

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

MARIA IRIAN DE MASCENA DUARTE

ANÁLISE INTEGRADA DE DADOS APLICADA À GEOLOGIA DO SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS (NE DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO).

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Gilberto Amaral

Este exemplar corresponde 75 à redação final da tese defendida por Maria Trian de Marcena Quarte e aprovada pela Gomissão Julgadora em 03 ORIENTADOR

CAMPINAS - SÃO PAULO FEVEREIRO - 1998

and the second					
¥ K € C	無 ∰ ³ Υ ¹				
ADATOL MAN	CEN (THE				

NUMBER OF STREET	D	8	5	8	_		
ANALINA STREET STREET STREET	3	Č.	Š	0	8	/B	C



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

MARIA IRIAN DE MASCENA DUARTE

ANÁLISE INTEGRADA DE DADOS APLICADA À GEOLOGIA DO SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS (NE DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO).

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geociências, Área de Metalogênese.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Gilberto Amaral – IG/UNICAMP

CAMPINAS - SÃO PAULO FEVEREIRO - 1998

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA I.G. UNICAMP

 Duarte, Maria Irian de Mascena Análise integrada de dados aplicada à geologia do Supergrupo Rio das Velhas (NE do Quadrilátero Ferrífero). / Maria Irian de Mascena Duarte. - Campinas,SP.: [s.n.], 1998.
Orientador:Gilberto Amaral Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências
1. * Aerogeofísica 2. LANDSAT. 3. Processamento Digital de Imagens. 4. Pesquisa Mineral. 1. Amaral, Gilberto. II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. III. Título.



UNICAMP

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

Autora: MARIA IRIAN DE MASCENA DUARTE

ANÁLISE INTEGRADA DE DADOS APLICADA À GEOLOGIA DO SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS (NE DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO).

ORIENTADOR: Prof. Dr. Gilberto Amaral.

Aprovada em :____/___/____

PRESIDENTE: Prof. Dr. Gilberto Amaral

EXAMINADORES:

- Presidente

Prof. Dr. Gilberto Amaral Award Prof. Dr. Paulo Roberto Meneses fleue 45 Prof. Dr. Alfonso Schrank Affrecco Hucark.

Campinas, 03 de abril de 1998.

Aos meus pais Luiz e Francisca Luiza, por todo amor.

,

- Agradeço a todas as pessoas e instituições que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e em especial:
- A CAPES, pela bolsa de estudo concedida durante o período de realização deste trabalho.
- Ao DNPM/CPRM, pela permissão para utilizar os dados aerogeofísicos do Projeto Rio das Velhas.
- Ao PADCT/FINEP, pelo recurso obtido para aquisição da imagem Landsat-TM.
- Ao orientador, Prof. Dr. Gilberto Amaral, pela dedicação, incentivo e paciência com que orientou o presente trabalho.
- A Prof^a. Dra. Elisabete Maria Pascholati, pela amizade, estímulo e solidariedade demonstrada.
- Aos Profs. Alfonso Schrank e Ardemírio Barros, membros da banca de qualificação, pela leitura crítica e sugestões que contribuíram para a forma final desta dissertação.
- Aos Profs. Venerando Eustáquio (DG-UFRN) e José Wilson Macedo (DFTE-UFRN), pela amizade e incentivo para "continuar" na vida acadêmica.
- Aos funcionários do IG/UNICAMP, principalmente à Valdirene, nossa "fada madrinha", e Sr. Aníbal pelo convívio, amizade e compreensão a mim proporcionados.
- Aos analistas de sistemas Patrícia C. Leite e Moacir Cornetti, por todos os "galhos quebrados".
- Aos amigos sempre presentes nas horas difíceis, principalmente: Carla, Alessandra, José Renato, Guilherme, Ronaldo, Rodox, André Fornari, Trilili, Lígia, Silvia Rolim, Blau-Blau, Ilio e Cris.
- A sempre amiga Valéria Augusti, por todas as horas gastas na correção do texto.
- Ao Engenheiro Geofísico e amigo Rigoberto, por sempre acreditar que seria possível.
- A Geóloga e amiga de sempre Márcia Cristina, pelos ótimos momentos passados juntos.
- Aos amigos da turma de 1995, Teófilo, Regina, Enrico, Marcelus, Gilberto, Robson, Marcelo Braghin e Tonelada, por todas as dificuldades enfrentadas juntos.
- Aos geólogos e amigos Márcia Gomes e Ivaldo, companheiros de todas as horas.
- A minha familia, por compreender todas as horas ausentes.
- Por fim, agradeço ao Amintas, pelo constante incentivo, amor e "paciência", com que me ajudou a superar todas as dificuldades.

Lista de Abreviaturas e Siglas	v
Listas de Figuras	vii
LISTAS DE TABELAS	. ix
LISTAS DE ANEXOS	x
RESUMO	. xi
Abstract	xii

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Considerações Gerais	1
1.2 - Objetivos	3
1.3 - Localização da Área	4
1.4 - Aspectos Fisiográficos	4

CAPÍTULO 2 - CONTEXTO GEOTECTÔNICO E GEOLÓGICO8
2.1 - O Cráton do São Francisco8
2.2 - O Quadrilátero Ferrífero8
2.2.1 - Complexo Granito-gnáissico10
2.2.2 -Supergrupo Rio das Velhas12
2.2.3 - Supergrupo Minas13
2.2.4 - Grupo Itacolomi14
2.3 - Geologia da Área de Trabalho15
2.4 - Aspectos Metalogenéticos16
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS 18
3.1 - Materiais Utilizados
3.2 - Método
3.2.1 - Tratamento da Imagem Landsat5-TM
3.2.2 - Tratamento dos Dados Aerogeofísicos
3.2.3 -Digitalização dos Lineamentos da Imagem Landsat5-TM27
3.2.4 -Integração dos Dados Digitais28

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES
4.1 - Análise e Interpretação da Imagem Multiespectral
4.2 - Análise e Interpretação das Imagens Aerogeofísicas
4.2.1 - Imagens Magnetométricas
4.2.2 - Imagens Gamaespectrométricas
4.3 - Interpretação dos Traços de Fraturas 55
4.4 - Análise e Integração dos Dados Digitais60
4.4.1 - Análise e integração dos Dados Gamaespectrométricos com
os Dados Magnetométricos e Imagem Landsat5 - TM60
4.4.2 - Análise e integração dos mapas de lineamentos com os dados
dados gamaespetrométricos64
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES 69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AVIRIS	Airbone Visible and Infrared Imaging Spectometer
CPRM	Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais
CPS	Contagem por segundo
DN	Digital Number
DNPM	Departamento Nacional de Produção Nacional
ERTS	Earth Resources Technology Satellite
FINEP	Financiadora de Estudos e Pesquisa
HRV	High Resolution Visible
IGRF	International Geomagnetic Reference Field
IHS	Intensity, Hue, Saturation
INPE	Instituto de Pesquisas Espaciais
IRS	Indian Remote Sensing Satellite
JERS	Japanese Earth Resources Satellite
K	Potássio
km	Quilômetro
MG	Minas Gerais
MSS	Multi-spectral Scanner
m	Metro
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NGDC	National Geophysical Data Center
OIF	Optimum Index Factor
PADCT	Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico
PDI	Processamento Digital de Imagens
QF	Quadrilátero Ferrífero
RGB	Red, Green, Blue
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SOM	Space Oblique Mercator
SPOT	Systeme Probatoire de l'Observation de la Terre
Th	Tório

TM	Thematic Mapper
U	Urânio
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transerve de Mercator

a present	Localização geográfica da área de estudo e principais vias de acesso	5
1.2	Localização do bloco IV em relação ao levantamento aerogeofísico Rio das	
	Velhas - Quadrilátero Ferrífero, MG	б
2.1	Traçado atualizado do limites do Cráton São Francisco	9
2.2	Principais unidades litoestratigráficas do Quadrilátero Ferrífero	11
2.3	Domínios tectônico-estratigráficos propostos para o Supergrupo Rio das Velhas.	13
3.1	Principais etapas relativas ao método de trabalho	21
3.2	Principais etapas do processamento IHS	29
4.1	Gráfico com os melhores tripletes para a área de trabalho	33
4.2	Imagem das bandas 541 do Landsat5-TM em RGB	34
4.3	Imagem do índice de vegetação Tasseled_cap	36
4.4	Imagem da banda 4 do Landsat5-TM, com filtro textural e reclassificada	37
4.5	Mapa de contorno do campo magnético residual	39
4.6	Imagem do campo magnético residual em nT	40
4.7	Imagem do campo magnético residual com filtro de continuação para baixo (20	
	m da superfície)	42
4.8	Imagem do campo magnético residual com filtro de continuação para cima (160	
	m da superfície)	43
4.9	Imagem do campo magnético residual, reduzido ao polo	45
4.10	Imagem do campo magnético residual com filtro direcional e sombreamento	
	sintético de NW para SE	46
4.11	Scattergramas do índice de vegetação NDVI (eixo X), pelos canais	
	radiométricos K (a), Th (b) e U (c)	47
4.12	Imagem dos canais radiométricos do potássio, tório e urânio em RGB	49
4.13	Imagem do canal radiométrico do potássio, em %	50
4.14	Imagem do canal radiométrico do tório em ppm	52
4.15	Imagem do canal radiométrico do urânio em ppm	53
4.16	Distribuição dos traços de fratura da imagem Landsat5-TM	56

4.17	Distribuição dos traços de fratura da área	57
4.18	Densidade de fraturamento da imagem Landsat5-TM	58
4.19	Número de intersecções, por célula, dos traços de fratura da imagem Landsat5-	
	ТМ	59
4.20	Índice de atipicalidade dos lineamentos da imagem Landsat5-TM	61
4.21	Imagem dos canais radiométricos (K, Th e U) em RGB integrados a banda 4 do	
	sensor Landsat5-TM (canal de intensidade)	62
4.22	Imagem dos canais radiométricos (K, Th e U) em RGB, integrados a imagem do	
	campo magnético residual (canal de intensidade)	63
4.22	Mapa integrado da densidade de fraturamento com o canal do potássio	65
4.23	Mapa integrado do número de interseções com o canal do potássio	67
4.24	Mapa integrado do índice de atipicalidade com o canal do potássio	68

LISTA DE TABELAS

1.1	Coordenadas dos vértices da área de trabalho	6
4.	Parâmetros estatísticos das seis bandas da imagem Landsat5-TM da área de	
	estudo	31
4.2	Pontos utilizados na correção geométrica da imagem para a área de trabalho,	
	com seus respectivos erros	31
4.3	Distribuição dos radioelementos nas unidades geológicas presentes na área de	
	trabalho	54

- I Mapa geológico referente ao bloco IV do Projeto Rio das Velhas 1996
- II Mapa geológico da área de trabalho



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

ANÁLISE INTEGRADA DE DADOS APLICADA À GEOLOGIA DO SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS (NE DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO).

RESUMO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Maria Irian de Mascena Duarte

O presente trabalho aborda o tratamento e integração de dados aerogeofísicos (gamaespectrometria e magnetometria), geológicos e de imagens do Landsat5-TM. Os mesmos foram analisados individualmente e de forma integrada, utilizando-se técnicas de processamento digital de imagens (PDI) e de sistemas georeferenciados de informações (SIG), com ênfase na geologia do Supergrupo Rio das Velhas (NE do Quadrilátero Ferrífero, MG). procurou-se com isto contribuir para a compreensão do contexto geológico da região e de seu potencial metalogenético para ouro.

A análise dos produtos individuais mostrou que os melhores resultados foram obtidos através dos dados aerogeofísicos, onde a gamaespectrometria exibiu uma grande eficácia na correlação com as unidades geológicas mapeadas na área, enquanto a magnetometria mostrou-se eficaz no reconhecimento e correlação com a estruturação geral da área. As imagem do Landsat5-TM não apresentaram bons resultados na discriminação litológica, em virtude da presença da grande quantidade de vegetação e ao espesso manto de intemperismo existente na área. A extração e o tratamento dos alinhamentos estruturais, permitiu separar áreas com diferentes níveis de fraturamento que podem servir como uma ferramenta na seleção de áreas favoráveis a mineralizações, em especial as auríferas.

A partir da integração dos dados gamaespectrométricos com os traços de fraturas extraídos da imagem do Landsat5-TM, procurou-se selecionar áreas favoráveis ou prioritárias a pesquisa mineral para ocorrências de ouro.

Os resultados demonstram a possibilidade da aplicação dos dados gamaespectrométricos integrados aos traços de fraturas à seleção de áreas prioritárias a pesquisa mineral, mesmo em regiões de densa cobertura vegetal.



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

INTEGRATED ANALYSIS OF DATA APPLIED TO THE RIO DAS VELHAS SUPERGROUP GEOLOGY (NE OF QUADRILÁTERO FERRÍFERO).

ABSTRACT

M. Sc. DISSERTATION

Maria Irian de Mascena Duarte

The analysis of the geology of the Archean Rio das Velhas Supergroup, in the northeastern portion of the Quadrilátero Ferrífero, and its gold mineralizations, using remote sensing, aerogeophysical and geological data integration was the main objective of this work. Digital image processing and georeferenced information systems (GIS) techniques were applied to Landsat-TM and aerogeophysical data (magnetics and gamma-spectrometry), in order to obtain additional lithological and structural information and its relationship with known gold deposits in the area.

For lithology, the best results were obtained with gamma-spectrometric data which presented a good correlation with the known mapped units. Magnetic data were useful for mapping iron formations as well as the main structural trends. Landsat-TM image analysis presented poor results for lithology due to the presence of intense weathering and vegetation cover. However, its infra-red bands were useful for extraction of fracture traces whose digital processing allowed the identification of zones with different brittle behavior, potentially linked to hydrothermal processes.

GIS data integration, using gamma-spectrometry, fracture trace data and location of mineral occurrences, resulted in the definition of areas potentially favourable for mineral exploration, even in areas with thick soil and vegetation covers.

1.1 – Considerações Gerais

A historia do sensoriamento remoto, segundo o Manual *of Remote Sensing* (Colwell 1983), é dividida em dois períodos, um de 1860 a 1960 onde o mesmo seria baseado na utilização de fotografias aéreas e outro de 1960 até os nossos dias, caracterizado pela multiplicidade dos sistemas sensores aéreo e orbitais. A partir da década de 60, com o desenvolvimento do programa espacial norte-americano, as técnicas de sensoriamento remoto evoluíram rapidamente, atingindo de modo intenso o setor das aplicações civis. Os principais sistemas sensores hoje em uso têm origem em projetos iniciados na década de 70, sendo estes os precursores dos sensores e das câmaras a bordo de satélites e veículos espaciais.

O programa pioneiro norte-americano ERTS (atual LANDSAT) teve seu primeiro satélite lançado em julho de 1972 (Lauer *et al.* 1997, Mika 1997). Após o LANDSAT, devese destacar o aparecimento de outros programas, tais como o programa SPOT (França), o JERS (Japão), o IRS (Índia), o RADARSAT (Canadá), entre outros.

A evolução dos sistemas sensores orbitais ocorreu tanto em relação ao aumento da resolução espacial, como é o caso do programa SPOT/HRV, que oferece imagens digitais com resolução espacial de 10 m, em modo pancromático, quanto em relação à resolução espectral, com o aumento no números de bandas espectrais, como as sete apresentadas pelo sensor TM-LANDSAT e dos primeiros sensores hiperespectrais aeroportados, como é o caso do programa AVIRIS, com 224 bandas espectrais de 10 nm de largura média cada uma operando entre 0,4 a 2,4µm e resolução espacial de 20 m.

Nos últimos 15 anos, as pesquisas em sensoriamento remoto têm produzido sensores cada vez mais sofisticados, tais como o AVIRIS, JERS-1, RADARSAT, etc. (Crósta 1996), ampliando sua aplicabilidade a uma grande gama de problemas ecológicos, urbanos e de recursos naturais (Garcia Netto 1993, Okida & Veneziani 1994, Van der Meer 1994; Homer *et al.* 1997).

A síntese metodológica de inúmeros trabalhos mostra que as imagens do Landsat/TM são muito utilizadas no estudo de áreas mineralizadas, por realçar feições espectrais características das litologias e zonas de alterações associadas (Amaral *et al.* 1976, Crósta & Moore 1989, Crósta 1993, Almeida Filho & Vitorello 1993), além de melhorar a compreensão

dos sistemas de estruturas deformacionais e revelar a influência do controle estrutural na mineralização (Kowalik & Glenn 1987, Queiroz *et al.* 1994, Freitas-Silva & Meneses 1994).

Além dos sistemas sensores orbitais, a aerogeofísica tem se destacado no mapeamento e exploração regional (Reeves 1985, Santos Filho *et al.* 1994) e, ainda, na detecção de novas mineralizações (Gnojek & Prichystal 1985). No caso da aeoromagnetometria, que é muito utilizada na pesquisa de depósitos de ferro, devido à magnetita associada (Luiz & Silva 1995), esta técnica permite que além da localização de jazidas economicamente importantes, possa ainda ser usada na identificação de contatos geológicos e de estruturas geológicas, já que o sensor atua em profundidades, até quilométricas. Outro método geofísico bastante utilizado é a aerogamaespectrometria, que se baseia na distribuição de radioelementos (K, U e Th) nos materiais terrestres, o que possibilita com isto a separação de litologias de acordo com o seu conteúdo nestes elementos. Por atuar em superfície, seus resultados guardam considerável semelhança com aqueles obtidos pelos mapeamentos geológicos (Luíz & Silva *op cit.*).

A integração de dados aerogeofísicos com imagens Landsat-TM, vem sendo utilizada ao longo dos últimos anos, sendo inúmeros os trabalhos publicados que demonstram a eficácia dessa técnica (Kowalik & Glenn *op cit.*, Harris *et al.* 1990, Carmelo & Carvalho 1993, Perrotta & Câmara 1994), para estudos na área da geologia.

A disponibilidade de trabalhar com dados digitais geológicos, geofísicos, referentes ao Projeto Rio das Velhas (DNPM 1993) e imagem Landsat5 - TM, propiciou a oportunidade deste trabalho, que procurou empregar as técnicas de processamento digital de imagens na análise e integração destes dados, a fim de contribuir para o conhecimento geológico da região.

A área escolhida para realização desta pesquisa encontra-se inserida no contexto geotectônico do Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais, o qual representa uma região do Pré-Cambriano brasileiro de grande importância econômica, devido às suas mineralizações, principalmente de ouro, ferro e manganês. Diversas jazidas, depósitos e ocorrências de ouro são conhecidas nesta área e as principais minas subterrâneas em atividade no Brasil situam-se no Supergrupo Rio das Velhas, unidade Arqueana do Quadrilátero Ferrífero (Ladeira 1988).

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução sobre o tema abordado, os objetivos desta pesquisa, a localização da área, escolhida de acordo com o Projeto Rio das Velhas (DNPM *op cit.* 1993), e uma sucinta descrição dos aspectos fisiográficos predominantes.

O segundo capítulo descreve e faz uma revisão do contexto geológico e geotectônico do Cráton do São Francisco e do Quadrilátero Ferrífero, descrevendo suas unidades geológicas e suas inter-relações. Apresenta também as principais unidades do Supergrupo Rio das Velhas e seus aspectos metalogenéticos.

O capítulo 3 relaciona os materiais utilizados na elaboração da presente dissertação, tais como imagem do Landsat5-TM, mapas geológicos, dados magnetométricos e gamaespectrométricos, apresentando as principais etapas metodológicas, referente tanto aos tratamentos individuais utilizados no processamento dos dados (correções relativas a cada dado, além de técnicas específicas de processamento digital), como as técnicas empregadas para a integração dos diferentes dados.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos através do processamento dos dados digitais individuais (imagem do Landsat5-TM, aeromagnetometria, aerogamaespectrometria, traços de fraturas), bem como os resultados referentes a integração desses dados.

O capítulo 5 traz uma discussão final com base na análise dos resultados encontrados a partir de todos os processamentos empregados e fornece sugestões para trabalhos posteriores a serem desenvolvidos na área.

1.2 - Objetivos

Este trabalho teve por objetivo principal realizar, através de processamento digital, a integração de dados geológicos, aerogeofísicos e de imagens multiespectrais geradas pelo LANDSAT5 - TM, com ênfase na geologia do Supergrupo Rio das Velhas (NE do Quadrilátero Ferrífero, MG), procurando com isto contribuir para a compreensão do contexto geológico da região e de seu potencial metalogenético relacionado com as mineralizações auríferas.

Como objetivo secundário foi testada uma seqüência metodológica para a delimitação de áreas favoráveis a mineralizações auríferas, a partir da utilização dos dados do canal de potássio com os mapas gerados a partir da extração de traços de fraturas.

3

1.3 - Localização da Área

A área escolhida para a realização do presente trabalho, situa-se na região nordeste do Quadrilátero Ferrífero (MG), abrangendo parte das quadrículas de São Gonçalo do Rio Abaixo, Santa Bárbara, Florália, Conceição do Rio Acima, Catas Altas, Capanema e Santa Rita Durão, englobando parte dos municípios de Barão de Cocais e Santa Bárbara (Figura 1.1), possuindo aproximadamente 325 km². A delimitação da área, cujos vértices são apresentados na Tabela 1.1, foi feita de acordo com a subdivisão do Projeto Rio das Velhas (DNPM 1993), correspondendo ao bloco IV deste levantamento aerogeofísico (Figura 1.2).

1.4 - ASPECTOS FISIOGRÁFICOS

A seguir será reproduzido de Baltazar & Raposo (1993) à descrição dos principais aspectos fisiográficos da área de trabalho.

"De acordo com a classificação climática de Köppen, ocorrem na área os tipos climáticos Cwa e Cwb. O primeiro predomina nas partes menos elevadas, compreende um clima úmido de verões quentes, temperatura média anual entre 19,5° e 21,8° C e média do mês mais frio inferior a 18° C, o segundo domina os níveis mais elevados, diferindo do Cwa pelos verões mais brandos, ou seja, temperatura média anual mais baixa, entre 17,4° e 19,8° C, e média do mês quente inferior a 22° C.

A rede hidrográfica pertence, em quase sua totalidade, à bacia do rio Doce, sendo que o principal curso d'água da área de estudo é o Rio Conceição, cujas nascentes estão situadas na serra do Caraça, no município de Ouro Preto. A rede de drenagem, desordenada no conjunto, apresenta, em detalhe, nítidos controles estruturais, mas sem direção preferencial.

Os aspectos florais atuais refletem a atuação antrópica do homem sobre o meio natural. Estes aspectos apresentam-se sob a forma de uma paisagem combinada de vegetação nativa, pastagens e capoeiras. Atualmente verifica-se a substituição, em vários locais, da vegetação nativa pela silvicultura com eucalipto.



Figura 1.1 - Localização geográfica da área de estudo e principais vias de acesso (modificada de Abreu *et al.* 1988).

VÉRTICES	LATITUDE SUL	LONGITUDE OESTE	VÉRTICES	LATITUDE SUL	LONGITUDE OESTE
9	20 ⁰ 07' 48"	43° 39' 12"	16	20 ⁰ 00' 25"	43° 26' 35"
10	19 ⁰ 59' 53"	43° 34' 17"	17	20 ⁰ 03' 40"	43° 26' 18"
anne anna anna anna anna anna anna anna	19 ⁰ 56' 48"	43° 29' 49"	18	20 ⁰ 03' 10"	43° 32' 15"
12	19 ⁰ 53' 05"	43° 26' 16"	19	20 ⁰ 08' 40"	43° 35' 35"
13	19 ⁰ 52' 25"	43° 23' 43"	20	20 ⁰ 11' 29"	43° 33' 13"
14	19 ⁰ 54' 56"	43° 21' 38"	21	20 ⁰ 11' 47"	43° 35' 47"
15	19 ⁰ 55' 51"	43° 23' 45"			

Tabela 1.1 – Coordenadas dos vértices da área de trabalho.



Figura 1.2 - Localização do bloco IV em relação ao levantamento aerogeofísico Rio da Velhas - Quadrilátero Ferrífero, MG (DNPM 1993).

As unidades geomorfológicas presentes na área correspondem ao Quadrilátero Ferrífero e aos Planaltos Dissecados. A primeira unidade apresenta altitudes médias em torno de 1.400 – 1.600 m. Em sua área de ocorrência estão situadas as nascentes dos rios das Velhas e Piracicaba, sendo seu relevo controlado estruturalmente de maneira marcante. O escarpamento que delimita o Quadrilátero Ferrífero apresenta desníveis de centenas de metros, em relação às cotas médias das unidades vizinhas, levando a crer que não apenas processos erosivos, mas também movimentos tectônicos contribuíram para a evolução geomorfológica da área. A segunda unidade, apresenta como principal característica, a dissecação fluvial que, atuando sobre as rochas predominantemente granito-gnáissicas, originou formas de colinas e cristas com vales encaixados e/ou de fundo chato. Nessa unidade, as altitudes são muito variáveis, oscilando entre 1.000 e 1.200 m nas cristas e 500 a 800 m nos vales". Este capítulo apresenta uma síntese do conhecimento geológico e geotectônico da área estudada, em especial ao Supergrupo Rio das Velhas, sendo discutido abaixo tanto suas relações com as outras unidades inseridas dentro do Cráton do São Francisco, como sua litoestratigrafía.

2.1 - O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO

O Cráton do São Francisco deve ser compreendido como a área continental que restou estável a partir de uma grande placa litosférica neoproterozóica, em grande parte externa, a qual sofreu processos de subducção e colisão (Brito Neves & Alkmim 1993).

Alkmim *et al.* (1993), propõe um traçado atualizado e mais preciso do contorno do cráton (Figura 2.1), mantendo ainda fidelidade aos critérios de Almeida (1977), ou seja, posicionando o limite sempre pela presença de rochas ou estruturas do Brasiliano.

A província tectônica do Cráton do São Francisco, que se estende pelos Estados da Bahia e Minas Gerais e uma pequena porção dos Estados de Sergipe e Goiás, é caracterizada pela presença de uma rica e diversificada gama de recursos minerais. As associações vulcanosedimentares, principalmente os *greenstone-belts* de Serrinha e Rio das Velhas, formam as entidades tectônicas mais importantes para concentrações de ouro do Cráton São Francisco (Misi *et al.* 1993).

2.2 - O QUADRILÁTERO FERRÍFERO

O Quadrilátero Ferrífero (QF) se estende por uma área aproximada de 7.000 km², na porção central do Estado de Minas Gerais, sendo uma das áreas mais investigadas no Brasil em termos geológicos. Apesar de alguns autores terem publicado sínteses a respeito da estratigrafia, tectônica e evolução geológica do QF, nota-se que há divergências acentuadas quanto à delineação do seu arcabouço estrutural e de sua estratigrafia (Marshak *et al.* 1992, Chemale Jr. *et al.* 1994, Corrêa Neto & Baltazar *et al.* 1994.).



Figura 2.1 – Traçado atualizado dos limites do Cráton São Francisco (Alkmim *et al.*1993). 1.Embasamento do cráton. 2.Embasamento envolvido nos processos de deformação e metamorfismo do Evento Brasiliano. 3.Unidades Mesoproterozóicas. 4.Unidades Neoproterozóicas. 5.Coberturas Fanerozóicas. 6.Limite do cráton, dentes em negrito e vazados indicam, respectivamente, falha de empurrão de alto e baixo ângulo. 7.Cidades:L, Lençois; S, Salvador; BR, Brasília; DA, Diamantina; BH, Belo Horizonte. 8. Províncias fisiográficas e geológicas: CD, Chapada Diamantina; ET, Espinhaço Setentrional; BP, Bacia do Rio Pardo; EM, Espinhaço Meridional; QF, Quadrilátero Ferrífero. 9.Faixas de dobramentos marginais brasilianas: FA, Faixa Araçuai; FRG, Faixa Alto Rio Grande; FB, Faixa Brasília; FRP, Faixa Rio Preto; FRPT, Faixa Riacho do Pontal; FS, Faixa Sergipana.

Em termos geotectônicos, o Quadrilátero Ferrífero encontra-se inserido no extremo sul do Cráton São Francisco (Alkmim *et al.* 1993). Segundo Chemale Jr. *et al.* (1991, 1994), a estruturação complexa do Quadrilátero Ferrífero seria resultado, principalmente, da ação de dois eventos deformacionais. O primeiro teria ocorrido no Paleoproterozóico, teve caráter extensional e foi responsável pela formação dos megassinclinais interconectados de Sta. Rita, Dom Bosco, Moeda e Serra do Curral, além do soerguimento dos complexos granitognáissicos (domos) de Sta. Rita, Bonfim, Bação, Belo Horizonte e Caeté, os quais, em termos gerais definiram o formato do Quadrilátero. O segundo pertencente ao Neoproterozóico , teria um caráter compressional e afetou principalmente a porção leste da região, ampliando os megassinclinais, reaproveitando as descontinuidades previamente formadas e gerando novas estruturas.

Dorr II (1969) sintetizou os resultados do projeto DNPM-USGS realizado nas décadas de 50 e 60, o qual resultou no empilhamento litoestratigráfico mais utilizado para o Quadrilátero Ferrífero. Ladeira (1980), subdividiu as rochas Arqueanas do Quadrilátero Ferrífero em dois conjuntos: um complexo granito-gnáissico indiferenciado e o Supergrupo Rio das Velhas. As rochas Proterozóicas foram divididas nos Supergrupos Minas e Espinhaço.

A coluna litoestratigráfica do Quadrilátero Ferrífero utilizada como referência nesta dissertação é definida por: Complexo Granítico-gnáissico, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi (Figura 2.2).

2.2.1 - Complexo granito-gnáissico.

Os terrenos granítico-gnáissicos que se localizam nas imediações do Quadrilátero Ferrífero e em alguns casos apresentam-se como estruturas dômicas, consistem em gnáisses polideformados, metatonalitos a metagranitos, migmatitos, anfibolitos, metaultramafitos assim como pegmatitos formados preferencialmente no Arqueano e no Transamazônico (Chemale Jr. *et al* 1991; 1994).

Harder & Chamberlin (1915) interpretaram as rochas graníticas (*senso lato*) como as mais antigas do Quadrilátero Ferrífero, formando assim o embasamento da região.

Dorr II & Barbosa (1963) e Dorr II (1969), com base nos primeiros dados geocronológicos da região, consideraram esta unidade como as mais jovens do Précambriano.

10

Herz (1970) relacionou os complexos granito-gnáissicos, subdividindo-os de acordo com suas características petrográficas, litogeoquímicas e geocronológicas.

Sichel (1982) e Ladeira (1985) consideram estas rochas como a unidade Arqueana mais antiga da região, com algumas associações ígneas relacionadas.



Figura 2.2. – Principais unidades litoestratigráficas do Quadrilátero Ferrífero (modificada de Chemale Jr. et al. 1994).

2.2.2 - Supergrupo Rio das Velhas

Esta sequência vulcano-sedimentar Arqueana do Quadrilátero Ferrífero foi definida originalmente por Dorr II *et al.* (1957) como Série Rio das Velhas. As rochas vulcânicas compreendem, komatiítos com textura *spinifex* (Schorscher 1978, Schorscher *et al.* 1982), basaltos toleíticos, rochas vulcanoclásticas e vulcânicas félsicas (Ladeira, 1980, 1981), enquanto que a porção sedimentar, é de natureza clástica e química, predominantemente composta por filitos cloríticos, somados à formação ferrífera, grauvaca, quartzito e conglomerados (Dorr II 1969, Ladeira 1980).

Dorr II *et al.* (*op cit.*) subdividiu a Série Rio das Velhas em dois grupos: Nova Lima (inferior) e Maquiné (superior). O Grupo Maquiné foi posteriormente subdividido em duas formações, denominadas Palmital (inferior), constituída predominantemente de quartzitos sericíticos, filitos quatzosos e filitos (O'Rourke, comunicação escrita *apud* Dorr II 1969) e Casa Forte, constituída de quartzitos sericíticos, cloríticos a xistosos (Gair, 1962 *apud* Dorr II 1969).

Almeida (1976), Schorscher (1976) e Amaral *et al.*(1976) interpretaram esta seqüência vulcano-sedimentar Arqueana como um *greenstone belt*, sendo a mesma elevada à categoria de supergrupo pelos últimos autores. Schorscher (1979) subdividiu o Supergrupo Rio das Velhas em três grupos, da base para o topo: Quebra Osso (composto por rochas vulcânicas e plutônicas de caráter ultramáfico); Nova Lima (composto por uma sequência metavulcanossedimentar) e Maquiné (sequência metassedimentar detrítica).

Ladeira (1980), com base no modelo de estratigrafia para *greenstone belts*, mantém a proposta original de Dorr (op. cit.), mas subdivide o Grupo Nova Lima em três unidades: uma unidade metavulcânica (base), uma unidade metassedimentar química (intermediária) e uma unidade metassedimentar clástica (topo)

Oliveira *et al.* (1983) e Vieira & Oliveira (1988) restringindo suas pesquisas ao distrito de Nova Lima, propuseram para o Grupo Nova Lima, uma subdivisão em Unidade Inferior, Média e Superior.

Pinto & Silva (1996) propõem, com base no projeto aerogeofísico Rio das Velhas quatro grandes domínios tecnônico-estratigráficos para o Supergrupo Rio das Velhas: Nova Lima, Caeté, Santa Bárbara e São Bartolomeu, separados entre si por zonas de cisalhamento de baixo ângulo (Figura 2.3). Os Grupos Nova Lima e Maquiné foram subdivididos em várias unidades menores, de acordo com características específicas de cada domínio.

A idade radiométrica das rochas do greenstone belt Rio das Velhas foi definida recentemente com maior precisão por Machado et al. (1996), para as quais foram estabelecidas idades mínimas de 2772 - 2778 M.a. em zircões detríticos.



Figura 2.3 - Domínios tectônico-estratigráficos propostos para o Supergrupo Rio das Velhas (Pinto & Silva 1996).

2.2.3 - Supergrupo Minas

Esta sequência foi definida originalmente por Derby (1906) como Série Minas, constituída por um conjunto de rochas xistosas que recobrem discordantemente gnaisses mais antigos. Dorr II *et al.* (1957) subdividiram o Supergrupo Minas em três grupos: Caraça (inferior), Itabira (médio) e Piracicaba (topo).

Dorr II (1969), subdividiu o Supergrupo Minas em quatro grupos, da base para o topo: Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba. O grupo Tamanduá, incluído como o quarto

grupo, foi primeiramente definido por Simmons & Maxwell (1961) e atribuído à Série Rio das Velhas.

O Grupo Tamanduá ocorre na Serra do Tamanduá, é composto pela Formação Cambotas (quartzitos, conglomerados e quartzitos conglomeráticos) e, segundo Door II (1969) situa-se entre o Grupo Maquiné (Rio das Velhas) e o Grupo Caraça (Minas), através de contato tectônico. Schorscher (1980), Sichel (1982) sugerem o abandono definitivo do termo Grupo Tamanduá, devido a sua correlação com as unidades do Supergrupo Espinhaço.

As rochas do Supergrupo Minas ocorrem sobrepostas e em nítida discordância com as unidades do Supergrupo Rio das Velhas, sendo constituídas por uma unidade clástica basal, uma clástico-química intermediária e ainda uma químico-clástica superior (Chemale Jr. *et. al.* 1991). A unidade basal é representada pelo Grupo Caraça, composto pela Formações Moeda (quartzitos, conglomerados e filitos) e Batatal (filitos sericíticos e subordinadamente metacherts, formações ferríferas e filitos grafitosos). A unidade intermediária é representada pelo Grupo Itabira, composto pelas Formações Cauê (formações ferríferas fácies óxidos-itabiritos e filitos) e Gandarela (mármores e filitos dolomíticos). A unidade do topo, Grupo Piracicaba, foi subdividida por Dorr II *et al.* (1957) em cinco formações, da base para o topo: Cercadinho (quartzitos ferruginosos, filitos ferruginosos, filitos dolomíticos, filitos e dolomito), Fecho do Funil (filitos dolomíticos, filitos e dolomitos impuros) Formações (quatzitos finos e maciços), Barreiro (filitos e filitos grafitosos) e Sabará (filitos, clorita-xistos, grauvacas e, localmente, tufos metamórficos e cherts).

Com base em estudos geocronológicos, utilizando isótopos de Pb em carbonatos, Babinski *et al.* (1991) conclui que a deposição do Supergrupo Minas ocorreu entre 2,4 e 2,1Ga, sendo então indicada uma idade Eoproterozóica para o mesmo (Babinski *et al.* 1993).

2.2.4 - Grupo Itacolomi.

Esta unidade representa o topo da coluna estratigráfica Proterozóica, repousa discordantemente sobre as litologias do Supergrupo Minas sendo constituída, principalmente, por quartzitos conglomeráticos e lentes de conglomerados com seixos de itabiritos, filitos, sericíticos, quartzitos e veios de quartzo, depositados em um ambiente litorâneo ou deltáico (Dorr II 1969). A série Itacolomi de Dorr II (*op. cit.*), também foi redefinida como Grupo Itacolomi por Ladeira (1980).

2.3 – Geologia da Área de Trabalho

De modo geral, a área objeto deste estudo está compreendida no domínio Santa Bárbara definido por Pinto & Silva (1996), sendo quase totalmente restrita ao Supergrupo Rio das Velhas, unidade Arqueana do Quadrilátero Ferrífero. As unidades litoestratigráficas presentes na área de trabalho, de acordo com CPRM (1996) são (Anexo I):

→ Rochas metabásica intrusiva (ib): ocorrem como corpos localmente na parte norte e central da área;

→ Os terrenos granito-gnáissicos (gg), ocorrem predominantemente na porção leste e nordeste da área. Destaca-se o corpo granítico existente no extremo NE da área denominado de Granito Peti (Silva 1995).;

→ O Supergrupo Rio das Velhas, representa mais de 90% da área total. É constituído pelos Grupos Maquiné e Nova Lima (base). O Grupo Nova Lima, que ocupa quase toda a área, é composto da base para o topo, pelas seguintes Formações:

 Quebra Osso (qo): representada por metavulcanicas ultramáficas (serpentinatalco xisto, tremolita/actinolita xisto, (talco)-clorita xisto, serpentinito), dunito, peridotito, formação ferrífera e turmalinito;

- Ouro Fino (of): constituída por metabasaltos (clorita-tremolita/actinolita xisto, (carbonato)/(plagioclásio)-mica-clorita xisto), metavulcanica ácida (quartzo-sericita xisto), sericita-clorita xisto, formações ferríferas, metachert e xisto carbonoso;

- Santa Quitéria (sq): constituída por metapelitos (clorita-sericita xisto com carbonato, grafita, talco), formações ferríferas, metachert e xisto carbonoso muito abundante;

- Córrego do Sítio (cs): representada por metaturbiditos finos ((clorita)quartzo-sericita xisto, (plagioclásio)-sericita-clorita-quartzo xisto, mica-quartzo xisto), mica xisto carbonoso e formação ferrífera pouco frequente;

- Mindá (m): constituída por metagrauvaca ((plagioclásio)-(clorita)sericita/moscovita-quartzo xisto) e metapelito subordinado ((clorita)-sericita xisto fino);

►O Grupo Maquiné ocupa a porção S/SE da área, representa a unidade de menor distribuição espacial. É constituído pelas Formações Palmital (base) e Casa Forte.

15

 A Formação Palmital é representada na área pelo Membro Rio de Pedras (rp), constituído por (clorita) quartzo-sericita xistos, quartzito sericítico e cloritóide-mica-quartzo xisto.

- A Formação Casa Forte é representada na área pelo Membro Chica Dona (cd), na base, constituído por quartizito sericítico fino, metaconglomerado polimítico sustentado pela matriz e Córrego do Engenho (ce), no topo, constituído por quartzito sericítico fino e sericita xisto.

→ O Supergrupo Minas (SGM): ocorre principalmente na porção sudoeste, sendo seus litotipos indiscriminados na área (Pinto & Silva 1996).

→ Canga e coberturas lateríticas (Qtca): compostos basicamente por materiais clásticos de composição siliciclástica e por óxidos hidratados de ferro.

Aluviões (Qa): sedimentos inconsolidados por deposição fluvial.

2.4 ASPECTOS METALOGENÉTICOS

O Quadrilátero Ferrífero destaca-se por seus depósitos minerais de ouro, ferro, manganês, topázio imperial e bauxita. A produção total de ferro para o ano de 1995 foi de 132 mt ou 75,4% do total nacional, enquanto que a produção industrial de ouro, também para o ano de 1995, chegou a 15.060 kg ou 36,4% do total produzido no país (Brito 1997).

Grande parte do ouro encontrado dentro do Quadrilátero Ferrífero, provém do *greenstone belt* Rio das Velhas, conhecido mundialmente por suas minas de ouro, em especial associados aos litotipos do Grupo Nova Lima, destacando-se as minas de Morro Velho, Raposos, São Bento, Raposos, do Faria, do Bicalho, entre outras (Berbert 1988).

As ocorrências de ouro na porção norte do Supergrupo Rio das Velhas estão hospedadas principalmente em fácies-carbonatos ou fácies-óxidos de formações ferríferas do do tipo Algoma e localmente em metavulcânicas. Modelos singenéticos (Ladeira 1980, Vial 1980) e epigenéticos (Vieira 1988) têm sido propostos para explicar essas mineralizações, não havendo porém, até hoje, um consenso. Na parte sul, o ouro localiza-se ao longo de falhas de cavalgamento, junto ao limite oriental do cráton. Adicionalmente, o ouro ocorre em conglomerados uraníferos (Heineck *et al.* 1995).

16

Os depósitos de formações ferríferas bandadas do tipo Lago Superior de idade Paleoproterozóica são ocasionalmente associados com depósitos de óxidos de manganês e, subordinadamente, ouro. Os depósitos hidrotermais de topázio imperial, têm sido explotados por muitas décadas na parte sul do Quadrilátero, onde também ocorrem os depósitos de lateritas aluminosas e de bauxitas (Heineck *et al.* 1995).

Para efeito de exploração mineral na área de estudo, basicamente há duas situações potenciais para ocorrências de ouro:

 a) mineralizações auríferas do tipo São Bento, Santa Quitéria, onde o ouro esta associados a corpos sulfetados ou veios de quartzo hospedados na seqüência metavulcanossedimentar;

b) mineralizações auríferas do tipo Córrego do Sítio, onde os depósitos estão associados a zonas de alteração hidrotermal em metassedimentos da unidade homônima.

Esta dissertação envolveu um grande volume de dados, os quais tiveram que passar por uma série de processamentos, a fim de serem convenientemente utilizados, bem como a necessidade do emprego de uma gama de *software* Este capítulo apresenta os materiais utilizados bem como os principais procedimentos metodológicos.

3.1 - MATERIAIS UTILIZADOS

A seguir serão descritos os dados utilizados para execução do presente trabalho:

Mapas Geológicos e Topográficos

Os dados geológicos referem-se a mapas geológicos na escala 1:25.000 do Projeto Rio das Velhas (Fase II), executado pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil) para o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral) em 1995, referentes às quadrículas São Gonçalo do Rio Abaixo, Santa Bárbara, Florália, Conceição do Rio Acima, Catas Altas, Capanema e Santa Rita Durão (MG), além de mapas geológicos e seções do Quadrilátero Ferrífero - MG, na escala de 1:25.000, elaborados sob o auspício do Programa de Cooperação Técnica Brasil - Estados Unidos entre 1949-1960. Estes mapas foram digitalizados e serviram para análises comparativas com os dados geofísicos e a imagem Landsat5-TM (Anexo II).

Foram utilizadas cartas topográficas referentes às quadrículas dos mapas geológicos, na escala 1:25.000, elaboradas pelo DNPM em 1962, sob o auspício do Programa de Cooperação Técnica Brasil - Estados Unidos. Essas cartas serviram como base para efetuar a correção geométrica da imagem Landsat5 -TM.

• Imagem LANDSAT5 - TM

O sensor *Thematic Mapper* (TM), faz parte da segunda geração de imageadores multiespectrais, deriva do sensor *Multi-Spectral Scanner* (MSS) e possui sete bandas espectrais, com resolução espacial de 30 m nas bandas 01-05 e 07 (bandas de reflexão solar) e de 120 m na banda 06, que corresponde ao canal termal. A resolução radiométrica desse sensor é de 256 níveis de cinza nas bandas 01 - 05 e 07 e de 64 na banda 06 (Lillesand & Kiefer 1994).

A imagem utilizada neste trabalho, em formato digital, refere-se a um corte (1051 x 1221 pixels) de uma cena completa, referentes à órbita 217, ponto 74, com elevação solar de 32°, adquiridas em 18 de junho de 1985, com 0% de cobertura de nuvens. Apenas as bandas de reflexão solar foram utilizadas no decorrer do trabalho. A imagem do Landsat5 - TM foi obtida com recursos do projeto PADCT/FINEP/ Mineralizações Auríferas... 52/93.

Dados Aerogeofísicos

O dados disponíveis na área são referentes ao Projeto Rio das Velhas, com levantamento e processamento de dados efetuados pela CPRM na região do Quadrilátero Ferrífero – MG, entre os anos de 1992 a 1995, com ênfase especial à exploração do ouro. O levantamento atingiu 6.726 km de perfis aerogeofísicos com emprego simultâneo dos sensores de aeromagnetometria, gamaespectrometria e eletromagnetometria, em linhas espaçadas de 250 m, altura média de vôo de 60 m e velocidade média de 90 km/h. As linhas de vôo foram projetadas perpendicularmente à direção preferencial das rochas dos Grupos Nova Lima e Maquiné, variando entre N50°E e N40°W (DNPM 1993). Os dados foram cedidos no formato digital ASCII, sendo interpolados e posteriormente interpretados durante a execução deste trabalho.

Equipamentos

Os equipamentos (*workstations*, microcomputadores, mesa digitalizadora, impressoras, *plotter*) utilizados como suporte às atividades deste trabalho encontram-se disponíveis nos Laboratórios de Ensino Informatizado (LEI), de Editoração Gráfica (LEG) e no de Processamento de Imagens Geo-Referenciadas (LAPIG), no Instituto de Geociências da UNICAMP.

• Programas

Diversos programas foram utilizados durante a execução deste trabalho, dentre eles: *ER-MAPPER*, versão 5.5, para as atividades de pré-processamento das imagens, processamento dos dados digitais disponíveis, digitalização dos lineamentos na imagem Landsat e integração de todas as informações digitais; *ENVI*, versão 2.6, para aplicação do filtro textural; *SURFER for Windows*, versão 6.0, foi utilizado para a interpolação dos dados geofísicos; *IDRISI for Windows*, versão 1.01, para a integração dos dados; *AUTOCAD*, versão

13.0, para a digitalização das informações topográficas e dos mapas geológicos, *WORD*, versão 7.0, *POWER POINT*, versão 7.0, *COREL DRAW*, versão 7.0, e *PHOTOSTYLER*, versão 2.0, foram utilizados para as atividades de editoração de texto e gráfica.

3.2 - Método

Inicialmente deve-se destacar a grande gama de materiais e métodos utilizados neste trabalho, o que juntamente com o formato da área, fez com que houvesse um aumento substancial na etapa de processamento digital.

A abordagem metodológica utilizada se constituiu, basicamente, pelos seguintes procedimentos: levantamento bibliográfico, pré-processamento e processamento da imagem do Landsat5-TM, tratamento dos dados digitais aerogeofísicos, digitalização e tratamento dos dados temáticos, integração dos dados digitais e avaliação dos resultados. A extração e tratamento dos traços de fratura está incluída no processamento digital da imagem Landsat5-TM.

A figura 3.2 apresenta um fluxograma, que sintetiza as etapas relativas ao método escolhido, para atingir os objetivos pré-estabelecidos.

3.2.1 – Tratamento da imagem Landsat5-TM

A) Pré-processamento digital.

Os dados originais do LANDSAT5-TM foram processados pelo INPE para correções do sistema. Além das correções efetuadas, ainda se fizeram necessários outros tipos de correção: geométrica e atmosférica.

• Correção Geométrica

Devido ao fato da imagem original fornecida pelo INPE estar em projeção SOM (*Space Oblique Mercator*), foi necessário refinar a correção geométrica da imagem, que consistiu em ajustá-la ao sistema de coordenadas UTM (*Universal Transversa de Mercator*). Para realizar esse ajuste, foram utilizados pontos de controle no terreno.


Figura 3.1 - Principais etapas relativas ao método de trabalho.

A seleção dos pontos de controle foi feita nas bases cartográficas descritas anteriormente, sendo os mesmos distribuídos homogeneamente por toda a área e facilmente identificáveis na imagem digital. Da totalidade desses pontos, apenas 9 foram usados para efetuar a retificação. O processo de correção foi realizado no programa ER-Mapper, utilizando-se o datum Córrego Alegre e a projeção UTM, zona 23 sul. O tipo de retificação adotado foi por vizinho mais próximo, por sua maior interação com os pixels na vizinhança e melhor visualização final da imagem.

Correção Atmosférica

Nesta etapa procedeu-se à subtração do efeito da radiação solar sobre os valores de nível de cinza registrados nas bandas TM. Tal correção se mostrou necessária face à diminuição da qualidade dos dados e redução dos contrastes espectrais das diferentes imagens.

Utilizou-se para este procedimento a subtração de pixel escuro ("*dark pixel subtraction*"), a qual baseou-se na subtração de um valor de cinza (que representaria o efeito de espalhamento) determinado para cada banda individualmente (Chavez 1988). A determinação desse valor de cinza foi feita empiricamente, com base no fato de que áreas com águas profundas devem refletir a radiação solar, aparecendo com DN próximo a zero. A determinação desses valores na imagem foi realizada na represa do Peti, localizada no extremo NE da área de trabalho.

B) Processamento digital.

Para efetuar o processamento digital, foi utilizado o programa ER-Mapper. As principais técnicas de processamento digital de imagem, utilizadas na imagem da área de trabalho, foram:

• Aplicação de aumentos de contraste: As técnicas de contrastes aplicadas, em função da forma do histograma e do objetivo desejado, foram: Aumento linear e Aumento de contraste balanceado - BCET (Liu 1991).

• Filtragens espaciais: Apenas a filtragem por convolução foi abordada na imagem Landsat5-TM da área. Três tipos de filtros foram utilizados: passa baixa, passa alta e direcional. (Lillesand & Kiefer 1994).

Composições coloridas: As composições coloridas foram obtidas por um processo que combinou simultaneamente três bandas da imagem multiespectral com as três cores primárias
RGB, vermelho, verde e azul (Green 1989). A seleção dos melhores tripletes foi realizada através do método de Chavez *et al.* (1982) e por observação visual.

• Índices de Vegetação: Foram utilizados os índices de vegetação NDVI e *Tasseled Cap* (Crist & Kauth 1986), que fornecem a proporção de biomassa, objetivando inferir variações litológicas.

Transformação por principais componentes: A utilização da análise por principais componentes foi realizada com o objetivo de reduzir a dimensionalidade da imagem Landsat5
 TM, gerando canais ou componentes principais que são combinações lineares dos dados originais (Chavez 1989, Cracknell & Hayes 1991).

• Classificação textural: A classificação textural foi realizada na banda 4 da imagem Landsat5-TM, referente a área de trabalho. Foram utilizados filtros texturais disponíveis no programa ENVI, que calcula, ao mesmo tempo, quatro parâmetros diferentes (Data Range, RMS, 1º e 2º momentos). O *Data Range* substitui o *pixel* central da janela em processamento pela diferença entre o valor mínimo e máximo contido nesta janela. O RMS substitui o *pixel* central da janela que está sendo processada pela raiz média quadrada dos pixels desta janela. O primeiro momento é a medida do contraste na imagem e o segundo momento mede a homogeneidade.

• Classificação supervisionada e não supervisionada:

O processo de classificação consiste em atribuir cada pixel da imagem a uma classes. Essa atribuição é feita com base em observações no pixel em si e na vizinhança. Na análise supervisionada é necessário que o próprio operador faça a seleção de áreas de treinamento, auxiliando na tomada de decisões, enquanto que na análise não-supervisionada o próprio programa procura identificar agrupamentos naturais de dados, através de algoritmos especiais (Shimabukuro 1996).

3.2.2 - Tratamento dos Dados Aerogeofísicos.

A utilização dos dados geofísicos sob a forma de imagem exige uma etapa de processamento dos dados originais, envolvendo correções relativas a cada método, filtragens e geração de malhas.

Para o Projeto Rio das Velhas, o pré-processamento dos dados magnéticos foi efetuado pela PROSPEC, com as medidas do campo total, previamente corrigidas para variações diurnas e nivelamento. Os dados gamaespectrométricos foram previamente submetidos a correção para atenuação atmosférica, efeito Compton e remoção de *background*.

Os dados geofísicos estavam inicialmente no formato ASCII (registros lógicos de 682 bytes e blocos de 20.460 registros), sendo necessária a elaboração de um programa de conversão dos dados para o formato XYZ, com interpolação de coordenadas para os dados aeromagnéticos (programa efetuado pelo analista de sistemas Moacir Cornetti, IG-UNICAMP).

A) Correção do Dados

Antes do processamento dos dados aerogeofísicos é necessário fazer correções relativas a cada método. Nos dados magnetométricos do Projeto Rio das Velhas foi necessária a remoção do IGRF e nos dados gamaespectrométricos, a conversão dos dados de contagem por segundo para teor.

Remoção do IGRF

Inicialmente foi montada uma rede com 20 pontos (5x4), em coordenadas UTM, abrangendo a área do Projeto Rio das Velhas, calculou-se, então, o valor do IGRF relativo à metade do ano de 1992 em cada ponto da rede, utilizando-se uma versão modificada do programa GEOMAG do NGDC - National Geophysical Data Center.

Em seguida, foram ajustados polinômios ortogonais de primeiro e segundo graus aos dados da rede, sendo utilizado para isto o programa MAPSIS desenvolvido pelo Prof. Gilberto Amaral (IG-UNICAMP). O melhor ajuste foi obtido para o polinômio de primeiro grau, com coeficiente de determinação igual a 0.9927:

$IGRF = 18137.34 + 0.6676 \times 10^{-3} \times UTMN + 0.6173 \times 10^{-3} \times UTME$

O valor do IGRF foi calculado para cada ponto da área de trabalho, em coordenadas UTM e, em seguida, removido do campo total observado para a obtenção do campo anômalo.

• Conversão de contagem por segundo (cps) para teor

A conversão dos dados de contagem por segundo para teores na superfície foi efetuada com base na altura do vôo, tamanho do cristal e nas sensibilidades para U, Th e K, utilizados no aerolevantamento Rio das Velhas (Pascholati & Amaral 1998). As contagens nos canais do potássio, urânio e tório, foram convertidas em % de K, ppm de eU e ppm de eTh na superfície. Técnica similar foi utilizada por Misener et al. (1997).

B) Geração de malhas regulares

Após as correções, os dados magnéticos e gamaespectrométricos foram interpolados no programa SURFER *for windows* pelo método de mínima curvatura para gerar malhas regulares (*grids*), foi escolhido o método de mínima curvatura por não ter maiores modificações em relação a outros métodos testados e devido a sua rapidez.

Antes de gerar os *grids* foi necessário estabelecer o tamanho ideal da célula da malha, em função do espaçamento das linhas de vôo e da escala do levantamento aerogeofísico. Normalmente, a célula quadrada deve apresentar lado equivalente a um valor entre 1/4 e 1/8 do espaçamento das linhas de vôo, de modo a serem evitados os efeitos de *aliasing* (Vasconcelos et al. 1994). O espaçamento entre as linha de vôo no Projeto Rio das Velhas foi de 250 m, portanto, foi escolhido 30 m para as dimensões das células do *grid*.

Após a geração das malhas dos canais de K, U, Th, contagem total e razões (Th/K), e devido ao fato que a área de trabalho forma um polígono irregular foi necessário jogar uma máscara (*blank*) ao redor da mesma, já que o SURFER apenas interpola uma área quadrada. Desse modo, a máscara gerou um valor constante para toda a área exterior ao poligono irregular. Depois do "blank", as malhas foram convertidas para o formato ASCII (XYZ), para serem importadas pelo ER-Mapper e transformadas em imagens.

Antes das imagens serem importadas, foi necessário elaborar um programa que reduzisse os valores criados pela máscara a um DN igual a zero (programa efetuado pela Analista de Sistemas Patrícia Cerqueira Leite IG-UNICAMP). Após os dados serem transformados para imagem, os mesmos estão aptos a outros tipos de processamento e integração com a imagem do Landsat5-TM.

C) Processamento dos dados digitais aerogeofísicos

O processamento dos dados digitais aerogeofísicos foi realizado no programa ER-Mapper. Foram utilizadas técnicas de processamento digital nas imagens magnetométricas (filtro de redução ao polo, baixa e alta freqüência e sombreamento sintético) e gamaespectrométricas (realce de contraste, composições coloridas, classificações e pseudocor), com o intuito de melhorar a qualidade dos dados e realçar anomalias diversas (DUVAL 1983, DRURY & WALKER 1987).

Redução ao polo

A redução ao polo foi realizada com o intuito de transformar o campo magnético da área de trabalho para a inclinação de 90[°] Este filtro considera que todas as anomalias são causadas por indução, restaurando assim, as anomalias magnéticas diretamente sobre os corpos causadores, removendo as assinaturas causadas por magnetização não vertical ou campo regional, (Baranov 1957).

• Filtros de baixa freqüência

Os filtros de baixa freqüência foram aplicados com o propósito de realçar os componentes dos dados com maior comprimento de onda, ou seja, realçam as estruturas e os corpos mais profundos e atenuam os mais rasos. Os filtros de baixa frequência utilizados foram: passa baixa e continuação para cima.

• Filtros de alta frequência

Contrários aos filtros de baixa frequência os de alta realçam feições de fontes mais rasas. Esses filtros devem ser utilizados com cuidado pois realçam, também, os ruídos contidos na imagem. Os filtros utilizados foram: continuação para baixo, realce de borda e filtros direcionais

Sombreamento sintético

O sombreamento sintético realçou as feições estruturais na imagem, através da simulação de uma fonte luminosa com um determinado azimute e elevação.

Pseudocor

A implementação da pseudocor consistiu, basicamente, em atribuir uma cor a cada nível de cinza de uma imagem monocromática.

Composições coloridas

A composição colorida foi obtida alocando simultaneamente os canais gamaespectrométricos de K, Th e U com as três cores primárias, vermelho, verde e azul.

• Classificação supervisionada e não supervisionada:

O processo de classificação consiste em atribuir cada pixel da imagem a um grupo de classes. Essa atribuição é feita com base em observações no pixel em si e na vizinhaça. Na análise supervisionada é necessário que o próprio operador faça a seleção de áreas de treinamento, auxiliando na tomada de decisões, enquanto que na análise não-supervisionada o próprio programa procura identificar agrupamentos naturais de dados, através de algorítimos especiais (Shimabukuro 1996).

3.2.3 - Digitalização dos traços de fratura da imagem Landsat5-TM

Sabins (1978 *apud* Liu 1984) definiu lineamentos como "uma feição linear topográfica ou tonal no terreno e nas imagens e mapas, que pode representar uma zona de fraqueza estrutural". Neste trabalho o termo "traços de fratura" é usado num contexto que denota seu relacionamento com as estruturas geológicas, de acordo com a definição de Sabins (*op. cit.*).

A extração dos traços de fratura foi realizada na imagem gerada pela primeira principal componente (PC1), resultante das seis bandas utilizadas e na banda 4 da mesma imagem. Nesta imagem, teoricamente, encontram-se concentradas as informações correspondentes ao sombreamento topográfico e albedo, que são comuns a todas as bandas utilizadas. As informações estruturais, foram retiradas por análise visual, diretamente na tela do computador e em papel, onde foi possível a identificação e análise das fraturas, por variações tonais e feições morfológicas.

Após a extração, os traços de fratura foram digitalizados no programa DIGIFRAT (elaborado pelo prof. Gilberto Amaral/IG/UNICAMP), o qual montou um arquivo ASCII com todos os dados digitalizados, para serem tratados no programa FRATURA (também elaborado pelo prof. Gilberto Amaral), que gerou dados sobre a variação regional de 19 parâmetros estatísticos mais as respectivas principais componentes. Esses parâmetros foram posteriormente processados, para serem representados na forma de mapas de isolinhas. Dentre os 19 parâmetros estatísticos calculados, foram empregados neste trabalho os dados de:

- Densidade de Fraturamento: é denominado densidade de fraturamento o comprimento total de linhas por unidade de área (km/km²).

- Número de Interseções: corresponde ao número total de interseções dos traços de fraturas por unidade de área.

Índice de Atipicalidade: Este índice foi proposto por Pretorius & Partridge (1974) e deu bons resultados para a pesquisa mineral na África do Sul. O método baseia-se na construção de um histograma com classes de 1°, onde é representada a soma dos comprimentos por classes. As classes mais freqüentes são consideradas típicas, as classes abaixo de 40% das típicas são consideradas atípicas. O índice de atipicalidade é igual à soma dos comprimento das linhas atípicas, dividida pela soma total do comprimento de todas as linhas. O índice de atipicalidade varia entre 0 e 1.

3.2.4 - Integração dos dados digitais

Os produtos obtidos a partir do processamento das imagens Landsat5-TM e aerogeofísicas foram integrados, tentando-se obter informações adicionais. Para isso, se fez necessário homogeneizar os dados, ou seja, tornar o tamanho dos pixels iguais e registrar todos os dados em um mesmo sistema de coordenadas.

A integração dos dados (gamaespectrométricos, magnéticos e imagem Landsat) foi realizada através da técnica de IHS (*intensity, hue, saturation*) que é uma forma alternativa ao espaço RGB de representação de cores. Nesse espaço as cores são definidas por três atributos: intensidade, que define brilho; matiz, que define cor e saturação, que define a pureza da cor, ao invés de três quantidades de cores primárias. A vantagem dessa técnica é que a intensidade, a matiz e a saturação podem ser analisadas e manipuladas individualmente (Harris *et al.* 1990).

A técnica de IHS foi aplicada aos dados como forma de gerar um produto com contraste de cores entre as imagens integradas, o que facilitou a interpretação visual dos atributos analisados, devido ao fato das variáveis serem independentes entre si, permitindo assim, a integração de informações de diferentes naturezas. Primeiramente foi criada uma imagem no espaço RGB dos canais gamaespectrométricos K, Th e U, a qual foi convertida para o espaço IHS; no canal I foi alocada individualmente a banda 4 da imagem Landsat5-TM e a imagem magnetométrica, e no canal S, uma imagem com DN=128 para produzir matizes não muitos vibrantes, permitindo uma mistura proporcional da imagem Landsat5-TM ou magnética com os dados gamaespectrométricos (Figura 3.2). Após a integração dos dados, realizou-se a conversão para o espaço RGB, já que todas as manipulações desejadas no espaço IHS já haviam sido realizadas.

28

Foi também realizada, neste trabalho, a integração do canal radiométrico do potássio (indicativo de processos hidrotermais), com os dados gerados a partir da extração dos traços de fraturas da imagem Landsat5-TM (densidade de fraturamento, número de interseções e índice de atipicalidade), em um sistema geográfico de informação (SIG).

Inicialmente houve a importação para o software IDRISI, das imagens do canal do potássio, da atipicalidade, freqüência de fraturas e números de interseções, onde estas imagens de mesmo tamanho e georreferenciadas foram reclassificadas em cinco categorias de igual valor, de acordo com seus respectivos limites de mínimo e máximo.



Figura 3.2 - Principais etapas do processamento IHS.

Posteriormente houve o cruzamento individual da imagem do canal de potássio com as outras três imagens, a partir de uma operação do tipo *overlay* (soma). Finalmente as imagens resultantes do cruzamento foram novamente reclassificadas em cinco categorias (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto). Sendo acrescentado a cada uma das imagens resultantes a posição das ocorrências de ouro existentes na região, de acordo com CPRM (1996). Neste capítulo são discutidos os resultados alcançados através do processamento digital da imagem Landsat5-TM, caracterizando as diferentes unidades geológicas presentes na área de trabalho com sua resposta espectral ao sensor TM.

Também são discutidos os resultados conseguidos através do processamento digital dos dados aerogeofísicos, tanto para os dados magnéticos como para os dados radiométricos, isto é, contagem total, potássio, urânio e tório, os quais foram processados e convertidos em imagens, de modo a caracterizar os domínios e feições relevantes e suas correlações com a geologia da área.

São apresentados, ainda, as diversas integrações entre os diferentes dados digitais processados, segundo o método de trabalho esboçado no capítulo 3. Para um melhor acompanhamento das discussões apresentadas no presente capítulo, encontra-se em anexo (anexo II) uma transparência que contém os principais elementos geológico-estruturais na mesma escala das figuras descritas.

4.1 – Análise e Interpretação da Imagem Multiespectral.

O processamento digital da imagem multiespectral, Landsat5-TM, teve como objetivo básico a discriminação dos domínios e feições geológicas do Supergrupo Rio das Velhas, e a caracterização das diferentes respostas espectrais dos materiais superficiais e sua possível correlação litológica das unidades presentes na área.

A primeira etapa da análise da imagem foi calcular os parâmetros estatísticos (Tabela 4.1), onde foram fornecidas as características das seis bandas utilizadas, além de informações sobre a correlação entre os pares de bandas que serão utilizadas em outros processamentos.

Bandas	Banda1	Banda2	Banda3	Banda4	Banda5	Banda7	
Parâmetros							
Mínimo	22	10	8	3	Į	Nuclear Sector S	
Máximo	255	87	119	122	231	88	
Média	49,064	19,687	18,931	43,468	46,020	12,046	
Mediana	48	20	18	44	47	11	
Desvio padrão	3,465	2,747	5,253	14,111	18,195	6,824	
Correlação	Bandal	Banda2	Banda3	Banda4	Banda5	Banda7	
Bandal	l	0,809	0,786	0,786 0,225 0,		0,673	
Banda2	0,809	1	0,887	0,416	0,777	0,780	
Banda3	0,786	0,887	To and the second secon	1 0,197 0		0,851	
Banda4	0,225	0,416	0,197	1	0,574	0,265	
Banda5	0,621	0,777	0,758	0,574	1	0,887	
Banda7	0,673	0,780	0,851	0,265	0,887	1	

Tabela 4.1 – Parâmetros estatísticos das seis bandas da imagem Landsat5-TM da área de estudo.

Posteriormente foi implementado o processo de correção geométrica sobre a imagem do Landsat5-TM, transformando a imagem do sistema de *projeção Space Oblique Mercator* (SOM) para o de coordenadas *Universal Transversa de Mercator* (UTM), de forma que a imagem do Landsat5 - TM ficou com a mesma projeção dos demais dados digitais. O erro de posicionamento médio gerado neste procedimento foi calculado a partir da raíz média quadrada *Root Mean Square* (RMS) e o erro obtido foi de 0,29 pixel, sendo o erro total de 2,64 m. Os pontos utilizados para a correção, com seus respectivos erros, estão ilustrados na Tabela 4.2. Essa correção foi necessária, neste primeiro momento, para possibilitar o corte da área, uma vez que a mesma forma um polígono irregular, necessitando da criação de uma máscara definida pelas 13 coordenadas que limitam a área.

Tabela 4.2 - Pontos utilizados na correção geométrica da imagem para a área de trabalho com seus respectivos erros.

Name	On	Edit Undo	Cell X	Cell Y	TO Easting	TO Northing	RMS
1	<u>On</u>	Edit	726.95	170.94	670918.18E	7797579.00N	0.14
2	<u>On</u>	Edit	371.60	345.64	658972.00E	7794223.15N	0.04
3	On	Edit	458.93	406.77	661171.55E	7791963.77N	0.02
4	<u>On</u>	Edit	315.82	614.02	655399.26E	7786551.45N	0.34
5	On	Edit	172.90	550.48	651539.05E	7789162.82N	0.39
6	On	Edit	158.87	438.03	651890.73E	7792586.78N	0.59
7	On	Edit	602.71	399.85	665557.55E	7791435.91N	0.15
8	On	Edit	116.33	899.56	647367.65E	7779111.54N	0,48
9	On	Edit	125.51	1141.90	645897.91 E	7771886.19N	0.49

Outro procedimento necessário foi a correção atmosférica, onde determinou-se o menor valor a ser subtraído de todas as bandas da imagem original. Os valores obtidos nos corpos d'água foram os seguintes: TM1 = 50, TM2 = 19, TM3 = 15, TM4 = 6, TM5 = 0, TM7 = 0. O efeito da camada atmosférica sobre o registro espectral da imagem deve ser removido antes de ser feita as razões entre bandas, pois esta operação ocasiona a ampliação do espalhamento atmosférico.

Uma segunda etapa da análise da imagem consistiu na aplicação de técnicas descritas na literatura com o objetivo de diferenciar unidades geológicas dentro do Supergrupo Rio das Velhas (Moore et al. s.d.). Aplicou-se a técnica de composições coloridas (RGB simples) na tentativa de realçar as litologias do Supergrupo Rio das Velhas.

Para a escolha das três bandas que seriam visualizadas em uma única imagem, utilizou-se o índice criado por Chavez (1982) denominado de OIF (*Optimum Index Factor*). Este método consiste em avaliar a quantidade de informação contida em cada banda, usando seus respectivos desvios-padrões e os coeficientes de correlação de três bandas quaisquer, segundo a equação a seguir:

$$OIF_{(abc)} = \Sigma(\delta_a + \delta_b + \delta_c) / \Sigma(C_{ab} + C_{ac} + C_{bc})$$

Onde:

- a, b e c são três bandas quaisquer;
- δ é o desvio padrão de cada banda;
- C, o coeficiente de correlação entre as bandas.

Teoricamente, os OIF's com valores mais altos representariam os tripletes entre todas as bandas que, por sua vez, conteriam o maior número de informações, indicando, a partir do conjunto de bandas, as melhores para combinação em composições RGB (Figura 4.1). Apesar do OIF ser um índice quantitativo, baseado em parâmetros estatísticos da cena, o melhor triplete por ele indicado pode não ser o melhor em termos visuais.



Figura 4.1 - Gráfico com os melhores tipletes para a área de trabalho

Observa-se que a banda 4 está associada aos 10 melhores tripletes estabelecidos pelo OIF. Este fato se deve à baixa correlação desta banda em relação às demais e à alta reflectância da vegetação na área. Para a área de estudo, o melhor triplete dentre os calculados foi o 145 e, dentre as múltiplas possibilidades de combinações dessas bandas em RGB, a que apresentou a melhor composição visual foi a 541.

Na imagem 541 em RGB (Figura 4.2), referente a área de estudo, pode-se observar os seguintes elementos facilmente identificados: a presença de uma grande massa d'água, na porção norte, relacionada ao represamento da drenagem, a qual aparece na imagem em tons de preto; áreas mais aplainadas, nas porções norte e leste, com solo exposto que aparecem em tons magenta, ocupando grande parte da área de estudo; Terrenos montanhosos com vales encaixados, nas porções central e sudeste, com grande incidência de vegetação, que aparecem na imagem em tons esverdeados.

Mesmo fazendo uso do triplete 541, em RGB, o número de informações geológicas passíveis de reconhecimento é muito pequeno, tornando-se difícil o delineamento das principais unidades geológicas. Apenas no extremo sul da área são reconhecidas porções sem vegetação correlacionadas aos quartzitos do Grupo Maquiné [1]. A ausência de vegetação nem sempre implica na ocorrência das unidade deste grupo. Em áreas com vegetação é possível, também



Figura 4.2 - imagem das bandas 541 do Landsat5-TM em RGB.

distinguir áreas com padrão de reflectância que é correlacionado aos limites de coberturas lateríticas [2].

A presença de extensiva cobertura vegetal na região de estudo, dificultou a extração de informações espectrais correlacionáveis às unidades geológicas a partir das composições coloridas. Por esse motivo aplicou-se os índices de vegetação NDVI e *Tasseled Cap* a fim de correlacionar as imagens resultantes desses índices com as unidades geológicas.

A transformação *Tasseled Cap* envolve a extração de diferentes coeficientes da cena, relacionados ao brilho - *brightness* (dado pelos coeficientes positivos de todas as bandas), verdor - *greenness* (dado pelo coeficientes positivos das bandas do infravermelho) e umidade - *wetness* (dado pelo coeficiente positivo das bandas 3 e 4). Esses coeficientes são definidos como forma de realçar as feições de maior reflectância do solo, o maior contraste do verdor e a informação da umidade, respectivamente. Antes de ser realizada a transformação *Tasseled Cap* foi necessário atualizar os coeficiente do algoritmo existente no programa ER Mapper, já que esse programa utilizava os parâmetros para o Landsat4-TM (Crist *et al.* 1986).

Na imagem do *Tasseled Cap* em RGB (Figura 4.3) foi alocado o canal de brilho em R, que evidenciou as áreas de solo exposto; o canal de verdor em G, que identificou as áreas com vegetação e o canal de umidade em B, que discriminou as áreas com vegetação úmida. A imagem, no geral, mostra uma grande quantidade de vegetação úmida distribuída por toda a área. No extremo sul, o tom marrom-avermelhado evidencia as áreas com pouca vegetação, que podem ser correlacionadas aos quartzitos do Grupo Maquiné. Apesar de haver variações de vegetação, não foi possível correlacioná-las a mudanças litológicas, já que essas variações são, muitas vezes, observadas dentro de uma mesma unidade, como é o caso do Grupo Maquiné.

Como as composições em RGB e os índices de vegetação (NDVI e *Tasseled Cap*) não apresentaram resultados satisfatórios correlacionados com as unidades geológicas da área, foi realizada outra tentativa de realce através da técnica de análise textural, com o objetivo de delinear as unidades geológicas por diferenças texturais. Para a realização dessa análise foi escolhida a banda 4, já que a mesma é a que melhor exibe informações texturais na região de estudo (Figura 4.4). Após a aplicação do filtro textural foi realizada, simultaneamente, uma classificação não-supervisionada nas quatros bandas geradas (*Data Range*, RMS, 1° e 2° momentos), com o objetivo de agrupar as diferentes classes texturais. Apesar disso, os



Figura 4.3 - Imagem do indice de vegetacao Tasseled_Cap.



Figura 4.4 - Imagem da banda 4 do Landsat5-TM, com filtro textural e reclassificada.

resultados obtidos com a análise textural não se mostraram satisfatórios, pois não foi possível observar diferenças texturais correlacionáveis à mudanças litológicas.

De modo geral, pode-se afirmar que a utilização da imagem Landsat5-TM para a região não se mostrou útil na caracterização espectral das unidades litoestratigráficas que ocorrem na área. A ineficácia da imagem Landsat5-TM, neste caso, provavelmente se deve a presença de cobertura vegetal e ao manto de intemperismo existente na área de estudo.

4.2 – Análise e Interpretação das Imagens Aerogeofísicas

Nesta etapa buscou-se analisar e interpretar os dados aerogeofísicos (magnéticos e radiométricos) a fim de determinar possíveis feições significativas para a caracterização da geologia da área de estudo. O processamento dos dados aerogeofísicos foi realizado, estando os dados magnetométricos e gamaespectrométricos com o mesmo datum, projeção cartográfica e resolução da imagem Landsat5-TM.

4.2.1 – Imagens magnetométricas

A primeira etapa da análise dos produtos aeromagnéticos foi realizada no mapa de contorno magnético residual, gerado no *SURFER*, definindo áreas com diferentes feições geofísicas para uma posterior correlação com os diferentes tipos de rochas da área. O valor de amplitude das anomalias magnéticas na área chega a um máximo de 4500 nT no centro leste e a um mínimo de -3500 nT no sudoeste. A visualização das isolinhas permitiu identificar três padrões na distribuição das anomalias, sendo, então, estabelecidos três domínios magnéticos [A, B, C] representados pelas mudanças de gradientes (Figura 4.5). O domínio A é caracterizado pelo maior gradiente, o domínio B é representado pelos gradientes intermediários, enquanto que o domínio C representa os menores gradientes da área de trabalho.

A segunda etapa da análise foi realizada a partir da importação desse dado para o programa ER Mapper, por meio do qual foi transformado em imagem (Figura 4.6) facilitando sua interpretação devido à possibilidade da aplicação de contrastes e filtros a este produto. As



Figura 4.5 - Mapa de contorno do campo magnético residual (escala aproximada, 1:165.000).



Figura 4.6 - Imagem do campo magnetico residual em nT.

características dos três domínios magnéticos estabelecidos permitiram inferir uma correlação com os dados estruturais e geológicos da área.

No domínio A se destacam as anomalias de alta freqüência causadas pelos corpos de formações ferríferas na Formação Santa Quitéria, localizada no centro da área.

No domínio B se destacam as anomalias causadas pelas litologias do Supergrupo Minas ao sul; do corpo metabásico intrusivo ao norte; das formações lateríticas ao sudoeste e norte e de parte das litologias da Formação Córrego do Sítio.

O domíno C é caracterizado pelos menores gradientes. Encontra-se, nesse domínio, as litologias do Grupo Maquiné, da Formação Quebra-Osso, Santa Quitéria, Mindá, além dos corpos graníticos e parte da Formção Córrego do Sítio, ao norte da área.

As litologias da Formação Córrego do Sítio do Grupo Nova Lima se apresentam nos domínios B e C, com gradientes variando de médio a baixo, o que pode representar áreas com e sem influência de formações ferríferas.

Algumas das unidades litológicas mantêm relação com determinados domínios, embora outras sejam enquadradas em mais de um domínio, o que pode ser explicado por variações laterais de fácies, grau de intemperismo, laterização, lentes de formações ferríferas ou, ainda, níveis com diferenças de suscetibilidade.

De maneira geral, os filtros aplicados mostraram uma resposta similar à do campo físico. Utilizou-se o filtro de continuação para baixo, com um incremento de 20m em relação à imagem original (Figura 4.7), com o objetivo de caracterizar corpos geológicos próximos à superfície. Comparando-se a imagem gerada pela aplicação do filtro com a imagem original, nota-se, na primeira, uma melhor individualização das ocorrências dos corpos de formações ferriferas no centro da área, do corpo intrusivo básico ao norte da área, do empurrão também ao norte e da Formação Ouro Fino ao sul.

O filtro de continuação para cima com incremento de 160m (Figura 4.8), resultou numa perda das informações texturais, na atenuação dos maiores contrastes e numa melhor caracterização das fonte anômalas regionais (formações ferríferas e Formação Ouro Fino ao centro e Sul e intrusiva básica ao Norte). O resultado da aplicação dos filtros de continuação para baixo e para cima mostram que as principais anomalias são representadas nas duas imagens.



Figura 4.7 - Imagem do campo magnetico residual com filtro de continuacao para baixo (20m da superficie).



Figura 4.8 - Imagem do campo magnetico residual com filtro de continuacao para cima (160m da superficie).

O filtro de redução ao polo foi utilizado na imagem do campo magnético residual com a finalidade de fornecer uma melhor definição dos limites dos corpos geológicos. Esse procedimento facilitou a interpretação da imagem uma vez que, as anomalias transformadas ao polo são de feições mais simples (Figura 4.9), possibilitando, assim, uma melhor delimitação das crostas lateríticas nas porções sudoeste e norte, das formações ferríferas ao centro, da intrusiva básica ao norte e, na porção sul, das rochas do Supergrupo Minas.

A interpretação visual dos alinhamentos estruturais na imagem do campo magnético residual se mostrou mais efetiva em relação ao mapa de contorno, devido à possibilidade de aplicação de filtragens direcionais. Foi aplicado um filtro direcional e um sombreamento sintético de NW para SE procurando, com isto, realçar a visualização das feições lineares de direção NE-SW (Figura 4.10), que são as mais marcantes da imagem.

Após a aplicação desse filtro foi possível constatar melhor os alinhamentos estruturais já mapeados por CPRM (1996), além de observar outros alinhamentos não mapeados na área. Mesmo com a aplicação do filtro direcional, as imagens não evidenciaram a complexidade dos alinhamentos estruturais reconhecidos na área, já que os alinhamento de direção NW são encobertos nos filtros aplicados por estarem na mesma direção da linha de vôo.

4.2.2 – Imagens gamaespectrométricas

Após o processo de gridagem dos canais radiométricos efetuados no *SURFER*, estes foram importados para o programa *ER MAPPER* e transformados em imagem.

Foi realizada uma tentativa de corrigir os dados gamaespectrométricos para efeitos da atenuação da água e vegetação, utilizando a imagem Landsat5-TM, com base no trabalho de Lavreau & Fernandez-Alonso (1991), no qual os autores aplicaram esta técnica em uma área no SW de Ruanda, coberta parcialmente por densa Floresta Equatorial Primária. Para este experimento foi selecionada, uma pequena área de treinamento no Supergrupo Rio das Velhas, na qual a técnica dos autores acima citados foi aplicada com algumas modificações.

Para calcular os índices de correção radiométrica, os autores correlacionam os dados gamaespectrométricos (K, Th e U) à banda de umidade (*wetness* - TCW) do índice de vegetação *Tasseled_Cap*. Como não foi possível reproduzir os resultados obtidos com o



Figura 4.9 - Imagem do campo magnetico residual, reduzido ao polo.



Figura 4.10 - Imagem do campo magnetico residual com filtro direcional e sombreamento sintetico de NW para SE.

TCW, optou-se por utilizar o índice de vegetação NDVI, pois o mesmo não sofre influência da topografia.

O modelo de Lavrou & Fernandes Alonso (1991) utiliza a inclinação negativa da reta dos *scatter gramas* gerados pelo índice de vegetação, e pelos canais radiométricos (K, Th e U). Na área do Supergrupo Rio das Velhas, onde foi realizado o experimento, a vegetação existente é do tipo Floresta Tropical Úmida, o que resultou numa reta com inclinação aproximadamente vertical (Figura 4.11a, b e c). Essa inclinação vertical não possibilitou o estabelecimento de índices para a correção do efeito da vegetação nos dados gamaespectrométricos, obtidos por Lavreau e Fernandez-Alonso (1991).



Figura 4.11 - Scattergramas do índice de vegetação NDVI (eixo x), pelos canais radiométricos K (a), Th (b) e U (c).

A análise e interpretação dos dados gamaespectrométricos foi realizada definindo-se áreas com níveis radiométricos distintos, utilizando-se, para facilitar sua interpretação, imagens em pseudocor e RGB. Foi aplicado um aumento de contraste para que as imagens ocupassem todo o intervalo do histograma. O aumento linear de contrate foi o melhor para os canais individuais e a composição em RGB.

Os dados radiométricos apresentaram, em geral, uma variabilidade nas imagens analisadas, fornecendo subsídios para a discriminação litológica. A partir da análise realçada da imagem dos canais radiométricos do potássio, tório e urânio em RGB, onde está impressa conjuntamente a resposta dos três canais, foi possível delimitar visualmente domínios litológicos com a influência dos diferentes níveis radiométricos (Figura 4.12). O vermelho representa a influência apenas do canal do potássio, o verde do canal do urânio e o azul do canal do tório. A cor amarela reflete uma mistura em proporções iguais de potássio e urânio, a cor cyan, dos canais de urânio e tório e a cor magenta, do tório e potássio. A presença dos três elementos radiométricos em proporções iguais é exibida pela cor branca, enquanto a cor preta demonstra os valores mínimos destes elementos.

Esta imagem (Figura 4.12) apresenta um predomínio geral do canal do potássio na área, evidenciado pelos tons avermelhados, sendo que apenas na porção norte existe uma proporcionalidade entre os três canais e/ou um predomínio do tório e urânio, caracterizado pelos tons azulados e branco, que corresponde à área de influência do granito Peti. Em alguns locais da porção sudoeste os três canais apresentam valores baixos, o que aparece na imagem em tons escuros e corresponde no terreno à presença de crostas lateríticas.

A imagem do canal do potássio (Figura 4.13) é marcada por uma distribuição radiométrica heterogênea, com teores variando de 0,01 a 1,47%. Ao norte, a área com teor radiométrico variando entre 0,9 e 1,4% está relacionada a presença do corpo granítico Peti. No centro e ao sul da área, as anomalias com teor variando de 0,5 a 1,1 % compreendem parte da Formação Córrego do Sítio, onde esses altos valores podem estar associados a processos hidrotermais. Os valores intermediários de potássio (0,2 - 0,9%) são correlacionados à parte da Formação Mindá e às unidades do Grupo Maquiné. Os baixos teores potássicos (0-0,2%) refletem as litologias do Supergrupo Minas ao sul da área, unidade Quebra Osso, ao leste, e coberturas lateríticas a noroeste, além dos locais onde são constatadas as ocorrências de formações ferríferas, na Formação Santa Quitéria. O baixo teor constatado na Formação



Figura 4.12 - Imagem dos canais radiometricos do potassio, torio e uranio em RGB.



Figura 4.13 - Imagem do canal radiometrico do potassio, em %.

Mindá e Córrego do Sítio ao norte da área, pode estar relacionado com a presença de coberturas lateríticas ou de área inundada pela represa do Peti.

A imagem do canal radiométrico de tório possui teor variando de 0,7 a 34 ppm (Figura 4.14). Ao norte da área destaca-se uma anomalia da ordem de 15 a 34 ppm, correlacionável à presença de um corpo granítico com provável enriquecimento em tório da ordem de 15 a 34 ppm. À NW é evidenciada uma anomalia com teor variando de 2 a 15 ppm, correlacionável à coberturas lateríticas. As demais áreas possuem uma distribuição homogênea, os valores intermediário de tório (8-16 ppm) são correlacionados com as unidades do Supergurpo Minas e com a Formação Córrego do Sítio, todas as outras unidades do Supergrupo Rio das Velhas apresentam baixos teores (0-8ppm).

A imagem do canal radiométrico de urânio apresenta-se muito ruidosa, provavelmente devido ao efeito do radônio na atmosfera, sendo claramente observada a direção das linhas de vôo do aerolevantamento (SE/NW). A área possui um teor de urânio variando de 0,9 a 7,5 ppm (Figura 4.15), estando os maiores teores de correlacionados à presença do corpo granítico ao norte da área (4-7,5 ppm). No centro-oeste da área os teores de urânio variam entre 0,3 e 2 ppm e são correlacionados à Formação Córrego do Sítio. Nesta mesma unidade, em sua porção sul, os valores de urânio variam entre 2 e 4 ppm. Teores intermediários de urânio (0,3 a 3 ppm), no noroeste e sudoeste da área (0,1 - 2 ppm), são correlacionados à Formação Quebra Osso.

Realizou-se uma classificação supervisionada nos dados gamaespectrométricos individualmente com o objetivo de fazer uma análise quantitativa e, assim, estabelecer uma melhor correlação dos mesmos com as litologias existentes na área. Para essa classificação foi utilizada as próprias unidades geológicas como área de treinamento, a fim de obter parâmetros estatísticos com os valores radiométricos para cada unidade (Tabela 4.3). A distribuição dos radioelementos potássio, tório e urânio tem um comportamento que varia de acordo com as unidades litológicas.



Figura 4.14 - Imagem do canal radiometrico do torio, em ppm.



Figura 4.15 - Imagem do canal radiometrico do uranio, em ppm.

Tabela 4.3 - Distribuição dos radioelemento nas unidade geológicas presentes na área de trabalho (Qa/T - Quaternário/Terciário; Qa - Quaternário; sq - Santa Quitéria; cs - Córrego do Sítio; ff - Formação ferrífera; o f- Ouro Fino; rp - Rio de Pedra; m - Mindá; qo - Quebra Osso; ce - Córrego do Engenho; cd - Chica Dona; gg - Granito gnaisse; ib - Intrusivas básicas; SGM - Supergrupo Minas).

	Unidades Estat.	Qa/T	Qa.	sq	cs	ff	of	rp	RTR	qo	ce	ed	gg	ib	SGM
К	Mínimo	0,049	0,129	0,002	0,033	0,081	0,324	0,162	0,048	0,016	0,138	0,226	0,089	0,113	0,049
	Máximo	0,622	0,947	1,02	0,842	0,721	0,761	1,069	0,931	0,906	0,761	0,939	1,433	0,437	1,392
	Média	0,254	0,41	0,385	0,371	0,369	0,542	0,452	0,495	0,248	0,418	0,464	0,548	0,247	0,413
	Des. Padrão	0,073	0,141	0,16	0,126	0,116	0,09	0,111	0,142	0,096	0,105	0,132	0,232	0,065	0,204
Th	Mínimo	2,001	3,144	1,429	2,767	3,144	3,431	2,575	2,861	1,993	2,29	3,143	10,3	3,147	0,859
	Máximo	18,451	7,153	9,725	12,305	8,871	6,437	9,157	14,711	10,01	10,00	7,818	35,331	9,467	16,879
	Média	6,867	5,097	5,244	6,351	5,201	4,837	5,03	6,078	3,741	4,787	5,279	24,06	5,268	6,189
	Des. Padrão	3,479	0,672	1,318	1,27	0,819	0,543	1,006	1,642	0,86	0,933	0,967	3,949	1,236	2,638
U	Mínimo	0,332	0,997	0,416	0,332	0,498	1,55	0,913	0,498	0,145	1,08	1,162	1,993	0,387	0,664
	Máximo	4,069	3,322	4,045	4,816	3,653	3,986	3,653	4,651	3,653	3,321	3,238	7,723	2,832	4,982
	Média	1,844	2,164	1,954	2,305	1,873	2,528	2,284	2,209	1,433	2,11	2,163	4,098	1,372	2,383
	Des. Padrão	0,515	0,318	0,431	0,506	0,519	0,523	0,437	0,497	0,505	0,362	0,381	0,732	0,452	0,695

Analisando os valores da Tabela 4.3, referente ao canal do potássio, pode-se afirmar que os valores médios encontrados para as diferentes litologias presentes na área de estudo. Estão, de modo, geral abaixo da média em termos de abundância relativa deste radioelemento (Van Schmus 1995, Matolin 1984). Apenas para as Formações Quebra Osso, Ouro Fino e as formações ferríferas, os valores médios de potássio estão acima da média, possivelmente devido à influência das reações hidrotermais a que foram submetidas estas seqüências de rochas durante sua evolução crustal.

Para o canal do tório, seus valores médios, de acordo com a tabela 4.3, apresentam um enriquecimento generalizado nas Formações basais do Grupo Nova Lima (Quebra Osso e Ouro Fino), intrusiva básica e um empobrecimento no resto das unidades do Supergrupo Rio das Velhas, o que pode ser explicado devido a laterização, já que rochas máficas são pobres em tório.

O canal do urânio apresenta um comportamento bastante semelhante ao do tório, com exceção da Formação Mindá e do Membro Rio de Pedra, que têm valores médios acima do normal para as litologias que compõem esta unidades.

De qualquer forma, é importante ressaltar que relacionar as concentrações dos radioelementos de forma quantitativa é extremamente complexo, face aos problemas ocasionados por fatores naturais, como por exemplo, a atenuação da radiação pela absorção diferencial dos radioelementos pela vegetação e umidade (Miranda 1997), como também pela ampla diversidade de rochas encontradas na área de trabalho.

4.3 - INTERPRETAÇÃO DOS TRAÇOS DE FRATURA

Procurando obter subsídios para a análise e interpretação dos dados utilizados neste trabalho foi realizada, também, a digitalização dos lineamentos relacionados a zonas de fraquezas, observados nas imagens geradas a partir de uma PC1 e banda 4 do Landsat5-TM. Foram digitalizados um total de 1.241 traços de fratura na imagem Landsat5-TM (Figura 4.16), referente à área de trabalho, possibilitando observar nesses traços de fratura uma predominância na direção NW-SE, com duas concentrações principais uma a N50-55E e outra a N80-85E.



Figura 4.16 - Distribuicao dos tracos de fraturas da imagem Landsat 5-TM.
A partir do mapa de freqüência de fraturamento foi gerado um histograma que mostra o valor das classes (em graus) no eixo X e a porcentagem de fraturas para o eixo Y (Figura 4.17), podendo-se observar que o maior número de fraturas encontra-se no intervalo de 120 a 160°.



Figura 4.17 - Distribuição dos traços de fratura da área

O mapa de densidade de fraturamento (Figura 4.18) apresenta valores que variam de 0,15 (valor mínimo) a 3,17 (valor máximo). Os valores máximos encontram-se na parte central da área de estudo, atingindo dois picos: um associado ao contato entre as Formações Córrego do Sítio e Mindá e outro, no contato entre a Formação Córrego do Sítio e Santa Quitéria. Ocorre, também, um pico na porção sudoeste em rochas do Supergrupo Minas.

No mapa de número de interseções (Figura 4.19), os valores ocorrem entre um mínimo de 0 e um máximo de 4,13. As áreas com maiores valores referem-se às regiões que afloram rochas do Supergrupo Minas, localizadas na porção sudoeste da área. Ocorrem, também, regiões com valores médios em torno de 2 a 3, onde afloram rochas das Formações Córrego do Sítio e Santa Quitéria, distribuídos pela área de estudo.

Os mapas de densidade de fraturamento e número de interseções dão uma idéia sobre a competência das rochas: quanto mais competente, maior a possibilidade de deformação rúptil com relação a dúctil. Esses mapas fornecem uma noção da permeabilidade das rochas com relação à percolação de fluídos podendo, então, auxiliar na seleção de áreas favoráveis à mineralizações.



Figura 4.18 - Densidade de fraturamento da imagem Landsat5 - TM (escala aproximada, 1:165.000).





No mapa de atipicalidade (Figura 4.20), que apresenta uma distribuição mais irregular, os valores se distribuem em um intervalo de 0,11 a 0,82. Os valores mais altos estão associados a rochas da Formação Córrego do Engenho, na porção sudeste da área e nas extremidades norte, onde afloram rochas do Supergrupo Minas e Formação Quebra Osso.

4.4 – ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DA INTEGRAÇÃO DOS DADOS DIGITAIS

Neste tópico são discutidos os resultados oriundos da integração dos dados digitais aerogeofísicos e imagem do Landsat5-TM a partir de técnicas de IHS. Será discutida, ainda, a integração dos dados digitais obtidos a partir da extração dos traços de fratura com os dados gamaespectrométricos, com o objetivo de diagnosticar áreas de maior hidrotermalismo, que podem ser indicativas de zonas mineralizadas.

4.4.1 - Análise e integração dos dados gamaespectrométricos com os dados magnetométricos e imagem Landsat5-TM.

Nesta etapa do trabalho foi testado o método de integração IHS, objetivando uma análise conjunta das informações contidas nos dados gamaespectométricos com os dados magnetométricos e a imagem do Landsat5-TM. O resultado da integração, através da técnica de IHS, não foi satisfatório, o que pode ter sido ocasionado devido ao ruído existente na imagem do canal do urânio. A imagem gerada através da técnica de IHS ficou marcada por faixas intercaladas de direção NW-SE. Optou-se, então, apenas pela superposição dos dados digitais.

Primeiramente foi realizada a integração dos canais radiometricos de potássio, tório e urânio em RGB, para depois superpor a banda 4 da imagem Landsat5-TM no canal de intensidade (Figura 4.21). Foi escolhida a banda 4 pois esta apresentava os melhores contrastes texturais. Para alocar a imagem magnetométrica no canal de intensidade foi, inicialmente, aplicado um filtro direcional e sombreamento sintético de NW para SE, o que realçou melhor as estruturas presentes na área. Foi, ainda, aplicado um filtro de mediana (janela 5x5) para suavizar um pouco a imagem (Figura 4.22).



4.20 - Índice de atipicalidade dos lineamentos da imagem Landsat5- TM (escala aproximada, 1:165.000).



Figura 4.21 - Imagem dos canais radiometricos (K, Th e U) em RGB, integrados a banda 4 do sensor Landsat5 - TM (canal de intensidade).



Figura 4.22 - Imagem dos canais radiometricos (K, Th, U) em RGB, integrados a imagem do campo magnetico residual (canal de intensidade).

Algumas características observadas individualmente nas imagens puderam ser então realçadas. Na imagem dos canais radiométricos em RGB, integrada à banda 4 do Landsat5-TM, destaca-se ao sul e sudoeste da área, uma anomalia com médio teor de potássio/urânio, que está correlacionada às litologias do Supergrupo Minas. Ao norte, destaca-se uma anomalia causada pela presença de um corpo granítico-gnáissico com teor proporcional dos três canais radiométricos.

Na imagem dos canais radiométricos em RGB, integrada ao canal magnetométrico, é possível visualizar que as feições estruturais marcadas na imagem magnetométrica possuem um alto teor potássio/urânio, principalmente aquelas correlacionadas à presença das formações ferriferas, no centro da área.

4.4.2 — Análise e Integração dos mapas de lineamentos com os dados de gamaespectrometria.

Tendo em vista o potencial metalogenético para ouro existente na área de estudo, associado, principalmente, às rochas do Supergrupo Rio das Velhas, procurou-se neste item analisar e discutir a integração dos dados do canal radiométrico do potássio, o qual pode indicar processos de alteração hidrotermal, com os dados de lineamentos extraídos da imagem do Landsat5-TM, indicativos de zonas de maior fraturamento.

Para isto foi realizada a integração destes dados no software *IDRISI*, utilizando-se a técnica de *overlay*, a partir da somatória dos mapas digitais do canal do potássio e de lineamentos, gerando, com isto, mapas com cinco categorias de valores: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto. Adicionalmente foi incluído, também, as ocorrências de ouro existentes na área de acordo com CPRM (1996), que serviram de parâmetro nas discussões dos resultados.

No mapa gerado pela integração da densidade de fraturamento com o canal de potássio (Figura 4.23) os valores da categoria muito alto e parte dos valores da categoria alto estão em áreas relativas à exposição de rochas da Formação Córrego do Sítio. No entanto, ao analisar a localização das ocorrências de ouro existentes na área, constata-se que a maioria situam-se em áreas da categoria baixo, com exceção da mina Córrego do Sítio que está dentro da categoria alto e de uma ocorrência que está localizada na Formação Quebra Osso.

64





No mapa obtido pela integração do número de interseções com o canal de potássio (Figura 4.24) os valores alto e muito alto encontram-se, em sua quase totalidade, relacionados à Formação Córrego do Sítio, sendo que a maioria das ocorrências está situada no campo da categoria muito baixo.

No mapa integrado do índice de atipicalidade com o canal de potássio (Figura 4.25) as áreas com maiores valores, isto é, categoria muito alto e alto encontram-se espalhadas por toda a área de estudo, devido à influência relativa da heterogeneidade do índice de atipicalidade, e as ocorrências de ouro encontram-se em áreas que variam da categoria muito baixo a médio.

Dentre os dois tipos principais de ocorrências de ouro na área de estudo, o que apresenta maior afinidade com o tipo de integração discutida nesse item é o de zonas de alteração hidrotermal – tipo mina Córrego do Sítio. Pode-se afirmar que o resultado da integração do mapa de densidade de fraturamento com o mapa do canal do potássio é o que melhor evidencia áreas potenciais para pesquisa mineral voltada à ocorrências de ouro. Essas áreas potenciais se enquadram na categoria muito alto e alto.



Figura 4.24 - Mapa integrado do número de interseções com o canal do potássio (escala aproximada, 1:165.000).



Figura 4.25 - Mapa integrado do índice de atipicalidade com o canal do potássio (escala aproximada, 1:165.000).

O presente trabalho procurou analisar e interpretar os diferentes dados digitais disponíveis para a área de estudo, ou seja, mapas geológicos, aerogeofísicos (gamaespectômetro e magnetômetro) e imagem multiespectral do Landsat5-TM. Para atingir esses objetivos foram utilizadas, principalmente, técnicas de PDI e secundariamente, técnicas de SIG, com o finalidade de comparar estes dados com as unidades geológicas do Supergrupo Rio das Velhas, presente na área de estudo.

A área de trabalho possui uma extensão considerável (325 km²) e a quantidade de informações foi enorme e diversificada. Isto fez com que o autor elaborasse um estudo generalista e abrangente no tocante às questões relevantes desta pesquisa. A seguir são apresentados os principais resultados obtidos:

- Os produtos gerados a partir do processamento digital da imagem Landsat5-TM (RGB, NDVI, *tasseled cap*, análise textural) apresentaram limitações na discriminação e caracterização espectral das unidades geológicas do Supergrupo Rio das Velhas, com exceção das coberturas lateríticas e parte das unidades do Grupo Maquiné ambas com sua localização restrita a áreas com pouca ou nenhuma vegetação. As limitações se devem, principalmente, à presença de vegetação e ao manto de intemperismo existente na área de estudo.
- A imagem Landsat5-TM foi muito útil na extração dos lineamentos relativos às zonas de fraquezas, através das imagens de PC1 e banda 4.
- Os dados aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria) apresentaram resultados bastantes satisfatórios, principalmente no que concerne à discriminação de feições e domínios geológicos. Os principais alinhamentos estruturais da área são visíveis nas imagens gamaespectrométricas, sendo ainda mais nítidos nas imagens magnetométricas.
- As anomalias de alta freqüência na imagem magnetométrica, causadas pelos corpos de formações ferriferas localizados no centro da área, destacam-se em todos os produtos gerados a partir do dado magnetométrico.

 Pode-se separar a área de estudo em três domínios magnéticos, de acordo com diferenças de gradientes:

No domínio A se destacam as anomalias de alta freqüência causadas pelos corpos de formações ferríferas na Formação Santa Quitéria, localizada no centro da área.

No domínio B se destacam as anomalias causadas pelas litologias do Supergrupo Minas ao sul; do corpo metabásico intrusivo ao norte; das formações lateríticas ao sudoeste e norte e de parte das litologias da Formação Córrego do Sítio.

O domíno C é caracterizado pelos menores gradientes. Encontra-se, nesse domínio, as litologias do Grupo Maquiné, da Formação Quebra-osso, Santa Quitéria, Mindá, além dos corpos graníticos e parte da Formação Córrego do sítio, ao norte da área.

- Mesmo não evidenciando a complexidade dos alinhamentos estruturais presentes na área, os dados magnetométricos mostraram-se eficazes na visualização de alinhamentos estruturais, principalmente, aqueles com direção NE/SW. Isto se deve, em grande parte, à aplicação de filtros direcionais NW/SE nas imagens geradas.
- Os dados gamaespectrométricos apresentaram, no geral, uma boa variabilidade nas imagens analisadas, permitindo uma relativa correlação com as unidades litológicas. Entretando não é possivel, a partir desses dados discriminar todas as unidades representadas por CPRM (1996). A imagem do canal do potássio é a que melhor reproduz os litotipos discriminados na área de estudo. Na imagem do canal do tório destaca-se ao norte da área, a presença de um corpo granítico com provável enriquecimento em tório. A imagem do canal do urânio, apresenta-se bastante ruidosa, o que não permitiu maiores inferências.
- A partir da análise quantitativa, realizada nos dados gamaespectrométricos, foi possível verificar melhor a distribuição dos radioelementos nas unidades geológicas presentes na área de trabalho nos permitindo tecer algumas considerações:

1. Algumas das unidades descritas na área de estudo por CPRM (1996) estão intimamente ligadas, no que tange à sua origem e composição, como por exemplo, Formações Córrego do Sítio e Mindá. Neste caso, é muito difícil a separação dessas unidades como sugere CPRM (*op cit.*);

2. Apenas as Formações Córrego do Sítio, Quebra Osso, Santa Quitéria (principalmente com formações ferríferas associadas), unidades do Grupo Maquiné, coberturas

lateríticas, além dos terrenos granito-gnaissicos são bem discriminados a partir dos dados gamaespectrométricos;

3. Foi possível constatar que nas Formações Quebra Osso e Ouro Fino ocorreu um enriquecimento dos três canais radiométricos, o que pode estar relacionado a eventos metamorficos-hidrotermais ocorridos na área;

4. Na Formação Mindá e Membro Rio de Pedra, os valores de urânio se apresentam com níveis radiométricos acima do normal.

- Na imagem dos canais radiométricos em RGB, integrada ao canal magnetométrico foi possível visualizar que as feições estruturais marcadas na imagem magnetométrica possuem um alto teor potássio/urânio, principalmente aquelas correlacionadas à presença das formações ferríferas, no centro da área.
- Os dados gerados a partir da extração dos traços de fraturas mostraram uma predominância na direção NW-SE, com concentrações em N50-55E e N80-85E.
- As áreas com maior densidade de fraturamento se encontram na parte central da área de estudo, com dois picos de valores: um associado ao contato entre as Formações Córrego do Sítio e Mindá e um outro, ao contato entre as Formações Córrego do Sítio e Santa Quitéria. Ocorre também um pico na porção sudoeste em rochas do Supergrupo Minas.
- Entre os tipos principais de ocorrências de ouro na área de estudo, o que apresenta maior afinidade com a integração do mapa do canal radiométrico do potássio com o mapa dos traços de fraturas é o de zonas de alteração hidrotermal – tipo mina Córrego do Sítio. Podese afirmar que o mapa de densidade de fraturamento integrado com o canal de potássio é o que melhor se evidencia este tipo de ocorrência. Podendo-se então considerar como áreas potenciais para pesquisa mineral voltada a ocorrências de ouro, as áreas que se enquadrem na categoria muito alto e alto deste mapa.

- ABREU, S.A.; DINIZ, H.B.; PRADO, M.G.B.; SANTOS, S.P. 1988. Mina de ouro de São Bento, Santa Bárbara, Minas Gerais In: Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral. *Principais Depósitos Minerais do Brasil*: Metais básicos não-ferrosos, ouro e alumínio. Brasília: DNPM. 3:393-411.
- ALMEIDA FILHO, R. & VITORELLO, I. 1993. Uso combinado de imagens Landsat e fotografias aéreas na discriminação espectral de áreas de alteração hidrotermal: uma nova abordagem em pesquisa mineral. In: INPE:SMA/PR:SBS, VI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, 1993, *Anais*, 3:145-147.
- ALMEIDA, F.F.M. 1976. Estruturas do Pré-Cambriano Inferior Brasileiro. In: Congr. Bras. Geol., 29, Ouro Preto, 1976, *Boletim de Resumos*, 201-202.
- ALMEIDA, F.F.M. 1977. O Cratón do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*. 7(4):349-364.
- ALKMIM, F. F.; BRITO NEVES, B. B.; ALVES, J.A.C. 1993. Arcabouço tectônico do cráton do São Francisco - Uma revisão. In: Dominguez, J.M.L. & Misi, A., O cráton do São Francisco. Salvador, SBG: SGM: CNPq, 201-202.
- AMARAL, G.; MATTOS, J.T. DE; ALMEIDA Fo., R.; CUNHA, R.P.; PARADELLA, W.R. 1976. Carta geológica ao milionésimo da folha de Belo Horizonte com base na interpretação de imagens Landsat. In: SBG, Cong. Bras. Geol., 29, Ouro Preto, 1976. *Anais*, 4:229-238.
- BARANOV, V. 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudogravimetric anomalies. *Geophysics*, **22**:259-283.
- BABINSKI, M.; CHEMALE Jr., F.; VAN SCHMUS, W.R. 1991. Geocronologia Pb/Pb em rochas carbonáticas do Supergrupo Minas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geoquímica, 3, São Paulo, 1991. Boletim de Resumos, 2:628-631.

- BABINSKI, M.; CHEMALE Jr., F. & VAN SCHMUS, W.R. 1993. A idade das formações ferríferas bandadas do supergrupo minas e sua correlação com aquelas da África do Sul e Austrália. In: SBG, II Simpósio do Cráton do São Francisco, *Anais*, 152-153.
- BALTAZAR, O.P & RAPOSO, F.O. 1993. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Mariana - Folha SF.23-X-B-I. Estado de Minas Gerais, Escala 1:100. 000.
 Brasília, DNPM/CPRM, 196p. il., 2 cartas (in bolso).
- BERBERT, O.C. Geologia do Ouro. In: Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral. Principais Depósitos Minerais do Brasil: Metais básicos não-ferrosos, ouro e alumínio. Brasília: DNPM. 3:289-300.
- BRITO, O. 1997. Minas Gerais: mantendo a liderança na produção mineral. Brasil Mineral, **15**(149): 12-17.
- BRITO NEVES, B.B. & ALKMIM, F. F. 1993. Cráton: evolução de um conceito. In: Dominguez, J.M.L. & Misi, A (ed.) O cráton do São Francisco. Salvador, SBG: SGM: CNPq, 1-10.
- CARMELO, A. C. & CARVALHO, A. S. 1993. Realce digital para o greenstone belt de Crixás, Goiás. In: INPE, VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, *Anais*, 3:182-187.
- CHAVEZ, P.S., Jr. 1988. An improved dark-object subtration technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24:459-479.
- CHAVEZ, P.S, Jr.; BERLING, G.L.; SOWERS, L.B. 1982. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. *Journal of Applied Photographic Engineering*. 8:23-30.
- CHAVES, P.S., Jr. & KWARTENG, A.Y. 1989. Estracting spectral contrast in Landsat thematic mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **55**(3):339-348
- CHEMALE Jr., F.; ROSIÈRE, C.A.; ENDO, I. 1991 Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais Um Modelo. *Pesquisas*, **18**(2):104-127.
- CHEMALE Jr., F.; ROSIÈRE, C.A.; ENDO, I. 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Precambrian Research*, 65:25-54.

- COLWELL, R.N. 1983. *Manual of Remote Sensing*. 2ed. Houston: American Society of Photogrammetric, 1232 p.
- CORRÊA NETO, A.V.; BALTAZAR, O.F. & SILVA, S.L. 1994. Evolução estrutural do setor setentrional do Greenstone belt Rio das Velhas (MG). In: SBG, Cong. Bras. Geol., 38, Camboriú. *Boletim de resumos*, 1:69-70.
- CPRM. 1996. Projeto Rio das Velhas. Mapa geológico integrado: *texto explicativo*. CPRM, Belo Horizonte, MG. Escala 1:100.000. 122p.
- CRACKNELL A. P. & HAYES, L.W.B. 1991. Introduction to Remote Sensing, London, Taylor & Francis. 293p.
- CRIST, E.P. & KAUTH, R.J. 1986 The tasseled cap de-mystified. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **52**(1):81-86.
- CRÓSTA, A. P. 1993a. Caracterização espectral de minerais de interesse-proseção mineral e sua utilização em processamento digital de imagens In: INPE, VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, *Anais*, 3:202-209.
- CRÓSTA, A.P. 1996. Século XXI em alta resolução. Fator Gis, 15:14-17.
- CRÓSTA, A.P.; MOORE, J.M. 1989. Enhancement of Landsat thematic mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais sate, Brazil. A prospecting case history in greenstone belt terrain In: VII Thematic Conference on Remote Sensing For Exploration Geology, Galgary, Alberta, Canada, *Proceedings*, 1173-1187.
- DERBY, A.O. 1906. The Serra do Espinhaço, Brazil. Jour. Geol. 14(5):374-401.
- DNPM. 1993. Levantamento Aéreo Magnético, Gamaespectrométrico e Eletromagnetométrico - Projeto Rio das Velhas, *Relatório Final - fase I*. vol. I, 47p.
- DOBRIN, M.B. & SAVIT, C.H. 1988. *Introduction to geophysical prospecting.* 2 ed. Singapore: McGraw Hill, 867p.
- DORR II, J.V.N. 1969. Physiographic, stratigraphic and estructural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S.G.S. Prof. Paper, 641-A, 110p.
- DORR II, J.V.N; GAIR, J.E.; POMERENE, J.B.; RYNEARSON, G.A. 1957. Revisão estratigráfica Pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero. DNPM-DFPM. *avulso* 81, 31p.
- DORR II, J.V.N. and BARBOSA, A.L.M. 1963. Geology and ore deposits of the Itabira district Minas Gerais, Brazil. U.S.G.S. Prof. Paper 341-C, 110p.

- DRURY, S.A.; WALKER, A.S.D. 1987. Display and enhacement of gridded aeromagnetic data of the Solway Basin. *Int. J. Remote Sensing*, **8**(10): 1433-1444.
- DUVAL, J.S. 1983. Composite color images of aerial gamma-ray spectrometric data. *Geophysics*, 48 (6):722-735.
- FREITAS-SILVA, F. H. & MENESES, P.R. 1994. Tratamento digital de imagens TM aplicado a interpretação geológico-estrutural e implementações para prospecção de ouro no Grupo Paranoá. In: SBG, IV Simpósio de Geologia do Centro oeste, Brasília, *Anais*, 105-107.
- GARCIA NETTO, L.R. 1993. O sensoriamento remoto nos estudos geoecológicos e de organização espacial. In: SBG, VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, Anais, 2:81-87.
- GNOJEK, I. & PRICHYSTAL, A. 1985. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia). *Geoexploration*, 23:491-502.
- GREEN, W.B. 1989. *Digital image processing: A system approach*, 2ed. New York: Van Nostrand Reinhold. 251p.
- HARDER, E.C. & CHAMBERLIN, R.T. 1915. The geology of central Minas Gerais, Brazil, J. Geol. 23(4):341-378; 23(5):385-424.
- HEINECK, C.A.; ALVES DOS SANTOS, R.; DELGADO, I.M. 1995. Geologia e recursos minerais do Brasil: regiões leste e sudeste. In: Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral. *Economia Mineral do Brasil*. Brasília, DNPM, 82-89.
- HERZ, N. 1970. Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. USGS Prof. Pap. 641-C, 81p.
- HARALICK, R.M.; SHANMUGAM, K.; DINSTEIN, I. 1973. Textural features for image classification, *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, SMC. 3(6):610-621.
- HARRIS, J.R.; MURRAY, R. and HIROSE, T. 1990.IHS transform for the integration fo radar imagery with other remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 56(12):1631-1641.

- HOMER, C.G.; RAMSEY, R.D.; EDWARDS Jr., T.C.; FALCONER, A. 1997. Landscape cover-type modeling using a multi-scene thematic mapper mosaic. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 63(1):59-67.
- KOWALIK, W.S. & GLENN, W.E. 1987. Image processing of aeromagnetic data and integration with Landsat images for improved structural interpretation. *Geophysics*, 52(7): 875-884.
- LADEIRA, E.A. 1980. Metallogenesis of gold at the Morro Velho mine and in Nova Lima District, Quadrilátero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil. University of Western Ontário London (Ontário), PhD. Thesis, 272p.
- LADEIRA, E.A. 1981. Primeiras lavas com almofadas ("pillows") encontradas no Supergrupo Rio das Velhas, de idade Arqueana, no Quadrilátero Ferrífero e no Distrito de Pitangui, Minas Gerais. *Ciências da Terra*, 1:12-14.
- LADEIRA, E.A. 1985. Metalogênese do ouro na minas de Morro Velho e no Distrito de Nova Lima, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Contr. Geol. Petrol., SBG-CBMM/MG, 95-151.
- LADEIRA, E. A. 1988. Metalogenia dos Depósitos de Ouro do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: In: Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral. *Principais Depósitos Minerais do Brasil*: Metais básicos não-ferrosos, ouro e alumínio. Brasília: DNPM. 3:393-411.
- LADEIRA, E.A. 1989. Evolução geológica do Quadrilátero Ferrifero no Arqueano e Proterozóico Inferior, com base em geocronologia U-Pb. In: SBG, V Simpósio Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte. *Anais*, 10:1-5.
- LAUER, D.T.; MORAIN, S.A.; SALOMONSON, V.V. 1997. The Landsat program: its origins, evolution and impacts. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 63(7):831-838.
- LAVREAU, J. & FERNANDEZ-ALONSO, M. 1991. Correcting airborne radiometric data for water/vegetation screening using landsat thematic mapper imagery. In: Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 8, Denver, *Proceedings*, 439-446.
- LILLESAND, M.T. & KIEFER, R.W. 1994. *Remote sensing and image interpretation*. 3ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 750p.

- LIU, C.C. 1984. Análise estrutural de lineamentos em imagens de sensoriamento remoto: aplicação ao Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutoramento, 224p.
- LIU, J. G. 1991. Balance contrast enhancement techniques and its application in image colour composition. *Int. J. Remote Sensing*. **12**(10):2133-2151.
- LUIZ, J.G. & SILVA, L.M.C. 1995. *Geofisica de prospecção*. Belém, Universidade Federal do Pará: CESUP, 311p.
- MACHADO N.; SCHRANK, A.; NOCE, C.M.; GAUTHIER, G. 1996. Ages of detrital zircon from Archean-Paleoproterozoic sequences: Implications for Greenstone Belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil. *Earth and Planetary Science Letters*. 141:259-276.
- MARSHAK, S.; ALKIMIN, F.F.; JORDT-EVANGELISTA, H. 1992. Proterozoic crustal extension and generation of dome-and keel structure in an Archean granite-greenstone terrane. *Nature*, **357**:491-493.
- MATOLIN, M. 1984. Radiometric methods and methods of nuclear geophysics In: S. Mares (ed.) *Introduction to applied geophysics*. Dordrecht, Reidel, 154-245.
- MIKA, A. M. 1997. Three decades of Landsat instruments. *Photogrammetric Engineering* & *Remote Sensing*. **63**(7):839-852.
- MIRANDA, R.M. de. 1997. Avaliação da atenuação de vegetação da Mata Atlântica à radiação gama natural emitida pela superficie. Inst. de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Dissertação de mestrado. 62p.
- MISENER, D.J.; SINCLAIR, R.; MOURÃO, L.M.F. 1997. A new Brazil radiometric database generatio and application. In: SBGF, V Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, *Resumos expandidos*, 1:564.
- MISI, A.; VIVEIROS SÁ, P.V.S.; LOBATO, L.M.; PEDROSA-SOARES, A.C. 1993. Os depósitos minerais do Cráton do São Francisco e seu contexto geotectônico. In: Domingues, J.M.L. & Misi, A. (ed.) *O Cráton do São Francisco*. Salvador, SBG:SGM:CNPq. 187-215.
- MOORE, J. McM., GUO, L. J. Imagem enhancement of epithermal gold deposit alteration zones in southeast spain. *Sem referência*.

- MULDERS, M.A. & EPEMA, G.F. 1986. The thematic mapper: a new tool for soil mapping in arid areas. *ITC Journal*, 1: 24-29.
- NOVO, E.M.L. 1989. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. São Paulo, Edgard Blucher. 308p.
- OLIVEIRA, G. A. I.; CAIAFA, P. L.; VIAL, D.S. 1983. Excursão a mina de Ouro de Morro Velho. In: SBG, II Simp. Geol. Minas Gerais, *Resumo*, 497-505
- OKIDA, R. & VENEZIANI, P. 1994. Caracterização de áreas de riscos associadas a escorregamentos e a inundações através de técnicas de sensoriamento remoto: uma proposta metodológica. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 38. Camboriú, 1994. *Boletim de resumos*, 1:451-452.
- PASCHOLATI, E.M. & AMARAL, G. 1998. Conversão de dados gamaespectrométricos para teor na superfície. *Em elaboração*.
- PERROT, M. M. & CÂMARA, M. M. 1994. Processamento digital de imagens de satélite e aerogamaespectrometricas na região entre Guapiara-Iporanga-Eldorado Paulista-Serra dos Agudos Grandes, médio Vale do Ribeira- SP. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 38, Camboriú, 1994. *Boletim de resumos*, 1:471-473.
- PINTO, C.P. & SILVA, L.C. 1996. Contrasting tectono-stratigraphic domains in the Rio das Velhas Greenstone Belt (RVGB), MG, Brazil. In: SBG, Symposium Archaean terranes of the South American Platform. Brasília, 1996. *Extend abstracts*, 23-25.
- QUEIROZ, C.L.; KUYUMJIAN, R.M.; MENESES, P.R.; MAGALHÃES, E.R. 1994. Um estudo de lineamentos morfoestruturais extraídos de imagens TM-Landsat do Greenstone Belt de Crixas e parte do Bloco da Anta. In: : SBG, Simpósio de Geologia do Centro-oeste, 4, Brasília. *Anais*, 88-91.
- REEVES, C.V. 1985. Airborne geophysics for geological mapping and regional exploration. *ITC journal*, 3:147-161.
- REEVES, C.V. 1993. New horizons for airborne geophysical mapping. *ITC journal*, 2:149-155.
- SANTOS FILHO, J.L.; ARAÚJO, A.H. & CARVALHO Jr., O.A. 1994. Expressão geofísica da alteração hidrotermal no Greenstone Belt de Guarinos, Goiás. In: SBG, Simpósio de Geologia do Centro-oeste, 4, Brasília. *Anuis*, 92-94.

- SCHORSCHER, H.D. 1976. Polimetamorfismo do Pré-Cambriano na Região de Itabira, Minas Gerais, Brasil. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 29, Ouro Preto, *Boletim de Resumos*, 201-202.
- SCHORSCHER, H.D. 1978. Komatiitos na estrutura "Greenstone Belt" série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 30, Recife, *Boletim de Resumos*, 292-293.
- SCHORSCHER, H.D. 1979. Evolução geotectônica e petrogenética do embasamento arqueano do QuadriláteroFerrífero. *An. Acad. Bras. Ciên.*, **51**:767-768.
- SCHORSCHER, H.D. 1980. Contribuição à estratigrafia Proterozóica do Quadrilátero Ferrifero. An. Acad. Bras. Ciên., **51**(1):195.
- SCHORSCHER, H.D.; SANTANA, F.C.;POLONIA, J.C. ; MOREIRA, J.M.P. 1982. Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, state: Rio das Velhas Greenstone Belt and Proterozoic rocks. In: SBG, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ARCHEAN AND EARLY PROTEROZOIC EVOLUTION AND METALLOGENESIS, Salvador. *Excursions Annex*, 44p.
- SHIMABUKURO, M.T. 1996. Avaliação de classificadores espectrais de imagens landsat5-TM em áreas rurais densamente ocupadas – o caso da região de Brotas e Torrinha, São Paulo, Brasil. Inst. de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Dissertação de mestrado. 177p.
- SICHEL, S.E. 1982. Expressão Litoestratigráfica das Rochas Pré-cambrianas da Região de Barão de Cocais. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 32, Salvador, Anais, Salvador, 1:194-195.
- SIMMONS, G.C. & MAXWELL, C.H. 1961. Grupo Tamanduá da Série Rio das Velhas. DNPM-DGM. Avulso 211, 31p.
- TSOMBOS, P.I. & KALOGEROPOULOS, S.I. 1990. Remote sensing as applied to mineral exploration in the Chalkidiki peninsula, northern Greece. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **45**: 344-354.
- VAN DER MEER, F.D. 1994. Mineral identification and mapping of hydrothermal alteration zones using high-spectral resolution images (AVIRIS). *ITC Journal.*, 2: 145-154.

- VAN SCHMUS, W.R. 1995. Natural Radioactivity of the Crust and Mantle. In: Thomas J. Ahrens Global Earth Physics, a handbook of physical constants. Washington: AGU Books Board, p.283-291.
- VASCONCELLOS, R.M.; METELO, M.J.; MOTTA, A.C.; GOMES, R.D. 1994. Geofísica em levantamentos geológicos no Brasil, Rio de Janeiro, CPRM/DIGEOF, 165p.
- VIAL, D.S. 1980. Geologia da Mina de Ouro de Raposos. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 31, Camboriú, Anais, 3:1851-1866.
- VIEIRA, F.W.R. 1988. Processos epigenéticos de formação dos depósitos auríferos e zonas de alteração hidrotermal do Grupo Nova Lima, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: SBG, Cong. Bras. Geol., 35, Belém, Anais, 1:76-87.
- VIEIRA, F.W.R. & OLIVEIRA, G.A.I. 1988. Geologia do distrito aurífero de Nova Lima, MG. In: Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral. *Principais Depósitos Minerais do Brasil*: Metais básicos não-ferrosos, ouro e alumínio. Brasília: DNPM. v.3, p. 377-391.

ANEXO I

ANEXO II



Anexo II - Mapa geológico da área de trabalho (CPRM, 1996).