PC4	-0,897	+0,110	-0,084	+0,420

Através da inspeção dos valores e sinais para os autovetores extraídos para o conjunto de bandas TM 1345, observa-se que a principal componente que apresenta altos valores para as

bandas 3 e 1, com sinais inversos é a PC4 (Tabela 5.8a). Para o mapeamento de feições espectrais relacionadas a presença de hidroxila, observa-se que na PC3 estão contidos valores altos, mas com valores opostos para as bandas TM5 e TM7 (Tabela 5.8a).

O procedimento final de análise consiste na composição de uma terceira imagem, que combine os componentes com conteúdo alto de hidroxila (Hy) e de óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) numa composição colorida RGB. Esta terceira imagem, denominada Hy+Fe, consiste do cálculo da soma ou PC1 das componentes Hy e Fe. A primeira alternativa foi utilizada neste estudo.

Uma vez produzidas as imagens Hy, Fe e Hy+Fe, a interpretação visual final baseia-se em cores, no espaço RGB, onde a componente Hy foi alocada no vermelho, a componente Hy+Fe no verde e a componente Fe no azul.

A Figura 5.9 apresenta estes resultados, onde observa-se que ao longo do *trend* estrutural Paracatu-Vazante, tons laranja (R+G) realçam a ocorrência dos filitos carbonosos pertencentes ao Membro Morro do Ouro. A ocorrência pervasiva de tons azuis aponta que os efeitos intempéricos foram bastante intensos, gerando paragêneses minerais ricas em ferro.

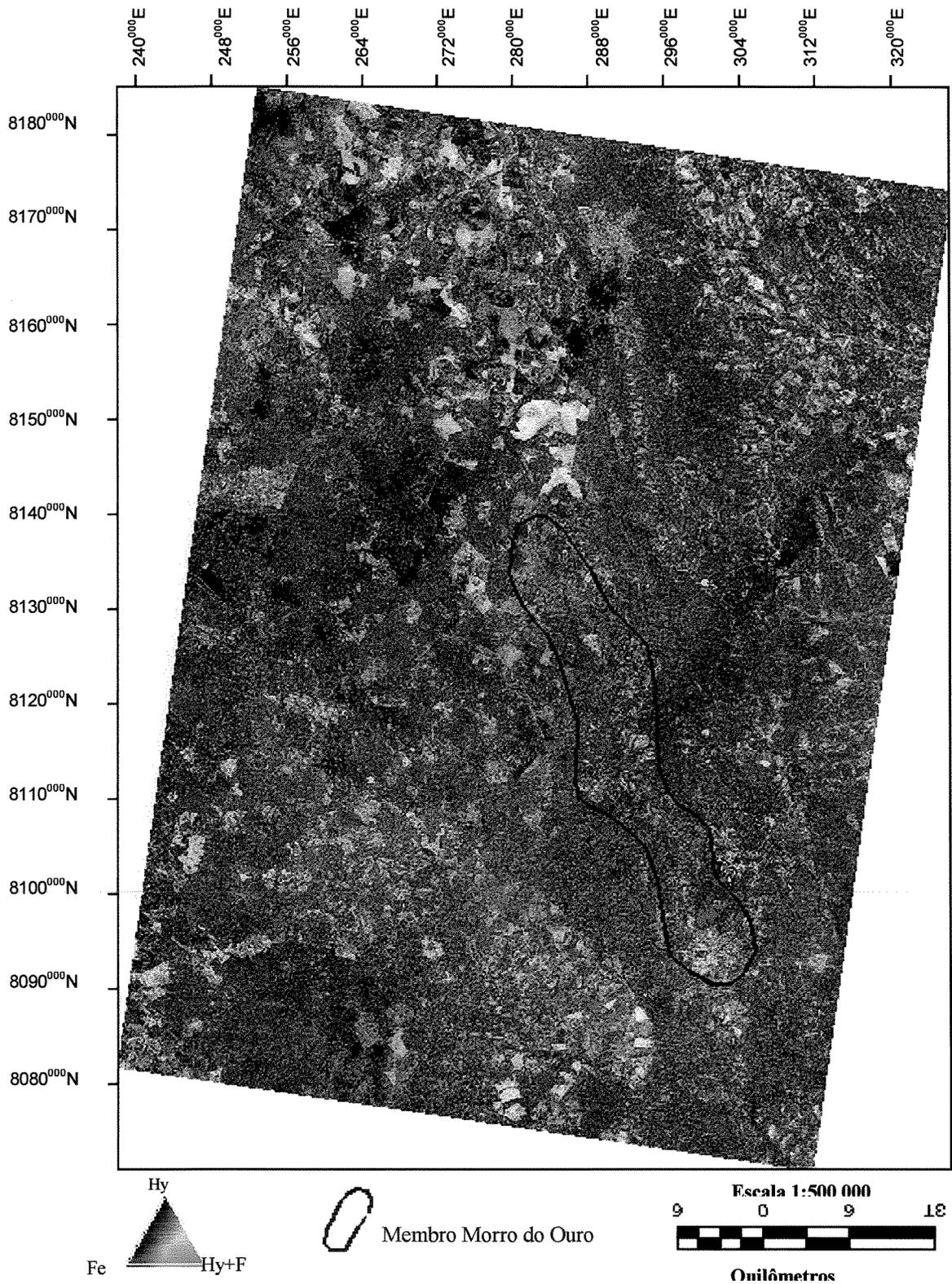
A área de rocha exposta, restrita a cava da mina de Morro do Ouro, é apresentada em tons mais intensos de laranja, o que comprova a eficácia do método, já que o conteúdo em hidroxilas das rochas expostas nesta área é de fato muito alto, como concluído a partir de inspeções petrográficas e espectroscopia de reflectância (Capítulo 3).

### **5.3.3-) ETAPA II – IDENTIFICAÇÃO DA UNIDADE MEMBRO MORRO DO OURO**

Tanto o conceito de misturas espectrais quanto o de proporções de *endmembers* foi introduzido nos estudos iniciais de imagens multiespectrais.

Através da comparação entre espectros contidos em bibliotecas espectrais de referência e os valores de reflectância obtidos para os pixels de dados multi ou hiperespectrais, tornou-se possível mapear a distribuição espacial de minerais numa imagem.

Nos itens subsequentes serão abordados os aspectos teóricos e metodológicos de técnicas de mapeamento e classificação espectral utilizadas para a identificação de assinaturas espectrais típicas dos filitos pertencentes ao Membro Morro do Ouro através da imagem TM.



**Figura 5.9 - Composição Colorida RGB Hy, Hy+Fe, Fe (Técnica Crósta) para realce dos filitos carbonosos pertencentes ao Membro do Ouro**

### **5.3.3.1-) MAPEAMENTO ESPACIAL DA DISTRIBUIÇÃO LITOLÓGICA – CLASSIFICAÇÃO ESPECTRAL**

Duas metodologias foram aplicadas para o mapeamento espectro-litológico: Spectral Angle Mapper (SAM) e Spectral Feature Fitting (SFF). Ambos os métodos integram as ferramentas de processamento de imagem disponíveis no software ENVI® (RSI, 1997).

Das cinco curvas espectrais selecionadas, apenas três foram utilizadas como dados de entrada, pois a redução do número de dados de entrada implica numa maior acurácia na classificação final, evitando ambiguidade nos resultados, conforme aplicado em Swalf *et al.* (2000).

A determinação destes três *endmembers* baseou-se em análises prévias, onde variou-se tanto o número quanto os espectros disponíveis para a análise através do sensor TM.

Os seguintes *endmembers* foram então utilizados como dados de entrada: Laterita, Fazenda Lavras (Rocha) e MOC. A escolha destes *endmembers* foi feita de uma forma criteriosa, visando atender a questão da sensibilidade do método, já que os espectros típicos de MOC e FL\_rocha, interpolados para a resolução TM são bastante semelhantes e, sua diferenciação aponta a eficiência do classificador. Utilizou-se como “pontos de controle” as áreas onde estas amostras foram coletadas. Considerando-se a diferença na forma das curvas destes dois *endmembers* e da laterita, a não classificação da laterita indica a total inabilidade do método.

#### **a.) SPECTRAL ANGLE MAPPER (SAM)**

O *Spectral Angle Mapper* (SAM) é um método utilizado para comparação de espectros de imagem com espectros individuais ou com uma biblioteca espectral de referência (Boardman & Kruse, 1994; CSES, 1992; Kruse *et al.*, 1993). Para a aplicação desta técnica, os números digitais dos pixels da imagem devem estar convertidos previamente, para reflectância real.

Este algoritmo determina a similaridade entre dois espectros através do cálculo do “ângulo espectral” entre eles, considerados vetores num espaço com dimensionalidade igual ao número de bandas (*nb*) (Figura 5.10). Apenas a direção é então considerada para os espectros, não seu comprimento, o que torna o método insensível à fatores de ganho e à todas as diferenças

de iluminação. Posto isto, os pixels com pouca iluminação permanecerão próximos à origem, enquanto a cor do material será definida pela direção de seu vetor unitário.

O comprimento do vetor relaciona-se apenas à quantidade de iluminação do pixel. O algoritmo SAM generaliza esta interpretação geométrica para o espaço  $nb$  dimensional. Através da equação abaixo, o SAM determina a similaridade de um espectro desconhecido  $t$ , com um espectro de referência  $r$  (CSES, 1992):

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{\sum_{i=1}^{nb_1} t_i r_i}{\left( \sum_{i=1}^{nb_1} t_i^2 \right)^{1/2} \left( \sum_{i=1}^{nb_1} r_i^2 \right)^{1/2}} \right)$$

onde  $nb$  é igual ao número de bandas na imagem.

O ângulo  $\alpha$  entre o espectro de referência e o pixel da imagem apresenta valor em radianos, que é atribuído ao pixel correspondente na imagem SAM de saída. Os mapas derivados do ângulo espectral formam um novo cubo de dados com o número de bandas igual ao número de espectros de referência utilizados no mapeamento. O limiar (*thresholding*) em nível de cinza é utilizado empiricamente para determinar aquelas áreas que mais se ajustam ao espectro de referência, enquanto guardam a coerência espacial.

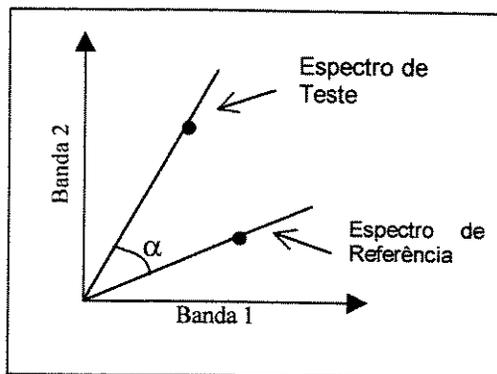


Figura 5.10 - Uma imagem composta por duas bandas, representada no espaço bi-dimensional.

As imagens resultantes da classificação para cada um dos três *endmembers* foram analisadas individualmente, em níveis de cinza, onde o realce de contraste (forma do histograma final) foi controlado. Aos valores positivos, indicando áreas classificadas como espectralmente similares aos respectivos *endmembers*, atribuiu-se um valor de DN próximo de 255. Por uma

questão visual, em seguida, uma composição colorida RGB foi gerada e o procedimento do ajuste do histograma foi aplicado.

A imagem final é apresentada na Figura 5.11. Como observado, as áreas de ocorrência de pixels com assinaturas espectrais mais próximas àquelas de FL e MOC foram detectadas apenas ao longo do *trend* estrutural Paracatu-Vazante, com tons de azul e verde. As demais áreas foram classificadas como espectralmente similares à curva espectral da laterita. O método SAM não foi sensível o bastante para distinguir estas duas assinaturas espectrais, pois na resolução TM estas duas assinaturas são muito semelhantes. Trata-se na verdade de uma limitação inerente ao sensor. As demais áreas, ou não foram classificadas, ou foram classificadas como laterita.

Nas áreas-teste Fazenda Lavras e Mina de Morro do Ouro, a classificação é ambígua. Na maior parte da área os pixels foram classificados como MOC. Em menor número é possível observar a presença de pixels classificados como FL (p.ex. em Fazenda Lavras, estes pixels ocorrem ao redor da mina).

Estes resultados indicam que o classificador forneceu resultados satisfatórios, mas não atendeu à questão da acuidade do método, devido à limitação espectral do próprio sensor.

#### ***b.) SPECTRAL FEATURE FITTING (SFF)***

O *Spectral Feature Fitting* (SFF) é um método que utiliza as feições de absorção para comparar espectros referentes ao pixel da imagem com *endmembers* de referência. Trata-se de um método similar ao Tricorder ou ao Tetracorder, desenvolvido pelo U. S. Geological Survey (Clark *et al.*, 1990, 1991; Clark and Swayze, 1995).

A profundidade das feições de absorção é obtida através da remoção do *continuum* tanto dos espectros de referência quanto dos espectros referentes aos pixels da imagem. Uma imagem "Scale" é produzida para cada *endmember* selecionado da seguinte forma: inicialmente subtrai-se de 1 os espectros com continuum removido e, em seguida, estes espectros são invertidos, comparação entre os espectros conhecidos com aqueles referentes aos pixels da imagem é dada tornando o continuum igual a zero. Um único fator multiplicativo de escala é determinado e a classificação é efetuada. Considerando-se que um intervalo espectral razoável tenha sido selecionado, um fator de escala alto é equivalente à feições espectrais profundas, enquanto um fator de escala baixo indica uma feição espectral pouco intensa. Um ajuste baseado no método

268262,41

388735,09

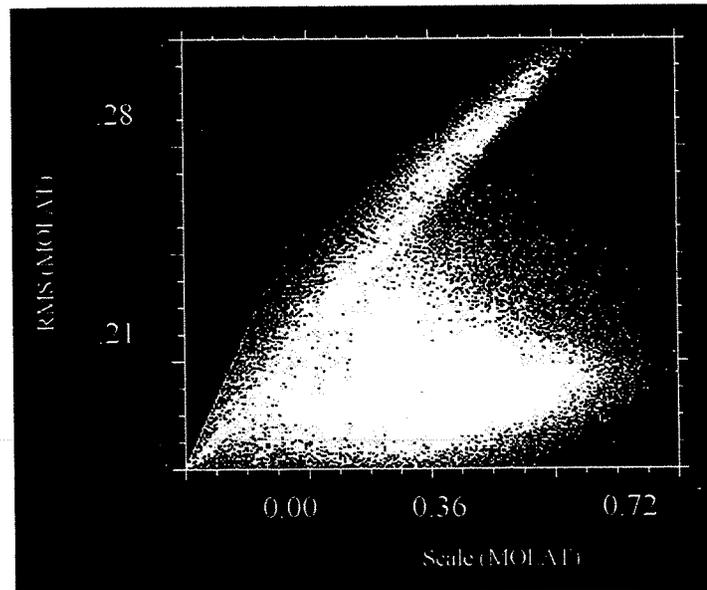
8151770,44

8085671,46



**Figura 5.11 - Classificação espectral obtida através do SAM, onde as três imagens são apresentadas numa composição colorida RGB, sendo em vermelho a laterita; verde a unidade MOC; e em azul o FL\_Rocha (Escala 1:250.000).**

dos mínimos quadrados (*least-squares-fit*) é calculado banda por banda, entre o *endmember* de referência e os pixels da imagem. Um fator de erro (RMS - *root-mean-square*) é utilizado para compor uma imagem RMS para cada *endmember*. Uma imagem opcional da razão entre a imagem de escala e a de RMS fornece uma imagem de ajuste, que refere-se ao nível de ajuste entre o espectro de referência e o pixel analisado. Este ajuste pode ser controlado manualmente através da geração de classes, definidas a partir de um gráfico bidimensional, sendo X a imagem “scale” e Y a imagem RMS (Figura 5.12), onde são determinadas áreas (classes) que localizem-se preferencialmente em valores de RMS baixo. Os resultados obtidos através deste segundo procedimento, dito aqui “controlado”, foram considerados mais satisfatórios.

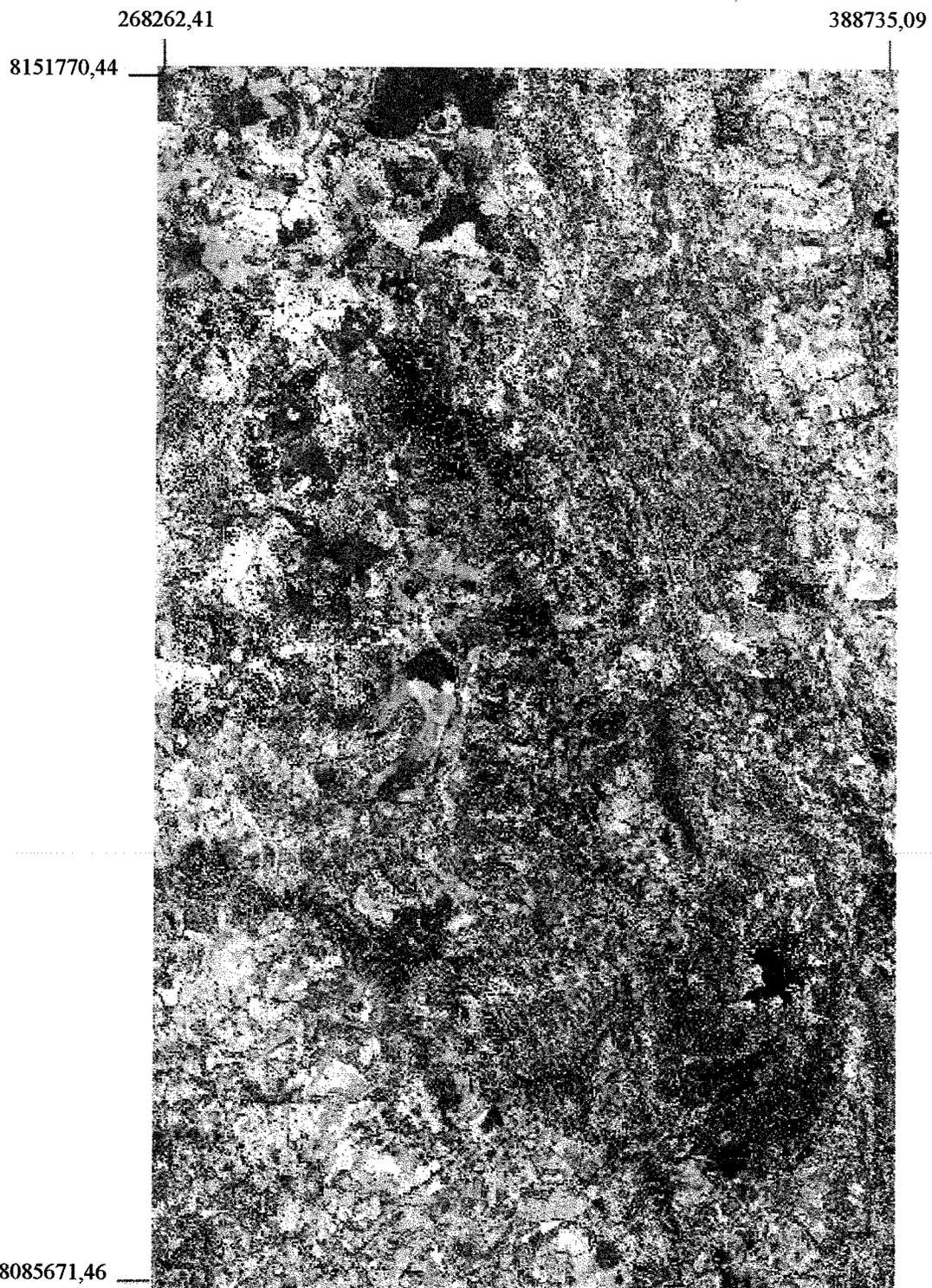


**Figura 5.12 - Gráfico de dispersão utilizado na determinação de classes, representadas por valores baixos para RMS e altos para a imagem SCALE (abundância do material analisado)**

A aplicação deste método implica num maior tempo gasto com processamento, pois o continuum é removido dos espectros relativos aos pixels da imagem

Os resultados obtidos através deste método são apresentados na Figura 5.13. A ambiguidade dos dados MOC e FL para a resolução TM também não foi resolvida através do SFF, considerado um método mais robusto que o SAM.

A visualização dos dados é confusa, provavelmente devido também à resolução espacial,



**Figura 5.13 - Imagem RGB resultante do método de classificação SFF, onde alocou-se o endmember Laterita em vermelho, MOC em verde e FL\_Rocha em azul (Escala 1:250.000).**

pois este método é capaz de executar uma classificação a nível de sub-píxel. Este método classificou satisfatoriamente as áreas representadas por píxels com assinaturas espectrais próximas a da laterita. As áreas representadas por píxels com assinaturas espectrais de FL e MOC são também restritos à zona de falha. As áreas com ausência de informações (não classificadas) aparecem em níveis de cinza.

Apesar do SFF ter sido desenvolvido para imagens de melhor resolução espectral, ofereceu para a imagem TM, resultados bastante satisfatórios, individualizando as áreas compostas por píxels de assinaturas espectrais FL e MOC das lateritas. É interessante notar que píxels classificados como FL\_rocha estão localizados numa área entre as minas de Morro do Ouro e Fazenda Lavras (coordenadas 298835,65E / 8106673,56N). Esta área é parte de um prospecto de pesquisa que vem sendo avaliado para ouro.

#### **5.3.4-)REALCE DAS ESTRUTURAS**

A extração dos principais lineamentos foi executada a partir da imagem TM, em níveis de cinza, tendo sido utilizada a banda TM5 e a primeira principal componente das seis bandas TM.

Através da análise visual destas imagens (Figura 5.14), identificou-se pares de fraturas conjugadas (NE-SW, NW-SE) no domínio das unidades pertencentes à Formação Paracatu e à Formação Vazante. Na Figura 5.14 os traços em vermelho indicam a expressão em mapa da Falha Paracatu-Vazante - um notável *trend* estrutural de direção NW/SE, com sigmóides associados, que se estende por aproximadamente 110 Km.

O contraste no comportamento reológico entre as duas unidades litológicas detectadas na imagem é marcado pela presença de lineamentos contínuos e de dimensões de dezenas de quilômetros (possíveis descontinuidades tectônicas), predominantemente de direção NE-SW, na Formação Vazante (traços azuis).

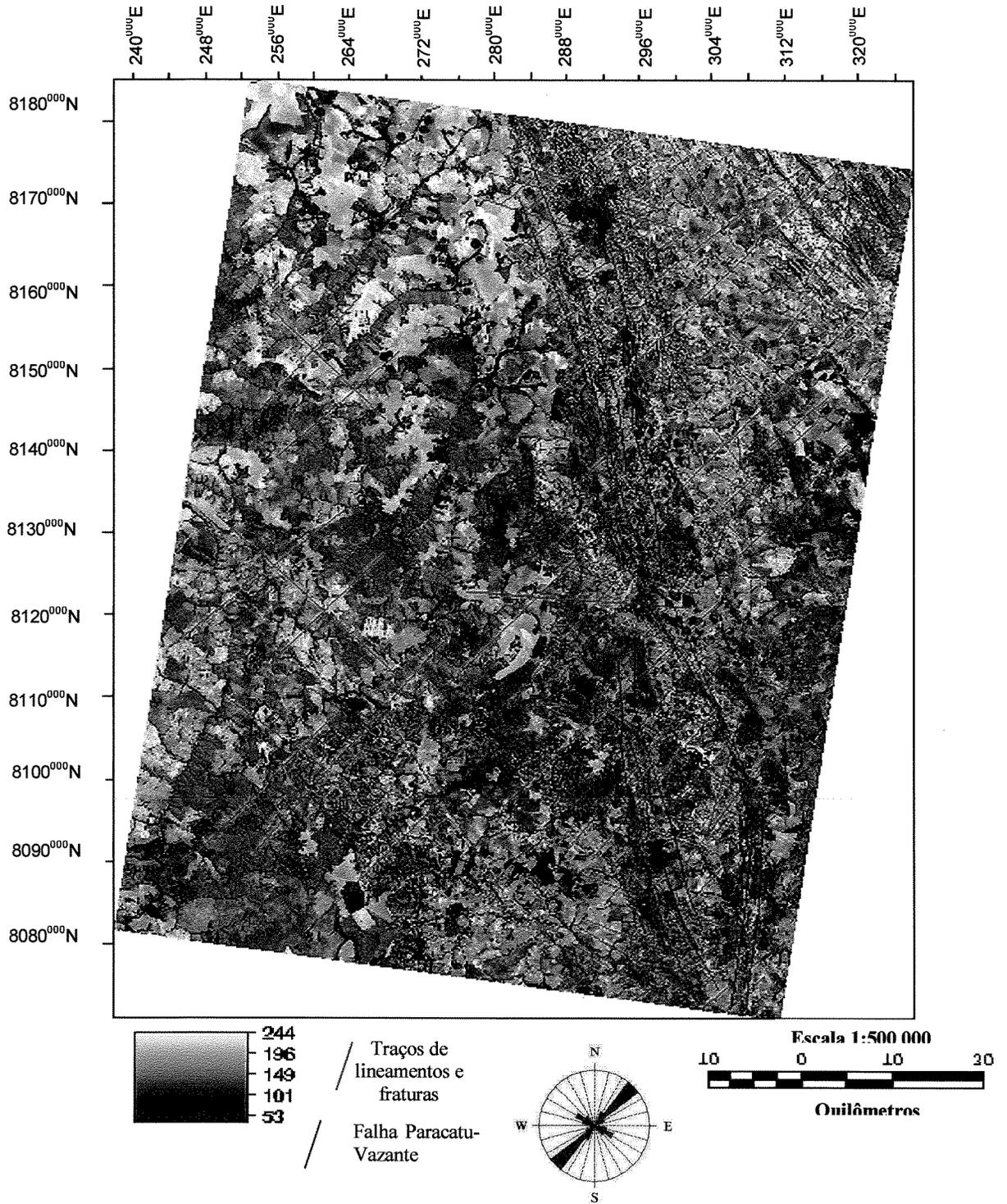


Figura 5.14- Imagem em níveis de cinza (banda TM5) com traços de fraturas

#### 5.4-) DISCUSSÃO

Os métodos de classificação espectral e de desmistura espectral, como os implementados nesta dissertação apresentam algumas vantagens sobre os métodos “convencionais”, tais como operações aritméticas e APC. A primeira é que utilizam na mesma análise todas as regiões do espectro cobertas pelo sensor, aumentando a capacidade de detecção de feições espectrais mais discretas, mesmo em imagens de baixa resolução. A outra vantagem é que tratam-se de métodos que independem da estatística da cena para a qual foram aplicados, uma vez que as reflectâncias bidirecionais ou hemisféricas são similares para muitas superfícies naturais (Gradie & Veverka, 1982) e por este motivo podem ser relacionadas à dados de imagem multiespectral (radiância) através de uma transformação linear (Hapke, 1981).

## ***CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES***

---

A análise dos dados apresentados nos capítulos 2, 3, 4 e 5 desta dissertação conduz às seguintes conclusões e recomendações:

- A formulação e aplicação do modelo de exploração para DTMO, com base em dados de sensores remotos, possibilitou um avanço neste campo da pesquisa científica, com desdobramentos práticos potencialmente importantes. O modelo incorpora tanto as feições descritivas dos DTMO, bem como seu significado genético. A partir dele foi possível identificar o tipo de sensor mais adequado aos objetivos de cada campanha exploratória, prever a detectabilidade ou não de determinadas feições geológicas associadas à mineralização aurífera (como estruturas e paragêneses minerais) e delinear uma estratégia de processamento digital adequada à obtenção dos melhores resultados.
- As assembléias minerais constituintes das amostras de rocha provenientes das regiões de Paracatu, Luziânia e redondezas foi reconhecida através da análise espectral, com base numa rotina de classificação semi-automática.
- Através da classificação espectral, foi possível concluir que óxidos e hidróxidos de ferro (goetita, hematita e limonita), filossilicatos (muscovita e os argilominerais illita, montmorilonita, caulinita e esmectita) e matéria orgânica são os principais constituintes responsáveis pela resposta espectral dos filitos presentes em Morro do Ouro e Serra da Anta.
- A análise espectral das amostras de filitos intemperizados revelou, como característica distintiva, a presença de bandas de absorção bem definidas, além de um albedo sensivelmente mais elevado, ao contrário das amostras do mesmo filito provenientes de testemunhos de sondagem, o que coaduna com as observações feitas por Meneses *et al.* (1993) e Pontara (1998). Os dados obtidos foram os seguintes:
  - entre 0,35 e 1  $\mu\text{m}$ , a presença de íons ferro-férrico e ferro-ferroso nas estruturas dos minerais jarosita, goetita e da mistura limonita, é responsável pelas transições eletrônicas em  $\sim 0,43$ ,

0,65 e 0,95  $\mu\text{m}$  (com deslocamentos da ordem de 0,02  $\mu\text{m}$ ).

➤ de 1 a 2,4  $\mu\text{m}$ , a presença do íon  $\text{OH}^-$  na estrutura dos minerais montmorilonita, illita, muscovita, dickita, e da mistura caulinita-esmectita é responsável pelas transições vibracionais em 1,4, 1,9, 2,2 e 2,35  $\mu\text{m}$  (com deslocamentos da ordem de 0,01  $\mu\text{m}$ ).

- As assinaturas espectrais dos filitos Serra da Anta e Morro do Ouro são semelhantes. Entretanto, as proporções entre os minerais presentes nas amostras analisadas são variáveis, influenciando diretamente no albedo e na intensidade de absorção em 2,2  $\mu\text{m}$ , sempre maior nos filitos Morro do Ouro.
- O tamanho dos minerais que compõem as rochas analisadas não interfere na interpretação dos dados espectrais, dada sua homogeneidade.
- A biblioteca espectral de referência elaborada para DTMO constitui uma base de dados importante para a análise das respostas espectrais de materiais geológicos sob diferentes resoluções (modelamento espectral). Face à sua representatividade, o uso desta biblioteca pode ser estendido para classificação espectral de amostras e imagens de outras áreas com características geológicas similares.
- Observou-se que rochas pertencentes à mesma unidade lito-estratigráfica e com mineralogia similar (modificada por processos supergênicos) podem ser individualizadas/diferenciadas em função das intensidades das feições de absorção localizadas nos comprimentos de onda ao redor de 0,9  $\mu\text{m}$  e de 2,2  $\mu\text{m}$ . Constatou-se ainda que estas intensidades estão relacionadas principalmente à abundância do grão absorvedor e não ao seu tamanho.
- Para fins de exploração mineral de DTMO através de sensores remotos, os processos intempéricos são determinantes. Seus efeitos resultam na supressão da matéria carbonácea e na transformação dos sulfetos (arsenopirita, pirita e traços de galena) em óxidos/hidróxidos de ferro, permitindo o mapeamento tanto mineral quanto espectro-litológico através de sensores de alta e baixa resoluções espectrais.

- Sensores com bandas posicionadas próximo a 2,2  $\mu\text{m}$  são potencialmente capazes de detectar e individualizar as rochas pertencentes à Formação Paracatu. O sensor ASTER constitui uma boa escolha para o mapeamento dos filitos pertencentes aos Membros Morro do Ouro e Serra das Antas, já que apresenta uma resolução espectral superior aos sensores da série Landsat-TM e Fuyo-1 (JERS-1) na região do SWIR.
- A utilização integrada de dados espectrais de diferentes resoluções (espectrorradiômetro *FieldSpec-FR* e sensor Landsat-TM) para a região de Paracatu, constituiu um meio eficiente para o reconhecimento de unidades lito-estratigráficas associadas à mineralização aurífera do tipo Morro do Ouro.
- As metodologias empregadas nas duas etapas definidas neste trabalho como de **discriminação e identificação**, são complementares. Das técnicas ditas convencionais, a imagem da composição colorida RGB de diferença de bandas TM (5-2, 5, 3-1) mostrou-se como um produto útil na discriminação das rochas pertencentes ao Membro Morro do Ouro. Quanto aos métodos de classificação espectral SAM e SFF, utilizados neste trabalho, ambos foram bastante eficazes na identificação dos sericita filitos carbonáceos pertencentes ao Membro Morro do Ouro.
- A correção atmosférica implementada mostrou-se também adequada para os dados TM. Os valores de reflectância aparente extraídos dos pixels da imagem TM puderam ser comparados com as curvas de reflectância espectral (interpoladas para esta resolução) obtidas em laboratório.
- A extração dos lineamentos das imagens TM permitiu visualizar várias das estruturas regionais que afetam unidades da Formação Paracatu e Formação Vazante, além do *trend* Paracatu-Vazante, ao qual subordinam-se zonas de cisalhamento, que por sua vez representam importantes metalotectos da mineralização.
- A metodologia desenvolvida nesta dissertação é aplicável para quaisquer áreas, desde que se disponha de dados de sensores remotos compatíveis com a escala e requisitos espectrais das feições

descritivas do depósito. Assim como os DTMO, muitos dos grandes depósitos auríferos do mundo estão associados a folhelhos negros e apresentam características similares às aquelas identificadas no depósito Morro do Ouro. Dentre estes destacam-se os depósitos do *trend* Getchell-Cortez-Carlin (Nevada, EUA), Bendigo-Ballarat (Austrália), Muruntau (Uzbequistão) e os depósitos das províncias Sabie-Pilgrim's Rest, na África do Sul (Roberts *et al.* 1971; Bowen & Whiting, 1975; Hutchinson, 1987). A possibilidade de reconhecimento de rochas ricas em matéria carbonácea e de outras feições diagnósticas de DTMO através de dados e técnicas de sensoriamento remoto, abre novos horizontes para a exploração de depósitos de ouro de baixo teor e alta tonelagem, estes de grande interesse para indústria mineral.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

- Adams, J.B. 1975. Interpretation Of Visible And Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectra Of Piroxenes And Other Rock Forming Minerals. In: C. Karr (ed.) *Infrared and Raman Spectroscopy Of Lunar And Terrestrial Materials.*. San Diego, 91-116.
- Amaral, G. 1984. Remote Sensing Systems Comparisons for Geological Mapping in Brazil. In: Teleki, P. & Weber, C. (eds.) *Remote Sensing for Geological Mapping*. Documents BRGM n.82. publication IUGS 18:91-106.
- Blum, M.L.B. & Pires, A.C.B. 1996. Superfície Curie da Região Central de Goiás. *Rev. Bras. Geociências.*, 26(3):1997-208.
- Boardman, J. W. & Kruse, F.A. 1994. Automated Spectral Analysis: A Geological Example using AVIRIS data, North Grapevine Mountains, Nevada. In: Tenth Thematic Conference on Geological Remote Sensing, San Antonio, Texas, I:407-418.
- Bowen, K.G. & Whiting, R.G. 1975. Gold in Tasman geosyncline, Victoria. *Australasian Inst. Mining and Metallurgy Mon.* 5:647-658.
- Buckingham, W. F. & Sommer, S.E. 1983. Mineralogical Characterization of Rock Surfaces Formed by Hydrothermal Alteration and Weathering - Application to Remote Sensing, *Econ.Geol.*, 78 (4): 664-674.
- Burns, R.G.1970. Mineralogical Application to Crystal Field Theory. Cambridge University Press, New York. 224p.
- Clark, R.N.; King, T.V.V.; Klejwa, M. & Swayze, G.A. 1990. High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Mineral. *J. Geophys. Res.*, 95(B8):12.653-12.680.
- Clark, R.N. & Roush, T.L. 1984. reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *J. Geophys. Res.*, 89:6329-6340.
- Clark, R.N.; Swayze, G.A.; Gallagher, A.; Gorelick, N. & Kruse, F. 1991. Mapping With Imaging Spectrometer Data Using The Complete Band Shape Least-Squares Algorithm Simultaneously Fit To Multiple Spectral Features From Multiple Materials. In: Third Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, *Proceedings*, JPL Publication 91-28, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, p.2-3.

- Clark, R.N. & Swayze, G.A. 1995. Mapping Minerals, Amorphous Materials, Environmental Materials, Vegetation, Water, Ice And Snow And Other Materials: The USGS Tricorder Algorithm. In: 5<sup>th</sup> Annual Jpl Airborne Earth Science Workshop, *Summaries*, JPL Publication 95-1, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, p.39-40.
- 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.
- Costa Junior, C.N. 1997. *Caracterização mineralógica dos diferentes tipos de minérios e concentrado de flotação da Mina de Morro do Ouro. Paracatu – MG*. Inst. De Geociências, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado.
- Crósta, A.P. & Moore, J.McM, 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: 7<sup>th</sup> Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, *Proceedings*, Calgary, Canada, 2:1173-1187.
- Crósta A.P; Rabelo, A. 1993. Assessing Landsat/TM for hydrothermal alteration mapping in Central-Western Brazil. In: 9<sup>th</sup> Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, *Proceedings*, Pasadena, California, USA, 2:1053-1061.
- 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.
- Center For The Study Of Earth From Space (Cses). 1992. SIPS User's Guide, The Spectral Image Processing System *apud* ENVI (1997). The Environment for Visualizing Images Version 3.2.. Tutorials.
- Duba, D. & Williams-Jones, E. 1983. The application of Illite Crystallinity, Organic Matter Reflectance and Isotopic Techniques to Mineral Exploration: A Case Study in Southwestern Gaspe, Quebec. *Econ. Geol.*, 78:1350-1363.
- ENVI (1997). The Environment for Visualizing Images Version 3.2.. Tutorials.
- Ferreira Filho, C.F.; Kamo, S.L.; Fuck, R.A.; Krogh, T.E. & Naldrett, A.J. 1994. Zircon and rutile U-Pb geochronology of the Niquelândia mafic-ultramafic intrusion, Brazil: constrains for the timing of magmatism and high-grade metamorphism. *Precambrian Res.*, 68:241-255.

- Freitas-Silva, F.H. 1991. *Enquadramento Litoestratigráfico e Estrutural do Depósito de Ouro de Morro do Ouro, Paracatu - MG*. Inst. de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de Mestrado, 151 p..
- Freitas-Silva, F.H. 1996. *Metalogênese do Depósito do Morro do Ouro, Paracatu, MG*. Inst. de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 337 p.
- Freitas-Silva, F.H.; Ferreira Jr., L.G.; Meneses, P.R. & Dardenne, M.A. 1993. Resultados preliminares sobre a aplicação de dados espectroradiométrico e geoquímicos na prospecção de depósitos auríferos Tipo Morro do Ouro. In: SBG-MG, VII Simp. Geol. Minas Gerais, 12. Minas Gerais, *Anais*, p.58-60.
- Freitas-Silva, F.H. & Dardenne, M.A. 1994. Proposta de Subdivisão Estratigráfica Formal para o Grupo Canastra no Oeste de Minas Gerais e Leste de Goiás. In: SBG-DF/GO, Simp. Geol. Centro-Oeste, 4. Brasília, *Anais*, p.164-165.
- Fuck, R.A. 1994. A Faixa Brasília e a Compartimentação Tectônica na Província Tocantins. In: SBG – Brasília, Simp.Geol.Centro-Oeste, 4. Brasília, *Anais*, p.184-187.
- Fuck, R.A.; Jardim De Sá, E.F.; Pimentel, M.M.; Dardenne, M.A. & Pedrosa Soares, A.C. 1993. As Faixas de Dobramentos Marginais do Cráton do São Francisco: Síntese dos Conhecimentos. In: DOMINGUEZ, J.M.L. & MISI, A. ed. *O Cráton do São Francisco*. Salvador, SBG/SGM/CNPq. p. 161-185.
- Gaffey, S.J. 1986. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35 – 2.55  $\mu\text{m}$ ) – anhydrous carbonate minerals. *J. Geophys. Res.* **92**(B2): 1429-1440.
- Galvão, L.S. 1994. *Litoestratigrafia de Reflectância Espectral e uma Abordagem Quantitativa para Análise de Espectros*. IAG/USP, São Paulo. Tese de Doutorado, 181p.
- Goetz, A.F.H.; Rowan, L.C.; Kingston, M.J. 1982. Mineral Identification from Orbit: Initial Results from the Shuttle Multispectral Infrared Radiometer. *Science*, **218**:1020-1024.
- Gradie, J. & Veverka, J., 1982. When are spectral curves comparable? *Icarus*. **49**:109-119
- Guo, L.J. 1991. Balance Contrast Enhancement Technique and its application in image colour composition. *Int. J. Remote Sensing*, **12**:2133-2151;
- Hagemann, S. 1988. *The structure, Petrology and Geochemistry of the gold-bearing Canastra Phyllites near Luziânia-Goiás, Brazil*, Master Thesis (unpubl): 156 p.

- Hagemann, S. 1989. The Petrology and Structural Geology of the Proterozoic Canastra Group near Luziânia-Goiás, Brazil. *Zbl. Geol. Palaeont. Teil I* (5/6): 887 - 901.
- Hagemann, S. G.; Leonardos, O. H.; Rodrigues, L.; Walde, D. H. G. 1988. The gold-bearing Canastra Phyllites of Luziânia: A model of thin-skinned thrust mineralization of the Brasília Belt, *Austral. Geol. Soc.*, **23**:187 - 189.
- Hagemann, S. G.; Brown, P. E.; Walde, D. H. G. 1992. Thin-skinned thrust mineralization in the Brasília fold belt: the example of the old Luziânia gold deposit. *Mineralium Deposita*, **27**:293-303.
- Hapke, B. 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy, I. Theory. *J. Geophys. Res.*, **86**: 3039 – 3054.
- Hauff, P.; Kruse, F.; Madrid, R.; Fraser, S.; Huntington, J.; Jones, M. & Watters, S. 1991. Illite Crystallinity - Case Histories Using X-Ray Diffraction and Reflectance Spectroscopy to Define Ore Host Environments. In: Eighth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, *Proceedings*, Denver, Colorado, USA, **I**:447-458.
- Hodgson, C.J. & Macgeehan, P.J. 1982. Geological Characteristics of gold deposits in the Superior Province of the Canadian Shield. *Apud* Hodgson, C.J. 1993, Uses (and Abuses) of Ore Deposit Models in Mineral Exploration In: P.A Sheahan & M.E. Cherry (eds.) *Ore Deposit Models*, Geoscience Canada, **II**-1-11
- Hodgson, C.J. 1993. Uses (and Abuses) of Ore Deposit Models in Mineral Exploration In: P.A Sheahan & M.E. Cherry (eds.) *Ore Deposit Models*, Geoscience Canada, **II**-1-11.
- Hovis, W. A. 1965. Infrared Reflectivity of iron oxide minerals. *Icarus*, **4**(4):425-430.
- Hovis, W. A. & Calahan, W.R. 1966. Infrared Reflectance Spectra of Igneous Rocks, Tuffs and Red Sandstone from 0.5 to 2.2  $\mu\text{m}$ . *Journal of the Optical Society of America*, **56**(5):639-643.
- Huguenin, R.L. & Jones, J.L. 1986. Intelligent information extraction from reflectance spectra: absorption band positions. *J. Geophys. Res.* **91**(B9):9585-9598.
- 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. & Lenhoff, C.J. 1971. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: III Oxides and hydroxides. *Modern Geology*, **2**:195 -205.

- Hunt, G.R. 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible near infrared. *Geophysics*, **42**(3): 501-513.
- Hunt, G.R. & Ashley, R.P. 1979. Spectra of Altered rocks in the visible and near infrared. *Econ. Geol.*, **74**: 1613-1629.
- Hunt G.R. & Vincent, R.K. 1968. The behaviour of Spectral Feature in the Infrared Emission from Particulate Surfaces of Various Grain Sizes. *J. Geophys. Research*, **73**(18):6039-6046.
- Hungtington, J.F. & Green, A.A. 1988. Recent Advance and Practical Considerations in Remote Sensing applied to Gold Exploration. In: Bicentennial Gold, Melbourne, *expanded abstracts*, 246-257.
- Hutchinson, R.W.1987. Metallogeny of Precambrian Gold Deposits: Space and Time Relationships. *Econ. Geol.* **82**:1993-2007
- Kruse, F.A.; Lefkoff, A.B.; Boardman, J.W.; Heidebrecht, K.B.; Shapiro, A.T.; Barloon, P.J. & Goetz, A.F.H. 1993. The Spectral Image Processing System (SIPS), Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment*, **44**:145-163.
- Kruse, F.A.1989. Spectral mapping with Landsat Thematic Mapper and imaging spectroscopy for precious metals exploration. In: 7<sup>th</sup> Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, *Proceedings*, Calgary, Alberta, Canada, p.17-28..
- Kruse, F.A.; Hauff. P.L. 1991. Identification of Illite Polytype Zoning Disseminated Gold Deposits Using Reflectance Spectroscopy and X-Ray Diffraction - Potential for Mapping with Imaging Spectrometers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **29**(1):
- Lang, H.R.; Bartholomew, M.J.; Grove, C.I. & Paylor, E.D. 1990. Spectral Reflectance Characterization (0.4 to 2.5 and 8.0 to 12.0  $\mu\text{m}$ ) of Phanerozoic Strata, Wind River and Southern Bighorn Basin Areas, Wyoming. *Journal of Sedimentary Petrology*, **60**(4): 504-524.
- London, J.; Bojkov, R.J.; Oltmans, S. & Kelley, J.I. 1976. *apud* Zullo Jr., J. (1996). Atmospheric Correction of Satellite Images in a Tropical Region. In: *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Viena, Austria, p.831-834.

- Loughlin, W.P. 1991. Hydrothermal Alteration Mapping for Mineral Exploration Using Principal Component Analysis. *National Remote Sensing Centre - UK, SP (91) WP13*.
- Mackin, S. 1998. SIMIS-FIELD Version 2.8 - Spectrometer Independent Mineral Identification Software. In: *User Manual Version 2.8*.
- Marques, F.B.; Batelochi, M.A. & Möller, J.C.C. (1996). Geologia, Mineração e Lavra do Morro do Ouro - Paracatu (MG). In: XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia - Gold Deposits of South America, p. 204-209.
- Martinez-Alonso, S.E., Atkinson, W.W., Goetz, A.F.H., Kruse, F.A. 1997. Short Wave Infrared (SWIR) Spectrometry of Illite ("Sericitic") to Estimate Temperature of Formation of Hydrothermal Mineral Deposits. In: Twelfth International Conference and Workshops on Applied Geologic Remote Sensing, *Proceedings*, Denver, CO, II: 426-429.
- Martins, E.S. 1991. *Comportamento mineralógico do ouro em perfis de intemperismo nas regiões de Luziânia (GO) e Paracatu (MG)*. Instituto de Geociências - Universidade de Brasília, Brasília. Dissertação de Mestrado.
- Masinter, R.A. & Lyon, R.J.P. 1991. Spectroscopic confirmation of increasing illite ordering with hydrothermal alteration of argillaceous ore in the Gold Bar Mine, Eureka, CO, Nevada. In: Eighth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, *Proceedings*, Denver, Colorado, USA, I:563-571.
- Meneses, P.R.; Freitas-Silva, F.H.; Paradella, W.R. & Ferreira Jr., L.G. 1993. O comportamento espectral e radiométrico dos filitos carbonosos portadores de mineralizações auríferas na Faixa Brasília. In: VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. *Anais*, Curitiba, PR, Brasil. p.266-274.
- Passos, R.V. 1999. *Caracterização da Geometria de Zonas de Alteração Hidrotermal – Estudo de Caso no Depósito Aurífero de Brumal, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Instituto de Geociência - DMG- Unicamp, Campinas, Dissertação de Mestrado, 190 p.
- Pieters, C.M. 1983. Strength of Mineral Absorption Features in the Transmitted Component of Near-Infrared Reflected Light: First Results from RELAB. *J. Geophys. Res.* **88**:9534-9544.
- Pimentel, M.M.; Heaman, L. & Fuck, R.A. 1992. Idade do meta-riolito da sequência Maratá, Grupo Araxá, Goiás: estudo geocronológico pelos métodos U-Pb em zircões, Rb-Sr e Sm-Nd: *An. Acad. Bras. Cienc.*, **64**:19-28

- Pimentel, M.M.; Heaman, L. & Fuck, R.A. 1991. *Apud* Pimentel, M.M.; Heaman, L. & Fuck, R.A. 1992. Idade do meta-riolito da sequência Maratá, Grupo Araxá, Goiás: estudo geocronológico pelos métodos U-Pb em zircões, Rb-Sr e Sm-Nd: *An. Acad. Bras. Cienc.*, **64**:19-28
- Pontara R.C.P. 1998. *Análise do comportamento espectral dos filitos carbonosos para interpretação de imagens*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de Mestrado nº 132, 105p.
- Roberts, R.J.; Radtke, A.S.; Coats, R.R. 1971. Gold-bearing deposits in north-central Nevada and southwestern Idaho. *Econ. Geol.* **66**:14-33.
- Rowan, L.C.; Collins, W.; Kingston, M.J. & Crowley, J.K. 1984. Spectral Reflectance of carbonatite complexes at Mountain Pass, California, and Iron Hill, Colorado. *Environmental Research Institute of Michigan "Remote Sensing for Exploration Geology", Third Thematic Conference*, Colorado Springs.
- Sabine, C. 1999. Remote Sensing for Exploration. Manual of Remote Sensing - 3<sup>rd</sup> Edition. Manuscript.
- Salisbury, J.W. & Hunt, G.R. 1974. Remote Sensing of Rock Types in the Visible and Near-Infrared. In: Int. Symp. Remote Sensing of Environment, 9<sup>th</sup>, *Proceedings*. p.1953-1958.
- Settle, J.J.; Drake, N.A. 1993. Linear Mixing and the Estimation of Ground Cover Proportions. *Int. J. Remote Sensing*, **14**(6):1159-1177.
- Short, N.M. 1998. The Remote Sensing Tutorial Online Handbook. [online] Disponível na Internet via WWW. URL: <http://rst.gsfc.nasa.gov>. Arquivo consultado em 10 de fevereiro de 1999.
- Singh, A. & Harrison, A. 1985. Standardized Principal Components. *Int. J. Remote Sensing*, **6**(6):883-896.
- 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.
- Spatz, D.M. 1996a. Remote Sensing Characteristics of Precious Metal Systems: The Volcanic-Hosted Deposits. In: 11<sup>th</sup> Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, *Proceedings*, Ann Arbor, **I**:1-12.

- Spatz, D.M. 1996a. Remote Sensing Characteristics of Precious Metal Systems: The Sediment-hosted and Detachment Related Deposits. In: 11<sup>th</sup> Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, *Proceedings*, Ann Arbor, I:13-22.
- Spatz, D.M. 1997. Remote Sensing characteristics of the sediment- and volcanic- hosted precious metal systems: imagery selection for exploration and development. *Int. J. Remote Sensing*, **18**(7): 1413-1438.
- Strieder, A. & Nilson, A.A. (1992). *Mélange* ofiolítica nos metassedimentos Araxá de Abadiânia (GO) e implicações tectônicas regionais. *Revista Brasileira de Geociências*. **22**(2):204-215.
- Suita, M.T.F.; Kamo, S.L.; Krogh, T.E.; Fyfe, W.S. & Hartmann, L.A., (1994). U-Pb Ages from the high-grade Barro Alto mafic-ultramafic complex (Goiás, central Brazil): middle Proterozoic continental mafic magmatism and Upper Proterozoic continental collision. In: 8<sup>th</sup> Int. Conf. Geochronology, Cosmochronology and Isotope Geology, Berkeley, USGS Circular 1107, *Abstracts*, p.309.
- Swalf, P.S.; Crósta, A.P. & Souza Filho, C.R. 1999. Estudos sobre a aplicabilidade do uso de dados e técnicas de sensoriamento remoto na prospecção de depósitos auríferos do Tipo Morro do Ouro (MG). In: SBG, VII Simp. Geol. Centro-Oeste e X Simp. Geol. Minas Gerais. SBG-Brasília, Centro-Oeste, Minas Gerais– Brasília. *Boletim de Resumos*. p. 124.
- Swalf, P.S.; Crósta, A.P. & Souza Filho, C.R. 2000. Spectral modeling for identification of mineral assemblages associated with gold mineralization in tropical /sub-tropical environments: a case study in central-western Brazil. In: XXXI Congresso Brasileiro de Geologia (no prelo).
- Tanré, D.; Deroo, C.; Herman, M.; Morcrette, J.J.; Perbos, J. & Deschamps, P.Y. (1990), *Apud* Zullo Jr., J. (1996), Atmospheric Correction of Satellite Images in a Tropical Region, *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Viena, Austria, pp.831-834;
- Taranik, J.V. 1988. Application of Aerospace Remote Sensing Technology to Exploration for Precious Metal Deposits in the Western United States. In: Geol. Soc. of Nevada, Reno, Nevada. Bulk Mined Precious Metals Deposits of the United States. p. 551-576.
- Vane, G. & Goetz, A.F.H. 1993. Terrestrial Imaging Spectrometry: Current Status, Future Trends. *Remote Sensing of the Environment*, **44**:117-126.

- Vincent, R.K. & Hunt, G.R. 1968. Infrared Reflectance from Mat Surfaces. *Applied Optics*, 7(1): 53-58.
- Yon, S.A. & Pieters, C.M. 1988. Interactions of Light with Rough Dielectric Surfaces: Spectral Reflectance and Polarimetric Properties. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 18<sup>th</sup>*, p.581-592.
- Zini, A.; Forlin, R.; Andrezza, P., Souto, A. 1988. Depósito de ouro de Morro do Ouro. Paracatu, Minas Gerais. In: Schobbenhaus, C. & Coelho, C. E. S. (coords.). *Principais Depósitos Minerais do Brasil*. Brasília. DNPM/CVRD. 3: 479-489;
- Zullo Jr., J. 1996. Atmospheric Correction of Satellite Images in a Tropical Region. In: *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Viena, Austria, p.831-834;