

Marco Follador

A caracterização mineral pelo
sensoriamento remoto

VII Curso de Especialização em Geoprocessamento
2004



UFMG
Instituto de Geociências
Departamento de Cartografia
Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha
Belo Horizonte
cartog@igc.ufmg.br

Marco Follador

A CARACTERIZAÇÃO MINERAL PELO SENSORIAMENTO REMOTO

Monografia apresentada ao Curso de Pós-
Graduação em Geoprocessamento,
Departamento de Cartografia, Instituto de
Geociências, Universidade Federal de Minas
Gerais, como requisito parcial à obtenção do
título de especialista em Geoprocessamento.

Orientador: Professor Luciano Vieira Dutra

BELO HORIZONTE
2004

**DEPARTAMENTO DE CARTOGRAFIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
UFMG**

SUMARIO

PREFACIO

1.	INTRODUÇÃO AO SENSORIAMENTO REMOTO	1
	1.1 Generalidades	1
	1.2 Vantagens da observação remota	4
	1.3 O espectro eletromagnético	6
	1.4 Bibliotecas espectrais	7
	1.5 O projeto Landsat	8
2.	DESCRICAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO	10
	2.1 Apresentação	10
	2.2 Características gerais	12
	2.3 Geologia Regional	13
	2.4 O trabalho de campo	15
3.	A EXPLORAÇÃO MINERARIA	23
	3.1 Introdução	23
	3.2 Parâmetros estatísticos das bandas TM	24
	3.3 Composição de cores 147	27
	3.4 Reconhecimento dos Minerais ferríferos: Ratio 3/1 TM	33
4.	CLASSIFICAÇÃO DIGITAL E DISTRIBUIÇÃO DOS MINERAIS	38
	4.1 Introdução	38
	4.2 Classificação supervisionada	39
	CONCLUSOES	43

AGRADECIMENTOS

BIBLIOGRAFIA

PREFÁCIO

O presente trabalho foi realizado para conclusão do Curso de Especialização em Geoprocessamento da Universidade Federal de Minas Gerais em 2004, graças a uma parceria entre Universidades da América do Sul e Européia. Como pesquisador do Projeto Alfa, minha principal função foi de reforçar a relação entre a Universidade de Bolonha e a UFMG no que diz respeito ao estudo de pedras ornamentais.

Os principais objetivos dessa pesquisa foram as possíveis aplicações dos recursos de sensoriamento remoto na exploração de minas, e a caracterização geológica de uma área em MG(Municípios de Oliveira e São Francisco de Paola) utilizando imagens TM Landsat7.

A economia de muitos países em desenvolvimento depende fortemente dos recursos naturais. As novas tecnologias de informação espacial podem contribuir de maneira relevante com as tradicionais metodologias de estudos da terra. Pois, permitem um correto e sustentável uso dos recursos, facilitando sua individualização e caracterizarão e avaliando as mudanças ocorridas em diferentes períodos, assim como os impactos ambientais. Essas informações são extremamente necessárias pra se tomar uma decisão eficiente.

Imagens de sensoriamento remoto podem ser utilizadas para localizar fraturas e falhas onde geralmente concentram-se os depósitos minerais, e para caracterizar os recursos. O projeto em tela, através de técnicas clássicas de processamento digital das imagens, entre elas: Componentes Principais, Divisão, Composições em falsas cores e Classificação multiespectral, tenta evidenciar a distribuição de Granitos, Quartzitos e Ferro na área estudada.

As informações sobre o comportamento espectral das rochas foram encontradas em bibliotecas espectrais disponíveis em internet (USGS Library, ASTER Library,etc.), bancos de dados construídos através de medidas em laboratório. Afloramentos minerais *in situ* apresentam claramente alterações das propriedades físico - químicas manifestando anomalias se comparados às rochas originais.

A vegetação, as vezes muito densa, representa um fator de distúrbio aumentando a incerteza na análise e no reconhecimento dos recursos.

O trabalho, que foi acompanhado por medidas em campo para verificar e melhorar a qualidade dos resultados obtidos serviu como um rápido passeio sobre as possíveis aplicações do sensoriamento remoto na pesquisa dos recursos naturais. Uma abordagem mais aprofundada do assunto, com particular atenção no estudo das anomalias espectrais das rochas alteradas e na influência da vegetação, será provavelmente o enfoque do meu projeto de doutorado.

MARCO FOLLADOR

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO AO SENSORIAMENTO REMOTO

1. Generalidades

Voar sempre foi um dos sonhos mais intensamente perseguidos pela Humanidade, mas foi apenas recentemente que Santos Dumont conseguiu os meios necessários para a realização desse desejo. Desde então o crescimento tecnológico vem avançando em um ritmo extraordinário e permitindo, assim, o enriquecimento de nossos conhecimentos sobre a Terra e seus fenômenos.

A observação por sensoriamento remoto da superfície do planeta constitui material de estudo do Geoprocessamento, ciência que compreende não só a aquisição das imagens, mas também seu posterior tratamento num determinado contexto aplicativo.

Moura (2003) define o Geoprocessamento como “*palavra que engloba processamento digital de imagens, cartografia digital e os sistemas informativos geográficos GIS*”. Esta definição bem se aplica às imagens provenientes dos sensores montados sobre plataformas espaciais (*Fig. 1.1*), embora a fotografia aérea e a videografia continuem sendo ferramentas fundamentais para os estudos ambientais.



Figura 1.1: Exemplo de imagem remota obtida por satélite

Entre a Terra e o satélite existe uma interação energética, seja por reflexão da energia solar (sensor passivo) ou por impulso artificial (sensor ativo) que será gravado para uma seguinte interpretação num contexto aplicativo (*Fig. 1.2*).

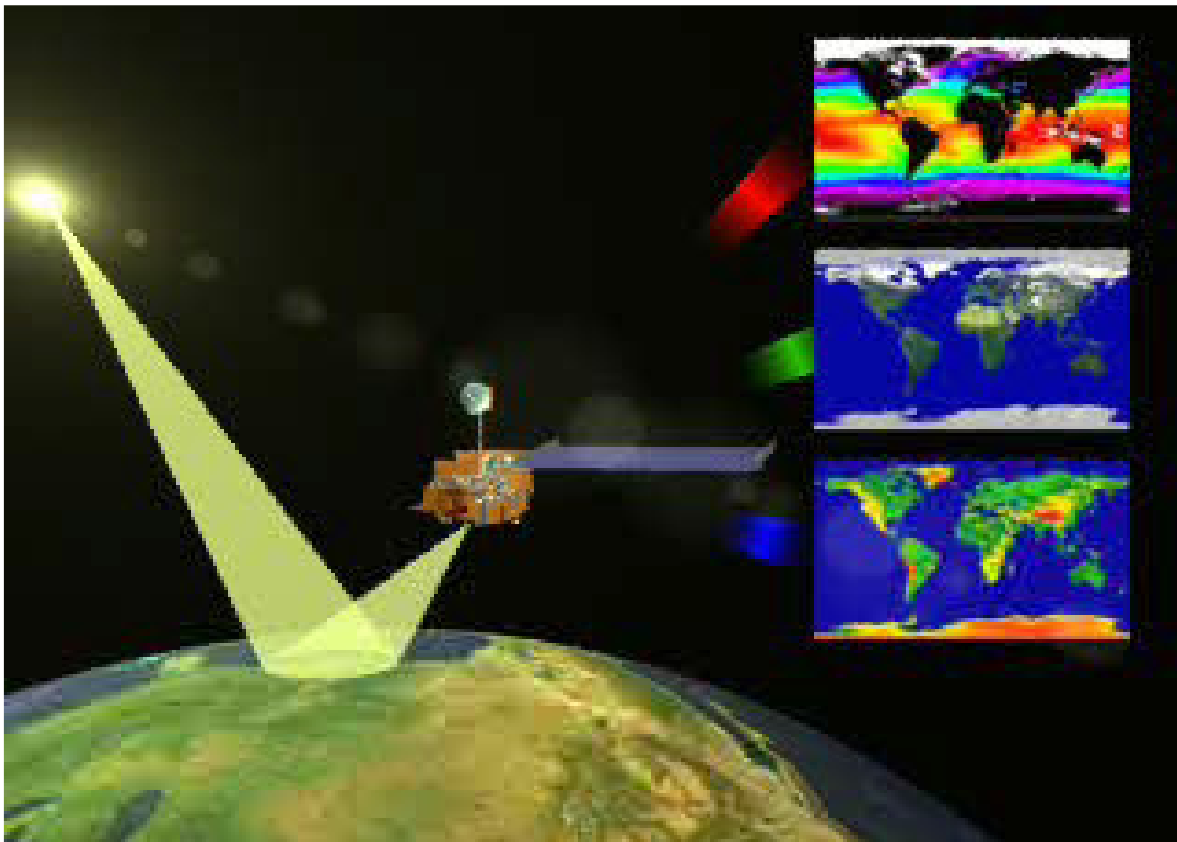


Figura 1.2: *Sensor passivo e possíveis interpretações digitais das imagens gravadas*

Geralmente um sistema completo de geoprocessamento, desde o satélite até o usuário final, inclui os seguintes elementos (Fig 1.3):

1. Fonte de energia, solar ou emitida pelo próprio sensor
2. Camadas terrestres recebem a energia e a refletem ou emitem de acordo com as suas características físicas
3. Sensor mais a plataforma que o hospeda, recebem a energia refletida, a codificam e gravam ou mandam ao sistema de recepção.
4. Sistema de recepção recebe as informações do satélite e as grava de forma comercializável, depois das devidas correções.
5. Laboratório de geoprocessamento converte os dados em informações temáticas de interesse, para avaliar e resolver um problema.
6. Usuário final analisa o resultados obtidos e avalia as conseqüências

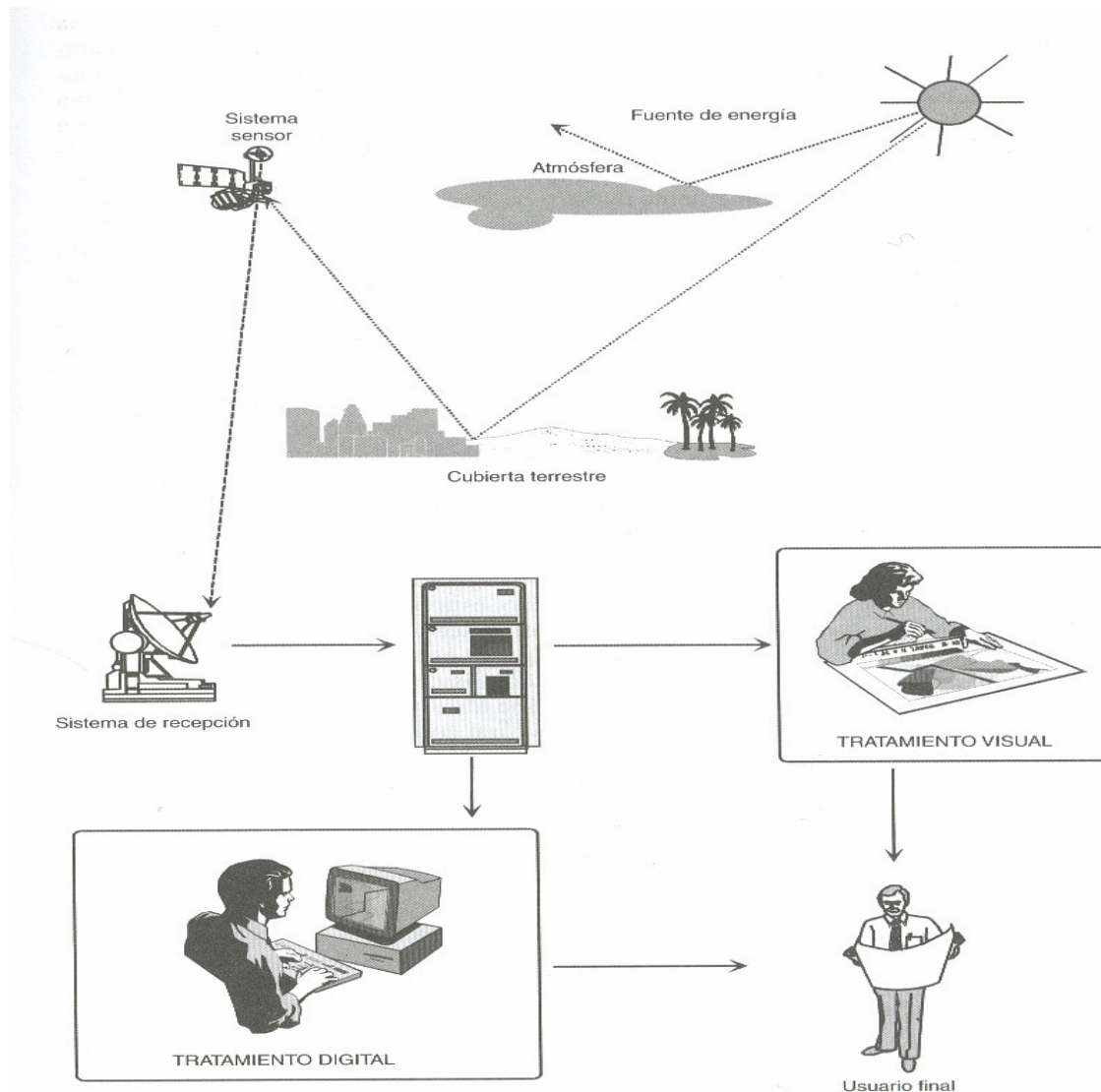


Figura 1.3: *Sistema completo de Geoprocessamento*

O uso cada vez maior de diferentes sensores de observação terrestre está proporcionando não só uma enorme quantidade de dados, mas também uma nova maneira de estudar a superfície da Terra. O sensoriamento remoto, assim como as metodologias de processamento das imagens digitais, permitem-nos acessar um banco de informações completo e muito extenso. Fundamental para o aproveitamento dos dados é a aplicação de recursos computacionais que aumentam as possibilidades de análise, tornando o processo mais rápido e econômico. É importante não perder a capacidade de abstração e ter o conhecimento necessário para interpretar corretamente estas informações, para que “*não se tornem um labirinto, no qual o encantamento com a nova tecnologia cegue o pesquisador*” (Moura, 2003).

2. Vantagens da observação remota

O sensoriamento remoto é uma das poucas fontes de observação global, pois, os sistemas orbitais nos permitem obter informações sobre a totalidade do planeta em condições comparáveis (altura, tipo do sensor). Esta propriedade é muito importante para entender os fenômenos que dizem respeito ao meio ambiente da Terra como a depleção da camada de ozônio, o efeito estufa e o derretimento das geleiras nas montanhas.

É bem conhecida a dificuldade de obter informações numa escala global, dado que cada País utiliza um banco de dados construído segundo critérios diferentes e de difícil integração. O sensoriamento remoto, pelo contrário, nos oferece uma visão completa, homogênea, das características do planeta, facilitando estudos de problemas globais.

A altura do satélite permite detectar grandes espaços; uma imagem TM Landsat cobre uma superfície de 34000 km² por aquisição e chega até milhões de km² em uma imagem do NOAA.

Existem fenômenos que podem ser percebidos somente com uma perspectiva global, como no caso da individualização de fraturas e falhas, onde geralmente se encontram depósitos minerais (Short e Blair 1986, Floyd 1999).

Outra vantagem do sensoriamento remoto é a possibilidade de se trabalhar em escalas diferentes (*Fig 1.4*), utilizando sensores de caráter local (com precisão de 1m² e cobertura de centenas de km²) até sensores de visão global (com precisão de km² e cobertura de milhões de km²). Esta propriedade é muito importante para estudos ambientais onde as relações entre as variáveis podem mudar em relação à escala.

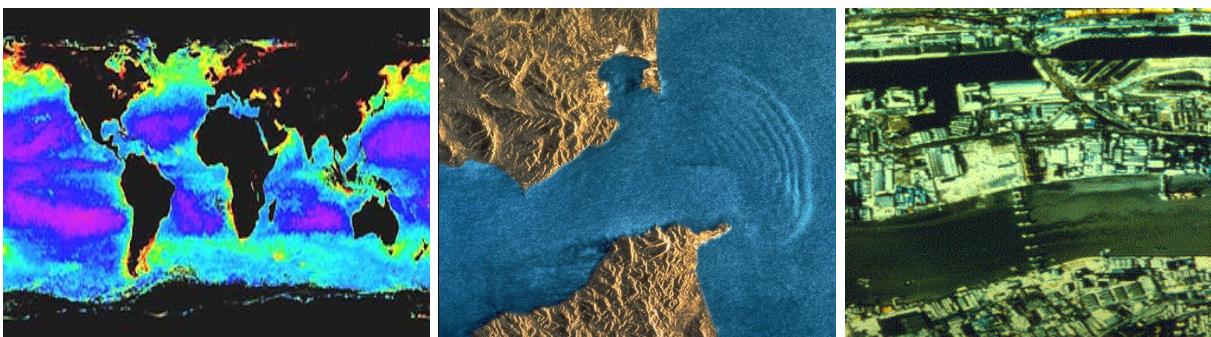


Figura 1.4: *Observação em multiescala*

Os sensores ótico-eletrônicos nos permitem obter imagens sobre tipos de energias que não são perceptíveis ao olho humano, como o infravermelho ou as microondas. Estas bandas contêm importantes informações para estudar fenômenos ambientais como

distribuição espacial das temperaturas, estado hídrico ou stress da vegetação, individuação de incêndios e correntes marinhas (*Fig. 1.5*).

Os satélites podem, em função das características orbitais, adquirir imagens periódicas da Terra em datas diferentes, facilitando assim uma análise multi-temporal de processos como desertificação, retirada do gelo polar ou comportamento de bacias hídricas em diferentes estações (*Fig1.5*).

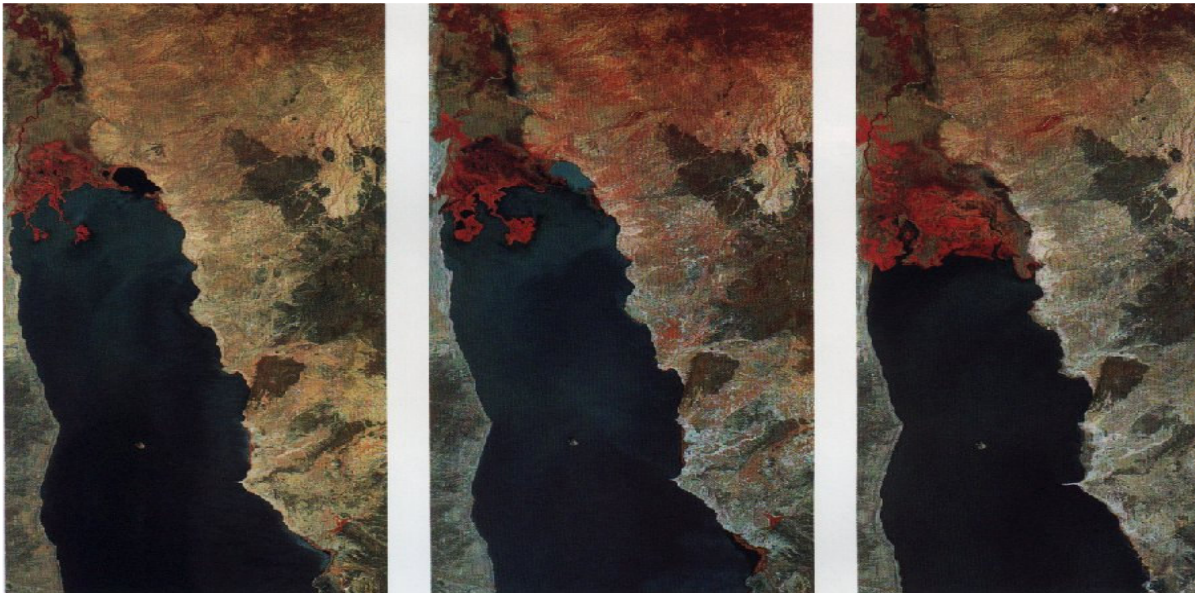


Figura 1.5: *Imagens da lagoa de Rosarito, Espanha, em diferentes datas. Banda IR proximo*

O processamento digital de imagens facilita a interpretação do fenômeno estudado e permite integrar os resultados com outro tipo de informações geográficas, obtendo assim uma visão mais completa e real da paisagem (*Fig 1.6*). A tecnologia de radar, que se encontra em rápido desenvolvimento, e a interferometria diferencial, permitem gerar modelos digitais do terreno muito precisos que podem ser usados para estudos topográficos, modelação de movimentos sísmicos ou produzidos por vulcões (Coltelli, Dutra *et al.*, 1996).

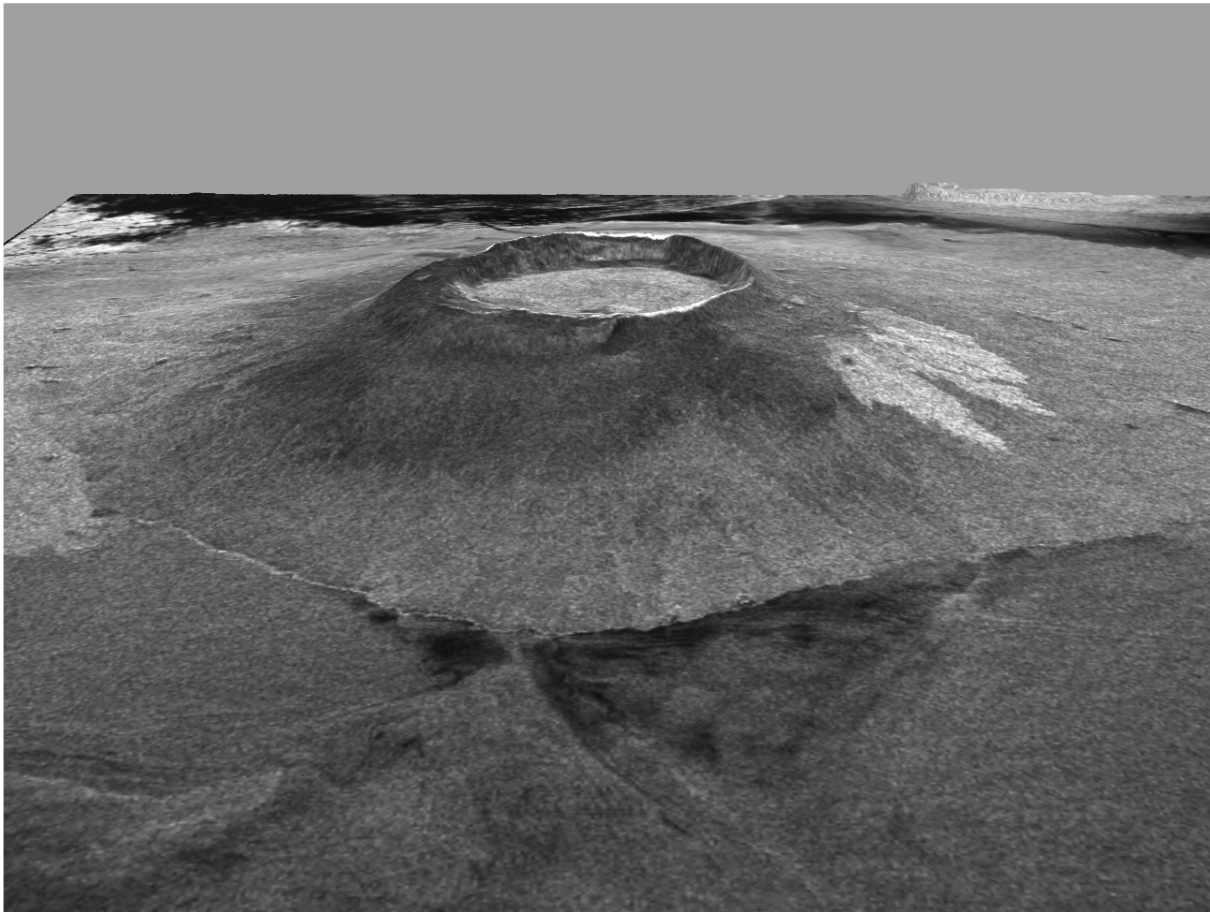


Figura 1.6: Imagem tridimensional construída com uma imagem SIR-C e um MDE

3. O espectro eletromagnético

A organização de bandas (intervalos de comprimento de onda ou de frequência, onde a radiação eletromagnética tem um comportamento similar) se chama espectro eletromagnético (*Fig 1.8*). Compreende desde os comprimentos de onda menores (raios gamma) até os quilométricos (telecomunicações).

No sensoriamento remoto se utilizam principalmente as seguintes bandas:

- Espectro visível (0,4 - 0,7 μm). Nesta região existem 3 bandas: Azul (0,4 - 0,5 μm), Verde (0,5 - 0,6 μm) e Vermelho (0,6 - 0,7 μm): São as cores primárias que o nosso olho percebe.
- Infravermelho próximo (0,7 - 1,3 μm), é muito importante no estudo das massas vegetais e concentração de umidade.
- Infravermelho médio (1,3 - 8 μm), incorpora o SWIR (*short wave infrared*, 1,3 - 2,5 μm) útil para estimar a umidade da vegetação e no solo, e o infravermelho médio (cerca

de 3,7 μm) utilizado no reconhecimento de focos de alta temperatura (incêndios, vulcânicos).

- Infravermelho térmico (8 - 14 μm), inclui a porção do espectro da Terra onde se detecta o calor emitido por as camadas terrestres.
- Micro-ondas (>1mm), transparentes à camada das nuvens. Aplicações de radar.

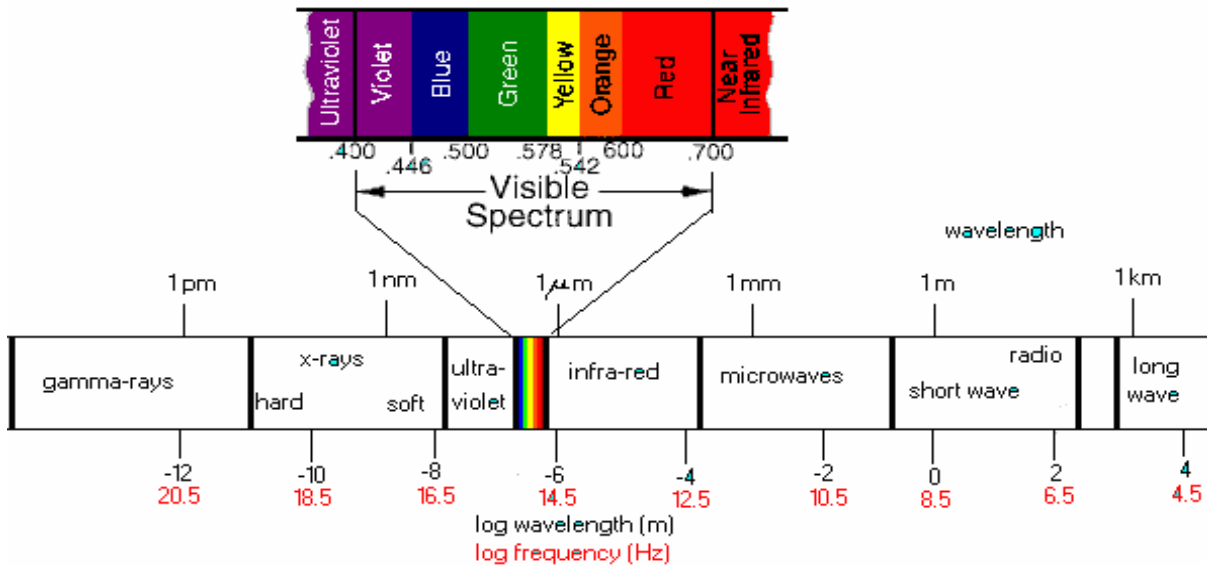
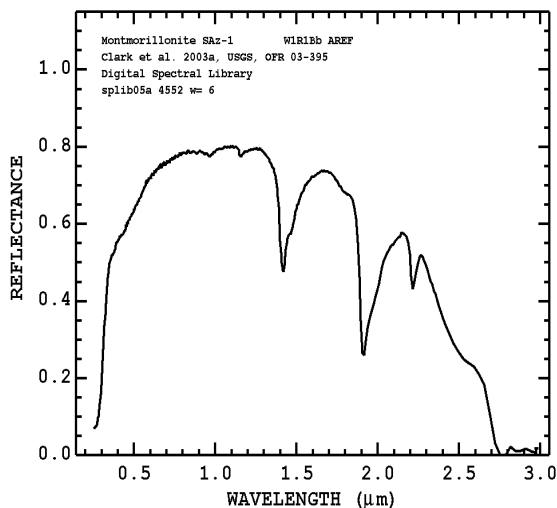


Figura 1.8: *Espectro electromagnético*

4. Bibliotecas espectrais

Foram utilizadas informações e curvas espectrais das rochas contidas em bibliotecas disponíveis na internet. Estas são coleções de espectros, medidas em laboratório em condições controladas, que recolhem as informações sobre a refletividade de um amplo número de materiais (Fig 1.7).

Entre elas destacam-se as bibliotecas ASTER, compilada pelo *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), (<http://speclib.jpl.nasa.gov>), e a do Serviço Geológico dos Estados Unidos, (<http://speclab.cr.usgs.gov>), que foi a referência na presente pesquisa.



```
[TITLE]:Montmorillonite-CM20-DESCRIPT-¶
DOCUMENTATION_FORMAT:MINERAL-¶
SAMPLE_ID:CM20-¶
MINERAL_TYPE:Phyllosilicate-¶
MINERAL:Montmorillonite:(Montmorillonite:group)-¶
FORMULA:-(Na,Ca)0.33(Al,Mg)2Si4O10(OH)2*nH2O-¶
FORMULA_HTML:-(Na,Ca)0.33(Al,Mg)2Si4O10(OH)2*nH2O-¶
COLLECTION_LOCALITY:Husband:Mine,:Polkville,:Mississippi-¶
ORIGINAL_DONOR:Clay:Mineral:Standard,:Wards:Natural:Science:Inc-¶
CURRENT_SAMPLE_LOCATION:USGS:Denver:Spectroscopy:Laboratory-¶
ULTIMATE_SAMPLE_LOCATION:USGS:Denver:Spectroscopy:Laboratory-¶
```

Figura 1.7: Exemplo de curva espectral, Fonte USGS library

5. O projeto Landsat

O primeiro satélite da família ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*), foi colocado em órbita no dia 23 julho de 1972. Esta família de satélites, chamada Landsat desde seu segundo lançamento em 1975, tem sido o projeto mais frutífero do sensoriamento remoto até hoje, devido à boa resolução, caráter global e periódico das observações e a fácil comercialização (Chuvieco, 2002).

Os três primeiros satélites operaram de 1972 a 1985, incorporando um MSS (*Multispectral Scanner*) e três câmeras de vídeo RBV (*Return Beam Vidicon*). Eles foram substituídos por uma segunda geração de Landsat (4, 5 e 7). O Landsat 6 foi lançado em 1993, mas não conseguiu alcançar sua órbita e ficou perdido. Os novos satélites contam com um sensor chamado *Thematic Mapper* (TM), projetado para cartografia temática, que aumenta a resolução espacial de 79 a 30 m, e passa de 4 a 7 bandas e de 6 a 8 bits. O último, o Landsat 7 (*Fig 1.1*), incorpora um sensor ETM+, que adiciona uma banda pancromática (8) com resolução de 15m e aumenta a resolução da banda térmica de 120m a 60m (*Tab. 1.1*). O TM é um scanner ótico-eletrônico multiespectral; um espectrômetro divide a energia refletida da superfície do planeta em diferentes intervalos de comprimentos de onda, chamadas bandas espectrais. Cada banda é gravada em uma imagem.

Characteristic	Landsat 4, 5 thematic mapper (TM)	Landsat 7 enhanced TM	SPOT multispectral scanner (XS)	SPOT panchromatic (Pan)	AVIRIS hyperspectral scanner
<i>Spectral region</i>					
Visible and reflected IR	0.45 to 2.35 μm	0.45 to 2.35 μm	0.50 to 0.89 μm	–	0.40 to 2.50 μm
Panchromatic	–	0.52 to 0.90 μm	–	0.51 to 0.73 μm	
Thermal IR	10.5 to 12.5 μm	–	–	–	
<i>Spectral bands</i>	7	8	3	1	224
<i>Terrain coverage</i>					
East to west	185 km	185 km	60 km	60 km	10.5 km cross-track
North to south	170 km	170 km	60 km	60 km	
<i>Ground resolution cell</i>					
Visible and reflected IR	30 by 30 m	30 by 30 m	20 by 20 m	–	20 m
Panchromatic	–	15 by 15 m	–	10 by 10 m	
Thermal IR	120 by 120 m	60 by 60 m	–	–	

Tabela 1.1: *Características do Landsat TM, SPOT e AVIRIS, muito usados na exploração mineral*

CAPITULO 2

DESCRICÃO DA ÁREA DE TRABALHO

1. Apresentação

O presente trabalho de exploração mineral e caracterização geológica refere-se à uma área localizada entre os municípios de Oliveira, Claudio e São Francisco de Paula, Minas Gerais, Brasil (*Fig 2.1*).

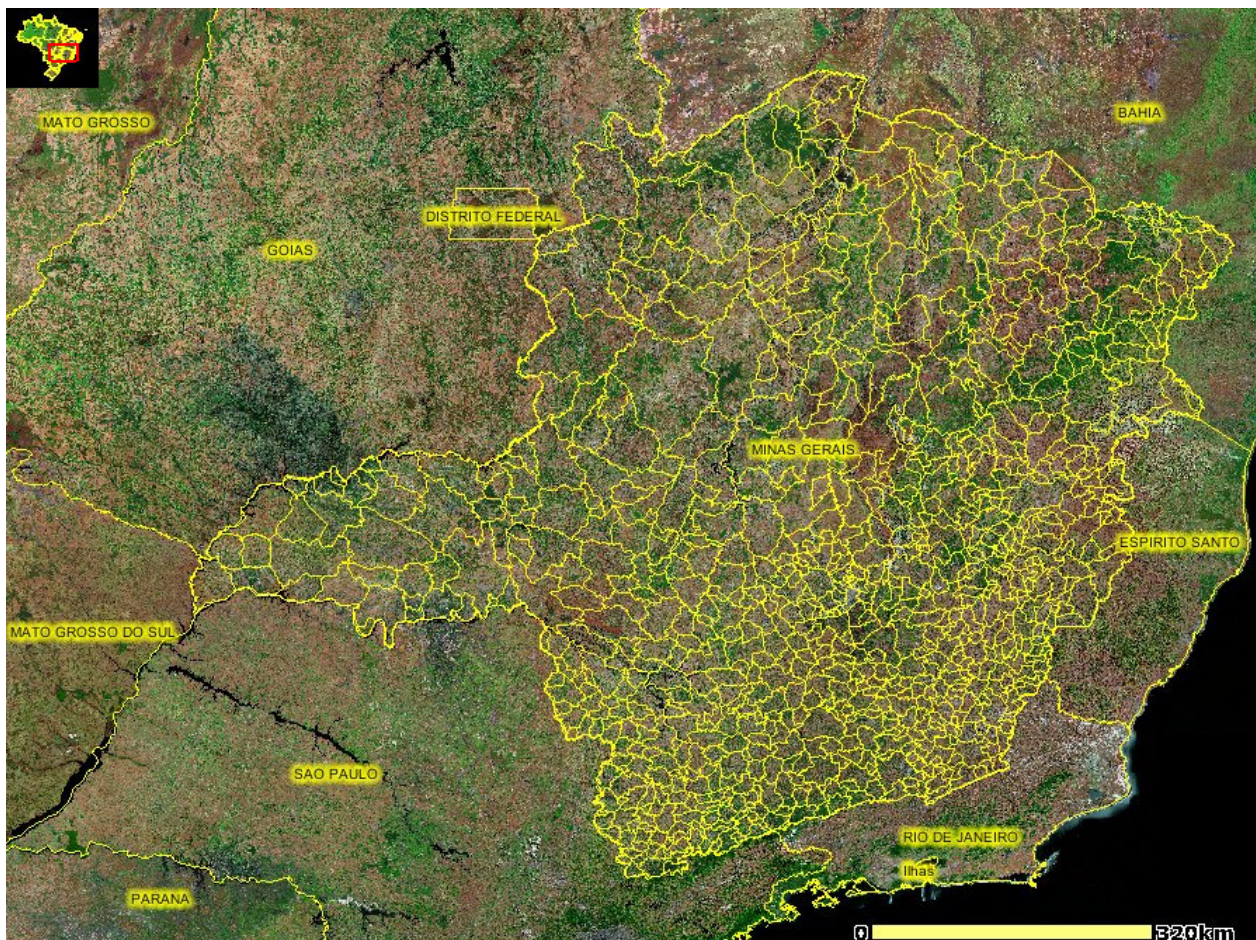


Figura 2.1: Localização do estado de Minas Gerais MG, Brasil

A região em estudo situa-se entre as latitudes (20°00'04" S) e (21°12'06" S) e entre as longitudes (44°00'07" W) e (45°26'42" W) abrangendo uma superfície de aproximadamente 16177 Km² (Fig 2.2).

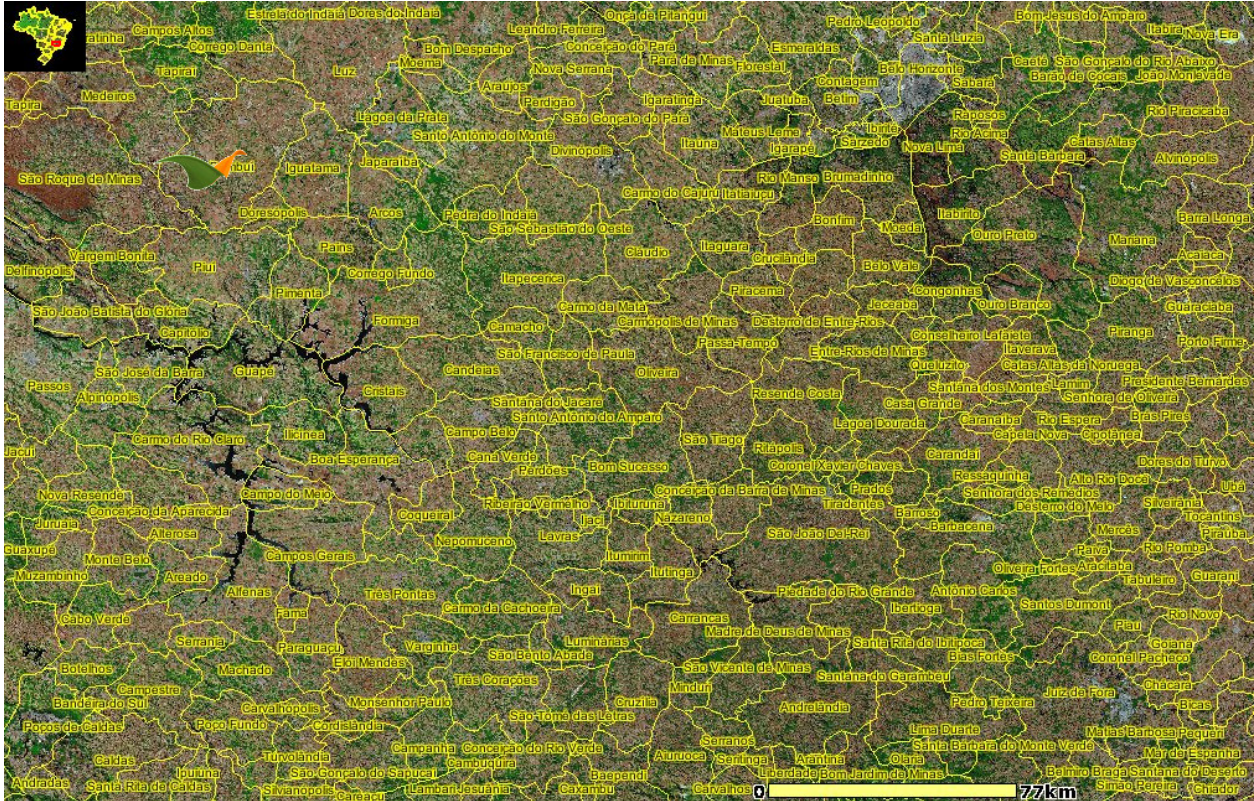


Figura 2.2: Região de MG objeto da exploração e caracterização geológica, enfoque desta pesquisa

Devido à grande extensão, baixa densidade dos afloramentos e à presença de uma camada vegetal, o mapeamento dos minerais ferríferos, dos granitos e particularmente dos quartzitos será bastante trabalhoso e complexo, fornecendo resultados às vezes poucos claros e úteis. Para melhorar e verificar a qualidade da análise foi feito um trabalho de campo, visitando numerosas pedreiras e afloramento das rochas em estudo.

Em termos geológicos, a região está localizada na porção sul do Cráton do São Francisco (CFS), a cerca 80 km a sudoeste do Quadrilátero Ferrífero. A maior parte da área compreende o embasamento arqueano do CFS, constituído por rochas granitognaissicas frequentemente migmatizadas e deformadas em regime ductil. Diques máficos, de orientação predominante NW-SE, cortam as unidades anteriores. Pode-se observar também, pequenas bacias sedimentares que podem estar relacionadas à atividades neotectônicas.

2. Características gerais

No contexto geomorfológico regional a área em estudo posiciona-se dentro de dois grandes domínios centrados na Bacia do Alto São Francisco: o Planalto Dissecado do Sul de Minas e a Depressão Sanfranciscana. No geral predomina um relevo bastante arrasado com formas onduladas e colinas subarredondadas; devidas às constantes alterações climáticas, onde a morfogenese úmida intensificou o aprofundamento dos vales e promoveu a dissecção da superfície até então plana. Essa evolução morfológica propiciou o desenvolvimento de vertentes côncavas-convexas ravinas, vales em V nos canais de cabeceira e vales com fundo chato nos cursos d'água maiores. Tal conjunto morfológico, junto com planícies fluviais com rampas de colúvio, caracteriza a morfodinâmica holocênica (CETEC, 1985; Campello 1997).

As altitudes regionais variam entre 900 e 1300m; as porções maiores se encontram na Serra dos Alemães (1296m), onde se localiza o ponto test FC08, indicativo do Morro de Ferro. As altitudes menores posicionam-se ao longo das várzeas que margeiam o rio Jacaré e não ultrapassam os 1000m.

Os solos, resultados das alterações das rochas, apresentam características diferentes em base ao litotipo de origem. Solos cor rosa (às vezes também amarelo-branco) derivam das alterações dos gnaiss-migmáticos; cores vermelhas escuras são resultados das alterações de diques máficos e outras rochas básicas. Os quartzitos, resultam em solo arenoso, de cor branca-cinza, onde se desenvolve vegetação de baixo porte

A vegetação predominante são as pastagens e o cerrado; às vezes se encontram áreas com vegetação primitiva, floresta tropical, principalmente nos morros e em certas nascentes fluviais.

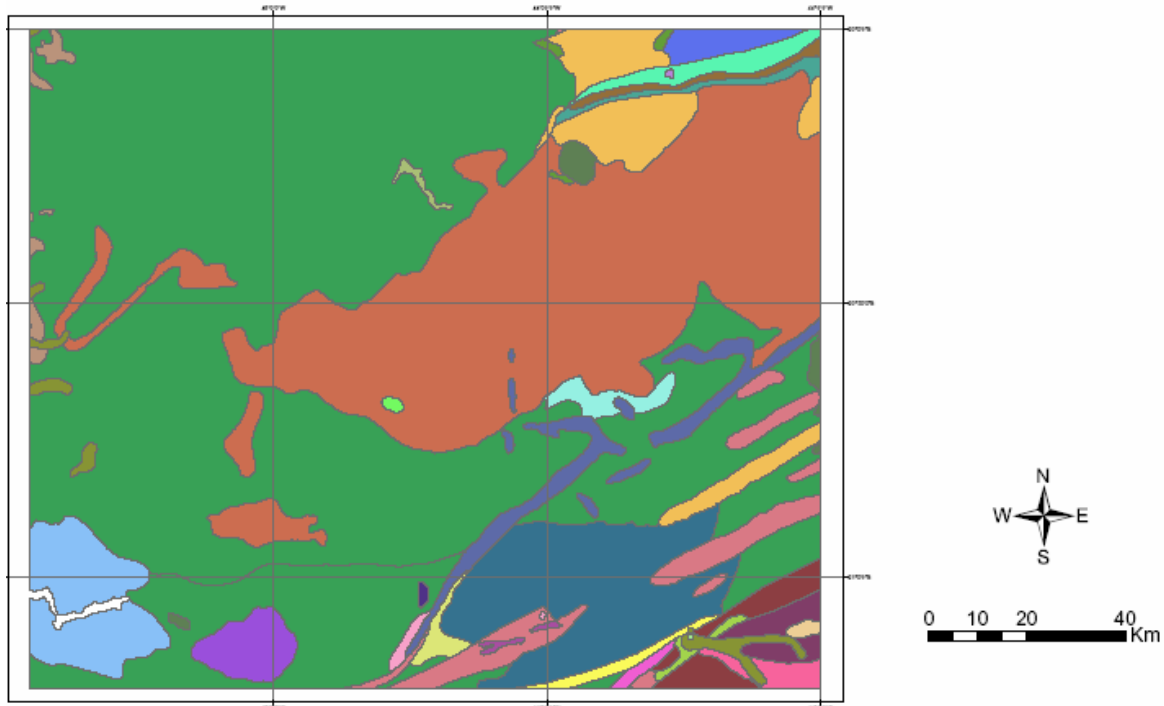
Uma alta densidade de drenagem irriga toda a área mapeada, que se encontra o divisor de águas de duas grandes bacias hidrográficas: a do Rio São Francisco e a do Rio Grande. O principal Rio que corta a região é o Rio Jacaré, que segue uma direção E-W com elevado nível de assoreamento. Os rios em maioria desaguam na bacia do Rio Grande, enquanto os ribeiros Boa Vista, do Engenho e tributários, fazem parte da Bacia do São Francisco.

3. **Geologia Regional**

A região apresenta uma grande variedade de litotipos (*Fig 2.3*) que podem-se ragrupar nos seguintes complexos (Campello 1997):

- I. Gnaissico-Migmático; o complexo metamórfico Campo Belo (CMCB) é constituído por rochas gnaissicas e granitoides do facies anfibólito, além de tipos litológicos subordinados do facies granulito. Os migmatitos apresentam geralmente bandas máficas e felsicas alternadas, composição granodiorítica a granítica, granulação média à grossa. Cor cinza. Mostram-se muitas vezes foliados. As estruturas são dos tipos nebulítica, shollen e raramente agmática. Encraves máficos deformados (composição anfibolítica) de diferentes tamanho e formas são frequentes. Veios graníticos a pegmatóides cortam as diversas estruturas, sendo provavelmente resultado das últimas manifestações de fusão dos gnaisses. O domínio granitoide é constituído por rochas de composição granítica a granodiorítica, frequentemente associados aos migmatitos. Os gnaisses migmatíticos são as rochas mais abundantes na região de estudo (principalmente hornblenda-biotita, gnaisses e diversas estruturas migmatíticas).
- II. Supergrupo Rio das Velhas; divide-se em dois grupos: o grupo Nova Lima, constituído por 3 unidades (1-Metavulcânica: xistos verdes, tufáceos e metaultramáficas; 2-Metassedimentar química: formação ferrífera, xistos tufáceos e grafitosos; 3-Metaclástica: xistos carbonáticos, quartzitos imaturos, quartzo e metaconglomeratos) e o grupo Maquie constituído por duas formações (1-Palmital: filitos, quartzo, quartzitos e metagrauvascas; 2-Casa Forte: quartzito, filitos e metaconglomeratos).
- III. Supergrupo Minas; constituído por o grupo de Caraça (ortoquartzito, metaconglomerado, filito, quartzito sericitico e filito quartzoso, filito grafitos, formação ferrífera facies óxido) e o grupo de Itabira (itabirito, itabirito dolomítico).
- IV. Diques Máficos; diques constituem lineamentos finos e contínuos ao longo de centenas de metros a dezenas de Km, com espessura média em torno de 40m. Petrograficamente são variedades de composição básica, basaltos, gabbros e diabásios.

GEOLOGIA REGIONAL



- Batolito granítico São Tiago e pegmatitos estaníferos associados. ERA: Proterozoico PERÍODO: Inferior
- COMPLEXO BARBACENA: anfíbolitos, metavulcânicas ácidas. ERA: Arqueano
- COMPLEXO BARBACENA: gabro São Sebastião da Vitória. ERA: Arqueano
- COMPLEXO BARBACENA: gnaisses, migmatitos, granitoides, gnaisses e xistos grafitosos, ultramáficas e máficas, formações ferríferas, gnditos e quartzitos. ERA: Arqueano
- COMPLEXO BARBACENA: granitos a quartzo-dioritos, gnaissificados ou não. ERA: Arqueano
- COMPLEXO BELO HORIZONTE: gnaisses, migmatitos e granitoides foliados ou não. ERA: Arqueano
- COMPLEXO PASSA-TEMPO: gnaisses charnockíticos e enderbiticos, gnaisses kinzigíticos, metamáficas e metaultramáficas. ERA: Arqueano
- COMPLEXO RESSAQUINHA: granitoides dioríticos a graníticos, metagabros subordinados. ERA: Proterozoico PERÍODO: Inferior
- Corpos ultramáficos, metamorfizados ou não. ERA: Indiviso
- Depósitos coluvionares, aluvionares e de terracos. ERA: Cenozoico PERÍODO: Quaternário
- GRUPO DOM SILVERIO: mica xistos, quartzitos, anfíbolitos, tremolititos e gnditos. ERA: Proterozoico PERÍODO: Inferior
- GRUPO MATA DA CORDA - FM CAPACETE: arenitos sineríticos. ERA: Mesozoico PERÍODO: Cretáceo Superior
- Granito Porto Mendes. ERA: Proterozoico PERÍODO: Médio
- Granitoide Bom Sucesso. ERA: Arqueano
- Granitos e granitoides. ERA: Proterozoico PERÍODO: Superior
- Rochas básicas. ERA: Indiviso
- Rochas da suite charnockítica dominante. ERA: Arqueano
- SUPERGRUPO ALTO RIO GRANDE - GRUPO SÃO JOÃO DEL REI - FM CARANDAI: metadiamictitos. ERA: Proterozoico PERÍODO: Superior
- SUPERGRUPO ALTO RIO GRANDE - GRUPO SÃO JOÃO DEL REI - FM PRADOS: metassilitos, metapelitos, calcio-xistos. ERA: Proterozoico PERÍODO: Superior
- SUPERGRUPO ALTO RIO GRANDE - GRUPO SÃO JOÃO DEL REI - FM RIO ELVAS: metacalcários, metapelitos. ERA: Proterozoico PERÍODO: Superior
- SUPERGRUPO ALTO RIO GRANDE - GRUPO SÃO JOÃO DEL REI - FM TIRADENTES: quartzitos, metassilitos. ERA: Proterozoico PERÍODO: Superior
- SUPERGRUPO MINAS - GRUPO CARACA: quartzitos, filitos e conglomerados. ERA: Proterozoico PERÍODO: Inferior
- SUPERGRUPO MINAS - GRUPO ITABIRA: itabiritos, dolomitos e filitos. ERA: Proterozoico PERÍODO: Inferior
- SUPERGRUPO MINAS - GRUPO ITABIRA: sucessão metadetrítica, com termos químicos, vulcânicos e vulcanoclasticos subordinados. ERA: Proterozoico PERÍODO: Inferior
- SUPERGRUPO MINAS INDIVISO: em geral indica faixas dos grupos Itabira e/ou Caraca. ERA: Proterozoico PERÍODO: Inferior
- SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS - GRUPO NOVA LIMA: sequência metavulcano-sedimentar. ERA: Arqueano
- SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS INDIVISO: em geral, corresponde ao GRUPO NOVA LIMA. ERA: Arqueano
- SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS: gnditos e outros horizontes manganésíferos. ERA: Arqueano
- SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS: metavulcanitos máficos e ultramáficos de Mateus Leme. ERA: Arqueano
- SUPERGRUPO SÃO FRANCISCO - GRUPO BAMBUI - SUBGRUPO PARAÓPEBA INDIVISO. ERA: Proterozoico PERÍODO: Superior
- Tonalitos. ERA: Indiviso
- lago; lagoa; represa

Figura 2.3: Esboço geológico da área em estudo

4. O trabalho de campo

Para melhorar o conhecimento sobre a área de estudo, e verificar os resultados do Processamento Digital das imagens TM, foi feito um trabalho de campo no mês de outubro 2004. Fundamental foi a colaboração do geólogo Marcos Campello, que está realizando seu projeto de doutorado na mesma região.

Em seguida serão apresentados os pontos teste FC (Follador-Campello), as coordenadas UTM, as fotos e as notas tomadas para descrever e memorizar as características dos afloramentos visitados.

- FC01: afloramento de gnaiss migmatítico cinza, rocha tipo “knwalight”; 2 Km de Claudio; parcial cobertura vegetal (527139,5; 7740857,6)UTM; *Fig 2.4*



Figura 2.4: Afloramento gnaiss-migmatítico, 2Km da cidade de Claudio, FC01

- FC02: grande afloramento de Pirassena, distrito de Itapeçerica, gnaiss migmatítico cinza; (509587,5; 7747082)UTM; *Fig 2.5 e Fig 2.6*



Figura 2.5: Afloramento de Pirassena, gnaiss-migmatítico, FC02



Figura 2.6: A) Superfície do afloramento B) Pormenor do gnaiss migmatítico, cor cinza

- FC03: afloramento a NE do FC02, mesmo gnaiss migmatítico cinza; partial cobertura vegetal; (511073; 7747917)UTM; Fig 2.7



Figura 2.7: Afloramento de gnaiss migmatítico, a NE do FC02; ponto teste FC03

- **FC04**: afloramento de gnaiss migmatítico, perto de uma pequena lagoa; (511073; 7747917)UTM; Fig 2.8



Figura 2.8: A) Afloramento de gnaiss-migmatítico, FC04 B) Lagoa perto do FC04, referencia geografica

- **FC05**: grande afloramento, pedra abandonada na fazenda Mandaçaia, de Rubens Paiva, no município de Oliveira; gnaiss cinza, bandeamento da rocha (banda clara: Kfeldspato+quartzo; banda escura: mica+ anfiboli); parcial cobertura vegetal; (514309; 7716005)UTM; Fig 2.9

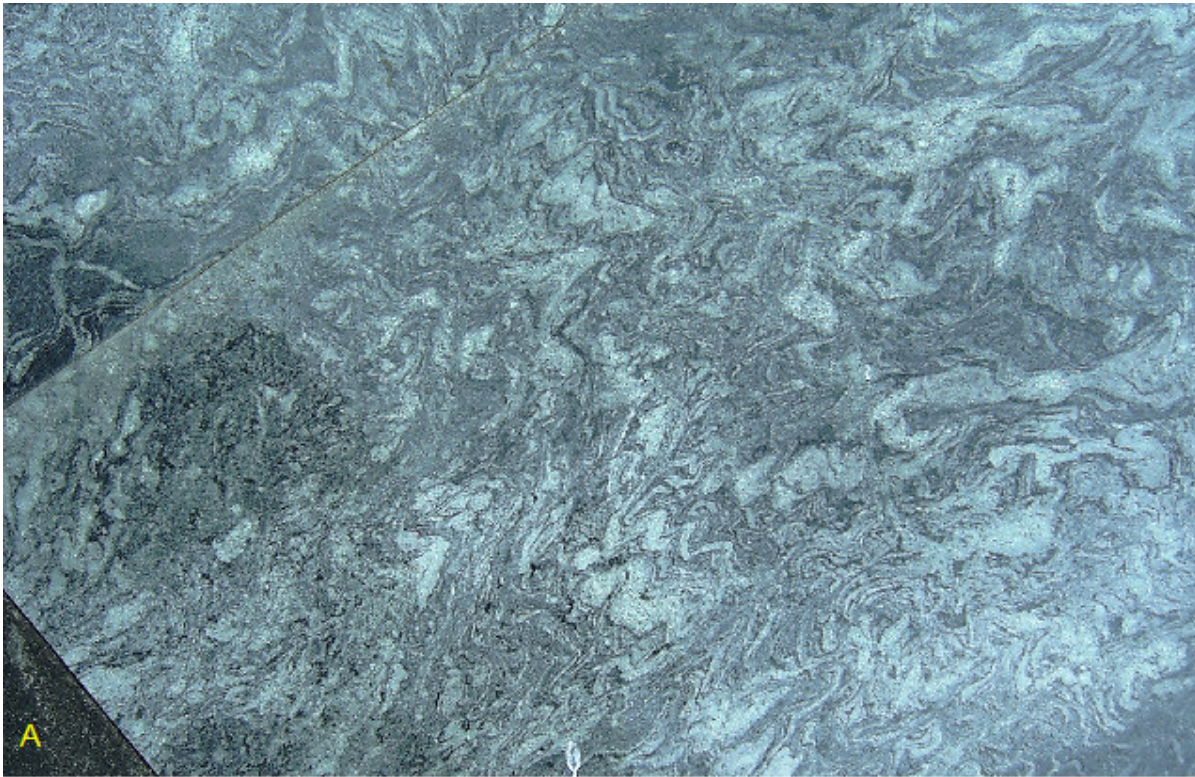


Figura 2.9: Afloramento de gnaiss migmatítico, FC05; A) Pormenor da rocha B) Pedreira paralisada, na fazenda Mandaçaia, município de Oliveira C) Blocos abandonados, não comercializados por causa de defeitos ou impurezas

- FC06: pedreira - Mineração Covardado no município de São Francisco de Paula, perto da rua; gnaiss migmatítico cinza; cobertura parcial vegetal e de solo; (489436, 7701055) UTM; Fig 2.10



Figura 2.10: *Pedreira-Mineração Covardado, município de São Francisco de Paula, FC06*

- FC07: afloramento no topo de um morro a “meia laranja”, no município de São Francisco de Paula; granito Kfeldspático cor verde, textura homogênea sem bandeamento (não migmático); presença de vegetação e cultivos de café; a 1Km da rua; presença de outros afloramentos pequenos perto, em direção NW e NE; (494700; 7708181,7)UTM; *Fig 2.11*



Figura 2.11: A) Afloramento de granito Kfeldspato, verde, no município de São Francisco de Paola, FC07 B) Pormenor da rocha, evidencia a textura homogênea do granito kfelspatico

- **FC08:** Morro de Ferro, na Serra dos Alemães; na base se mesclam quartzito, ematite, magnetite, speculite e laterite; presença de arbustos pequenos; altura do morro 1300m; do topo pode-se ver o Rio Jacare, util referência geográfica; (547483; 7703861)UTM; Fig 2.12



Figura 2.12: A) O morro de Ferro aparece ao fundo; na esquerda da foto pode-se distinguir um afloramento de quartzito B) vegetação que cresce no morro C) Pormenor da base do Morro (quartzo+minerais ferríferos) D) Pormenor do topo do Morro; podem-se distinguir a estratificação magnetite-hematite(preto) e quartzo(branco) parcialmente eroso

- FC09: pedreira paralisada, propriedade de Pasto Cachoeira, na base da Serra dos Alemães; gnaiss migmatítico, tipo “Verde Van Gogh”; (546946; 7705513)UTM; Fig 2.13



Figura 2.13: *pedreira paralisada, na Serra dos Alemães; gnaiss tipo "Verde Van Gogh"; FC09*

- **FC10**: afloramento de quartzito, na Serra do Engenho, distrito de Morro de Ferro, município de Oliveira; pedreira-cascalheira de quartzito que funciona ocasionalmente; o afloramento é pequeno e possui uma densa cobertura vegetal; (541962,6; 7714679,7)UTM; Fig 2.14. Foi gravado recentemente um novo ponto teste de um afloramento maior; (543291,7; 7705996,7)UTM; ainda sem foto.



Figura 2.14: A) Afloramento de quartzito na Serra do Engenho, FC10 B) Pormenor do quartzito

- FC11: afloramento de gnaiss migmatítico cinza, perto da Rodovia Fernão Dias, W de Carmópolis de Minas; (532793; 7728676)UTM; não existe foto.

CAPÍTULO 3

A EXPLORAÇÃO MINERAL

1. Introdução

Os dados gerados por sensoriamento remoto são normalmente usados para caracterizar vegetação, minerais e outros materiais sobre a superfície da Terra . A necessidade crescente de uma melhor caracterização de todos os recursos naturais, sobretudo nas áreas de difícil alcance ou muito extensas, acelerou o avanço da tecnologia e das metodologias de estudo.

Esta publicação descreve rapidamente as principais técnicas de Geoprocessamento utilizadas como proposta de apoio para a exploração mineral e mapeamento geológico, aplicando-as em uma área-piloto localizada nos municípios de Oliveira e São Francisco da Paula, MG, Brasil.

Em trabalho similar para o mapeamento geológico do Parque Nacional do Utah, Clark *et al.* (2002) concluíram sobre estudos de rochas: “*Reflectance spectra of weathered surfaces of rocks from these areas show two components: 1) variations in spectrally detectable mineralogy and 2) variations in the relative ratios of the absorption bands between minerals. Both types of information can be used together to map*”. Os espectros dos afloramentos rochosos apresentam anomalias em relação aos valores gravados nas bibliotecas espectrais, medidos sobre amostras em condições controladas. Estas anomalias são o espelho das alterações químico-físicas das rochas *in situ*.

O enfoque do presente trabalho é o reconhecimento dos afloramentos superficiais, muitas vezes indicativos de depósitos minerais subterrâneos, baseado na análise dos espectros das rochas e no processamento digital das imagens TM Landsat7.

2. Parâmetros estatísticos das bandas TM

O mecanismo de absorção da energia eletromagnética sobre a superfície das rochas depende da geoquímica dos materiais e do comprimento de onda considerado. A refletância de cada frequência pode ser alterada também por “*the molecular content of H₂O, OH, OOH, Fe³⁺, Fe²⁺, or others in rock forming mineral phases like phyllosilicates, feldspars, calcite, gypsum, quartz, hematite and many more*” (Zumprekel e Prinz, 2000).

A presença de mata, plantações de café, campo sujo, são fatores de distúrbio que confundem e diminuem a intensidade da energia refletida, dificultando o reconhecimento dos afloramentos.

O estudo das curvas e das variações espectrais mostra como as principais diferenças acontecem na região IR próximo, médio e em parte no espectro visível. “*This emphasizes the importance of TM bands 4, 5 and 7 if they are combined with one channel from the VIS to create a color composite in which the strongest spectral anomalies might be visualized*” (Zumprekel e Prinz, 2000). A análise dos parâmetros estatísticos dos dados TM (Tab 2.1) evidenciam uma variação espectral maior no IR, especialmente nas bandas TM 4, 5 e 7 (Imagens TM Landsat7, L71218074_00020020803) As informações espectrais TM podem ser muito correlacionadas (Tab 2.2). Utilizando o coeficiente OIF (*Optimum Index Factor*) desenvolvido por Chavez *et al.* (1982) e adaptado para os estudos geológicos por Prinz e Bischoff (1994), selecionamos as combinações de bandas que disponibilizam a maior quantidade de informações. O uso destas composições de cores (CC) objetivava facilitar o reconhecimento das rochas através do contraste ou diferentes tonalidades. O OIF é baseado sobre os coeficientes de correlação (r) dos DN (*Digital Number*, valor de refletividade de cada pixel na imagem) e dos desvios padrão (σ) das bandas ($n=3$ bandas):

$$\text{OIF} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{(i)}}{\sum_{i=1}^n |r_{(i)}|}$$

onde (r) representa a força de relação entre as variáveis e (σ) mede a distribuição dos valores entorno da média.

BANDA 1

MOMENTOS: Amostra = 3

Banda	Média	Desv.Padrão	Variância	3_Momento	4_Momento
1	100.10	39.85	1588.40	58322.55	11976990.00

VALORES: Amostra = 3

Banda	Moda	Valor Mínimo	Valor Máximo
1	82	0	246

BANDA 2

MOMENTOS: Amostra = 3

Banda	Média	Desv.Padrão	Variância	3_Momento	4_Momento
2	103.13	47.60	2266.11	78550.52	18133726.00

VALORES: Amostra = 3

Banda	Moda	Valor Mínimo	Valor Máximo
2	77	0	244

BANDA 3

MOMENTOS: Amostra = 3

Banda	Média	Desv.Padrão	Variância	3_Momento	4_Momento
3	82.08	45.04	2028.70	127268.41	22547714.00

VALORES: Amostra = 3

Banda	Moda	Valor Mínimo	Valor Máximo
3	54	0	249

BANDA 4

MOMENTOS: Amostra = 3

Banda	Média	Desv.Padrão	Variância	3_Momento	4_Momento
4	45.41	55.01	3026.01	-33367.66	26370202.00

VALORES: Amostra = 3

Banda	Moda	Valor Mínimo	Valor Máximo
4	122	0	252

BANDA 5

MOMENTOS: Amostra = 3

Banda	Média	Desv.Padrão	Variância	3_Momento	4_Momento
5	110.93	55.13	3039.13	69362.70	26491334.00

VALORES: Amostra = 3

Banda	Moda	Valor Mínimo	Valor Máximo
5	96	0	253

BANDA 7

MOMENTOS: Amostra = 3

Banda	Média	Desv.Padrão	Variância	3_Momento	4_Momento
7	92.53	50.47	2546.74	120566.88	25718814.00

VALORES: Amostra = 3

Banda	Moda	Valor Mínimo	Valor Máximo
7	91	0	249

Tabela 2.1: *Parametros estatisticos das bandas TM Landsat7*

A análise da matriz (Tab 2.2) evidencia dois grupos estatísticos com forte correlação:

- 1) região do visível com valores próximos de 0,9;
- 2) as bandas IR 5 e 7 com valores de 0,93. A banda 4 tem índices baixos em relação a outras bandas do IR e VIS, manifestando uma evidente independência.

MATRIZ DE CORRELAÇÃO:

1.00	0.87	0.87	0.12	0.78	0.78
0.87	1.00	0.91	0.25	0.80	0.79
0.87	0.91	1.00	-0.00	0.80	0.86
0.12	0.25	-0.00	1.00	0.25	0.07
0.78	0.80	0.80	0.25	1.00	0.93
0.78	0.79	0.86	0.07	0.93	1.00

Tabela 2.2: Correlação (r) entre os dados TM; Bandas 1,2,3,4,5,7

BANDAS	TOT (σ)	TOT (r)	OIF
147	145,33	0,97	149,82
345	155,18	1,05	147,79
134	139,9	0,99	141,31
247	153,08	1,11	137,9
145	149,99	1,15	130,42
457	160,61	1,25	128,48
234	147,65	1,16	127,28
245	157,74	1,3	121,33
124	141,46	1,24	114,08
347	150,52	1,79	84,08
257	153,2	2,52	60,79
235	147,77	2,51	58,87
157	145,45	2,49	58,41
125	142,58	2,45	58,19
357	150,64	2,59	58,16
135	140,02	2,45	57,15
127	137,92	2,44	56,52
237	143,11	2,56	55,9
137	135,36	2,51	53,92
123	132,49	2,65	49,9

Tabela 2.3: OIF das 20 positivas combinações das bandas TM Landsat7 utilizadas em esta pesquisa

A tabela 2.3 mostra como a CC das bandas 147 é a que, estatisticamente, apresenta o maior número de informações (OIF=149.82) entre todas as 20 possíveis combinações dos dados TM. Também é importante evidenciar como a 321 “*true color composite*”, que corresponde à sensibilidade espectral do olho humano, tem o OIF menor, portanto a menor quantidade de informações multiespectrais. Em todas as primeiras 11 combinações aparece a banda 4, o que se explica pela grande presença de vegetação na região estudada. O uso das bandas 4+ 5 ou 7+ uma do VIS resulta ser a melhor CC. Publicações de Sabins (1999) e de Prinz *et al.* (2000) indicam como principais ferramentas para a pesquisa de minerais as bandas TM 5 e 7, fazendo porém referência a áreas desertificadas e áridas, condição ideal para o reconhecimento dos afloramentos. Neste caso o OIF maior pertence à combinação 157.

3. **Composição de cores 147**

Diferentes CC 147 são produzidas para tentar evidenciar a distribuição na área de estudo dos afloramentos de granito, ferro e quartzito, através de contraste e tonalidades marcadas de cores. Em seguida apresentaremos um exemplo de combinação RGB das bandas 147 e as considerações sobre os resultados obtidos.

A CC 417 (RGB) permite evidenciar facilmente os afloramentos de granito que mostram uma cor *blue*, azul escuro (*Fig 3.1*). Este resultado é comprovado pelo trabalho de campo realizado no mês de outubro, visitando 10 afloramentos e pedreiras de granito nos municípios de Oliveira e São Francisco do Paula (MG). Todos os afloramentos foram verificados com respostas certas, mas aqui só serão mostradas as imagens de alguns pontos amostrados como exemplos.

I. Ponto FC02: Coord.UTM (509587,5; 7747082); grande afloramento de Gnaiss migmatítico, Pirassena distrito de Itapeçerica. A Nord-Est há outro depósito de granito similar (Ponto FC03)

Ponto FC11: Coord.UTM (532793, 7728676); o afloramento pode ser visto desde a rodovia Fernando Dias.

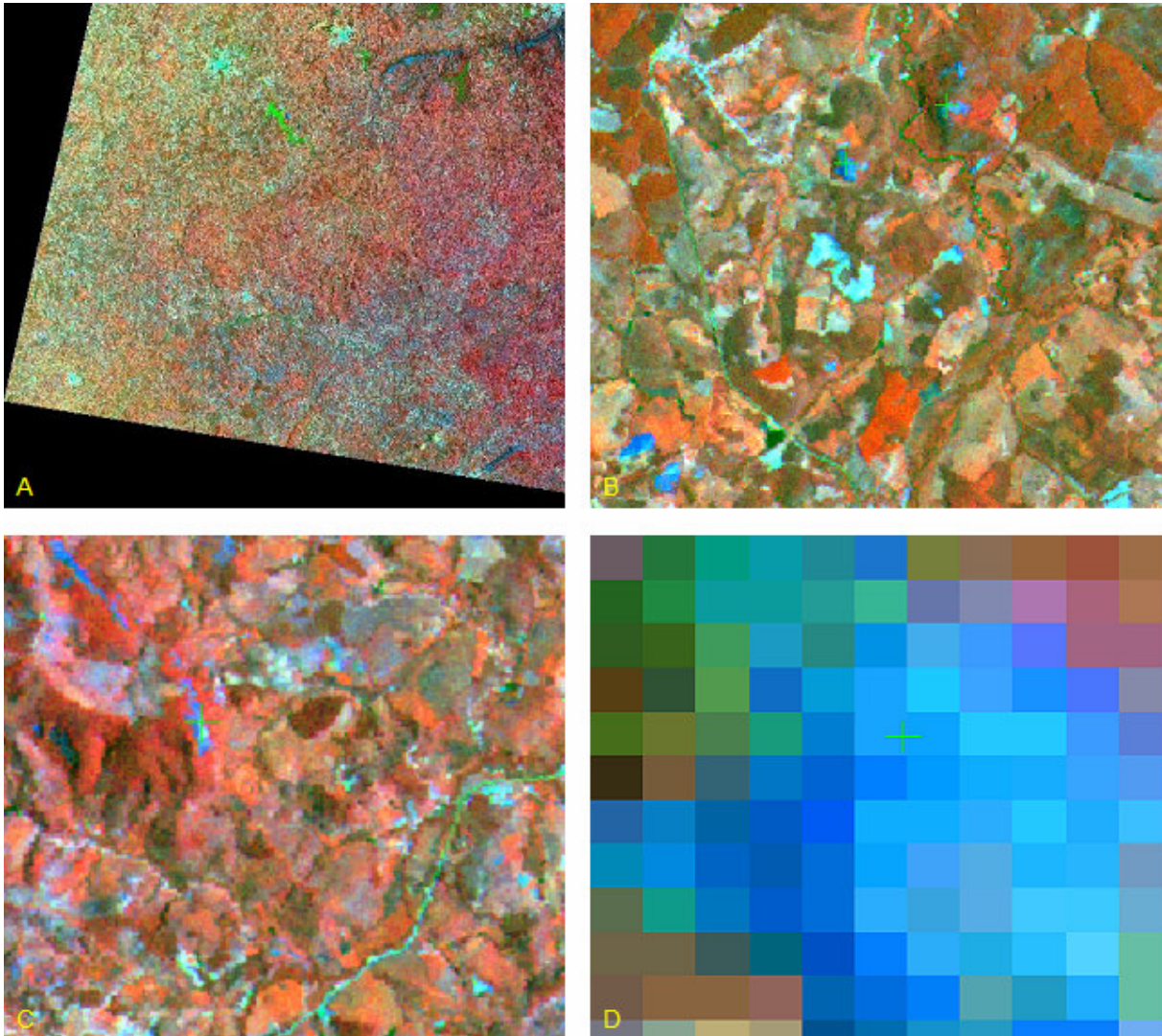


Figura 3.1: A) CC 417 da área estudada B) Pontos-teste FC02 e FC03, marcados por uma cruz verde, confirmam os resultados obtidos com o processamento das imagens TM Landsat 7 C) Ponto test FC11, ao lado da rodoviária D) Zoom do ponto FC02, mostra as tonalidades de cor blue - azul dos afloramentos de granito.

O reconhecimento dos minerais do ferro através da composição 417 é mais difícil se comparando com o dos granitos. Durante o trabalho de campo só foi visitada uma formação ferrífera na Serra dos Alemaes (Fig 3.2):

Ponto FC08: coord.UTM (547483; 7703861), Morro do Ferro, presença de hematite, magnetite, laterite (+quartzito na base do morro). Parcialmente recoberto por vegetação.

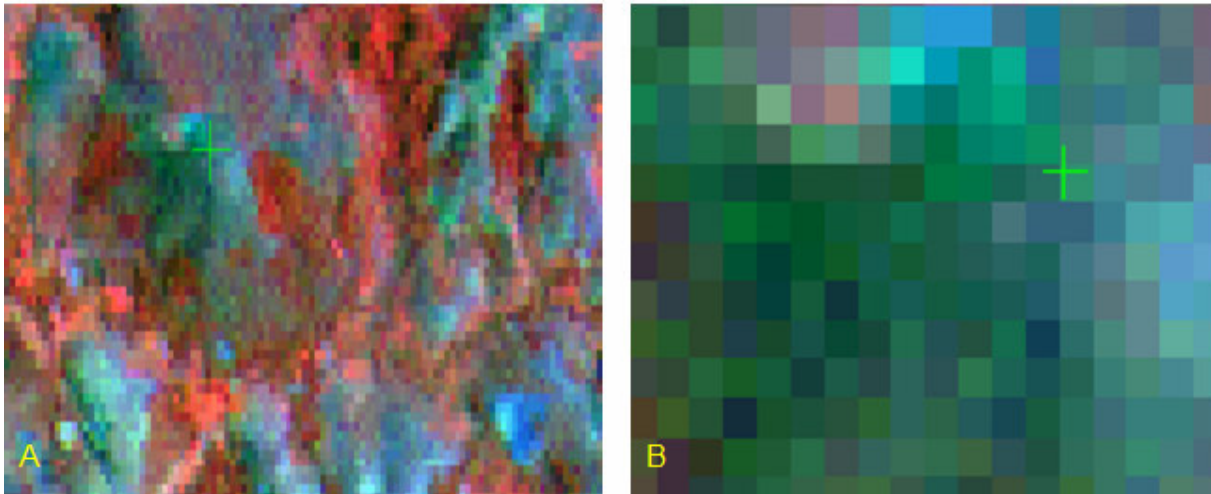


Figura 3.2: A) Morro do Ferro, na Serra dos Alemães, ponto test FC08 B) Zoom do ponto-teste FC08, mostra as tonalidades de cor verde dos minerais ferríferos

Os afloramentos de minerais de ferro se manifestam nesta CC 417 (RGB) com cores principalmente verdes. No parágrafo seguinte demonstraremos uma outra metodologia de pesquisa de Fe-óxidos (ratio 3/1), que permite adquirir novos pontos-teste na tela para aplicar na verificação dos resultados aqui obtidos.

O reconhecimento e caracterização do quartzo é muito complexa; o ponto-teste FC10 não permite definir valores de ND para classificar este material, sendo o afloramento muito pequeno e coberto por uma densa mata. Um novo ponto-teste FC12, de um recente trabalho de campo, evidencia um depósito de quartzito grande através de tonalidades de cor azul claro-branco, muito parecidas as da cidade e solo exposto (Fig 3.3). Portanto, a CC 417 não é uma boa ferramenta para reconhecimento dos afloramentos de quartzo.

- I. Ponto FC10: Coord. UTM (541962,6 ; 7714679,7), afloramentos pequenos com presença de mata às vezes densa
- II. Ponto FC12: Coord. UTM (543291,7 ; 7705996,7), grande afloramento de quartzito.

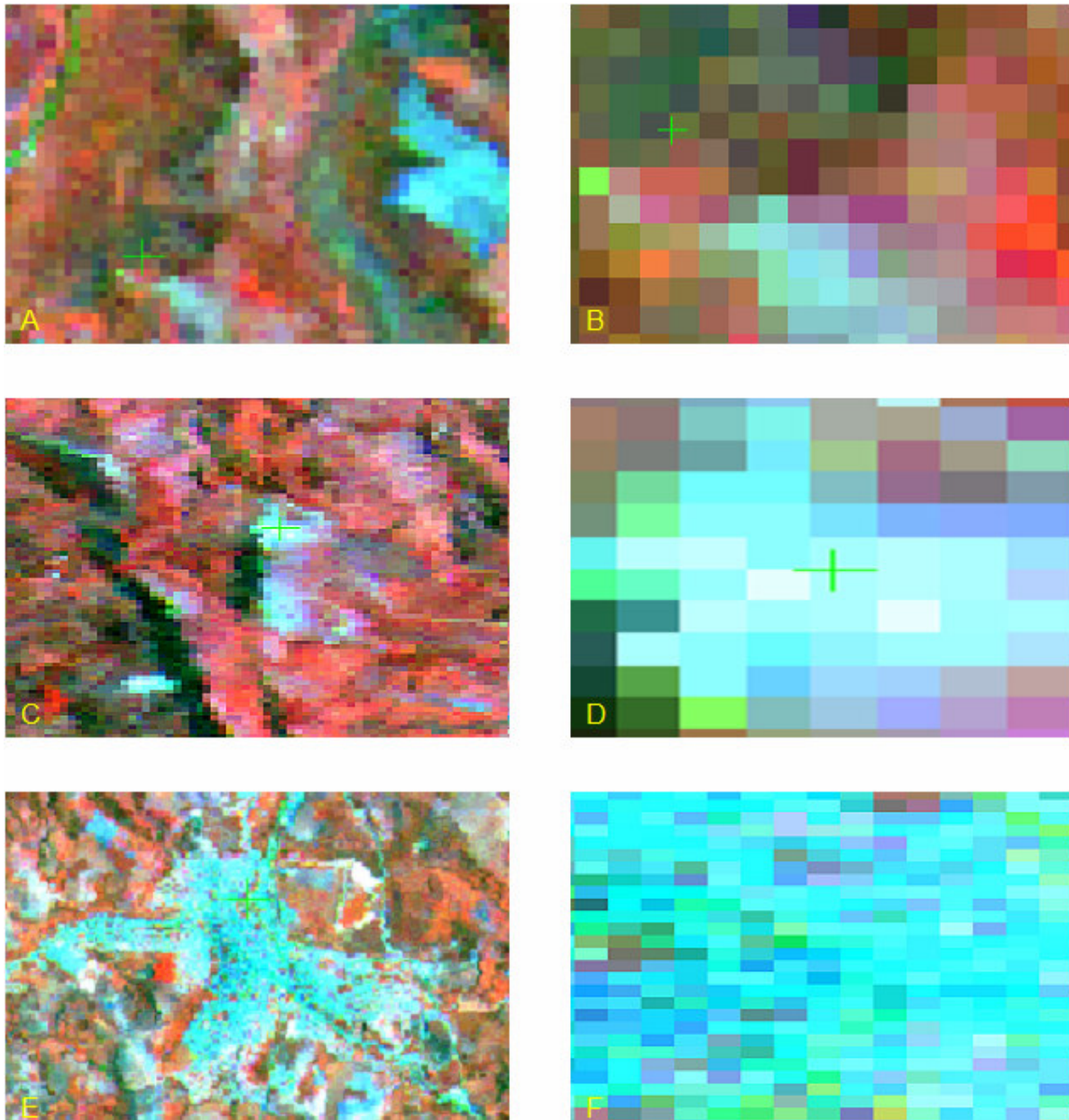


Figura 3.3: A) e B) Ponto teste FC10 e zoom, a camada de vegetação não permite reconhecer bem o afloramento; C) e D) Ponto-teste FC12 e zoom, evidencia o afloramento com tonalidades de cor azul claro-branco, similares as das cidades e solo exposto; E) e F) Cidade de Oliveira (MG) e zoom, as cores são parecidas as do quartzito

A dificuldade de reconhecimento do quartzo é uma limitação do Sensoriamento Remoto. O uso da banda IR térmica (8-14 μm) pode representar uma possível solução, pois os materiais com elevado percentual de sílica manifestam nesta região do espectro um pico negativo (Fig 3.4) . Esta análise permite evidenciar altas concentrações de sílica, mas não distingue entre hidrotérmica, sedimentária ou ígnea (Sabins 1999).

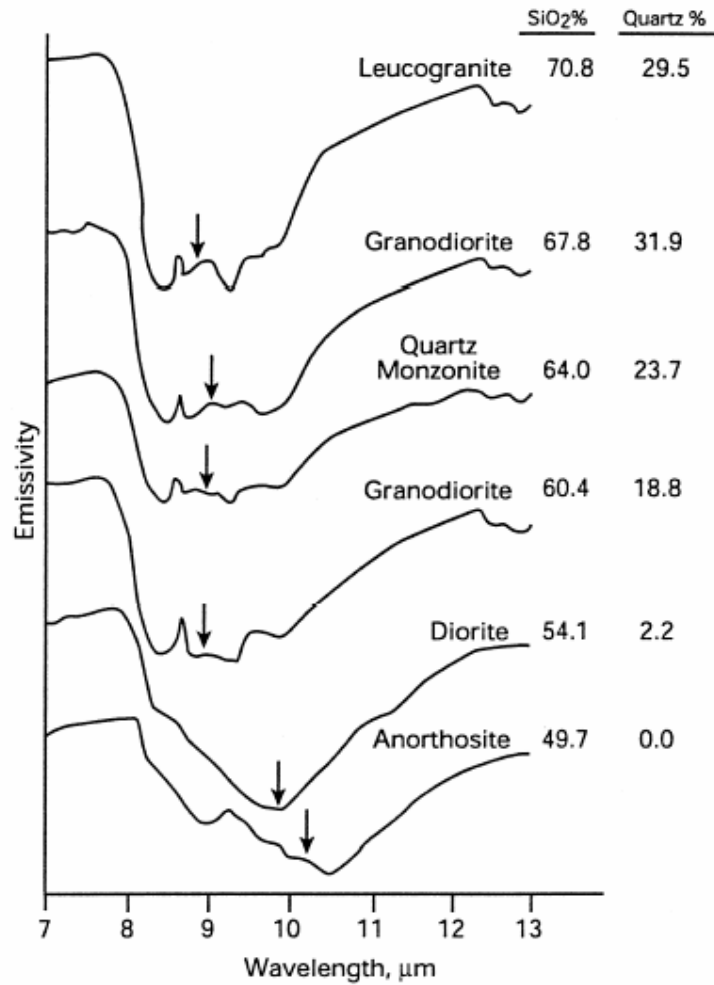


Figura 3.4: Espectros IR térmico das rochas ígneas com diferentes % de sílica; em evidência os picos negativos, que correspondem ao máximo de absorção de energia

O estudo da banda térmica 6 TM Landsat7 evidencia manchas mais escuras, que correspondem às regiões de maior absorção de energia. Os pontos FC10 e FC12 aparecem sobre essas áreas evidenciadas, sendo possível considerá-las como indicativas de rochas com alto percentual de quartzo (Fig 3.5). Para comprovar estes resultados foram selecionadas algumas amostras da imagem da banda 6 TM, e foi realizada comparação com os mesmos pontos na CC 417, verificando as tonalidades de cores existentes.

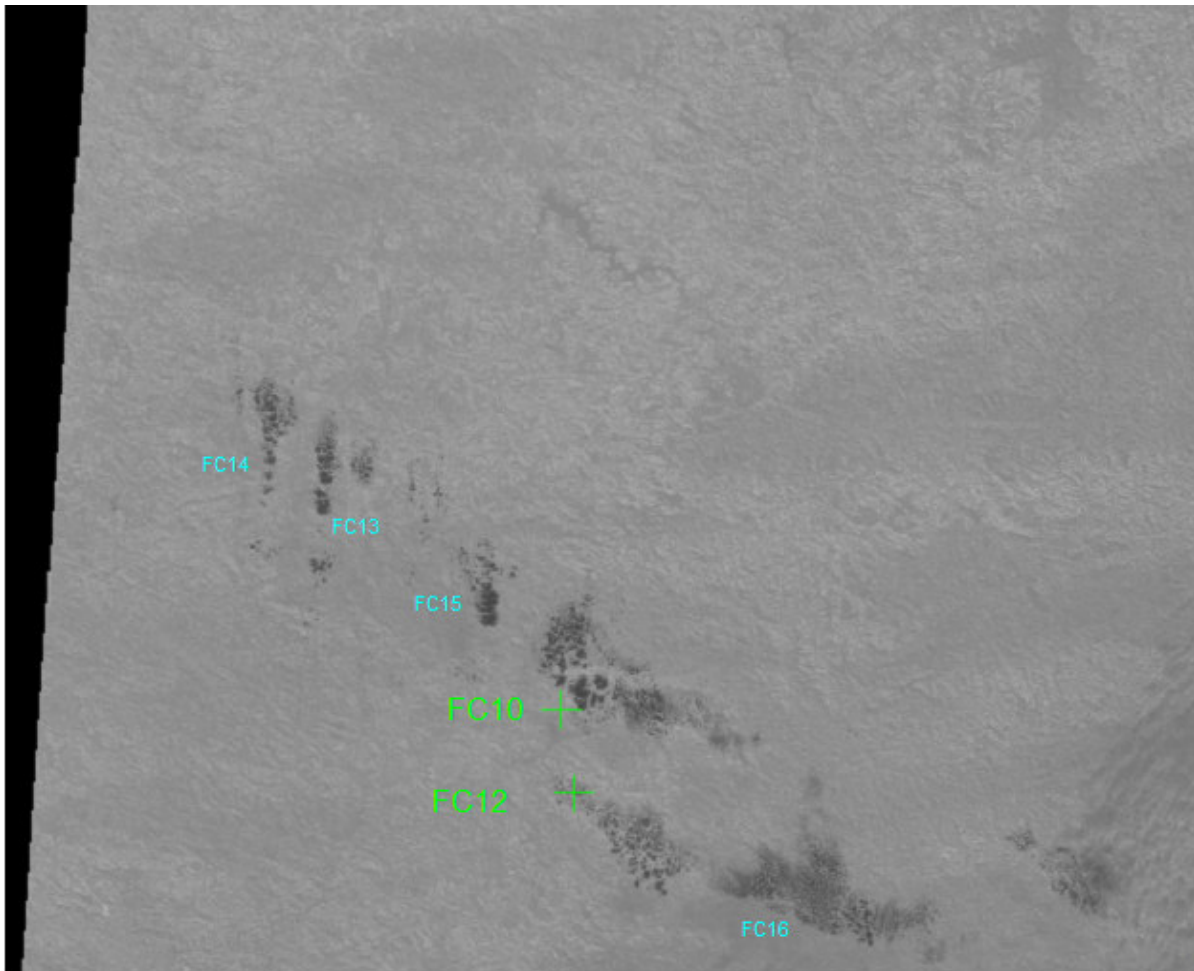


Figura 3.5: Banda 6TM, IR térmico; as manchas escuras de maior absorção evidenciam as rochas com alto percentual de sílica; os pontos-teste, FC10 e FC12, indicativos de afloramentos de quartzito, aparecem sobre essas áreas escuras

Os novos pontos amostra da figura 3.5 são:

- I. Ponto FC13tela: Coord. UTM (518706,1; 7735437,6)
- II. Ponto FC14tela: Coord.UTM (513394,6; 7746777,7)
- III. Ponto FC15tela: Coord. UTM (535037,4; 7726003,7)
- IV. Ponto FC16tela: Coord. UTM (567716,17; 7692449,8)

A verificação na imagem RGB 417 não proporcionou bons resultados, sendo todas as regiões cobertas por vegetação (Fig 3.6).

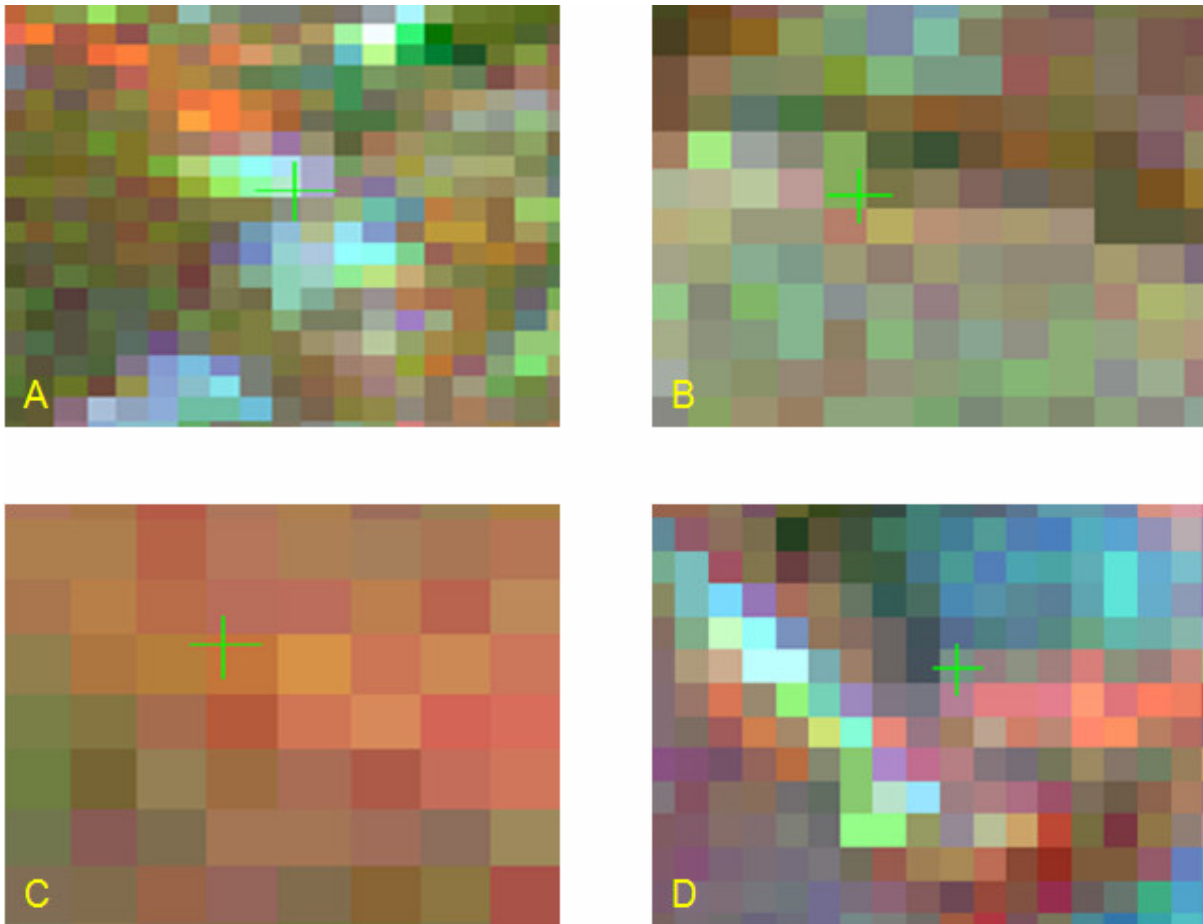


Figura 3.6: A) Ponto-teste FC13, a resposta da verificação na CC 417 é boa, as rochas com quartzo mostram tonalidades de cor azul claro-branco B) e C) Pontos-teste FC14 e FC15, resposta negativa, a camada de vegetação não permite reconhecer os afloramentos de quartzo; D) Ponto-teste FC16, se podem distinguir afloramentos de cor azul claro-branco, parcialmente cobertos por vegetação. Na totalidade a comparação entre informações da imagem da banda 6TM e as CC 417 não forneceu uma resposta clara devido à presença de uma densa camada vegetal.

Na totalidade, a comparação entre as informações obtidas com a análise no IR térmico e os valores da CC 417, não forneceram uma boa resposta devido à presença de uma densa camada vegetal na área estudada. Não foi obtida nenhuma nova informação útil para a classificação supervisionada.

Para melhorar este resultado seria necessário um longo trabalho de campo para verificar se as manchas escuras observadas na figura 3.5, correspondem efetivamente às rochas com elevado percentual de sílica.

4. Reconhecimento dos Minerais ferríferos: Ratio 3/1 TM

O OIF permite reconhecer as melhores CCs, mas elas muitas vezes não são suficientes para individualizar as características de reflexão de áreas muito pequenas

(baixo número de pixels). Neste item apresentamos o cálculo de “*standard mineral Ratio images*” com o objetivo de evidenciar as propriedades espectrais que não apareceram nas imagens precedentes.

Geralmente, a presença de afloramentos alterados hidrotérmicamente é um ótimo indicador de depósitos minerais superficiais. Existe uma literatura muito ampla sobre estes assuntos (Prinz e Bishoff 1995; Sabins 1999; Prinz e Zumpreskel 2000) que demonstra que dividindo os DN de materiais que apresentam valores espectrais altos ou baixos em algumas bandas TM, obtém-se resultados simplificados (ratios) que são uma eficiente ferramenta para o mapeamento geológico. Estudos precedentes confirmaram a utilidade do ratio 3/1 e 5/4 para reconhecimento de Fe-óxidos e hidróxidos, e da ratio 5/7 para argilas.

O espectro dos minerais ferríferos (*Fig 3.7*) mostra uma baixa refletividade na região do Azul (TM1) e uma alta reflexão na região do Vermelho (TM3). Rochas alteradas do ferro têm então elevados valores na imagem Razão 3/1 (para normalizar utiliza-se um ganho=100, seguindo o exemplo das referências bibliográficas consultadas).

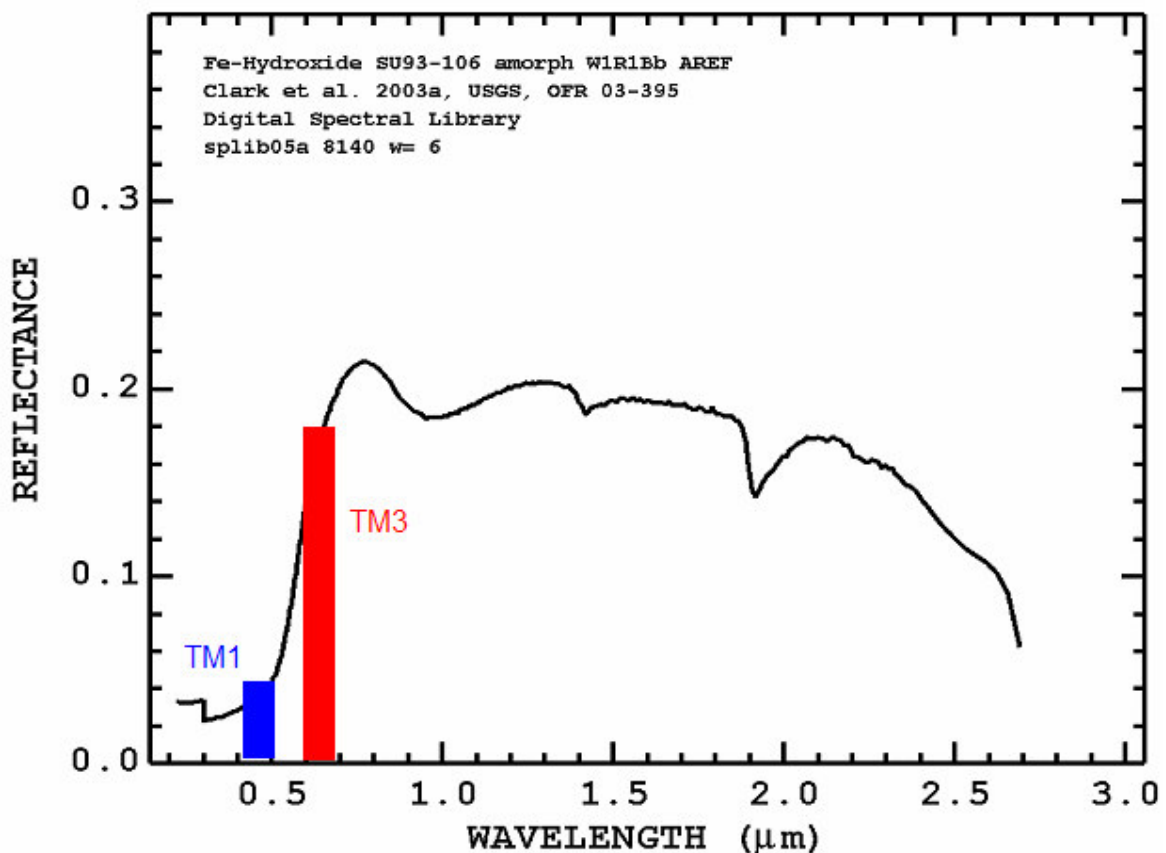


Figura 3.7: Espectro dos Fe-hidróxidos medido em laboratório; fonte USGS Library. Evidenciadas as bandas TM usadas na Ratio

Experiências de laboratório sobre a emissão espectral das rochas evidenciam como os ND das Ratio 3/1, em presença de alterações, são maiores com relação aos materiais sãos. Sabins (1999) sugere um valor de ND mínimo de 150 para reconhecer os afloramentos com Fe-óxidos (*Fig 3.8*). Este valor não concorda, porém, com os dados de campo (ponto FC08), provavelmente porque se refere a estudos em áreas áridas, enquanto o morro resulta recoberto por pequenos arbustos e os ND mostram valores próximos de cem. Por isso, em seguida apresentamos uma imagem com dois diferentes níveis de densidade obtida através de fatiamento: em vermelhos são evidenciados os valores da ratio 3/1 superiores a 150, em amarelo os valores de 120 a 150, que permitem incluir também uma parte do morro do ferro (*Fig 3.9*). É importante observar que essas razões só tem significado mais geral quando os ND da imagens são tratados para correção radiométrica senão os valores vão variar com o tempo para o mesmo material.

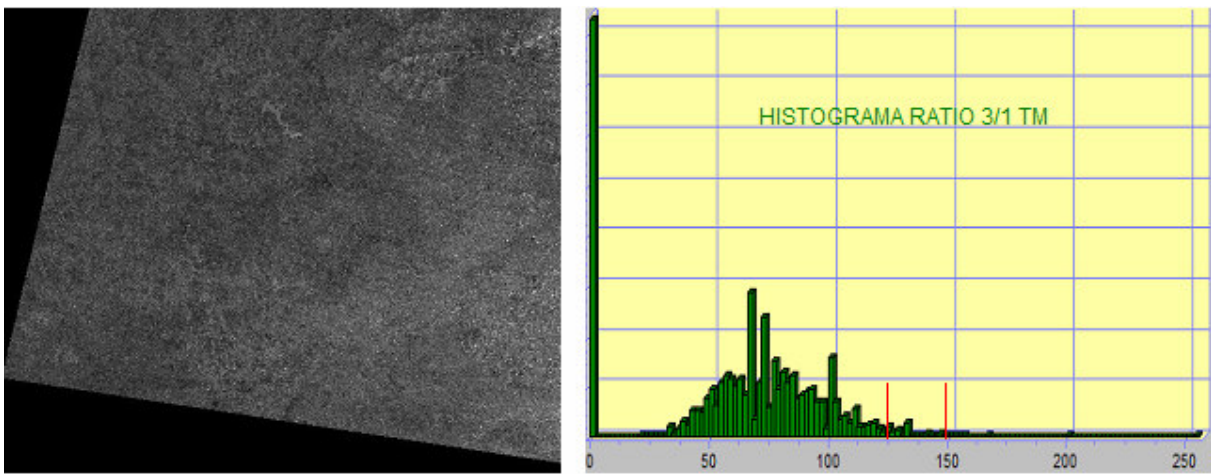


Figura 3.8: Imagem ratio 3/1 TM e histograma dos níveis de cinza. Evidenciados os dois valores limites considerados no fatiamento: 120 e 150

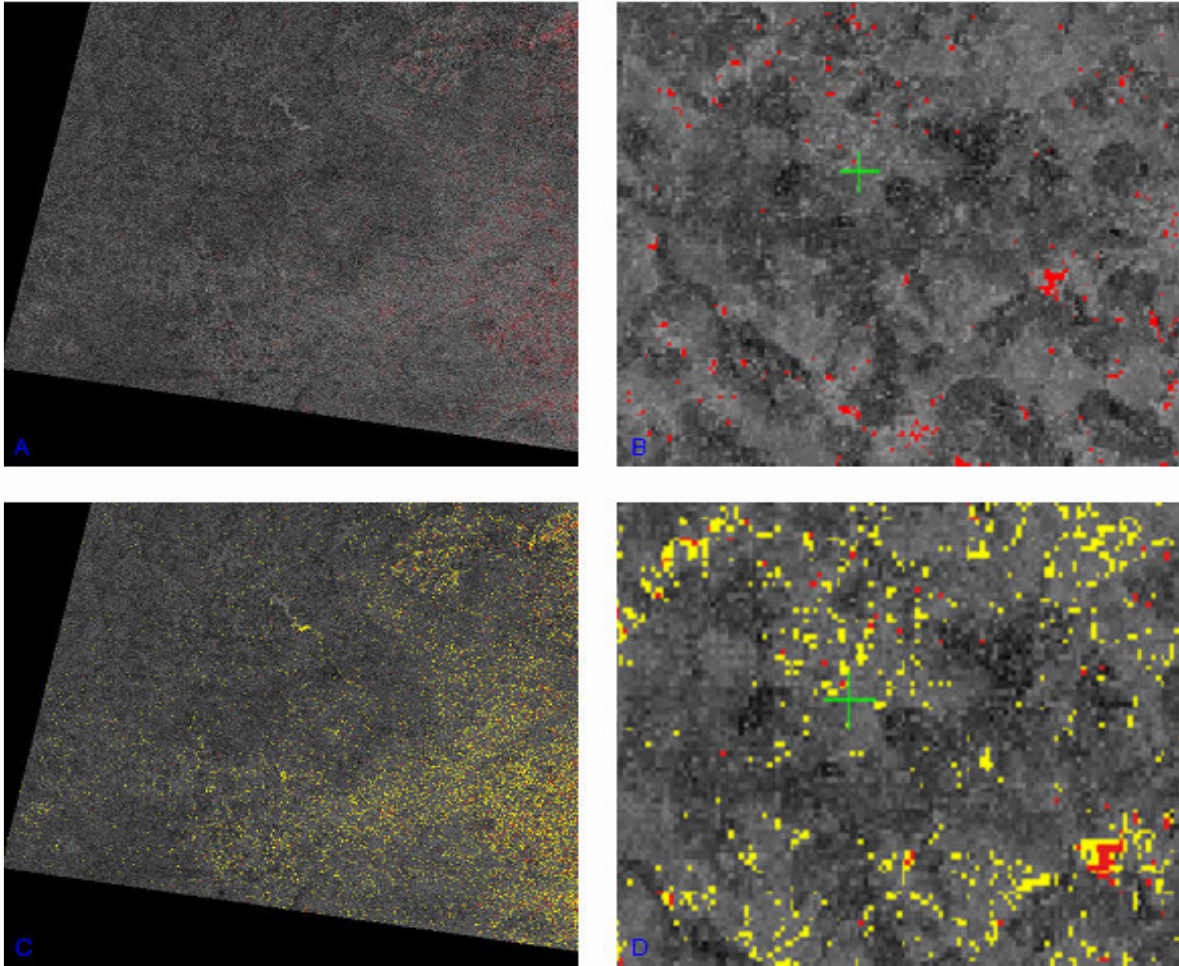


Figura 3.9: A) Fatiamento da imagem ratio 3/1 com limite mínimo do ND= 150; em vermelho os afloramentos do minerais ferríferos B) O morro, ponto-teste FC08, não é muito evidenciado C) Fatiamento com 2 níveis de densidade: 120-150 amarelo, 150-255 vermelho D) o morro resulta agora mais evidenciado

Utilizando as informações das Ratio 3/1 são selecionados alguns pontos-teste das áreas evidenciadas como afloramento de Fe-óxidos, para confrontar com os resultados da CC 417 e facilitar a classificação supervisionada:

- I. Ponto Fe1: Coord UTM (598383,5; 7780142,7)
- II. Ponto Fe2: Coord UTM (545722,3; 7703246)

Os resultados da comparação entre os dados da Ratio 3/1 e a CC 417 são bons, e os pontos-teste Fe1 e Fe2 evidenciam rochas com Fe-hydroxidos através de tonalidades de cor verde (Fig 3.10), como demonstrado anteriormente no estudo do morro de ferro (Ponto-teste FC08).

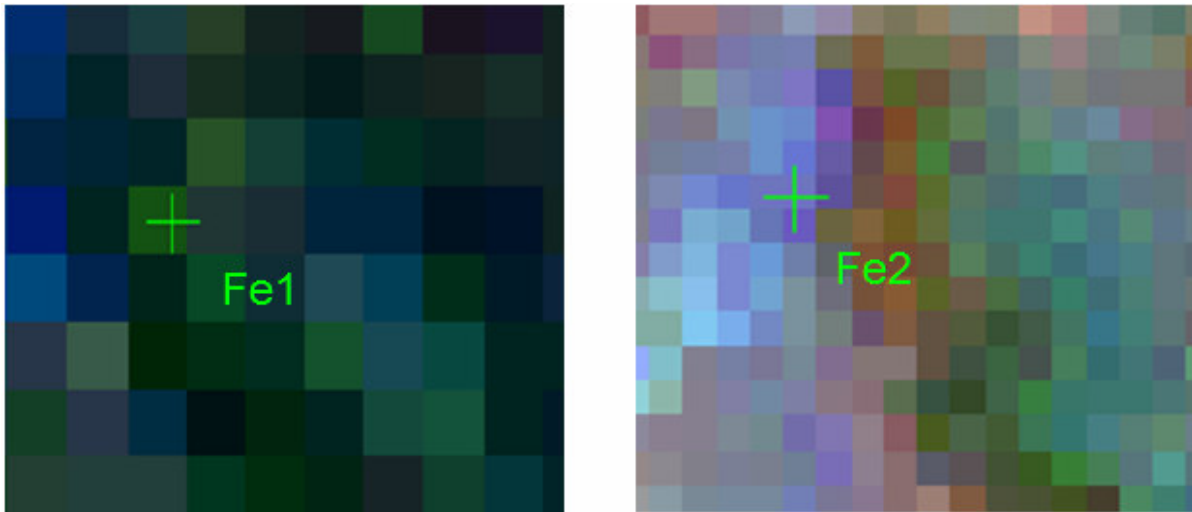


Figura 3.10: Pontos-teste Fe1 e Fe2, obtidos usando as informações da ratio 3/1, que permitem evidenciar como o Fe-hydroxidos aparecem na CC 417 com tonalidades de cor verde

Estas cores são então usadas na classificação supervisionada da área estudada, a fim de se reconhecer os afloramento de minerais ferríferos.

Na totalidade, a CC 417 se revelou uma boa ferramenta para exploração e caracterização dos afloramentos de granito (cores azul escuro - blue), de ferro (cores verde) porém ela não permite reconhecer com clareza as rochas com alto percentual de sílica e quartzo, pois estas se manifestam com cores azul claro – branco, similares às das cidades e dos solos expostos.

No próximo capítulo é explicada a metodologia de classificação supervisionada da área estudada e os resultados obtidos são comparados com os mapas geológicos da região.

CAPITULO 4

CLASSIFICAÇÃO DIGITAL E DISTRIBUIÇÃO DOS MINERAIS

1. Introdução

A classificação multiespectral representa a fase final da Análise Digital de Imagem para a extração das informações temáticas, assinalando cada pixel em classes com propriedades espectrais similares.

O produto final da classificação é um mapa e um inventário das categorias estudadas. A imagem multibanda se converte em uma outra imagem de mesmo tamanho e características, com a diferença que cada pixel não tem relação com a reflexão detectada pelo sensor, mas representa um identificador da classe de pertinência.

Categorizar uma imagem multibanda pressupõe reduzir a escada de medida desde uma variável continua (ND detectados pelo satélite) até uma escala categórica na qual se diferenciam os tipos de camada (tipo de vegetação, etc.); ou em escala ordinal, por intervalos de uma mesma categoria (densidade de vegetação, por exemplo).

Uma classificação baseada nos ND se chama classificação espectral. Apesar dela ser muito rica em informações, nem sempre é possível separar todas as classes, pois existem categorias com comportamento espectral similar. Neste caso, é útil utilizar outras fontes de informação da imagem, como a dimensão espacial (contexto espacial de cada pixel) e a dimensão temporal (evolução estacional, muito útil para discriminar camadas vegetais). Também pode ser necessário adicionar outras informações auxiliares, como a topografia, os relevos geofísicos, entre outros.

O esquema da classificação digital compreende as seguintes fases:

- I. Fase de treinamento: aquisição de amostras na imagem para definir as categorias
- II. Fase de assinatura: agrupamento dos pixels nestas categorias, com base nos ND
- III. Fase de verificação: verificação dos resultados a partir dos dados de campo ou mapas existentes.

Os métodos de classificação se dividem em dois grupos: supervisionada e não supervisionada.

O método supervisionado pressupõe um conhecimento prévio da área estudada, pois são selecionadas as amostras que definem cada categoria. O não supervisionado significa a procura automática por grupos de valores homogêneos de ND na imagem, o que requer que o usuário individualize depois entre eles as categorias de interesse. O método supervisionado define classes informacionais (que constituem a legenda do mapeamento temático: “uso do solo” por exemplo), e o não supervisionado evidencia as classes espectrais na imagem (reflexão similar para as bandas e datas consideradas). Entre as duas classificações deveria existir uma correspondência biunívoca, para uma categoria um só grupo espectral; mas geralmente esta situação não é muito comum, o que dificulta a operação de classificação.

2. **Classificação supervisionada**

Foi realizada uma classificação supervisionada da CC 417 (RGB), utilizando todas as informações obtidas nos estudos do Capítulo 3, a fim de evidenciar a distribuição dos granitos e dos ferro-hidróxidos na área estudada. Esta composição de cores não permite individualizar afloramentos de quartzo, de modo que a caracterização deste segue sendo difícil usando ferramentas do Sensoriamento Remoto.

O classificador utilizado foi o classificador de Máxima Verossimilhança, denominado “MaxVer”, que considera os ND de cada classe distribuídos segundo uma curva de distribuição normal. Este procedimento permite descrever uma categoria através de uma função de probabilidade, a partir da sua matriz de variância-covariância e dos valores médios. O cálculo é realizado para todas as categorias da classificação, associando cada pixel à classe que maximiza a função de probabilidade, estimada a partir das medidas sobre as amostras obtidas na fase de treinamento.

É possível que alguns pixels resultem mal definidos (por exemplo em área de sobreposição das curvas de duas classes com comportamento espectral similar) e que outros resultem em não classificados, por isso se define uma tolerância de probabilidade para eliminar os valores das caudas das distribuições ($\pm 0,1\%$).

Os resultados das classificações foram verificados em relação aos dados do trabalho de campo, resultando em boa resposta para Ferro-hidróxidos (*Fig 4.1*) e Granitos (*Fig 4.2*).

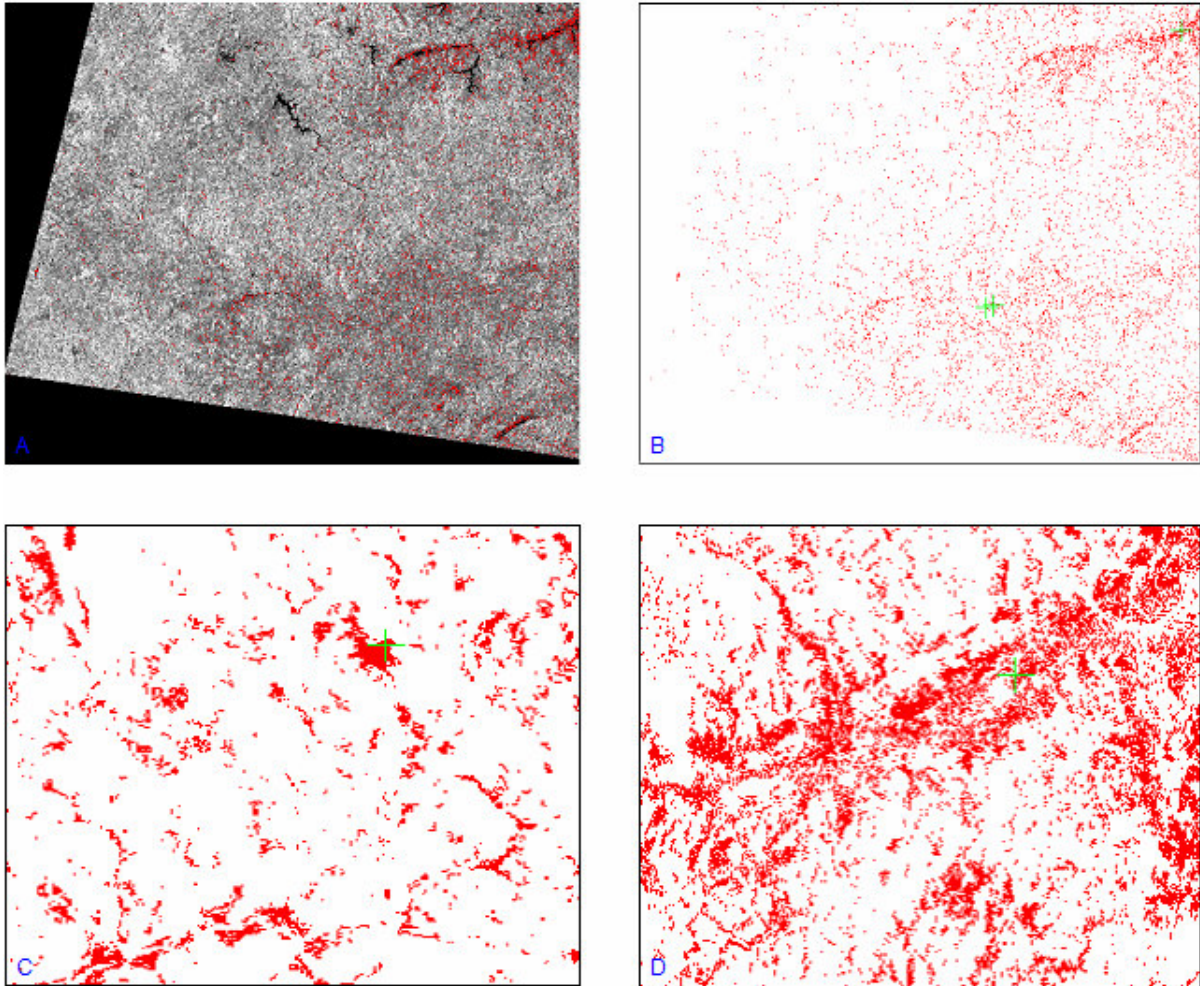


Figura 4.1: A) A sobreposição da imagem classificada sobre uma imagem monocromática (B4) permite evidenciar a distribuição dos minerais ferríferos na área de estudo B) Imagem classificada, com uma única categoria de estudo, os Fe-hidróxidos; as cruces verdes localizam os pontos-teste obtidos durante o trabalho de campo e com a Ratio 3/1 (capítulo3) C) Ponto-teste FC08, o Morro de Ferro, é bem evidenciado pela classificação D) Ponto-teste Fe1, resultado da Ratio 3/1

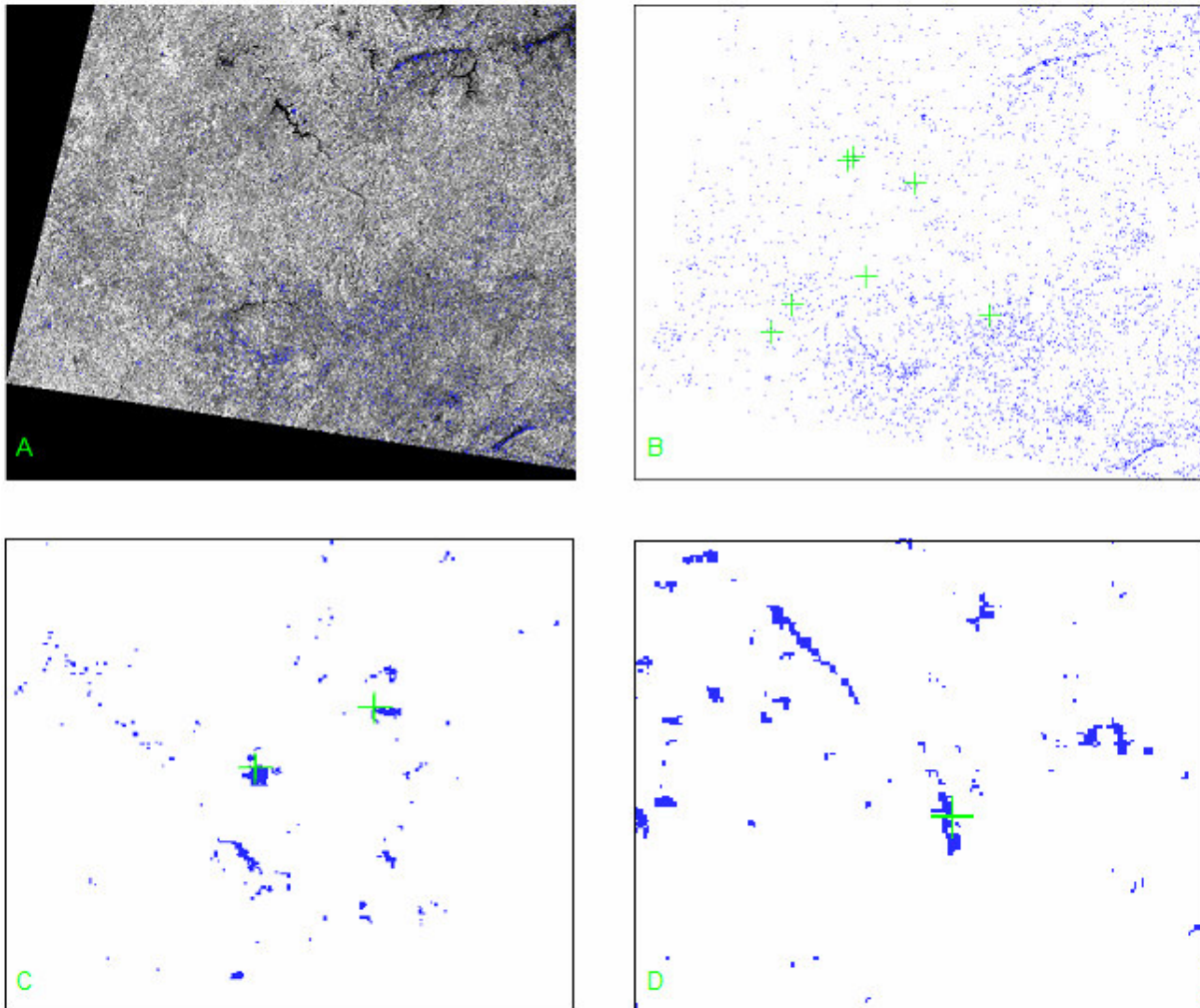


Figura 4.2: A) A sobreposição da imagem classificada sobre uma imagem monocromática (B4) permite evidenciar a distribuição dos granitos na área estudada B) Imagem classificada, com uma única categoria de estudo, os Granitos; as cruces verdes localizam os pontos-teste obtidos durante o trabalho de campo C) Pontos-teste FC02 e FC03 confirmam os resultados das classificação D) Ponto-teste FC11, também incluído em uma área evidenciada pela classificação

Todos os pontos-teste recolhidos durante o trabalho de campo verificam os resultados obtidos, confirmando a qualidade do trabalho de classificação dos Granitos e Fe-hidróxidos. É importante lembrar que estas amostras são localizações pontuais em uma região restrita em relação ao tamanho da área estudada. Uma comparação entre as imagens categorizadas e as mapas geológicos de Minas Gerais permite obter conclusões gerais e que podem se estender para toda a imagem. Os resultados desta classificação

são válidos relativamente às condições específicas da cena analisada; a categorização não procura uma definição absoluta de cada camada, aplicável a qualquer imagem, mas uma caracterização relativa, válida para uma determinada imagem, para um sensor, uma área ou uma data.

A Figura 4.3 resume os resultados da classificação sobrepostos a uma CC 321 (*true color composite*) e uma imagem monocromática, mostrando a distribuição dos minerais ferríferos e dos granitos na região estudada.

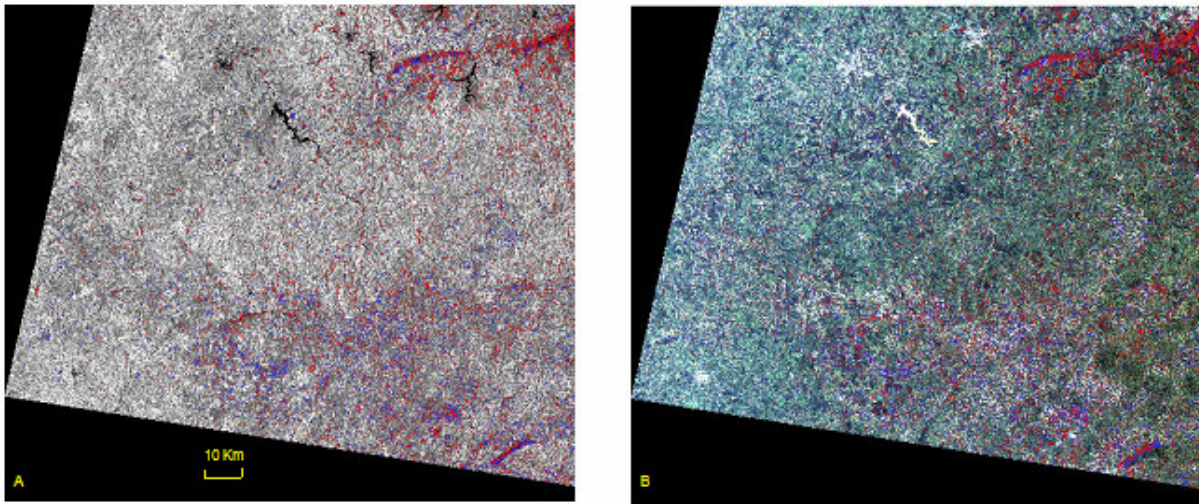


Figura 4.3: Distribuição na área estudada dos minerais ferríferos (Vermelho) e dos granitos (blue); A) classificação sobreposta a uma imagem monocromática que facilita a individualização dos minerais B) sobreposição à CC 321, imagem percebida pelo o olho humano

Conclusões

O Sensoriamento Remoto, utilizado conjuntamente com as disciplinas tradicionais de estudo das ciências da terra, representa com certeza uma importante ferramenta para a exploração e caracterização dos recursos minerais, sobretudo nas áreas de difícil acesso e de grande extensão.

O processamento das imagens de satélite pode facilitar a individualização de fraturas e falhas, onde existe a elevada probabilidade de se encontrar depósitos intrusivos de minerais, e o seguinte mapeamento deles.

Hoje em dia existe uma grande bibliografia com exemplos de exploração mineral através do Sensoriamento Remoto, a maioria em regiões áridas ou desérticas, onde a análise da reflexão das rochas e o reconhecimento dos afloramentos superficiais são bem mais fáceis. Esta publicação tenta estender as metodologias de pesquisa dos recursos minerais à uma área com densa cobertura vegetal, importante fator de distúrbio e confusão no estudo do espectro dos materiais rochosos.

Uma primeira análise estatística das imagens TM Landsat7 (bandas de 1 a 7, L71218074_00020020803) evidencia, através de um índice de otimização OIF calculado a partir dos coeficientes de correlação e dos desvios padrões dos dados TM, como a combinação das bandas 147 é a que aporta o maior número de informações espectrais úteis. Estudos similares às este feitos em áreas áridas, indicam nas bandas 5 e 7 TM as principais ferramentas para o mapeamento geológico; neste caso a presença da banda 4 TM, se explica com o aparecimento de uma extensa camada vegetal, considerada aqui somente como fator de confusão na caracterização dos afloramento (a magnitude deste distúrbio na análise espectral e no reconhecimento das rochas não é objeto desta publicação).

A combinação de cores (CC) 417 foi escolhida como exemplo para o presente processamento digital com o intuito de evidenciar a distribuição dos afloramentos de granitos, minerais ferríferos e quartzitos.

As informações sobre a reflexão dessas rochas foram encontradas em bibliotecas espectrais (USGS Library, ASTER Library), considerando as diferenças entre os espectros dos materiais saos e os espectros dos materiais alterados hidro-termicamente *in situ*.

Essa CC 417 nos permitiu obter as seguinte informações úteis para o reconhecimento e a caracterização dos recursos minerais em estudo:

1) os granitos, que são visualizados claramente em tonalidades de cor azul escuro, são facilmente individualizáveis na região. Todos os pontos-coleta visitados durante o trabalho de campo foram verificados, oferecendo uma resposta correta. A CC 417 representa uma ótima ferramenta na exploração dos granitos e gnaiss em áreas com vegetação (*Fig C.1*).

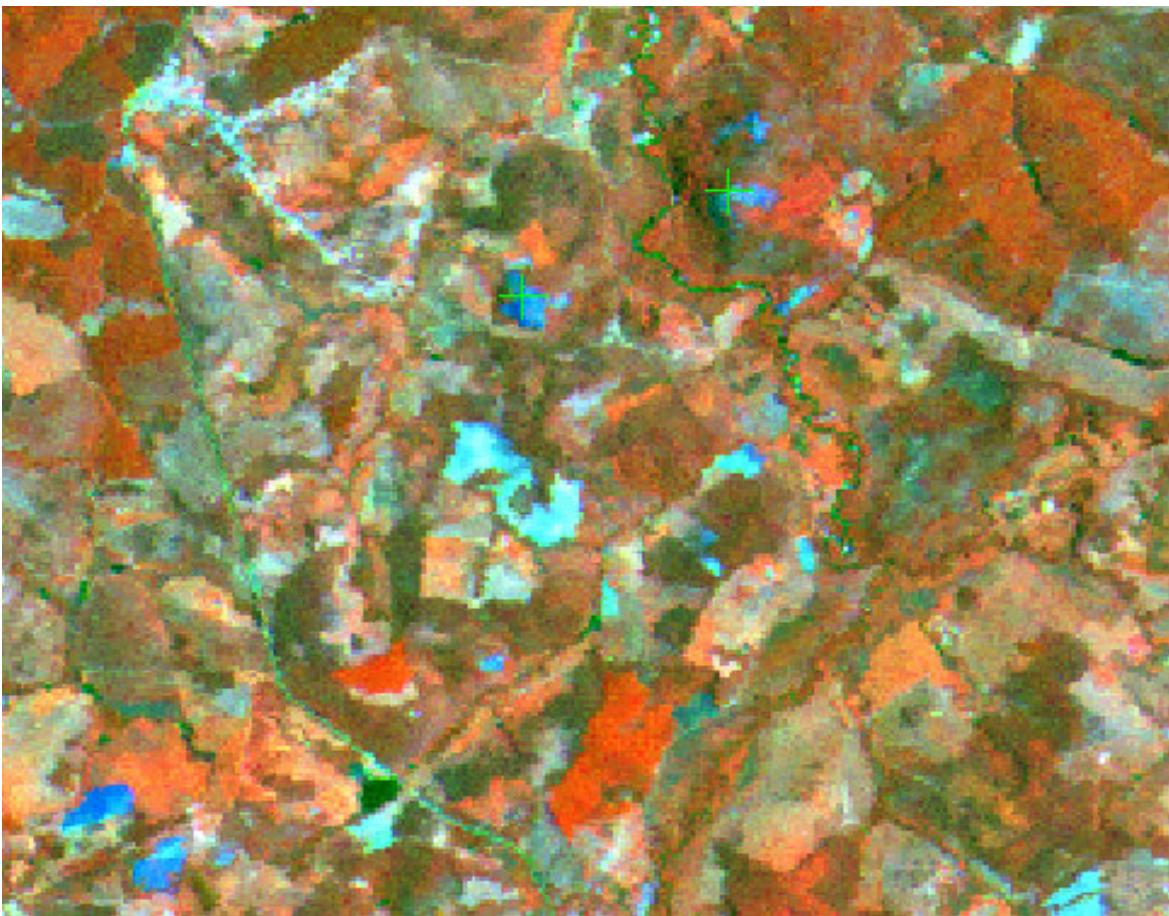


Figura C.1: Afloramentos de gnaiss migmatítico, evidenciados na CC 417 por cores blue-azul escuro. As cruzes verdes localizam dois pontos coletas visitados no trabalho de campo.

2) os Fe-hidróxidos aparecem na CC 417 com cor verde escuro; o reconhecimento destes afloramentos é mais difícil; o trabalho de campo não ajudou muito porque foi visitado um único ponto de coleta (Morro de Ferro). Para obter um maior número de informações sobre a distribuição dos recursos ferríferos e facilitar a individualização dos afloramentos menores, que as vezes não comparecem na CC e na seguinte classificação, foi calculada a razão de bandas 3/1 TM, importante ferramenta na caracterização desses materiais. Os valores dos níveis digitais (ND) utilizados no fatiamento para evidenciar os afloramentos, foram diminuídos de 150 (como aconselhado em precedentes trabalhos similares a este, mas em áreas desérticas) para 120, permitindo obter resultados de acordo com o ponto coletado. (Fig C.2).

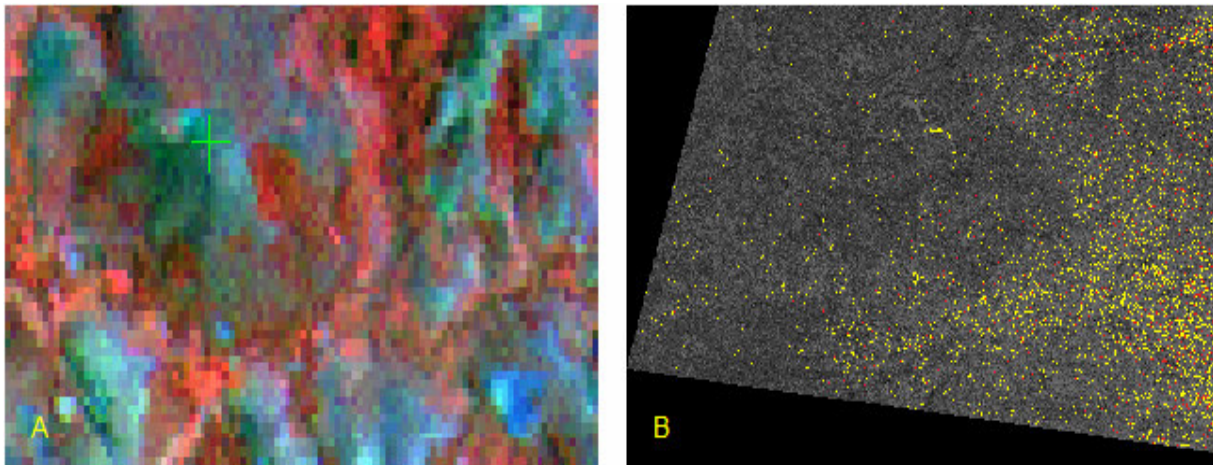


Figura C.2: A) Morro de Ferro, ponto coletado no trabalho de campo, evidenciado por tonalidades de cores verde B) Distribuição dos afloramentos ferríferos, resultados do fatiamento da imagem Razão 3/1 TM; foram utilizadas duas classes, de 120 a 150 em amarelo (que permite incluir o ponto coletado na áreas evidenciadas), de 150 à 255 em vermelho.

3) a CC 417 não se mostrou uma boa ferramenta para individualização dos afloramentos de quartzito, que apresentam tonalidades de cores similares às das cidades e solos expostos. O estudo do espectro do quartzo evidencia um pico negativo de reflexão na região do IR térmico (8-14 μm), que na imagem é representado por manchas escuras de máxima absorção. Os pontos coletados são incluídos nestas áreas escuras, mas os dados disponíveis não são suficientes para obter conclusões gerais. Um futuro trabalho de campo verificará a qualidade dessa técnica de pesquisa dos minerais com elevado percentual de sílica (Fig C.3).

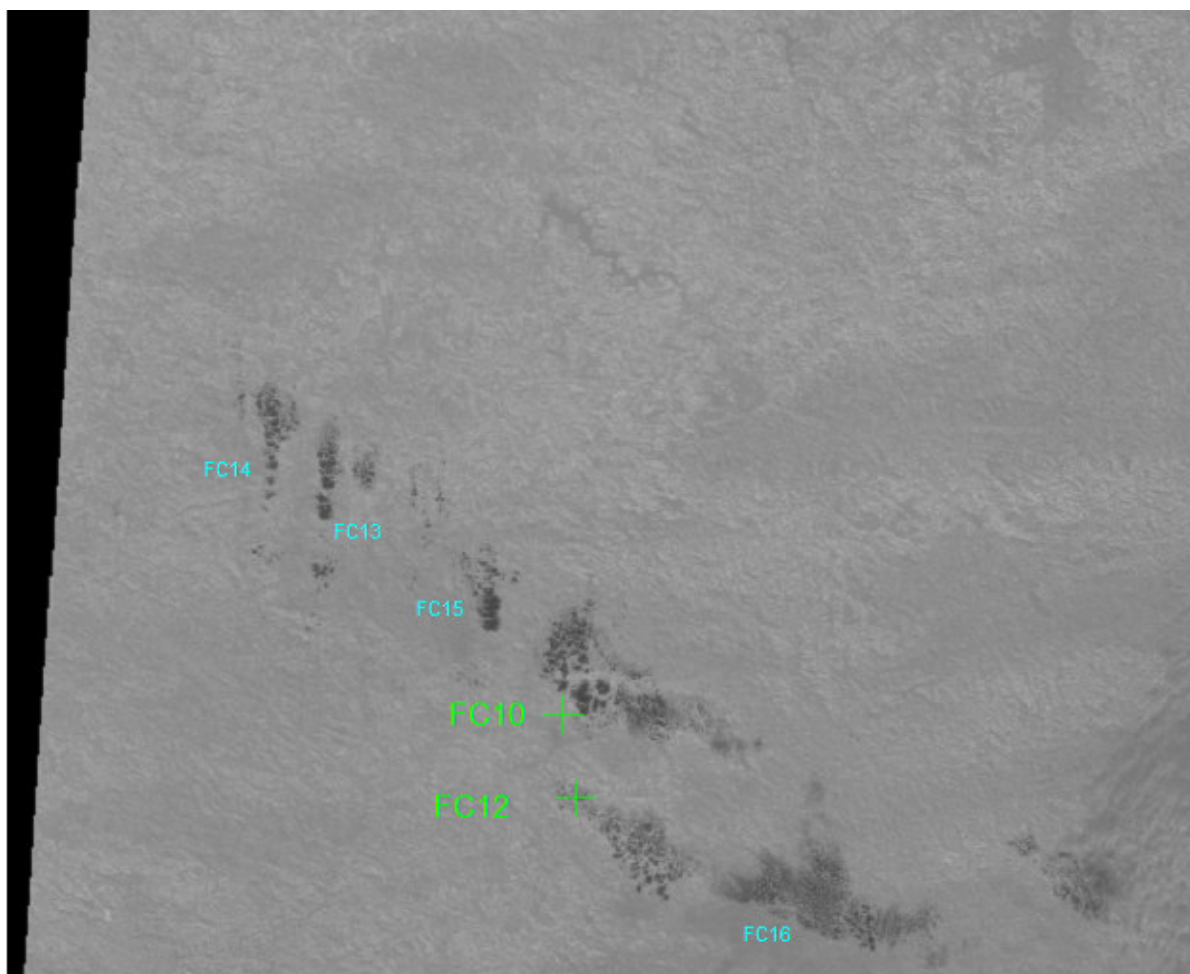


Figura C.3: Imagem IR térmica, banda 6 TM; as manchas escura evidenciam talvez as rochas com elevada % de sílica. Os pontos coletados visitados no trabalho de campo são localizados com cruzes verdes, os pontos que se verificaram num próximo trabalho de campo são evidenciados por letras azuis

Utilizando todas as informações descritas anteriormente, foi realizada uma classificação supervisionada da área, que proporcionou o seguinte resultado (Fig C.4):

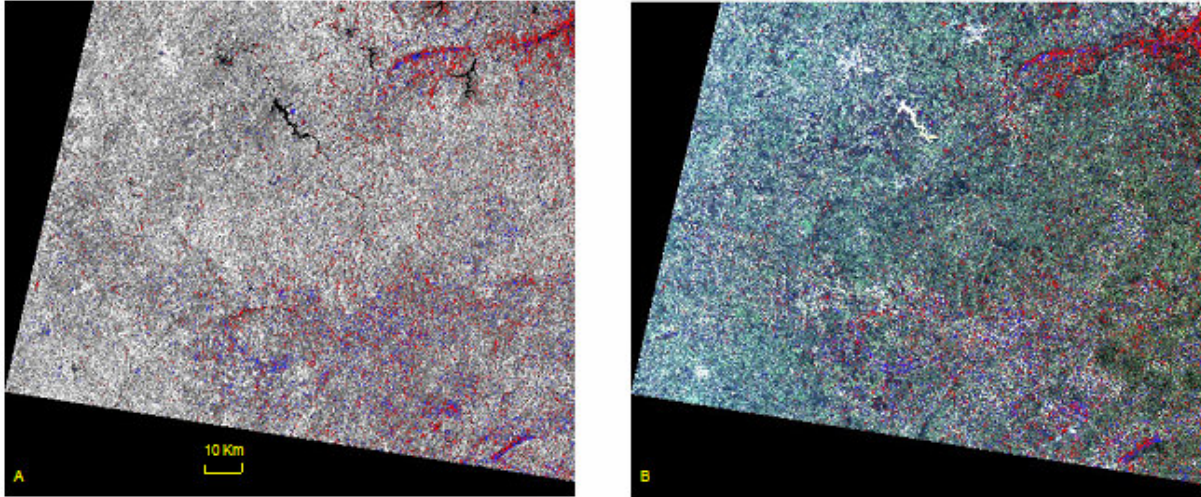


Figura C.4: Imagem classificada, que evidencia a distribuição dos granitos (Blue) e dos minerais ferríferos (vermelho) na área de estudo, sobreposta A) a uma imagem monocromática B4 B) a uma imagem 321, true color composite

Os resultados da classificação foram verificados em relação à alguns pontos coletados obtidos no trabalho de campo e o mapa geológico, oferecendo uma resposta correta (Fig C.5)

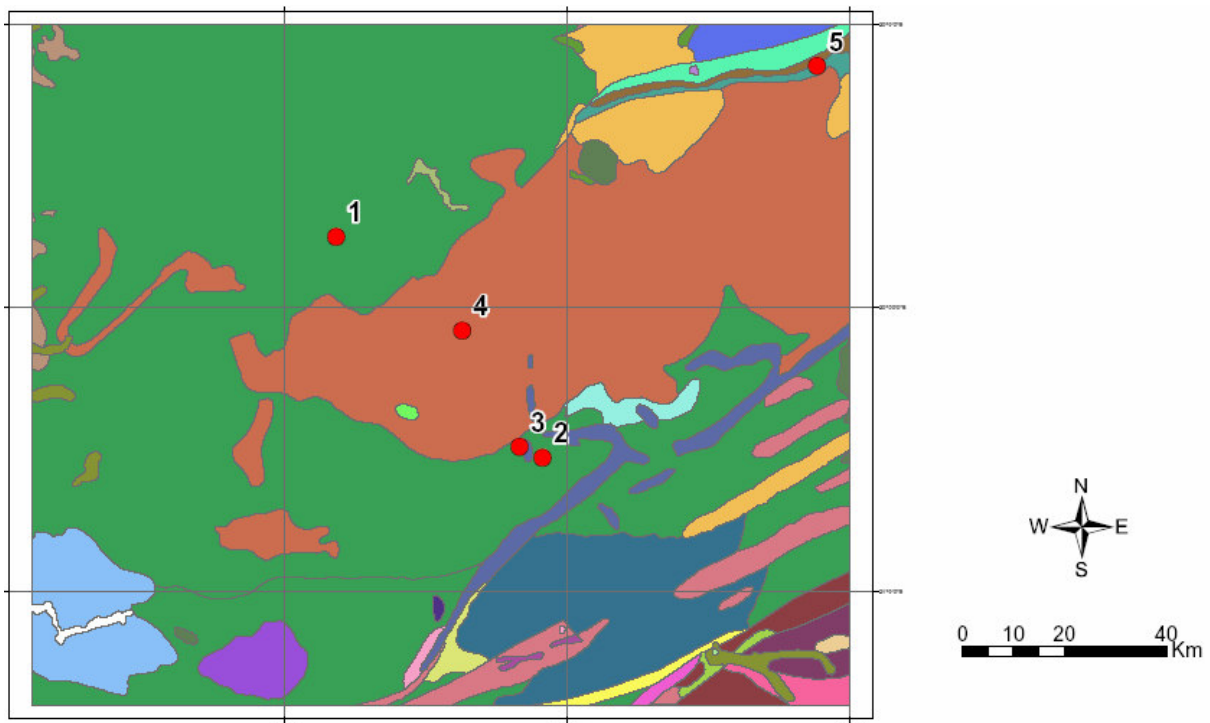


Figura C.5: Mapa geológico da área estudada com evidenciados os pontos usados para confirmar os resultados da classificação digital da CC 417

Resumindo o Sensoriamento Remoto pode ser considerado como uma importante ferramenta para integrar as tradicionais metodologias de exploração mineral, sobretudo nas regiões onde não seja possível coletar dados de campo por serem muito extensas ou de difícil acesso, representando uma notável economia de tempo e de dinheiro. A individualização dos depósitos de minerais com elevado percentual de quartzo continua sendo um problema para o Sensoriamento Remoto; o rápido desenvolvimento de novas tecnologias, com particular atenção aos GPRs (ground penetration radars), pode representar um passo importante na definitiva aceitação dessas metodologias de pesquisa dos geo-recursos naturais, eliminando os atuais limites impostos pela presença de vegetação na área de estudo.

Agradecimentos:

Queria agradecer à todas as pessoas que caminharam comigo durante este ano no Brasil. Sem a ajuda deles meus passos inseguros não teriam desenhado esta maravilhosa experiência.

Um abraço particular vai para Ana Clara, pela amizade e por ter-me socorrido cada vez que estava precisando; para o “Sior Alfredo”, por não entender nada de futebol e por ter-me oferecido uma segunda família; para o “Sior Carletto”, por suas ótimas descrições das mulheres e por ter contado a todos minha vida pessoal. Também queria agradecer Luciano Dutra, por seus conselhos, sua ajuda e sobretudo sua paciência comigo. Não posso esquecer de lembrar minha querida Fernanda, por ter-se tornado minha dona no Brasil e por estar ainda mandando em mim aqui na Europa.

BIBLIOGRAFIA

- 1) CAMPELLO *et al*, **Mapeamento Geológico da Região Entre Morro do Ferro e Oliveira Minas Gerais**; Trabalho Geológico de Graduação, DEGEL/UFMG, 1997.
- 2) CHAVEZ *et al*; **Statistical methods for selecting Landsat MSS ratios**; J. Appl. Photogr. Eng. 8, Pag.30-32, 1982
- 3) CHUVIECO SALINEIRO Emilio; **Teledetección ambiental**; edizioni ariel, 2002
- 4) CLARK, SWAYZE and GALLAGHER; **Mapping the Mineralogy and Lithology of Canyonlands, Utah with Imaging Spectrometer Data and the Multiple Spectral Feature Mapping Algorithm**; U.S.Geological Survey, JPL Publication , 1991; <http://speclab.cr.usgs.gov>
- 5) CLARK *et al.*; **Surface Reflectance Calibration of Terrestrial Imaging Spectroscopy Data**; AVIRIS Workshop Proceedings,2002
ftp://popo.jpl.nasa.gov/pub/docs/workshops/02_docs/2002_Clark_web.pdf
- 6) COLTELLI, DUTRA *et al.*; **SIR-C / X-SAR Interferometry over Mt. Etna: DEM generation, Accuracy Assessment and Data Interpretation**; DLR, 1996
- 7) DU-SHENG-GUO-SHI; **Study on the key techniques of mine environment protection and disaster prevention decision support system**; IAPRS volume XXXIV, part2, commissionII, Aug.20-23 2002
- 8) HALE & CARRANZA; **Geospatial data infrastructure for mineral resources management**; International institute for geo-information science and earth observation, ITC, www.itc.nl, 2004
- 9) HEMING Robert Frederic; **Impact of information technology on the earth sciences**; Technology in Society volume 18, Issue 3 (1996), Pag. 297-319
- 10) MOURA Ana Clara; **Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano**; 2003
- 11) SABINS Floyd; **Remote sensing for mineral exploration**; Ore Geology Reviews 14 (1999) pag. 157-183
- 12) SHORT & BLAIR; **Geomorphology from Space**; Nasa, Scientific and Technical Information Branch, 1986; http://daac.gsfc.nasa.gov/DAAC_DOCS/geomorphology/GEO_HOME_PAGE.html
- 13) UFMG; **Postillas do curso de especialização em Geoprocessamento**; 2004
- 14) WU-CUI-GENG-WANG; **Remote sensing rock mechanics and associated experimental studies**; international journal of rock mechanics and mining sciences 37 (2000), Pag. 879-888
- 15) ZUMPRESKEL e PRINZ; **Computer-enhanced multispectral remote sensing data: a useful tool for the geological mapping of Archean terrains in (semi)arid environments**; Computer and Geosciences 26 (2000), Pag 87-100

