

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA - CEPSRM
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

INTEGRAÇÃO DE IMAGENS TM E AEROGEOFÍSICAS PARA ANÁLISE LITO-
ESTRUTURAL DE UMA PORÇÃO DA ZONA DE CISALHAMENTO TRANSCORRENTE
DORSAL DE CANGUÇU, REGIÃO DE QUITÉRIA - VÁRZEA DO CAPIVARITA, RS.

Márcio André Klein
Geólogo

Porto Alegre (RS), Brasil
Maio de 1998.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA - CEPSRM
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

INTEGRAÇÃO DE IMAGENS TM E AEROGEOFÍSICAS PARA ANÁLISE LITO-
ESTRUTURAL DE UMA PORÇÃO DA ZONA DE CISALHAMENTO TRANSCORRENTE
DORSAL DE CANGUÇU, REGIÃO DE QUITÉRIA - VÁRZEA DO CAPIVARITA, RS.

Autor: Márcio André Klein

Orientadores: Prof. Dr. Robin Thomas Clarke

Prof. Dr. Paulo Roberto Meneses

Dissertação apresentada como um dos
requisitos à obtenção do Grau de
Mestre em Sensoriamento Remoto

Porto Alegre (RS), Brasil

Maio de 1998.

*“Se você duvida de que as montanhas caminham,
você ainda não aprendeu sua própria caminhada”.*

(Provérbio Chinês)

AGRADECIMENTOS

Ao término desse trabalho, exponho meus agradecimentos às pessoas e instituições que contribuíram para sua execução.

Aos profs. Drs.: Robin Thomas Clarke e Paulo Roberto Meneses, meu mais profundo respeito e gratidão pela oportunidade de viabilização desse trabalho, amizade, correções, críticas e sugestões.

Ao prof. Dr. Luis Alberto D'Ávila Fernandes pelo incentivo, ensinamentos e importantes contribuições ao conhecimento geológico da área.

Ao prof. Dr. Antônio Flávio Uberti Costa, pelas constantes abordagens e auxílio às questões geofísicas.

Ao prof. Dr. Nélon Amoretti Lisboa, pela contribuição na área de geomorfologia, indicações e sugestões de leitura que muito enriqueceram este trabalho.

Ao prof. Dr. Albertino Carvalho, pelos ensinamentos na área de integração de dados digitais e sugestões de leitura.

Aos geólogos *M.Sc.* Edinei Koester e Sílvia Beatriz Alves Rolim pelos esclarecimentos, sugestões e empréstimo de material bibliográfico.

Aos geólogos, Gérson Caravaca e Luis Carlos Bosi Tubino, pela amizade, incentivo e apoio logístico.

Aos colegas de pós-graduação: Glauco Ferrasi Duarte, Rosemary Hoff, Marcelo Almeida Bastos, Marcos Alexandre de Freitas e Sérgio Florêncio de Souza pelo convívio, amizade, ensinamentos, discussões e “churrascos”.

Aos colegas Régis Lahm e Laurindo Guasseli pela cooperação técnica.

Ao CEPSRM, em nome dos seguintes professores: Jorge Ducatti, Franz Reiner Semmelmann, Vitor Haertel; às secretárias Magdalena e Mônica; e aos demais funcionários: Luciane, Fabiana, Adriano, Fausta e Dona Maria (“*in memoriam*”), pela cooperação e convívio no período de estudos

À CPRM, pelo fornecimento dos dados aerogeofísicos.

À CAPES, pela viabilização desta pesquisa através da bolsa de estudos.

Em especial, aos meus familiares, pelo incentivo e carinho em mais esta caminhada.

*“Integração de imagens TM e aerogeofísicas para análise lito-estrutural de uma porção da Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu, região de Quitéria - Várzea do Capivarita, RS”.*¹

Autor: Márcio André Klein
Orientadores: Robin Thomas Clarke e Paulo Roberto Meneses

RESUMO

A utilização de programas de processamento de imagens digitais e de sistemas de informações geográficas que admitem a importação e exportação de inúmeros formatos de apresentação de dados, aliado a modernos equipamentos de computação, tem tornado a integração de dados, de diferentes sensores, um caminho padrão em Geociências, pela otimização da relação custo/tempo na execução de serviços de mapeamento. Neste contexto, esse trabalho resulta da análise da integração de dados de sensoriamento remoto e geofísica, com o objetivo de verificar sua aplicabilidade na identificação e caracterização litológica e estrutural de uma área-teste, localizada na Região de Quitéria-Várzea do Capivarita, no Estado do Rio Grande do Sul. A metodologia usada, em um primeiro momento, priorizou o processamento e análise individual de dados cartográficos, de imagens TM/LANDSAT-5 e dados de aeromagnetometria e aerogamaespectrometria nos canais Contagem Total (CT), Potássio (K), Tório (Th) e Urânio (U). Os dados foram, a seguir, convertidos para o formato digital na forma de imagens (“raster”) com resolução espacial de 30 x 30 m, a fim de permitir o cruzamento de informações através de técnicas de Processamento Digital de Imagens e de Sistemas de Informações Geográficas (SIG’s). A integração das imagens TM e geofísicas foi realizada com o uso da Transformação IHS, através da conversão das bandas TM para as componentes individuais I, H e S; substituindo-se a componente H, pela imagem geofísica no retorno ao espaço RGB. A análise dos produtos de sensoriamento remoto e geofísica obtidos nessa pesquisa, permitiram identificar os Domínios Morfoestruturais; identificar e delimitar as diferentes Unidades Fotolitológicas; reconhecer os principais sistemas estruturais a partir da extração e análise de lineamentos; obter informações do padrão de relevo magnético; e, principalmente, a geração de imagens temáticas de teores de radioelementos com a identificação de áreas promissoras de mineralizações. Os resultados comprovam a eficiência do emprego de técnicas de integração de dados digitais, via computador, tanto para fins de mapeamento lito-estrutural, como em caráter prospectivo, em serviços geológicos de grandes áreas.

1/ Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, UFRGS. Porto Alegre, RS (120p.). Maio, 1998.

*“Integration of satellite images (TM/LANDSAT-5) and geophysical for lithostructural analysis, in a portion one of the Dorsal de Canguçu Shear Zone, in an area located in the Quitéria-Várzea do Capivarita region, in the Rio Grande do Sul State”.*¹

Author: Márcio André Klein

Advisor: Robin Thomas Clarke and Paulo Roberto Meneses

ABSTRACT

The use of digital image processing programs and of geographical information systems which admit the import and export of countless formats of data presentation, allied to the modern computation equipments, have turned the crossing of different data groups, from different sensors, a standard path to follow in the geoscience field. It optimizes the time/cost relationship in the execution of mapping services processes. This work presents the analysis results of the integration of remote sensing and geophysical data. The main objective is to verify the potentialities of such an integration in the lithological and structural characterization of a field area. The methodology has been applied in an area located in the Quitéria-Várzea do Capivarita region, in the Rio Grande do Sul State. At a first moment the used methodology prioritized the processing and analysis of cartographic data, satellite images TM/LANDSAT-5, aeromagnetometric and aerial gamma-ray data in the channels Total Count (CT), Potassium (K), Thorium (Th) and Uranium (U). In order to allow the crossing of information from the digital image processing techniques and from the GIS technologies, the data were transformed into the digital format (raster) with a spacial resolution of 30 x 30 m. The integration of the images TM and geophysics have been done through the application of the IHS Transformation. The TM bands were converted into the components I, H and S, with the component H being substituted by the geophysical image in the RGB space. By analysing the results it was possible to take many conclusions about the geological and geomorphological units, the main structural systems and the magnetic relief patterns present in the region studied. Also thematic images showing the radioelements concentration distribution were generated as a very important product. Those maps permitted the reconnaissance of potential mineralization areas. The results proved that the employment of digital data integration techniques, through the computer, are an efficient tool in the lithostructural map preparation with prospective finalities, specially suitable for large scale areas.

1/ Master of Science Thesis, Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Post-graduate Course in Remote Sensing, UFRGS, Porto Alegre (120 p.). May, 1998.

SUMÁRIO

Página

AGRADECIMENTOS.....	II
RESUMO.....	III
ABSTRACT.....	IV
SUMÁRIO.....	V
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE ANEXOS.....	XI

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO..... 1

1.1. APRESENTAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS.....	1
1.3. ETAPAS DE TRABALHO	2
1.4. NATUREZA DOS DADOS E PROGRAMAS UTILIZADOS	2
1.5. SELEÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	4

CAPÍTULO 2 - ASPECTOS FISIAGRÁFICOS DA REGIÃO..... 7

2.1. RELEVO	7
2.2. CLIMA.....	8
2.3. SOLOS	8
2.4. VEGETAÇÃO	9
2.5. HIDROGRAFIA	9

CAPÍTULO 3 - GEOTECTÔNICA E GEOLOGIA..... 10

3.1. CONTEXTO GEOTECTÔNICO	10
3.2. GEOLOGIA REGIONAL	10
3.3. GEOLOGIA ESTRUTURAL	18
3.4. CARACTERIZAÇÃO TECTÔNICA, CINEMÁTICA E EVOLUTIVA DA ZCTDC	19
3.5. GEOLOGIA ECONÔMICA	20

CAPÍTULO 4 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... 22

4.1. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE SENSORIAMENTO REMOTO	22
4.1.1. PRINCÍPIOS	22
4.1.2. SENSORES IMAGEADORES ORBITAIS	23
4.1.3. IMAGENS DIGITAIS	25
4.1.4. PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS	25
4.1.5. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS COLORIDAS	27

4.2. GEOPROCESSAMENTO	29
4.2.1. CONCEITOS BÁSICOS	29
4.2.2. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	30
4.2.3. PRINCÍPIOS DE INTEGRAÇÃO DE DADOS DIGITAIS	32
4.3. AEROGEOFÍSICA	34
4.3.1 AEROGAMAESPECTROMETRIA	34
4.3.1.1. PRINCÍPIOS FÍSICOS	35
4.3.1.2. RADIOATIVIDADE NATURAL DE MINERAIS E ROCHAS	38
4.3.2. AEROMAGNETOMETRIA	39
4.3.2.1. PRINCÍPIOS FÍSICOS	40
4.3.2.2. MAGNETIZAÇÃO DOS MINERAIS E ROCHAS	40

CAPÍTULO 5 - PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS CARTOGRÁFICOS, DE SENSORIAMENTO REMOTO E GEOFÍSICOS 42

5.1. INTRODUÇÃO.....	42
5.2. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS VETORIAIS	43
5.3. PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS TM/LANDSAT-5	44
5.3.1. CORREÇÃO ATMOSFÉRICA	44
5.3.2. CORREÇÃO GEOMÉTRICA	45
5.4. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS	46
5.4.1. CORREÇÕES SOBRE OS DADOS AEROGEOFÍSICOS BRUTOS	46
5.4.2. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS CORRIGIDOS	49
5.4.2.1. SELEÇÃO DA JANELA DA ÁREA DE ESTUDO	49
5.4.2.2. CALIBRAÇÕES DOS DADOS GEOFÍSICOS	49
5.4.2.3. GERAÇÃO DAS GRADES REGULARMENTE ESPAÇADAS (“GRIDS”).....	50
5.4.2.4. FILTRAGENS	51
5.4.2.5. CONVERSÃO <i>GRID X RASTER</i> E GEORREFERENCIAMENTO UTM	51
5.4.2.6. MOSAICO	53

CAPÍTULO 6 - PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DAS IMAGENS DIGITAIS 54

6.1. INTRODUÇÃO	54
6.2. DADOS MORFOESTRUTURAIS	54
6.2.1. INTRODUÇÃO	55
6.2.2. CLASSIFICAÇÃO MORFOESTRUTURAL DA ÁREA E CORRELAÇÃO COM AS SUPERFÍCIES DE APLAINAMENTO NO RS	56
6.3. DADOS ESPECTRAIS DAS IMAGENS TM	62
6.4. DADOS GEOLÓGICOS - ESTRUTURAIS	74
6.5. DADOS AEROMAGNETOMÉTRICOS	80
6.6. DADOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS	84
6.6.1. INTERPRETAÇÃO DAS IMAGENS DE RADIAÇÃO TOTAL (CT)	85
6.6.2. INTERPRETAÇÃO DAS IMAGENS DE POTÁSSIO (K)	87
6.6.3. INTERPRETAÇÃO DAS IMAGENS DE TÓRIO (TH)	89

6.6.4. INTERPRETAÇÃO DAS IMAGENS DE URÂNIO (U)	91
6.6.5. INTERPRETAÇÃO DAS IMAGENS RAZÕES	93
6.7. DADOS INTEGRADOS VIA TRANSFORMAÇÃO IHS	97
6.7.1. INTEGRAÇÃO DAS IMAGENS TM COM AS IMAGENS MAGNETOMÉTRICAS VIA TRANSFORMAÇÃO IHS	99
6.7.2. INTEGRAÇÃO DAS IMAGENS TM COM AS IMAGENS GAMAESPECTROMÉTRICAS VIA TRANSFORMAÇÃO IHS	100
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
ANEXOS.....	118

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 1.1 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS AEROLEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS NO RIO GRANDE DO SUL.....	5
TABELA 2.2 - QUADRO DEMONSTRATIVO DAS DENOMINAÇÕES COMUNS PARA O RELEVO DA ÁREA DE ESTUDO.....	7
TABELA 4.1 - PRINCIPAIS APLICAÇÕES DAS BANDAS ESPECTRAIS DO SENSOR TM/LANDSAT-5, EM RECURSOS NATURAIS	24
TABELA 4.2 - APLICAÇÕES MAIS COMUNS DE SISTEMAS DE GEOPROCESSAMENTO	30
TABELA 5.1 - PLANOS DE INFORMAÇÕES CRIADOS NO SISTEMA GEOGRÁFICO DE INFORMAÇÕES.....	43
TABELA 6.1 - PRINCIPAIS TÉCNICAS DE REALCE UTILIZADAS NO PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS	54
TABELA 6.2 - ESQUEMA DAS SUPERFÍCIES DE APLAINAMENTO IDENTIFICADAS NA ÁREA DE ESTUDO.....	56
TABELA 6.3 - SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DO RELEVO E PADRÕES DE DRENAGENS DA ÁREA DE QUITÉRIA - VÁRZEA DO CAPIVARITA, RS	57
TABELA 6.4 - VALORES ESTATÍSTICOS PARA AS BANDAS TM 1, 2, 3, 4, 5 E 7.....	63
TABELA 6.5 - MATRIZ DE VARIÂNCIA-COVARIÂNCIA DAS BANDAS TM 1, 2, 3, 4, 5 E 7	63
TABELA 6.6 - MATRIZ DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE AS BANDAS TM	63
TABELA 6.7 - VALORES DOS ÍNDICES CALCULADOS PARA AS DIFERENTES COMPOSIÇÕES ENTRE AS BANDAS MULTIESPECTRAIS	67
TABELA 6.8 - VALORES ESTATÍSTICOS PARA OS LINEAMENTOS TRAÇADOS SOBRE AS IMAGENS DIGITAIS	77
TABELA 6.9 - SISTEMAS DE LINEAMENTOS IDENTIFICADOS NA ÁREA DE ESTUDO	77
TABELA 6.10 - CARACTERÍSTICAS RADIOMÉTRICAS DAS UNIDADES LITOLÓGICAS DA ÁREA DE ESTUDO	84

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1.1 - FLUXOGRAMA GERAL DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS	3
FIGURA 1.2 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E DETALHE DAS VIAS DE ACESSO....	6
FIGURA 2.1 - VISÃO GERAL DO RELEVO NA PARTE NORTE DA ÁREA.....	8
FIGURA 3.1 - PRINCIPAIS ASSOCIAÇÕES PETROTECTÔNICAS DO CINTURÃO DOM FELICIANO NO RIO GRANDE DO SUL	11
FIGURA 3.2 - MAPA GEOLÓGICO DA REGIÃO DE ENCRUZILHADA DO SUL.....	12
FIGURA 3.3 - COLUNA ESTRATIGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO.....	14
FIGURA 3.4 - RELEVO DO GRANITO SERRA DO HERVALNA PORÇÃO SW DA ÁREA	17
FIGURA 3.5 - MORRO “TESTEMUNHO” DA FORMAÇÃO RIO BONITO	17
FIGURA 3.6 - PEDREIRAS DE EXTRAÇÃO DE CALCÁRIOS EM VÁRZEA DO CAPIVARITA, RS	21
FIGURA 4.1- REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE.....	22
FIGURA 4.2 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	23
FIGURA 4.3 - MODELO GEOMÉTRICO DO REALCE NO DOMÍNIO ESPECTRAL DE UMA IMAGEM DIGITAL	26
FIGURA 4.4 - MODELO CÚBICO DE CORES: ESPAÇO DE CORES RGB E ESPAÇO IHS.....	28
FIGURA 4.5 - COMPONENTES DE UM SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	31
FIGURA 4.6 - CURVAS ESPECTRAIS TÍPICAS PARA OS RAIOS GAMA.....	36
FIGURA 4.7 - INTERAÇÕES DE RAIOS GAMA COM A MATÉRIA	37
FIGURA 4.8 - JANELAS DE U, Th e K e OS “ <i>STRIPPING FACTORS</i> ”.....	38
FIGURA 5.1 - FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES DE PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	42
FIGURA 5.2 - MAPA DE ISOVALORES ORIGINAIS DOS CANAIS: A) CAMPO MAGNÉTICO TOTAL E B) POTÁSSIO	52
FIGURA 5.3 - MAPA DE ISOVALORES FILTRADOS PARA OS CANAIS: A) CAMPO MAGNÉTICO TOTAL E B) POTÁSSIO	52
FIGURA 6.1 - MODELO NUMÉRICO DO TERRENO (MNT) TRIDIMENSIONAL DA ÁREA DO PROJETO	59
FIGURA 6.2 - IMAGEM DO RELEVO OBTIDA ATRAVÉS DO SOMBREAMENTO ARTIFICIAL DO MNT.....	60
FIGURA 6.3 - PERFIL TOPOGRÁFICO NOS SUBDOMÍNIOS GEOMORFOLÓGICOS NA REGIÃO DE QUITÉRIA - VÁRZEA DO CAPIVARITA, RS.....	62

FIGURA 6.4 - BANDA TM 4 ORIGINAL	64
FIGURA 6.5 - HISTOGRAMA DA DISTRIBUIÇÃO DOS DN'S DA BANDA 4 ORIGINAL E COM <i>STRETCH</i> LINEAR	64
FIGURA 6.6 - BANDA TM 5 ORIGINAL.....	65
FIGURA 6.7 - HISTOGRAMA DA DISTRIBUIÇÃO DOS DN'S DA BANDA 5 ORIGINAL E COM <i>STRETCH</i> LINEAR.....	65
FIGURA 6.8 - COMPOSIÇÃO COLORIDA BGR 245	68
FIGURA 6.9 - COMPOSIÇÃO COLORIDA RGB 2/4*7, 5/7*3 E 5/3*7.....	70
FIGURA 6.10 - COMPOSIÇÃO COLORIDA RGB 5/3*7, 5/7*3 E 2/4*7	71
FIGURA 6.11 - PRIMEIRA COMPONENTE DA DECORRELAÇÃO DAS BANDAS 347 EM TONS DE CINZA.....	72
FIGURA 6.12 - IMAGEM MATIZ ORIGINADA A PARTIR DA TRANSFORMAÇÃO IHS	73
FIGURA 6.13 - MATRIZES DE PESOS PARA FILTROS DE CONVOLUÇÃO MULTIDIRECIONAIS A) 5x5; B) 7x7	75
FIGURA 6.14 - BANDA TM 4 COM REALCE DE ESTRUTURAS DIRECIONAIS ATRAVÉS DE FILTRAGEM	76
FIGURA 6.15 - DIAGRAMAS DE ROSETA DOS LINEAMENTOS PARA A ÁREA DE ESTUDO.....	78
FIGURA 6.16 - IMAGEM COLORIDA DE INTENSIDADE DE CAMPO TOTAL DA ÁREA	81
FIGURA 6.17 - IMAGEM DE RELEVO MAGNÉTICO COM SOMBREAMENTO ARTIFICIAL.....	82
FIGURA 6.18 - IMAGEM DE RELEVO MAGNÉTICO COM SOMBREAMENTO ARTIFICIAL OBTIDA A PARTIR DA FILTRAGEM COM A PRIMEIRA DERIVADA.....	83
FIGURA 6.19 - IMAGEM COLORIDA DA RADIAÇÃO GAMA TOTAL - CONTAGEM TOTAL (CT).....	86
FIGURA 6.20 - IMAGEM MONOCROMÁTICA DO RELEVO RADIOMÉTRICO DE CT.....	86
FIGURA 6.21 - IMAGEM COLORIDA DO RADIOELEMENTO K	88
FIGURA 6.22 - IMAGEM MONOCROMÁTICA DO RELEVO RADIOMÉTRICO DO RADIOELEMENTO K.....	88
FIGURA 6.23 - IMAGEM COLORIDA DO RADIOELEMENTO TH.....	90
FIGURA 6.24 - IMAGEM MONOCROMÁTICA DO RELEVO RADIOMÉTRICO DO RADIOELEMENTO TH.....	90
FIGURA 6.25 - IMAGEM COLORIDA DO RADIOELEMENTO U.....	92

FIGURA 6.26 - IMAGEM MONOCROMÁTICA DO RELEVO RADIOMÉTRICO DO RADIOELEMENTO U	92
FIGURA 6.27 - IMAGENS COLORIDAS DE RAZÃO RADIOMÉTRICA A) RAZÃO Th/K; B) RELEVO RADIOMÉTRICO Th/K.....	94
FIGURA 6.28 - IMAGENS COLORIDAS DE RAZÃO RADIOMÉTRICA A) RAZÃO U/K; B) RELEVO RADIOMÉTRICO U/K	94
FIGURA 6.29 - IMAGENS COLORIDAS DE RAZÃO RADIOMÉTRICA A) RAZÃO U/Th; B) RELEVO U/Th	95
FIGURA 6.30 - IMAGEM INTEGRADA DA BANDA TM 4 COM O CANAL MAGNETOMETRIA VIA TRANSFORMAÇÃO IHS	100
FIGURA 6.31 - IMAGEM INTEGRADA DA BANDA TM 4 COM IMAGEM GAMAESPECTROMÉTRICA A) TM4 x CT; B) TM4 x K.....	102
FIGURA 6.32 - IMAGEM INTEGRADA DA BANDA TM 4 COM A IMAGEM GAMAESPECTROMÉTRICA A) TM4 x Th; B) TM4 x U	103

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1 - MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO	118
ANEXO 2 - MAPA DE ANOMALIAS GEOFÍSICAS NA ÁREA DE ESTUDO.....	119
ANEXO 3 - TABELA DE ANÁLISES QUÍMICAS	120

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

O desenvolvimento nas últimas décadas de poderosos programas de processamento de imagens digitais e de georreferenciamento de dados estabeleceu um novo conceito na pesquisa geológica básica, no que refere-se à extração, manipulação e análise de informações integradas, provenientes das diferentes áreas das geociências.

Nesta dissertação, demonstra-se que a utilização de produtos de sensoriamento remoto, em conjunto com dados geológicos, cartográficos e aerogeofísicos, integrados via Sistemas de Informações Geográficas (SIG), permitem a confecção de imagens e mapas temáticos, os quais, possibilitam por exemplo, definir domínios geomorfológicos, unidades lito-estruturais e padrões de distribuição de elementos radiogênicos em superfície.

Para este propósito, foram utilizadas imagens digitais do sensor *Thematic Mapper* do satélite LANDSAT - 5, correspondentes às bandas 1, 2, 3, 4, 5, e 7; imagens geradas a partir de dados geofísicos de aerogamaespectrometria, canais K, U, Th e CT, equivalentes aos radioisótopos de potássio, urânio e tório, e contagem de radiação total; imagens formadas a partir de dados geofísicos de magnetometria, correspondentes à intensidade de campo magnético total; e imagens de relevo, confeccionadas através de Modelo Numérico do Terreno e sombreamento artificial.

1.2. Objetivos

O presente estudo teve como objetivo principal, integrar dados digitais de diferentes sensores para verificar suas potencialidades na identificação de características litológico-estrutural de uma área-teste localizada na região de Quitéria - Várzea do Capivarita (RS).

As atividades desenvolvidas nas diferentes etapas desse trabalho, visaram:

- (1) Analisar individualmente e de forma conjunta os produtos de sensoriamento remoto obtidos, a fim de avaliar sua aplicabilidade em mapeamento geológico básico;
- (2) Testar técnicas de processamento digital de imagens e de integração de dados digitais no reconhecimento de tipos de rochas, feições estruturais, feições de relevo e alvos para prospecção mineral na área selecionada.

1.3. Etapas de Trabalho

Esta pesquisa foi estruturada com base na metodologia de integração de dados de diferentes formatos, utilizando-se de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento.

O propósito básico da fusão de dados é o aprimoramento da qualidade visual do produto final, para análise qualitativa e/ou quantitativa. Eliason *et al.* (1983) descreveram como etapas principais no processo de combinação de dados geológicos, geofísicos, geoquímicos, entre outros, com imagens de satélite, os seguintes procedimentos:

† Formação de uma base de dados, incluindo as transformações da estrutura vetorial para *raster*, através da geração de grades regulares, interpolações e obtenção das imagens;

† Correção geométrica das imagens de satélite e georreferenciamento dos dados, e;

† Realce, integração e análise dos produtos gerados.

O pré-requisito para este procedimento é a compatibilização do formato de apresentação dos dados, ou seja, é necessário que os dados estejam na forma digital, para que possam ser analisados e interpretados conjuntamente.

O trabalho, aqui desenvolvido, subdividiu-se em etapas de campo e laboratório representadas no fluxograma geral de trabalho (Fig. 1.1).

As visitas ao campo foram realizadas com o objetivo principal de reconhecimento dos aspectos geomorfológicos, fisiográficos e geológicos-estruturais da área.

As etapas de laboratório compreenderam diversas atividades, desde a revisão bibliográfica e a obtenção dos dados, passando pelo pré-processamento, processamento e integração dos dados digitais, até a fase final de discussão dos resultados e editoração do trabalho.

1.4. Natureza dos Dados e Programas Utilizados

Foram utilizadas imagens de satélite no formato digital pertencentes à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), correspondendo às bandas espectrais 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do sensor TM/LANDSAT-5, órbita-ponto WRS 221.81, quadrante C, data de passagem: 10/12/1986, com baixa incidência de nuvens.

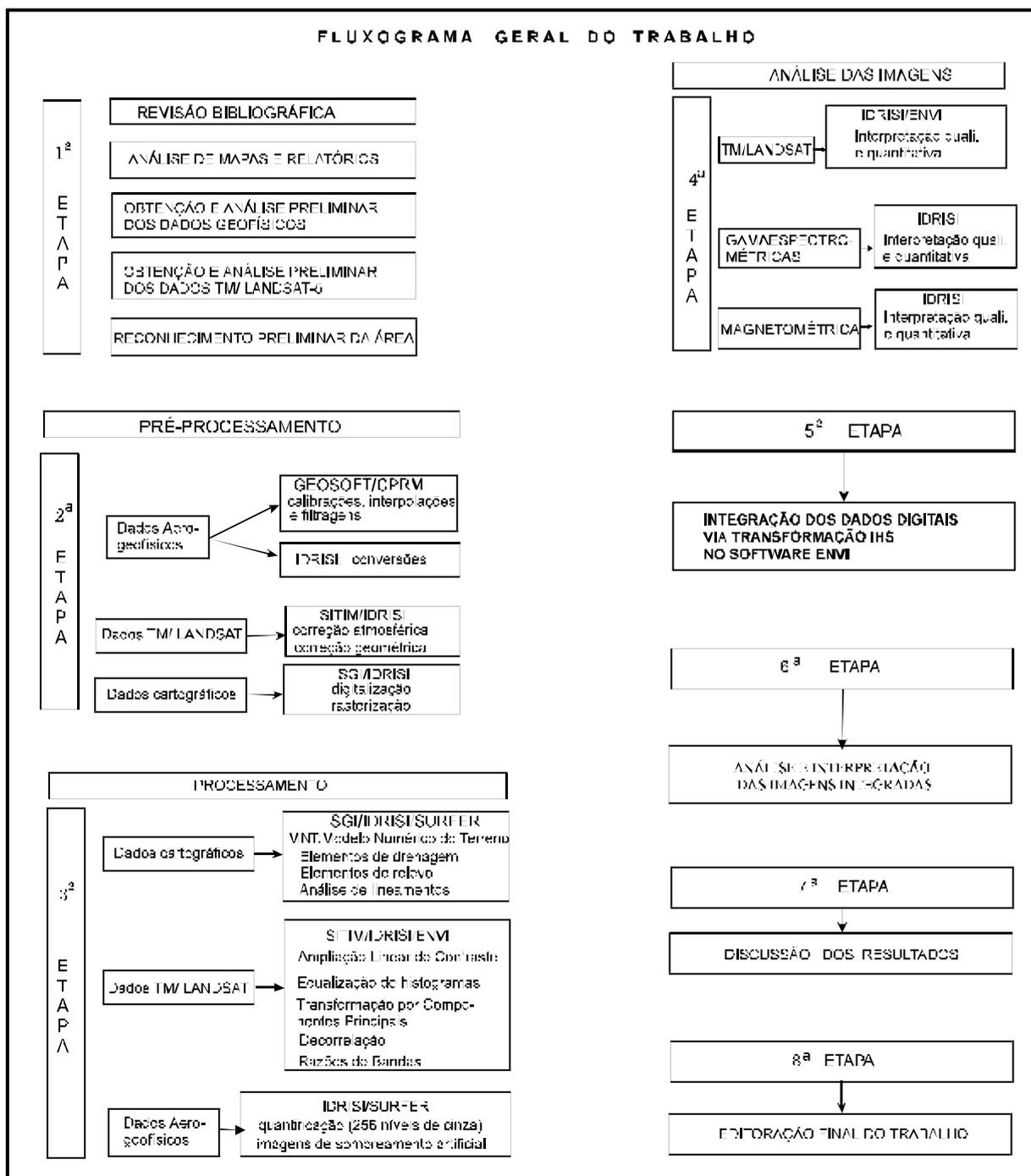


Figura 1.1 - Fluxograma geral das atividades desenvolvidas nesta dissertação.

Os dados aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria) utilizados na elaboração das imagens geofísicas, foram cedidos pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM), Superintendência Regional de Porto Alegre.

A aquisição dos registros geofísicos na região Sul do Brasil foi realizada através do Projeto Geofísico Brasil - Canadá (PGBC), executado na década de setenta, através do convênio CPRM/DNPM e o *Geological Survey Canada* (GSC).

Cerca de dois terços (2/3) dos registros geofísicos sobre a área de estudo pertencem ao Projeto Extremo Sudeste do Brasil, executado entre fevereiro e abril de 1978. Os dados restantes foram adquiridos pelo Projeto Aerogeofísico Camaquã entre junho de 1972 e maio de 1973.

Os resultados finais do PGBC encontram-se nos textos dos Relatórios Técnicos da CPRM, em conjunto com perfis integrados geológicos-geofísicos, mapas de contorno de intensidade magnética e mapas de contorno gamaespectrométricos nas escalas: 1:100.000 e 1:250.000.

No presente trabalho, foram processados dados gamaespectrométricos originais, correspondentes aos canais K (Potássio), U (Urânio), Th (Tório), e CT (Contagem Total) tomados em c.p.s (contagem por segundo), e dados de aeromagnetometria de intensidade do campo magnético total, em nanotesla (n?).

As especificações das características técnicas dos aerolevantamentos e os principais equipamentos utilizados encontram-se na Tabela 1.1.

Para o processamento e análise das imagens digitais foram utilizados os seguintes programas de tratamento de imagens: SITIM 150 (Sistema de Tratamento de Imagens - INPE); o *Sistema Idrisi de Software*, da Clark University (USA); e o *software* ENVI.

Os programas de geoprocessamento utilizados foram: SGI 150 e SGI 340 (Sistema Geográfico de Informações - INPE) e o *software Idrisi*.

No pré-processamento e processamento dos dados geofísicos foi utilizado o *software* GEOSOFT (1986) pertencente a CPRM/Porto Alegre; o *software* Idrisi; o *software* Surfer 5.01 da Golden Software, Inc.; e o programa *qbasic* da Microsoft Office.

Os materiais de apoio incluíram, entre outros: fotografias aéreas na escala 1:25.000 (UFRGS); mapa geológico na escala 1: 60.000 (UFRGS/88); cartas topográficas 1:50.000 do Serviço Geográfico do Exército do Brasil (1979): Folha Várzea do Capivarita (SH.22-Y-B-I-3) e Folha Quitéria (SH.22-Y-B-I-4).

1.5. Seleção e Localização da Área de Estudo

A área de estudo foi selecionada, tendo em vista a variabilidade de tipos de rochas, disponibilidade de imagens de satélite e de dados aerogeofísicos e, também, pelo grau de conhecimento geológico obtido através de mapeamentos sistemáticos, o que favorece a correlação litológica e estrutural com os dados de sensoriamento remoto e de geofísica.

Capítulo 1 - Introdução

Tabela 1.1 -Especificações técnicas dos aerolevantamentos geofísicos executados no RS.
Fonte: Texas Instruments, Inc. (1973) e Anjos & Mourão (1987).

Características dos aerolevantamentos	Nome do Projeto	
	Aerogeofísico Camaquã	Extremo Sudeste do Brasil
Empresa executora	Texas Instruments, Inc.	LASA Engenharia e Prospecção S.A.
Data de execução	06/1972 a 05/1973	02/1978 a 04/1978
Área de abrangência	33.906,19 km ²	41.000 km ²
Altura de voo	125m + ou - 30%	150m + ou - 10%
Velocidade média	193 km/h	220 km/h + ou - 10%
Direção das linhas de voo	N45W	N-S
Espaçamento das linhas de voo	1000 metros	1000 metros
Direção das linhas de controle	NE-SW	E-W
Espaçamento das linhas de controle	18.000 metros	10.000 metros
Sistema de navegação	Visual controlada por mapas de vôos obtidos através de mosaicos fotográficos, altura controlada por radaraltímetros.	
Aeromagnetômetro	Geometric modelo G-803, com precisão de 1 gamma para amostragem de 1s	
Aerogamaespectrômetro	GRAMS II	Exploranium modelo DIGRS 3001, com cristais detectores de NaI (TI)
Intervalo de amostragem	2.0 segundos	1.0 segundo

A área de estudo localiza-se na região de Quitéria - Várzea do Capivarita próximo à cidade de Encruzilhada do Sul (RS), distando cerca de 125 km de Porto Alegre na direção sudoeste.

As coordenadas geográficas limites da área são: 30° 15' 00" S - 30° 30' 00" S e 52° 05' 00" W - 52° 22' 30" W (Fig.1.2).

O acesso pode ser feito partindo-se de Porto Alegre na direção oeste, pela rodovia federal BR-290, percorrendo cerca de 118,0 km até a cidade de Pantano Grande. A partir do entroncamento na rodovia, toma-se a direção sul, rumo à cidade de Encruzilhada do Sul, pela Rodovia Estadual RS-471, percorrendo-se cerca de 7,0 km até o início da área de estudo.

A área é cortada pela rodovia RS-471, a partir da qual, se acessam as estradas vicinais que levam às diferentes localidades desse projeto.

CAPÍTULO 2 - ASPECTOS FISIAGRÁFICOS DA REGIÃO

2.1. Relevo

As formas do relevo da área de estudo estão inseridas na zona de transição da província geomorfológica conhecida como Depressão Periférica, na parte central do Estado, para a província geomorfológica denominada de Escudo Sul-rio-grandense, na porção sul (Fig. 1.2).

O enquadramento do relevo nesta região, conforme as proposições de Ab' Saber (1969) e do Projeto RADAMBRASIL (IBGE, 1986) é representado na Tabela 2.1.

A Depressão Periférica, limita-se a norte com o Planalto das Araucárias, a sul com o Planalto Sul-rio-grandense ou Escudo Sul-rio-grandense, a este com a Planície Costeira Interna, e a oeste com o Planalto da Campanha.

Tabela 2.1 - Quadro demonstrativo das denominações comuns para o relevo na área de estudo.

Cotas	Ab'Saber (1969)	Projeto RADAMBRASIL (1986)
> 450 metros	Superfície de Caçapava do Sul	Unidade Geomorfológica Planaltos Residuais Canguçu-Caçapava do Sul (Região Geomorfológica Escudo Sul-Rio-Grandense)
320 - 300 metros	Superfície do Cerro da Cadeia	Unidade Geomorfológica Planalto Rebaixado Marginal (Região Geomorfológica Escudo Sul-Rio-Grandense)
220 - 100 metros	Superfície da Campanha	
200 - < 100 metros	Depressão Periférica	Unidade Geomorfológica Depressão do Rio Jacuí (Região Geomorfológica Depressão Central Gaúcha)

A Depressão Periférica está presente na porção norte da área de estudo, constituindo-se por terrenos rebaixados esculpidos em rochas sedimentares paleozóicas, triássicas e jurássicas da Bacia do Paraná. As formas do relevo mais comuns são as colinas alongadas, regionalmente conhecidas como “coxilhas” (Fig. 2.1).

O Escudo Sul-rio-grandense dispõem-se de forma aproximadamente triangular, a partir do centro do estado para o sul. O relevo varia desde tipos intensamente dissecados, em forma de topo convexos e vales profundos, até fracamente dissecados em posição de topo, constituindo restos de superfícies pediplanas.



Figura 2.1 - Visão geral da morfologia na parte norte da área. Em primeiro plano, os terrenos rebaixados, na forma de colinas suavizadas, constituídas por rochas sedimentares, tendo ao fundo o relevo granítico (Granito Pitangueiras).

2.2. Clima

O clima da região é classificado como do tipo mesotérmico brando temperado, apresentando quatro estações climáticas bem definidas e precipitação pluviométrica homogênea. Os valores referentes à precipitação pluviométrica média anual, variam entre 1300 e 1500 mm. A temperatura média anual fica entre 16 e 18°C, sendo que durante os meses mais frios (julho e agosto) a temperatura pode cair a menos de 0°C, ocorrendo a formação de geadas.

2.3. Solos

Os solos da região são predominantemente Podzólicos Vermelho-Amarelos e Litólicos.

Nas áreas graníticas, predominam solos de natureza arenosa e coloração avermelhada, sendo comum a presença de material granular (saibro) e seixos de rocha granítica.

Sobre as rochas gnáissicas o solo exibe um perfil mais desenvolvido, mais espesso, com a predominância de constituintes siltico-argilosos nos paragnais e siltico-arenosos nos ortognais, sendo a coloração em geral acinzentada.

As zonas de cristas apresentam um solo muito pouco desenvolvido com seixos de quartzo leitoso e fragmentos de rocha de vários tamanhos.

Nas porções de rochas sedimentares ocorrem solos profundos, preferencialmente Podzólicos e secundariamente Brunizém, com Planossolos nos terraços e planícies aluviais/fluviais. A friabilidade desses solos favorece a ocorrência intensa de processos erosivos.

2.4. Vegetação

A cobertura vegetal na região, conforme mapeamento do Projeto RADAMBRASIL (IBGE, 1986), é constituída por dois tipos principais: Tipo campestre (Savana Arbórea Aberta, Parque e Gramíneo-Lenhosa) e do tipo floresta (Floresta Estacional Semidecidual).

Em campo e nas imagens de satélite, observou-se uma vegetação predominante do tipo rasteira, representada por gramíneas, e arbustiva de pequeno porte, regionalmente conhecida como "chircas". A vegetação de médio a grande porte localiza-se preferencialmente ao longo dos cursos d'água e em áreas reflorestadas.

2.5. Hidrografia

As bacias hidrográficas instaladas na área são denominadas na classificação global de endorréicas, onde as drenagens são internas e não possuem escoamento para o mar. Essas bacias são alimentadas por tributários de segunda e terceira ordem, que desagüam em dois rios principais, ao sul no rio Camaquã e ao norte no rio Jacuí.

Os padrões de drenagens exibidos pelos cursos d'água de menor ordem são do tipo subdendrítico a subparalelos, sendo estes provavelmente relacionados a um incipiente controle estrutural de direção NE e NW.

As drenagens de maior ordem exibem preferencialmente um padrão angular a subparalelo, controlado principalmente pelos padrões de fraturamento NE, NW e NS.

CAPÍTULO 3 - GEOTECTÔNICA E GEOLOGIA

3.1. Contexto Geotectônico

O arcabouço geotectônico do Estado do Rio Grande do Sul é constituído por cinco Províncias Litoestruturais, sendo três de cobertura plataformal fanerozóica (Bacias do Paraná, Pelotas e Santa Luzia), e duas de embasamento pré-Devoniano, representadas pelo Cráton Rio de La Plata e Cinturão Dom Feliciano (Fragoso César *et al.* 1986).

A área de estudo está inserida no contexto geotectônico do Cinturão Dom Feliciano, abrangendo duas unidades litoestruturais maiores, o Batólito Encruzilhada do Sul a oeste, e o Batólito Pelotas na parte leste, sendo ambas separadas tectonicamente pela Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu.

O Cinturão Dom Feliciano é uma entidade geotectônica de idade brasiliana (Proterozóico Superior) resultante da convergência entre os Crátons Rio de La Plata e Kalahari (África), sendo caracterizado por diversas associações petroectônicas (Fernandes *et al.* 1992) (Fig 3.1).

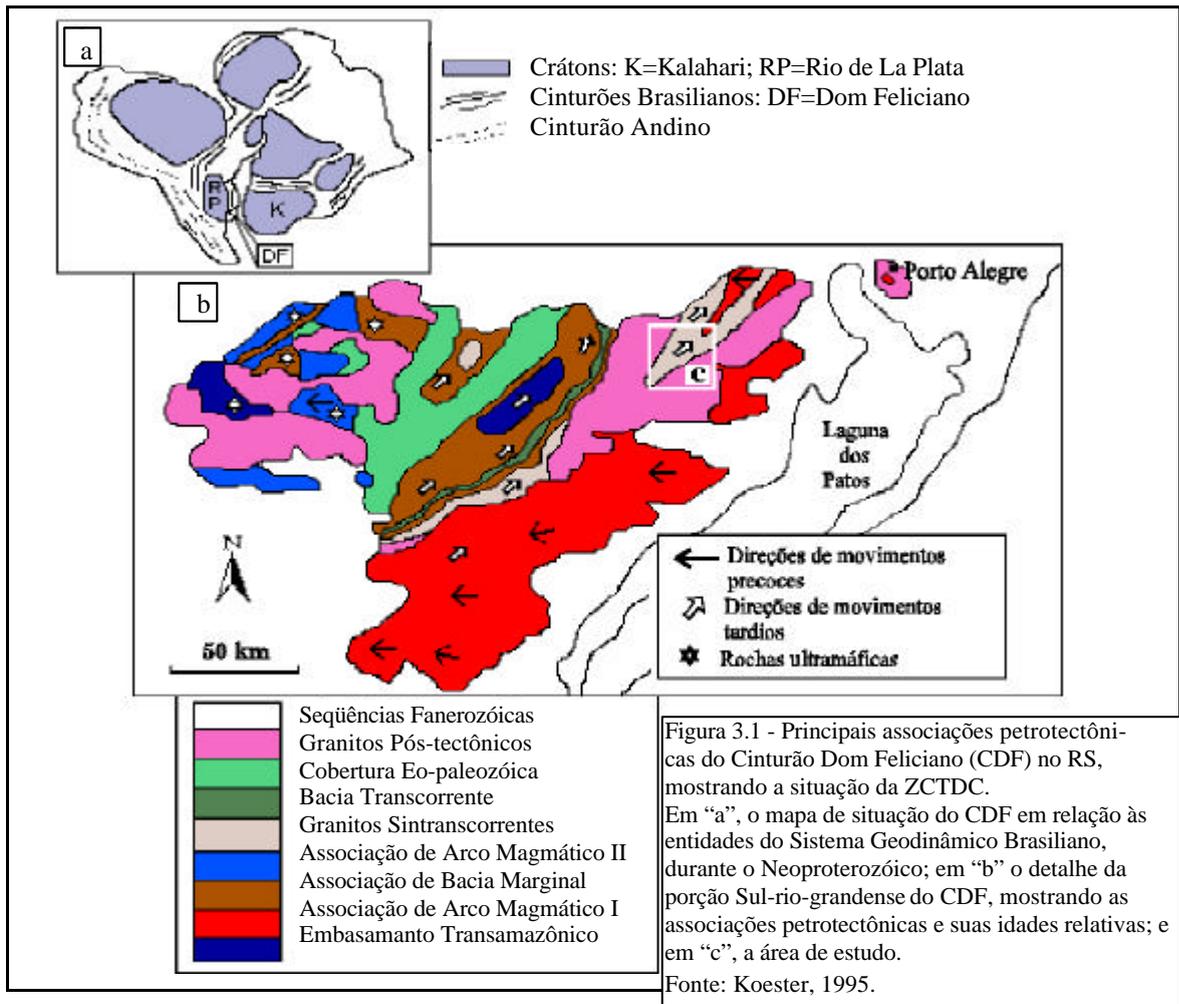
3.2. Geologia Regional

A geologia da região de Encruzilhada do Sul é constituída principalmente por rochas ígneas e metamórficas (cf. mapa geológico regional representado na Figura 3.2), formadas durante o Ciclo Orogênico Brasileiro no Escudo Sul-rio-grandense.

Sobre estas rochas atuaram dois regimes deformacionais e metamórficos distintos, denominados por Fernandes *et al.* (1988) de “D1” e “D2”. A deformação “D1” apresenta transporte tectônico de direção E-W, é a mais antiga e foi desenvolvida sob condições metamórficas de alto grau (anfíbolito superior). A deformação “D2” desenvolveu-se sob condições de baixo grau metamórfico (anfíbolito a xisto-verde), mostrando estruturas com orientação geral NE, truncando as estruturas “D1”.

Esses regimes deformacionais serão discutidos com maior detalhe no item Geologia Estrutural (Item 3.3).

As unidades litoestratigráficas, presentes na área de estudo, estão representadas no mapa geológico, no Anexo 1 e na coluna estratigráfica da Figura 3.3.



A unidade mais antiga é representada por uma seqüência de gnaisses pelíticos, cálcio-silicatados e quartzo-feldspáticos, lentes de mármore e quartzitos da Suíte Metamórfica Várzea do Capivarita (smVC), metamorfizados em condições de fácies anfibolito superior. Essas rochas afloram na área, como "roof-pendants" e xenólitos no Metanortosito Capivarita (mC), igualmente deformado e metamorfizado em alto grau (Fernandes *et al.* 1990) e xenólitos no Granito Pitangueiras (gP).

A trama de alta deformação exibida por estas rochas, mostra atitude sub-horizontal (subtraindo-se os efeitos de dobras tardias), com lineações de estiramento de direção predominante leste-oeste marcando a direção de transporte tectônico (*cf.* Fernandes *et al.* 1992).

Os gnaisses pelíticos essencialmente aluminosos são fortemente bandados, com granulação fina a média, variando composicionalmente desde andaluzita-sillimanita-biotita gnaisses até espinelio-cordierita-sillimanita-granada-biotita gnaisses.

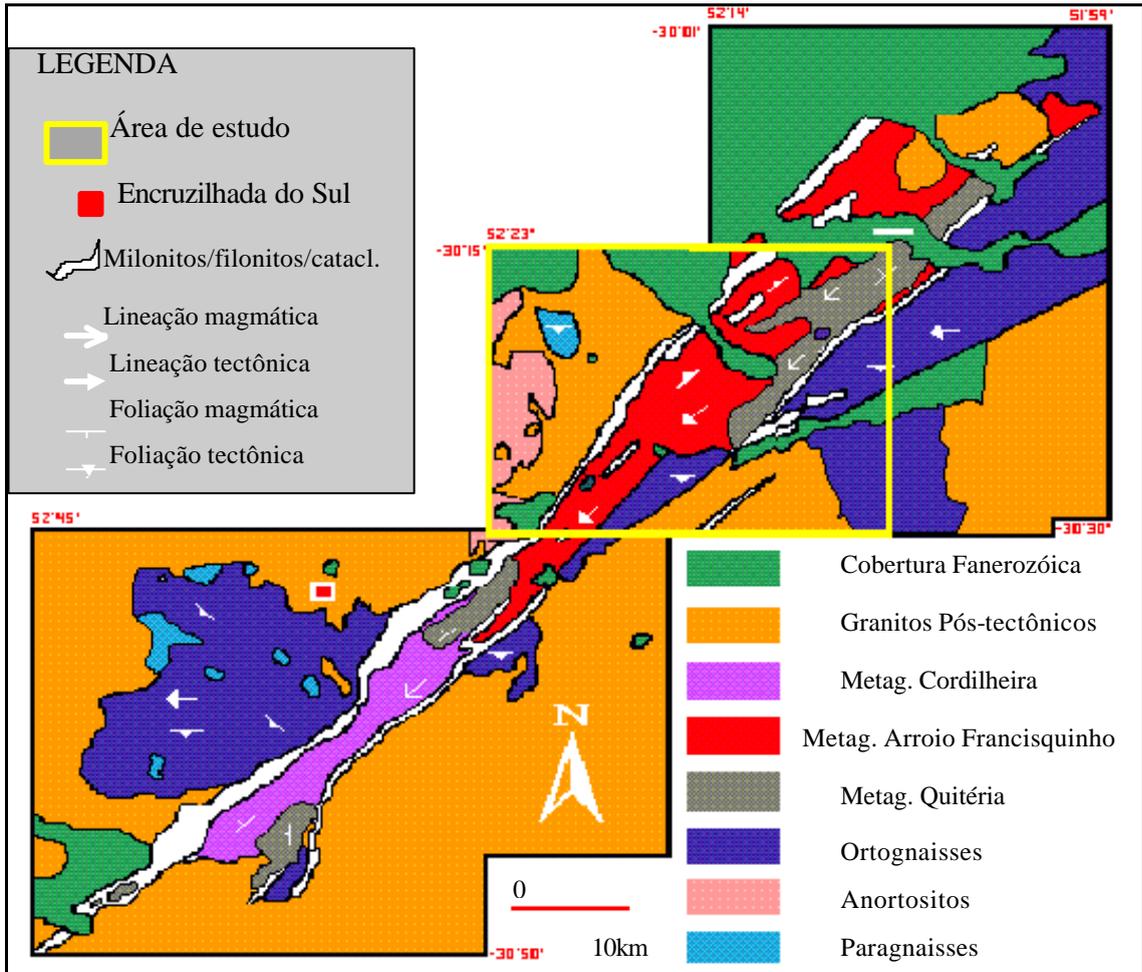


Figura 3.2 - Mapa Geológico da Região de Encruzilhada do Sul. Fonte: Koester (1995).

A mineralogia essencial destas rochas é constituída por quartzo, biotita, plagioclásio, silimanita e K-feldspato; como acessórios ocorre zircão, granada, óxido de ferro e opacos. Os minerais de alteração mais frequentes são a muscovita, clorita, epidoto e argilo-minerais.

Os gnaisses cálcio-silicatados apresentam uma textura granoblástica de quartzo e feldspatos e localmente uma orientação preferencial de plagioclásios, que juntamente com as bandas milimétricas de quartzo, marcam a foliação gnáissica. A mineralogia essencial é constituída por plagioclásio, quartzo, diopsídio e K-feldspato; como minerais acessórios ocorre granada, esfeno, epidoto e apatita. Os minerais secundários mais comuns são a actinolita, clorita, carbonato e argilo-minerais.

Os gnaisses quartzo-feldspáticos mostram uma alternância de bandas finas (0,1 a 1 mm) e grossas (1 a 6 mm) de composição quartzo-feldspática, intercaladas com bandas micáceas, com textura lepidoblástica, marcando a foliação gnáissica. Composicionalmente, variam desde biotita-feldspato-plagioclásio-quartzto gnaisses até anfibólio-biotita-feldspato-

plagioclásio-quartzo gnaisses. Os principais minerais acessórios encontrados nesses gnaisses, são: granada, zircão e apatita.

O metanortosito Capivarita (mC) constitui-se de anortositos maciços de textura equigranular grossa a pegmatóide, localizadamente bandados (intercalações de anfibolitos). As melhores exposições do mC encontram-se no Passo do Moinho e ao longo do Arroio Braço do Capivari, próximo ao Passo do Pessegueiro.

Na seqüência estratigráfica ocorrem, respectivamente: o Complexo Gnáissico Arroio dos Ratos (cgAR) e o Complexo Granítico-Gnáissico Pinheiro Machado (cgPM).

O cgAR é formado por rochas de composição granodiorítica a tonalítica com bandamento milimétrico (G1) contendo enclaves dioríticos de textura fina à média e xenólitos de paragneisses com bandamento (Sb) discordante do G1. Essa associação é cortada por veios de granitóides leucocráticos finos à médios (G2) e por sua vez intrudido por granitóides leucocráticos grossos e pegmatóides (G3) em volumes variáveis (Fernandes *et al.* 1990). Estas rochas foram metamorfisadas sob condições de alto grau e apresentam-se localizadamente milonitizadas.

As principais paragêneses minerais identificadas no cgAR, são as seguintes:

- 1) plagioclásio + ortoclásio/microclínio + biotita + granada + quartzo;
- 2) plagioclásio + ortoclásio/microclínio + biotita + granada + silimanita + quartzo + muscovita;
- 3) muscovita + epidoto + clorita.

As melhores exposições do cgAR encontram-se ao norte do Cerro dos Burros, onde em um perfil ao longo do Arroio dos Ratos, pode-se observar todos os tipos litológicos e sua variação deformacional. O cgPM ocorre na parte SE da área, próximo à cidade de Quitéria, sendo representado por metagranitóides monzograníticos porfiríticos. Essas rochas são inequigranulares médias a grossas, normalmente porfiríticas, mesocráticas cinza a cinza-escuro, com foliação magmática bem pronunciada, marcada pelo alinhamento dimensional e entelhamento de megacristais de K-feldspatos e “*schlierens*” máficos. Os acessórios comuns são a biotita cloritizada, epidoto, allanita apatita, zircão, esfeno e opacos.

As rochas gnáissicas apresentam-se truncadas pela Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu (ZCTDC) e granitóides geneticamente associados. Estes granitóides correspondem a monzogranitos a granodioritos cálcio-alcalinos alto-K (Metagranito Quitéria - mgQ) e granitos peraluminosos (Metagranito Arroio Fransisquinho - mgAF), que constituem corpos alongados segundo a direção NE-SW (Koester, 1995).

IDADE (M.a.)	ERA	PERÍODO	SUPERGRUPO	GRUPO	FORMAÇÃO	UNIDADE/FÁCIES		
1	Cenozóico	Quaternário	.....	.....	Depósitos Quaternários	Depósitos Aluvionares Depósitos Lacustres	
190	Mesozóico	Jurássico-Cretáceo	.....	São Bento	Serra Geral (Fsg)	"Sills" de diabásios	
250	P A L E O Z O I C O	P E R M I A N O	T U B A R Ã O	G U A T Ã	Palermo (Fp)	Marinho raso		
					Rio Bonito (Frb)	Praial Fluvial Deltáico Marinho raso		
280					Itararé (Pci)	----	Lacustre	
550		C A M B R I A N O	G R A N I T Ó I D E S	T a r d i P ós- T e c t ô n i c o s	Suíte Granítica Dom Feliciano (SGDF)	Riolitos Ana Dias	Riolitos	
						(rAD)	avermelhados	
590	G R A N I T Ó I D E S				T a r d i P ós- T e c t ô n i c o s	Suíte Intrusiva Encruzilhada do Sul (SIES)	Granito Serra do Herval (qSH)	sienogranitos equigranulares a porfiríticos, médios a grossos
							Granito Arroio Braço do Capivari (qABC)	sienogranitos perfiticos, equigranulares médio a grossos
							Granito Pitangueiras (qP)	monzogranito equigranular fino a porfirítico com foliação
630	P R O T E R O Z O I C O S U P E R I O R	P R É - C A M B R I A N O	G R A N I T Ó I D E S	Sin-Tectônicos	Metagranito Arroio Francisquinho (mqAF)	Sieno a monzogranitos leucocráticos equigranulares finos à médios		
670					Sin-D2	Metagranito Quitéria (mqQ)	Monzogranitos a granodioritos porfiríticos grosseiros com fenocristais de k-feldspatos	
						Complexo Granito-Gnáissico Pinheiro Machado (cgPM)	Monzogranitos porfiríticos, inequigranulares médio a grosseiros com feno de K-feldspatos	
720						Complexo Gnáissico Arroio dos Ratos (cgAR)	Ortognaisses tonalíticos a granodioríticos	
775							Metanortosito Anortositos maciços, equigranulares grosseiros a pegmatóides	
?							Capivarita (mC)	Gnaisses pelíticos e quartzo-feldspáticos
?							Suíte Metamórfica Várzea do Capivarita (smVC)	

Figura 3.3 - Coluna Estratigráfica da área de estudo.

Os granitóides mais antigos (mgQ), ocorrem como “*roof-pendants*” e xenólitos no interior dos granitos peraluminosos (mgAF), que constituem o maior volume de magma posicionado ao longo da zona de cisalhamento, na área estudada.

O mgQ é constituído de biotita monzogranitos e subordinadamente granodioritos, mostrando uma textura porfírica com matriz de granulação média a grossa e uma pronunciada foliação de fluxo magmático, marcada pela orientação de megacristais de K-feldspatos (2,0 a 10,0 cm).

O mgAF corresponde à uma associação de sieno e monzogranitos leucocráticos a duas micas, com textura equigranular fina a média (0,2 a 0,5 mm), apresentando uma foliação gerada no estado sólido, com direção NE-SW e bem desenvolvida. A foliação milonítica é marcada pela orientação de muscovita, “*ribbons*” de quartzo e feldspatos estirados.

Nas zonas de maior deformação dúctil do estágio final, o mgAF apresenta aspectos texturais/estruturais típicos de ultramilonitos e milonitos, caracterizados pela presença de um bandamento pronunciado com intercalação de bandas ricas em micas e bandas quartzosas.

A ZCTDC e granitóides sintectônicos associados são truncados por granitos (monzo a pertita-sienogranitos) sub-alcalinios, incluídos na Suíte Intrusiva Encruzilhada do Sul (SIES), e sienogranitos e riolitos da Suíte Granítica Dom Feliciano (SGDF), designados de ‘Granitos Tardi a Pós-tectônicos’.

A SIES é representada na área de estudo pelo Granito Pitangueiras (gP) e Granito Arroio Braço do Capivari (gABC). O gP ocorre como um corpo alongado NE, controlado por falhamentos e zonas de cisalhamento, sendo composicionalmente formado por monzo a granodioritos, com biotita como mineral varietal, e apatita, zircão, esfeno e opacos, como acessórios. Localizadamente, o gP mostra ultramilonitos e filonitos em zonas de cisalhamento de espessura métrica, caracterizando-os como intrusões tardi-tectônicas em relação à movimentação das zonas de transcorrência.

O gABC, ocorre como “stocks” tardios de forma poligonal e intrusivos no gP e mC, correspondendo a pertita sienogranitos com anfibólio e biotita.

A SGDF é constituída por uma série de plútons, estruturalmente alongados na direção NE, sendo representado na área pelo Granito Serra do Herval (gSH) e Riolitos Ana Dias (rAD).

O gSH corresponde petrograficamente a sienogranitos com biotita, e como acessórios: allanita, zircão e esfeno. Essas rochas são caracterizadas como granitos de epizona com bordas de resfriamento estreitas (máximo de 100m) e cavidades miarolíticas, posicionadas durante a

reativação rúptil de algumas zonas de cisalhamento **NE**, como indicado pela natureza retilínea de parte dos seus contatos e geometria das intrusões maiores (corpos alongados **NE-SW**) quando observados em escala 1:500.000 e menores (*cf.* Fernandes *et al* 1995a).

O Granito Serra do Herval, destaca-se na topografia por constituir morros elevados, cortados por extensas cristas de rochas cataclásticas, conforme demonstra a Figura 3.4.

Os Riolitos Ana Dias, localizados na parte leste da área, correspondem à fácies subvulcânica da SGDF, apresentando biotita como varietal e, apatita e zircão como acessórios.

As intrusões dessas rochas foram consideradas por Fernandes *et al.* (1990), como posteriores aos períodos de movimentação das zonas de transcorrência, visto que os mesmos não apresentam evidências da deformação dúctil pervasiva da fácies xisto-verde, responsável pela formação dos filonitos, que são rochas que apresentam feições estruturais típicas de zonas de cisalhamento transcorrentes.

As unidades mais jovens ocorrentes na área, incluem ‘morros testemunhos’ das rochas sedimentares paleozóicas da Bacia do Paraná (Grupo Itararé - Pci, Formação Rio Bonito - Frb, e Formação Palermo - Fp), cuja deposição e preservação foi parcialmente controlada pelas reativações das falhas transcorrentes **NE**.

As características de deposição e preservação das rochas sedimentares é indicado por mapas de isópacas, paleocorrentes e padrão de afloramento, pois as exposição dos mesmos mostram-se alinhadas segundo a direção **NE** na escala regional (*cf.* Fernandes *et al.* 1993).

O Grupo Itararé, indiviso, é constituído por para-conglomerados e orto-conglomerados, arenitos grossos, ritmitos, pelitos escuros e arenitos finos com estratificação plano-paralela, estratificação ondulada e “*climbing ripples*”.

A Formação Rio Bonito é constituída na porção basal por arenitos grossos a finos, com estratificação cruzada e pelitos em ciclos granodecrescentes. Na porção média-superior, ocorrem folhelhos carbonosos, carvões, pelitos e arenitos finos.

A Figura 3.5, ilustra a manutenção de morros sedimentares da Formação Rio Bonito, na forma de “*mesa*”, tendo a base constituída por rochas miloníticas. Esta formação ocorre na porção SW da área, no Cerro Grande, a sul de Várzea do Capivarita.

A Formação Palermo é representada por arenitos finos bem selecionados, arenitos médios e grossos com ondulações truncadas; na parte mais superior, ocorrem pelitos e arenitos finos com estratificação lenticular, “*flaser*”, “*wavy*” e bioturbações.

Intrusivos na Formação Rio Bonito ocorrem *sills* de diabásio (basalto andesítico) da Formação Serra Geral (Jurássico Superior/Cretáceo Inferior), apresentando geralmente um sistema de disjunções colunares bem desenvolvidas.



Figura 3.4 - Em primeiro plano os afloramentos rochosos do gSH; em posição intermediária o relevo rebaixado dos gnaisses do cgAR; e ao fundo, as cristas de quartzo-milonitos no Rincão dos Amigos (UTM 390500W e 663600N).



Figura 3.5 - Ao fundo, morro em forma de mesa, constituído por intercalações de rochas areníticas, pelitos e folhelhos carbonosos da Formação Rio Bonito, na parte SW da área (Cerro Grande - UTM 370000W e 6627500N).

3.3. Geologia Estrutural

Na região de Quitéria-Várzea do Capivarita foram individualizados dois regimes principais de deformação distintos, denominados “D1” e “D2”. Essas deformações afetaram as rochas da área, originando estruturas típicas para cada evento deformacional.

As estruturas dúcteis assim originadas foram afetadas por uma série de dobras abertas, com “*trends*” regulares, que controlam o padrão de afloramento das rochas. Estas estruturas, posteriormente, sofreram deformações por sistemas de fraturas em várias direções.

A deformação “D1” afetou a smVC, o cgAR, e o mC. As estruturas formadas durante a “D1” são truncadas por milonitos e filonitos, e também pelo posicionamento de granitóides mais jovens (mgQ e mgAF) controlados pelas estruturas “D2” (falhas transcorrentes).

No regime deformacional “D1”, foi produzida uma fábrica “L-S” com lineação de baixo ângulo de caimento, com “*trend*” geral E-W. Essa direção principal de transporte tectônico foi interpretada como produzida por um evento colisional. A análise dos indicadores cinemáticos presentes em espessas zonas de milonitos originadas ao final desta deformação, sugere movimento de topo de seqüência para leste.

O segundo regime deformacional “D2”, atingiu todas as unidades Pré-Cambrianas da área, desenvolvendo falhas transcorrentes de orientação geral NE e sentido levógiro de movimento.

Os filonitos e milonitos, originados por deformação progressiva das unidades pré-existentes e dos granitóides sin-cinemáticos, mostram dobras intrafoliais e apertadas com “*trend*” NE e eixos com caimento variável, passando a sub-horizontal nas zonas de alto “*strain*”.

A natureza transcorrente destas zonas é indicado não apenas pela estrutura interna e traçado retilíneo da foliação associada às suas estruturas tardias (faixas de milonitos), em escala regional, mas também pela atitude sub-horizontal da lineação de estiramento, freqüentemente marcada pelo alongamento de fenocristais e porfiroclastos de feldspatos e “*rods*” de quartzo.

A fase de deformação precoce da ZCTDC é registrada pela trama magmática dos granitóides sin-trancorrência (mgQ), caracterizando-se por uma maior homogeneidade deformacional, gerando uma foliação “S2” e uma lineação “L2”, produzida por fluxo magmático.

O estágio de deformação de baixa temperatura é caracterizado pelo intenso desenvolvimento de filonitos e milonitos que materializam as principais zonas de cisalhamento em ambos os granitóides (mgQ e mgAF).

A tectônica frágil é caracterizada por falhas e fraturas com direções variadas e desenvolvimento de rochas cataclásticas com direção NE. Essas estruturas são resultantes de reativações em zonas de cisalhamento, sob condições rúpteis, e afetaram todas unidades litoestratigráficas individualizadas na área, predominando as direções NE-SW e N-S, observadas tanto em meso, quanto em macro-escala.

3.4 Caracterização Tectônica, Cinemática e Evolutiva da ZCTDC

A Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu (ZCTDC) faz parte de um sistema de falhas intracontinentais e transcrustais tardi-orogênicas, que ocorre paralelo ao Cinturão Dom Feliciano, considerado a continuidade do Cinturão Kaoko (Sudoeste da África), conforme mostrado na Figura 3.1.

Diversos autores tem caracterizado a ZCTDC no que diz respeito às suas características geotectônicas, magmáticas e metamórficas durante o Neoproterozóico, entre estes destacam-se Jost *et al.* (1984), Fernandes *et al.* (1993), Koester *et al.* (1995), Costa *et al.* (1995), Fernandes *et al.* (1995a).

Discussões a respeito das sucessivas reativações das zonas de cisalhamento transcorrente do sistema Dorsal de Canguçu, durante o Fanerozóico, são ainda bastante recentes. Estes estudos baseiam-se principalmente em evidências indiretas, tais como: dados de proveniência (petrografia e litogeoquímica) e paleotectônicos, embasados por geocronologia das seqüências das bacias eo-paleozóicas do final do Ciclo Brasileiro; e, ainda, em critérios estratigráficos, como mapas de isópacas das unidades gonduânicas (Fernandes *et al.* 1995b).

A história evolutiva das unidades presentes na área do projeto e associadas à ZCTDC, estão intrinsecamente relacionadas às diversas fases de evolução do Cinturão Dom Feliciano no Escudo Sul-rio-grandense, desde o Pré-Cambriano até o Paleozóico.

No Cinturão Dom Feliciano a deformação longitudinal foi acomodada por zonas de cisalhamento transcorrentes e tangenciais, sob condições de temperatura típicas de um ambiente de crosta média. Dentre as principais razões para estas proposições destacam-se àquelas referidas por Fernandes *et al.* (1995a).

A partir de medições dos padrões das atitudes das foliações e lineações magmáticas dos granitóides porfiríticos (mgQ), e através da interpretação dos abundantes indicadores cinemáticos em filonitos e ultramilonitos, foi sugerida uma movimentação levógira de direção NE-SW para a ZCTDC, que condicionou o posicionamento de grandes massas de granitóides sin-transcorrência (Fernandes *et al.* 1990).

Dados geocronológicos de Koester *et al.* (1994), indicam uma idade de 672±22 Ma em Rb/Sr e rocha total para o metagranito cálcio-alcálico alto-K (mgQ), e uma idade em torno de 628±22 Ma em Rb/Sr-RT, para o metagranito peraluminoso (mgAF).

Segundo Fernandes *et al.* (1995a), o mgQ é derivado da cristalização fracionada de um magma basáltico original e assimilação de rochas crustais, enquanto o mgAF é originado, provavelmente da fusão parcial dos ortognaisses e rochas supracrustais.

Os filonitos e ultramilonitos desenvolvidos sobre este granitóides são indicativos da alta magnitude da deformação, e interpretadas como o registro do último episódio de deformação dúctil do Ciclo Brasileiro, uma vez que ocorrem em monzogranitos tardi-transcorrentes, com idades em torno de 582±17 Ma, sendo ainda truncadas por granitos pós-tectônicos, com idades em torno de 570±13 Ma (Rb/Sr-RT), conforme discutido em Soliani Jr. (1986) e Frantz & Fernandes (1994).

Estudos preliminares de modelagem gravimétrica “3D” da ZCTDC (Costa *et al.* 1995a), mostram uma geometria de “estrutura-em-flor” positiva, característica de zonas de movimentação transcorrente de alto ângulo. Esta forma é marcada por uma anomalia gravimétrica negativa com cerca de 25 km de profundidade, refletindo principalmente o volume dos granitos peraluminosos em subsuperfície.

3.5. Geologia Econômica

As ocorrências de importância econômica conhecidas na região, referem-se principalmente a lentes de mármore encaixadas segundo à foliação regional NW-NE da Suíte Metamórfica Várzea do Capivarita (Fig. 3.6), ou como xenólitos no Granito Pitangueiras; e, algumas jazidas de caolim no Metanortosito Capivarita, ou em xenólitos do Metanortosito Capivarita nos granitos da SIES.

Secundariamente, a região apresenta boas potencialidades à extração de rochas ornamentais, principalmente nos granitos tardi a pós-tectônicos que podem ser utilizados na construção civil, como revestimento.

Estes granitos são atualmente explorados na forma de blocos, em diversas frentes de lavra na região, e as pedras de menor qualidade, ou menos nobres, são utilizadas como alicerce, moirões e brita.

As principais ocorrências de mármore situam-se nas localidades de Aroeira e Várzea do Capivarita. Em Aroeira, os mármore ocorrem sob a forma de lentes com expressivas dimensões, acarretando na existência de grandes pedreiras.

Na localidade de Várzea do Capivarita, por outro lado, as pedreiras, apesar de em maior número, são pouco expressivas devido a pequena envergadura e as formas irregulares dos corpos de rocha calcária que lá ocorrem.

As jazidas de caulim localizam-se na região de Várzea do Capivarita, na porção oeste da área, e se desenvolveram através de processos de alteração supergênica sobre a rocha-mãe, o Metanortosito Capivarita (mC). Os depósitos de caulim ocorrem como corpos irregulares de dimensão e espessura variáveis, preferencialmente nos contatos entre o Granito Pitangueiras e o mC, ou isolados no interior do mC, formando bolsões alterados, que em algumas partes preservam a estrutura original da rocha anortosítica.

Outras potencialidades econômicas presentes na região são as argilas e areia quartzosas que podem ser utilizadas na construção civil. As areias representam depósitos aluviais quaternários, distribuindo-se ao longo dos arroios maiores. As argilas mais nobres são formadas a partir da alteração intempérica e/ou hidrotermal dos gnaisses pelíticos da smVC, depositadas em ambientes lacustres no Quaternário.



Figura 3.6 - Pedreiras de extração de rocha calcária formando lentes encaixadas (porções esbranquiçadas) nos paragneisses da Suíte Metamórfica Várzea do Capivarita, nas proximidades de Várzea do Capivarita.

CAPÍTULO 4 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto

4.1.1. Princípios

Sensoriamento Remoto (SR) é uma técnica de aquisição e análise das informações sobre as propriedades físico-químicas de objetos de interesse, ou fenômenos dinâmicos da superfície terrestre, com base nas interações da radiação eletromagnética com os alvos e o meio-ambiente (Fig. 4.1).

O processo de aquisição ou coleta de dados, compreende uma fonte de radiação eletromagnética (**REM**), normalmente o Sol, e um dispositivo eletro-óptico-mecânico, denominado sensor. O sistema sensor capta a **REM** na forma de níveis discretos de energia refletidos e/ou emitidos pelos alvos, de maneira seletiva em relação ao comprimento de onda. O registro energético é convertido em sinal elétrico pelos detectores e, posteriormente, amplificados por circuitos eletrônicos para serem transmitidos em uma determinada frequência às estações receptoras em Terra.

Nas estações, os sinais são gravados digitalmente em fitas magnéticas de alta densidade (HDT's) e posteriormente formatadas em fitas compatíveis ao computador (CCT's) ou CD (*Compact Disk*) nos laboratórios de processamento e produção de imagens.

O produto gerado, do qual podemos extrair as informações, pode ser de dois tipos: o tipo fotográfico (papel preto e branco ou colorido) e o tipo digital. A interpretação dos dados pode ser feita visualmente, ou através de rotinas computacionais que permitem por exemplo, mediante a classificações automáticas, supervisionadas ou não, elaborar mapas temáticos.

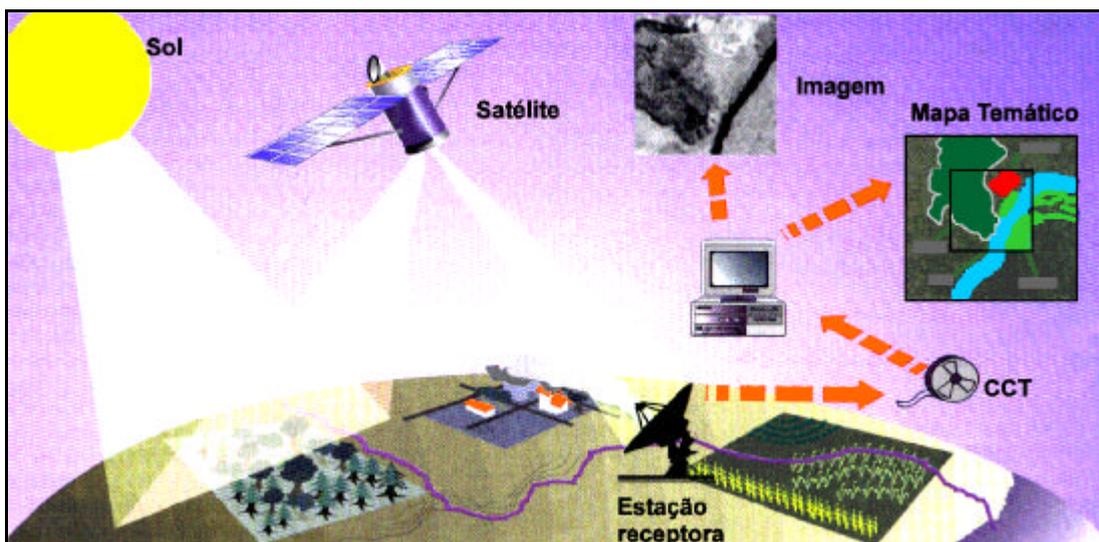


Figura 4.1 - Representação do processo de aquisição de uma imagem de satélite (Fonte: Auada, 1996).

Capítulo 4 - Fundamentação Teórica

de varredura eletro-óptico-mecânico, semelhante ao MSS mas com amplas melhorias em relação às características espectrais, radiométricas e espaciais. Este sensor é sensível a sete (7) bandas espectrais, sendo três na região visível do espectro eletromagnético (bandas 1, 2 e 3), uma banda no infravermelho muito próximo (banda 4), duas bandas no infravermelho próximo (bandas 5 e 7), e uma banda no infravermelho termal (banda 6).

As bandas espectrais do sensor TM do LANDSAT-5 possuem aplicações distintas na avaliação de recursos naturais, especialmente no que diz respeito ao mapeamento geológico, atividades de planejamento urbano, monitoramento de áreas degradadas e de risco ambiental (Tabela 4.1).

O campo de visada instantâneo ou IFOV (*Angular Instantaneous Field of View*) do TM é de 120x120m na banda 6, e 30x30m para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7. Esta alta resolução espacial na região do espectro refletido, permite observar pequenos segmentos de área, como por exemplo, parcelas agriculturadas

O conjunto de detectores do TM está arranjado na forma de uma matriz de 16x6 fotodetectores de silício (bandas 1,2 ,3 e 4) e de antimônio de índio (bandas 5 e 7), com mais 4 detectores termais de telureto de mercúrio-cádmio (HgCdTe) para a banda termal, resultando em um matriz com 100 detectores. Esta disposição permite que o imageamento de uma cena ocorra simultaneamente para as sete bandas, cobrindo uma área de 185 x 185 km.

Tabela 4.1 - Aplicações das bandas do sensor TM do LANDSAT-5. Fonte: Freden & Gordon Jr. (1983).

Banda	Faixa espectral (?m)	Res. Radiométrica	Aplicações
1	0,45-0,52 (azul)	0,8% NE? (NE=Noise-equivalent)	Estudos de sedimentos na água Mapeamento de águas costeiras Oxidação de rochas
2	0,52 - 0,60 (verde)	0,5% NE?	Mapeamento de estradas e áreas urbanas Mapeamento da vegetação
3	0,63-0,69 (vermelho)	0,5% NE?	Mapeamento de estradas e áreas urbanas Diferenciação de espécies
4	0,76-0,90 (infraverm. muito próximo)	0,5% NE?	Levantamento da biomassa Relevo Mapeamento de corpos d'água
5	1,55-1,75 (infraverm. próximo)	1,0% NE?	Mapeamento de corpos d'água Umidade da vegetação Discriminação de tipos de rochas
6	10,40-12,50 (infraverm. termal)	-----	Stress térmico em vegetação Propriedades termais do solo
7	2,08-2,35 (infraverm. próximo)	2,4% NE?	Mapeamento geológico Zonas hidrotermalizadas

4.1.3. Imagens Digitais

Uma imagem digital é um arranjo de números complexos ou reais representados por um número finito de bits. Existem diversas categorias de imagens, as quais podem representar, por exemplo: a luminância de objetos em uma cena (fotografia); a absorção característica dos tecidos do corpo (imagem de raios-X); a temperatura de uma região (imagem do infravermelho termal); as propriedades eletrogeométricas de um alvo (imagem de radar); o campo geomagnético de um local (imagem geofísica), entre muitas outras (Jain, 1989).

Em Sensoriamento Remoto, uma imagem pode ser conceituada como: *“uma medida da intensidade de radiação eletromagnética, refletida ou emitida pelos materiais que compõem a superfície terrestre”*.

A imagem digital é constituída por um conjunto de elementos discretos de informação - *“pixels”* - arranjados na forma de uma matriz bidimensional no formato *“raster”*. Cada *“pixel”* corresponde a uma mesma unidade de área imageada no terreno e à qual é atribuído um valor numérico, referido como nível de cinza ou DN (*“digital number”*). Este valor representa a radiância integrada dos diferentes objetos presentes em uma dada área da superfície, cujo tamanho (resolução espacial) varia em função das diferentes plataformas orbitais.

Os valores de radiância dos *pixels* originais de uma imagem orbital podem muitas vezes ser modificados por problemas técnicos nas fases de aquisição, registro e transmissão dos dados, por variações na altitude do satélite e geometria de imageamento, ou por fatores ambientais. Estas influências podem ser minimizadas por técnicas de correções radiométricas, geométricas e atmosféricas, as quais procuram restaurar o valor real de radiância dos objetos de uma cena.

No caso do reconhecimento geológico por sensoriamento remoto, os efeitos ambientais mais relevantes sobre as imagens, são: a contribuição atmosférica, os efeitos da topografia e a densidade de cobertura vegetal sobre o terreno.

4.1.4. Processamento de Imagens Digitais

O propósito dos sistema de processamento e tratamento de imagens digitais é melhorar a qualidade da imagem, para facilitar a interpretação visual (realce) ou o discernimento automático de informações de interesse (classificação).

As técnicas de realce de imagens digitais podem ser divididas em duas categorias principais: *Realce no Domínio Espacial* e *Realce no Domínio Espectral*.

As técnicas de *Realce no Domínio Espacial* ou filtragens do tipo convolução, são transformações *pixel-a-pixel* que não dependem apenas do nível de cinza do *pixel* processado, mas também do valor dos níveis de cinza dos *pixels* vizinhos, na imagem original. Neste caso, a definição de filtragem é vinculada ao conceito de distribuição ou frequência espacial dos valores de brilho dos *pixels*.

O *Realce no Domínio Espectral* são operações *pixel-a-pixel* que utilizam-se de técnicas de modificação de histogramas das imagens, operações aritméticas em imagens ou ainda de técnicas de rotação dos eixos do espaço “n” dimensional (n = ao número de bandas espectrais da imagem), que representa a distribuição dos valores de DN’s dos *pixels* entre as bandas.

A Figura 4.3, abaixo, ilustra o modelo geométrico de realce no domínio espectral.

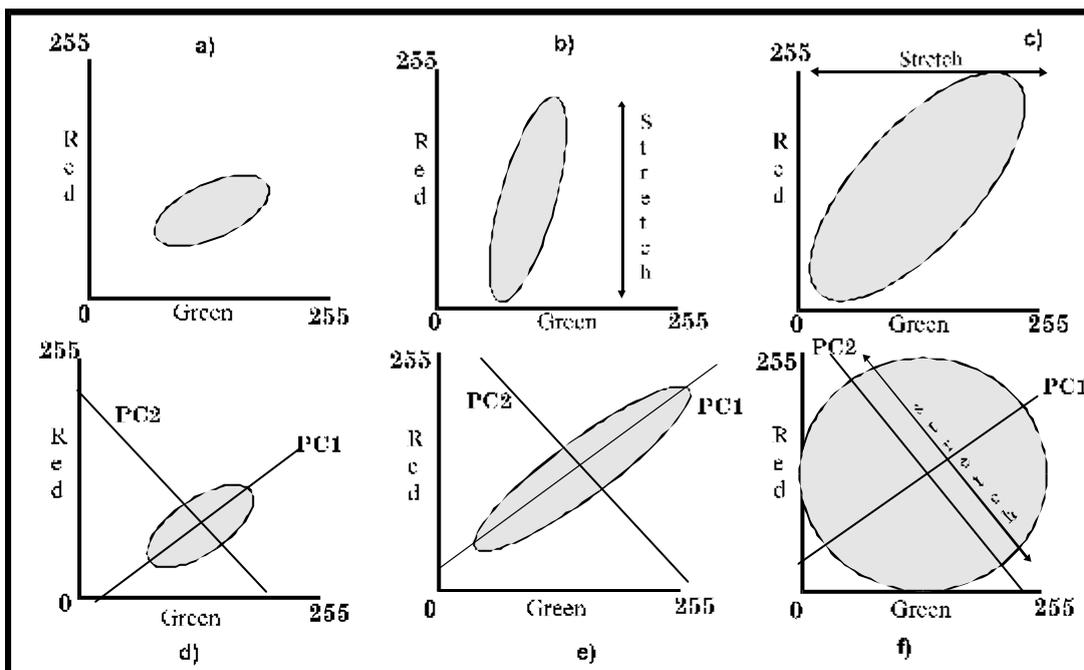


Figura 4.3 - Representação esquemática de alguns tipos de realce de contraste em um espaço bi-dimensional. Em a,b e c, o *stretching* convencional, onde uma ampliação simples de contraste é usado para expandir os DN’s sobre todo o intervalo da imagem, mas com os dados não ocupando os cantos do espaço. Portanto as sobras da imagem são suavizadas com cores não puras, qualquer *pixel* que tem um alto DN no vermelho, também tem alto DN no verde e azul, produzindo tons pastéis. Em d,e a representação hipotética da orientação dos eixos ortogonais (PC1 e PC2) após a transformação por componentes principais. E de d a f, a representação do processo de decorrelação, onde a distribuição dos dados é realçada paralela aos eixos PC, maximizando o volume do espaço de cores. Fonte: Rothery (1987).

4.1.5. Processamento Digital de Imagens Coloridas

A compreensão e entendimento das técnicas de processamento digital de uma imagem colorida é fundamental em **SR**, uma vez que o olho humano pode discriminar com muito mais facilidade cores do que tons de cinza.

O uso de técnicas de realce de cores, como por exemplo, na supressão da sombra e realce da assinatura espectral de rochas, solos e vegetação são particularmente importantes para mapeamento litológico por geólogos que utilizam imagens multiespectrais (Kruse & Raines, 1984).

Especialmente, hoje, com o aperfeiçoamento dos Sistemas de Informações Geográficas (**SIG**), as transformações no espaço de cores estão sendo extensivamente investigadas para integração de dados e realce visual (Welch & Ehlers, 1987; Harris & Murray, 1990; Chavez *et al.*, 1991; Grasso, 1993), ou para aperfeiçoamento das técnicas de classificação de imagens multiespectrais (Munehika *et al.*, 1993).

Existem muitas maneiras de geração de uma imagem de composição colorida a partir de um conjunto de dados multiespectrais como uma imagem TM. A mais simples é o uso das três bandas separadas nos canais R, G e B. Outra é o uso da técnica de razões, que permitem a entrada de mais de três bandas a serem combinadas. A terceira opção é a produção de uma imagem principal componente.

Segundo Rothery (1987) apenas três sistemas de coordenadas são relativamente comuns e podem ser usados com maior liberdade no realce de cores: o espaço de cores de principais componentes por decorrelação (Soha & Schwartz, 1978; Rothery 1987); espaço IHS (Gillespie, 1980; Haydn *et al.* 1982); e, o espaço N.T.S.C. Y-I-Q, no qual Y é iluminância (intensidade), I e Q são informações das cores .

As cores podem ser definidas, descritas ou organizadas através dos métodos de “*espaço de cores*”, sistemas de coordenadas ou modelos coloridos. O espaço RGB é o modelo mais usual para visualização em monitores coloridos-CRT (*cathode ray tube*) e pode ser geometricamente representado como um cubo, onde cada cor, é definida pelas suas coordenadas (Fig. 4.4a).

Na origem dos três eixos há ausência de cores, e quando adicionamos iguais quantidades da cor vermelho, verde e azul, formam-se diferentes níveis de cinza, cada vez mais claros, até a cor branca.

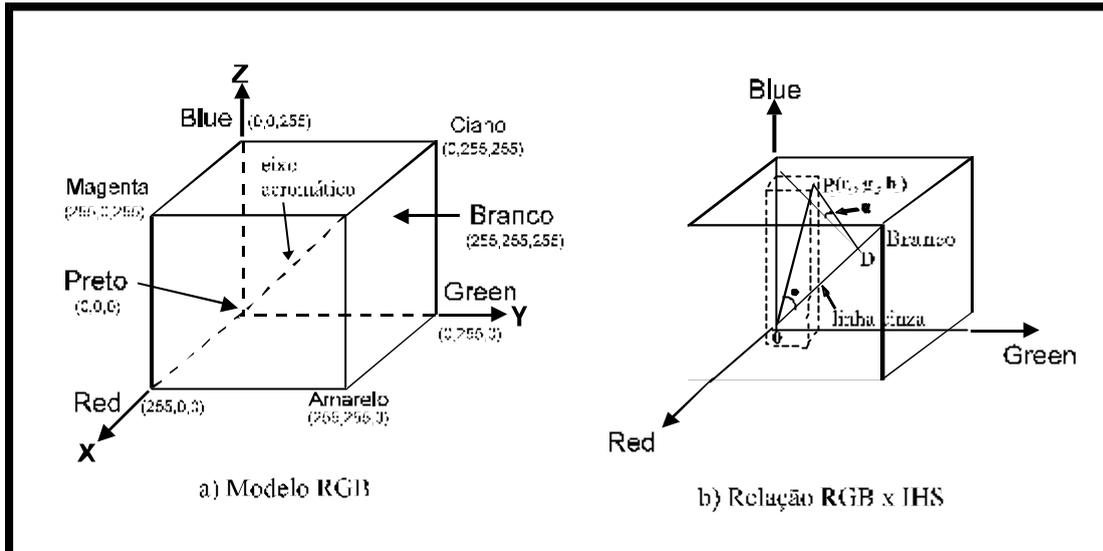


Figura 4.4 - a) Modelo cúbico de cores RGB; b) Modelo cúbico de cores para a transformação RGB-IHS, onde o vetor $OP_i=(r_i,g_i,b_i)$ define a cor de um *pixel* em uma composição RGB; a linha diagonal maior (OD) é chamada linha acromática, ou cinza; a intensidade do vetor-cor OP_i é definido como o comprimento de sua projeção na linha OD; a matiz é o ângulo azimutal (?) em torno de OD; e a saturação é ângulo (?) entre vetor OP_i e a linha OD (Fonte: Liu & Moore, 1990).

No espaço IHS, uma cor é quantitativamente definida em termos de três variáveis: intensidade (I), matiz (H=hue) e saturação (S), as quais determinam uma descrição numérica do brilho, intervalo espectral e pureza de uma cor (Liu & Moore 1990).

Um alto valor de saturação resulta em uma cor espectralmente pura, ao passo que um baixo valor indica uma mistura de comprimentos de onda que irá produzir tons pastéis (apagados).

O espaço IHS pode ser representado através de coordenadas triangulares, obtidas do diagrama de cromaticidade da *Commission Internationale de l'Eclairage - C.I.E.* (Haydn *et al.*, 1982); por meio de coordenadas ortogonais (Smith, 1978); ou ainda por coordenadas esféricas (Gillespie *et al.* 1986; Pratt, 1991).

A decomposição de uma imagem colorida RGB nas componentes I, H e S, é chamada **Transformação IHS**, sendo a relação geométrica entre o espaço RGB e o espaço IHS, representado na Figura 4.4b.

Esta transformação é bastante útil para produzir composições coloridas com reduzida correlação interbandas, conseqüentemente com melhor utilização do espaço de cores, e para combinar diversos tipos de imagem ou imagens de diferentes sensores com diferentes resoluções espaciais ou espectrais.

Para produzir composições coloridas, escolhem-se três bandas de uma imagem multiespectral, e associa-se cada banda a um dos componentes RGB.

A Transformação IHS é feita *pixel-a-pixel* e, cada *pixel* na imagem de saída possuirá um ponto correspondente no espaço IHS.

O produto final é um conjunto de três novas imagens: uma de intensidade, uma de matiz e outra de saturação. Estas novas imagens são a seguir realçadas, de modo a expandir o intervalo de intensidade e saturação através das técnicas convencionais de contraste, e novamente transformadas para o sistema RGB, permitindo assim melhor separação das feições que se deseja observar.

Dentre as muitas vantagens do sistema IHS sobre o sistema RGB, podemos citar (Harris & Murray, 1990):

? os aspectos informativos de uma imagem são apresentados usando os atributos de quantificação das cores, os quais podem ser distintamente percebidos;

? as variações numéricas nos dados da imagem são uniformemente representados em um intervalo de cores facilmente concebido, e;

? é possível o controle individual sobre as componentes cromáticas (matiz) e acromáticas (saturação) da imagem.

4.2. Geoprocessamento

4.2.1. Conceitos Básicos

Os sistemas de geoprocessamento são hoje ferramentas indispensáveis no planejamento urbano, utilização de recursos naturais e proteção ao meio ambiente.

Já são muitas as instituições no Brasil, que utilizam as tecnologias de geoprocessamento na tomada de decisões frente a estas questões.

A palavra geoprocessamento pode ser entendida como: “*O conjunto de tecnologias de coleta e tratamento de informações espaciais e de desenvolvimento, e uso, de sistemas que as utilizam*” (Rodrigues, 1991 *apud* Câmara, 1995). Neste contexto, geoprocessamento possui um caráter amplo, global, podendo inserir, entre outras aplicações os Sistemas de Informações Geográficas (**SIG's**).

Uma visão retrospectiva e perspectiva sobre a tecnologia de geoprocessamento é apresentada em Câmara (1995).

As aplicações mais comuns em geoprocessamento estão representadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Exemplos de aplicações de Geoprocessamento e escalas típicas de trabalho. (Fonte: Câmara, 1995)

Aplicações	Escalas típicas	Tipos de dados	Representações gráficas	Operações
Floresta	1:10.000 a 1:500.000	cadastro rural (talhões)	matricial, vetorial	classificação de imagens, consulta espacial
Agricultura	1:25.000 a 1:250.000	mapas temáticos, imagens, MNT	matricial, vetorial, grades, TIN*	análise espacial, declividade
Geologia	1:100.000 a 1:2.500.000	mapas temáticos, imagens, MNT	matricial, grades	transformação IHS, visualização 3D
Redes	1:1.000 a 1:10.000	redes lineares (topologia)	vetorial	consulta espacial, cálculos dedicados
Estudos Urbanos	1:1.000 a 1:25.000	redes, cadastro urbano	vetorial	consulta espacial

* TIN = Triangulated Irregular Network (Rede Irregular Triangulada).

4.2.2. Sistemas de Informações Geográficas

A literatura emergente sobre **SIG's** traz à tona diferentes abordagens quando a questão é a conceituação desses sistemas.

De acordo com Teixeira *et al.* (1995), freqüentemente os **SIG's** são confundidos com outros sistemas gráficos como o CAD (*Computer Aided Design*) e o CAC (*Computer Aided Cartography*). Isto, em parte, seria decorrente da falta de intercâmbio entre os pesquisadores que criam uma terminologia própria às suas experiências, e ao enfoque comercial que desvirtua a verdadeira identidade de um SIG.

Teixeira *et al.* (1995), propõe que a melhor definição para **SIG's** seria: “*Conjunto de programas, equipamentos, metodologias, dados e pessoas (usuários), perfeitamente integrados, de forma a tornar possível a coleta, o armazenamento, o processamento e a análise de dados georreferenciados, bem como a produção de informação derivada de sua aplicação*”.

Este conceito é bastante abrangente e dinâmico, divergindo de muitas abordagens anteriores, pois integra tecnologias e usuários em todas as etapas de trabalho na busca de soluções rápidas e concisas para determinado problema.

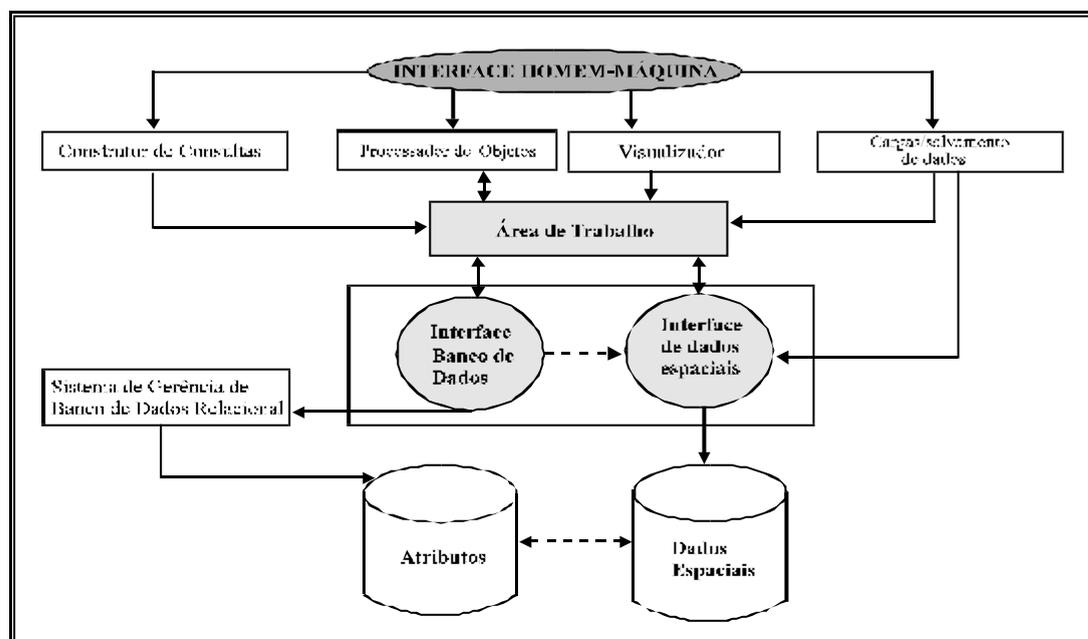
Para Câmara (1994), os Sistemas de Informações Geográficas caracterizam-se essencialmente pela possibilidade de: integrar, numa única base de dados as informações espaciais provenientes de mapas, dados censitários, de cadastro urbano e rural, imagens de

satélite, e modelos numéricos de terreno (MNT's), entre outros; combinar as várias informações através de algoritmos de manipulação, para gerar mapas derivados, e; consultar, recuperar, visualizar e desenhar o conteúdo da base de dados geocodificados.

Os componentes básicos que formam a estrutura hierárquica de um **SIG** é constituído pelos seguintes níveis (Câmara, 1994): interface com o usuário; entrada e integração de dados; funções de processamento gráfico de imagens; visualização e plotagem; e, banco de dados geográficos (Fig.4.5).

O componente gráfico de um **SIG** é freqüentemente descrito como uma série de “layers”, ou camadas, cada uma das quais contendo mapas que são relacionados funcionalmente. Cada “layer” é um conjunto de feições homogêneas que é registrado espacialmente em relação a outro “layer”, a partir de um sistema de coordenadas comuns (Antenucci, 1991).

Figura 4.5 - Esquema das interrelações entre os diversos componentes de um SIG. (Fonte: Câmara, 1994).



É justamente essa possibilidade de manipular e integrar dados obtidos a partir de várias fontes, cruzar as informações em vários “layers” ou Planos de Informações (**PI's**) para visualização, e ainda a rápida e constante atualização do banco de dados, que fazem o sucesso da operação destes sistemas.

A eficiência deste processo, portanto, vai depender da implementação de um **SGDB** - Sistema de Gerência de Banco de Dados - para atender bases de dados espaciais cada vez maiores (Câmara, 1994).

4.2.3. Princípios de Integração de Dados Digitais

“A integração pode ser entendida como o processo de combinar diferentes dados espacialmente distribuídos, e prepará-los para armazenamento, recuperação, análise e apresentação” Knapp (1980).

O obstáculo maior neste processo é a falta de um modelo de dados geográficos universalmente estabelecido. Neste sentido, o desenvolvimento de sistemas que possibilitem integrar dados provenientes de fontes diversas com formatos digitais diferentes, tendem a expandir a utilização das técnicas de geoprocessamento.

Historicamente, o maior custo na implementação de um sistema de geoprocessamento é justamente o agrupamento de dados espaciais geocodificados. Recentemente (início dos anos 90), as tecnologias para entrada, armazenamento, acesso e análise de dados evoluíram de tal maneira que uma nova visão para **SIG** foi estabelecida com muitas inovações.

O conceito de modelamento de *tempo real* e interatividade *3D*, obrigou o questionamento de como manipular os dados espaciais (Faust *et al.* 1991). Esta nova percepção pode ser atribuída em parte aos avanços computacionais e a institucionalização do processo **SIG/SR** no preparo de decisões rotineiras (Lang, 1989 *in* Faust *et al.* 1991).

As propostas de modelagem de dados, na tentativa de integrar as diferentes técnicas (dicotomia raster/vetor e unificação dos dados) são baseadas no entendimento dos diferentes conceitos de espaço em **SIG's**.

Segundo Worboys (1995), em geoprocessamento o espaço geográfico é modelado segundo duas visões complementares: o modelo de *campos* e o modelo de *objetos*. O modelo de *campos* conceitua o espaço geográfico como uma superfície contínua, sobre a qual variam os fenômenos a ser observados segundo diferentes distribuições (por exemplo: tipos de solos, topografia, teor mineral). O modelo de *objetos* representa o espaço geográfico como uma coleção de entidades distintas e identificáveis, ou seja, atributos não-espaciais, por exemplo: lotes num mapa cadastral.

Para Câmara (1995), a implementação de um **SIG** depende quase que exclusivamente da escolha do *modelo de dados*, conceituado como: “um conjunto de ferramentas utilizadas para estruturar dados num sistema computacional”.

O autor (*op cit.*) apresenta um modelo de dados para geoprocessamento projetado com técnicas de *orientação-por-objetos* e que permite lidar com os diversos tipos de dados geo-ambientais. As contribuições mais relevantes do modelo são: apresentar uma abordagem unificada para a modelagem em geoprocessamento, combinando as idéias de campos e

os objetos; integrar imagens de Sensoriamento Remoto e Modelos Numéricos de Terreno com mapas temáticos, mapas cadastrais e redes; prover suporte para representações geométricas múltiplas de uma mesma entidade do mundo real e permitir a coexistência de representações vetorial, matricial e grades num mesmo sistema; gerar uma interface de alto nível com conteúdo semântico.

A utilização de técnicas de fusão de dados digitais via computador tem permitido investigações extensivas na área de Geociências, em especial na Geologia para fins de mapeamento litoestrutural e prospecção mineral.

As formas mais usuais de integração de dados digitais é através dos **SIG's**, onde as informações a serem analisadas necessitam estar georreferenciadas e, através dos sistemas de tratamento de imagens que integrem imagens digitais através da informação espectral de cada *pixel* para produzir uma nova imagem com outras características espectrais.

Outra possibilidade de integração é através da **Transformação IHS**. Essa técnica é uma das mais utilizadas para realce, visualização e fusão de dados de diferentes resoluções espectrais e espaciais, estando presente na maioria dos “softwares” de processamento de imagens, o que a faz bastante conhecida.

A integração via IHS é feita durante o retorno ao espaço RGB, através da substituição de uma das componentes IHS pelas imagens selecionadas, a fim de obtermos um produto que melhor combine, por exemplo, as informações espectrais das imagens TM, com dados de radar e aerogeofísica. Neste caso, é necessário que as imagens integradas tenham um mesmo valor de tamanho de “*pixel*”.

Alguns dos trabalhos que descrevem metodologias para integração de dados via **SIG's** são por exemplo: Schetsellar *et al.* (1990) e Bonham-Carter (1994). Exemplos da aplicação da Transformação IHS são encontrados em: Haydn *et al.* (1982); Harding & Forrest (1989); Harris *et al.* (1990); Grasso (1993), entre outros.

A literatura nacional menciona diversos trabalhos que utilizaram a Transformação IHS nos últimos anos, sendo a aplicação mais comum, a integração de dados de sensores geofísicos com imagens de radar e imagens TM/LANDSAT, em reconhecimento e mapeamento geológico.

Entre os muitos trabalhos nesta área no Brasil, podemos destacar: Rolim, 1992; Ferreira, 1992; Bicho, 1994; Carmelo, 1994; Martini 1995; Paradella *et al.* 1996; e Carvalho, 1996.

4.3. Aerogeofísica

Desde o início do anos 50, que o governo brasileiro tem investido em serviços de aerolevantamentos geofísicos sobre o país com o propósito de complementar o conhecimento geológico e prover o descobrimento de minerais de interesse econômico.

Os resultados finais destes projetos normalmente são apresentados na forma de mapas geológicos, mapas de intensidade magnética total ou residual, perfis lineares de aeroespectrometria de alta precisão, mapas de análise estrutural, mapas de interpretação aeromagnéticos e de raios gama.

Os mapas de contorno, uma vez interpretados qualitativamente e quantitativamente, podem ser usados para correlações geológicas-geofísicas e fornecer conhecimento sobre as potencialidades minerais de determinada região.

Estes levantamentos, apresentam uma relação custo-benefício bastante favorável em vista da área de abrangência e tempo de amostragem. Os principais parâmetros envolvidos no planejamento de uma expedição de geofísica aérea, são entre outros: o objetivo do serviço, fator econômico, espaçamento das linhas de vôo, características dos detectores e altura de vôo.

4.3.1 Aerogamaespectrometria

A espectrometria de raios-gama a partir de aeronaves foi originalmente concebida exclusivamente para exploração do elemento urânio, sendo posteriormente estendida sua aplicação em geologia, devido a ubiquidade dos elementos radioativos naturais e sua atividade como indicadores litológicos e marcadores de processos geológicos de interesse econômico, como metassomatismo e alteração hidrotermal (Darnley,1993).

Os levantamentos aerogamaespectrométricos tem como princípio a detecção das emanções de radioatividade natural de solos e rochas, oriundas da desintegração radioativa de três elementos relativamente comuns na crosta terrestre: K^{40} , U^{238} e Th^{232} .

A utilização dessa técnica em mapeamento geológico e prospecção orienta-se pelas mudanças do teor desses elementos nos materiais que provavelmente acompanham variações litológicas, permitindo a identificação de classes de rochas quando correlacionadas com as características mineralógicas e geoquímicas e quando integradas com dados obtidos de outros sensores.

Killeen (1979) e Ptikin & Duval (1980), analisaram e exemplificaram as relações entre os principais parâmetros de aerogamaespectrometria com base nas diferentes maneiras de execução dos serviços radiométricos de exploração mineral.

4.3.1.1. Princípios Físicos

A gamaespectrometria tem como princípio o registro do espectro de raios gama (γ) por detectores formados por cristais de iodeto de sódio ativados por tálio NaI(Tl).

Os γ ao incidirem nos cristais interagem com os elétrons, deixando-os no estado energético excitado. Os elétrons, ao retornarem ao estado fundamental, emitem fótons, que são pacotes de energia produzidos por ocasião de processos de transição atômica ou nucleares.

Como o número de fótons emitidos é proporcional à energia do γ , a intensidade de luz total captada é uma medida da energia do γ incidente. O comprimento de onda da luz medida pelo detector é convertida em sinal elétrico por um conjunto de tubos fotomultiplicadores para serem processadas digitalmente (Grant, 1982b).

Na superfície da Terra, apenas três elementos são suficientemente comuns, a ponto de permitir sua utilização em prospecção geofísica: o potássio (K^{40}), que possui uma abundância de 0.012%; o urânio (U^{238}) com 99.3% do U_{total} ; e o Tório (Th^{232}) com 100% do Th_{total} (Telford, 1976). Destes, o K^{40} é responsável por cerca de 98% da radiação gama emitida a partir dos solos e rochas.

As emissões gama oriundas do U^{238} e Th^{232} , são determinadas a partir dos produtos de suas séries de decaimento, respectivamente Bi^{214} e Pb^{214} . Os espectros de emissão de γ , são caracterizados por picos de energia bem definidos em 1,46 MeV para o K^{40} ; 1,76 MeV para o Bi^{214} , e 2,62 MeV para o Pb^{214} . Por isso, são muito utilizados os chamados espectrômetros diferenciais ou de “janelas”, já que eles obtêm a taxa de contagem em certas “janelas” espectrais de largura fixa.

A radioatividade total de um levantamento radiométrico é obtida através do registro de todos os γ produzidos na janela da contagem total, sendo este canal o que melhor reflete as variações litológicas (Gratsy *apud* Bicho, 1994). Espectros típicos da radiação γ natural, para amostras de K, U, Th e rochas graníticas-gnáissicas são representadas na Figura 4.6. Ao analisarmos a radiação γ , proveniente dos materiais terrestres, para o caso do U^{238} e Th^{232} devemos levar em consideração, que a intensidade de radiação detectada não emana

do chamado átomo-pai. Mas sim, de seus produtos da série de decaimento radioativos, os átomos-filho, ou seja o Bi^{214} e Tl^{208} respectivamente.

Neste caso, a taxa de contagem pode ser relacionada com a quantidade de átomo-pai, se assumirmos que existe uma relação direta entre a quantidade de átomos pai e filho. Isto é válido, quando a série de decaimento radioativo está em estado de equilíbrio radioativo (Killeen, 1979).

Os efeitos do estado de desequilíbrio radioativo nas séries de decaimento do U e Th sobre os dados radiométricos de aerogamaespectrometria são analisados em Dickson (1995).

Os raios gama são absorvidos ou espalhados pela matéria com perda parcial ou total de energia, devido às influências decorrentes das interações físicas conhecidas como: Efeito Compton, Efeito Fotoelétrico e Produção de Par (Fig. 4.7).

Destas interações, apenas o Efeito Compton atua no intervalo espectral definido pelos fotopicos de interesse na prospecção geológica, ou seja entre 1,46 MeV e 2,62 MeV.

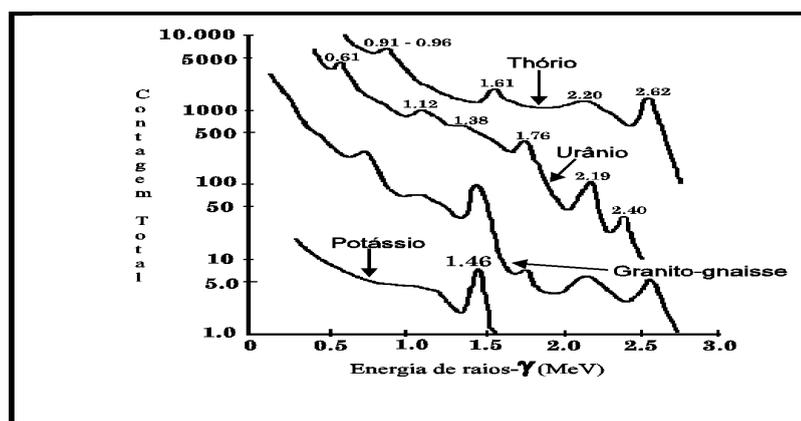


Figura 4.6 - Curvas espectrais típicas de raios- γ para os elementos tório, urânio e potássio; e para as rochas graníticas-gnáissicas. (Fonte: Telford, 1976).

O Efeito Compton pode ser entendido como a incidência de um fóton de γ , sobre um elétron livre, com transferência e/ou espalhamento de uma certa quantidade de energia, causando como consequência interferências em janelas espectrais de baixa energia.

Alguns autores, como Killeen (1979), propôs a utilização do “*Stripping Factor*”, para a calibração da constante, denominada “*K factor*”, para a eliminação destas interferências.

Esta constante é empregada no cálculo da concentração de um radioelemento, através da relação:

$$\dagger \text{ concentração de radioelemento} = (\text{constante}) \cdot (\text{intensidade de } \gamma).$$

Para este cálculo, considera-se que já foram realizadas as correções de *background*, e eliminadas as interferências de α e β , relacionadas a outros radioelementos. Por *background*, entende-se toda e qualquer radiação detectada pelo espectrômetro de α e β , não originada a partir da fonte que é potencialmente analisada, no caso a litosfera (I.A.E.A, 1976).

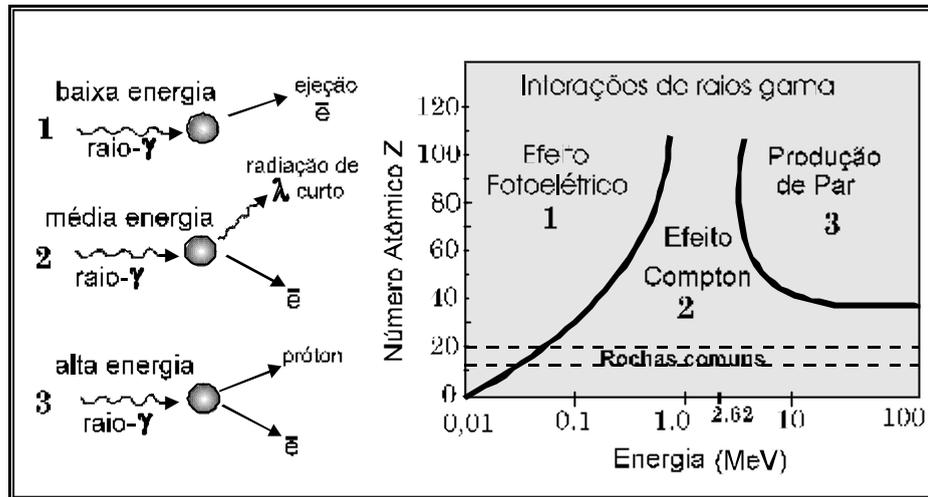


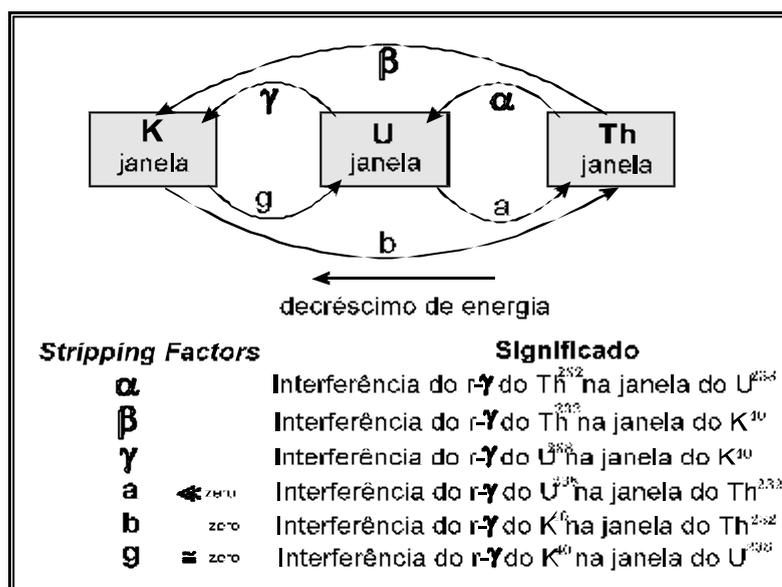
Figura 4.7- Interações do raio- γ com a matéria em função do número atômico do elemento absorvido e da energia do fóton. Quando Z aumenta devido ao aumento do conteúdo de U, o efeito fotoelétrico é a reação dominante nas baixas energias. Isto causa uma relação não linear entre a contagem e a concentração, a menos que energias acima de 0,4 MeV sejam consideradas (Fonte: Killeen, 1979).

A Figura 4.8, representa esquematicamente as interações entre as janelas de energias do K, U e Th, indicando os *stripping factors* que são utilizados para remover as interferências, denotadas na Figura por α , β e γ . Os *stripping factors*: a, b e g, são geralmente considerados muito pequenos ou zero, sendo frequentemente ignorados. Apenas, quando a concentração de urânio, for muito alta, o *stripping factor* “a” será necessário, assumindo o valor aproximado de 0,005 (Killeen, *op cit.*).

Maiores esclarecimentos sobre os procedimentos experimentais para as calibrações necessárias sobre os equipamentos e correções dos dados de gamaespectrometria, em especial aqueles obtidos a partir de aeronaves, podem ser encontradas em: Darnley, (1970); I.A.E.A (1976); Telford, (1976), Travassos & Pires (1979), Pitkin & Duval (1980), Travassos & Figueiredo (1992).

As calibrações efetuadas sobre os dados utilizados nesta dissertação estão documentadas em Anjos & Mourão (1987) e nos relatórios da companhia Texas Instruments (1973).

Figura 4.8 - Esquema representando as interações entre as janelas de energia do K, U e Th, e os *stripping factors* usados para remover as interferências definidas pelas setas. Os valores de α , β e γ podem ser determinados experimentalmente, a partir de uma fonte de radiação artificial. Valores típicos para as razões U/Th, K/Th e K/U, ficam entre 0.5 e 1.0 (Fonte: Killeen, 1979; Grant, 1982b).



4.3.1.2. Radioatividade Natural de Rochas

A abundância relativa e absoluta de K, U e Th determinadas pela aerogamaspectrometria pode ser usada para caracterizar muitos tipos de rochas e sítios de mineralizações, principalmente aquelas originadas por processos de intemperismo, nos primeiros 30 cm da superfície.

As maiores concentrações de K, U e Th, ocorrem nas rochas granitóides, em decorrência das propriedades geoquímicas destes elementos, que facilitam seu enriquecimento nas séries mais diferenciadas do magmatismo, especialmente em pegmatitos.

O conteúdo de U e Th também aumenta nas fases alteradas de biotita granitos, leucogranitos e alcáli-granitos. Porém, as razões U/Th nestas rochas podem ser altamente variáveis devido às diferenças na oxidação que acompanha os processos tardios (Yeats *et al.* 1982).

Grande parte do U e Th presente nas rochas ígneas, está concentrado em minerais acessórios como: zircão, esfeno, e apatita. Outros minerais altamente radioativos e ricos em U e Th, são: monazita, alanita, uraninita, thorita e pirocloro. Entretanto, estes minerais são constituintes menores nas rochas e estão amplamente distribuídos, não permitindo altas concentrações. Valores mais altos do elemento K encontram-se em K-feldspatos e micas.

A distribuição das concentrações de radioisótopos de U, Th e K em rochas sedimentares e solos é condicionada principalmente pelo comportamento geoquímico destes elementos em ambientes superficiais.

O Th é um elemento relativamente imóvel em seu estado de oxidação (Th^{+4}), tendendo a se concentrar em materiais residuais, ou ser transportado a curtas distâncias na forma de grãos sólidos. Assim, os minerais que contém Th em sua estrutura, como zircão e monazita, se concentram preferencialmente em depósitos do tipo *placers* e na fração pesada de sedimentos clásticos.

O U possui alta mobilidade geoquímica sob condições oxidantes (U^{+6}). Entretanto, no estado de oxidação tetravalente a dispersão é limitada pela adsorção por precipitados de óxidos-hidróxidos de ferro e matéria orgânica, a menos que altas concentrações de CO_3^{-2} , ou outros complexos estejam presentes (Rose & Wright, 1980).

O K é muito comum como mineral constituinte dos solos, principalmente em K feldspatos, micas e argilo-minerais e freqüentemente é transportado na forma coloidal pela água subterrânea e depositado em sedimentos argilosos.

A relativa estabilidade do Th e K em ambientes superficiais é demonstrada em mapas radiométricos de K/Th, onde os valores-razão são freqüentemente correlacionados com limites litológicos (Danrley, 1993).

O intemperismo é responsável por dois efeitos significantes sobre a distribuição de radioelementos: o decréscimo da razão U/Th nas rochas alteradas; e, funciona como guia para prospecção de halos de dispersão (principalmente para o urânio), em grandes extensões de área, a partir da rocha fonte.

4.3.2. Aeromagnetometria

Em aeromagnetometria, as anomalias, alvos de interesse prospectivos, são computadas como a diferença entre a intensidade do campo magnético, num ponto específico e a intensidade média do campo regional, podendo ser positivas ou negativas. Estas anomalias são produzidas por contrastes de susceptibilidade magnética (?) presentes nas rochas e seus valores conduzem a dois tipos de interpretação: estimativas da profundidade da fonte magnética, e a delimitação de áreas com padrões magnéticos similares.

Discussões a respeito da utilização de técnicas magnéticas de prospecção geológica e como devem ser analisados e interpretados os dados geofísicos, especialmente aqueles obtidos a partir de aeronaves, podem ser encontradas com detalhes, nos seguintes trabalhos: Telford (1976), Misener (1982), Grant (1982a) e Reeves (1982).

4.3.2.1. Princípios Físicos

O campo magnético é gerado no núcleo-externo da Terra que é constituído por uma liga de Fe-Ni em estado de fusão. Atraídos pela força gravitacional, os materiais condutores de eletricidade deste fluído, adquirem um movimentação convectiva criando correntes elétricas responsáveis pela formação do campo magnético terrestre.

O campo magnético da Terra é definido, em cada ponto da superfície, pela intensidade do campo e pela sua direção, tangente à linha de força imaginária que passa por este ponto. Convencionalmente, representa-se o campo magnético através de um vetor que pode ser sub-dividido em três componentes principais (Telford, 1976):

? *Campo Principal*: é o campo magnético principal originado no interior da Terra;

? *Campo Externo*: é produzido por fontes magnéticas externas à crosta terrestre. Os principais mecanismos atuantes seriam os efeitos indutivos de circulação de correntes elétricas na ionosfera;

? *Anomalias Regionais*: corresponde às variações do campo magnético principal, originadas pelas heterogeneidades da crosta terrestre.

A direção do campo magnético é referenciada em relação às coordenadas geográficas e ao ângulo de inclinação em relação ao plano horizontal. A intensidade e a direção do campo magnético terrestre variam de local para local, na superfície do globo, e no mesmo ponto, variam também com relação ao tempo. A intensidade é mínima nas regiões equatoriais e máxima nos pólos.

Em aeromagnetometria, o campo magnético é medido pela amostragem do campo total, ou um de seus componentes, em tempos discretos ou pelo registro da continuidade do campo ao longo das linhas de vôo. A unidade utilizada é o “gama”, que é equivalente a 10^{-5} T, ou 10^{-9} Wb/m² (1 T=10⁴ gama).

4.3.2.2. Magnetização dos Minerais e Rochas

A partir do núcleo da Terra até profundidades abaixo da superfície onde a temperatura chega a aproximadamente 500° C, não existe contribuição adicional do campo magnético. Acima desta isoterma, que ocorre geralmente em profundidade entre 5 a 15 km, certos minerais adquirem propriedades magnéticas e causam distúrbios ou anomalias locais no campo geomagnético. Entre estes, a magnetita é o mineral mais fortemente magnético, outros,

incluem a magnemita, a titanomagnetita e titanomagnemita, pirrotita, e alguns óxidos de Fe e Ti (Grant, 1982).

A intensidade de magnetização de uma rocha ou mineral vai depender de dois fatores principais:

≠ *Magnetismo Induzido* (MI): quando a magnetização de uma rocha é obtida em virtude de sua susceptibilidade em relação ao campo aplicado. Neste caso, as propriedades magnéticas podem desaparecer quando a rocha é afastada da influência do campo magnético, e;

≠ *Magnetismo Remanente* (MR): é aquele adquirido quando da formação da rocha, e por conseguinte os materiais retêm as propriedades magnéticas mesmo depois de o campo magnetizante ser afastado.

Estes fatores relacionam-se através da relação: $I = \chi B + I_r$, onde I= intensidade de magnetização; \vec{B} = vetor indução magnética da Terra para o local considerado; \vec{I}_r = vetor campo remanente.

A intensidade de magnetização, entretanto, não é fixa em relação ao tempo e espaço, e como estamos geralmente interessados nas variações espaciais da intensidade de magnetização, a variação temporal deve ser identificada e removida durante as etapas de compilação dos dados (Misener, 1982).

Segundo Bourne (1993), todos os minerais contribuem para a susceptibilidade magnética total exibida por uma amostra de rocha, mas a magnetita quando abundante é o mais importante. Minerais máficos, como a hornblenda e biotita, também contribuem significativamente, e podem ser predominantes onde a magnetita é pouco expressiva.

Cameron & Carrigan (1987) listam 4 fatores que influenciam a χ de uma rocha: o conteúdo de magnetita primária da amostra; o conteúdo de magnetita secundária formada por substituição de minerais pré-existentes; a perda de qualquer magnetita que acompanha estados de oxidação ao longo de planos de falha e fraturas; e, a anisotropia magnética da amostra.

De acordo com Reeves (1982), entretanto, a assinatura magnética de uma rocha não depende apenas da porcentagem absoluta de magnetita dentro de uma unidade litológica, mas também da forma como ela está distribuída dentro dessa unidade. E, cita o exemplo de uma seqüência sedimentar com intercalações de camadas ricas em magnetita, que após processos de dobramentos e metamorfismo mostra uma assinatura magnética diferente, refletindo as dobras e deformações da rocha.

CAPÍTULO 5 - PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS CARTOGRÁFICOS, DE SENSORIAMENTO REMOTO E GEOFÍSICOS

5.1. Introdução

Os SIG's tem-se tornado um caminho padrão no manejo de dados geocodificados e análise de dados para múltiplas aplicações. Para a integração de SR e SIG's, entretanto, existe a necessidade de superar os obstáculos impostos pelas diferentes técnicas usadas e pela diferença na estrutura dos dados.

Neste sentido, antes da etapa de processamento, os dados originais de cartografia, sensoriamento remoto e aerogeofísica, passam necessariamente por etapas de edição, conversões, correções dos valores anômalos inferidos por diferentes fontes de erros durante a aquisição, compatibilização dos formatos de apresentação dos mesmos, e georreferenciamento das imagens geradas.

Estas diferentes etapas e suas interações são ilustradas no fluxograma da Figura 5.1.

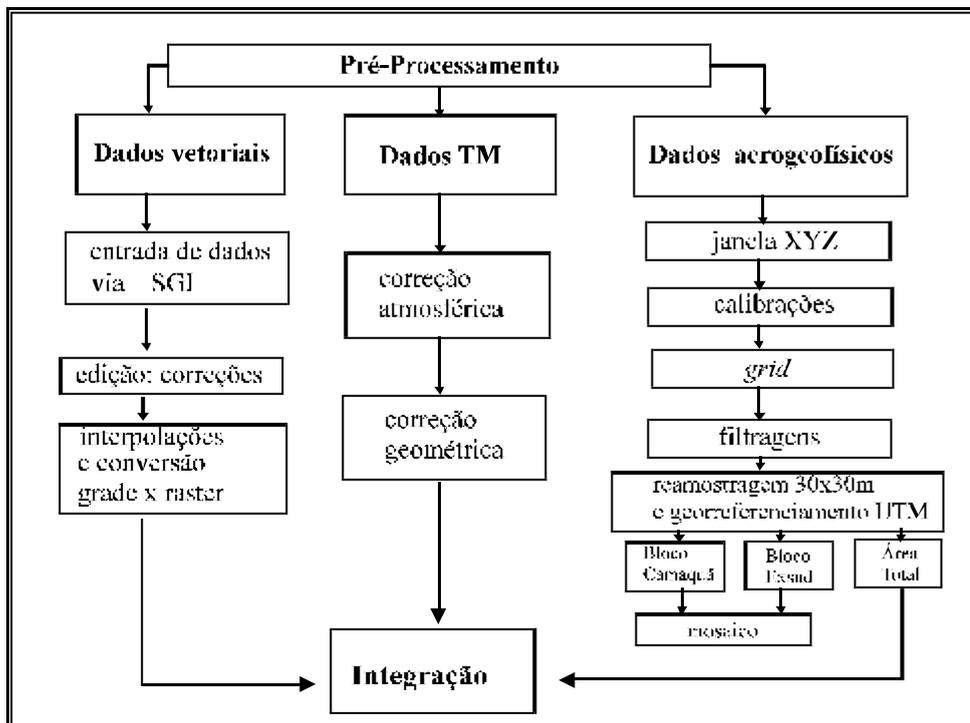


Figura 5.1 - Fluxograma das atividades de pré-processamento dos dados.

5.2. Pré-Processamento dos Dados Vetoriais

Esta etapa de trabalho, consistiu na entrada, edição e conversão dos atributos vetoriais referentes ao mapa geológico, curvas de nível topográfico, rede de drenagem e morfoestruturas, usando-se o Sistema Geográfico de Informações (**SGI-INPE**).

A implementação do ambiente de trabalho no **SGI**, sucedeu-se em diversas fases:

✍ Criação do Projeto de Trabalho: Nesta fase, definiu-se o nome do projeto; a escala de referência; o retângulo envolvente da área representada pelo projeto; e o sistema de projeção cartográfico. A escala base utilizada foi 1:50.000 (a mesma das cartas topográficas), e o sistema de projeção, o UTM Córrego-Alegre.

✍ Definição dos Planos de Informações (PI's): Para fins de cruzamento de informações foram criados os seguintes PI's (Tabela 5.1):

Tabela 5.1 - Planos de Informações criados no SGI.

Nome dos PI's	Categoria	Classes
mnt- Modelo Numérico do Terreno	MNT	1
drn - Drenagens	Mapa Polig.	1
lin - Lineamentos	Mapa Polig.	1
geo - Geologia	Temática	17
1- Banda 1 da imagem TM	Temática	1
2- Banda 2 da imagem TM	Temática	1
3- Banda 3 da imagem TM	Temática	1
4- Banda 4 da imagem TM	Temática	1
5- Banda 5 da imagem TM	Temática	1
7- Banda 7 da imagem TM	Temática	1

✍ Entrada de dados: A captura de dados vetoriais dos mapas cartográficos e geológicos foi realizada via mesa digitalizadora em diversas sessões de digitalização, antecedidas da calibração da mesa. Procurou-se reduzir ao máximo o número de sessões para cada PI, para minimizar os erros decorrentes do ajuste do mapa com a mesa.

✍ Edição: No processo de edição, foram averiguadas todas as informações digitalizadas, para suprimir eventuais erros durante a entrada dos dados. Os ajustes foram realizados tanto na categoria temática, como MNT. No caso do PI-mnt, o arquivo de linhas gerado foi salvo no formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) para ser processado com o programa *Surfer* para a geração do Modelo Numérico do Terreno.

✍ Conversão: Nesta etapa foi gerada a grade regular (*grid*) para o PI-mnt com interpolador por *Krigagem*, com modelo de variograma linear e método da procura normal, uma vez que os pontos amostrais encontravam-se distribuídos aleatoriamente no espaço, evitando-se desta maneira a tendenciosidade no processo de interpolação.

Os PI's mnt e geo, foram em seguida convertidos para o formato “raster” (varredura) por meio de rotinas do *software* Idrisi. As imagens foram geradas com o mesmo número de linhas e colunas da imagem TM, para permitirem o cruzamento das mesmas, ou seja com tamanho de pixel de 30x30 m.

5.3. Pré-Processamento das Imagem TM/LANDSAT-5

Uma imagem de satélite, devido as suas características de aquisição e formas de registro, está sujeita a uma série de degradações do sinal detectado pelo sensor.

Para Meneses *et al.* (1995), estas interferências podem ser decorrentes de vários fatores: desajustes de calibração dos detectores; mal funcionamento esporádico dos sensores; problemas na transmissão, recepção e registro dos dados; interferências na radiância por efeitos atmosféricos; distorções nas formas dos *pixels* causados por variações da altitude do satélite, ou pela própria configuração da geometria de imageamento.

Neste contexto, existem três tipos de correções efetuadas sobre imagens orbitais: Correções radiométricas, correções atmosféricas e correções geométricas. Para os objetivos deste trabalho, a imagem utilizada foi submetida à correção geométrica no sistema SITIM-150 (INPE), e atenuação das interferências atmosféricas.

5.3.1. Correção Atmosférica:

Os modelos de correção atmosférica são definidos como os procedimentos desenvolvidos para estimar e eliminar as componentes que contaminam a informação espectral de imagens de satélites.

A grande maioria dos modelos descritos na literatura para correção atmosférica não são fáceis de aplicar em casos reais. Os métodos mais sofisticados utilizam modelos de transferência radioativa, os quais requerem medidas “*in situ*” de alvos específicos em uma imagem; ou medidas simultâneas dos parâmetros atmosféricos, através de dados de radiosondagem, que permitem conhecer com precisão as condições da atmosfera no momento de aquisição da cena.

Uma nítida desvantagem na aplicação destes métodos é o fato de que estes requerem informações adicionais aos dados da imagem digital, não podendo serem utilizados quando os dados atmosféricos e as características espectrais “*in situ*” não forem analisadas (Gilbert *et al.*, 1994).

Alguns métodos alternativos tem sido empregados, como é o caso do conhecido subtração de *dark-pixel* (Crane, 1971), também chamado de método do mínimo histograma (Chaves *et al.* 1977). Outros modelos, incluem procedimentos matemáticos e estatísticos mais complexos, como: conversão de radiância em reflectância; matrizes de covariâncias; métodos de regressão; e método da intersecção de regressão.

Nesta dissertação foi utilizado o modelo do mínimo histograma, pela praticidade e simplicidade de implementação em qualquer programa de processamento de imagens. Este modelo baseia-se na identificação de alvos com valores de *pixels* próximos de zero (água, áreas sombreadas, e etc.). Considerando-se que a interferência atmosférica é aditiva sobre os DN's da imagem e decresce com o aumento do comprimento de onda, a subtração do valor excedente, obtido a partir da leitura direta dos *pixels* de corpos d'água, ou através do histograma da imagem, resulta na remoção aproximada da contribuição atmosférica.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, face a melhoria da qualidade visual da imagem, e ao contraste espectral de alvos específicos presentes na cena TM.

5.3.2. Correção Geométrica:

O propósito dos programas de ajuste geométrico é reorganizar os *pixels* da imagem original, em relação a um determinado sistema de projeção cartográfica.

Para georreferenciar uma imagem, inicialmente, é necessário selecionar pares de pontos de controle (PC's), que são feições bem definidas e possíveis de serem identificadas de modo preciso, tanto na imagem quanto no mapa, como por exemplo, o cruzamento de estradas e drenagens.

Neste trabalho, foram selecionados 10 pontos de controle notáveis na carta topográfica e na imagem, sendo a maior parte posicionados em cruzamento de estradas. A transformação de

coordenadas foi modelada usando-se um polinômio linear de 1º grau, obtido através do ajuste pelo método dos mínimos quadrados em relação aos PC's. Na análise do erro de posicionamento médio obtido a partir do *RMS Error*, foram descartados 3 pontos com erros considerados elevados (acima de 40 m). A seguir, foi refeito o cálculo de precisão da correção com os 7 pontos restantes mostrando um $RMS = 18,6$ m.

Com base na transformação geométrica, atribuem-se níveis digitais à imagem registrada pelo processo de reamostragem por interpolação. Optou-se, neste trabalho, pela interpolação tipo “*nearest neighbour*” ou vizinho mais próximo. Neste modelo, o valor do *pixel* da imagem original, que tem seu centro o mais próximo do ponto localizado na imagem de saída, é unicamente transferido para o correspondente *pixel* da grade de localização, na nova imagem geometricamente corrigida. Ou seja, o valor de brilho da imagem original não é modificado apenas rearranjado.

A precisão do georreferenciamento foi conferida através da sobreposição no SGI, do PI-drm na forma vetorial, com o PI-5 correspondente à imagem da banda TM5, que proporcionou o melhor mapeamento dos corpos d'água, presentes na área de estudo.

5.4. Pré-Processamento dos Dados Aerogeofísicos

Nesta etapa, num primeiro momento, far-se-á uma breve descrição das correções mais importantes efetuadas pela empresas executoras do aerolevantamentos e pela CPRM, sobre os dados brutos, ou dados de campo. Após, será feita a descrição do pré-processamento sobre os dados já corrigidos, utilizados nesta dissertação.

5.4.1. Correções Sobre os Dados Aerogeofísicos Brutos

As correções executadas pela empresa executora e pela CPRM, foram as seguintes:

✂ *Correção dos dados criticados*: Consiste em submeter a fita reformatada ao programa “Correção da Crítica”, que corrige os dados dos erros de gravação.

✂ *Correção da variação diurna*: Este programa, corrige os dados de campo da influência da variação magnética diurna, a partir dos registros da estação base. Nestes registros anotam-se o valor e a hora em que ocorre a inflexão na curva do espectro magnético, no intervalo de tempo de voo. O programa utiliza como referência, o valor médio da estação base, a partir do qual se desenvolve o processo de correção.

† *Correções Gamaespectrométricas:* Nesta etapa, os registros radiométricos são corrigido dos erros de gravação com relação à redução do ruído de fundo atmosférico (“background”), correção do Espalhamento Compton nos cristais e correção altimétrica.

? *Redução do ruído de fundo atmosférico:* O ruído de fundo atmosférico ocorre devido à radiação cósmica e sua influência é eliminada subtraindo de cada canal, um valor médio da radiação que é fornecido. Nessa operação são eliminados, também, os ruídos devido à estrutura e equipamentos da aeronave.

Os valores do ruído são obtidos no início e no término de cada vôo, e consiste em registrar os valores gamaespectrométricos a 750 m de altura. Tais perfis com aproximadamente 200 registros são denominados perfis teste do “background”. Um programa auxiliar lê os valores de cada canal, calcula e lista a média aritmética, os valores máximos e mínimos e o desvio padrão.

De posse das médias extraídas das medições inicial e final de cada vôo, calcula-se o valor médio de cada canal, o qual é o valor do ruído de fundo usado nas reduções dos dados.

? *Correção do Espalhamento Compton:* Esta correção na fita magnética é efetuada mediante a determinação e redução das parcelas responsáveis pelo aumento do nível de radiação dos canais de U e K a partir dos valores reduzidos do “ruído de fundo atmosférico” da seguinte forma:

$$† D(U)_{\text{corr.}} = D(U) - ? \cdot D(\text{Th}), e;$$

$$† D(K)_{\text{corr.}} = D(K) - ? \cdot D(\text{Th}) - ? \cdot D(U)_{\text{corr.}}; \text{ onde:}$$

$D(U)_{\text{corr.}}$ = valor do canal do urânio corrigido do efeito Compton;

$D(U)$ = valor do canal do urânio corrigido do “background”;

$?$ = coeficiente de correção do urânio em relação ao tório;

$D(\text{Th})$ = valor do canal do tório corrigido do “background”;

$D(K)_{\text{corr.}}$ = valor do canal do potássio corrigido do efeito Compton

$D(K)$ = valor do canal do potássio corrigido do “background”;

$?$ = coeficiente de correção do potássio em relação ao tório, e; $?$ = Coeficiente de correção do potássio em relação ao urânio já corrigido do efeito Compton.

Os coeficientes de correção do *Espalhamento Compton* ($?$, $?$ e $?$) nos cristais dependem da largura da janela empregada, do tamanho, número e espaçamento dos cristais. Estes coeficientes são determinados pelo volume dos cristais, que são fornecidos pelo fabricante do

equipamento. Posteriormente, estes valores são informados ao programa de correções gamaespectrométrica, para que se processe a correção do *Espalhamento Compton*.

Correção altimétrica: A radiação gama sofre atenuações da atmosfera, e esta atenuação é uma função linear da altura de vôo. Desta forma são necessárias correções altimétricas a fim de obtermos os valores desta função, conhecidos como testes de absorção ou atenuação, os quais são realizados sobre relevo suaves. O teste de absorção consiste em sucessivos vôos, a diferentes alturas, no mesmo sentido, objetivando determinar o coeficiente de atenuação atmosférica (?) para os canais de Th, U, K e CT. O coeficiente de atenuação total é a soma dos coeficientes devido ao espalhamento Compton, efeito fotoelétrico e formação de pares.

Entre 50 e 250 m de altura, atenuação da intensidade de radiação obedece, aproximadamente a seguinte relação (Darnley, 1973): $N = N_0 \cdot e^{-\mu h}$, onde: N = é a radiação medida à altura h; N_0 = é a radiação correspondente à altura zero; μ = é o coeficiente de atenuação atmosférica do canal.

Com os coeficientes de atenuação informados, o programa corrige os valores de radiação gama para uma mesma altura (no caso 150 m), através da fórmula: $D = D_0 \cdot e^{-\mu(H-150)}$, onde: D= valor do canal corrigido para a altura de 150 m; D_0 = valor do canal corrigido do espalhamento Compton; μ = coeficiente de atenuação atmosférica para o canal; H= altura sobre o terreno em que foi medido o canal.

O programa de correções gamaespectrométricas tem como saída, além do relatório das correções efetuadas, a fita magnética com os valores gama corrigidos e as razões U/Th, U/K e Th/K.

† Distribuição dos erros: Este programa visa a eliminação e/ou minimização dos erros, principalmente àqueles devidos à diferença de altitude entre os perfis de produção e os de controle; e imprecisões da amostragem.

† Redução do campo geomagnético (*IGRF*): Nesta etapa, caso deseja-se trabalhar com o campo magnético residual é feito a subtração do valor do *IGRF* (*International Geomagnetic Reference Field*) do valor do campo total obtido no levantamento geofísico.

Como, o campo geomagnético é definido por uma superfície do 2º grau, na forma: $Ax^2 + By^2 + Cxy + Dx + Ey + F$, podemos calcular os coeficientes da equação, a partir dos seguintes parâmetros: coordenadas geográficas e UTM dos vértices da área do projeto; ano em que foi executado o aerolevanteamento; altitude média de vôo; e as coordenadas geográficas e UTM de

um ponto dentro da área que é usado como origem para os cálculos.

† Geração do arquivo XYZ: A partir dos dados corrigidos é gerado um arquivo XYZ, contando apenas com as coordenadas UTM de cada ponto de medição e o correspondente valor dos canais desejados. Para isso, informa-se ao programa, as coordenadas limites da área em estudo e os números dos canais.

5.4.2. Pré-Processamento dos Dados Aerogeofísicos Corrigidos

Nesta etapa de trabalho, foram realizadas as atividades referentes à seleção da janela da área de estudo, calibrações dos dados, geração das grades regulares, filtragens, refinamento das grades e conversão para formato imagem.

5.4.2.1. Seleção da Janela da Área de Estudo:

A janela sobre os dados do PGBC, já corrigidos pelos procedimentos anteriores, foi selecionada com o auxílio do programa GEOSOFT(CPRM). Estes dados foram armazenados em arquivos do tipo XYZ, onde constam as coordenadas UTM leste e UTM norte da área, e os canais Th, U, K, CT e Mag.

5.4.2.2. Calibrações dos Dados Geofísicos:

Em vista dos dados geofísicos corresponderem a dois aerolevantamentos distintos, realizados em épocas diferentes e com equipamentos de resoluções diferentes, os mesmos foram separados em dois blocos para análises preliminares e correções, definidos como: Bloco Camaquã (Projeto Camaquã) e Bloco Extsud (Projeto Extremo Sudeste do Brasil).

No Bloco Camaquã, os dados magnéticos disponíveis foram àqueles referente apenas ao valor do campo total. Já, para o Bloco Extsud os dados finais correspondiam ao campo magnético residual.

Neste caso, para a confecção do mapa de contorno do campo magnético total da área, foi necessário calcular o valor do *IGRF* no Bloco Extsud, utilizando-se a equação de segundo grau, referida anteriormente.

Os parâmetros envolvido no cálculo foram obtidos em Anjos & Mourão, 1987:
? coordenadas do projeto: 31° 00' 00" de latitude Sul e 52° 00' 00" de longitude Oeste;
? ano do levantamento 1978;

? altitude média de vôo: 140m;

? coordenadas do vértice da área;

? coeficientes: $A= 0,798750 \times 10^{-9}$; $B= 0,440900 \times 10^{-9}$; $C= 0,223830 \times 10^{-9}$; $D=-0,767618 \times 10^{-3}$; $E= -0,183417 \times 10^{-3}$; $F= 23.615,8$;

? coordenadas UTM: UTM leste= 404,528m; UTM norte = 6.569,918 m.

O valor do *IGRF* calculado foi de 23.614,30 nT. Esta constante, foi então somada a cada valor do campo residual em cada ponto amostrado no Bloco Extsud.

Os dados gamaespectrométricos, por sua vez, mostraram diferenças marcantes nos valores radiométricos em vista das diferenças técnicas dos aerolevantamentos (Tabela 1.1). Para efeitos de confecção dos mapas de contornos de valores radiométricos, e a posterior geração das imagens geofísicas foi adotado dois procedimentos distintos:

- † Manutenção dos valores originais dos dados do PGBC, para ambos os blocos, e;
- † Correções estatísticas com base na comparação dos valores da média e do desvio padrão para cada canal radiométrico, medido sobre unidades litológicas idênticas, presentes no limite entre os dois projetos e em continuidade para ambos os lados, e mesmo sobre unidades não presentes na área de estudo, mas levantadas pelo PGBC.

5.4.2.3. Geração das Grades Regularmente Espaçadas (“grids”):

O primeiro passo, na interpolação dos dados geofísicos para geração do *grid* é a definição do tamanho da célula da grade regular. Um tamanho grande de célula resulta em prejuízo da representação de detalhes de feições de comprimento de onda curtos, isto é, anomalias locais. Por outro lado, se o tamanho de célula for muito pequeno, podem ser criados ruídos e artefatos não relacionados aos dados geofísicos.

O tamanho da célula é, em geral, determinado em função do espaçamento médio entre as linhas de vôo. Algumas referências sugerem a utilização do valor entre 1/2 e 1/5, como é caso do USGS (*United State Geological Survey*).

Nesta dissertação, adotou-se o valor inicial para interpolação de 250m, em acordo com o valor estabelecido por Vasconcelos *et al.* (1990), para os quais o valor ideal estaria situado no intervalo entre 1/4 a 1/8 do valor médio entre as linhas de produção.

A próxima etapa, consistiu na escolha do interpolador mais apropriado para a geração do *grid*. Esta escolha recai sobre uma função capaz de atenuar as diferenças de amostragem ao longo das direções de vôo, e que minimize as diferenças entre o espaçamento das amostragens.

Dentre os interpoladores testados, o que apresentou os melhores resultados foi o método de mínima curvatura, similar ao descrito por Briggs (1974). O princípio da mínima curvatura fornece um método de interpolação bidimensional que permite ao computador desenhar superfícies com a curvatura minimizada.

A geração das grades regularmente espaçadas foi implementada com o auxílio do programa RAMGRID (GEOSOFT), utilizado pela CPRM. Estas grades serviram de base para a confecção dos mapas de contornos dos isovalores de intensidade de radiação gama e campo magnético total.

5.4.2.4. Filtragens:

O processo de interpolação, entretanto, gerou marcantes feições ao longo da direção das linhas de vôo: NW para o Bloco Camaquã e N-S para o Bloco Extsud.

A Figura 5.2a, ilustra o mapa de contorno dos valores originais do campo magnético total para o Bloco Camaquã, onde observa-se o nítido alinhamento das curvas na direção N45W.

A Figura 5.2b, representa o mapa de contorno dos valores gamaespectrométricos do canal K, no Bloco Extsud, sendo visível a orientação de ruídos N-S.

Estes artefatos ou ruídos na direção de vôo são devido provavelmente a flutuações do espectrômetro durante a coleta de dados ou imperfeições da correção de *background* (Broome, 1990).

Para eliminar estas anomalias foram utilizado dois tipos de filtros, disponíveis no programa MAGMAP (GEOSOFT): um filtro passa-baixa com frequência de corte equivalente ao dobro da dimensão da célula (frequência de Nyquist), ou seja, 0,002 ciclos/m; e um filtro coseno-direcional do tipo DCOS nas direções 045 e 090.

O resultado das filtragens pode ser visto na Figura 5.3a, para o campo magnético total no Bloco Camaquã; e Figura 5.3b, para o canal K no Bloco Exsud, demonstrando a eficácia dos filtros utilizado, com a remoção quase que total dos ruídos criados nas direções de vôo.

5.4.2.5. Conversão *grid x raster* e Georreferenciamento UTM:

Esta fase de trabalho, compreendeu todas as rotinas necessárias à conversão dos *grids* dos valores geofísicos para a forma de imagens digitais monocromáticas de 8 bits.

Neste processo, o espectro dos valores do *grid* é representado em um intervalo de 256 níveis de cinza, o que significa uma compressão da resolução original dos dados geofísicos.

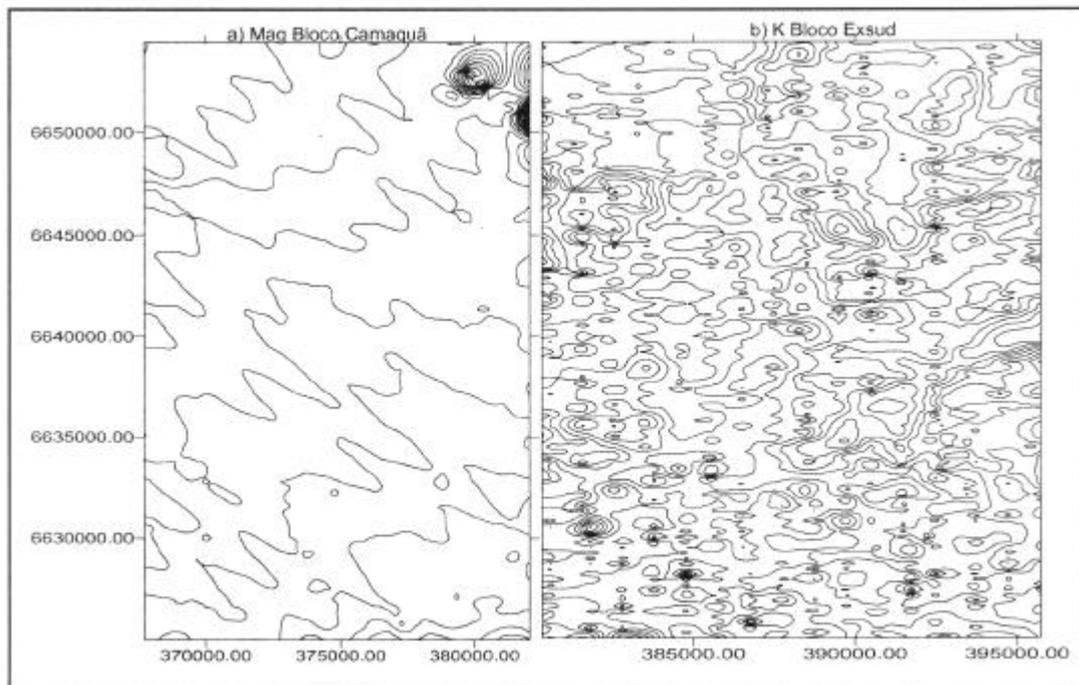


Figura 5.2 - Mapas de isovalores originais: a) Mag do Bloco Camaquã; b) K do Bloco Exsud.

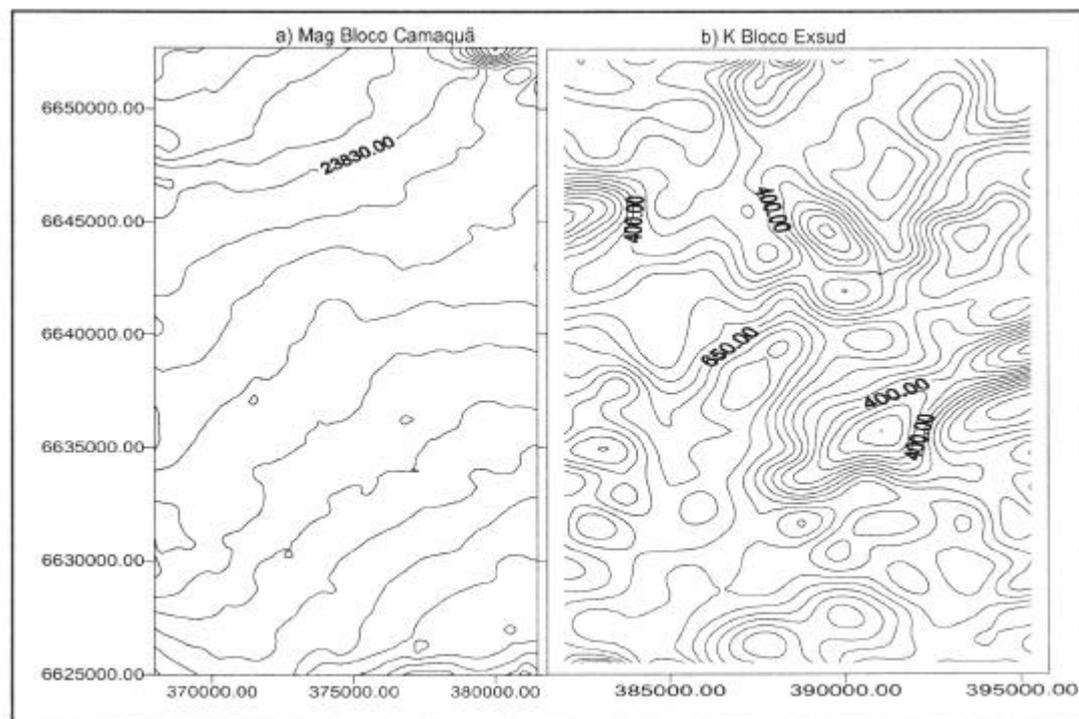


Figura 5.3 - Mapas de isovalores filtrados: a) Mag Bloco Camaquã; b) K Bloco Exsud.

A metodologia empregada nestas conversões foi semelhante àquela proposta por Carvalho, 1996. Basicamente, utilizou-se rotinas disponíveis no *software* Idrisi, e programas desenvolvidos na linguagem *basic*, consistindo das seguintes tarefas:

† Reamostragem dos valores da grade regular para tamanho de célula de 125x125, 90x90, e 30x30m. Este refinamento do *grid* foi feito com interpolador do tipo mínima curvatura e suavização por interpolação por *spline* cúbico, sendo os resultados armazenados no formato ASCII para serem posteriormente convertidos na forma de imagens de 8 bits, em diferentes resoluções espaciais;

† Remoção dos eixos X e Y dos *grids*;

† Criação do arquivo descritor da imagem;

† Quantização linear dos valores radiométricos para 256 níveis;

† Conversão dos valores para o sistema numérico *byte* e binário, e;

† Transposição das linhas e colunas da imagem.

Foram geradas imagens gamaespectrométricas dos elementos Th, U, K, e radiação total CT; imagens-razões Th/K, U/K e U/Th para os Blocos Camaquã e Exsud separadamente, e área total; e imagem Mag, equivalente ao campo magnético total para toda área de estudo.

Através de inspeção visual, verificou-se que as imagens geofísicas com valor de *pixel* reamostrado para 30x30m, não apresentaram modificações significativas nas feições que provavelmente representam a forma de anomalias geofísicas. Ao contrário do que acontece com a imagem TM, que sofre degradação dos valores espectrais ao ser reamostrada para um valor de *pixel* maior que 30x30m. Portanto, para o objetivo deste trabalho foi adotada a resolução de grade de 30m. No processo de reamostragem de tamanho de "*pixel*" para 30m foi feito o georreferenciamento da imagem geofísica, com base nas coordenadas UTM limites da área de estudo, e com o mesmo número de linhas e colunas da imagem TM.

5.4.2.6. Mosaico:

As imagens gamaespectrométricas dos Blocos Camaquã e Bloco Exsud foram unidas em uma única imagem, para permitir a integração com as imagens TM. Esse procedimento, entretanto, não apresentou bons resultados, pois algumas imagens mostraram diferenças marcantes dos isovalores radiométricos, especialmente no contato entre os dois blocos. Adotou-se desta forma as imagens radiométricas calibradas em relação à área total para o processamento e correlações com as imagens TM e a geologia local.

CAPÍTULO 6 - PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS

6.1. Introdução

As técnicas de processamento e análise de imagens digitais utilizadas nesta dissertação (Tab. 6.1), objetivaram a obtenção de imagens que possibilitassem a sua integração no Sistema Geográfico de Informações (SGI/INPE) e Sistema *Idrisi*, de forma a permitir a extração de informações morfológicas, geológico-estruturais e radiométricas da área de estudo.

Os planos de informações na forma vetorial, criados no SGI/INPE, e convertidos para a forma de imagem foram bastante úteis no reconhecimento e definição dos domínios geomorfológicos da área de estudo, e dos diversos padrões de lineamentos estruturais.

Tabela 6.1 - Principais técnicas de realce utilizadas no processamento e tratamento das imagens digitais.

Domínios	Tipos	Características
Espacial	Filtros Passa-baixa Filtros Passa-alta Filtros Direcionais	realça as baixas frequências realça as altas frequências realça bordas em determinadas direções
Esppectral	Ampliação Linear de Contraste Equalização de Histogramas Razão de bandas Análise por Componentes Principais Decorrelação	reescalonamento dos DN's a partir da equação da reta uniformização do histograma dos DN's da imagem divisão <i>pixel-a-pixel</i> de um par ou conjunto de bandas remoção da redundância espectral entre imagens multispectrais maximização da distribuição de cores na imagem

As técnicas de filtragens foram utilizadas para realçar a existência de gradientes de níveis de cinza nos limites entre duas áreas distintas, de maneira a indicar discontinuidades ou contatos litológicos, tais como, lineamentos e/ou feições de ruptura de relevo. Para isto, foram usados filtros passa-alta direcionais. Os filtros passa-baixa foram usados em algumas imagens para remoção de ruídos.

As técnicas de realce espectral, por sua vez, objetivaram a caracterização espectral e radiométrica das litologias presentes na área. A manipulação de contraste das diferentes bandas TM foi implementada através da ampliação linear de contraste e equalização de histogramas.

As operações aritméticas envolveram basicamente o método da razão de bandas, e a rotação espectral através da transformação por componentes principais e decorrelação.

O realce de cores nas imagens foi estabelecido através de composições coloridas no espaço de cores RGB (Red, Green e Blue), IHS (Intensidade, Hue=matiz, e Saturação) e decorrelação.

Os dados geofísicos na forma de imagens permitiram avaliar a contribuição de radioelementos sobre as rochas estudadas e, estabelecer a integração com os dados de sensoriamento remoto para fins de caracterização lito-estrutural e, diagnóstico de áreas favoráveis à prospecção mineral.

6.2. Dados Morfoestruturais

6.2.1. Introdução

Este item tem por objetivo a caracterização geomorfológica da área de estudo, através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, usando especificamente a geração de um Modelo Numérico do Terreno (MNT).

Com este propósito foram analisadas fotografias aéreas na escala 1:25.000, cartas topográficas na escala 1:50.000, cartas e secções geológicas. Essas informações foram correlacionadas com o MNT (Fig. 6.1) e MNT realçado por iluminação artificial de 45° na vertical e 135° na horizontal (Fig. 6.2).

A pesquisa geomorfológica dos produtos acima foi direcionada em uma primeira etapa para uma classificação morfoestrutural descritiva da área, segundo critérios estabelecidos em Thornbury (1954) e, em uma segunda etapa, para estabelecer um estudo geomorfológico explicativo da evolução, em termos do significado na paisagem, de superfícies de aplainamento de cimeira e interplanálticas identificadas na área segundo esquema regional de Ab' Saber (1969) e continental (King, 1967).

Deste modo, foi realizada a correlação dos domínios morfoestruturais identificados com a preservação das superfícies de aplainamento estabelecidas na região de estudo.

O termo Superfície Aplainada pode ser conceituada como: “*uma área onde os processos de desnudação geraram um plano topográfico discordante das estruturas localizadas acima do nível base regional, por processos epirogênicos*” (Pinto, 1988).

6.2.2. Classificação Morfoestrutural da Área e Correlação com as Superfícies de Aplainamento

Este estudo baseia-se no conceito de domínios morfoestruturais Thornbury (*op cit.*) e de superfícies de erosão definidas por Ab' Saber (*op cit.*) para o Rio Grande do Sul e por King (*op cit.*) no Brasil.

A Tabela 6.2 reproduz as definições clássicas para as superfícies de aplainamento na região de estudo.

Tabela 6.2 - Esquema das superfícies de aplainamento identificadas na área.

Idade relativa	Sup. de Cimeira no RS	Superfície. de Cimeira no Brasil	Superfície Interplanálticas no RS	Superfície Interplanáltica no Brasil
Quaternário	-----	-----	Pedimentos Recentes	Pedimentos Recentes
Neógeno	-----	-----	Campanha	Paraguassu
Paleógeno	Caçapava	Sul Americana	Cerro da Cadeia	Velhas

A metodologia de fotoanálise e fotointerpretação baseou-se nos critérios de Veneziani & Anjos (1981) para caracterização das imagens TM/LANDSAT e, em Soares & Fiori (1976) para as fotografias aéreas.

Os elementos morfoestruturais observados, dizem respeito principalmente, aos alinhamentos do relevo, lineações de relevo, vales estruturais, falhas, alinhamentos e lineações de drenagens.

A utilização de técnicas de fotoanálise e fotointerpretação de fotografias aéreas, imagens TM, e a confecção do Modelo Numérico do Terreno (MNT)(Fig. 6.1 e 6.2), permitiram caracterizar e identificar as principais feições de relevo, e individualizar quatro domínios morfoestruturais na área de estudo, cujas principais características do relevo e drenagem para as diversas litologias são representadas na Tabela 6.3.

Os planaltos caracterizam as feições marcantes na parte centro-sul da área, formados por rochas graníticas em diferentes níveis altimétricos. Outras feições são representadas por superfícies relativamente mais dissecadas, como: pedimentos interplanálticos em três níveis de dissecação (baixo, médio e alto); vales interplanálticos, nos entalhes profundos das drenagens principais; e, planícies aluviais formadas pelo acúmulo de sedimentos ao longo do principal arroio.

Em geral, a influência da componente lito-estrutural sobre os processos formadores do relevo da área é bastante evidente, em especial, sobre as rochas granitóides.

Capítulo 6 - Processamento e Interpretação de Imagens Digitais

Tabela 6.3 - Síntese das principais características de relevo e drenagens identificadas nas diferentes unidades litológicas, na área de estudo.

C a r a c.	Unidades Litoestratigráficas	Formação Serra	Rochas	riólitos Ana Dias	Rochas graníticas	Metagranitos	Filon. Blast. Cerro	Compl. Gran.gnáis.	Complexo gnáis.	Metanortosito	Suíte vulc. Várzea do
		Geral	sedimentares				Agudo	Pinheiro Machado	Arroio dos Ratos	Canivarita	Canivarita
	Domínios	III e IV	I, III e IV	II	I e II	I, II e III	III	II	II e III	III	III
D r e n a g e m	padrão	----	subdendrítico	----	retangular a angular	angular	angular	subparalelo a angular	subparalelo a angular	subdendrítico a subparalelo	subparalelo a angular
	densidade	----	baixa a média	----	média	média a alta	média a alta	média	média	média	baixa
	sinuosidade	----	mistos	----	mistos	mistos	mistos	mistos	mistos	mistos	mistos
	angularidade	----	baixa	----	média a alta	média	alta	média	média	média	média
	tropia	----	uni a bidirecional	----	bi a multidirecional	mutidirecional	multi	multi	multi	bidirecional	multi
	assimetria	----	fraca	----	fraca	forte	forte	fraca	fraca	fraca	fraca
		amplitude	187 m	1- 151m; 2- 499m; 3- 262m	442 m	4- 558m; 5- 332m; 6- 219m	7- 452m; 8- 381m	341 m	330 m	367 m	200 m	156 m
R e l e v o	expressão das colinas	pequeno	1-pequeno; 2-amplio; 3-pequeno	pequeno	4- amplo 5- amplo 6-pequeno	amplo	médio	amplo	amplo	amplo	médio
	forma dos topos	aplainados	aplainados	angulosos	arredondados	arredondados	angulosos	arredondados	arredondados	arredondados	arredondados
	perfil das vertentes	côncavo-covexo	convexo	convexo	convexo	convexo	côncavo-convexo	côncavo-convexo	côncavo-convexo	convexo	convexo
	vales	abertos	abertos	fechados	fechados	abertos	fechado	fechados	fechados	abertos	abertos
	alinhamentos	ausentes	ausentes	presentes	presentes	presentes	presentes	presentes	presentes	ausentes	presentes

Convenções: 1-Fm. Palermo; 2-Fm. Rio Bonito; 3-G. Itararé; 4- gr. Serra do Herval; 5-gr. Pitangueiras; 6- gr. Arroio Braço do Capivari; 7-mg. Arroio Francisquinho; 8- mg. Quitéria.

Os Domínios morfoestruturais identificados nas imagens foram os seguintes:

† **Domínio I** Este Domínio é representado por feições geomorfológicas denominadas descritivamente de Planaltos. É constituído principalmente por rochas graníticas que formam o relevo mais elevado (cotas entre 350 a 550 m) e, em áreas adjacentes, por rochas gnáissicas e metagranitóides. As formas que melhor caracterizam estas rochas são as colinas arredondadas (cupuliformes), com alguns topos aguçados aparecendo isoladamente configurando cristas. No modelo de elevação digital, foram individualizados 3 tipos de modelados: os Planaltos altos (Pa) com cotas altimétricas superiores à 450m; os Planaltos médios (Pm) entre 400 e 450m; e, os Planaltos baixos (Pb) com cotas entre 350 e 400 metros.

Localizadamente neste domínio, ocorrem áreas de topo plano ou incipientemente dissecados, como “morros testemunhos”, como o Cerro Grande à SW, que é formado por rochas sedimentares da Formação Rio Bonito. A presença destas formas erosionais ocorrem devido às diferenças litológicas, acompanhadas de zonas de falhas.

Esse domínio é correlacionado à Superfície de Cimeira de Caçapava do Sul (Ab’ Saber, *op cit.*), e à Superfície de Cimeira Sul Americana, King (*op cit.*), de idade Paleógena, conforme Tabela 6.2 e Figura 6.3.

† **Domínio II:** Caracterizado pelas rochas granito-gnáissicas, com cotas altimétricas intermediárias (entre 250 e 350 m). O relevo desta unidade está representado principalmente por colinas pouco arredondadas e alongadas, com declives médios a suaves e vertentes côncavo-convexas, resultantes da atuação de processos de aplainamentos não muito intensos, denominados Planaltos Residuais (Pr). Esse domínio é correlacionado às superfícies interplanálticas paleógenas, ou Superfície do Cerro da Cadeia (Ab’ Saber, *op cit.*) e Velhas (King, *op cit.*), de acordo com a Tabela 6.2 e Figura 6.3.

† **Domínio III:** Representado por terrenos de dissecção baixa a forte sobre metagranitóides, milonitos e rochas sedimentares, caracterizando uma típica superfície interplanáltica, com elevações entre 100 e 250m, e formas de relevo conhecidas como “coxilhas”, resultantes da atuação de processos erosionais subtropicais úmidos.

As formas do modelado observadas neste domínio são os relevos em pedimentos com pouco aprofundamento dos vales, com dissecção muito fraca a fraca (Pdb); pedimentos de média dissecção (Pdm); e, pedimentos situados nos vales, entre superfícies de cimeira, com forte aprofundamento (Pdf). Estas formas do relevo estão inseridas na Superfície de Campanha de Ab’ Saber (*op cit.*) e Paraguassu de King (*op cit.*), de idade neógena, conforme a Tabela 6.2 e Figura 6.3.

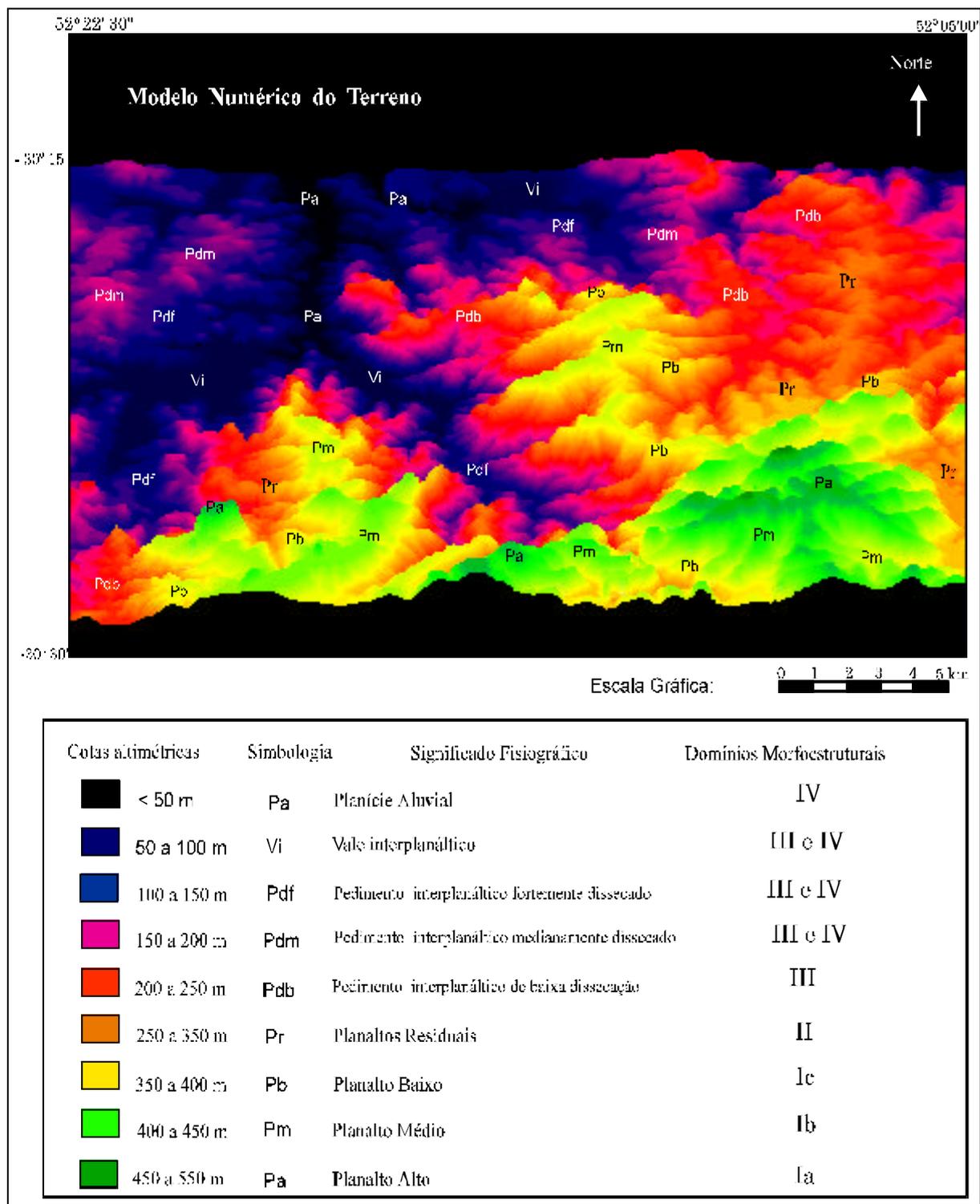


Figura 6.1- Modelo Numérico do Terreno visualizado tridimensionalmente, com as diferentes feições de relevo reconhecidas e os respectivos domínios morfoestruturais na área de Quitéria - Várzea do Capivarita, RS. As diferentes cores, caracterizam os diferentes níveis altimétricos resultantes dos processos formadores do relevo.

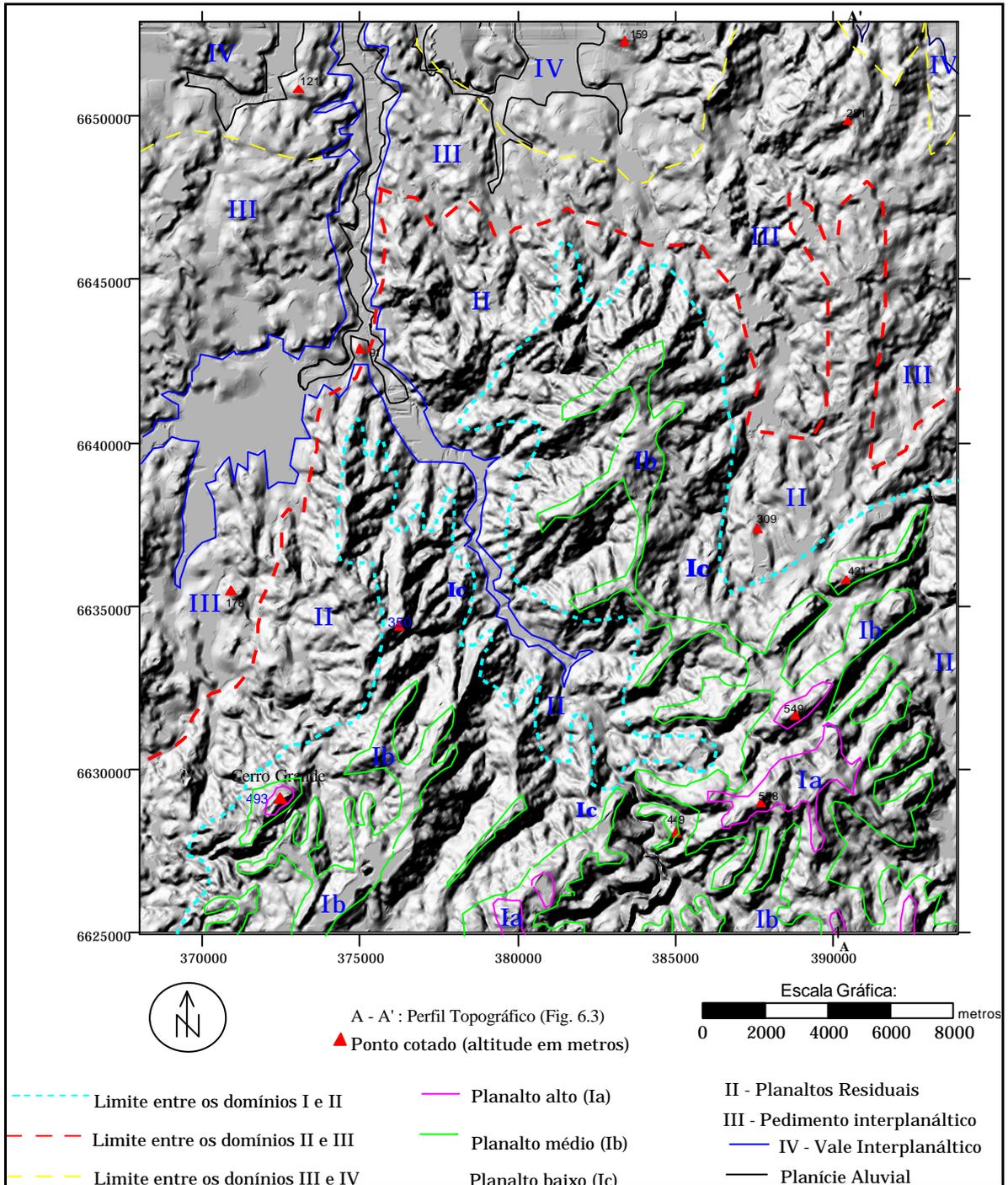


Figura 6.2 - Imagem de relevo obtida através da iluminação artificial do MNT, com ângulos de iluminação de 45° na vertical e 135° na horizontal. Esta imagem foi obtida pelo princípio do sombreamento artificial, que permite o modelamento tri-dimensional do terreno em diferentes ângulos de iluminação, independentemente da iluminação solar, com o resultado semelhante ao de fotografias aéreas. A figura permite uma visão semi-realística do terreno, sendo possível a determinação dos limites entre os domínios geomorfológicos na área de estudo.

† **Domínio IV:** O padrão de relevo que caracteriza esse domínio são as colinas alongadas de topo convexo (“coxilhas”), fortemente aplainadas, onde as cotas altimétricas podem variar desde menos de 50 metros, até o máximo de 200 metros em áreas isoladas. A forte dissecação que caracteriza este domínio atuou mais intensamente sobre as rochas sedimentares da Bacia do Paraná e intrusivas básicas do Cretáceo (“sills” de diabásio), que ocorrem à norte.

As formas do relevo inseridas neste domínio correspondem a pedimentos recentes, esculpidas no Quaternário (Tab. 6.2 e Fig. 6.3).

A confecção tridimensional do Modelo Numérico do Terreno (Fig. 6.1) e da imagem de relevo (Fig.6.2) obtida através de iluminação artificial, que simula a orientação solar sobre a superfície topográfica, permitiu a observação e análise em detalhe da morfologia, ou seja, das diferentes feições fisiográficas da área de estudo, de maneira mais prática e eficiente, em relação às técnicas usuais de interpretação de fotografias aéreas e cartas topográficas.

As áreas de Planalto Alto (Pa), em posição de topo, em geral formando cristas alongadas de direção NE-SW, constituem restos de superfícies pediplanas de cimeira, evidenciando o antigo e alto grau de atuação dos processos de aplainamento.

A passagem dos diferentes níveis altimétricos dos Planaltos, ocorre de forma transicional e às vezes de forma mais acentuada, através de quebras de relevo entre as rochas granitóides.

A preservação das rochas sedimentares, como “morros testemunhos” destes aplainamentos, como é o caso do Cerro Grande, seria devido principalmente aos intensos processos de ferrificação e silicificação sobre as mesmas (Ab’ Saber, *op cit.*).

Os níveis altimétricos intermediários comprovam a existência de aplainamentos parciais, pós-superfície de Caçapava do Sul e pré-superfície da Campanha. Os testemunho deste aplainamento são as rochas granitóides e gnáissicas (domínio II) de cotas relativamente mais elevadas, em relação às superfícies pediplanadas marginais da Superfície de Campanha.

Os terrenos situados na zona de transição entre as rochas do domínio II e as rochas sedimentares do domínio IV, representados na imagem de sombreamento da Figura 6.2 por morros arredondados e aplainados, caracterizam a Superfície de Campanha.

Segundo Ab’ Saber (*op cit.*), o processo de formação desta superfície de aplainamento, que ocorreu após o período de formação da Superfície do Cerro da Cadeia, foi desenvolvido por processos erosivos do tipo circundesnudação, seguido de um prolongado período de pediplanação exorréica.

Ainda de acordo com esse autor (Ab'Saber, *op cit.*), o processo de circundesnudação seria responsável pela escavação do compartimento interplanáltico. À pediplanação por sua vez, são atribuídos os processos de homogeneização dos níveis altimétricos e sua penetração parcial sobre as rochas da Bacia do Paraná (domínio IV), através de reescavações e erosões interiores.

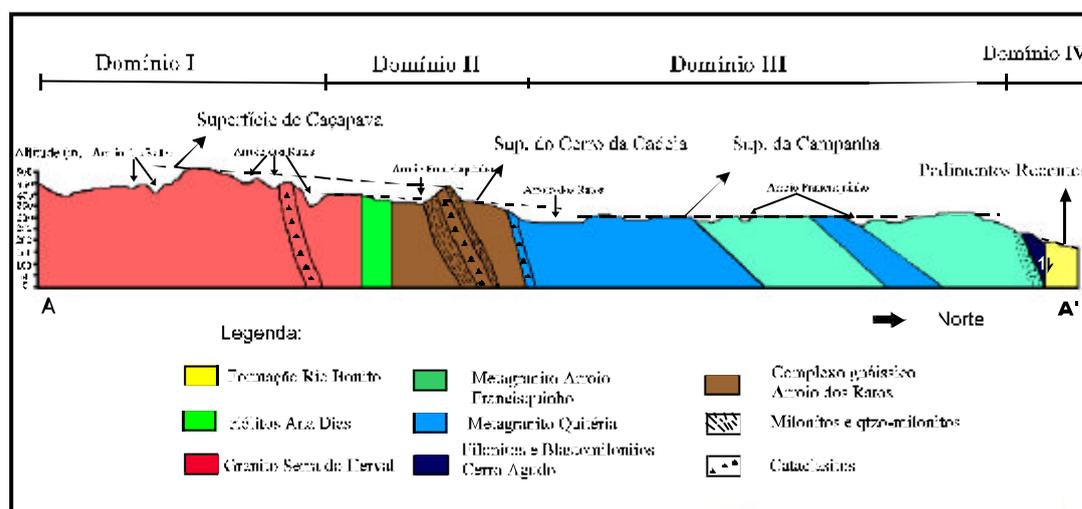


Figura 6.3 - Perfil topográfico representando os domínios morfoestruturais da área de estudo. A seção A - A' estende-se no sentido de sul para norte, estando demarcada no mapa geológico (Anexo 1) e na Figura 6.2. Escala horizontal aproximada do desenho: 1:200.000.

6.3. Dados Espectrais das Imagens TM

O processamento de imagens digitais de SR para a discriminação espectral de unidades litológicas é uma técnica muito eficaz em regiões áridas e semi-áridas, com pouca densidade de cobertura vegetal.

Em regiões tropicais e subtropicais, no entanto, ela é mais limitada. Neste sentido, várias técnicas de realce espectral precisam ser testadas e analisadas, na tentativa de se obter uma discriminação mais eficiente das litologias ocorrentes na área de estudo.

As seis bandas ópticas do sensor TM/LANDSAT-5 processadas nesta pesquisa, cobrem a porção visível do espectro eletromagnético (TM1, TM2 e TM3), o infravermelho muito próximo (TM4), e o infravermelho próximo (TM5 e TM7).

Nesta fase do trabalho, inicialmente, procedeu-se a análise estatística dos valores digitais das imagens TM/LANDSAT-5 (Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6). O cálculo estatístico, neste caso, foi baseado nas matrizes de variância/covariância e nos coeficientes de correlações entre as diferentes bandas.

A variância é definida pelo quadrado do desvio padrão do histograma de intensidade para cada banda e fornece a medida do contraste de cada banda espectral. A covariância, por sua vez, é a correlação entre cada par de bandas, sendo indicativa da redundância de informação existente entre as bandas. Os coeficientes de correlação são obtidos através da normalização da covariância, ou seja, pela divisão da covariância pelo produto dos desvios-padrão dos pares de bandas analisados (Crósta, 1992).

Na Tabela 6.5, a diagonal da matriz representa a variância de cada banda, e os valores vizinhos a covariância. O maior valor de variância é dado pela banda 5, ou seja, esta banda apresenta uma maior variação de níveis de cinza, sendo portanto, a banda com melhor capacidade de discernimento entre os diferentes alvos presentes na cena.

Tabela 6.4) Valores estatísticos para as bandas TM 1,2,3,4, 5 e 7.

bandas	DN min	DN máx	média	desvio padrão
1	0	232	76.100	11.4768
2	0	150	36.745	7.7800
3	0	255	37.146	13.2509
4	0	234	91.166	16.2380
5	0	255	106.36	33.2177
7	0	255	32.870	16.8958

Tabela 6.5) Matriz de variância-covariâncias das bandas TM, onde a diagonal representa a variância.

bandas	1	2	3	4	5	7
1	131.72	--	--	--	--	--
2	82.36	60.53	--	--	--	--
3	126.68	95.60	175.59	--	--	--
4	67.20	37.11	8.53	263.67	--	--
5	302.74	227.21	378.33	102.64	1103.4	--
7	141.12	106.57	198.64	-10.02	509.78	285.47

Tabela 6.6) Matriz dos coeficientes de correlação entre as bandas TM.

bandas	1	2	3	4	5	7
1	1.000000	--	--	--	--	--
2	0.922349	1.000000	--	--	--	--
3	0.833014	0.927296	1.000000	--	--	--
4	0.360613	0.293732	0.039655	1.000000	--	--
5	0.794106	0.879187	0.859524	0.190287	1.000000	--
7	0.727785	0.810723	0.887230	-0.036512	0.908305	1.000000

A inspeção visual das imagens originais mostrou que as bandas individuais 1, 2 e 3, apareciam muito escuras no monitor de vídeo, com pouco contraste, em decorrência dos baixos valores de níveis de cinza. Isto ocorre porque as imagens da região do visível são fortemente influenciadas pelo comportamento espectral da vegetação, que tem baixa reflectância neste intervalo espectral. Para aumentar o contraste dessas bandas foi aplicada a *Ampliação Linear de Contraste*, ou “*stretch*” linear. Essas bandas foram úteis para visualização de estradas, áreas urbanizadas e delimitação de corpos d’água.

Na banda 4, o contraste é relativamente maior, com uma radiância média-alta, destacando sobretudo o realce do relevo (Fig. 6.4). A vegetação, nessa banda, exerce um papel de auxílio ao foto-intérprete, pois a mesma passa a ser o componente espectral responsável pela acentuação de contraste do par face frontal clara/face oposta escura do relevo, que gera a sensação tridimensional do relevo (Meneses & Cobra, 1993).

Neste caso, também foi usada a técnica de ampliação linear, com valores de DN's ocupando todo intervalo de 256 níveis de cinza.

Figura 6.4 - Imagem do satélite TM/LANDSAT-5, banda 4, realçada com ampliação linear de contraste. Notar os lineamentos estruturais NE-SW, na porção SE, próximas a região de Quitéria. O traço é marcado por sulcos do relevo, realçados na imagem pelo sombreamento topográfico.

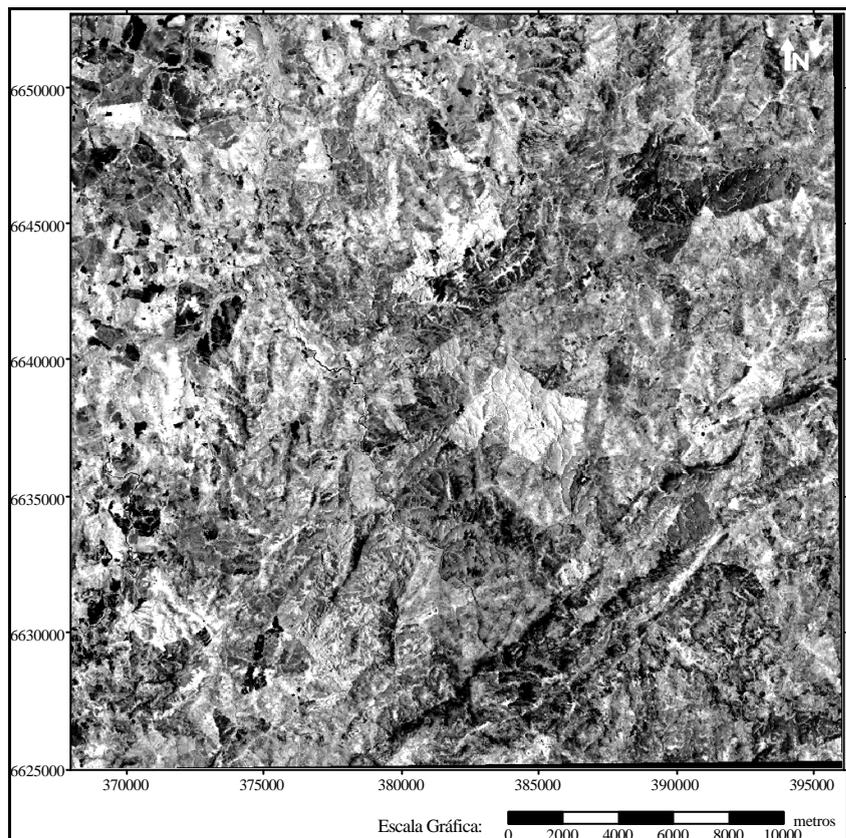
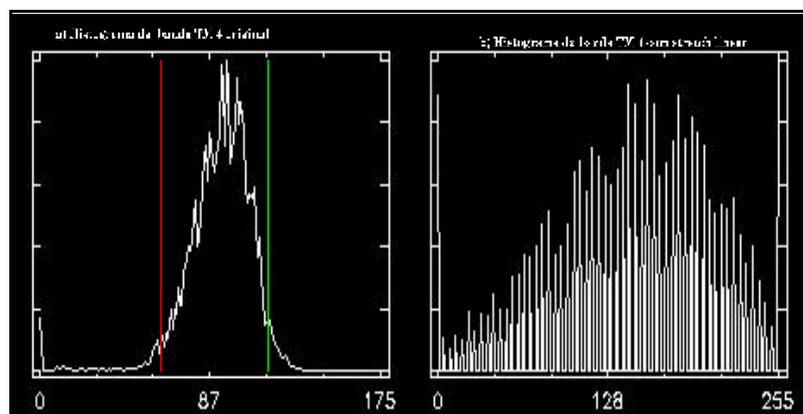


Figura 6.5 - Histogramas representando a distribuição dos DN's da banda 4 original (a), e após o *stretch* linear (b).



A banda 5 (Fig. 6.6), apresenta uma curva histogrâmica aproximadamente gaussiana, com média próxima a 128 e alta variância dos níveis de cinza, o que acarreta uma imagem com bom contraste espectral. A Figura 6.7, representa a curva histogrâmica dos DN's da imagem original e com *stretch* linear, com valores de corte mínimo e máximo originais de 48 e 177, respectivamente.

Esta imagem realça principalmente a vegetação e corpos d'água em tons escuros, solo exposto em tons esbranquiçados, padrões de drenagens e relevo.

Figura 6.6 - Imagem do satélite TM/LANDSAT-5, banda 5, realçada com ampliação linear de contraste, onde são identificados principalmente os corpos d'água e a vegetação em tons escuros, solo exposto em tons esbranquiçados, e os tipos e padrões de drenagens.

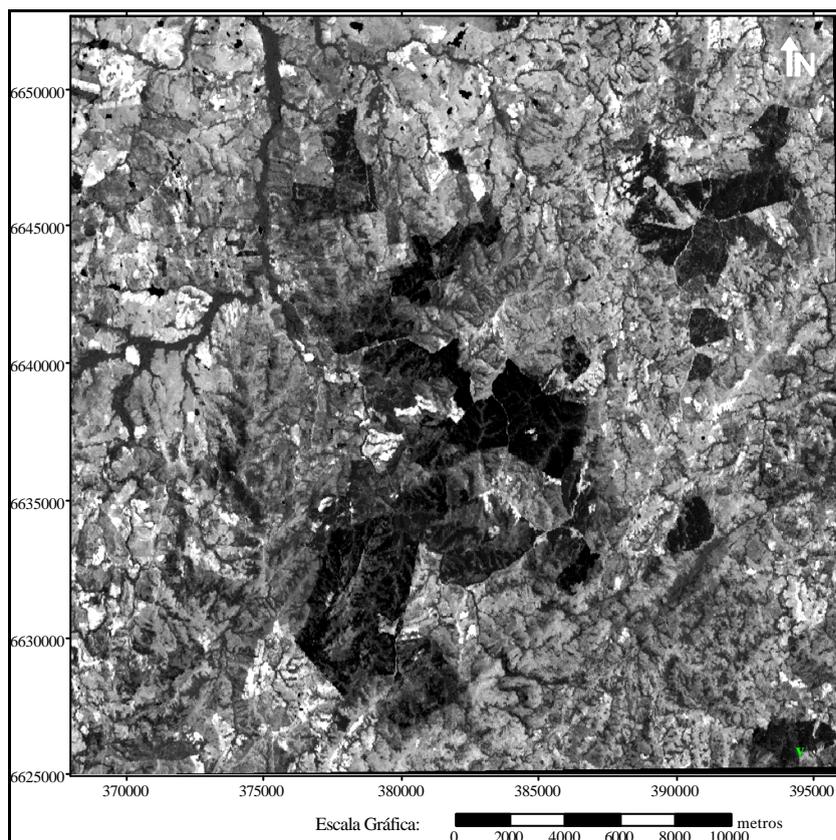
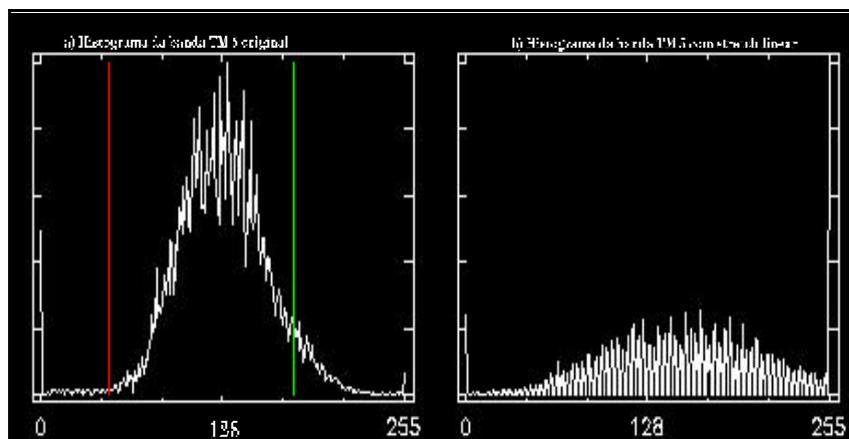


Figura 6.7 - Histogramas representando a distribuição dos DN's da banda 5 original (a), e após o *stretch* linear (b).



No caso da banda 7, as características visuais foram semelhantes à banda 5 com valores de radiância mais altos, dispensando técnicas de ampliação histogrâmica.

Alguns índices tem sido propostos na literatura, na tentativa de selecionar o melhor conjunto de bandas espectrais para a investigação de materiais geológicos, como, por exemplo: O *Optimum Index Factor (OIF)*, desenvolvido por Chaves *et al.*(1982); e o *index*, proposto por Crippen (1989).

Esses índices foram computados para todas as combinações possíveis entre as 6 bandas TM, utilizadas neste estudo.

O *OIF*, calcula qual o melhor triplete de bandas a ser usado em uma composição colorida, através do cálculo da razão entre o somatório dos desvios padrões das bandas pelo somatório dos coeficientes de correlação entre as bandas (equação 1). Neste caso, quanto maior o *OIF*, menor a correlação entre as bandas e melhor a composição colorida.

O *index* (equação 2), corresponde à raiz quadrada do determinante da matriz de correlações. Estes valores, foram comparados com os resultados obtidos a partir da análise visual das combinações entre bandas. Os produtos calculados encontram-se na Tabela 6.7.

Equação 1 :

$$OIF = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{r_{xy} + r_{xz} + r_{yz}}$$

Equação 2 :

$$index = \sqrt{1 + 2(r_{xy} \cdot r_{xz} \cdot r_{yz}) - r_{xy}^2 - r_{xz}^2 - r_{yz}^2}$$

onde: $\sigma_{x,y,z}$ = desvios padrões do triplete de bandas x, y e z; $r_{x,y,z}$ = coeficientes de correlações entre as bandas x, y e z.

Os resultados demonstram que composições envolvendo as bandas TM 4, 5 e 7, são as que melhor contribuem para a obtenção de informações espectrais, em vista da menor correlação entre as mesmas. O *OIF*, indica que a melhor composição é a 4-5-7, seguida da 3-4-5 e 3-4-7; o método do *index* ressalta as combinações entre as bandas TM 1-4-5, 1-4-7 e 2-3-7, como as melhores.

Muitas semelhanças entre estes dois métodos são observadas para as combinações que envolvem as bandas TM 1-2-3, 1-3-5 e 2-4-5; e grandes diferenças entre as bandas 2-3-7, 3-4-7 e 4-5-7.

Capítulo 6 - Processamento e Interpretação de Imagens Digitais

Tabela 6.7 - Valores dos índices calculados para as diferentes composições entre as bandas multiespectrais.

Combinações	OIF	rank	INDEX	rank	rank visual	Combinações	OIF	rank	INDEX	rank	rank visual
4/5/7	62,54	1	0,35	9	6	1/3/5	23,30	11	0,27	12	--
3/4/5	57,53	2	0,48	4	2	1/2/4	22,50	12	0,36	8	--
3/4/7	52,11	3	0,32	11	3	2/5/7	22,28	13	0,19	17	--
1/4/5	45,30	4	0,57	1	4	1/2/5	20,22	14	0,18	18	--
1/4/7	42,41	5	0,56	2	5	2/3/5	20,88	15	0,17	19	--
2/4/5	41,99	6	0,44	6	1	1/3/7	17,00	16	0,33	10	--
2/4/7	38,30	7	0,47	5	--	2/3/4	16,48	17	0,27	13	--
1/3/4	33,19	8	0,42	7	--	1/2/7	14,69	18	0,22	15	--
1/5/7	25,35	9	0,25	14	--	2/3/7	14,45	19	0,54	3	--
3/5/7	23,83	10	0,19	16	--	1/2/3	12,12	20	0,14	20	--

As principais características observadas nas imagens TM para fins geológicos, são:

? As feições espectrais nas bandas do sensor TM são associadas, principalmente, com a alteração de feldspatos (caolinização e sericitização) e biotitas (cloritização);

? A feição mais comumente observada para solos e rochas intemperizadas é a abrupta queda de reflectância a partir do visível para os comprimentos de onda menores, sendo freqüente nos minerais de alteração, óxidos e hidróxidos de ferro, e é típica para diagnosticar a presença de óxidos nas rochas, mesmo que em reduzidas porcentagens (Meneses & Ferreira Jr., 1995). Isto significa que altos valores de biotita e anfibólios em granitos intemperizados, por exemplo, diminui a reflectância da rocha nas bandas TM 1, 2, 3 e 4;

? Feldspatos em geral não possuem feições espectrais características, e o quartzo é mais reflectivo que outros minerais em rochas graníticas (Hunt & Salisbury, 1970). Ou seja, o aumento no conteúdo de quartzo nas rochas, aumenta a reflectância das mesmas;

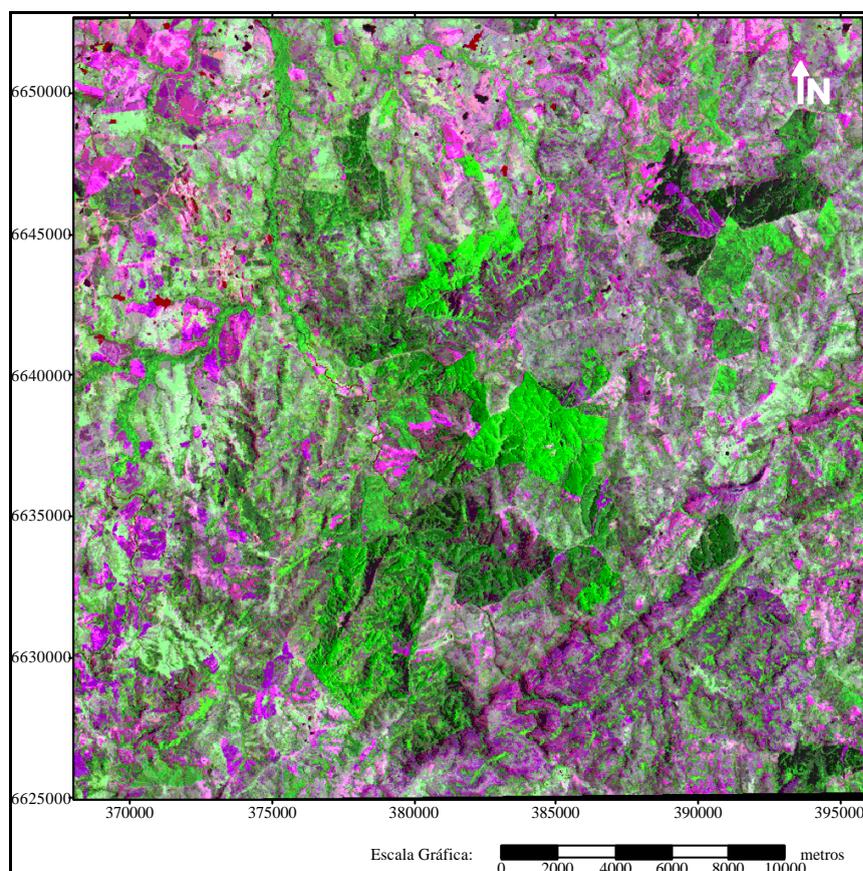
? As rochas graníticas inalteradas são caracterizadas por fracas feições de absorção nas bandas TM4 e TM7, devido ao baixo grau de intemperismo superficial. A alteração e intemperismo das rochas graníticas são caracterizadas por feições muito fortes de absorção na bandas TM 2, 3 e 4, devido à presença de Fe⁺³ em assembléias de limonita-hematita, e moderada a forte absorção na banda TM7 devido a caolinita (Abrams *apud* El Rakaiby, 1995);

? Nas imagens TM, as áreas de ocorrência de intrusões graníticas, por exemplo, podem ser reconhecidas por diferentes características, tais como: cor, expressão topográfica, forma, textura, em função da composição química e mineralógica, feições de alteração, relações de contato, efeitos de intemperismo e lineamentos estruturais.

A composição colorida das bandas TM 2, 4 e 5 da área de estudo, associadas aos canais BGR respectivamente (Fig. 6.8), permitiu identificar o comportamento espectral dos alvos da

superfície, como por exemplo a vegetação mais espessa em diferentes tons de verde; solo exposto em tons de magenta; e corpos hídricos em preto e vermelho.

Figura 6.8 - Composição colorida BGR, com as bandas 2, 4 e 5, mapeando a vegetação em diferentes tons de verde, corpos d'água em preto e vermelho, e solo exposto e rochas em tons de magenta, com base no comportamento espectral; e o relevo granítico à SE e sedimentar à norte, com base na textura e expressão topográfica.



Com relação a distinção de tipos de rocha, pôde-se com base no padrão textural desta imagem, separar grosseiramente a área em duas porções: Na porção norte, a textura mais lisa na imagem é estabelecida pelo relevo plano, associado às rochas sedimentares. Na parte SE, o relevo granítico, mais acidentado, confere uma textura rugosa, claramente identificável, destacando ainda, as estruturas NE-SW.

O método conhecido como *Razão de Bandas* mostrou-se eficaz no realce de áreas de extração mineral (pedreiras de mármore e caolim), comprovadas em campo; áreas graníticas jovens; e, áreas de diferentes densidades de cobertura vegetal.

Nesta dissertação, foram geradas todas as razões possíveis entre as 6 bandas TM, e selecionadas as razões 2/4, 3/2, 4/3, 5/3, 5/4, 5/7, 7/1, 7/3. A razão 4/3 foi usada para analisar a influência da cobertura vegetal sobre o comportamento espectral de solos e rochas da área. A razão 5/7 foi importante para caracterizar a presença de argilo minerais, em decorrência da alta reflectância destes materiais na banda 5 e absorção na 7.

Composições coloridas com imagens razão de bandas, foram utilizadas no intuito de suavizar a sombra topográfica e realçar os materiais geológicos e a vegetação.

A técnica CRCI (*Coloured Ratio Composite Image*) semelhante ao proposto por El Rakaiby (*op cit.*), foi testada com bons resultados, sobretudo para as rochas graníticas, quando combinadas as razões $TM2/TM4 * TM7$ no canal R (red), $TM5/TM7 * TM3$ no canal G (green), e $TM5/TM3 * TM7$ no canal B (blue) (Fig.6.9).

Para preservar as feições topográficas, juntamente com o realce de cores, cada banda da imagem razão foi produzida pela divisão do DN de um pixel, de uma banda, pelo DN do mesmo pixel em outra banda, e o produto foi multiplicado pelo DN do mesmo pixel, tomado em uma terceira banda.

Algumas das características observadas nas três razões foram:

† Na razão $2/4 * 7$, no canal R, os altos valores de minerais de ferro intemperizados, resultam em cores vermelho claro, nas rochas mais máficas; e vermelho escuro para as rochas mais ácidas;

† A razão $5/7 * 3$, colocada no canal G, mostrou uma assinatura mais clara para rochas alteradas, e verde-escuro para rochas inalteradas;

† A razão $5/3 * 7$, no canal B, em rochas com alta quantidade de minerais ferro-magnesianos, aparece na cor azul mais claro, que naquelas rochas com quantidade menor ou desprezível de minerais de Fe-Mn intemperizados.

A cor nestas composições é um indicador da presença ou ausência de óxidos de Fe e Mg, minerais de alteração e conteúdo de sílica de intrusões graníticas.

Na Figura 6.9, a cor magenta, que recobre praticamente todo o Granito Serra do Herval, na parte SW da área, é reflexo do baixo conteúdo de Fe (1,6%), MgO (0,13%) e alto conteúdo de sílica destas rochas (75,9%), além do grau de exposição de afloramentos rochosos.

Estas características, associada a expressão topográfica e textura grosseira na imagem da Figura 6.9, permitiram a delimitação dos contatos do Granito Serra do Herval, em relação às demais rochas.

A cor ciano, que predomina em faixas NE sobre os milonitos, está relacionada principalmente à presença de minerais ferro-magnesianos intemperizados.

Invertendo-se os canais R e B, da composição anterior, mapeou-se com excelentes resultados os tipos de vegetação da área de estudo, em diferentes tons de verde.

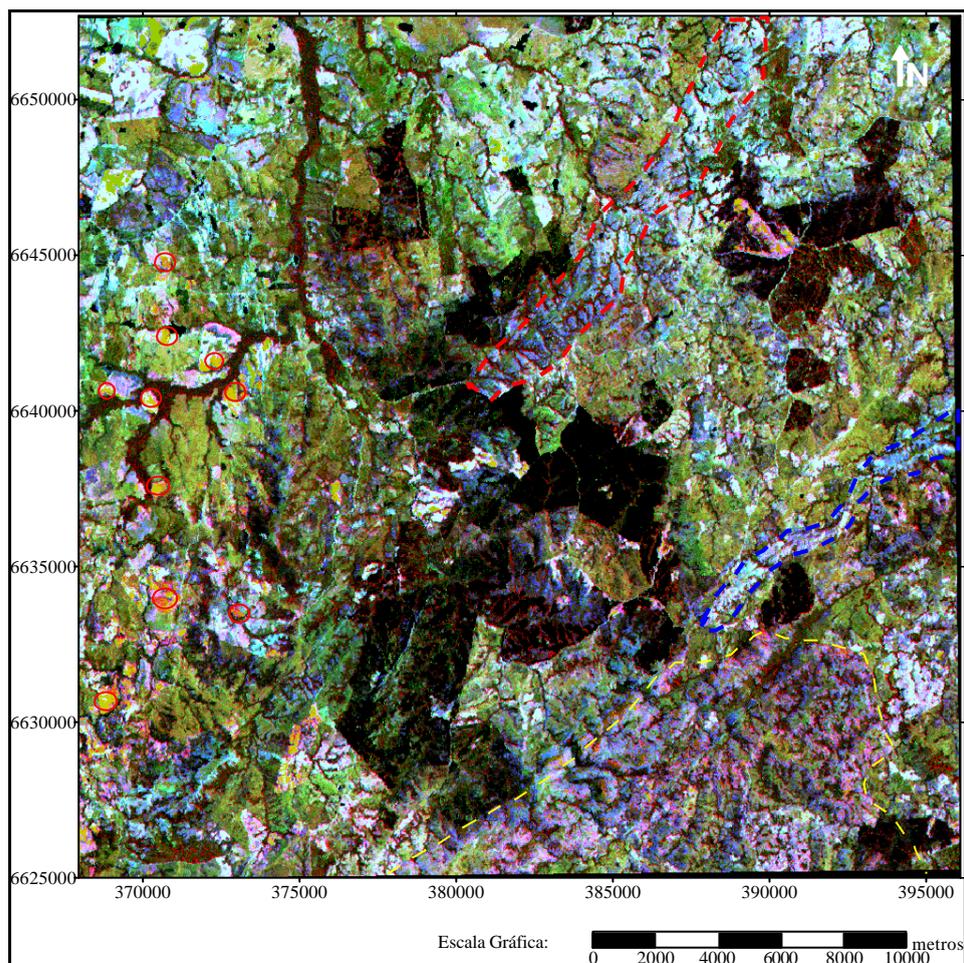


Figura 6.9 - Composição colorida RGB com as imagens razões $2/4*7$, $5/7*3$, $5/3*7$. Em tracejado amarelo foi delimitado o Granito Serra do Herval. A linha tracejada em azul escuro limita os milonitos do Cerro dos Burros; e em tracejado vermelho os milonitos e blastomilonitos Cerro Agudo. Os círculos vermelhos destacam as áreas de caulinitização.

Na imagem obtida (Fig. 6.10), o verde-escuro identifica as áreas reflorestadas; em verde-médio a mata de galeria e mata nativa; e, em tons verde-claro os campos, característicos dos terrenos onde predominam as “coxilhas”.

A operação aritmética entre bandas, neste caso, proporciona também o diagnóstico de áreas de exposição de solos na coloração magenta-claro a tons azulados, especialmente associada às zonas de degradação por atividades de extração mineral na parte oeste da área.

A tonalidade magenta mais escuro, predominante na porção SE da área, corresponde ao relevo mais acidentado do Granito Serra do Herval, com a ocorrência de inúmeros afloramentos da rocha granítica.

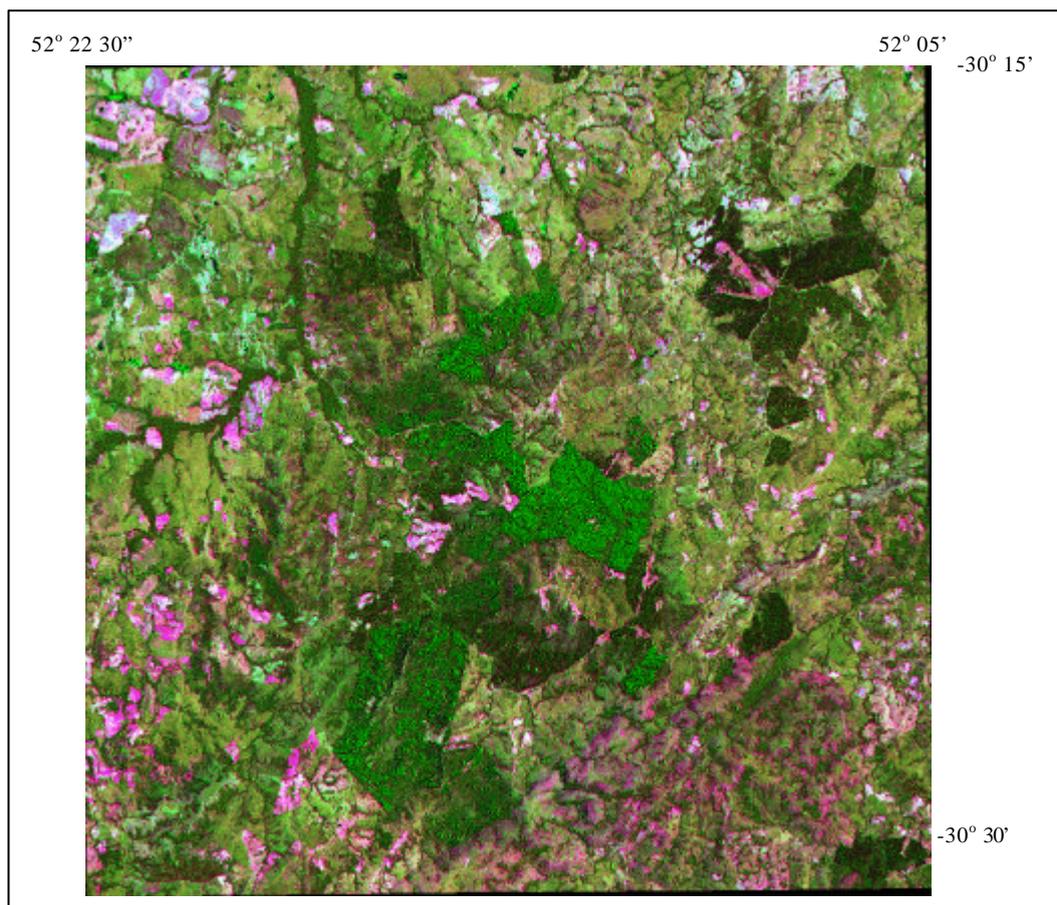


Figura 6.10 - Composição colorida RGB com as imagens razões, 5/3*7, 5/7*3 e 2/4*7. O verde-escuro identifica as áreas reflorestadas; em verde-médio a mata de galeria e mata nativa; e, em tons verde claro a ocorrência de vegetação rala ou campos. Em tons de magenta os solos expostos e afloramentos.

A *Análise por Componentes Principais* (APC) aplicada às imagens multiespectrais, teve como objetivo a redução da redundância espectral entre os dados das imagens multiespectrais.

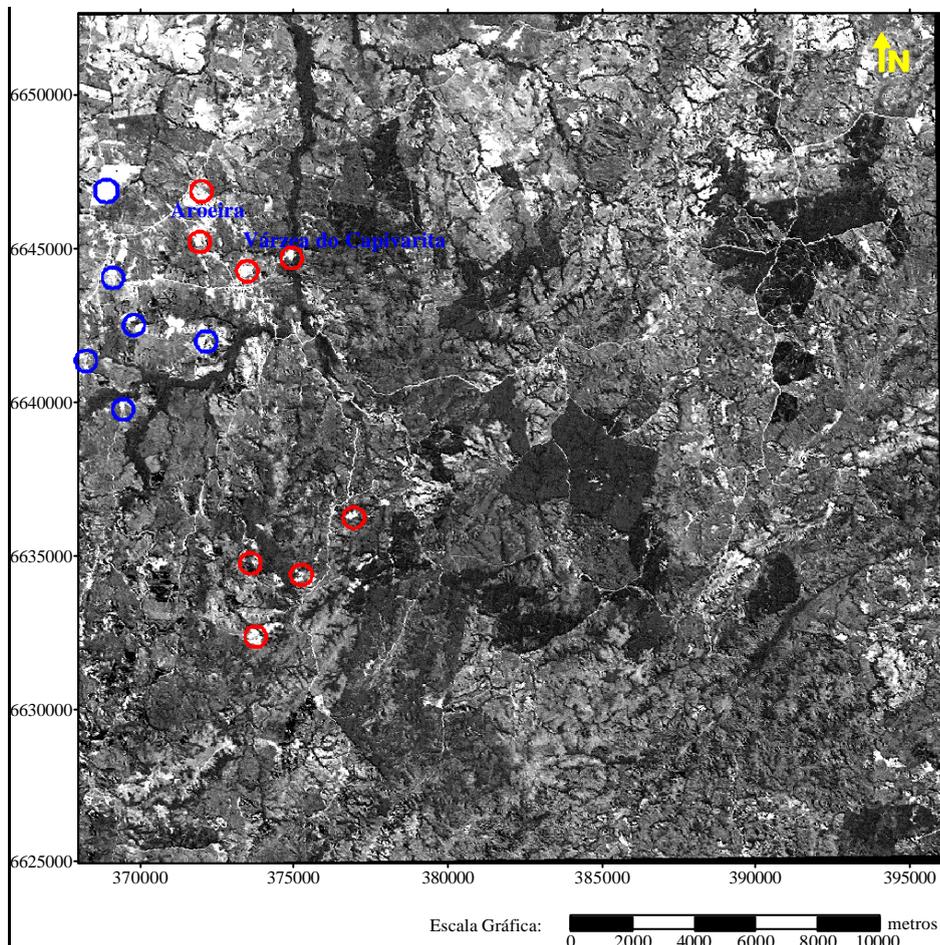
Os resultados da aplicação dessa técnica mostrou que a 1ª CP (componente principal) detêm 80,85% da informação da imagem, a 2ª CP 13,84%, a 3ª CP 3,20%, a 4ª CP 1,29%, a 5ª CP 0,69% e, a 6ª CP 0,13%.

A soma das três primeiras componentes totalizam 97,89% da variância total da imagem, em decorrência principalmente do comportamento espectral da vegetação, do albedo e sombreamento, que são parâmetros comuns à todas as bandas.

Visualmente, a melhor resposta foi obtida com a 1ª CP (imagem albedo) que resulta em uma imagem com ótimo contraste, muito parecida com a TM5. Essas imagens foram reservadas para serem utilizadas no processo de integração com as imagens geofísicas, devido a sua reduzida correlação espectral entre as bandas.

A técnica de *Decorrelação*, que é uma transformação por componentes principais, seguido por equalização de variâncias e uma rotação que é inversa a da rotação usada nas componentes principais, visou principalmente o realce da distribuição de cores nas composições coloridas selecionadas.

Figura 6.11 - Imagem resultante da decorrelação das bandas TM 3-4-7, visualizada a primeira componente no canal R, em escala de níveis de cinza. As áreas marcadas por círculos azuis correspondem a locais de extração de caolim e os círculos vermelhos, indicam extração de mármore, próximos a Aroeira e Várzea do Capivarita, e mais ao sul, no gP e nos contatos entre o gP e mgAF.



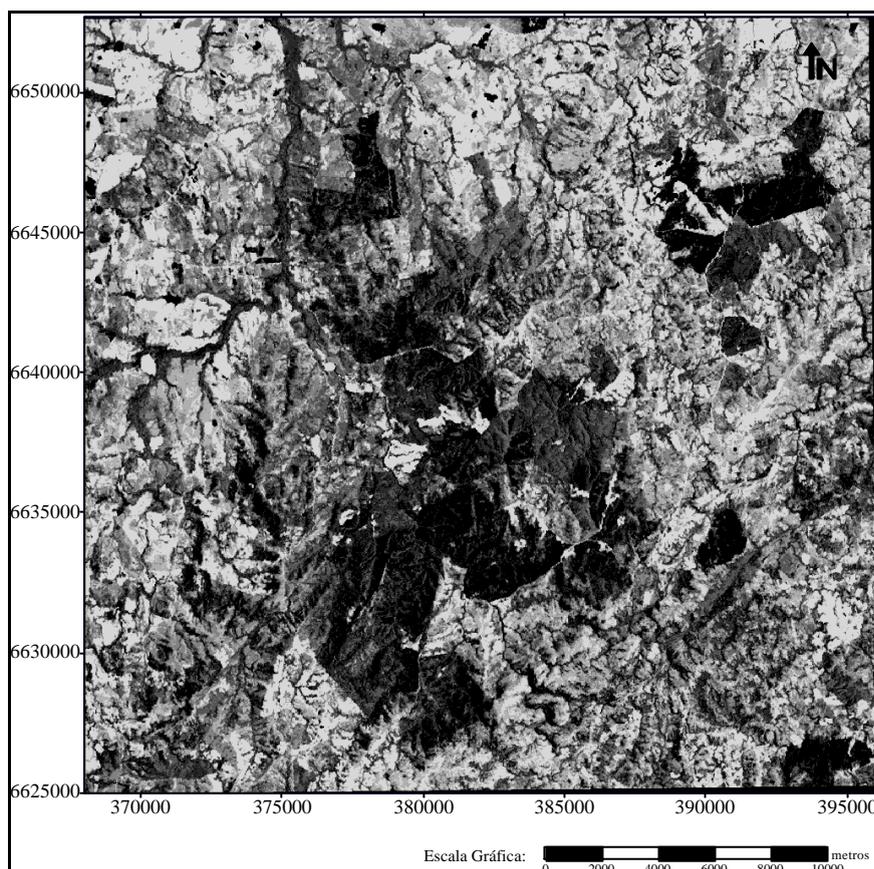
As relações de cores das bandas originais, neste caso, são preservadas, ou seja, os valores de matiz não são distorcidos, ao contrário do que ocorre na APC. Isto é importante, pois facilita o entendimento do comportamento espectral dos materiais, uma vez que as cores estão diretamente relacionadas com a reflectância dos alvos (Meneses *et al.* 1995).

A primeira componente resultante da decorrelação da composição das bandas 347, mostrada em tons de cinza (Fig. 6.11), foi bastante útil na visualização de áreas de alteração de rochas, áreas urbanizadas e de extração mineral. Foi possível nessa imagem o mapeamento de minas de extração de caolim junto ao Metanortosito Capivarita, na porção oeste da área; e mármore intercalados na Suíte Metamórfica Várzea do Capivarita, nas proximidades das cidades de Várzea do Capivarita e Aroeira, e mais ao sul, englobados no Granito Pitangueiras e junto aos contatos deste último com o Metagranito Arroio Francisquinho.

As composições das bandas 3-4-7, 3-4-5 e 1-4-7 geradas por decorrelação foram as mais indicadas para a observação de feições de relevo e lineamentos estruturais. Estas imagens foram empregadas na transformação IHS com as imagens geofísicas.

A técnica IHS foi usada para produzir uma imagem-matiz RGB (Fig. 6.12), conforme descrito por Liu & Moore (1990), na tentativa de realce de assinaturas espectrais e supressão da sombra topográfica .

Figura 6.12 - Imagem-matiz derivada a partir de três composições coloridas RGB, transformadas via IHS. Esta imagem tem como característica a supressão da sombra topográfica ocasionada pelo relevo.



Para este procedimento foram utilizadas as composições menos correlacionadas, indicadas pelo *OIF* (RGB 457, RGB 345 e RGB 347). Esses tripletes foram convertidos para o espaço IHS, produzindo 9 novas imagens correspondendo as variáveis I, H e S.

As 3 imagens H resultantes foram a seguir reunidas em uma nova composição do tipo HRGB (Liu & Moore *op cit.*), que reúne desta forma as informações espectrais das nove bandas originais. O produto final mostra excelente realce espectral em comparação com as bandas originais, sendo apropriado seu uso no processo de integração com outras imagens, pelo fato de eliminar as interferências do sombreamento topográfico.

Isto ocorre porque os valores dos “pixels” na imagem-matiz são independentes da iluminação e relacionadas apenas com a forma da assinatura espectral das três bandas TM envolvidas no processamento.

6.4. Dados Geológicos - Estruturais

A análise de lineamentos geológicos através de técnicas de processamento e tratamento de imagens é uma ferramenta eficaz na caracterização tectono-estrutural, para fins de mapeamento geológico, em especial, em zonas de cisalhamento.

A tendência espacial das estruturas lineares, particularmente em uma dada direção, possui grande importância na interpretação estrutural, tanto no que se refere às morfoestruturas, quanto às informações do caráter deformacional e de suas zonas preferencias de atuação de esforços (Frasca, 1996).

Podemos considerar um lineamento, como sendo uma feição linear (reta ou curva) de uma dada superfície, que reflete um fenômeno geológico de subsuperfície. Essas feições, em geral, são definidas por cristas, vales ou linhas de escarpas do relevo, padrões de drenagem, bandamentos litológicos ou mesmo padrões de vegetação.

Os lineamentos podem ser geneticamente classificados em dois grandes grupos (*cf.* Strieder & Amaro, 1993.):

† Lineamentos associados com estruturas penetrativas, os quais desenvolvem feições geomorfológicas positivas e negativas em um padrão linear ou curvo, de pequenas dimensões. Estes, são geralmente associados a acamadamento, bandamento composicional/xistosidade e foliações cataclásticas-miloníticas;

† Lineamentos associados a estruturas rúpteis, geralmente expressos como feições geomorfológicas negativas, as quais freqüentemente truncam limites litológicos, sendo em geral, retilíneas ou levemente curvadas, e de maior extensão. Em alguns casos, essas estruturas podem vir a ser penetrativas, em decorrência da componente dúctil de deformação que porventura exista. Exemplos deste tipo de lineamentos são os traços de fratura (juntas e falhas).

As imagens utilizadas, nesta etapa, foram as bandas individuais TM 4 e TM 5 originais e realçadas por Ampliação Linear de Contraste (ALC); a banda TM 4 processada com filtro passa-alta direcional; imagens geradas da Transformação por Componentes Principais (CP1); imagens decorrelacionadas; imagem-matiz obtida através da transformação IHS; imagens de relevo do MNT com iluminação artificial em diferentes ângulos; e, ainda, a imagem do mapa geológico-estrutural (Anexo 1) e interpretação de fotografias aéreas.

A análise consistiu, inicialmente, no traçado das feições lineares sobre as imagens e fotografias aéreas, na forma de “overlays”, seguido da digitalização via SGI para geração de mapas de lineamentos.

Na fotointerpretação da imagens, convencionou-se de fotolineações as feições associadas

aos lineamentos do tipo 1, e fotolineamentos aquelas correlacionadas aos lineamentos do tipo 2.

Os principais atributos analisados nas feições lineares foram: a posição espacial, a direção, o comprimento, a curvatura, e a densidade de ocorrência. A quantificação desses atributos foi realizada através de abordagem estatística, utilizando-se o módulo Análise de Lineamentos do programa SGI/SITIM do INPE.

A utilização de filtros digitais foram bastante úteis no realce dos lineamentos principais, pois os mesmos são marcados por mudanças bruscas na variação de níveis de cinza na imagem TM. A extração de lineamentos sobre as imagens filtradas foi feita de modo interativo com as imagens TM originais, imagens de relevo artificial e fotografias aéreas.

Os filtros passa-alta foram usados para realçar lineamentos geológicos identificados pelas feições de sombreamento associados ao relevo e lineações de drenagem. Esses filtros atribuem valores de nível de cinza para os “pixels” da cena original, em relação a uma média ponderada dos “pixels” vizinhos. Filtros unidirecionais foram implementados de maneira a realçar bordas em uma dada direção. Os filtros multi-direcionais, por sua vez, utilizam um máscara de pesos diferenciados, com valores indicativos da posição do “pixel” em relação à direção considerada.

No presente caso foram testadas diferentes máscaras, enfatizando a direção NE-SW, concordante com as maiores estruturas observadas na área. Os melhores resultados das filtragens sobre as imagens TM foram conseguidos com filtros multi-direcionais de ordem 5x5 e 7x7 (Fig. 6.13a e b), sobre a banda TM 4, que permitiram o realce dos lineamentos estruturais de maior porte presentes na área teste. O resultado destas filtragens sobre a imagem de satélite, está ilustrado na Figura 6.14.

a) Matriz 5x5.

5	4	3	2	1
4	3	2	1	0
3	2	1	0	-1
2	1	0	-1	-2
1	0	-1	-2	-3
0	-1	-2	-3	-4
-1	-2	-3	-4	-5

b) Matriz 7x7.

6	5	4	3	2	1	0
5	4	3	2	1	0	-1
4	3	2	1	0	-1	-2
3	2	1	0	-1	-2	-3
2	1	0	-1	-2	-3	-4
1	0	-1	-2	-3	-4	-5
0	-1	-2	-3	-4	-5	-6

Figura 6.13- Matrizes de pesos para filtros 5x5 (a) e 7x7 (b), multi-direcionais, modificados de Araújo & Carvalho (1994).

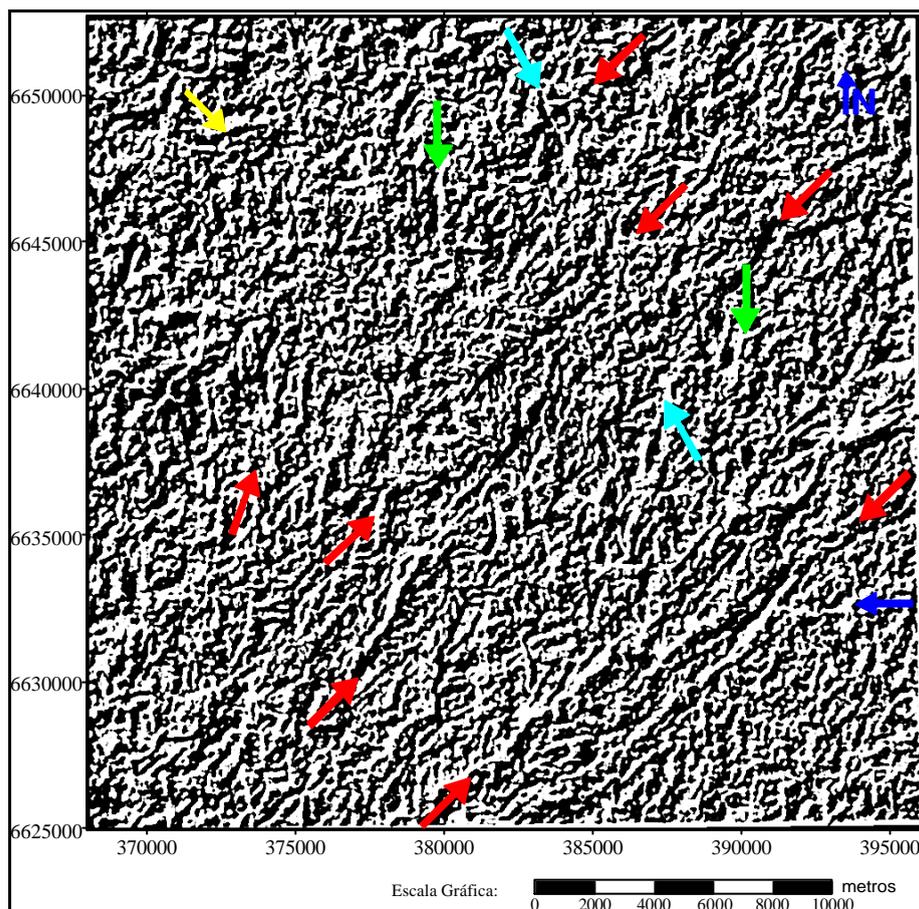


Figura 6.14 - Banda TM 4 com aplicação de filtro de convolução 7x7, multi-direcional. A seta amarela indica a direção de iluminação (SE), as setas vermelhas destacam o realce de estruturas na direção NE-SW, setas verdes N-S, azul E-W, e azul claro NW-SE.

A imagem de relevo por iluminação artificial em diferentes ângulos de iluminação, obtida a partir do Modelo Numérico do Terreno (Fig 6.2), mostrou-se bastante útil em trabalhos desta natureza, pois esta imagem possibilita a demarcação de feições lineares e alinhamentos de relevo sobre cristas e vales; e feições lineares e alinhamentos de drenagem através dos canais de drenagem, facilmente identificadas pela textura diferenciável nas imagens digitais.

Desta maneira, foram traçados e digitalizados via SGI, as feições que seguramente correspondem às feições geomorfológicas e geológicas existentes no terreno. Os padrões de orientação das feições lineares foram analisados através do ângulo planar entre essas feições e o norte geográfico.

Um total de 2686 lineamentos foram extraídos das imagens, e analisados com base aos aspectos de frequência relativa, direção média e comprimento médio (Tab. 6.8). Esses dados permitiram, também, a confecção dos diagramas de rosetas (Fig. 6.15) para as diferentes imagens, mapeando as orientações preferenciais para a área de estudo.

Capítulo 6 - Processamento e Interpretação de Imagens Digitais

Tabela 6.8- Quadro demonstrativo dos resultados obtidos da extração de lineamentos da imagem do mapa geológico, das imagens TM, e da imagem de relevo sombreado com diferentes ângulos de iluminação.

Diagrama	Número de medidas	% máx	% mín	Azimute médio	Comp. médio	fonte
a	184	10.9	2.9	27.4	1790.1	mapa geo
b	167	7.5	3.1	58.6	.....	mapa geo
c	642	6.4	2.8	7.9	1476.9	imagem TM
d	356	7.9	2.8	161.78	1590.6	ângulo de iluminação H:045 V:45
—	405	8.2	2.1	30.7	1297.5	ângulo de iluminação H:335 V:45
e	267	9.7	2.9	29.4	1949.2	ângulo de iluminação H:135 V:45
f	337	5.9	2.8	10.7	1558.2	ângulo de iluminação H:090 V:45
—	318	7.5	2.8	46.0	1312.7	ângulo de iluminação H:270 V:45

A partir desses produtos foi possível a identificação dos principais sistemas de lineamentos, e a correlação com medidas de campo realizadas em trabalhos anteriores, para a área em questão (Tab. 6.9).

O sistema principal possui “*trend*” NE-SW, com direção principal entre N30E e N55E, que seria originado pelas deformações de caráter transcorrente “D2” descritas por Fernandes *et al.* (1990), e reativações posteriores das zonas de cisalhamento sob condições frágil-dúcteis.

Esse sistema é caracterizado pelo predomínio de fotolineações, ou seja, lineamentos de pequeno comprimento e traçado retilíneo, identificados nas imagens TM, imagem de relevo com sombreado artificial, e fotografias aéreas pelos sulcos no relevo e textura fina de drenagem sobre os metagranitos.

Tabela 6.9 - Sistemas de lineamentos identificados na área de estudo através da análise de lineamentos de imagens TM, imagens de sombreado artificial e imagem do mapa geológico.

Sistemas	N - S	NE - SW		NW - SE		E - W	
Subsistemas	N10W - N20E	N20E - N40E	N40E - N70E	N10W - N30W	N30W - N60W	N70E - N90E	N60W - N90W
Direção média	N06E	N31E	N54E	N30W	N45W	N80E	N76W
Número de lineamentos	632	373	590	207	465	155	264
Porcentagem	23.5%	13.9%	22.0%	7.7%	17.3%	5.8%	9.8%
Comprimento médio (m)	1634.0	1666.3	1714.0	1534.0	1650.0	1288.5	1361.5
Total de lineamentos	632	963		672		419	
Porcentagem total	23.5%	35.9%		25.0%		15.6%	

Os lineamentos NE-SW, coincidem com a localização de extensas faixas de filonitos e milonitos que desenvolveram-se por deformação progressiva das unidades pré-existentes e, sobre os granitóides sin-transcorrentes (mgAF e mgQ) ao longo da Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu.

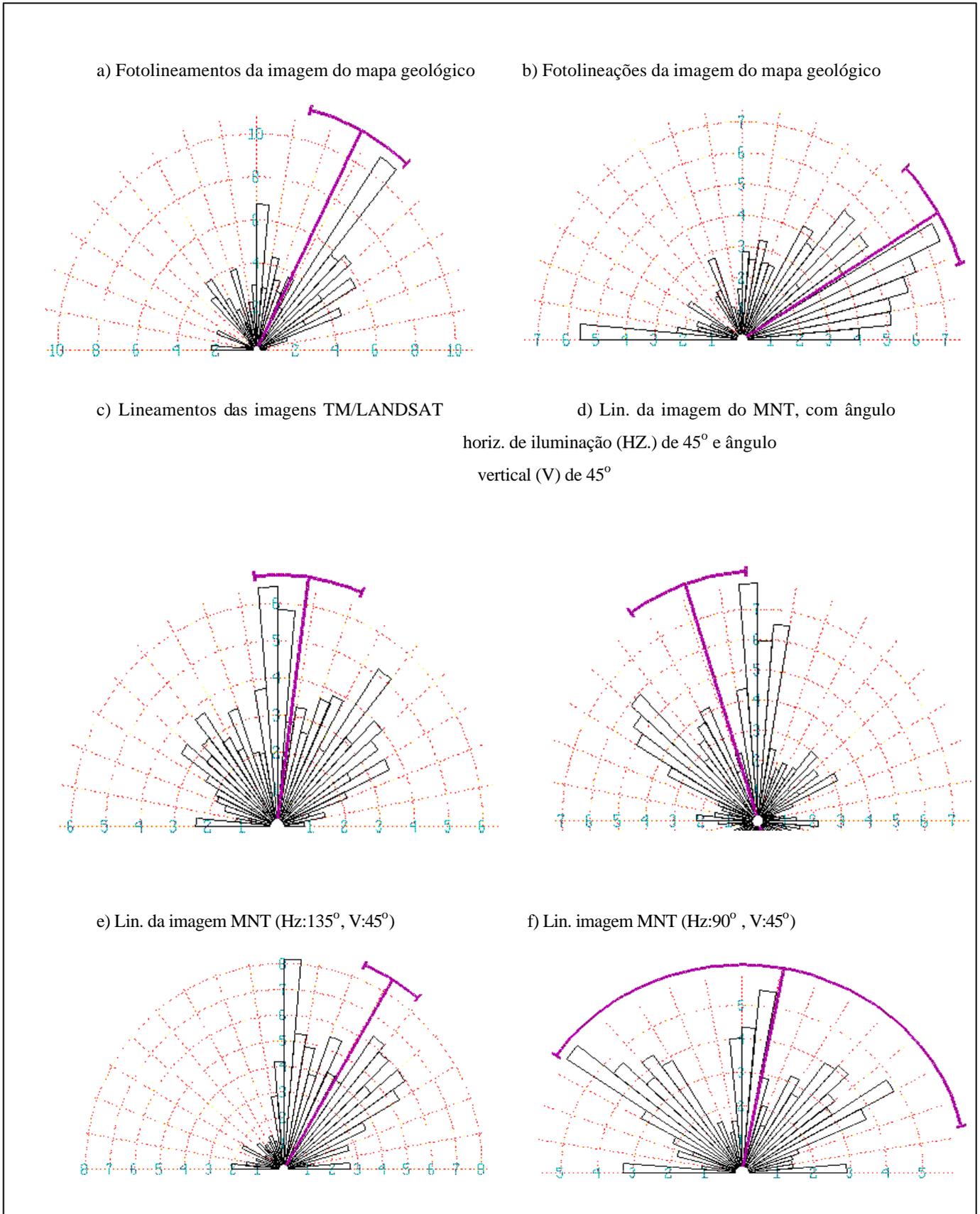


Figura 6. 15 - Diagramas de roseta dos lineamentos estruturais extraídos das imagens para a área de estudo.

De acordo com Fernandes *et al.* (1990), um dos indícios do caráter transcorrente dessas zonas é revelado pela estruturação interna e traçado retilíneo da foliação associada às suas estruturas tardias (faixas de milonitos), em escala regional.

A reativação desse sistema, com comportamento frágil é caracterizada por extensas faixas cataclásticas constituídas por cristas sobre o Granito Serra do Herval, na parte SW da área, cujo comprimento atinge até cerca de 24 km, sendo bastante evidentes nas imagens TM, fotografia aéreas e imagens do relevo.

O sistema N-S é representado principalmente por falhas correlacionáveis ao sistema de falhas Passo dos Marinheiros, caracterizando-se nas imagens e fotografias aéreas por extensos lineamentos marcados por cristas de fragmentos de rocha silicificados. Esse sistema (*cf.* Fernandes *et al.* 1990) foi responsável pelo posicionamento estrutural do Granito Arroio Braço do Capivari (porção centro-oeste da área), intrusivo no Granito Pitangueiras e Metanortosito Capivarita. E as reativações posteriores do sistema N-S atingiram as rochas gonduânicas, que ocorrem preferencialmente na parte norte da área.

Os sistemas NW-SE e E-W são posteriores, relacionados às reativações dos sistemas de falhas transcorrentes.

Na Figura 6.14, uma importante falha NW-SE foi evidenciada (setas azul claro). Essa falha corta o mgAF e as rochas sedimentares, e coincide com a localização de sills de diabásios na área. A intrusão dessas rochas provavelmente foi condicionada por esta zona de fraqueza.

Uma importante componente do sistema E-W é a falha (seta azul escuro na Figura 6.14) que desloca com movimento levógiro a grande falha NE-SW, que corta o Granito Serra do Herval e os Riolitos Ana Dias, na porção sudeste da área. A falha E-W é evidenciada nas imagens TM, nas fotografias aéreas e, principalmente no modelo de elevação do terreno, pela topografia rebaixada, no contato do gSH com cgPM e os riolitos.

Algumas dessas falhas, como veremos adiante nas imagens geofísicas, especialmente sobre o Metagranito Arroio Francisquinho, coincidem com zonas de maiores teores relativos de urânio e déficit em tório, revelando a importância das zonas de cisalhamento em concentração de radioelementos.

Verificamos, portanto, que os resultados obtidos a partir de produtos de sensoriamento remoto mostram-se coerentes com a seqüência de eventos previamente descritos para a região, caracterizando as relações entre os diferentes regimes deformacionais (D1 e D2) de idade brasileira, a estruturação das zonas de cisalhamento transcorrentes e o posicionamento dos granitóides sin transcorrência e pós-tectônicos.

6.5. Dados Aeromagnetométricos

A análise e interpretação de dados aeromagnetométricos nesta dissertação, consistiu na tentativa de reconhecimento de unidades litológicas e estruturais, através dos contrastes de intensidades magnéticas observadas em imagens digitais, e na análise das características das anomalias magnéticas com base no padrão do desenho das curvas de isovalores magnéticos.

Neste estudo, foram analisados os mapas de contorno dos valores de intensidade magnética de campo total gerados na etapa de pré-processamento dos dados geofísicos; imagens coloridas; imagem monocromática de relevo, obtida através do método de sombreamento artificial do “*grid*” dos dados magnéticos; e imagens filtradas pelo processo da primeira derivada (1ª drv).

A caracterização litológica da área de estudo através de dados aeromagnetométricos, mostrou-se bastante complexa, pois na região predominam rochas ígneas e metamórficas, variando de intermediárias a ácidas, refletindo em baixas respostas no levantamento aeromagnético, caracterizando um relevo magnético transparente, pouco acentuado e homogêneo.

Entretanto, a forte estruturação regional das rochas da ZCTDC, e o relevo granítico acentuado na porção sul-sudeste da área, permitem tecer algumas considerações geológico-estruturais nas imagens geofísicas.

O mapa de intensidade magnética total, demonstra que a área de estudo é representada por um relevo magnético pouco acentuado com padrão monótono quase transparente, denotando a pouca variação do campo magnético medido sobre as rochas da região.

As assinaturas magnéticas mais proeminentes, observadas tanto no mapa de contorno quanto nas imagens (Fig. 6.16 e Fig. 6.17), são notadas sobre as rochas vulcânicas intermediárias a básicas da Formação Serra Geral (diabásios), na forma de anomalias semi-circulares de pequeno comprimento de onda e amplitudes em torno de 50 nT.

Estas anomalias, constituem nas imagens, relevos magnéticos positivos acompanhados de um baixo magnético. O tamanho do eixo destas anomalias, por sua vez, é indicativo do tamanho da intrusão, o que nos faz sugerir que o corpo de diabásio, verificado mais ao norte, com centro nas coordenadas UTM 380000E, 6653000N; é em profundidade, provavelmente, bem maior do que o indicado pelo mapeamento geológico.

Outras duas anomalias de forma semi-circular relacionadas às intrusões básicas foram localizadas nas coordenadas UTM: 385000, 6648920 e UTM: 387084, 6643460.

O desenho das curvas isomagnéticas na Figura 6.16, junto as anomalias magnéticas semi-circulares, revela a presença da falha NW-SE, realçada anteriormente pelas filtragens direcionais das imagens TM.

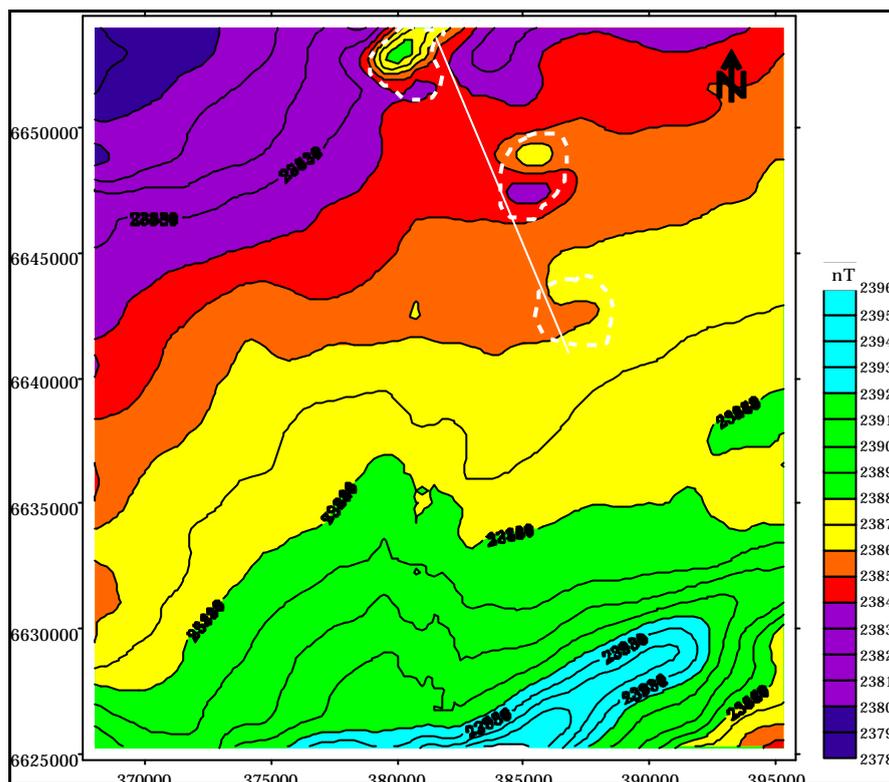


Figura 6.16 - Imagem colorida com *overlay* das curvas isomagnéticas de campo magnético total da área de estudo. Nesta figura estão realçados em tracejado branco as anomalias magnéticas oriundas das rochas básicas, bem como os valores mais altos sobre o relevo acidentado do gSH (cor ciano). Observamos, ainda, o padrão geral de orientação das curvas isomagnéticas, ocasionadas pela estruturação NE-SW da ZCTDC, e a falha NW-SE (traço branco) que condicionou as intrusão dos diabásios.

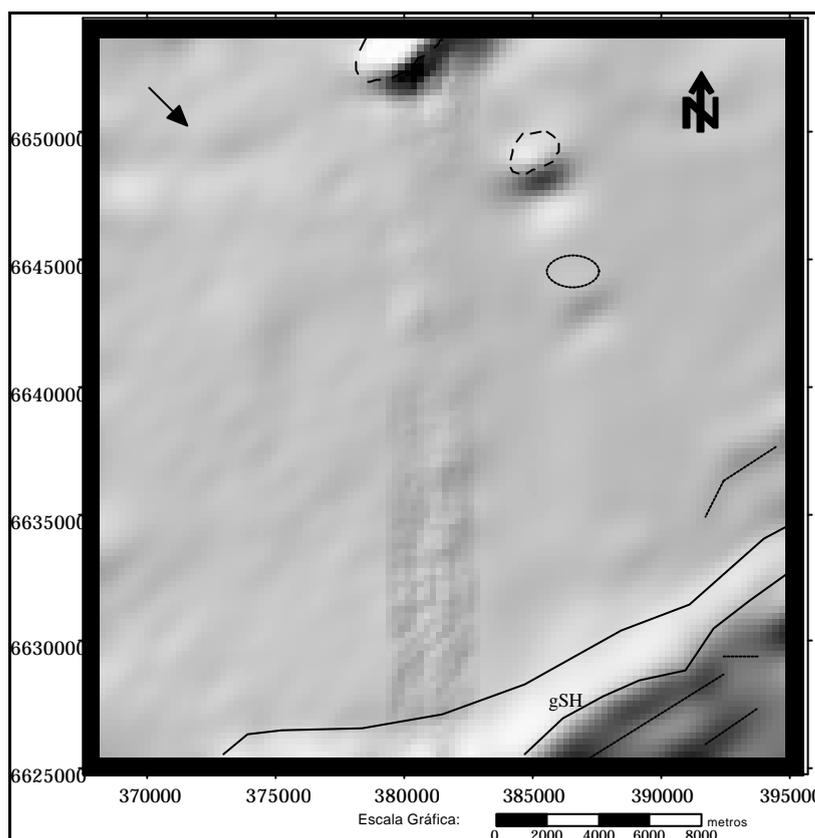
Os valores mais altos (cor ciano) que representa relevos magnéticos positivos, ocorre sobre a topografia mais elevada do Granito Serra do Herval a S-SE da área, sobre extensas faixas de cataclase, que marcam os contatos dessa unidade.

De acordo com Blakely & Grauch (1983) as rochas ígneas comumente apresentam alta susceptibilidade magnética em terrenos cristalinos topograficamente elevados, podendo produzir significativas anomalias magnéticas em aeromagnetometria. Isto concorda com a anomalia magnética sobre o gSH (cor ciano), uma vez que naquele local, o relevo é bastante acentuado (> 500m). Outra possibilidade diz respeito, a presença de minerais ferromagnéticos, como por exemplo, esfeno e allanita; e/ou a atuação de processos hidrotermais. Neste caso, as reações fluídos/rocha conduzem a mudanças no estado de oxidação dos minerais, produzindo grandes mudanças nas propriedades magnéticas da rocha, devido a criação ou destruição de minerais ferromagnéticos (Clark, 1983).

Outra observação importante, diz respeito ao padrão geral de orientação das curvas de isovalores, coincidentes com a estruturação regional da Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu (ZCTDC), na direção NE-SW, sendo essa estrutura, provavelmente, a responsável pelo padrão magnético de toda a área de estudo.

A imagem de relevo magnético com sombreado artificial (Fig. 6.17) foi gerada pelo cálculo e quantização da reflectância aparente de uma superfície imaginária definida pela intensidade magnética. A reflectância aparente é uma medida da proporção de luz refletida a partir de uma superfície e, é dependente da relação angular entre a direção de iluminação e atangente à superfície. O máximo de reflectância ocorre quando a direção de iluminação e a superfície tangente são perpendiculares (Broome 1990).

Figura 6.17 - Imagem de relevo magnético com iluminação magnético com iluminação artificial. A direção de iluminação N45W definiu sobretudo as estruturas NE-SW na parte S-SE da área; e as anomalias magnéticas semi-circulares (linha tracejada) relacionadas à rochas básicas. As áreas claras possuem relevo magnético positivo, e são acompanhada de depressões no desenho em tons escuros. As linhas escuras demarcam contatos e falhas pelos contrastes de intensidade magnética.



Desta forma, a imagem de relevo magnético artificial permitiu o realce de feições magnéticas através da identificação de variações texturais e picos de reflectância na imagem, associadas às estruturas NE-SW, rochas graníticas e vulcânicas básicas.

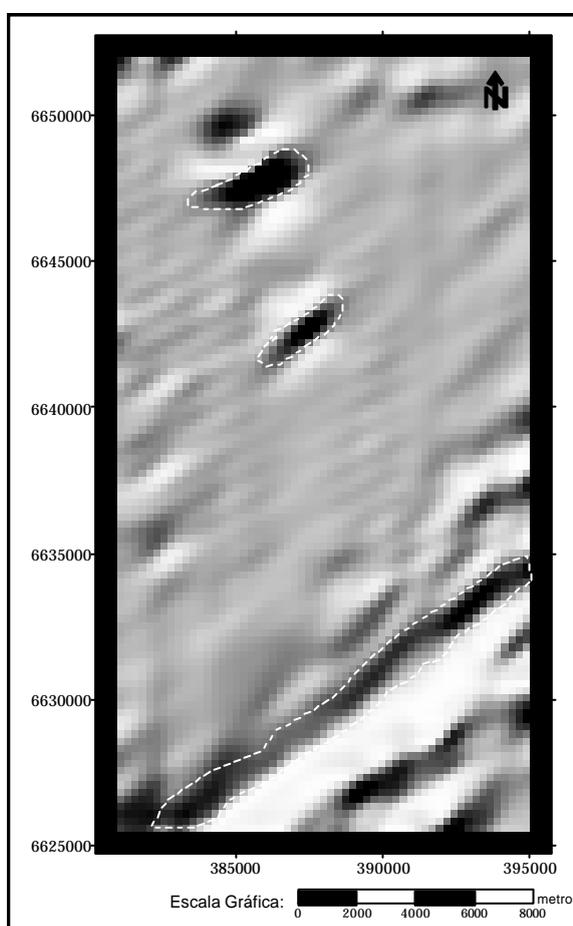
As áreas mais claras correspondem às mais altas reflectâncias, associadas aos altos magnéticos das rochas básicas e o relevo mais acidentado das rochas graníticas, acompanhadas de baixos magnéticos na forma de depressões no relevo, em tons escuros. O modelo foi gerado com ângulo vertical de iluminação de 45° e ângulo horizontal de 135°, ou seja, perpendicular às principais estruturas NE-SW ocorrentes na área de estudo.

O filtro do tipo primeira derivada (1ª drv) foi utilizado no intuito de realçar os componentes de alta frequência de feições rasas, normalmente associados a falhas, fraturas e contatos litológicos.

O resultado obtido a partir da filtragem com a 1ª drv, foi eficiente apenas quando usado sobre a imagem de relevo artificial para o bloco Extremo Sudeste (Fig. 6.18), na porção SE da área, por possuir as maiores estruturas geológicas da área. Nas demais áreas o relevo mostrou-se bastante homogêneo e sem variações texturais.

A imagem realça nitidamente as principais estruturas NE-SW relacionadas às falhas estruturais, sendo a mais evidente, a grande estrutura na parte inferior da imagem, que corta o Granito Serra do Herval, e é materializada no terreno, por extensas cristas de rochas cataclásticas. As falhas são reconhecidas, na imagem, pelas interrupções no desenho magnético e padrão linear das anomalias. Observa-se ainda, nitidamente, as depressões que caracterizam as anomalias semi-circulares ocasionadas por diabásios.

Figura 6.18 - Imagem de relevo magnético sombreado com filtro do tipo primeira derivada. A filtragem realçou com maior nitidez as principais fontes de informações magnéticas na área estudada. São notadas as principais falhas NE-SW na porção S-SE, e as feições semi-circulares definidas pelas rochas vulcânicas básicas.



A utilização de produtos digitais mostrou-se vantajosa sobre os mapas de contorno, pois permitiu o reconhecimento de pequenas variações de textura; identificação de valores altos e baixos de intensidade representados pelos DN's da imagem e, a aplicação direta de filtros para realce de feições lineares.

6.6. Dados Aerogamaespectrométricos

Na análise dos dados gamaespectrométricos procurou-se reconhecer áreas enriquecidas ou empobrecidas em radioelementos a fim de delimitar as principais unidades lito-estruturais, possíveis variações faciológicas dentro dessas unidades, e indícios de processos de alteração hidrotermal que pudessem indicar áreas alvos para prospecção mineral.

Os dados radiométricos de Potássio (K), Urânio (U), Tório (Th) e Contagem Total (CT) representados em c.p.s. (contagem por segundo) apresentaram nítidas variações nas imagens gamaespectrométricas, fornecendo subsídios para a discriminação entre alguns tipos de rochas, e permitindo desta forma uma boa correlação com as unidades geológicas mapeadas.

Embora na área de estudo não tenham sido reportadas mineralizações econômicas de minerais associados aos elementos radioativos, o padrão e a intensidade da distribuição de radioelementos, inferidos a partir da análise espectral, espacial e dados litoquímicos disponíveis (Anexo 3), permitiram diagnosticar: áreas enriquecidas no radioelemento de tório em rochas graníticas, especialmente no Granito Pitangueiras (gP) e Granito Serra do Herval (gSH); potássio no gSH, gP e Metagranito Arroio Francisquinho (mgAF); porções enriquecidas de radioelemento urânio no gSH, mgAF, e nos arenitos e folhelhos carbonosos da Formação Rio Bonito.

A Tabela 6.10, resume as características radiométricas extraídas das imagens geofísicas para as diferentes unidades geológicas da área de estudo.

Tabela 6.10 - Características radiométricas das unidades litológicas da área de estudo, com valores em c.p.s.

Unidades Litológicas	CT	K	U	Th	Th/K	U/K	U/Th
suíte metamórfica Várzea do Capivarita	3500 - 5000	100 - 400	60 - 100	100 - 250	<0,5 - 1,0	<0,2 - 0,40	<0,2 - 0,5
metanortosito Capivarita	3500 - 7000	200 - 800	40 - 160	<50 - 350	<0,5 - 1,0	< 0,2	<0,2 - 0,4
complexo granito gnáissico Pinheiro Machado	5000 - 7000	300 - 700	60 - 100	150 - 300	<0,5	< 0,2	< 0,4
complexo gnáissico Arroio dos Ratos	1000 - 7000	200 - 600	40 - 120	50 - 250	<0,5	< 0,2 - 0,4	<0,2 - 1,2
metagranito Quitéria	3500 - 6000	300 - 700	40 - 130	100 - 250	<0,5 - 1,0	< 0,2	<0,2 - 0,8
metagranito Arroio Francisquinho	2500 - 8000	300 - 1000	40 - 200	50 - 300	<0,5	< 0,2	<0,4 - 1,6
filonitos/blastomilonitos Cerro Agudo	3000 - 3500	300 - 500	40 - 80	100 - 250	<0,5	< 0,2	0,4 - 0,8
granito Pitangueiras	5000 - 8000	400 - 1000	80 - 180	150 - 500	<0,5 - 1,0	< 0,2	<0,4 - 0,8
granito Serra do Herval	6500 - 11000	500 - 1100	80 - 240	250 - 550	<0,5 - 1,0	< 0,2 - 0,4	<0,2 - 1,0
granito Arroio Braço do Capivari	4500 - 5500	450 - 700	80 - 120	150 - 400	<0,5	< 0,2	<0,2 - 0,4
riólitos Ana Dias	3500 - 6500	300 - 700	40 - 100	100 - 250	<0,5	< 0,2	<0,2 - 0,4
Grupo Itararé	3500 - 6500	400 - 700	80 - 140	100 - 150	<0,5	< 0,2	0,4 - 0,8
Formação Rio Bonito	<1000 - 5000	<100 - 250	60 - 240	100 - 200	<0,5 - 2,75	<0,2 - 1,8	0,2 - 1,8
Formação Palermo	3000 - 3500	200 - 300	40 - 80	100 - 200	<0,5 - 1,0	< 0,2	0,4 - 0,8
Formação Serra Geral	2500 - 4000	200 - 450	40 - 100	50 - 100	<0,5	< 0,2	0,4 - 0,8

Neste estudo, foram utilizadas imagens-elemento correspondentes aos canais CT, K, U e Th, com “*overlays*” das curvas de isovalores radiométricos sobrepostos, imagens-razões U/Th, U/K, Th/K, e imagens de relevo radiométrico com sombreamento artificial.

A imagem CT (Fig. 6.19) concentra a radiação proveniente de todos radioelementos. As imagens K (Fig. 6.21), Th (Fig. 6.23) e U (Fig. 6.25), de maneira geral, enfatizam os radioelementos específicos, com as altas concentrações mostradas em tons mais claros na imagem.

A percepção das anomalias na imagem digital depende fundamentalmente da paleta de cores utilizadas. Normalmente, utilizam-se cores frias, como o preto e azul para demonstrar valores baixos, e cores quentes (amarelo e vermelho) para valores mais altos.

As imagens monocromáticas de relevo geofísico com iluminação artificial de radiação total - CT (Fig. 6.20), e dos elementos: K (Fig. 6.22), Th (Fig. 6.24) e U (Fig. 6.26), permitiram realçar as maiores variações de níveis de cinza na forma de anomalias de alta frequência. Ou seja, estas imagens destacam as informações texturais que refletem mudanças litológicas e padrões estruturais.

6.6.1. Interpretação das Imagens de Radiação Total (CT)

Analisando-se a imagem gamaespectrométrica de radiação total - CT (Fig. 6.19), observa-se que as intensidades mais altas (8500 - 10500 c.p.s.), representados na imagem pela cor verde, associam-se aos granitos pós-tectônicos (Granito Serra do Herval - gSH e Granito Pitangueiras - gP). Os valores altos a médios (cor amarelo a laranja) correlacionam-se as rochas graníticas (gSH, gP, Granito Arroio Braço do Capivari - gABC) e gnáissicas (Complexo Granito - Gnáissico Pinheiro Machado - cgPM).

A anomalia sobre o cgAR, entre as coordenadas UTM: 383000 - 6633000, é provavelmente causada pela presença de solo aluvionar/coluvionar nas drenagens, originado a partir da alteração de rochas graníticas e transportado para àqueles locais. Nas coordenadas UTM: 377250 - 6625000 a anomalia sobre o cgAR é provavelmente reflexo da contribuição detrítica do gSH à S-SE da área.

Em vermelho estão representados os médios valores, predominando sobre as rochas metagranitóides (mgAF e mgQ) e paragnaisses da Suíte Metamórfica Várzea do Capivarita - smVC). As cores em tons de azul, magenta até o preto, registram as mais baixas respostas à radiação no canal de contagem total, verificadas na maior parte sobre as rochas sedimentares,

Figura 6.19 - Imagem geofísica em cores representando a intensidade de radiação total (CT) em c.p.s. As concentrações mais altas estão representadas nas cores verde e amarelo; valores intermediários em vermelho; e, em tons de azul até preto os baixos valores. Nota-se uma maior distribuição dos valores de K, U e Th, sobre rochas graníticas, em decorrência da constituição geoquímica dessas rochas. Os contrastes radiométricos definem aproximadamente os tipos litológicos e falhas geológicas.

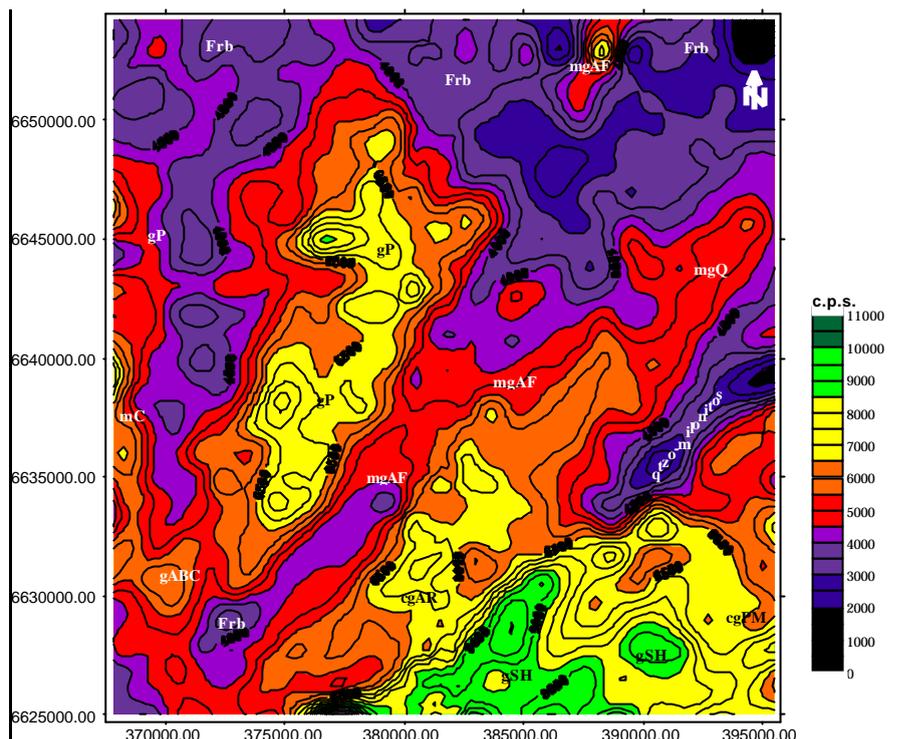
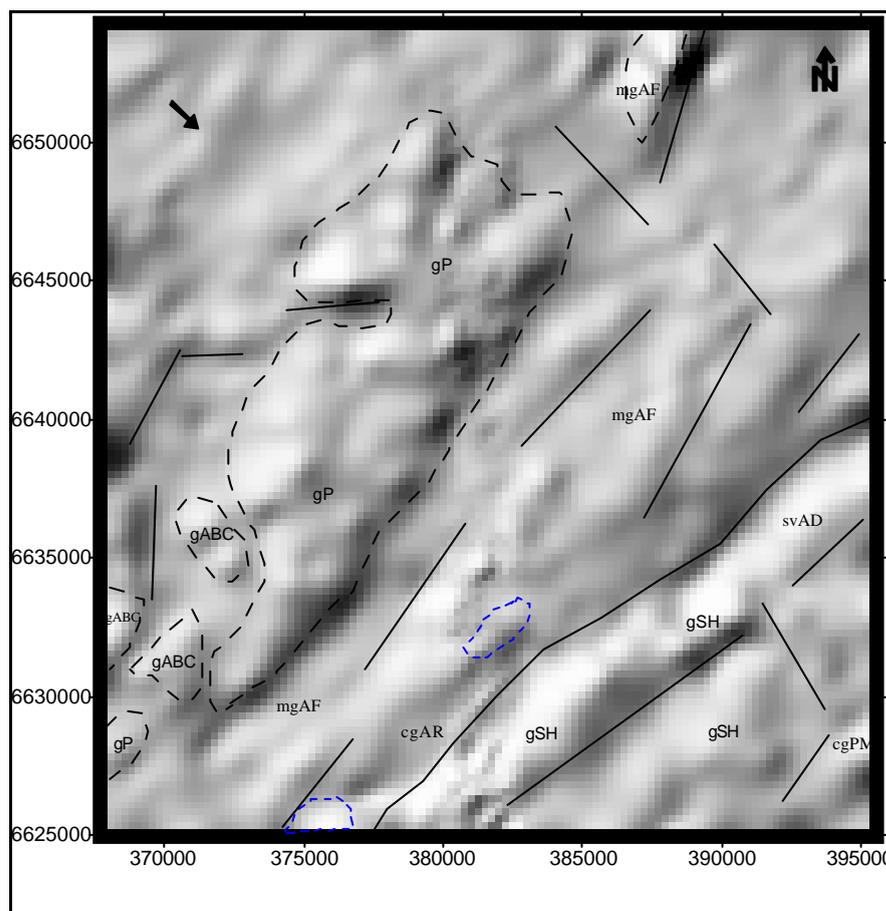


Figura 6.20- Imagem do canal CT na forma de relevo com sombreamento artificial, com ângulo vertical de 45° e ângulo horizontal de iluminação de 135° indicado pela seta. As maiores reflectâncias (tons claros) denotam as anomalias positivas. Os traços escuros são algumas das falhas e contatos identificados pelo contraste de tonalidade e textura. A linha azul tracejada ressalta a anomalia sobre o cgAR. Nesta figura: gABC = Granito Arroio Braço do Capivari; gP = Granito Pitangueiras; mgAF= Metagranito Arroio Francisquinho; cgPM= Complexo Granito-gnáissico Pinheiro Machado; cgAR=Complexo Gnáissico Arroio dos Ratos. A seta indica a direção de iluminação.



metanortosito e rochas que sofreram deformações ao longo da ZCTDC, ocasionando a perda de radioelementos de sua estrutura cristalina.

A maior distribuição da radiação gama oriunda dos radioisótopos de K, U e Th, coincide com a localização espacial das rochas graníticas face à concentração destes elementos nos minerais formadores dessas rochas, em decorrência das propriedades geoquímicas, que facilitam o enriquecimento nas séries mais diferenciadas do magmatismo, especialmente em fases tardias como pegmatitos e aplitos.

Os granitos dessa área, variam de monzogranitos a sienogranitos com elevada porcentagem de feldspatos potássicos, e minerais acessórios como zircão, apatita e esfero, que são minerais portadores dos elementos radioativos (U e Th) responsáveis pela emissão de radiação gama.

As cores em tons de magenta, azul até o preto ilustram os baixos valores (4000 - 0 c.p.s.) que predominam sobre as rochas sedimentares, milonitos, quartzo-milonitos e filonitos, metanortositos, e algumas porções das rochas granitoides.

A imagem de relevo artificial do CT (Fig. 6.20) permite a observação em baixo relevo, do posicionamento da ZCTDC, em relação as margens dos granitos gP e gSH, na direção NE-SW, marcado por falhas. Nota-se ainda, perfeitamente, o contato oeste do Granito Serra do Herval e o cgAR, a ocorrência do gABC e as faixas de cataclase sobre o gSH. As anomalias em áreas de solos transportados, sobre o cgAR, ocorrem como manchas claras na imagem (UTM 383000 - 6633000; 377250 - 6625000).

6.6.2. Interpretação das Imagens do Radioisótopo de Potássio (K)

A imagem do **radioisótopo potássio - K** (Fig. 6.21) mostra os menores valores relacionados às rochas sedimentares, rochas miloníticas e quartzo miloníticas da área (200 - 0 c.p.s.).

Os milonitos, apresentam baixo teor de K devido a perda deste elemento, durante os sucessivos estágios deformacionais que atuaram sobre a rocha original; e, as rochas sedimentares, por sua vez, refletem o conteúdo pobre em K das áreas fonte e, destruição/substituição pelos processos de intemperismo.

O canal de K permite definir com clareza, em baixo relevo radiométrico, a ocorrência dos arenitos e folhelhos carbonosos da Frb à SW, no Cerro Grande (coordenadas UTM 370000E e 6627500N) e dos quartzo-milonitos do Rincão dos Amigos e Cerro dos Burros à leste (UTM 390500 e 6636000).

Anomalias positivas de K, da ordem de 800 a 1100 c.p.s., ocorrem sobre porções do gSH, mgAF e sobre o gP. Valores intermediários ocorrem sobretudo sobre os metagranitóides (mgQ e mgAF) e riolitos à leste. Essas anomalias, refletem a maior concentração de potássio sobre as rochas enriquecidas em sílica, e zonas de hidrotermalismo.

De acordo com Dickson & Scott (1997), existe uma tendência de enriquecimento em K, através de soluções hidrotermais, em áreas graníticas, sendo um critério usual de diagnóstico geofísico de associações mineralizadas. Isso pode ser observado, principalmente, sobre o Granito Serra do Herval (UTM 387900 e 6626270), uma vez que, que os maiores valores do teor de K ocorrem sobre zonas de falhas, onde existem pegmatitos e focos de greisenização; e, greisens/feldspatização sobre o Metagranito Arroio Francisquinho (UTM 387380 e 6637790).

A contribuição de K no gSH, também está associada a presença de fenocristais de K-feldspatos, que são relativamente mais resistentes ao intemperismo, nesse caso, os solos, mostram-se enriquecidos em K.

A anomalia positiva que verifica-se sobre o cgAR, coincide com àquelas observadas no canal CT, causada pelo transportado de material intemperizado de áreas graníticas adjacentes, mais elevadas topograficamente.

A imagem de relevo artificial construída a partir da **imagem - K** (Fig. 6.22), mostra os maiores valores de radiação em tons mais claros, ou seja, com uma reflectância maior, principalmente sobre os granitóides. Os menores contrastes ocorrem em tons cinza a preto, associados às rochas sedimentares e quartzo-milonitos. Essa figura, destaca ainda, as principais falhas e lineamentos estruturais, através de sulcos retilíneos entre relevos radiométricos positivos e negativos.

6.6.3. Interpretação das Imagens do Radioisótopo de Tório (Th)

O **radioelemento tório** representado nas **imagens -Th** (Fig. 6.23 e Fig. 6.24), apresenta os valores radiométricos mais altos (450 - 550 c.p.s.) nas porções centrais dos granitos pós-tectônicos (gSH, gP, gABC), diminuindo em direção à borda destes corpos. Os menores valores ocorrem sobre os metagranitóides; gnaisses; metanortositos e rochas sedimentares (150 - 0 c.p.s.).

Este canal estabelece, perfeitamente, a orientação NE-SW da Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu, ao longo da qual se posicionaram os metagranitos peraluminosos (mgAF) e calco-alcalinios (mQ), ficando a faixa, balizada pelas intrusões posteriores do gP e gSH.

Figura 6.23- Imagem de intensidade de radiação para o radioelemento tório. Os valores mais altos (verde e amarelo) ocorrem sobre rochas granitóides mais jovens; os valores médios em laranja e vermelho nas bordas dos granitos; e as intensidades radiação mais baixas, representadas pelas tonalidades de azul até a cor preta, incidem sobre sedimentos, metagranitos e rochas anortosíticas.

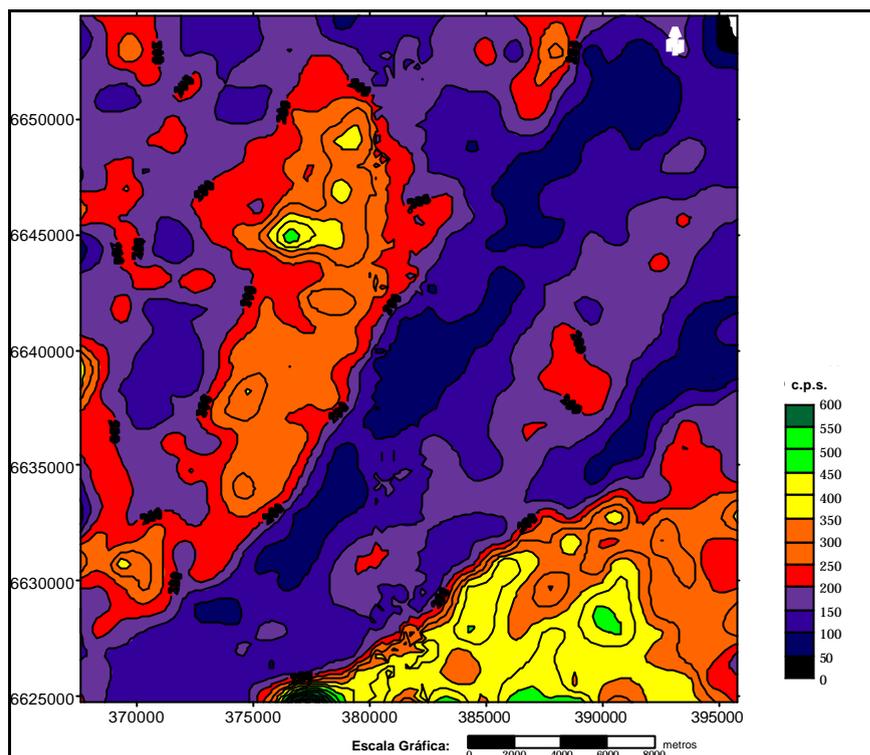
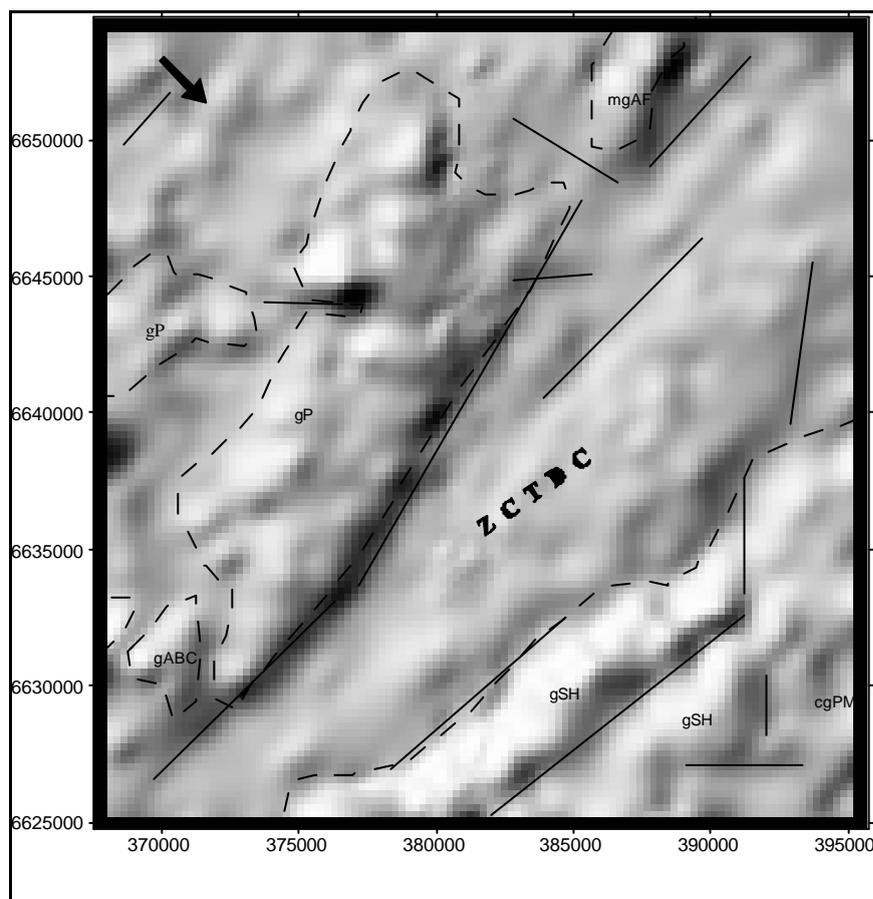


Figura 6.24 - Imagem de relevo com sombreado artificial para o elemento tório, com ângulo vertical de 45° e ângulo horizontal de iluminação de 135°. As linhas tracejadas representam contatos litológicos que puderam ser definidos; as linhas cheias caracterizam as falhas e lineamentos estruturais, identificadas pelo contraste de tonalidade e textura. gABC = Granito Arroio Braço do Capivari, gP = Granito Pitangueiras, gSH= Granito Serra do Herval; mgAF= Metagranito Arroio Francisquinho. A seta indica a direção de iluminação.



Apesar dos dados litoquímicos (Anexo 3) indicarem, no metagranito Quitéria, alta presença de zircão (166 ppm em média *cf.* Koester 1995), que é um mineral que normalmente contém Th e U em sua estrutura, a baixa resposta da radiação gama oriunda destes radioelementos, pode ter sido causado pela influência do posicionamento das intrusões de granitos posteriores, que afetou a estrutura cristaloquímica destes minerais. Os baixos valores radiométricos do Th para o mgQ, são demonstrados na Figura 6.23, pelas cores escuras em tons de azul na porção NE da área; e pela tonalidade cinza-escuro na Figura 6.24.

Verifica-se, nestas figuras, que o contato do cgAR e o gSH, que nas imagens anteriores confundiam-se, agora ficaram perfeitamente separados no mapa de intensidade de Th, pela maior intensidade de radiação sobre o gSH e menor para o cgAR. Já o contato do gSH com a fácies porfírica do cgPM, na parte SE da área, não foi definido, pois esses gnaisses são constituídos composicionalmente por monzogranitos com grande quantidade de fenocristais de K-feldspatos.

Esse canal foi importante também na diferenciação radiométrica entre o cgAR, e os gnaisses do cgPM. O cgPM mostra valores de Th mais elevados em relação ao cgAR, o que pode refletir além de diferenças composicionais, também, diferenças deformacionais.

Os limites do corpo correspondente ao Granito Pitangueiras, por sua vez, é perfeitamente definido. Esta distribuição de radiação no granito é controlada sobretudo pela presença de minerais portadores de Th, como por exemplo: zircão, apatita e esfeno. Portanto, para um dos propósitos deste trabalho, que é o mapeamento geológico com o uso de geofísica, o canal tório foi o mais eficiente, pois permitiu delinear os limites do gSH, a forma alongada N-S do gP, as intrusões do gABC e, também diferenciar o cgAR do cgPM.

A imagem de relevo com iluminação artificial do radioelemento Th (Fig. 6.24), realça perfeitamente o contraste entre o relevo geofísico das rochas graníticas mais jovens (gABC, gSH e gP) e as rochas limites, que apresentam respostas menos acentuadas.

6.6.4. Interpretação das Imagens do Radioisótopo de Urânio (U)

O canal de radioelemento **urânio - U** (Fig. 6.25) revela maior concentração de radiação gama, com valores variando de 100 a 300 cp.s. sobre o gSH, particularmente nas porções central deste corpo, incrementando na direção S; sobre porções localizadas do gP; e nos arenitos e folhelhos carbonosos da Frb, especialmente no Cerro Grande.

Estas anomalias, sobre a Frb, pode ser decorrente da adsorção de U^{+4} pelo conteúdo de matéria orgânica presente nos folhelhos carbonosos, intercalados com pelitos e arenitos. Como a

Figura 6.25 - Imagem geofísica com isovalores radiométricos para o elemento urânio. Nota-se uma maior intensidade de radiação sobre o Cerro Grande à SW; sobre o gSH (SSE) e gP indicado pela cor amarela e verde. Índices intermediários (tons alaranjados) sobre a faixa NE-SW no mgAF. Valores mais baixos são denotados pelos tons azul-escuro.

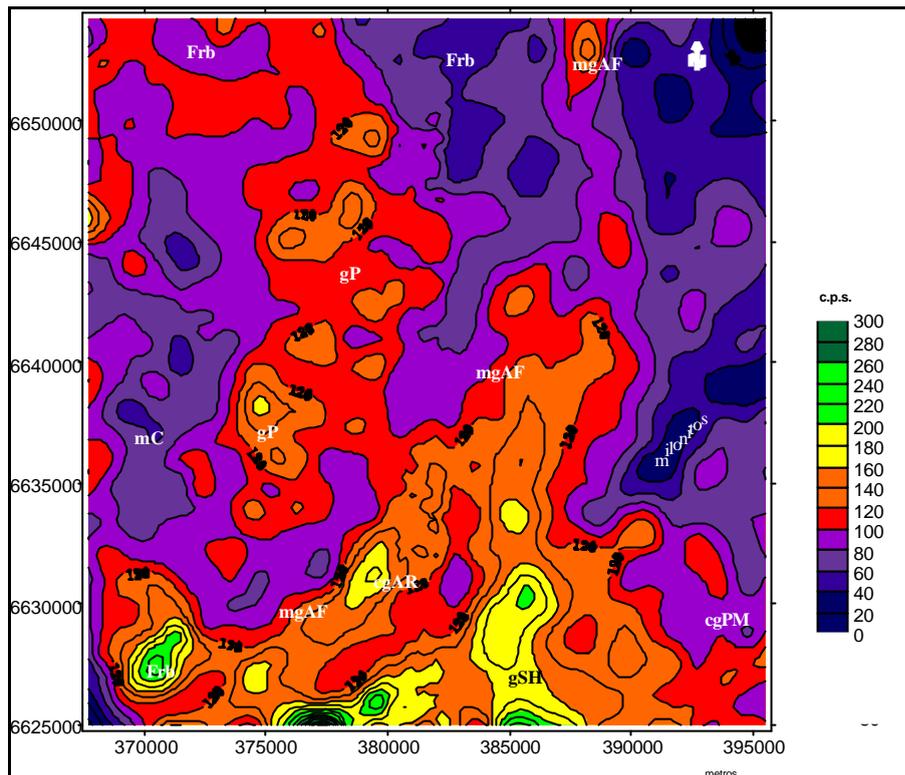
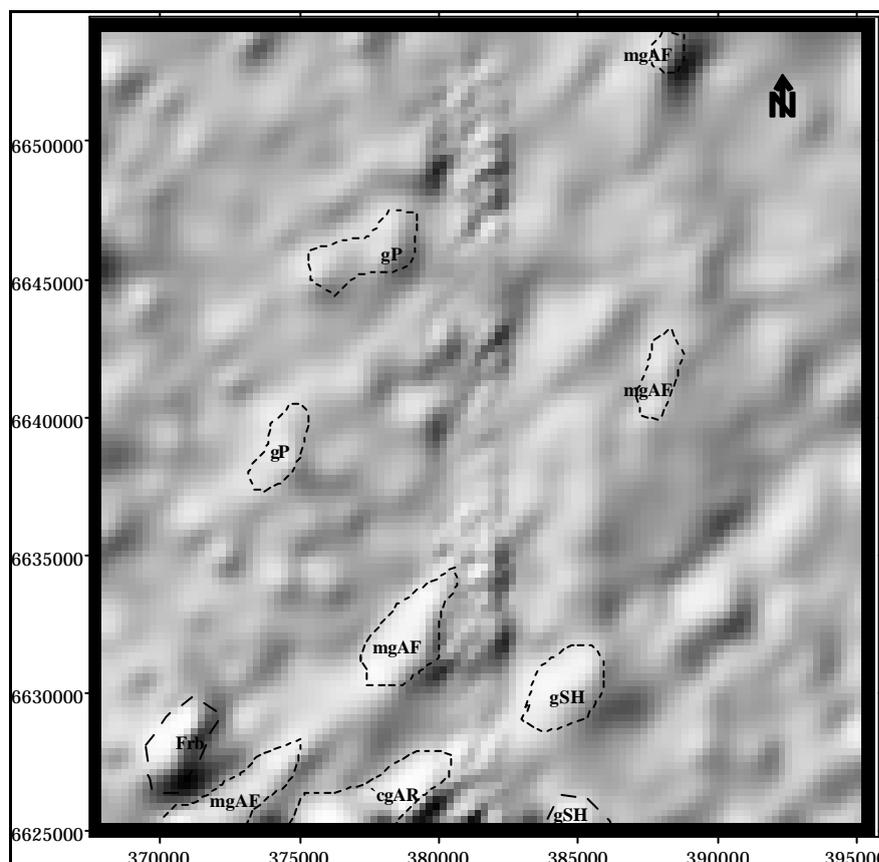


Figura 6.26 - Imagem de relevo artificial do elemento urânio, com ângulo vertical de iluminação de 45°, e ângulo horizontal de 135°. A área mostra homogeneidade textural e de tonalidades, à exceção de porções localizadas enriquecidas sobre granitóides (mgAF, gP e gSH) e folhelhos carbonosos da Formação Rio Bonito à SW.



detecção de U em ambientes sedimentares depende da comportamento geoquímico do U e elementos guia, torna-se evidente a necessidade de estudos geoquímicos complementares para determinar sobre a origem dessas anomalias.

Valores intermediários de teor de U ocorrem sobre o Metagrano Arroio Francisquinho, ao longo da estruturação NE-SW; na faixa de ocorrência do cgAR; sobre as rochas sedimentares da Frb à norte da área; no Granito Pitangueiras; e, no cgPM à SE.

Os valores contrastantes, sobre o gSH podem ser indicativos da variação na distribuição e conteúdo de minerais radioativos no corpo intrusivo, bem como do grau de exposição desses granitos, já que o relevo dessa unidade é fortemente caracterizado pela presença de afloramentos rochosos, na forma de campo de matacões, blocos e lajeados.

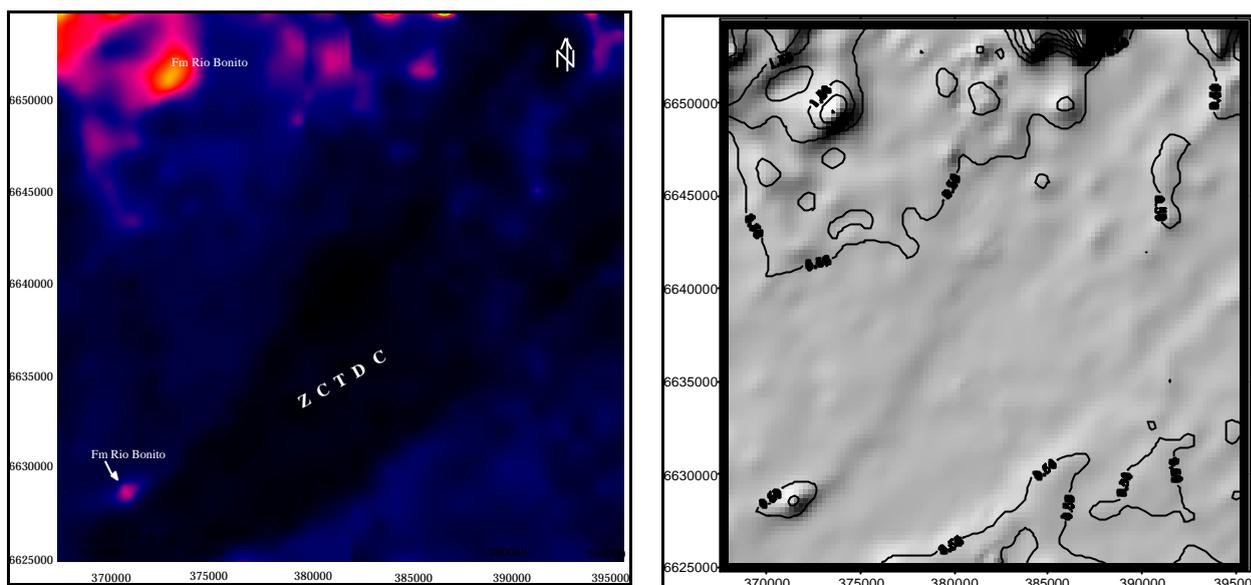
O urânio em granitos é retido nos minerais acessórios, como por exemplo: zircão, esfeno, monazita; e, apenas uma parte menor de U em granitos ocorre em minerais formadores da rocha, distribuídos ao longo dos contatos entre grãos e microfraturas.

A anomalia de U sobre o cgAR (UTM 377250 e 6625000) é coincidente com a anomalia de K, o que pode confirmar a influência da cobertura de solo, proveniente das áreas vizinhas, modificando as características originais de radiação gama dos ortognaisses. Os valores menos intensos de radiação gama no canal U (80 - 0 c.p.s.) situam-se sobre o Metanortosito Capivarita; os paragnaisses da svVC, nas faixas de milonitos e filonitos; e, sobre as rochas vulcânicas (sills de diabásio) na parte centro-norte da área.

O sombreamento artificial do relevo neste canal não apresentou bons resultados, devido a baixa resposta do urânio em terrenos graníticos-gnáissicos, o que refletiu em um padrão radiométrico homogêneo em grande parte da área. Apenas alguns picos de reflectância, associados a porções localizadas no mgAF, gSH, gP, e Formação Rio Bonito, ressaltam altas intensidades de U na imagem (Fig. 6.26).

6.6.5. Interpretação das Imagens Razões

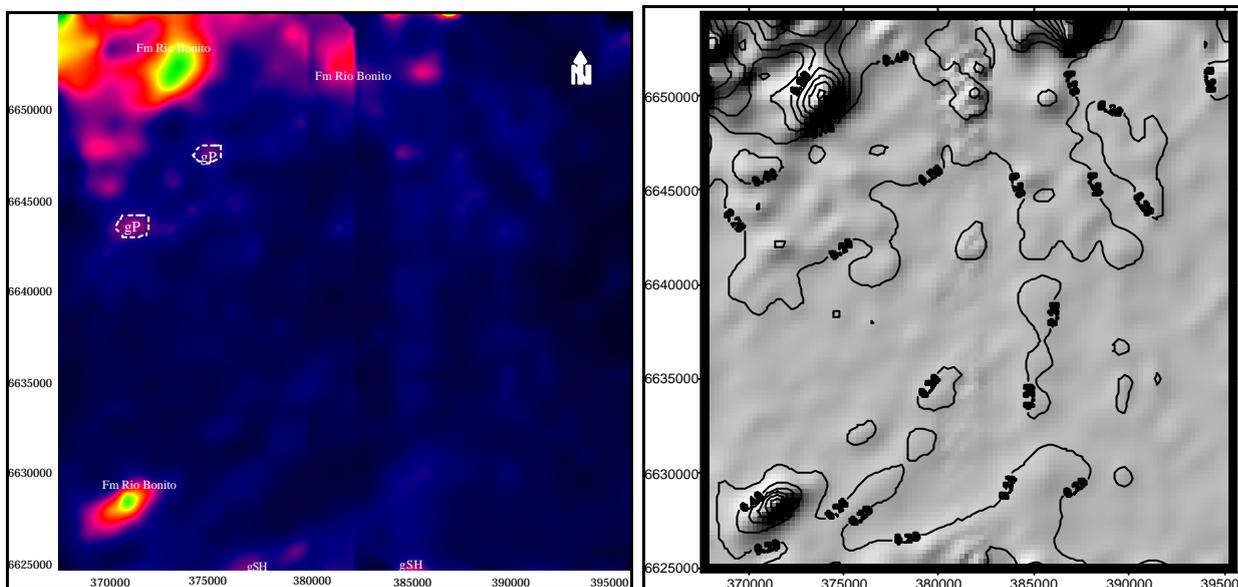
As imagens-razões **Th/K** (Fig. 6.27a), **U/K** (Fig. 6.28a) e **U/Th** (Fig. 6.29a) e as respectivas imagens de relevo com iluminação artificial (Fig. 6.27b, 6.28b e 6.29b), foram importantes na caracterização espacial de algumas unidades litológicas, no diagnóstico de anomalias de urânio e ainda possíveis padrões de dispersão hidrotermal indicados por concentração mais elevada em K, U e Th nas imagens razões, em comparação com as imagens-elementos.



a) Imagem-razão Th/K

b) Imagem de relevo radiométrico Th/K

Figura 6.27 - Em a, imagem colorida da razão radiométrica Th/K, destacando as maiores intensidades sobre as rochas sedimentares em tons mais claros e os baixos valores ao longo da ZCTDC. Em b, imagem de relevo com sombreado artificial com ângulos de iluminação vertical de 45° e horizontal de 135°, com *overlay* dos isovalores da razão.



a) Imagem-razão U/K

b) Imagem de relevo radiométrico U/K

Figura 6.28 - Em a, imagem colorida da razão radiométrica U/K com valores mais intensos sobre as rochas sedimentares (cor verde e magenta) e em porções à sul, no gSH, e a NW no gP. Em b, imagem de relevo com sombreado artificial com ângulos vertical de 45° e horizontal de 135°, com os isovalores das razões radiométricas.

Na imagem-razão Th/K (Fig. 6.27), os índices mais intensos ocorrem sobre as rochas sedimentares a NW, e em um corpo sedimentar isolado à SW (Cerro Grande) da Frb. Esses valores estão relacionados à imobilidade geoquímica do íon Th^{+4} , em ambientes superficiais, concentrando-se em materiais residuais nos folhelhos, pelitos e arenitos, existentes nesta unidade.

O Th está presente na allanita, monazita e zircão, que são bastante estáveis durante o intemperismo. Estas anomalias são percebidas nas áreas de exposições da rocha arenítica no Cerro Grande, e a norte da localidade de Várzea do Capivarita.

Na imagem da Figura 6.67a, é definida a faixa de ocorrência dos metagranitos sintranscorrentes e gnaisses do cgAR, em cor preta na direção NE-SW. Esse padrão é reflexo do alto valor de K e baixo Th sobre os metagranitos; e, o baixo conteúdo de Th e K no cgAR.

A Figura 6.28 representa os valores da razão U/K, com altos valores de urânio em algumas porções das rochas sedimentares da Formação Rio Bonito, como pôde-se observar, também, na imagem-elemento U (Fig. 6.25), permitindo desta forma a delimitação dessas rochas na área. O relevo radiométrico baixo nessa razão, praticamente homogêneo, é decorrente da composição geoquímica predominante na área, ou seja, rochas metagranitóides com alto teor de potássio.

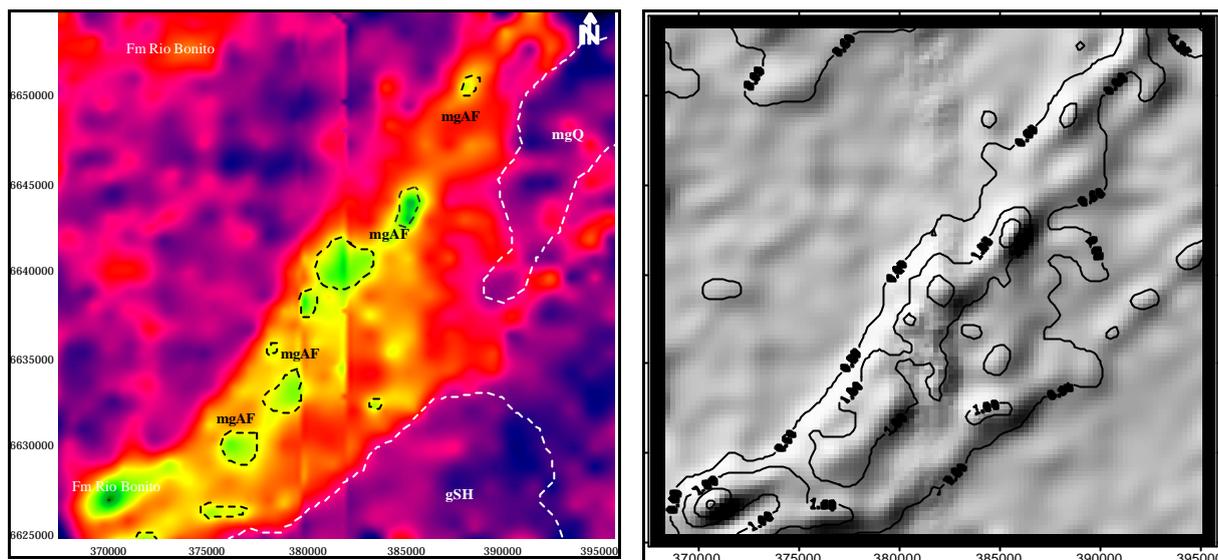
A razão U/K, mostra ainda, algumas porções sobre o gSH e gP com altos valores, o que provavelmente pode indicar a atuação de processos de diferenciação magmática nestes locais. Isto pode ser importante em estudos posteriores, visando a separação faciológica dessas unidades.

O relevo geofísico da razão U/K (Fig. 6.28b) é praticamente homogêneo nas áreas graníticas, sem picos de reflectância, à exceção sobre algumas rochas sedimentares.

As altas razões U/Th (cor verde) observadas na Figura 6.29a, e na imagem de relevo artificial (Fig. 6.29b), sobre o Metagranito Arroio Francisquinho, ao longo da faixa que se estende de NE-SW (em vermelho, amarelo e verde), está possivelmente relacionada com a atuação localizada de processos hidrotermais sobre essas rochas, com enriquecimento em urânio. O teor relativo de U, provavelmente, é explicado pelo fato do urânio possuir um grande número de complexos estáveis em soluções aquosas (hidrotermais) e apresentar um estado de oxidação hexavalente (U^{+6}), tendendo a ser mais solúvel que o Th, e a se concentrar em zonas mais especializadas.

Elevada razão U/Th, também foi identificada sobre a Formação Rio Bonito à SW, e à NW, com menor intensidade, confirmando as informações da imagem-elemento U.

Nos granitos pós-tectônicos (gABC, gP e gSH) a razão U/Th baixa, reflete a perda de U pelos processos de intemperismo e transporte, com retenção de Th, mais estável.



a) Imagem-razão U/Th

b) Imagem de relevo radiométrico U/Th

Figura 6.29- Em a, imagem colorida da razão radiométrica U/Th, com valores mais intensos sobre a faixa NE-SW sobre o mgAF, e sobre a Formação Rio Bonito (Cerro Grande) à SW, em tons avermelhados com pico em verde. A linha tracejada branca delimita o gSH e o mgQ. Em b, imagem de relevo com sombreado artificial com ângulos de iluminação vertical de 45° e horizontal de 135°, destacando a estruturação dos metagranitos na direção NE-SW da ZCTDC.

Sobre o gSH, a ocorrência de valores um pouco mais elevados da razão U/Th, denotadas por manchas vermelhas mais escuras, coincidem com as observadas na razão U/K, o que pode confirmar a sugestão de que possivelmente tratam-se de fácies composicionais distintas.

As anomalias identificadas nas imagens da Figura 6.29 a e b, especialmente sobre o Metagranito Arroio Francisquinho, não tinham sido detectadas até o momento, o que torna claro a utilidade destas imagens em mapeamento geológico, podendo serem de interesse para prospecção mineral, tanto de urânio, como de minerais de Estanho (Sn) ou Wolfrâmio (W), que normalmente ocorrem em áreas de alteração hidrotermal sobre rochas graníticas.

A imagem-razão U/Th foi importante para distinguir a posição do contato do Metagranito Quitéria com o mgAF, o que não foi possível nas outras imagens. Isto é decorrente da baixa razão U/Th apresentada pelo mgQ, e razão intermediária a elevada para o mgAF. Foi importante, também, para separar os contatos do Granito Pitangueiras (gP) com o mgAF, e os contatos do Granito Serra do Herval (gSH) com o cgAR, em função do gSH possuir elevado teor de Th.

As imagens razões, portanto, serviram para identificar possíveis áreas de atuação de processos hidrotermais sobre o mgAF; porções enriquecimento em U nas rochas sedimentares da Frb; variações litológicas e algumas diferenças faciológicas entre as rochas granitóides.

6.7. Dados Integrados Via Transformação IHS

Em sensoriamento remoto, a manipulação de imagens no espaço de cores perceptivo, é uma técnica eficiente e usual para realce das informações espectrais registradas pelos objetos nas diferentes regiões do espectro eletromagnético.

A apresentação das composições coloridas de imagens digitais, em monitores de vídeo, é feita através do espaço de cores fundamentais, ou primárias, RGB (vermelho-verde-azul).

Entretanto, a percepção visual do sistema óptico do homem, permite associar a estas cores, atributos quantificáveis e independentes de luminância (intensidade-I), matiz (*hue*-H) e saturação-S, que podem ser manipulados de maneira a melhorar a qualidade visual das imagens.

A técnica que permite a manipulação destes atributos, quantificados separadamente, é conhecida como **Transformação IHS**; e, pode ser usada, também, como técnica de combinação de dados de diferentes naturezas.

Este procedimento, permite, portanto, a obtenção de um produto final visualmente mais eficaz, sem degradação dos valores originais, ao contrário do que ocorre nas transformações estatísticas e aritméticas, como por exemplo, na Transformação por Componentes Principais.

Neste contexto, a aplicação da **Transformação IHS** foi escolhida como técnica de integração de dados neste trabalho, com o objetivo de extrair o máximo de informações texturais e espectrais dos dados TM/LANDSAT-5, somados às informações radiométricas das imagens de geofísica, através da exploração dos atributos individuais I, H e S.

Harris *et al.* (1994) analisaram as diversas técnicas de integração de dados de diferentes naturezas, apresentadas na literatura, concluindo que Transformação IHS seria a mais eficiente para este propósito.

A componente **intensidade-I** representa o total de energia ou brilho da imagem. Segundo Carmelo (1995), a “**I**” tem a propriedade de preservar o atributo da resolução espacial das imagens transformadas, realçando as variações morfológicas do terreno em função da intensidade luminosa mínima percebida pelo olho humano.

Neste trabalho, a componente intensidade “**I**” ressaltou as variações morfológicas existentes entre os terrenos elevados das rochas graníticas-gnáissicas, especialmente na parte S-SE da área, com o relevos de outras unidades.

A componente matiz “**H**” refletiu o comportamento espectral dos alvos, através das variações de cores, que caracterizam sobretudo, mudanças litológicas e faciológicas nas rochas da área estudada, sendo bastante marcante sobre as rochas graníticas.

A componente **saturação “S”**, por sua vez, apresentou um produto com baixo contraste de matizes, ou seja, com reduzida informação espectral sobre os alvos.

A transformação do sistema RGB, constituído por um triplete de bandas TM, para o espaço IHS, e o posterior retorno ao espaço fundamental foi testada com diversas configurações, em diferentes etapas.

Inicialmente, fez-se a seleção das composição coloridas que melhor reunissem as características espectrais e texturais da área de estudo. Esta escolha foi feita com base nos dados estatísticos do *Optimum Index Factor (OIF)* de Chaves *et al.*(1982), indicando as composições RGB 457 e 345.

Em seguida, antecedendo a integração das imagens via IHS, foi usada a técnica de *Equalização de histogramas* das bandas envolvidas. Isto, justifica-se, pelo fato desta técnica transformar a distribuição cumulativa das imagens originais, em imagens com histograma aproximadamente uniforme, reduzindo o contraste em área muito claras ou muito escuras nas imagens.

Após estes procedimentos iniciais, a composição RGB foi transformada para o sistema IHS. No retorno ao sistema RGB foram testadas as substituições das componentes I-H-S, pelas seguintes imagens: imagens gamaespectrométricas de CT, K, Th e U; imagem magnetométrica de campo total; primeira componente principal (1ª CP) das seis bandas TM; composições RGB decorrelacionadas; imagem-matiz; razões de bandas; imagem com DN de valor constante.

A integração das imagens TM com a imagem de aerogeofísica resultou em um produto híbrido que preservou a informação espectral das bandas do espectro óptico, combinando com aquelas obtidas pelos sensores geofísicos. Essas imagens, alternativamente, podem ser visualizadas tridimensionalmente através da cromostereoscopia, apresentado em Toutin & Rivard (1995). Este método é implementado através da utilização de óculos especiais com lentes *ChromaDepth*™ 3-D, que combinam os processos de refração e difração da luz, formando uma percepção artificial de relevo (profundidade) com base nas gradações de cores (resposta radiométrica ou magnética das rochas) e morfologia do terreno (imagem TM).

Neste processo, cada cor é deslocada diferentemente através da refração gerando diferentes paralaxes angulares as quais são traduzidas em paralaxes lineares na percepção visual (Paradella *et al.* 1996b). Por exemplo, no intervalo azul-vermelho do espectro de cores, as cores do azul ao violeta a profundidade é maior (mais distante do observador); do magenta ao vermelho a sensação é de proximidade, ressaltando aos olhos; e, as gradações intermediárias são vistas com profundidades entre estes extremos. Isso facilita a compreensão das interações entre as variáveis geofísicas e TM com as informações do terreno.

6.7.1. Integração da Imagem TM com a Imagem de Aeromagnetometria Via Transformação IHS

A análise e interpretação das imagens geofísicas e TM, integradas via **Transformação IHS**, foi feita com base na identificação de anomalias magnéticas oriundas dos dados magnéticos e as informações espectrais da imagem TM, com a correspondente correlação com a geologia da área.

O melhor resultado da integração TM com aeromagnetometria foi obtido com as seguintes configurações: composição colorida RGB-457 transformada para as componentes I-H-S; componente **I** substituída pela banda TM 4; componente **H** substituída pela imagem magnetométrica, e, componente **S** substituída pela imagem-matiz falsa cor RGB.

A seleção do triplete de bandas TM foi realizada com base em procedimentos estatísticos, anteriormente discutidos, de forma a escolher as bandas menos correlacionadas entre si.

Optou-se pela banda 4 para ser substituída na componente **I**, por apresentar as melhores características espectrais relacionadas à morfologia do terreno da área de estudo.

A componente **H** foi substituída pela imagem geofísica, por preservar as variações de cores associadas ao comportamento radiométrico dos tipos de rochas envolvidos.

A imagem-matiz utilizada na componente **S** foi obtida pelo método descrito por Liu & Moore (1990), com excelente realce espectral.

Como resultado desta integração obteve-se uma imagem (Fig. 6.30) que manteve as características espectrais da imagem TM, principalmente os alvos água e vegetação que aparecem em tonalidades de azul claro apagado, e a resposta magnética em gradações de cores do azul escuro (canto superior esquerdo) até o ciano (canto inferior direito).

Entretanto, em decorrência da fraca intensidade magnética das rochas da área de estudo, denotado por um padrão magnético suave e monotónico, a imagem integrada não apresentou bons resultados, revelando pobre contribuição no diagnóstico de anomalias geofísicas, com a exceção das já referidas anomalias decorrentes das rochas intrusivas básicas da Formação Serra Geral.

Estas anomalias são mostradas na imagem na forma de feições com aspecto semi-circular, caracterizadas por altos e baixos contrastes de cores, ou seja, relevo magnético positivo em amarelo ou verde e, o baixo magnético em vermelho até magenta.

A cor ciano na parte S-SE da área, relaciona-se ao relevo mais acentuado do Granito Serra do Herval, marcado por extensas cristas de cataclasitos. A anomalia pode ser decorrente do relevo ou das propriedades ferromagnéticas dos minerais acessórios, e ainda da atuação dos processos hidrotermais, que existem nesse granito.

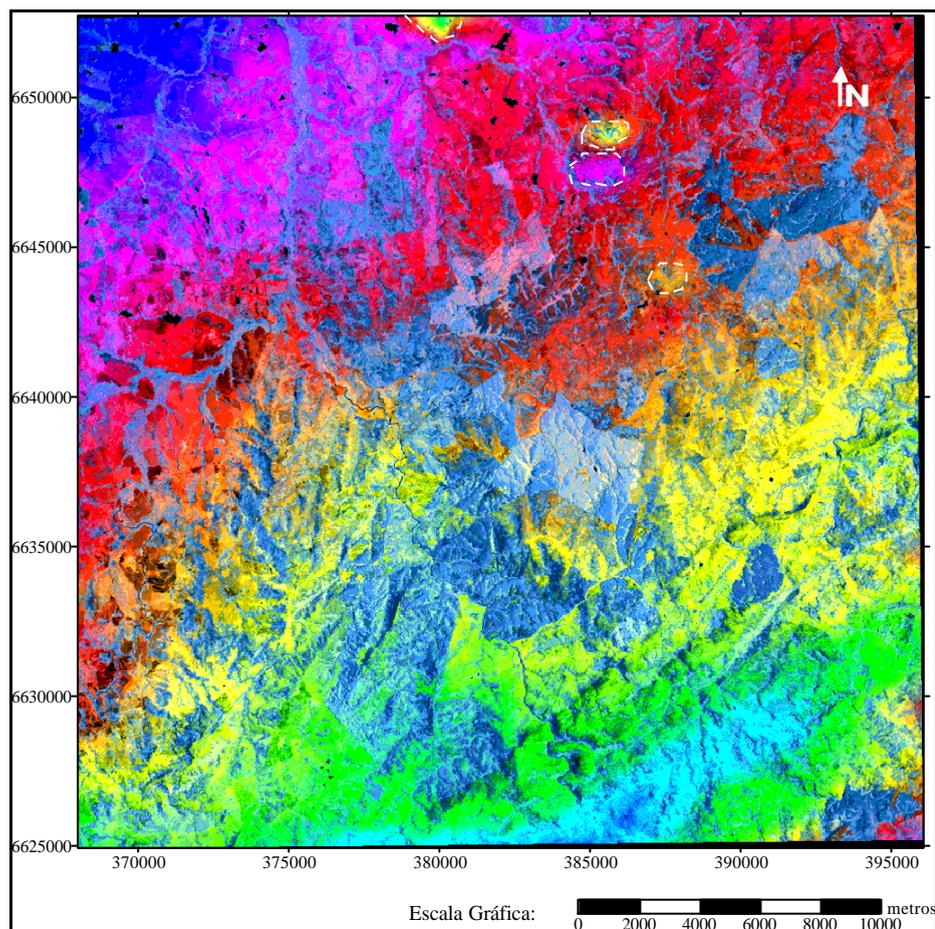


Figura 6.30 - Imagem integrada da composição RGB-457 com o canal magnetometria via Transformação IHS. As anomalias magnéticas decorrentes de intrusões básicas são delimitadas pela linha tracejada branca.

6.7.2. Integração da Imagem TM com a Imagem de Aerogamaespectrometria Via Transformação IHS

Nesta etapa, foram testadas várias combinações entre as imagens gamaespectrométricas e as componentes I-H-S das composições TM, a fim de avaliar visualmente a qualidade da informação espectral e espacial das litologias presentes na área de estudo.

Dentre todas as imagens geradas, aquelas que melhor combinaram as informações TM e geofísicas foram obtidas com a seguintes configurações: composição colorida RGB-457 transformada para as componentes IH-S; componente **I** mantida constante; componente **H** substituída pela imagem geofísica; e, componente **S** substituída pela banda TM 4 com DN=128 (50% saturação).

Estas imagens possibilitaram uma boa correlação entre as informações espectrais, feições de relevo, lineamentos estruturais e a informação geofísica com as unidades geológicas cartografadas.

A imagem obtida da integração da **imagem do canal CT com a TM** (Fig.6.31a), permitiu a nítida delimitação das intrusões graníticas que ocorrem na área, principalmente o granito Pitangueiras (gP) e granito Serra do Herval (gSH). Observa-se também, nesta imagem, valores elevados de radiação gama sobre os ortognaisses tonalíticos e granodioríticos do Complexo Gnáissico Arroio dos Ratos (cgAR); e, uma incidência muito restrita em alguns pontos isolados sobre os metagranitóides.

Valores anômalos de radiação gama sobre os granitos (cor verde-ciano) podem ser indicativos de variações faciológicas destas rochas, ou ainda, estar relacionado à maior concentração de radioelementos, em decorrência de enriquecimentos supergênicos posteriores.

Na Figura 6.31b, está representada a imagem resultante da combinação do **canal K com a imagem TM**, separando a área de ocorrência de rochas granitóides, em relação aos demais tipos litológicos.

Nesta imagem, a elevada concentração do elemento potássio sobre as rochas granitóides, faz com que a resposta radiométrica seja difusa, espalhando-se por toda área de ocorrência dos mesmos, não permitindo a distinção entre granitos ou granitos e gnaisses.

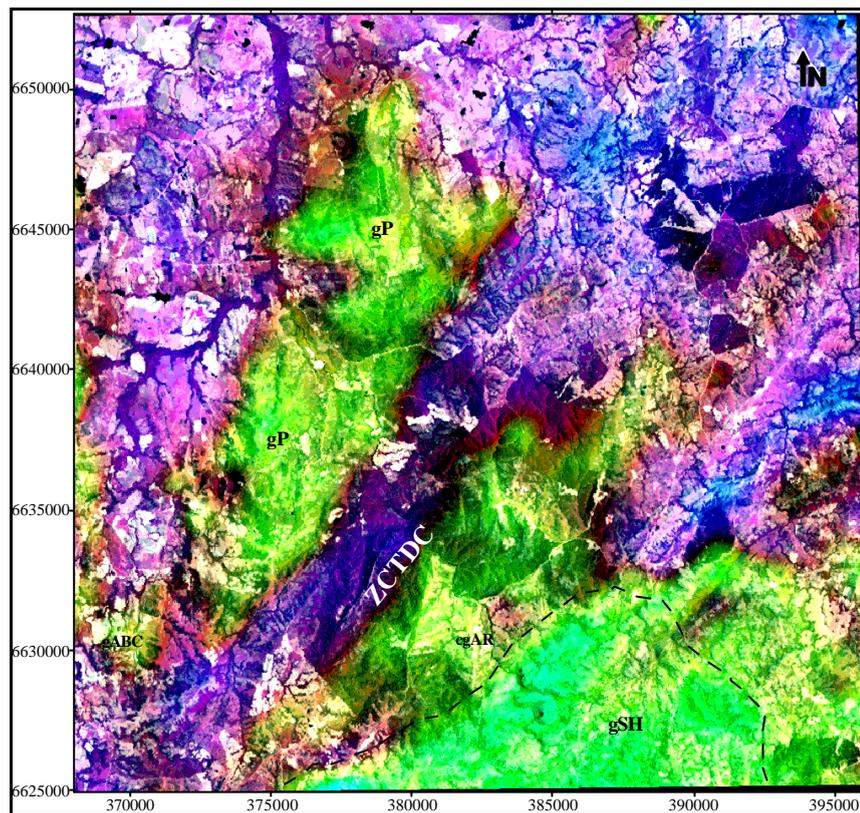
Os baixos valores ocorrem principalmente sobre as rochas sedimentares, o que pode ser decorrente da influência da composição da rocha fonte; e sobre as rochas que sofreram processos de deformação físico-químicas intensas, alterando de sobremaneira a sua composição e estrutura original, como é o caso das faixas de milonitos e filonitos ocorrentes na área.

A **imagem TM integrada com o canal Th** (Fig. 6.32a), mostra enriquecimento neste elemento, das bordas para o centro do corpo do Granito Pitangueiras, sendo indicativo da provável existência de fácies composicionais distintas nessas rochas.

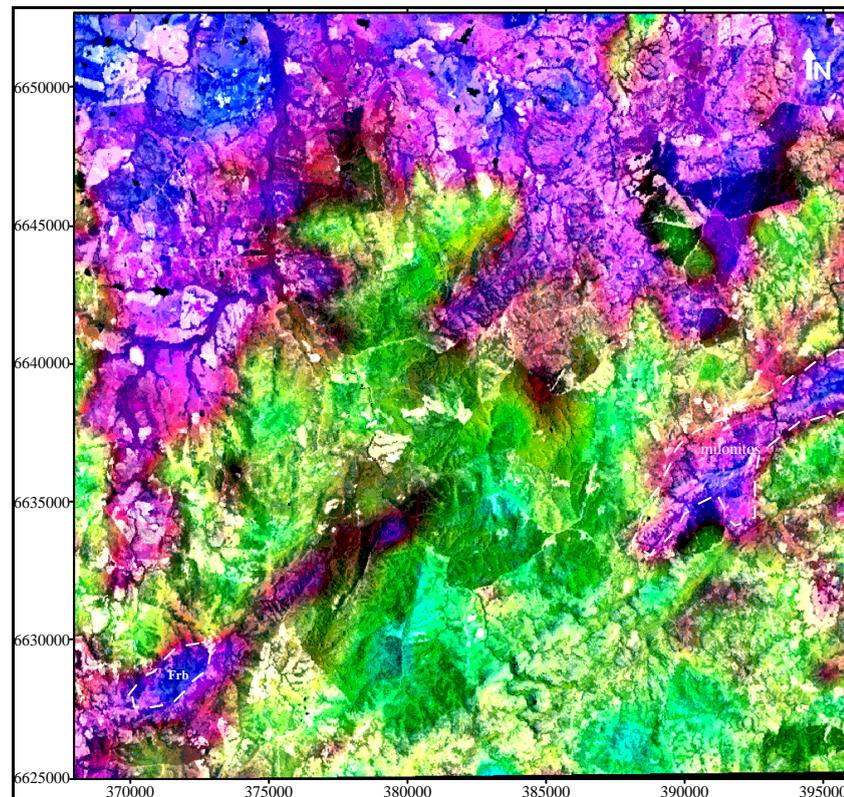
Esta imagem estabelece também, a perfeita definição do contato oeste do gSH com o cgAR, e a estruturação NE-SW dos metagranitóides ao longo da ZCTDC, representada em matizes de cor magenta até azul.

Na imagem da Figura 6.32b, que representa a integração do **canal U com a imagem TM**, ficam melhores definidas, que nas imagens geofísicas, as áreas de distribuição do radioelemento urânio na área de estudo.

A informação geofísica, nestas imagens, é combinada com as informações espectrais da vegetação e água em tons escuros, e solos descobertos em tons claros, oriundas da imagem de satélite.

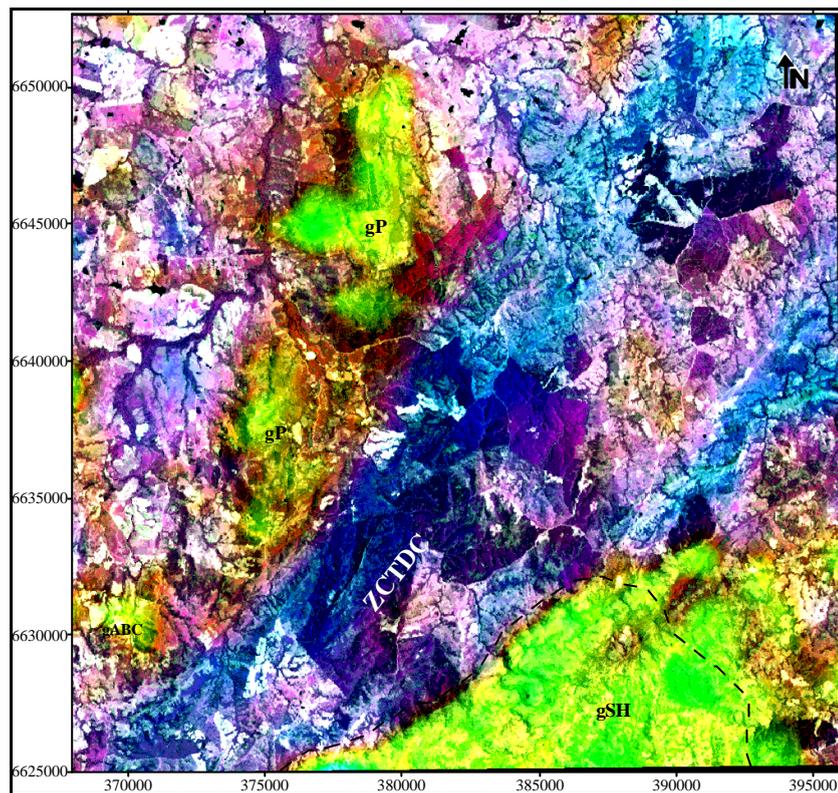


a) TM4 x CT.

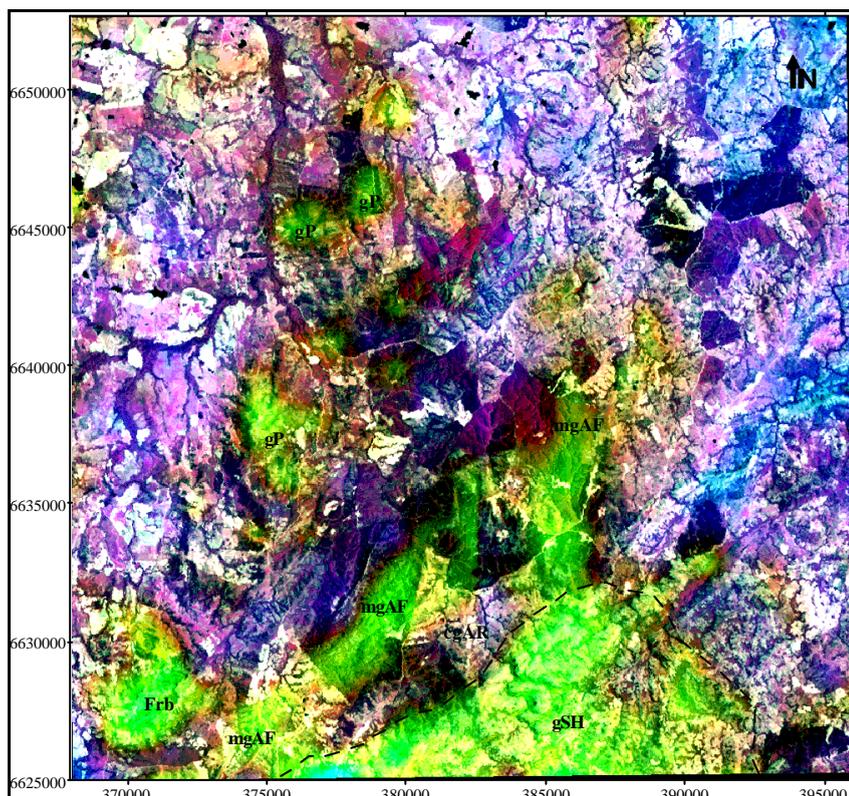


b) TM4 x K.

Figura 6.31 - Imagem resultante da integração IHS das imagens TM 457 e geofísicas. Em a) Componente I mantida constante, H substituída pela imagem CT e S pela banda TM 4. Em b) I constante, H substituída pela imagem geofísica do canal K e S substituída pela banda TM 4.



a) TM4 x Th.



b) TM4 x U.

Figura 6.32 - Imagem resultante da transformação IHS entre as imagens TM 457 e geofísicas. Em a) Componente I mantida constante, H substituída pela imagem Th e S pela banda TM4. Em b) I constante, H substituída pela imagem U e S pela banda TM4.

Esta integração permitiu, novamente, reconhecer os altos valores radiométricos sobre porções do metagranitóide Arroio Francisquinho (mgAF), ao longo da faixa NE-SW, que podem indicar a atuação de processos de alteração hidrotermal.

Como podemos perceber, ainda, nesta imagem, a contribuição do elemento U sobre porções dos granitóides gSH e gP, e sobre a Formação Rio Bonito (Frb) à SW, é relativamente considerável.

Sobre o Granito Pitangueiras, observa-se uma concentração maior em porções localizadas, como sendo aparentes halos de distribuição. No gSH, a distribuição do radioisótopo de U concentra-se na parte central do corpo, aumentando na direção sul, indicando uma variação faciológica nesses granitos.

A concentração elevada de urânio sobre a Formação Rio Bonito está relacionada ao conteúdo de matéria carbonosa dessas rochas, que retém este radioelemento em condições de redução. Essas anomalias podem ser melhor entendidas com estudos de detalhe, pois é reconhecida a importância econômica dos depósitos de U em rochas sedimentares, especialmente em arenitos.

O conteúdo de radiação gama sobre os granitos, principalmente aqueles teores referentes ao canal U, podem ser oriundos da maior exposição de afloramentos rochosos, o que verifica-se em campo, particularmente sobre o gSH.

A existência de fácies composicionais nos granitos da área, poderá ser confirmada com trabalhos de amostragem e detalhamento geológico nas áreas selecionadas pelas imagens.

As respostas espectrais e radiométricas, obtidas nas imagens híbridas, refletindo a informação das bandas TM e geofísicas, facilitaram o entendimento das relações espaciais e espectrais entre as unidades geológicas e os alvos não geológicos da área de estudo.

Estas imagens, foram portanto, apropriadas para o mapeamento básico de tipos de rochas, com destaque para as áreas de ocorrência de rochas granitóides; sistemas estruturais; e, anomalias de K, Th e U; em decorrência da resposta magnética e da informação radiométrica de concentração de radioelementos dos materiais da superfície, sugerindo um estudo mais completo em algumas áreas para futuros trabalhos de prospecção mineral.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES

O processamento e análise dos dados georreferenciados obtidos a partir das informações do Modelo Numérico do Terreno, imagens TM/LANDSAT-5 e imagens de aerolevantamentos geofísicos, apresentaram vantagens e limitações na discriminação de unidades litológicas, estruturas geológicas e alvos para mineralizações. Desse modo, os produtos gerados forneceram informações adicionais e complementares em relação às lito-estruturas anteriormente cartografadas na área de estudo, com os resultados mais relevantes apresentados no Anexo 2.

As vantagens, dizem respeito, principalmente, à possibilidade de realizar cartografia geológica de grandes áreas e de centralização da pesquisa em áreas-alvo promissoras em mineralizações, com custo relativamente baixo e ganho de tempo em relação aos métodos tradicionais de mapeamento geológico.

As limitações, por sua vez, são decorrentes da baixa resolução espacial, espectral e radiométrica dos sensores utilizados. A delimitação das unidades fisiográficas, litológicas, sistemas estruturais, domínios magnéticos e radiométricos poderá ser aprimorada em trabalhos futuros, com o acréscimo de novos dados obtidos de sensores orbitais com melhor resolução, aliado a novas informações, como por exemplo: dados geoquímicos, espectrorradiometria, geofísica de campo e, também, imagens de radar.

A **modelagem tridimensional** para representar o terreno da área de estudo, permitiu uma análise topológica da morfologia do relevo, com um grau de detalhamento maior que as obtidas através de técnicas convencionais de fotointerpretação, auxiliando desta maneira no entendimento da estratigrafia geomorfológica da região.

Com a utilização deste recurso, em conjunto com **fotointerpretação convencional** e de **imagens TM/LANDSAT**, foi possível caracterizar as formas de relevo, feições lineares e alinhamentos de relevo e de drenagem, permitindo a separação dos domínios geomorfológicos e feições fisiográficas presentes na área. Os domínios identificados foram correlacionados com as superfícies de aplainamento existentes no Rio Grande do Sul, com boa confiabilidade.

As técnicas de **realce espectral** das bandas TM, em geral, apresentaram poucas informações para identificação dos tipos de rochas existentes na área. Neste caso, priorizou-se, na maioria das vezes, para a discriminação das unidades litológicas, a análise dos padrões texturais das formas de relevo e drenagem realçadas.

O método **Razão de Bandas** foi útil no reconhecimento de áreas de extração mineral, áreas graníticas e alvos não geológicos, como tipos de vegetação e água.

As **Composições Coloridas das bandas TM** permitiram a observação de feições espectrais nas rochas graníticas intemperizadas, em função da presença de óxido-de-ferro.

As técnicas **Análise por Componentes Principais e Transformação IHS** foram importante no realce espectral e suavização da sombra topográfica.

O método da **Decorrelação** identificou as áreas de extração mineral de caolim e mármores, próximo às cidades de Aroeira e Várzea do Capivarita, e ao sul desta última, no contato do Granito Pitangueiras com o Metanortosito Capivarita.

A utilização de produtos de **sens oriamento remoto**, em particular imagens TM realçadas com filtros direcionais, no reconhecimento geológico-estrutural a partir de técnicas de **análise de lineamentos**, permitiram tecer considerações sobre os tipos e orientações dos sistemas de lineamento predominantes na área em questão. Essa prática é recomendada para estudos preliminares de mapeamento geológico em conjunto com técnicas de fointerpretação.

O sistema principal identificado na área possui “*trend*” NE-SW, com direção predominante entre N30E e N55E, originado pelas deformações de caráter transcorrente, e reativações posteriores das zonas de cisalhamento.

As **imagens magnetométricas** não foram de grande utilidade na discriminação de unidades geológicas e sistemas estruturais, em vista do padrão magnético da área ser praticamente transparente. Mesmo assim, algumas feições como: as anomalias magnéticas associadas às intrusões básicas-intermediárias - “sills” de diabásios; o mapeamento da falha NW-SE que permitiu o posicionamento dessas intrusões; o padrão estrutural dominante (NE-SW) da Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu; e as faixas de cataclase associadas às falhas que definem os contatos do Granito Serra do Herval (gSH), foram perfeitamente reconhecidas.

A análise quali-quantitativa dos dados de **emissão da radiação gama** baseados nos diferentes valores radiométricos, permitiram tecer boas correlações com as unidades litológicas cartografadas.

Nas áreas graníticas-gnáissicas, setores com maiores intensidades de radiação gama, são possivelmente reflexo da variação faciológica desses corpos ou até mesmo da atuação de processos hidrotermais e atividades pós-magmáticas.

As respostas radiométricas são afetadas, no entanto, pela maior exposição de afloramentos rochosos que ocorre nos terrenos graníticos, refletindo em uma resposta mais acentuada, em relação as outras áreas que são recobertas por horizontes de intemperismo e cobertura vegetal.

O **modelamento do relevo radiométrico**, visualizado tridimensionalmente através de técnicas de sombreamento artificial, permitiu diferenciar zonas com altas e baixas concentrações de teores de radioelementos a partir das diferenças de reflectâncias observados nas imagens, através do realce topográfico do relevo geofísico e padrão textural. Essas anomalias são associadas às diferenças litológicas e geoestruturas.

As imagens do canal **Contagem Total (CT)** foram importantes na discriminação de rochas ácidas, principalmente os granitos pós-tectônicos, auxiliando na delimitação de seus contatos com as rochas encaixantes.

As imagens do radioisótopo **Potássio (K)**, da mesma forma que a imagem CT, separaram as ocorrências de granitóides, mas não serviram para distinção entre si, pois os mesmos são constituídos preferencialmente por sienos a monzogranitos, e secundariamente por granodioritos.

As imagens do elemento **Tório (Th)** sugerem a existência de variações faciológicas nos corpos graníticos pós-tectônicos, pois há uma nítida gradação de teores da borda para zonas mais enriquecidas no centro dos corpos do Granito Pitangueiras (gP) e Granito Serra do Herval. Esse canal foi o que apresentou os melhores resultados em discriminação litológica das rochas graníticas das demais unidades, sendo possível a delimitação perfeita dos contatos do Granito Pitangueiras, do Granito Serra do Herval, e da faixa de ocorrência NE-SW dos granitóides sintectônicos à Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu.

O canal do radioelemento **Urânio (U)** mostrou áreas enriquecidas sobre o Metagranito Arroio Francisquinho (mgAF) em faixas de maior deformação/alteração, o que sugere um detalhamento dessas ocorrências em nível de potencial econômico para exploração de minerais de urânio, ou minerais associados, como por exemplo: Cassiterita (SnO_2) e Wolframita (Mn,FeWO_4). Esse canal, também, mostra alto valor em alguns halos dispersos, sobre o gSH e gP, como resultado da presença de minerais acessórios portadores de radioatividade, como por exemplo: zircão, monazita, apatita e esfeno.

As porções sobre o mgAF que mostra valores elevados na **imagem-razão U/Th**, são de grande importância, pois confirmam a presença de processos metassomáticos tardios, indicando áreas-alvos para a realização de estudos mais completos na área.

A maior concentração de urânio, no entanto, ocorre sobre as rochas sedimentares da Formação Rio Bonito (Frb), o que permitiu o reconhecimento espacial desta unidade e anomalias de U ainda não conhecidas, nas diferentes imagens geradas. Esta concentração deve-se a presença de folhelhos carbonosos na Frb, cujo teor de matéria orgânica, permite a retenção do íon U^{+4} , considerando-se que este elemento é bastante móvel durante os processos de intemperismo.

A integração de dados das Imagens TM/LANDSAT-5 e geofísicas, com o uso da **Transformação IHS**, mostrou os **melhores resultados** alcançados nesta pesquisa para a visualização das características morfológicas, geológicas e geofísicas, superando a análise e interpretação individualizada das imagens.

As imagens geradas permitiram uma análise integrada das informações espectrais das bandas TM, em conjunto com as informações radiométricas das imagens geofísicas, revelando com boa fidelidade os principais contatos, tipos de rochas, feições geológicas e, principalmente, a distribuição dos valores de radiação sobre as rochas da área estudada.

A componente **intensidade “I”** ressaltou as variações morfológicas existentes entre os terrenos elevados das rochas graníticas na parte SE da área com o relevos vizinhos. A componente **matiz “H”** refletiu o comportamento espectral dos alvos, através das variações de cores, que caracterizam sobretudo tipos litológicos e mudanças faciológicas nas rochas granito-gnáissicas. A componente **saturação “S”**, por sua vez, contribuiu para dimensionar as quantidades de branco presente na cor.

A imagem **magnetométrica integrada com a imagem TM**, permitiu a observação dos níveis distintos de intensidade magnética sobre a área, delimitando a ocorrência de anomalias das rochas básicas e, a forte estruturação granítica na parte SE da área, em conjunto, com os padrões espectrais da imagem de satélite.

O canal **Contagem Total (CT) integrado com a imagem TM**, apresentou ótimos resultados para diagnóstico de área graníticas, por representar o conteúdo total de radiação oriunda das rochas da superfície, mais a informação espectral dos alvos. A imagem resultante permitiu a nítida delimitação das intrusões graníticas pós-tectônicas que ocorrem na área, principalmente à do Granito Pitangueiras e Granito Serra do Herval, contrastando com os baixos radiométricos das demais rochas.

A **imagem integrada a partir da banda Potássio (K)** apresentou bons resultados na discriminação litológica dos tipos graníticos das demais rochas. Não sendo apropriada, entretanto, para a separação entre os granitóides, pois apesar deste elemento ser bastante abundante nos minerais essenciais das rochas graníticas, a excessiva contribuição resultou numa imagem com informação radiométrica muito dispersa e abrangente, não definindo claramente contatos, ou características faciológicas.

A **imagem híbrida do canal Tório (Th)** apresentou variações de níveis de brilho e espectrais mais nítidas para as rochas granito-gnáissicas, como consequência da presença deste elemento na estrutura de minerais acessórios, tais como: zircão, apatita, comuns aos granitóides da área. Pode ser observado nesta imagem, o enriquecimento em Th das bordas para o centro do

corpo do Granito Pitangueiras, o que pode refletir a existência de fácies distintas nessa unidade.

Esta imagem estabelece, ainda, a perfeita definição do contato do gSH com o Complexo Gnáissico Arroio dos Ratos (cgAR), na parte centro-sul da área. Outra feição bastante evidente é o marcante contato NE-SW, com os metagranitóides, ao longo da Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu.

O **canal de Urânio (U) integrado com a imagem TM** permitiu o reconhecimento de áreas enriquecidas nesse radioelemento, sobretudo sobre rochas graníticas, metagraníticas e sedimentares, apesar deste elemento ser fortemente susceptível no processo generalizado de lixiviação.

A intensidade de radiação gama, relativa ao canal do radioelemento-U, sobre os granitos pós-tectônicos, na parte central e centro-sul da área (gP e gSH), pode ser atribuída a elevada presença de minerais acessórios portadores de radioatividade, como por exemplo: zircão, apatita e esfeno, ou à ocorrência de processos hidrotermais com fluídos mineralizadores. A alta contribuição de U, deve-se também, pela maior exposição de rochas nestes locais.

Sobre o Metagranito Arroio Francisquinho, as anomalias de urânio, são provavelmente decorrentes da atuação de processos tardios com enriquecimento em porções localizadas.

Portanto, esses granitóides, são os mais interessantes do ponto de vista de prospecção, na área de estudo, já que normalmente associados à presença de U, podem ocorrer minérios de Estanho (Sn) e Wolfrâmio (W).

Com relação à concentração elevada de urânio sobre os folhelhos carbonosos da Formação Rio Bonito, é importante ressaltar a necessidade de estudos mais detalhados sobre a origem desse radioelemento, uma vez que, os depósitos de U em rochas sedimentares, contribuem com cerca de 2/3 da produção de urânio em reservas de baixo custo no mundo. Nos E.U.A, por exemplo, 90% das reservas e produção de U são atribuídas aos depósitos sedimentares.

A observação de níveis distintos de radiação gama detectados nas imagens integradas, especialmente sobre as rochas graníticas (Granito Pitangueiras, Granito Serra do Herval, Granito Arroio Braço do Capivari), permitem sugerir um detalhamento maior destas unidades litológicas, com base em dados petrográficos, geoquímicos e descrições de campo, visando sua possível subdivisão em fácies composicionais.

Em síntese, foi possível demonstrar nesse trabalho, que a utilização de técnicas de **Processamento Digital de Imagens e Sistemas de Informações Geográficas** consiste em poderosa ferramenta para integração de dados na geração de imagens e mapas temáticos para aplicações geológicas e geomorfológicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB' SABER, A.N. Participação das superfícies aplainadas nas paisagens do Rio Grande do Sul. In: *Geomorfologia*. Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo. p. 1-17. 1969.
- ANJOS, I.L.S. DOS, MOURÃO, L.M.F. Projeto Extremo Sudeste do Brasil: Relatório Final. Rio de Janeiro: DNPM/CPRM. 5v. (Inédito). 1987.
- ANTENUCCI, J.C., BROWN, K., CROSWELL, P.L., KEVANY, M.J., ARCHER, H. *Geographic information systems - A guide to the technology*. Chapman & Hall, New York, USA. 301 p. 1991.
- ARAÚJO, A.H.de, CARVALHO JR., O. de. Arquitetura e implementação computacional de filtros digitais multidirecionais para aplicação na detecção de lineamentos estruturais e contatos litológicos. In: XXXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Balneário Camboriú, Boletim de Resumos Expandidos. vol.2., p. 335-337. 1994.
- AUADA, V. Imagens de Satélite. *Fator GIS*. 4(13):23-29, Abril/Maio 1996.
- BICHO, C.P. Processamento digital de imagens aerogeofísicas, LANDSAT/TM e radar na folha Presidente Médici/RO com ênfase na caracterização metalogenética da suíte granítica Rio Pardo. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, UnB, Brasília, 103p. 1994.
- BLAKELY, J. R. & GRAUCH, V.J.S. Magnetic models of crystalline terrane: Accounting for the effect of topography. *Geophysycs*, vol. 48, nº 11, p. 1551-1557. 1983.
- BRIGGS, I.C. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, v.39, nº 1, p. 39-48. 1974.
- BROOME, H.J. Generation and interpretation of geophysical images with examples from the Rae Province, northwestern Canada shield. *Geophysics*, v. 55, nº 8, p.977-997. 1990.
- BONHAM-CARTER, G.F. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS*. Pergamon-Elsevier Science- Ltda. Kidlington, U.K. 398p. 1994.
- BOURNE, J.H. Use of magnetic susceptibility, density and modal mineral data as a guide to the composition of granitic plutons. *Mathematical Geology*, v. 25, n.3, p.357-375. 1993.
- CÂMARA, G. Anatomia de um SIG. *Fator GIS*. 1(4):11-15, Janeiro/Fevereiro/Março. 1994.
- CÂMARA, G. Modelos, linguagens e arquiteturas para sistemas de informações geográficas. Tese de Doutorado em Computação Aplicada. São José dos Campos, INPE, SP. 1995.
- CÂMARA, G., FREITAS, U.M. Perspectivas em SIG. *Fator GIS*, 3(10):31-34, Julho/Agosto/Setembro. 1995a.
- CAMERON, E. M., CARRIGAN, W.J. Oxygen fugacity of archean felsic magmas: relationships to gold mineralization. *Geol. Survey Can.*, Paper 87-1A, p.281-298. 1987.

- CARMELO, A.C. Integração de imagens TM/LANDSAT-5 e gamaespectrométricas no estudo geológico do Complexo Caiamar, na Região de Crixás, GO. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, IG/UnB, Brasília, DF, 63p. 1994.
- CARVALHO, A.S. O uso integrado de imagens SAR/JERS-1 TM/Landsat-5 e geofísicas de gamaespectrometria e magnetometria no mapeamento geológico da porção NE do Estado de Roraima, Brasil. Tese de Doutorado (inédita). IG/UnB, Brasília,DF. 1996.
- CHAVEZ JR., P. S. , BERLIN, G.L., MITCHELL, W.B. Computer enhancement techniques of Landsat MSS digital images for land use/cover assessments. *Proceedings of the Sixth Remote Sensing of Earth Resources Symposium*, Tullahoma, TN. p.259-275. 1977.
- CHAVEZ JR., P.S., BERLIN, G.L., SOWERS, L.B. Statistical method for selection Landsat MSS ratios. *Journal of Applied Photogrammetric Engineering*, 8: 23-30. 1982.
- CHAVEZ JR., P. S., SIDES, S.C., ANDERSON J.A. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and Spot panchromatic. *Photog. Eng. & Remote Sensing*, 57(3):295-303. 1991.
- CLARK. D.A. Magnetic petrophysics & petrology. In: *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*. Ed.: Ian Hodgson, Corporate Publications, Australian Geological Survey Organisation. 17(2), 83-103. 1997.
- COSTA, A.F.U.; FERNANDES, L.A.D; MAGRO, F.H.S.; NADAL, C.A. & FELIX, L.M. 1995a. Modelagem Gravimétrica dos Granitóides Sintectônicos à Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu. *Rev. Bras. Geofis.* (Submetido).
- COSTA, A.F.U., RAMGRAB, G.E., FERNANDES, L.A.D., CAMOZZATO, E. & AZEVEDO, M.L.V. Compartimentação tectônica das associações de rochas pré-cambrianas do escudo Sul-rio-grandense baseada em dados de magnetometria e gravimetria. In: V SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, Gramado,RS. p. 236-238. 1995b.
- CRANE, R.B. Preprocessing techniques to reduce atmospheric and sensor variability in multispectral scanner data. *Proceedings of the 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment* (Ann Arbor: University of Michigan). p.1345. 1971.
- CRIPPEN, R.E. The regression intersection method of adjusting image data for band rationing. *Int. J. Remote Sensing*. vol. 8, nº 2, p. 137-155. 1987.
- DARNLEY, A.G. Airbone gamma-ray spectrometry. *Can Min. Metall. Bull.* v.63, p.145-154. 1970.
- DARNLEY, A.G. Airbone gamma-ray survey techniques - present and future. *Uranium Exploration Methods, Proc. Series, I.A.E.A.*, Viena, p.67-108. 1973.
- DARNLEY, A.G. Some notes on the importance of airborne gamma-ray spectrometry in the International Geochemical Mapping. *Journal of Geochemical of Exploration*. v.49, n. 1/2, p. 201-212. 1993.

- DICKSON, B.L. Uranium-serie disequilibrium in Australian soils and its effect on aerial gamma-ray surveys. *Journal of Geochemical Exploration*. v.54, n. 3, p. 177-186. 1995.
- DICKSON, B.L. & SCOTT, K.M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors. In: *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*. Ed.: Ian Hodgson, Corporate Publications, Australian Geological Survey Organisation. 17 (2), 187-200. 1997.
- ELIASON, P.T., DONOVAN, T.J., CHAVEZ JR., P.S. Integration of geologic, geochemical and geophysical data of Cement Oil Field, Oklahoma, using spectral array processing. *Geophysics*, vol. 48, n° 10, p. 1305-1317. 1983.
- EL RAKAIBY, M.L. The use of enhanced Landsat-TM image in the characterization of uraniumiferous granitic rocks in the Central Eastern desert of Egypt. *International Journal of Remote Sensing*, vol 16, n° 6, p. 1063-1074. 1995.
- FAUST, N.L., STAR, J.L., ANDERSON, W.H. Geographic information systems and remote sensing: future computing environments. In: Jeffrey L. Star (Ed.): PROCEEDINGS: THE INTEGRATION OF REMOTE SENSING AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS. ACSM-ASPRS Annual Convention, Baltimore, p.39-49, 1991.
- FERREIRA, J.C.G. Avaliação e integração de dados LANDSAT-TM, geofísicos e geológicos através de técnicas de processamento digital de imagens e sistema de informações geográficas. Dissertação de Mestrado. INPE, São José dos Campos, SP. 1992.
- FERNANDES, L. A. D., TOMMASI, A., PORCHER, C. C., MARQUES-TOIGO, M., GUERRA-SOMMER, M., PICCOLI, A. E. M. Mapa Geológico de Parte das Folhas de Quitéria e Várzea do Capivarita-RS. *Pesquisas-Série Mapas*, P. Alegre. 1988.
- FERNANDES, L.A.D., TOMMASI, A., PORCHER, C.C. Esboço estrutural de parte do Batólito Pelotas - Região de Quitéria-Capivarita. *Acta Geol. Leop.* 13:117-138. 1990.
- FERNANDES, L.A.D., TOMMASI, A., PORCHER, C. C. Deformation patterns in the southern brazilian branch of the Dom Feliciano belt: a reappraisal. *Journal of South American Earth Sciences*, 5(1):77-96. 1992.
- FERNANDES, L.A.D., TOMMASI, A, VAUCHEZ, A., PORCHER, C.C., MENEGAT, R., KOESTER, E. Zona de cisalhamento transcorrente dorsal de Canguçu: caracterização e importância na compartimentação tectônica do cinturão Dom Feliciano. *Revista Bras. Geoc.* 23(2): 1-10. 1993.
- FERNANDES, L.A.D., KOESTER, E. & SOLIANI JR., E.. Evolução do Sistema de Zonas de Cisalhamento Transcorrentes Dorsal de Canguçu no Cinturão Dom Feliciano durante o Neoproterozóico: Uma discussão. In: V SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, Gramado-RS. *Boletim de Resumos Expandidos*. Gramado. SBG/Núcleo RS. p. 30-32. 1995a.
- FERNANDES, L.A.D., MILANI, E.J., MENEGAT, R., FACCINI, U.F., CARAVACA, G., OLIVEIRA, J.M.M.T, VEIGEL, R., VIGNOL-LELARGE, M.L.M., BACHI, F.A., SHERER, C.M.S. Evolução do Sistema de Zonas de Cisalhamento Transcorrentes Dorsal de Canguçu durante o Fanerozóico. In: V SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS

TECTÔNICOS, Gramado-RS. *Boletim de Resumos Expandidos*. Gramado. SBG/Núcleo RS. p.281- 283. 1995b.

FRAGOSO-CESAR, A.R.S., FIGUEIREDO, M.C.H., SOLIANI JR., E., FACCINI, U.F. O Batólito Pelotas (Proterozóico Superior - Eo-Paleozóico), no Escudo do Rio Grande do Sul. In: XXXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Goiânia. Anais...,3, p.1322-1343. Goiânia, GO. 1986.

FRANTZ, J. C. & FERNANDES, L. A. D. Granitóides tardi a pós orogênicos do ciclo Brasileiro no Cinturão Dom Feliciano-RS. XXXVIIIº CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, *Boletim de Resumos Expandidos*. Camboriú-SC, 1:150-152. 1994.

FRASCA, A.A. Aplicações de Sensoriamento Remoto e Análise de Lineamentos em Estudos Tectônicos na Região de São Francisco de Assis, Porção da Borda Meridional da Bacia do Paraná, RS. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. CEPSSRM/ UFRGS, Porto Alegre, RS. 1996. 105 p.

FREDEN, S.C., GORDON JR., F. Landsat satellites. In: COLWELL, N.R. (ed.). *Manual of remote sensing*. 2.ed. v.1, cap.12, p. 517-570. 1983.

GALBRAITH, J.H., SAUNDERS, D.F. Rock classification by characteristics of aerial gamma-ray measurements. *Journal of Geochemical Exploration*. v.18, n. 3, p. 49-73, 1983.

GILBERT, M.A., CONESE, C., MASELLI, F. An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectances from TM images. *International Journal of Remote Sensing*. vol. 15, nº 10, p. 2065-2086. 1994.

GILLESPIE, A.R., KAHLE, A.B., WALKER, R.E. Color enhancement In: GILLESPIE, A.R. & SIEGAL, B.S. *Remote sensing in geology*. New York, EUA. ed. John Wiley & Sons. 1980. p.139.

GILLESPIE, A.R., KAHLE, A.B., WALKER, R.E. Color enhancement of highly correlated images. I. Decorrelation and HSI contrast stretches. *Remote Sensing of Environment*. 20, p. 209-235. 1986.

GRASSO, D.N. Applications of the IHS color transformation for 1:24,000-scale geologic mapping: A low cost SPOT alternative. *Photog. Eng. & Remote Sensing*, 59(1):73-80. 1993.

GRANT, F.S. Regional magnetic/gravity data in selection areas for exploration. In: *Mining Geophysics Workshops*. Paterson, Grant & Watson Limited/Consulting Geophysicists. Ontario, Canada. cap.2, p. 2.1- 2.24. 1982a.

GRANT, F.S. Gamma ray spectrometry for geological mapping and for prospecting. In: *Mining Geophysics Workshops*. Paterson, Grant & Watson Limited/Consulting Geophysicists. Ontario, Canada. cap. 13, p. 13.1- 13.27. 1982b.

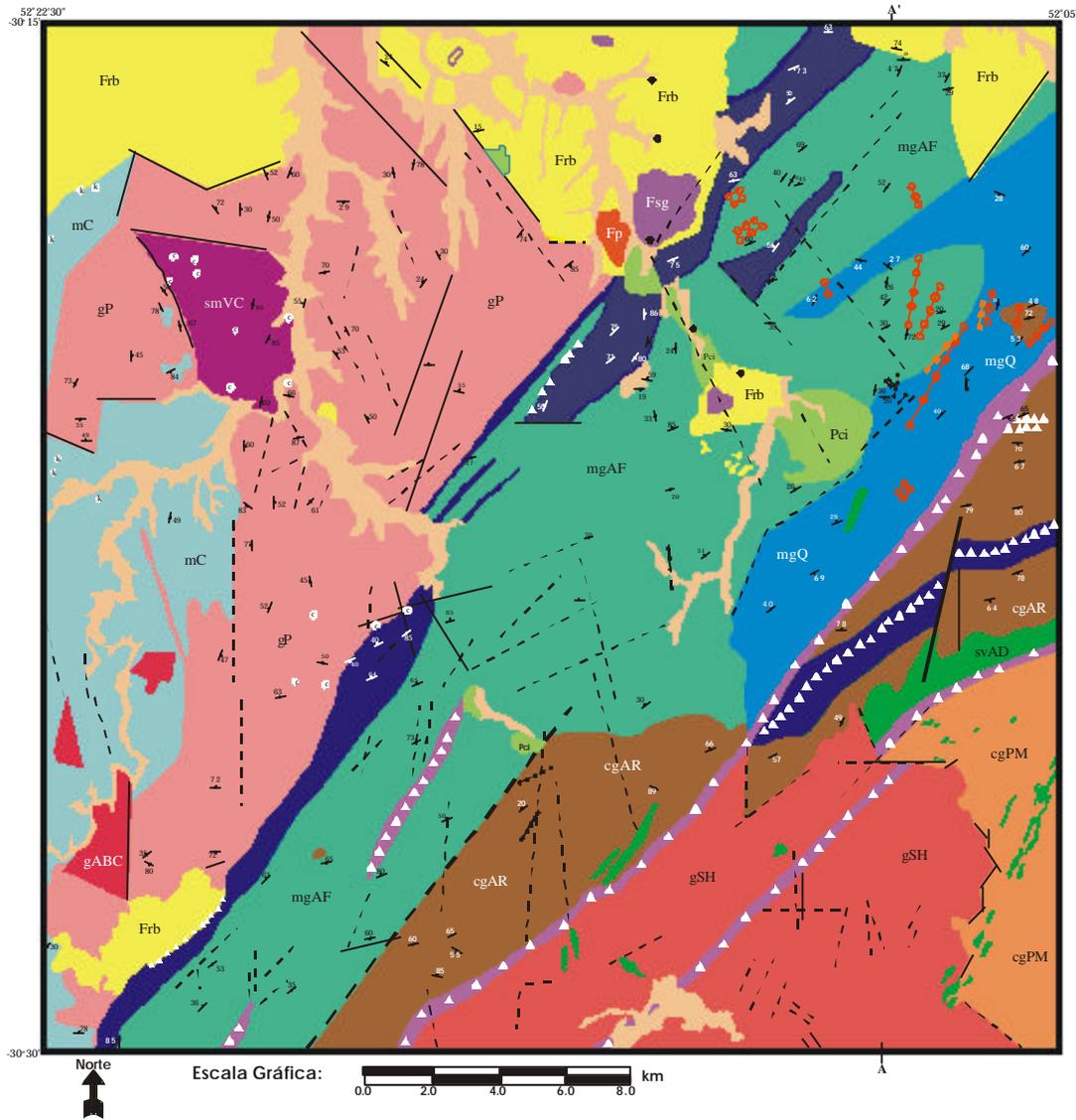
HARRIS, J.R., MURRAY, R., HIROSE, T. IHS transform for the integration of radar imagery with other remotely sensed data. *Photo. Eng. & Remote Sensing*. v.56., n.12, p. 1631-1641. 1990.

- HARRIS, J.R., BOWIE, C., RENCZ, A.N., GRAHAM, D. Computer-enhancement technique for the integration of remotely sensed, geophysical, and thematic data for the geosciences. *Canadian Journal of R. S.*, 20 (3): 210-221. 1994.
- HAYDN, R., DALKE, G.N. HENKEL, J., BARE, J.E. Application of the IHS color transform to the processing of multisensor data and image enhancement. In: INTERNATIONAL SIMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT. 1th Thematic Conference. Remote Sensing of Arida and Semiarida Lands. Proceedings 1, Cairo, Egypt. p. 599-616. 1982.
- HARDING, A.E., FORREST, M.D. Analysis of multiple geological datasets from English Lake District. *IEEE Transac. Geosc. Rem. Sens.*, 27(6):732-738. 1989.
- IBGE. Folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim. Rio de Janeiro:IBGE. vol 33. Projeto RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais. 1986.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Radiometric reporting methods and calibration in uranium exploration. *Technical Report*. n.174, I.A.E.A, Vienna. 1976.57 p.
- JAIN, A.K. *Fundamentals of digital image processing*. Prentice-Hall Information and System Sciences Series. Thomas Kailath (ed.), New Jersey, EUA. 1989. 567p.
- JOST, H., FRANTZ, J.C & BROD, J.A. Revisão da tipologia , cronologia e significado geotectônico dos falhamentos do Escudo Sul-rio-grandense. In: XXXIIIº CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. Anais, SBG, Rio de Janeiro, 3: 1707-1720. 1984.
- KAHLE, A.B., ROWAN, L.C. Evaluation of multispectral middle infrared aircraft for lithologic mapping in the East Tintic Mountains, Utah. *Geology*, 8, 234-239. 1980.
- KILLEN, P.G. CAMERON, G.W. Computation of in situ potassium uranium and thorium concentration from portable gamma-ray spectrometer data. In: *Report of Activities, Part A, Geol. Surv. Can., Paper 77 -1A*, p.91-92. 1977.
- KILLEEN, P.G. Gamma-ray spectrometric methods in uranium exploration - application and interpretation in geophysics and geochemistry in the search for metallic ores. *Geol. Survey of Canada, Economic Geology Report*. n.31, p. 163-229. 1979.
- KING, L.C. The morphology of the earth: A study and synthesis of world scenery. Hafner Publishing Company. New York. 1967. 726 p.
- KNAPP, E.M. *Spatial data integration*. In: Freeman, H., Goffredo, G. Ed. Map. Data Processing. New York, academic, p. 47-61. 1980.
- KOESTER, E., KRAEMER, G., TOMMASI, A., SOLIANI JR., E. & FERNANDES, L.A.D. Evolução geocronológica do magmatismo sintectônico à Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu (RS): Dados Rb/Sr. In: XXXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, *Boletim de Resumos Expandidos*, SBG, Balneário de Camboriú, SC, 1: 383 -384. 1994.

- KOESTER, E. Evolução Geológica do Magmatismo Sintectônico à Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu, região de Encruzilhada do Sul, RS. Dissertação de Mestrado em Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre-RS, 2vol. 240p. 1995.
- KOESTER, E., SOLIANI JR., E., FERNANDES, L.A.D., NARDI, L.V.S. & KRAEMER, G. Posicionamento de magmas cálcio-alcálicos e peraluminoso sintectônicos à Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu. In: V SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, Gramado-RS. *Boletim de Resumos Expandidos*. Gramado. SBG/Núcleo RS. p. 197- 198. 1995a.
- KRUSE, F.A. & RAINES, G.L. A Technique for enhancing digital colour images by contrast stretching in Munsell colour space. *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environmental. Third Thematic Conference, Environmental Research*. Institute of Michigan, Colorado Springs, Colorado, p. 755-773. 1984.
- LIU. J.G, MOORE, J. McM. Hue image RGB colour composition. A simple technique to suppress shadow and enhance spectral signature. *International Journal of Remote Sensing*. vol.11, nº.8., p.1521-1530. 1990.
- MARTINI, J.M. Análise integrada de dados aplicada ao estudo metalogenético da Serra dos Carajás. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, IG/UNICAMP, Campinas, SP, 126 p. 1995.
- MENESES, P.R., COBRA, D.T.Q. Estudo comparativo de técnicas de modificação histográfica de imagens TM Landsat 5. Anais do VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Curitiba, PR. p. 192 - 196. 1993
- MENESES, P.R., ASSAD, E.D., SANO, E.E. Introdução ao processamento de imagens digitais de satélites e sensoriamento remoto. *Textos Universitários*. Brasília, UnB. 1995. 67 p.
- MENESES, P.R, FERREIRA JR., L.G. Comportamento espectral de alvos naturais como base para a interpretação de imagens multiespectrais. *Textos Universitário*. Universidade de Brasília, UnB, Brasília, 1995. (no prelo).
- MISENER, D.J. Airborne magnetometer surveys. In: *Mining Geophysics Workshops*. Paterson, Grant & Watson Limited/Consulting Geophysicists. Ontario, Canada. 1982. cap.1, p. 1.1-1.19.
- MUNECHIKA, C.K., WARNICK, J.S., SALVAGGIO,C., SCHOTT, J.R. Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification accuracy. *Photog. Eng. & Remote Sensing*, 59(1)67-72. 1993.
- PARADELLA, W.R., PIETSH, R.W., TOUTIN, T., BIGNELLI, P.A., VENEZIANI, P., SINGHROY, V.H. Airborne and spaceborne SAR integration with TM-LANDSAT gamma ray spectrometry for geological mapping in a tropical rain forest environment. In: *Eleventh Thematic Conference and Workshops on Applied Geologic Remote Sensing*, Las Vegas, Nevada, EUA. p. I-330: I-342. 1996a.

- PARADELLA, W.R., TOUTIN, T., PIETSCH, R.W. Produtos integrados SAR e cromostereoscopia: uma abordagem metodológica para a fusão de imagens de radar com dados auxiliares e visualização em 3-D na geologia. XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Salvador, BA- Simp. de S.R. Geológico. vol. 7, pp. 100-105. 1996b.
- PINTO, M.N. Aplainamento nos trópicos - uma revisão conceitual. *Geografia*, 13(26): 119-139. 1988.
- PITKIN, J. A., DUVAL, J.S. Design parameters for aerial gamma-ray surveys. *Geophysics*. v. 45, n. 9. p. 1427-1439. 1980.
- PRATT, W.K. *Digital image processing*. 2 ed., John Wiley & Sons. 1991.
- REEVES, C.V. Magnetometer surveys in direct and semi-direct exploration. In: *Mining Geophysics Workshops*. Paterson, Grant & Watson Limited/Consulting Geophysicists. Ontario, Canada. 1982. cap.3, p. 3.1- 3.24.
- ROSE, A.W., WRIGTH, R.J. Geochemical exploration models for sedimentary uranium deposits. *Journal of Geochemical Exploration*. v.13, n. 2/3, p. 153-179. 1980.
- ROLIM, S.B.A. Avaliação do uso da transformação IHS na integração de dados geofísicos (aeromagnetometria) e de sensoriamento remoto (TM-LANDSAT) para a investigação geológica na área do Pojuca (Serra dos Crajás, PA). Dissertação de Mestrado. INPE, São José dos Campos, SP, 1992. 119 p.
- ROTHERY, D.A. Decorrelation stretching and related as an aid to image interpretation in geology. In: *Annual Conference of the Remote Sensing Society*, 13, University of Nottingham, p.194-203. 1987.
- SCHETSSELLAR, E.M., Van DIJK, P.M., Al FASATWI, Y.A. Digital image processing of geophysical data using a raster based GIS. *ITC Journal*, (3):248-252. 1990.
- SHIH, TIAN-YUAN. The reversibility of six geometric color spaces. *Photo. Eng. & Remote Sensing*. v.6., n.10, p.1223-1232. 1995.
- SMITH, A.R. Colour gamut transform pairs. *Proceedings of computer graphics*. Atlanta, Georgia-EUA. v.3, p.12-19. 1978.
- SOARES, P.C., FIORI, A.P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícia Geomorfológica*, Campinas, 16(32):71 - 104, Dez., 1976.
- SOHA, J.M., SCHWARTZ, A.N. Multispectral histogram normalization contrast enhancement. In: PROCEEDING 15th CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING. Victoria, BC, Canadá. p. 86-93. 1978.
- SOLIANI JR., E. Os dados geocronológicos do Escudo Sul-rio-grandense e suas implicações de ordem geotectônica. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 425p. 1986 (Inédito).

- STRIEDER, A.J. & AMARO, V.E. Regional tectonic patterns as removed from remote sensing imagery. In: VII SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS - SBG - Núcleo Minas Gerais. 1993.
- TEIXEIRA, A.L de A., MATIAS, L.F., NOAL, R.H., MORETTI, E. Qual a melhor definição de SIG. *Fator GIS*, 3, n.11. p.20-24. Outubro/Novembro/Dezembro. 1995.
- TELFORD, W.M., GELDART, L.P., SHERIFF, R.E., KEYS, D.A. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. 1976. 860p.
- TEXAS INSTRUMENTS. Projeto Aerogeofísico Camaquã: Estado do Rio Grande do Sul. Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, Convênio DNPM/CPRM e CNEN/CPRM, Relatório final, textos e anexos, 4v. Rio de Janeiro. 1973.
- THORNBURY, W.D. Principles of Geomorfology. Wiley, New York. Chapman, London. 1954. 618p.
- TOMMASI, A. Evolução Cinemática do Cinturão Dom Feliciano. Dissertação de Mestrado em Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre-RS. 207p. 1991.
- TOUTIN, T., RIVARD, B. A new tool for depth perception of multi-source data. *Photog. Eng. & Remote Sensing*. 61(10). p. 1209-1211. 1995.
- TRAVASSOS, J.M., FIGUEIREDO, I. Avaliação da blindagem de uma floresta à radiação gamma natural emitida pelo solo. *Revista Brasileira de Geofísica*. v.1, n. 10, p. 55-64. 1992.
- TRAVASSOS, J.M., PIRES, A.C.B. Sobre a largura ótima das janelas de um sistema gamaespectrométrico. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE TÉCNICAS EXPLORATÓRIAS EM GEOLOGIA, 2, Gravatal, SC, Anais... 1979. p. 437-442.
- VASCONCELOS, R.M., METELO, M.S., MOTA, A.C., GOMES, R.D. *Geofísica em levantamentos geológicos*. DIGEOF-CPRM, Rio de Janeiro, RJ. 1990.
- VENEZIANI, P., ANJOS, C.E. dos. Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia. São José dos Campos, INPE, 1981. 76 p.
- WELCH, R., EHLERS, M. Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data. *Photog. Eng. & Remote Sensing*. 53(3):301-303. 1987.
- WORBOYS, M.F., HEARNshaw, H.M., MAGUIRE, D.J. Object-oriented data modelling for spatial data bases. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4:369 - 383, 1990.
- YEATS, A.N., WYATT, B.W., TUCKER, D.H. Application of gamma-ray spectrometry to prospecting for tin and tungsten granites, particularly within the Lanchlan Fold Belt, New South Wales. *Economic Geology*, v.77, p. 1725-1738. 1982.



MAPA GEOLÓGICO DE PARTE DAS FOLHAS QUITÉRIA E VÁRZEA DO CAPIVARITA RIO GRANDE DO SUL

COLUNA ESTRATIGRÁFICA

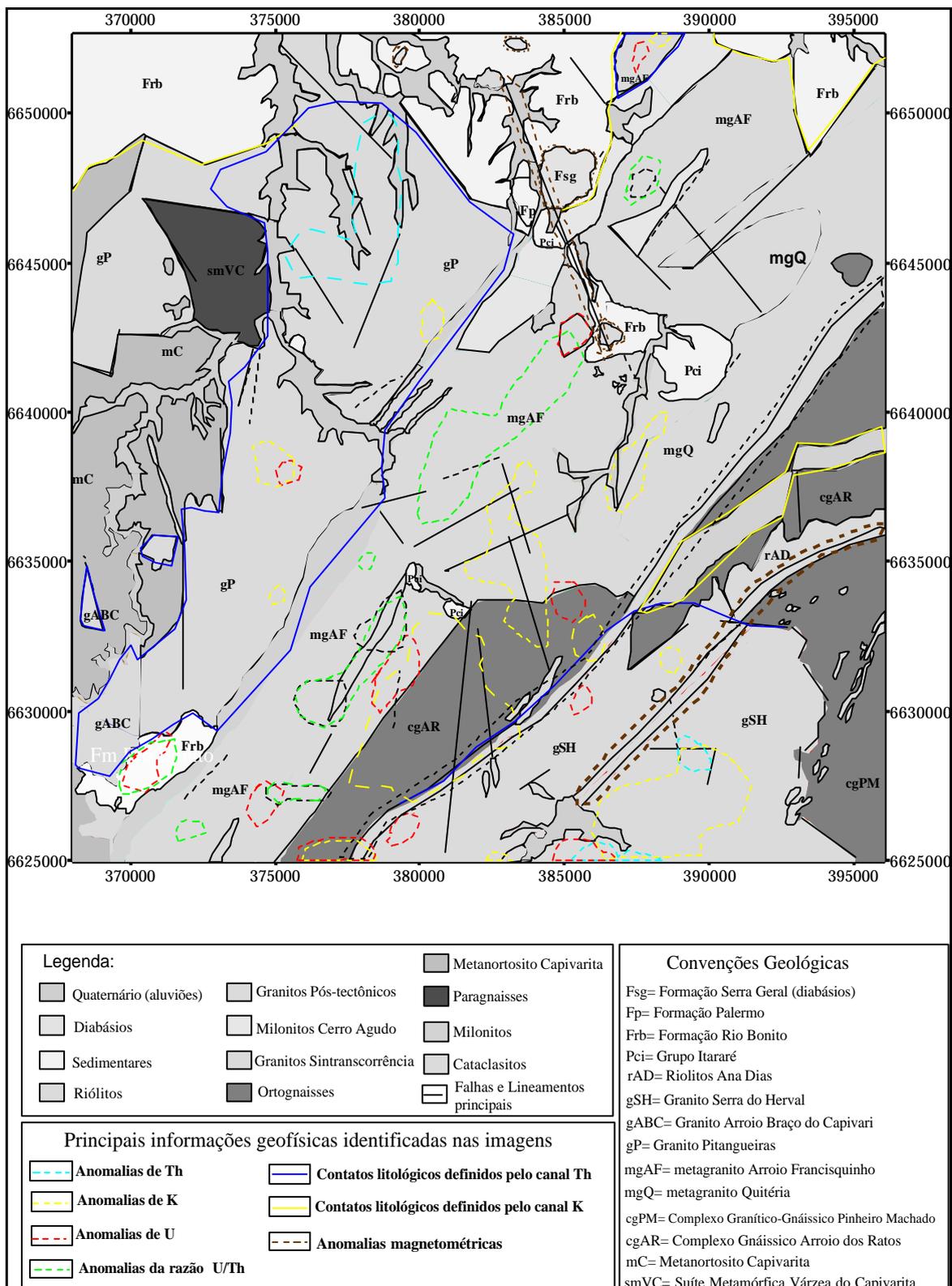
<p>CENOZÓICO</p> <p>Holoceno</p> <p>MESOZÓICO</p> <p>Cretáceo - Jurássico</p> <p style="text-align: center; font-weight: bold;">P A L E O Z O I C O</p> <p style="text-align: center; font-weight: bold;">P R É C A M B R I A N O</p>	<p style="text-align: center; font-weight: bold;">P e r m i a n o</p>	<ul style="list-style-type: none"> Aluviões Formação Serra Geral Formação Palermo Formação Rio Bonito Grupo Itararé Suíte Vulcânica Ana Dias Granito Arroio Braço do Capivarita Granito Serra do Herval Granito Pitangueiras Metagranito Arroio Francisquinho Milonitos e Blastomilonitos Cerro Agudo Metagranito Quitéria Complexo Gnáissico Arroio dos Ratos Compl. Granito-Gnáissico Pinheiro Machado Metanortosito Capivarita Suíte Metamórfica Várzea do Capivarita
---	---	--

LEGENDA:

 Milonitos		Foliação mergulhante
 Quartzo milonitos		Acamadamento horizontal
 Cataclasitos		Diques de diabásio
		Diques de riolito
		Pegmatitos
		Mineração de caulim

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO DE PESQUISA EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA
MAPA GEOLÓGICO DA REGIÃO DE QUITÉRIA - VÁRZEA DO CAPIVARITA
BASE CARTOGRÁFICA: Folhas SH.22-Y-B-1-4 e SH.22-Y-B-1-3 Escala: 1:50.000 Ano: 1979
Projeção: UTM Datum Horiz.: Córrego Alegre (MG)
Mapa Geológico por Fernandes et al. 1988/ Mapa Geológico da Folha SH-22-Y-B (POA) CPRM/1997.
ELABORAÇÃO : MÁRCIO ANDRÉ KLEIN CEPSRM/UFRGS/1998.

ANEXO 2 - MAPA DE ANOMALIAS GEOFÍSICAS



ANEXO 3 - TABELA DE ANÁLISES QUÍMICAS

Amostra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeOt	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	Ti	Rb	Ba	Sr	Zr
gSH	73,87	0,25	12,58	2,01	0,04	0,2	1,26	4,04	4,78	0,05	0,18	1499	349	608	91	164
gSH	75,4	0,15	11,42	1,92	0,02	0,03	0,73	4,13	4,62	0,02	0,18	899	401	76	0	161
gSH	75,1	0,17	11,91	1,8	0,03	0,1	0,93	4,04	4,56	0	0,24	1019	329	105	46	103
gSH	75,9	0,18	11,79	1,66	0,04	0,13	0,97	4,04	4,29	0,04	0,28	1079	403	199	38	99
gABC	68,9	....	16,7	2,86	0,03	0,59	1,5	3	5,77	0,14	....	....	183	703	170	280
gABC	76,48	....	11,34	2,86	0,06	0,02	0,81	3,08	5,09	0,03	....	....	99	66	<30	340
gABC	75,43	....	12,34	2,48	0,04	0,03	0,88	3,49	5,07	0,02	....	....	238	165	35	295
gP	74,95	0,21	11,95	2,48	0,03	0,22	1,15	3,8	5,15	0,05	....	....	217	1466	360	345
gP	66	1	15,75	4,94	0,1	1,51	2,66	3,41	4,3	0,34	....	....	266	759	210	285
gP	64,65	1,35	15,1	6,23	0,12	1,43	3,3	3,68	3,83	0,3	....	....	170	616	295	195
gP	66,58	1,14	14,2	5,35	0,11	1,49	3,23	3,38	4,18	0,33	....	....	196	1356	310	385
gP	64,67	1,4	14,92	6,38	0,11	1,52	3,72	3,44	3,41	0,43	....	....	221	1124	315	355
mgAF	71,89	0,06	16,07	0,82	....	0,66	0,85	3,1	5,63	0,11	0,08	....	244	439	257	84
mgAF	72,18	0,02	15,16	0,84	....	0,63	0,58	4,2	5,31	0,07	0,06	....	313	278	192	54
mgAF	73,44	0,08	15,85	0,89	0,01	0,73	0,97	3,27	4,76	0,14	0,12	....	40	228	255	....
mgAF	72,59	0,02	16,32	1,03	0,01	....	0,75	3,47	3,81	0,13	0,16	....	234	65	100	70
mgAF	72,53	0,07	15,72	0,91	0,02	0,69	0,6	4,09	3,91	0,23	0,01	....	507	191	78	79
mgQ	70,12	0,5	14,51	3,25	0,01	0,87	2,74	3,1	2,87	0,21	0,29	....	....	....	....	....
mgQ	69,33	0,5	15,13	3,23	0,02	0,79	2,57	3,37	3,5	0,2	0,22	....	....	....	....	....
mgQ	68,67	0,55	15,05	3,72	0,02	0,95	2,62	3,1	3,06	0,23	0,25	....	....	....	....	....
mgQ	67,36	0,64	14,94	4,05	0,05	1,13	3,01	3,82	2,7	0,18	0,07	....	....	....	....	....
mgQ	66,1	0,74	15,26	4,6	0,06	1,33	3,12	3,68	3,15	0,16	0,11	....	....	....	....	....
mC	53,73	1,46	16,02	8,97	0,14	3,81	6,55	4,04	2,82	0,49	0,08	....	....	....	....	....
mC	55,69	0,11	25,99	10,2	0,01	0,13	9,46	4,85	0,36	0,16	....	....	....	....	....	....
mC	46,34	2,18	13,98	24,6	0,24	6,36	9,59	2,16	1,49	0,28	0,15	....	....	....	....	....
mC	54,26	0,09	27,05	10,7	0,01	0,23	9,83	4,72	0,49	0,15	0,16	....	....	....	....	....
mC	50,57	0,21	23,68	15,2	0,07	2,68	9,67	4,04	1,01	0,14	0,17	....	....	....	....	....

Fonte: Koester, 1995.

Onde:

gSH = Granito Serra do Herval;

gABC = Granito Arroio Braço do Capivari;

gP = Granito Pitangueiras;

mgAF = Metagranito Arroio Francisquinho;

mQ = Metagranito Quitéria;

mC = Metanortosito Capivarita.