

Ainda que a figueira não floresça, nem haja fruto na vide; o produto da oliveira minta, e os campos não produzam mantimentos; as ovelhas sejam arrebatadas do aprisco, e nos currais não haja gado, todavia, eu me alegro no SENHOR, exulto no Deus da minha salvação (Hc 3:17-18).

Dedicatória

Àquele que nos ama, e, pelo seu sangue, nos libertou dos nossos pecados, e nos constituiu reino, sacerdotes para o seu Deus e Pai, a ele a glória e o domínio pelos séculos dos séculos.

Ao Meu Marido Charly e à Minha Filha Amanda.

À minha Mãe, Mariana (in Memoriam), fica a certeza de um dia nos encontramos.

Agradecimentos

Ao Meu Deus e seu Amado Filho Jesus Cristo, toda honra, toda glória e todo louvor sejam dados a Ti.

A palavra de Deus em Romanos 13:7b diz: Pagai a todos o que lhes é devido: a quem respeito, respeito; a quem honra, honra.

Ao concluir esse trabalho gostaria de agradecer às pessoas e instituições que pela sua colaboração e ajuda, tornaram viável a concretização desta tese.

Aos Professores Doutores Augusto César Bittencourt Pires e Claudinei Gouveia de Oliveira pela orientação e inestimável ajuda em todos os momentos de necessidades, assim como pelas leituras e críticas feitas aos escritos originais.

Ao Professor Doutor Roberto Alexandre Vitória de Moraes da HGEO Tecnologia em Geociências pelos ensinamentos e orientação pronta e dedicada sobre geofísica.

Ao Doutor Marcelo de Lawrence Bassay Blum pelo apoio, ensinamentos e correções dos escritos.

Ao Grupo Belmont Gemas Ltda., em nome do Engenheiro de Minas Luís Carlos Terto, pelo acompanhamento e informações durante a visita àquela empresa.

À Geóloga e Doutoranda da Universidade de Brasília (UnB), Gloria Obando, pelos ensinamentos no uso do geosoft e prestimosas sugestões nas discussões referentes à geofísica e pela amizade.

Ao colega Leandro pela prestimosa colaboração e ensinamentos do SIG ArcView.

À estudante de graduação Aline dos Anjos pela confecção de mapas e ensinamentos no uso do ArcView.

À Cristiane Moura, estudante de mestrado, pela ajuda na confecção de mapas e uso do ArcGis.

À Professora Doutora Maria de Lourdes Fernandes do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais (IG/UFMG), por ajudar-me nas etapas de levantamento bibliográfico, assim como pelas valiosas informações.

Ao administrador do Laboratório de Geofísica Aplicada, Osmar que sempre esteve disponível para ajudar e pelas conversas descontraídas e amigáveis durante minha permanência nesse laboratório.

Aos secretários da Pós-Graduação e do Instituto de Geociências pelos préstimos e atenção.

Aos colegas do Curso de Pós-Graduação, que contribuíram, quer sejam pelas discussões nos momentos de estudo e pesquisa, quer sejam pelo convívio, amizade e espírito de companheirismo.

À Mestre Ieda Ferreira de Oliveira pela amizade e hospedagem quando da minha estadia em Belo Horizonte.

Agradeço às instituições que me permitiram a realização desse trabalho.

Ao Departamento de Geologia da Universidade de Brasília que me permitiu a realização desse trabalho, assim como pela locação dos laboratórios e liberação de carro para visita ao campo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo imprescindível suporte financeiro oferecido através de bolsa de doutorado e auxílio pesquisa.

Ao Laboratório de Geofísica Aplicada pelo uso de suas dependências durante esses quatro anos.

À CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) e ao DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral) pela doação dos dados de aerogeofísica.

À COMIG (Companhia de Mineração do Estado de Minas Gerais) pelo fornecimento de dados, mapas e imagens que foram de uso essencial nesta tese.

Agradecimentos muito especiais aos meus pais, Cícero e Mariana, ao Charly, meu marido e à Amanda, minha filha, e a Niramar, Diogo e Gracy que me apoiaram em todas as fases desta tese, ajudando-me a suportar as pressões e as ausências com amor e compreensão.

Aos amigos e irmãos em Cristo, Patrícia, Neide, Judith, Adriana e Revenildo pelo companheirismo, alegria e orações nas horas de maior pressão e dificuldades.

Abstract

O temor do SENHOR é o principio do saber (Pv 1:7).

The Itabira-Ferros area is located in the Quadrilátero Ferrífero region, State of Minas Gerais, and it is known for abundant emerald occurrences. The area is characterized by volcanic metasedimentary sequences of the greenstone belt type (Rio das Velhas Super group) and paleoproterozoic iron formations of Minas Super Group, inserted in granitic bodies (Borrachudos Unit). Emerald genesis is associated to the interaction of pegmatitic fluids with mafic-ultramafic rocks of Rio das Velhas Super group.

The present work presents data processing, with the purpose of studying and analyzing airborne geophysical information and the integration with geological data, in order to determine zones prone to carry emerald mineralization. The results obtained with the interpretations of this airborne survey were individually analyzed and integrated among them. The final result of this study has two main specific objectives: the first illustrates the application of geophysical data to the geological and structural mapping and the second, to the mineral prospecting. In the first case evidence is shown of the use of geophysics derived information in the support of geological mapping and structural characterization. In the second, is shown how airborne geophysics can help in the characterization of exploration targets. From this study potential areas for mineralization are identified.

In gamma-ray spectrometry, the total count image leads to the definition of a framework of major units covering the area. The analysis of the distribution of the K, U, and Th elements, used together with ternary RGB and CMY images, leads to the characterization of units and structures. The processing of airborne magnetic data leads to images of the anomalous magnetic field, amplitude of analytical signal, magnetic field reduced to the pole, and analytical signal inclination. These images conducted to the design of a framework with emphasis on the crystalline basement of the region, with the definition of shallow and deep units. The integration of magnetic and gamma-ray spectrometric units leads to the definition of 27 distinct geophysical units. Most of these units are correlated to known geological units, however some of them have no correlation with mapped units in the area. Main magnetic and gamma-ray

spectrometric interpretes structures are correlated. This pattern seems to indicate that the main gamma-ray spectrometric lineaments are related to magnetic structures. These, on the other hand, are related to tectonic structures present on the study area. The main magnetic structure cuts the study area at a 70° angle to the gamma-ray structures, associated with the outcropping lithologies. Brittle structures, related to pressure relief in the directions E-W and N-S, are noticed in association with gamma-ray lineaments. Analysis and interpretation of the mentioned images suggests the presence of three deformation events. The lineament D1 represents the preferential direction of alignment, NE-SW. In the central region of the area, there is a sigmoidal feature that, probably, may reflect the Pedra Branca shear zone, with dextral movement. Lineament D2 cuts lineaments in the E-W direction, indicating, probably, a transcurrent system of faults with a sinistral movement, indicated by D1 lineament being displaced by D2 faults, as observed in central and northern portions of the area. Other brittle structures are present in the N40°W direction.

The maps with interpretation of geophysical units and structures show that mineralization in the region occurs in deeply faulted areas, specially associated to the border of the Pedra Branca shear zone, reflex of ductile displacement in the area. The main unit containing emerald mineralization is unit SGRv2, Rio das Velhas Supergroup. Known mineralizations form a belt, with a general NW-SE trend, between two faults, in the same direction, and the cities of João Monlevade and Dores de Guanhões. Emerald mineralizations remain to the east of the Pedra Branda shear zone, directly associated to NE-SW structures. Other beryl mineralizations (acqua marine and other beryls) are associated to the central portion of the shear zone or to other N-W and E-W features cutting the area. Image resulting from the integration of airborne magnetic and gamma-ray data indicates region with potential mineralization for emerald. Potential areas without spatial association with known occurrences suggest the enlargement of the exploration potential for gems for the region.

A área de Itabira-Ferros está situada na região do Quadrilátero Ferrífero, Estado de Minas Gerais e é conhecida pelas abundantes ocorrências de esmeralda. A área é caracterizada por seqüências vulcanossedimentares tipo greenstone belts (Supergrupo Rio das Velhas) e formações ferríferas bandadas paleoproterozóicas do Supergrupo Minas inseridas dentro de corpos graníticos (Suíte Borrachudos). A formação da esmeralda é atribuída à interação de fluidos pegmatíticos com rochas máficas-ultramáficas do Supergrupo Rio das Velhas.

O presente trabalho apresenta o processamento de dados, o qual teve como propósito o estudo e a análise de informações geofísicas aéreas e a integração dos mesmos com dados geológicos, para determinar prováveis zonas de mineralização de esmeralda. Os resultados obtidos com as interpretações deste aerolevante foram analisados individualmente e integrados entre si. O resultado deste estudo tem dois objetivos específicos: O primeiro ilustra a aplicação dos dados geofísicos no mapeamento geológico-estrutural, e o segundo à prospecção mineral. No primeiro caso procurou-se evidenciar a utilização das informações derivadas da aerogeofísica como suporte e detalhamento das atividades de mapeamento geológico e caracterização estrutural. No segundo caso, em como a aerogeofísica poderia ajudar na caracterização de alvos para a prospecção. Deste estudo destacaram-se algumas áreas com potencial neste tocante.

Na gamaespectrometria, a imagem do canal de contagem total permitiu definir um arcabouço contemplando a compartimentação em grandes unidades para a área. A análise do comportamento dos elementos K, Th, U foi realizada em conjunto com as imagens ternárias RGB e CMY, sendo possível à separação de unidades e estruturas. O processamento dos dados aeromagnetométricos permitiu a criação de imagens do campo magnético anômalo, a amplitude do sinal analítico, o campo magnético reduzido ao pólo e a inclinação do sinal analítico. Essas imagens foram utilizadas para traçar o arcabouço com ênfase no embasamento cristalino dessa região, sendo definidas unidades magnéticas profundas e rasas. A integração das unidades magnéticas com as gamaespectrométricas permitiu delimitar 27 unidades geofísicas distintas. Muitas dessas unidades são correlacionáveis à geologia conhecida, porém outras unidades não têm

aparente representação geológica em mapa. As estruturas gamaespectrométricas e magnéticas principais interpretadas mostram muitas similaridades entre si. Este padrão parece indicar que os principais lineamentos gamaespectrométricos estão associados às estruturas magnéticas. Essas por sua vez, estão diretamente associadas às estruturas tectônicas impressas na área de pesquisa. A estrutura magnética principal corta num ângulo de 70° as estruturas gamaespectrométricas, aquelas associadas às litologias expostas na superfície. Notam-se também estruturas rúpteis de alívio nas direções E-W e N-S associadas aos lineamentos gamaespectrométricos. As análises e interpretações estruturais dessas imagens sugerem a presença de três eventos deformacionais. O lineamento D1 representa a direção de alinhamento preferencial, NE-SW. Na região central da área, tem-se uma feição em sigmóide que, provavelmente, pode representar a zona de cisalhamento Pedra Branca, de movimento dextral. O lineamento D2 trunca os lineamentos de direção E-W, configurando, provavelmente um sistema de falhas transcorrentes de movimento sinistral, visto que alguns lineamentos D1 são deslocados por D2, isto pode ser observado no grande lineamento que cruza a área na porção central, bem como do extremo norte. Outras feições rúpteis são marcadas por direção aproximada de $N40^\circ W$.

Os mapas das interpretações dos domínios e estruturas geofísicas mostram que as mineralizações da região ocorrem em áreas falhadas, principalmente ligadas às bordas da zona de cisalhamento Pedra Branca, reflexo de deslocamento dúctil da área. A principal unidade que contém a mineralização de esmeralda é a unidade SGRv2, Supergrupo Rio das Velhas. As mineralizações conhecidas formam uma faixa entre duas falhas de mesma direção, NW-SE, entre as cidades de João Monlevade e Dolores de Guanhanes. As mineralizações de esmeralda ocorrem na porção leste da zona de cisalhamento Pedra Branca, ligadas diretamente às estruturas NE-SW, enquanto as águas-marinhas e outros berilos na parte central da mesma ou a outras feições NW e E-W que recortam a área. Imagem resultante da integração dos dados aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos indica a região de ocorrência potencial de mineralização de esmeralda. Áreas potenciais sem associação espacial com ocorrências conhecidas sugerem a perspectiva de ampliação do potencial de exploração de gemas para a região.

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMENTOS	iv
ABSTRACT	vi
RESUMO	viii
ÍNDICE	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xv
ANEXOS	xvi
ÍNDICE DE FIGURAS DOS ANEXOS	xix
ÍNDICE DE TABELA DOS ANEXOS	xxi

1 - Introdução

1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 JUSTIFICATIVA	3
1.4 LOCALIZAÇÃO E ACESSO	4
1.5 MÉTODOS UTILIZADOS	5
1.6 BASE DE DADOS	6

2 – Contexto Geológico

2.1 INTRODUÇÃO	9
2.2 O ORÓGENO ARAÇUAÍ E O CINTURÃO ARAÇUAÍ	9
2.3 GEOLOGIA	14
2.3.1 Embasamento	14
2.3.1.1 SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS	15
2.3.2 Paleoproterozóico	18
2.3.2.1 SUPERGRUPO MINAS	18
2.3.2.2 SUÍTE BORRACHUDOS	19
2.3.3 Mesoproterozóico	23
2.3.3.2 UNIDADE ITAMBÉ DO MATO DENTRO	23
2.3.4 Neoproterozóico	23
2.3.4.1 VEIOS DE QUARTZO E PEGMATITOS	23
2.4 EVOLUÇÃO GEOLÓGICA REGIONAL	24

2.5 MINERALIZAÇÕES DA ÁREA	25
2.5.1 Mineralizações de Minerais-Gemas	27
2.5.1.1 MINERALIZAÇÕES DE BERILOS	27
2.5.1.1.1 Esmeralda	27
2.5.1.1.2 Águas-marinha	29

3 – Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos

3.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS MAGNÉTICOS	31
3.1.1 etapas para a Confecção da Malha Regular	32
3.1.1.1 AVALIAÇÃO DOS DADOS	32
3.1.1.2 DIFERENÇA QUARTA	34
3.1.1.3 TRANSFORMAÇÃO DA MALHA ORIGINAL EM MALHA REGULAR	35
3.1.1.4 CÉLULA E MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO	36
3.1.1.5 MICRONIVELAMENTO	39
3.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS	42
3.2.1 Avaliação dos Dados	42
3.2.2 Diferença Quarta	43
3.2.3 Interpolação e Micronivelamento	43
3.2.4 Processamento das Imagens Magnéticas e Gamaespectrométricas	46

4 – Interpretação dos Dados Gamaespectrométricos

4.1 APRESENTAÇÃO	47
4.2 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS	47
4.2.1 Modelo Digital de Elevação de Terreno	48
4.2.2 Tório	48
4.2.3 Potássio	50
4.2.4 Urânio	50
4.2.5 Contagem Total	54
4.2.6 Imagens Ternárias (RGB e CMY)	57
4.2.7 Razões Th/K, U/K e U/Th	60
4.2.7.1 RAZÃO TH/K	60
4.2.7.2 RAZÃO U/K	60
4.2.7.3 RAZÃO U/TH	61
4.2.8 Outras Imagens Gamaespectrométricas	65
4.2.8.1 DADOS NORMALIZADOS	65
4.2.8.2 FILTRO DE AMPLITUDE	69

4.2.8.3 ANÁLISE DE GRUPOS (CLASSIFICAÇÃO NÃO SUPERVISIONADA)	73
4.2.8.4 POTÁSSIO ANÔMALO	76
4.2.9 Mapa dos Domínios Gamaespectrométricos	80
4.2.10 Estruturas Gamaespectrométricas	83
4.2.11 Mapa dos Domínios e Estruturas Gamaespectrométricas Interpretadas	85

5 – Interpretação dos Dados Magnetométricos

5.1 INTRODUÇÃO	87
5.2 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS MAGNÉTICOS	87
5.2.1 Espectro de Potência Ponderado Radialmente	88
5.2.2 Campo Magnético Anômalo	89
5.2.3 Estruturas Magnéticas	93
5.2.3.1 INTERPRETAÇÃO DAS ESTRUTURAS MAGNÉTICAS	93
5.2.4 Caracterização dos Domínios Magnéticos	98
5.2.4.1 FONTES MAGNÉTICAS PROFUNDAS	98
5.2.4.2 FONTES MAGNÉTICAS RASAS	103
5.2.5 Deconvolução de Euler	109
5.2.6 Mapa das Unidades e Estruturas Magnéticas Interpretadas	114

6 – Integração dos Dados Geofísicos a Geologia e à Prospecção Mineral

6.1 INTRODUÇÃO	116
6.2 INTEGRAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS	116
6.2.1 Integração das Estruturas Geofísicas	121
6.3 INTEGRAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS À GEOLOGIA	126
6.3.1 Mapeamento Geológico	126
6.3.1.1 EMBASAMENTO	134
6.3.1.2 SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS (SGRV)	137
6.3.1.3 SUPERGRUPO MINAS (SGM)	139
6.3.1.4 SUÍTE BORRACHUDOS (SB)	140
6.3.1.5 UNIDADE ITAMBÉ DO MATO DENTRO (UImD)	142
6.3.1.6 INTRUSÕES DIVERSAS – METAGRANITÓIDES (Mg)	143
6.3.2 Integração das Estruturas Geofísicas-Geológicas	144
6.3.3 Prospecção Mineral	152

<i>7 - Conclusões</i>	167
-----------------------	------------

Figura 1.1: Mapa de localização do Cinturão Esmeraldífero de Minas Gerais. Nesse cinturão estão inseridas as principais jazidas de esmeralda da região. Mostra também a localização da área do Projeto Itabira-Ferros dentro desse cinturão (Modificado de Souza <i>et al.</i> 1992).	05
Figura 1.2: Mapa de localização do aerolevante Itabira-Ferros, Quadrilátero Ferrífero, MG (Geomag 1996).	08
Figura 2.1: Mapa geológico simplificado mostrando a localização dos Cinturões Araçuaí, Ribeira e Brasília (modificado de Peres <i>et al.</i> 2004).	10
Figura 2.2: Mapa geológico regional da área em estudo (modificado de Peres <i>et al.</i> 2004).	12
Figura 2.3: Modelo para a evolução tectônica da porção meridional do Cinturão Araçuaí durante a fase D ₁ (Peres <i>et al.</i> 2004).	13
Figura 2.4: Mapa geológico da área em estudo contendo as principais compartimentações geológicas e estruturais da área do Projeto Itabira-Ferros (CPRM 2004). A-B detalhe da figura 2.8.	16
Figura 2.5: Coluna estratigráfica proposta por Marshak & Alkimim (1989) para os Supergrupos Rio das Velhas e Minas.	18
Figura 2.6: Mapa litológico representando os principais maciços de Granitos Borrachudos, o complexo granítico-gnáissico e as principais falhas encontradas no Cinturão Esmeraldífero do Estado de Minas Gerais (modificado de Fernandes <i>et al.</i> 1994).	20
Figura 2.7: Mapa mostrando as principais ocorrências minerais de berilo (esmeralda, água-marinha e berilos incolores) da área de estudo.	26
Figura 2.8: Mapa geológico mostrando um detalhe da área de ocorrência das rochas vulcanossedimentares na região entre Itabira e Nova Era, de acordo com a figura 2.4. Ela contém as principais jazidas de esmeraldas do Estado de Minas Gerais (modificado de Souza 1991).	28
Figura 3.1: Esquema mostrando as principais etapas para obtenção dos produtos magnéticos.	31
Figura 3.2: Mapa esquemático mostrando a orientação das linhas de vôo e controle do levantamento aerogeofísico da área em estudo.	33
Figura 3.3: Esquema mostrando a forma de obtenção do controle de dados através da diferença quarta.	34
Figura 3.4: Perfil da linha 1481 mostrando os dados sem correção (linha vermelha) e respectiva diferença quarta (linha azul).	35
Figura 3.5: Perfil do campo magnético anômalo mostrando os métodos de interpolação: (a) original e bidirecional, (b) original e curvatura mínima, (c) original e krigagem e (d) os tres métodos de interpolação com os dados originais.	38
Figura 3.6: Perfil do campo magnético anômalo com os dados antes e após o micronivelamento da área estudada.	40
Figura 3.7: Imagem da intensidade do Campo Magnético Anômalo antes (A) e após (B) o micronivelamento.	41
Figura 3.8: Esquema das principais integrações efetuadas para os dados gamaespectrométricos.	42
Figura 3.9: Perfil da linha 1970:0 analisado pela diferença quarta para o canal de contagem total.	43

Figura 3.10: Perfil da imagem de contagem total mostrando os métodos de interpolação curvatura mínima e bi-direcional testados nos dados gamaespectrométricos.	44
Figura 3.11: Imagem do canal de urânio antes (A) e após o micronivelamento (B).	45
Figura 4.1: Imagem do Modelo Digital de Elevação de Terreno (MDT)	49
Figura 4.2: Imagem do canal de Tório	51
Figura 4.3: Imagem do canal de Potássio	52
Figura 4.4: Imagem do canal de Urânio	53
Figura 4.5: Imagem do canal de Contagem Total	55
Figura 4.6: Mapa dos domínios gamaespectrométricos retirados a partir da imagem de contagem total. Com contribuições adicionais das demais imagens de gamaespectrometria. O domínio CT1 representam aquelas cotas topográficas mais elevadas, em torno de 1.000 metros. O domínio CT2 tem cota média de 800 metros, enquanto que o CT3 tem media 700 metros e o CT4 500 metros.	56
Figura 4.7: Imagem da Composição em falsa cor RGB (K:Th:U)	58
Figura 4.8: Imagem da Composição em falsa cor CMY (K:Th:U)	59
Figura 4.9: Imagem da razão Th/k.	62
Figura 4.10: Imagem da razão U/K.	63
Figura 4.11: Imagem da razão U/Th.	64
Figura 4.12: Imagem do canal de Tório Normalizado	66
Figura 4.13: Imagem do canal de Potássio Normalizado	67
Figura 4.14: Imagem do canal de Urânio Normalizado	68
Figura 4.15: Imagem do canal de Tório utilizando filtro de amplitude. Os dados utilizados encontram-se com valores radiométricos entre 53.3 cps e 60.0 cps (cor magenta).	70
Figura 4.16: Imagem do canal de Potássio utilizando filtro de amplitude.	71
Figura 4.17: Imagem do canal de Urânio utilizando filtro de amplitude.	72
Figura 4.18: Mapa de classificação não supervisionada por médias-K dos canais de K, Th, U normalizados e as razões U/K, U/Th e Th/K e contagem total. Foram feitos agrupamentos em trinta classes após cem interações.	75
Figura 4.19: Relação Potássio x Tório para os dados gamaespectrométricos.	77
Figura 4.20: Imagem do Potássio Anômalo para os dados da área em estudo. Esta imagem mostra que grande parte das áreas com cotas topográficas baixas tem alto conteúdo de potássio enriquecido.	79
Figura 4.21: Mapa dos domínios gamaespectrométricos interpretados a partir de todas as imagens (Md-A; Médio-Alto; Bx-Md: Baixo-Médio; Md: Médio). Observa-se que os domínios 7gm comporta as principais mineralizações da área.	82
Figura 4.22: Diagrama de roseta mostrando o comportamento das estruturas lineares das imagens gamaespectrométricas. As principais estruturas situam nos quadrantes NW e E-W. Estruturas N-S também são observadas.	83
Figura 4.23: Mapa das estruturas gamaespectrométricas interpretadas. Observa-se que a principal tendência tem direção NE-SW. Estruturas NW-SE e E-W são observadas em menor quantidade.	84
Figura 4.24: Mapa da integração dos domínios e lineamentos gamaespectrométricos interpretados dos diversos canais. Observa-se que grande parte das estruturas curvilíneas são contatos entre as unidades geofísicas.	86
Figura 5.1: Espectro de potência ponderado radialmente para o campo magnético anômalo. Foram obtidos quatro fontes principais: a 1ª encontra-se a aproximadamente 5.000 metros de	

profundidade, a 2ª a 2.000 metros, a 3ª a 500 metros, enquanto que a 4ª está a 150 metros, representando a altura do voo.	89
Figura 5.2: Imagem do Campo Magnético Anômalo da área de estudo.	91
Figura 5.3: Imagem da Intensidade do Campo Magnético Anômalo reduzido ao pólo magnético	92
Figura 5.4: Imagem da Inclinação do Sinal Analítico (ISA) de ordem zero em tons de cinza, com iluminação a 45°.	94
Figura 5.5: Imagem da amplitude do sinal analítico somado a imagem da inclinação do sinal analítico (ASAcinza + ISAcor).	95
Figura 5.6: Diagrama de roseta obtida da análise dos alinhamentos magnéticos lineares. A direção principal tem direção entre N40° – 60°E. Um segundo conjunto de estruturas tem direção E-W e um terceiro conjunto de lineamentos é observado nas direções N30° - 50°W.	96
Figura 5.7: Mapa das Estruturas Magnéticas lineares interpretadas a partir de todas as imagens magnéticas. A tendência predominante encontra-se com direção NE-SW, cortados por feições E-W. Já a direção NW-SE é apresentada como evento posterior aos dois primeiros, pois em corta os mesmos em vários locais da área.	97
Figura 5.8: Imagem da intensidade do campo magnético anômalo continuado a uma altura de 500 metros.	99
Figura 5.9: Imagem da susceptibilidade magnética aparente do campo magnético anômalo.	100
Figura 5.10: Domínios magnéticos interpretados a partir das fontes profundas. A unidade DP1 representa uma assinatura magnética muito baixa. A unidade DP2 possui assinatura baixa, enquanto que a DP3 tem assinatura média e a DP4 assinatura variando de alta a muito alta.	102
Figura 5.11: Imagem da intensidade do CMA continuado a uma altura de 1000 metros.	105
Figura 5.12: Imagem da Amplitude do Sinal Analítico de ordem zero	106
Figura 5.13: Imagem da Amplitude do sinal analítico de ordem zero somada a imagem da inclinação do sinal analítico (ASAcinza+ISAcor).	107
Figura 5.14: Domínios magnéticos interpretados a partir das fontes rasas. A unidade DR1 representa uma assinatura magnética muito baixa. A unidade DR2 possui assinatura baixa, enquanto que a DR3 tem assinatura média e a DR4 assinatura variando de alta a muito alta.	108
Figura 5.15: Mapa com os resultados da Deconvolução de Euler para o índice 0, obtido para uma tolerância suficientemente baixa, 3%.	110
Figura 5.16: Mapa com os resultados da Deconvolução de Euler para o índice 0, obtido para uma tolerância de 10%.	111
Figura 5.17: Mapa dos Domínios Magnéticos Rasos com os resultados da Deconvolução de Euler para o índice 0, obtido para uma tolerância de 10%.	113
Figura 5.18: Mapa dos Domínios e Estruturas Magnéticas Interpretadas. Em (A) tem-se os Domínios Profundos e (B) Domínios Rasos. Observa-se que nos domínios profundos tem predominios estruturas dúcteis, enquanto que nos domínios rasos tem-se estruturas dúcteis quanto rúpteis.	115
Figura 6.1: Imagem mostrando os mapas dos domínios gamaespectrométricos (A), domínios magnetométricos profundos (B) e rasos (C) utilizados na integração geofísica	118
Figura 6.2: Domínios gamaespectrométricos sobre os domínios magnéticos profundos (A) e rasos (B).	119
Figura 6.3: Mapa mostrando a integração dos resultados dos domínios profundos e rasos da magnetometria com os domínios obtidos a partir da gamaespectrometria (ver detalhes nas figuras 6.1 e 6.2).	120
Figura 6.4: Diagrama de roseta integrado para os lineamentos magnéticos (verde) e gamaespectrométricos (rosa). Observa-se que as principais feições situam nos quadrantes NW e	

- E-W. Estruturas N-S também são observadas. Já para a magnetometria, a direção principal encontra-se entre $N40^{\circ}$ – $60^{\circ}E$. Um segundo conjunto de estruturas tem direção E-W e um terceiro conjunto de lineamentos é observado nas direções $N30^{\circ}$ - $50^{\circ}W$. 122
- Figura 6.5: Mapa mostrando os principais lineamentos importantes para a mineralização das esmeraldas e águas-marinhas da área em estudo. Em (A) tem-se os lineamentos gamaespectrométricos e em (B) os magnéticos. 123
- Figura 6.6: Mapa mostrando os principais lineamentos importantes para a mineralização das esmeraldas e águas-marinhas da área em estudo. Em (A) tem-se a integração dos lineamentos gamaespectrométricos e magnéticos, e em (B) o estudo de sua cinemática 124
- Figura 6.7: Mapa mostrando em (A) a integração dos domínios geofísicos (gamaespectrometria com magnetometria) e em (B) os domínios integrados com o estudo da cinemática dos principais lineamentos geofísicos e considerados importantes para a mineralização da área em estudo. 125
- Figura 6.8: Mapa mostrando a integração dos resultados dos domínios profundos e rasos da magnetometria com os domínios obtidos para a gamaespectrometria (ver detalhes na Tabela 6.1). 128
- Figura 6.9a: Mapa de composição ternária CMY sobreposto pelo domínios da geologia regional obtido do mapa da CPRM (2004) para a área em estudo. 130
- Figura 6.9b: Legenda do mapa CMY com a geologia para a área em estudo 131
- Figura 6.10: Mapa geológico da área em estudo contendo as principais compartimentações geológicas e estruturais da área do Projeto Itabira-Ferros (CPRM 2004). 132
- Figura 6.11: Imagem contendo em (A) o mapa integrado a partir da geofísica e em (B) o mapa geológico contendo as principais compartimentações geológicas da área do Projeto Itabira-Ferros obtido a partir da interpretação da CPRM (2004). 133
- Figura 6.12: Imagem da deconvolução de Euler (Índice 0, com tolerância de 10%) com as interpretações das estruturas obtidas da geofísica. 147
- Figura 6.13: Imagem mostrando detalhes de dobras intrafoliais/parasíticas entre os estratos deslocados de biotititos e segregações de quartzo na área da mina belmont. As setas em vermelho dão a indicação do movimento deformacional ocorrido nesses corpos. 148
- Figura 6.14: Imagem mostrando detalhes de dobras contracionais deformacionais sinmetamórficas entre os estratos de biotititos e segregações de quartzo e pegmatitos na área da mina belmont. As setas em vermelho dão a indicação do movimento deformacional ocorrido nesses corpos. 148
- Figura 6.15: Outro detalhe das dobras contracionais deformacionais sinmetamórficas entre os estratos de biotititos e segregações de quartzo e pegmatitos na área da mina belmont. As setas em vermelho dão a indicação do movimento deformacional ocorrido nesses corpos. 149
- Figura 6.16: Mapa comparando os principais lineamentos gamaespectrométricos e magnéticos (A) com as interpretações estruturais do mapa geológico da CPRM (2004) para a área em estudo. 150
- Figura 6.17: Mapa mostrando a interpretação da cinemática para as estruturas geofísicas (A) em comparação com as estruturas regionais obtidas do mapa estrutural da CPRM (2004) para a área em estudo. 151
- Figura 6.18: Imagem CMY mostrando o recorte utilizado para a área de principal concentração de mineralizações. 156
- Figura 6.19: Imagem do potássio anômalo em detalhe utilizado para a área de principal concentração de mineralizações. 157
- Figura 6.20: Imagem do campo magnético anômalo em detalhe utilizado para a área de principal concentração de mineralizações. 158

- Figura 6.21: Imagem da amplitude do sinal analítico utilizado para a área de principal concentração de mineralizações. 159
- Figura 6.22: Imagem da inclinação do sinal analítico utilizado para a área de principal concentração de mineralizações. 160
- Figura 6.23: Mapa interpretado dos domínios gamaespectrométricos para a área de detalhe. Foi possível discriminar dezessete unidades de detalhe. As principais concentrações das mineralizações de esmeraldas encontram-se nas unidades 14 e 17. Já as mineralizações de berilos e águas-marinhas encontram-se nas unidades 1 e 7. 161
- Figura 6.24: Mapa interpretado das estruturas geofísicas para área em detalhe. As setas em preto indicam a cinemática para essa região. 162
- Figura 6.25: Mapa dos alvos escolhidos para prospecção de depósitos de esmeraldas na porção centro-leste. 163
- Figura 6.26: Mapa mostrando a integração dos alvos escolhidos para prospecção de esmeraldas na região de detalhe com as interpretações das estruturas geofísicas com sua cinemática. 64
- Figura 6.27: Mapa dos alvos escolhidos para prospecção de depósitos de esmeraldas e outros berilos em toda área de estudo. 165
- Figura 6.28: Mapa final contendo a integração dos alvos escolhidos para prospecção de depósitos de esmeraldas e outros berilos em toda área de estudo e sua interpretação estrutural. É possível observar que os principais lineamentos que controlam essas mineralizações estão na direção NE-SW. 166

Índice de Tabelas

Tabela 4.1: Tabela com a classificação das unidades gamaespectrométricas por seus teores de K, Th e U interpretadas para o Projeto Itabira-Ferros.	81
Tabela 5.1: Sumário estatístico das profundidades determinadas pela Deconvolução de Euler para os quatro índices básicos. ⁽¹⁾ Análise feita com base numa distribuição lognormal dos valores positivos da profundidade obtidos após a correção da altura de vôo (150 m).	112
Tabela 6.1: Classificação das unidades mistas com base na gamaespectrométricas por seus teores relativos em K, T h e U e as unidades magnéticas rasas associados às unidades geológicas.	129

1 – Métodos Aerogeofísicos – Magnetometria

A.1 FUNDAMENTOS DO MÉTODO MAGNÉTICO	A.1.1
A.1.1 O CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE E SUA ORIGEM	A.1.1
A.1.2 MAGNETISMO DE ROCHAS E MINERAIS	A.1.3
A.1.2.1 Diamagnetismo, Paramagnetismo e Ferromagnetismo	A.1.3
A.1.2.2 Magnetização das Rochas	A.1.3
A.1.2.3 Susceptibilidade de Rochas e Minerais	A.1.4
A.1.3 TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO E REALCE APLICADAS AOS DADOS MAGNETOMÉTRICOS	A.1.5
A.1.3.1 Relevo Sombreado	A.1.5
A.1.3.2 Filtragem dos Dados	A.1.5
A.1.3.2.1 FILTROS DERIVADAS	A.1.5
A.1.3.2.2 AMPLITUDE DO SINAL ANALÍTICO	A.1.7
A.1.3.2.3 INCLINAÇÃO DO VETOR SINAL ANALÍTICO	A.1.8
A.1.3.3 Deconvolução de Euler	A.1.8
A.1.3.4 Redução ao Pólo Magnético	A.1.9
A.1.3.5 Susceptibilidade Magnética Aparente	A.1.10
A.1.4 INTERPRETAÇÃO DE DADOS MAGNÉTICOS	A.1.10
A.1.4.1 Anomalias Magnéticas	A.1.11
A.1.4.2 Domínios e Estruturas Magnéticas	A.1.12
A.1.4.3 Espectro de Potência Ponderado Radialmente	A.1.12

2 – Métodos Aerogeofísicos – Gamaespectrometria

A.2 FUNDAMENTOS DO MÉTODO GAMAESPECTROMÉTRICO	A.2.1
A.2.1 RADIAÇÃO GAMA	A.2.1
A.2.2 GEOQUÍMICA DOS RADIOELEMENTOS	A.2.3
A.2.2.1 Potássio (K)	A.2.3
A.2.2.2 Urânio (U)	A.2.3
A.2.2.3 Tório (Th)	A.2.4
A.2.2.4 Contagem Total (CT)	A.2.4
A.2.2.5 Imagens Ternárias (RGB e CMY)	A.2.5
A.2.2.6 Razões Th/K, U/K e U/Th	A.2.5
A.2.2.7 Filtro de Amplitude	A.2.6

A.2.2.8 Análise de Grupos (Classificação não Supervisionada)	A.2.6
A.2.3 DISTRIBUIÇÃO DOS RADIOELEMENTOS EM ROCHAS E SOLOS	A.2.8
A.2.4 APLICAÇÕES DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS	A.2.9
A.2.4.1 Prospecção Mineral	A.2.9
A.2.4.2 Mapeamento Geológico	A.2.11

3 - Dados Geofísicos Utilizados

A3 APRESENTAÇÃO	A.3.1
A.3.1 DADOS GEOFÍSICOS	A.3.1
A.3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO LEVANTAMENTO AEROGEOFÍSICO	A.3.2
A.3.2.1 Magnetometria	A.3.2
A.3.2.2 Gamaespectrometria	A.3.3

Índice de Figuras dos Anexos

Anexo A.1.1: Imagem da primeira derivada horizontal em X da intensidade do CMA.	A.1.17
Anexo A.1.2: Imagem do gradiente horizontal total de primeira ordem (AGHT1).	A.1.18
Anexo A.1.3: Imagem da primeira derivada vertical (gradiente vertical) da intensidade do CMA colorido (A) e em tons de cinza.	A.1.19
Anexo A.1.4: Imagem da amplitude do sinal analítico de 1ª ordem (A) e 2ª ordem (B).	A.1.20
Anexo A.1.5: Imagem da Inclinação do Sinal Analítico (ISA) de ordem zero em tons de cinza (A). Imagem da Inclinação do Sinal Analítico (ISA) de ordem zero em cor (B).	A.1.21
Anexo A.1.6: Mapa com os resultados da Deconvolução de Euler para o índice 1, obtido para uma tolerância de 3%).	A.1.22
Anexo A.1.7: Mapa com os resultados da Deconvolução de Euler para o índice 2, obtido para uma tolerância de 3%).	A.1.23
Anexo A.1.8: Mapa com os resultados da Deconvolução de Euler para o índice 3, obtido para uma tolerância de 3%).	A.1.24
Anexo A.2.1 Imagem do canal de Tório (A) e em (B) imagem do canal de tório sobre o modelo digital de elevação de terreno .	A.2.16
Anexo A.2.2 Imagem do canal de Potássio (A) e sobre o modelo digital de elevação de terreno (B).	A.2.17
Anexo A.2.3: Imagem do canal de Urânio (A). Imagem do canal de Urânio sobre o modelo digital de elevação de terreno (B).	A.2.18
Anexo A.2.4: Imagem da composição em falsa cor RGB (K/Th/U) (A) e por sobre o modelo digital de elevação de terreno (B).	A.2.19
Anexo A.2.5: Imagem da composição colorida em falsa cor CMY (K/Th/U) (A) e por sobre o Modelo Digital de Elevação de Terreno (B).	A.2.20

Índice de Tabelas dos Anexos

Tabela A.1.1: Índices estruturais usados na deconvolução de Euler e seus respectivos significados em termos de modelos físicos.	A.1.9
Tabela A.3.1: Resumo dos parâmetros de aquisição dos dados do levantamento aerogeofísico do Projeto Itabira-Ferros.	A.3.1
Tabela A.3.2: Formato dos dados magnéticos.	A.3.3
Tabela A.3.3: Formato dos dados gamaespectrométricos.	A.3.4
Tabela A.3.4: Níveis de energia nas janelas dos espectrômetros.	A.3.4

Introdução

No princípio era o Verbo, e o Verbo estava com Deus, e o Verbo era Deus. Ele estava no princípio com Deus. Todas as coisas foram feitas por intermédio Dele, e sem ele, nada do que foi feito se fez (Jo 1:1-3).

1.1 APRESENTAÇÃO

O Brasil tornou-se um importante produtor mundial de esmeraldas em decorrência de descobertas de uma série de jazidas a partir da década de 60, sobretudo em Goiás, Bahia e Minas Gerais. Em Minas Gerais, essas descobertas culminaram a partir do final da década de 70, quando em 1977 descobriu-se o depósito da Mina Belmont, a 18km da cidade de Itabira, e em 1988, a Jazida do garimpo de Capoeirana em Nova Era, à aproximadamente 8km da Mina Belmont. Recentes descobertas de depósitos de esmeraldas aconteceram a partir dos meados de 90, como o Garimpo do Toco, em Nova Era; o de Alfié, no município de São Domingos do Prata e a Mina Canta Galo no município de Nova Era (Carvalho 1999).

A partir dos vários depósitos e ocorrências acima citados, Souza *et al.* (1992) delimitaram um cinturão definindo-o como Cinturão Esmeraldífero do Estado de Minas Gerais. Com as descobertas de esmeraldas nos municípios de Nova Era e São Domingos do Prata, pode-se afirmar que uma região ainda mais ampla apresenta grandes potencialidades para mineralização desse mineral-gema (Figura 1.1). Esse cinturão encontra-se inserido a oeste da Província Pegmatítica Oriental (Paiva 1946), na região central de Minas Gerais, bordejando o extremo SE do Cráton São Francisco e estendendo-se desde a parte norte do município de Rio Casca até o sul de Guanhães (Carvalho 1999; Figura 1.1).

Nesse contexto, dados geofísicos aéreos são críticos para o sucesso de programa de exploração mineral, uma vez que são ferramentas de baixo custo/benefício. Eles permitem avaliações de grandes extensões de terreno e seleção de áreas para trabalhos de detalhamento em locais de escasso conhecimento geológico, densa cobertura vegetal, manto de intemperismo e de difícil acesso. A gamaespectrometria e a magnetometria quando executados em recobrimento aéreo possibilitam a delimitação de diferentes

litotipos e o delineamento de traços estruturais, permitindo em níveis de detalhe diversos o fornecimento de subsídios para a cartografia geológica (Vasconcellos *et al.* 1994).

No caso de mapeamento geológico, os dados da radiação gama têm sido de grande valia, porque na maioria das vezes, há uma boa correlação entre padrões de dados radiométricos e as rochas aflorantes (Gunn *et al.* 1997). Essa informação complementa os dados magnéticos e os dados geoquímicos normalmente adquiridos durante um programa de exploração mineral (Shives *et al.* 1997).

O *capítulo 1* tem o objetivo de apresentar, de forma sucinta a área de estudo, os objetivos do desenvolvimento dessa tese, o contexto geográfico da mesma, destacando sua localização e os métodos utilizados.

O *capítulo 2* inicia-se por rápida apreciação da geologia do Orógeno Araçuaí e o Cinturão Araçuaí, seu arcabouço estrutural e ambiente geotectônico. Em seguida, são descritas algumas considerações sobre a geologia da região de estudo, destacando associações litológicas e o arcabouço estrutural. Nesse capítulo, também é apresentado a geologia dos principais depósitos de esmeraldas, águas-marinhas e berilos incolores, bem como algumas considerações sobre as estruturas e forma de ocorrência desses minerais-gemas na região.

O *capítulo 3* contempla os resultados da interpretação dos dados de gamaespectrometria, do estudo dos produtos gerados a partir desses dados, finalizando com a interpretação dos domínios e estruturas gamaespectrométricas.

O *capítulo 4* traz os resultados da interpretação dos dados de magnetometria, com descrição detalhada do campo magnético anômalo, seguido do estudo das profundidades utilizando o espectro radial de potência. Em seguida, são apresentadas as interpretações das estruturas magnéticas. Finalizando com as descrições dos domínios magnéticos profundos e rasos.

O *capítulo 5* versa sobre a integração dos dados geofísicos com a geologia conhecida, considerando dois objetivos específicos: o mapeamento geológico e a prospecção mineral. São estabelecidas algumas áreas-alvos que poderiam vir a servir de trabalhos de prospecção mais detalhados para depósitos de esmeralda.

O *capítulo 6* finalmente sintetiza os resultados obtidos nos diversos capítulos descritos anteriormente e suas implicações.

Os métodos e procedimentos executados sobre os dados de geofísica aérea são descritos nos anexos. O *anexo 1* apresenta os fundamentos de magnetometria, enquanto o

anexo 2 os fundamentos de gamaespectrometria. O *anexo 3* traz os parâmetros utilizados para os dados aerogeofísicos. O *anexo 4* mostra os procedimentos utilizados para o processamento dos dados magnetométricos e suas respectivas imagens processadas, já o *anexo 5* o processamento dos dados gamaespectrométricos e as imagens obtidas por esse método.

1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho é uma contribuição ao mapeamento geológico e uma tentativa de definição de um modelo de exploração dos minerais-gemas que ocorrem na região de Itabira-Ferros.

A contribuição almejada é a de gerar novas informações úteis à prospecção de esmeralda na região de Itabira-Ferros. Para isso pretende-se utilizar técnicas de melhoria e realce sobre o conjunto de dados de magnetometria e gamaespectrometria disponibilizados e da integração da informação gerada a partir desses procedimentos com o conhecimento geológico existente para a área. Objetiva-se com isso melhorar o entendimento do arcabouço geológico e a tectônica regional, bem como fornecer subsídios à prospecção mineral. A escolha da área se deu, sobretudo, a partir da familiaridade da autora com a geologia da área, uma vez que o desenvolvimento de sua dissertação de mestrado ocorreu nesse contexto e também da base de dados geofísicos disponível para a região.

Dentro dessa perspectiva, é que se pretendem empregar a informação derivada dos levantamentos geofísicos aéreos, gamaespectrometria e magnetometria, para aumentar o conhecimento geológico regional e fornecer novos subsídios a programas de exploração mineral para a região de Itabira-Ferros.

1.3. JUSTIFICATIVA

A indústria mineral constitui um segmento dinâmico onde as mudanças tecnológicas visam principalmente a diminuição dos custos de pesquisa, lavra e beneficiamento do minério, aumentando a eficiência dos processos envolvidos (Foster 1996).

A indústria mineral vem utilizando um segmento de suma importância na prospecção mineral, a integração de dados de diferentes origens, como por exemplo geológicos, geofísicos, geoquímicos e de sensores remotos, utilizando para isso a tecnologia computacional atualmente disponível. Alguns softwares específicos para essa função são ArcInfo, ArcView, ErMapper, Envi e Geosoft, dos quais alguns deles são utilizados neste trabalho. As empresas de mineração têm buscado se aprimorar nesse campo, mas em geral ainda falta uma maior integração entre essas fases e as observações de campo.

O estabelecimento de rotinas de trabalho que permitam a integração de dados é fundamental para que o sucesso seja alcançado, maximizando a utilização das informações disponíveis, diminuindo custos e dinamizando o processo de exploração mineral.

1.4. LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A área pesquisada está limitada pelos paralelos $19^{\circ}50'06''\text{S}/43^{\circ}26'20''\text{W}$ (vértice A), $18^{\circ}52'14''\text{S}/42^{\circ}59'50''\text{W}$ (vértice B), $19^{\circ}08'55''\text{S}/42^{\circ}45'29''\text{W}$ (vértice C) e $20^{\circ}06'47''\text{S}/43^{\circ}12'06''\text{W}$ (vértice D) (Figuras 1.1 e 1.2), e corresponde a uma superfície de aproximadamente 4.600 km^2 na porção centro-sudeste do Estado de Minas Gerais.

A área desse projeto está inserida nas Folhas Serro (SE.23-Z-B-IV; Knauer & Grossi Sad 1997), Guanhães (SE.23-Z-B-V; Grossi Sad 1997), Conceição do Mato Dentro (SE.23-Z-D-I; Grossi Sad *et al.* 1999), Ipatinga (SE.23-Z-D-II; Oliveira & Leite 2000), Itabira (SE.23-Z-D-IV; Padilha 2000), Coronel Fabriciano (SE.23-Z-D-V; Silva 2000) e Mariana (SF.23-X-B-I; Baltazar *et al.* 1993) apresentadas nas escalas 1:100.000. O acesso à área pode ser feito, a partir de Belo Horizonte, por meio das rodovias BR-262, BR-381, BR-120 e MG-434 até a cidade de Itabira, que constitui a principal cidade da região estudada. A área é cortada ainda pela ferrovia Belo Horizonte-Vitória, que escoou o minério de ferro da Companhia Vale do Rio Doce.

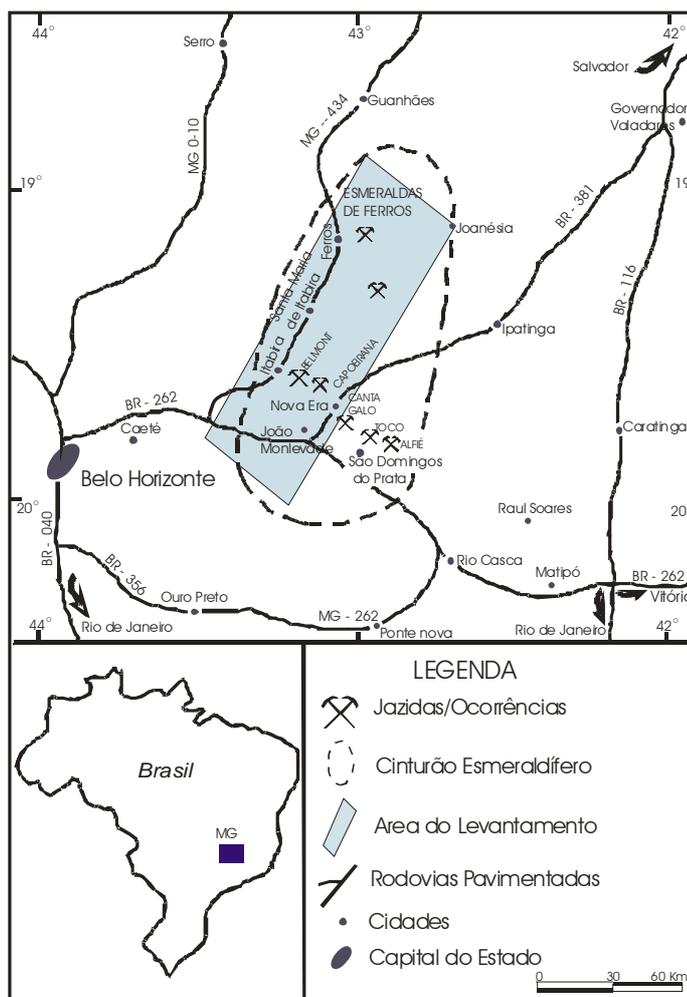


Figura 1.1: Mapa de localização do Cinturão Esmeraldífero de Minas Gerais. Nesse cinturão estão inseridas as principais jazidas de esmeralda da região. Mostra também a localização da área do Projeto Itabira-Ferros dentro desse cinturão (Modificado de Souza *et al.* 1992).

1.5 MÉTODOS UTILIZADOS

Os métodos aplicados nesta tese são tentativas de criar referencial comum de análise de métodos de pesquisas, buscando estabelecer parâmetros comparativos, do ponto de vista geofísico e geológico, para a prospecção de esmeralda na área entre João Monlevade e Dores de Guanhões.

Para o desenvolvimento desta tese se fez necessário a aplicação de conhecimentos na área de geofísica aerotransportada (magnetometria e gamaespectrometria) e processamento digital de imagens. A gamaespectrometria se propõe a estudar as variações das concentrações de potássio, urânio e tório e suas distribuições espaciais. A magnetometria é usado na identificação de contatos geológicos e de estruturas geológicas

(falhas, dobras). Deste modo, foram utilizadas diversas técnicas de pesquisa, que podem ser assim resumidos:

- Pesquisa bibliográfica sobre os aspectos geológicos em que estão situadas as diversas jazidas de esmeraldas. Sendo confeccionado o arcabouço geológico da área em estudo com a descrição das suas principais unidades geológicas;
- Levantamento bibliográfico acerca das técnicas de gamaespectrometria e magnetometria aerotransportadas e das técnicas aplicadas ao processamento desses dados;
- Processamento, análise e interpretação das imagens aerogeofísicas;
- Utilização de métodos de integração dos dados, com avaliações qualitativa e quantitativa;
- Discriminação e análise de padrões encontrados para as regiões mineralizadas e para unidades geológicas de interesse;
- Estabelecimento de feições indicativas de corpos mineralizados, a fim de evidenciar padrões similares em outras localidades da seqüência vulcanossedimentar, principal hospedeira das mineralizações.

Para o tratamento dos dados aerogeofísicos foi utilizado o programa computacional Oasis MontajTM 6.0 da GEOSOFT Inc. (Geosoft 1998) e rotinas elaboradas por Blum (1999). Na interpretação foram utilizados os *softwares* CorelDraw versão 12.0, SPSS 10.0, Surfer 8.0 e o SIG ArcView 3.2.

Os dados geofísicos (gamaespectrometria e magnetometria) foram cedidos pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) após autorização do DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral).

1.6 BASE DE DADOS

A base de dados utilizada nesta tese é representada por dados geológicos e geofísicos (magnetometria e gamaespectrometria) aéreos.

O projeto aerogeofísico Itabira-Ferros está inserido na Província Pegmatítica Oriental (Paiva 1946), que inclui os Projetos Leste (Oliveira & Leite 2000), Espinhaço Meridional (Grossi Sad *et al.* 1993) e Itabira (Padilha 2000) (Figura 1.2). Esses projetos

integram conjuntos de informações obtidas a partir de levantamentos tais como: mapas topográficos, fotografias aéreas, imagens de sensores remotos, mapas geofísicos (aeromagnetometria e aerogamaespectrometria), além de trabalhos de mapeamentos regionais e locais realizados em dissertações de mestrados e teses de doutorados realizados nessa região.

Trabalhos geológicos mais detalhados nas áreas das minas de esmeralda, abrangendo a geologia e enfocando os aspectos estruturais foram pesquisados principalmente em Souza (1988), Schorscher (1991, 1992), Machado (1994, 1998), Carvalho (1999), Fernandes (2001) e Projeto Itabira (Padilha 2000).

Os dados aerogeofísicos processados e interpretados nesta tese são originados do levantamento Gemas de Minas Gerais, Itabira-Ferros, no Estado de Minas Gerais. Os dados do campo magnético terrestre (magnetometria) e da emissão gamaenergética (gamaespectrometria) foram coletados pela GeoMag S/A entre o período de fevereiro a abril de 1996. Cobriu uma área 4.600 km² sendo voados 9.170 km de perfis orientados N40°W e espaçados de 500 m, amarrados por perfis de controle espaçados de 12.000 m. As especificações do aerolevanteamento podem ser verificadas no Anexo A.3.

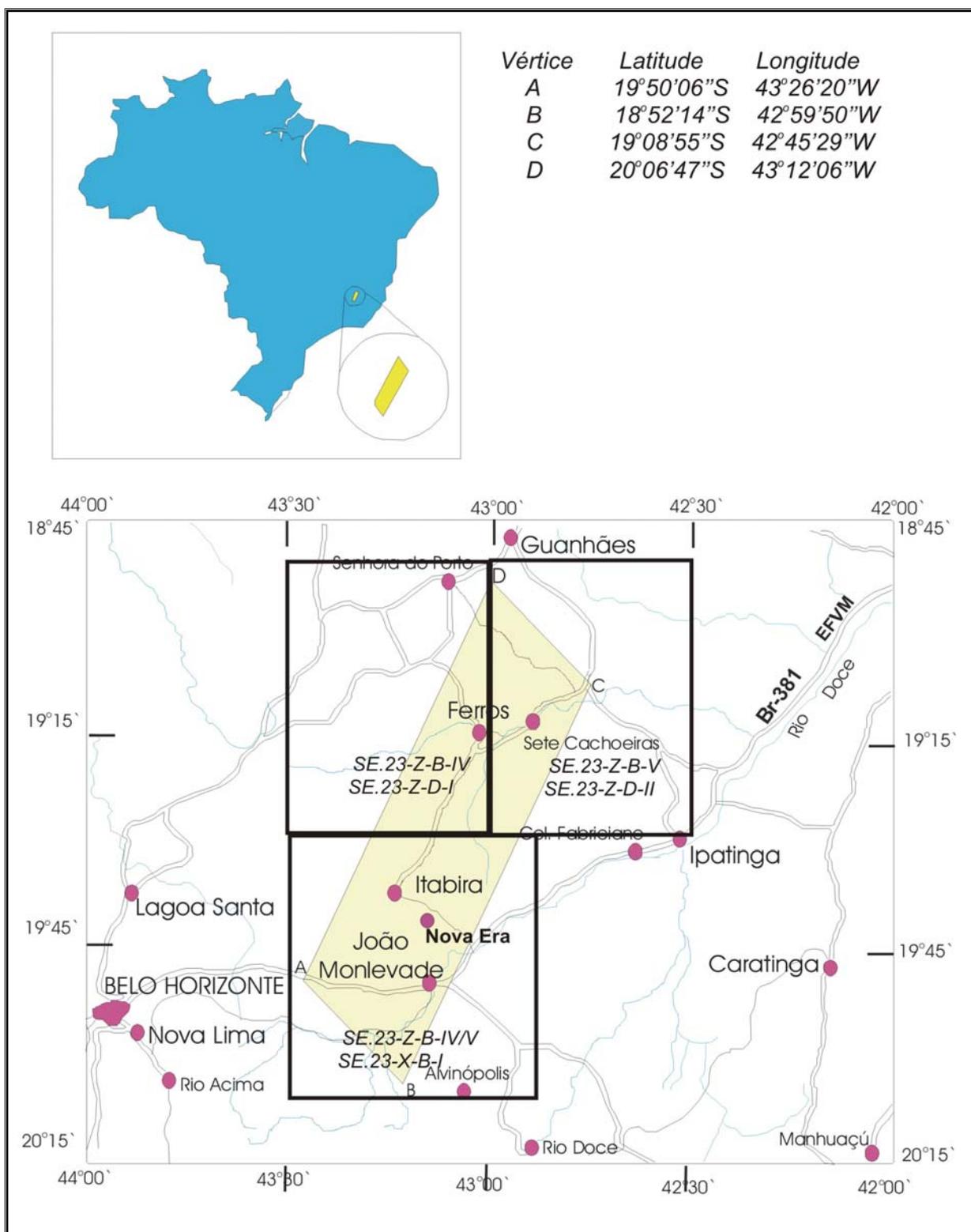


Figura 1.2: Mapa com as coordenadas de localização do aerolevante Itabira-Ferros, Quadrilátero Ferrífero, MG (Geomag 1996).

Contexto Geológico

O temor do SENHOR é o principio do saber (Pv 1:7).

2.1. INTRODUÇÃO

A região do Projeto Itabira-Ferros está contida na Província Estrutural Mantiqueira (Almeida 1976) e insere-se no contexto da Faixa de Dobramentos Araçuaí, que bordejia o Cráton São Francisco, no Estado de Minas Gerais (Figuras 2.1 e 2.2). Ela tem sido alvo de muitos estudos nessa última década e podem ser encontrados em Pedrosa-Soares *et al.* 1999; Chemale Jr. *et al.* 1994; Endo 1997; Pedrosa Soares & Wiedemann-Leonardos 2000; Silva *et al.* 2002; CPRM 2004 entre outros.

A Faixa de dobramentos Araçuaí desenvolveu-se durante o Ciclo Brasileiro, englobando depósitos minerais acumulados nesse mesmo ciclo e afetando rochas mais antigas que lhe serviram de embasamento (Pedrosa Soares *et al.* 1999). Diferentes tipos de pegmatitos foram originados durante a granitogênese tardi a pós-tectônica (550-500 Ma), resultante do espessamento crustal progressivo que ocorreu em função do fechamento do orógeno brasileiro (Pedrosa Soares *et al.* 1994; 1999).

2.2 O ORÓGENO ARAÇUAÍ E O CINTURÃO ARAÇUAÍ

O Orógeno Araçuaí ocupa a área entre o Cratón São Francisco e a margem continental brasileira e é limitado ao sul pelo Cinturão Neoproterozóico Ribeira (Figura 2.1; Pedrosa Soares & Wiedemann-Leonardos 2000). Esse limite é marcado por estruturas lineares, em que infletem levemente de NNE, no Orógeno Araçuaí para NE no cinturão Ribeira (Figura 2.1; Pedrosa Soares & Wiedemann-Leonardos 2000).

De acordo com Peres *et al.* (2004), o Orógeno Araçuaí consiste de duas feições tectônicas maiores: o Cinturão Araçuaí e o Núcleo Cristalino (Figura 2.1). O Cinturão Araçuaí é observado ao longo do limite oriental do Cratón São Francisco e penetra na porção meridional da Serra do Espinhaço, estendendo para sul da cidade de Barbacena em Minas Gerais (Figura 2.1; Chemale Jr. *et al.* 1994). O limite oriental desse Cinturão é

marcado pela descontinuidade geofísica de Abre Campo. A expressão dessa descontinuidade em campo é uma grande zona de cisalhamento dextral com orientação NS vergente para NE (Haralyi & Hasui 1982).

O núcleo cristalino do Orógeno Araçuaí é caracterizado pela predominância de rochas metamórficas de alto grau e um grande volume de rochas graníticas neoproterozóicas pré a pós-colisionais (Pedrosa Soares *et al.* 1999). Os principais componentes da arquitetura do Cinturão Araçuaí são quatro zonas de cisalhamentos maiores: Abre Campo, Ponte Nova, Dom Silvério e Pedra Branca (Figuras 2.1 e 2.2).

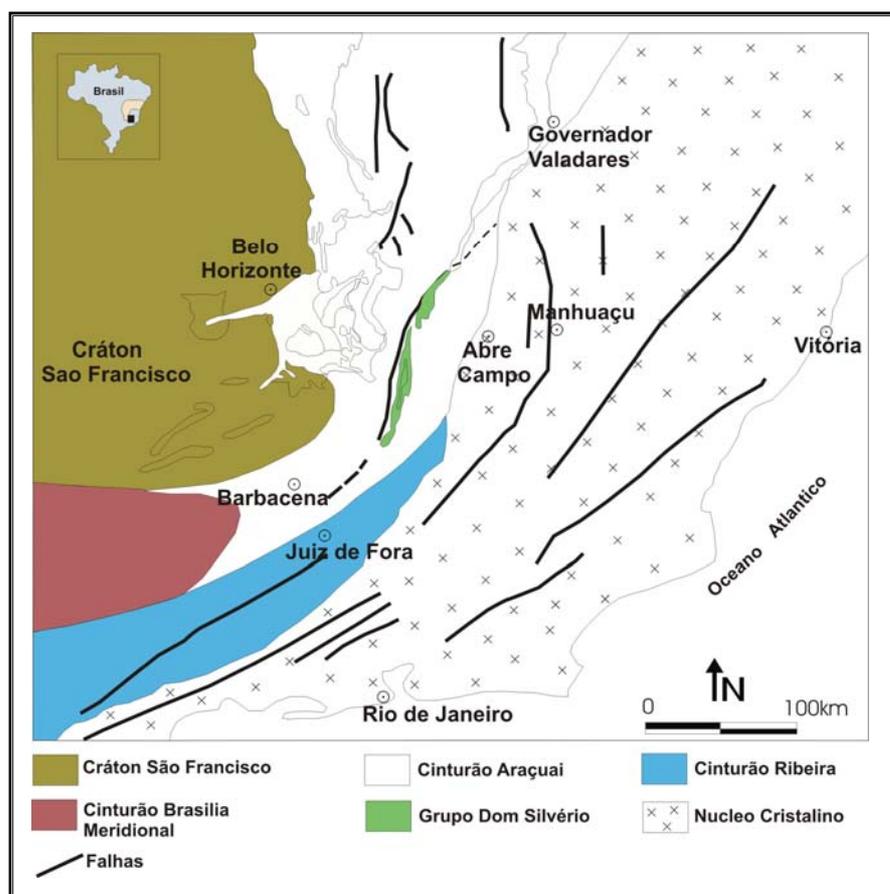


Figura 2.1: Mapa geológico simplificado mostrando a localização dos Cinturões Araçuaí, Ribeira e Brasília (modificado de Peres *et al.* 2004).

Zona de Cisalhamento Abre Campo - ZCAC

A zona de cisalhamento Abre Campo ocorre desde Governador Valadares, ao norte até Juiz de Fora, ao sul, mostrando em sua porção central uma largura média de 5km. Sua expressão em superfície é de anomalias gravimétrica e magnética remarcadas (Haralyi & Hasui 1982) que separa as rochas arqueanas/paleoproterozóicas do

Complexo Mantiqueira, a oeste dos Complexos Juiz de Fora e Paraíba do Sul, a leste, respectivamente do Paleozoico e Neoproterozóico (Silva *et al.* 2002). Fischel *et al.* (1998) indicam que esta zona limita também unidades com histórias metamórficas e deformacionais diferentes e interpreta-a como uma zona da sutura do Neoproterozóico. Dentro dessa zona de cisalhamento, domínios com foliação de alto ângulo mergulham progressivamente em domínios com foliação de baixo ângulo a leste. Os indicadores mostram um deslocamento predominantemente dextral; indicadores em sentido oposto podem ser, entretanto, encontrados ocasionalmente (Figura 2.2).

Zona de Cisalhamento Ponte Nova - ZCPN

A zona de Cisalhamento Ponte Nova mostra em mapa um traçado sinuoso com orientação geral N-S. Ao norte verge para NE, atingindo a zona de cisalhamento Abre Campo, a que é ligada. Ela é uma zona dúctil-rúptil de baixo ângulo com aproximadamente 150 metros de espessura. Sua expressão topográfica é muito modesta, não sendo evidente em imagens de satélite ou em fotografias aéreas (Figura 2.2; Peres *et al.* 2004).

Zona de Cisalhamento Dom Silvério - ZCDS

É descrita por Endo (1997) como zona de cisalhamento de movimento dextral (Figura 2.3), gerada durante o Paleoproterozóico e reativada durante a orogenia Brasileira. Essa zona tem estruturas de alto ângulo e uma largura variando de 1 a 4 km. Sua expressão topográfica é uma série de morros alinhados, compondo as partes mais elevadas da região (Figura 2.2; Peres *et al.* 2004).

Zona de Cisalhamento Pedra Branca - ZCPB

Nã região de Itabira-Ferros ocorre a zona de cisalhamento Pedra Branca. Essa zona de cisalhamento está localizada na porção meridional externa do Cinturão Araçuaí, estendendo-se na direção NNE, a partir da cidade de Itabira até Dores de Guanhões (Figura 2.2; Peres *et al.* 2004). Diversos traçados, principalmente NW-SE, estão conectados à zona principal. Nas porções internas são encontradas foliações miloníticas que mergulham para WNW. As inclinações das lineações variam entre 0° a

50°. Predomina deslocamento normal dextral, entretanto, pode ser observado indicador de cisalhamento sinistral por sobre as rochas mais antigas. Uma intensa alteração hidrotermal associada com o retrometamorfismo caracteriza a porção central dessa zona de cisalhamento (Peres *et al.* 2004).

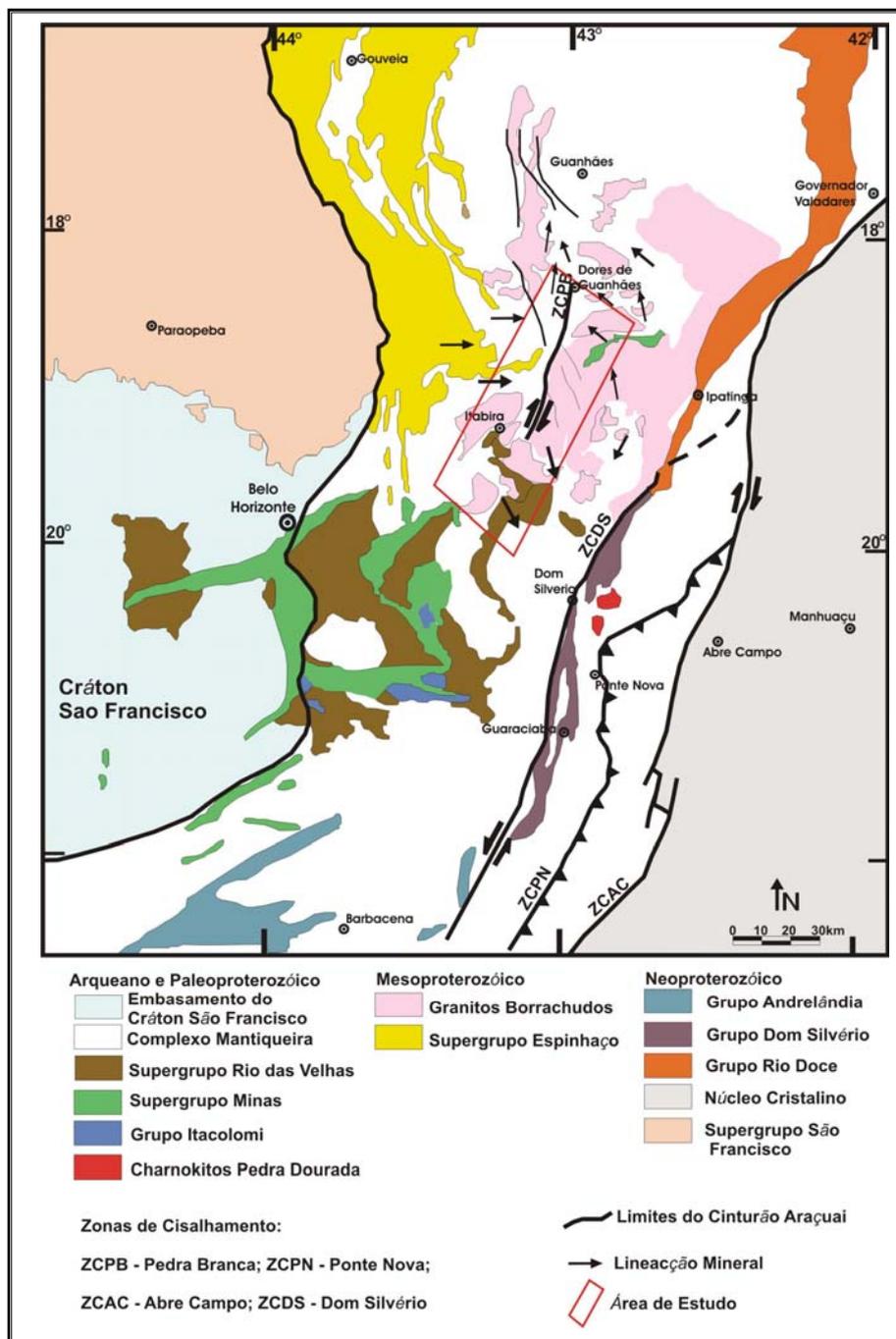


Figura 2.2: Mapa geológico regional da área em estudo (Modificado de Peres *et al.* 2004).

De acordo com Peres *et al.* (2004), todas as unidades da porção meridional da Faixa Araçuaí foram envolvidas em quatro fases deformacionais sin-metamórficas durante o Evento Brasileiro (Figuras 2.1, 2.2 e 2.3):

- **D₁**: Transporte tectônico de sentido norte em associação com fácies metamórficas anfíbolíticas M₁.
- **D₂**: Dobramento e empurrões vergendo para oeste associados com o desenvolvimento de um sistema transpressional dextral no núcleo cristalino e o metamorfismo de fácies xisto verde M₂.
- **D₃**: Redobramento coaxial das estruturas a partir da fase anterior;
- **D₄**: Falhamentos normal e reativação normal das zonas de cisalhamentos pré-existentes.

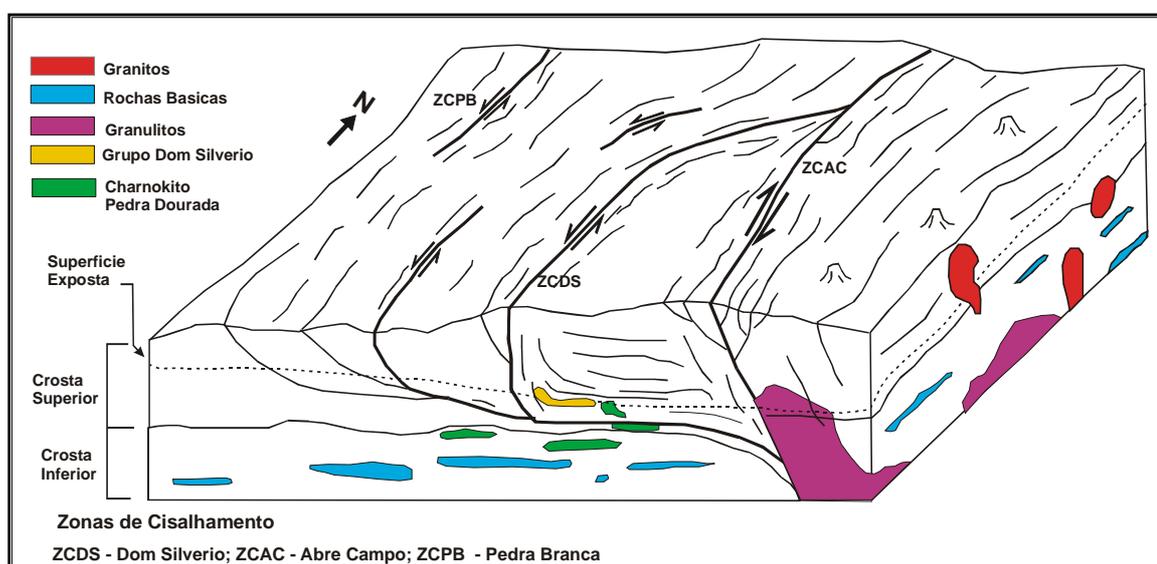


Figura 2.3: Modelo para a evolução tectônica da porção meridional do Cinturão Araçuaí durante a fase D₁ (Peres *et al.* 2004).

Peres *et al.* (2004) postularam um modelo para evolução tectônica do Cinturão Araçuaí Meridional durante o evento Brasileiro. A primeira fase de deformação (D₁), sincrônica a um metamorfismo regional de fácies anfíbolito M₁, associou-se a um transporte tectônico geral para norte ao longo da zona de cisalhamento sinistral Dom Silvério e no segmento de baixo ângulo a ela conectado. A segunda e terceira fases representam estágios progressivos de um encurtamento com movimentação geral para oeste, com desenvolvimento de empurrões localizados e intensos dobramentos em todas as escalas. A quarta fase é extensional e reflete o colapso do orógeno.

A zona de cisalhamento Pedra Branca foi gerada durante o desenvolvimento da fase D₁. A foliação S₁ e a lineação mineral L₁ associada são os principais elementos dessa

fase. Essa zona foi reativada durante a fase D₄. As estruturas D₄ mostram melhores expressões na região nordeste da cidade de Itabira, no interior e nas laterais dessa zona de cisalhamento.

De acordo com Machado & Schorscher (1997) o caráter retrometamórfico das reações associadas com o desenvolvimento das estruturas D₄ é atestado pela concentração de muscovita-sericita em protolitos quartzo-feldspáticos, bem como pela presença de clorita, biotita, flogopita, antofilita e actinolita nas rochas máficas e ultramáficas do distrito berilífero de Itabira-Nova Era. As reações associadas com essas estruturas sugerem as condições da fácies xisto verde.

2.3 GEOLOGIA

A geologia da região de Itabira-Ferros apresenta vários registros geocronológicos que vão desde o Arqueano ao Brasileiro. Ela é constituída por rochas arqueanas e proterozóicas, incluindo terrenos polimetamórficos de baixo a alto grau. São representados por gnaisses TTG, com rochas máficas e ultramáficas associadas, seqüências vulcanossedimentares tipo *greenstone belts* (Supergrupo Rio das Velhas) e seqüências ferríferas paleoproterozóicas do Supergrupo Minas do extremo nordeste do Quadrilátero Ferrífero (Schorscher 1991, Oliveira & Leite 2000; Figuras 2.2 e 2.4). Nesta tese, adota-se a figura 2.4 proposta pela CPRM (2004) para a área em estudo. Adota-se também o mapa da figura 2.2 para o arcabouço tectônico da área.

2.3.1 Embasamento

As rochas que compõem o embasamento da região entre Itabira e Guanhões foram denominadas inicialmente como embasamento arqueano Pré-Minas (Rynearson *et al.* 1954 In: Fernandes 2001; Pflug & Renger 1973) e Série Barbacena (Barbosa 1952). Fontes *et al.* (1978) denominaram de Complexo Gnáissico-Granítico a este variado conjunto de rochas metamórficas de médio a alto grau e intrusivas associadas. De acordo com o atual mapa geológico de Minas Gerais (CPRM 2004), o embasamento dessa região em estudo foi subdividido em diversos complexos: Mantiqueira, Santa Bárbara, Guanhões e Belo Horizonte que compõem a infra-estrutura das províncias estruturais Mantiqueira e São Francisco (Figuras 2.4, 2.5).

Esses complexos são constituídos por gnaisses do tipo TTG, migmatitos e por rochas típicas de seqüência vulcanosedimentar representadas por xistos verdes (ultramáficos e máficos), xistos pelíticos e delgadas lentes de itabirito, quartzito e formação manganésifera, com itabirito, itabirito carbonático, rocha calcissilicática, xisto carbonático, quartzito ferruginoso e quartzito (Padilha 2000). Diversos autores colocam estas rochas de idade paleoproterozóica como representando o embasamento da Faixa Araçuai. Intercalam-se aos gnaisses, corpos de metabásicas e pegmatitos, normalmente concordantes com o bandamento gnáissico (Grossi Sad *et al.* 1993).

Associados a esses ortognaisses ocorrem anfibolitos e metapiroxenito (mais raro), enquanto que próximo à localidade de Joanésia tem-se ocorrência de metapiroxenitos e na localidade de Sete Cachoeiras ocorrem diques de metagabros (Grossi Sad *et al.* 1993).

2.3.1.1 SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS

O Supergrupo Rio das Velhas foi interpretado como um cinturão de rochas verdes (*greenstone belts*) por Schorscher (1978) após a descoberta de *komatiitos* com estruturas do tipo *spinifex*. Ele compreende uma seqüência *greenstone belt* completa subdividido em três grupos: Quebra Osso, Nova Lima e Maquiné. Para esse autor, os contatos entre os migmatitos inseridos no complexo basal e as rochas desse supergrupo seriam tectônicos e com leves efeitos de metamorfismo termal.

O Grupo Quebra Osso é formado essencialmente por *komatiitos* peridotíticos com estruturas típicas de lavas almofadadas (*pillow lavas*), brechadas, maciças e com texturas *spinifex* bem preservadas. Nas seqüências superiores, observaram-se metassedimentos de origem química como *cherts*, formações ferríferas bandadas e intercalações de xistos de origem máfica, metamorfizados na fácies xisto verde. O contato desse grupo com o Grupo Nova Lima é gradacional, enquanto que com o embasamento é por falha inversa de alto ângulo (Schorscher 1979).

O Grupo Nova Lima é composto, essencialmente, por rochas máficas de origem vulcânica, vulcanoclástica e epiclástica, predominando xistos verdes derivados de rochas ígneas básicas e intermediárias, filitos e, subordinadamente, formações ferríferas portadoras de sulfeto. Esse grupo funciona como rocha matriz de numerosos depósitos auríferos. A figura 2.5 mostra de forma sucinta a representação das unidades geológicas para o Supergrupo Rio das Velhas e Supergrupo Minas.

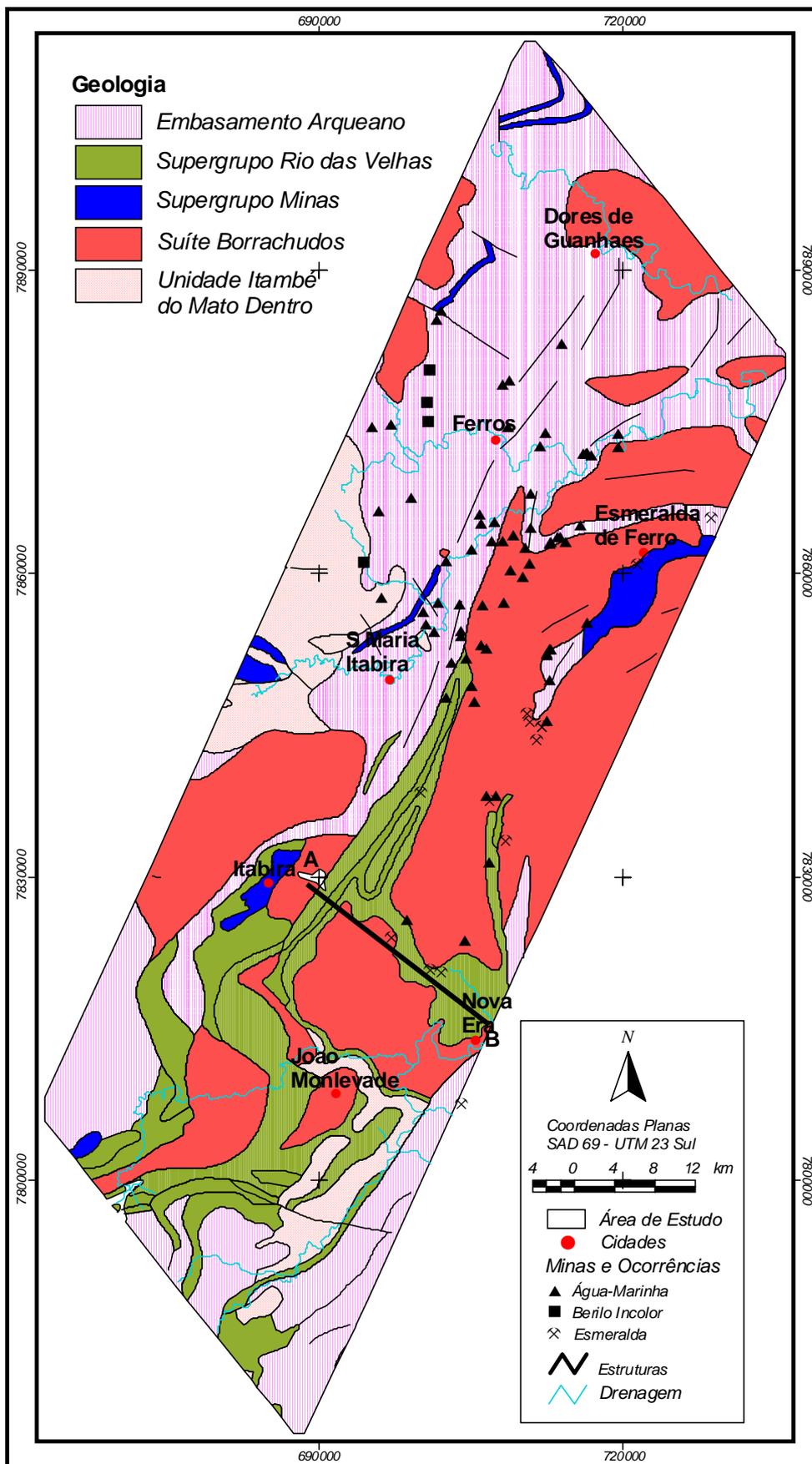


Figura 2.4: Mapa geológico da área em estudo contendo as principais compartimentações geológicas e estruturais da área do Projeto Itabira-Ferros (CPRM 2004). A-B detalhe da figura 2.8.

O Grupo Maquiné é a unidade do topo do Supergrupo Rio das Velhas e composta de moscovita-quartzo xisto. Ocorrem piritas detríticas nos planos de estratificação cruzada dos quartzitos conglomeráticos e nos conglomerados, indicando a existência de uma atmosfera redutora até o final da sedimentação arqueana no Cinturão de Rochas Verdes Rio das Velhas (Schorscher 1979) (Figura 2.5).

Nesse supergrupo predominou o metamorfismo regional, de caráter plurifacial-progressivo, durante o qual as condições de pressão e temperatura reinantes mudaram do tipo barroviano, nos estágios pré a sintectônicos, para o tipo abukuma, no estágio pós-tectônico. Esse metamorfismo progrediu da fácies xisto verde inferior até a fácies granulito (Schorscher 1976).

Segundo Schorscher (1991), os restos de associações vulcanossedimentares de metamorfismo mais elevado, que ocorrem na região entre Itabira e Nova Era (Figura 2.8) podem representar continuações dos *greenstones belts* Rio das Velhas mais fortemente afetados pelo principal evento metamórfico regional progressivo do Proterozóico.

De acordo com Souza (1988) e Machado (1994), os processos genéticos dos Granitos Borrachudos e os fluídos correlatos alcalinos-potássicos ricos em elementos incompatíveis que reagiram com as rochas metaultramáficas dessas seqüências geraram a mineralização das esmeraldas. Nessas rochas tem-se o aparecimento de anfíbolitos portadores de estauroлита marcando o início dessa fácies. Os xistos pelíticos na zona da sillimanita representam a fácies anfíbolito médio (Souza 1988).

As rochas dessa seqüência ocorrem por toda a área, em meio aos granitóides Borrachudos (Souza 1988). Elas são compostas por pacote de rochas de aspecto xistoso ou, às vezes, gnáissico, profundamente alterado com características estruturais notáveis e foliações bem desenvolvidas. Predominam, ainda, uma sucessão de xistos e gnaisses metapelíticos e xistos derivados de metaultramáficas intimamente associados com anfíbolitos, quartzitos micáceos e, subordinadamente, veios de quartzo (Souza 1988). As rochas metaultramáficas, com cromititos associados são as principais rochas encaixantes das mineralizações de esmeraldas. A importância das cromitas no contexto geológico das jazidas de esmeraldas encontra-se no fato de o cromo desempenhar o papel do elemento cromóforo dessas mineralizações (Leal 1998).

Para Machado *et al.* (1989), as rochas vulcânicas do Supergrupo Rio das Velhas evidenciam idades de 2.8-3.0Ga. Segundo Carneiro *et al.* (1996), a idade 2,780Ma, determinada pelo método U-Pb, sugere o tempo de formação do Evento Rio das Velhas.

Para esses autores, esse evento foi curto, menor que 80Ma, e, durante o mesmo, as rochas gnáissicas foram retrabalhadas e intrudidas por magmas cálcio-alcálicos, enquanto que de 2,4 a 2,1Ga teria ocorrido o Evento Transamazônico causando reativação crustal.

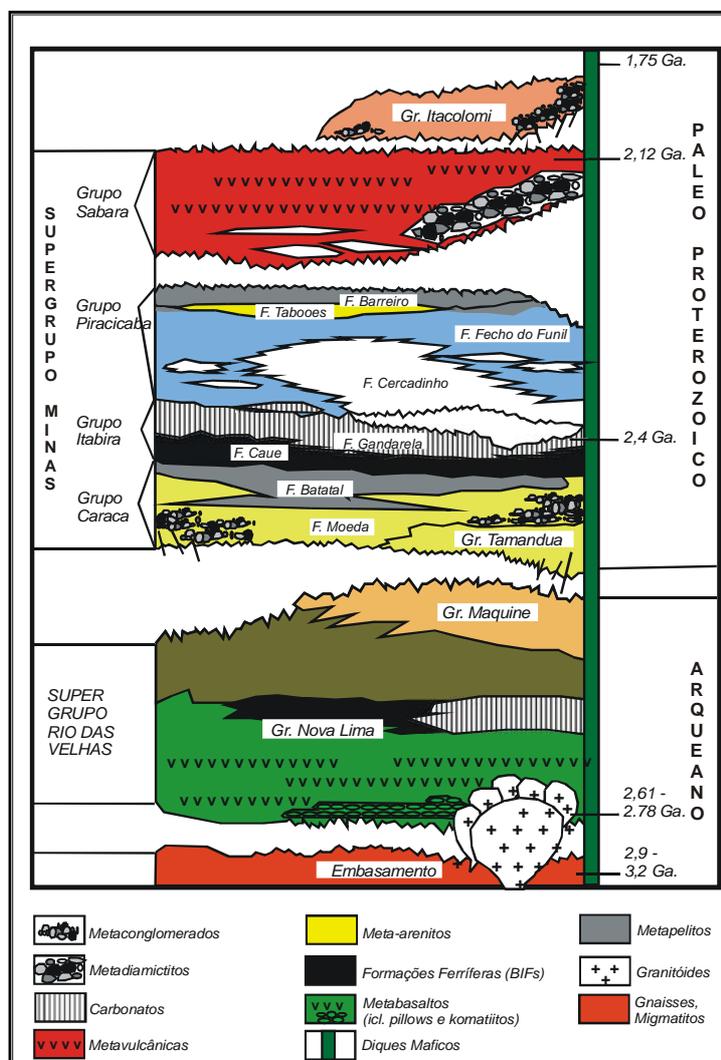


Figura 2.5: Coluna estratigráfica proposta por Marshak & Alkimim (1989) para os Supergrupos Rio das Velhas e Minas.

2.3.2 Paleoproterozóico

2.3.2.1 SUPERGRUPO MINAS

Dorr II *et al.* (1957) e Dorr II (1969) foram os primeiros a elaborarem uma estratigrafia para o Supergroupo Minas subdividindo-o em três grupos: Caraca, Itabira e Piracicaba. A estratigrafia atual desse supergrupo no Quadrilátero Ferrífero ainda é a

que foi elaborada por Dorr II (1969), com contribuições adicionais para áreas específicas feitas por diversos autores nos últimos anos (Ladeira *et al.* 1983, Marshak & Alkimim 1989). Da base para o topo, esse supergrupo é composto pelos Grupos Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará (Figura 2.5).

O Grupo Caraça é a unidade basal do Supergrupo Minas e subdivide-se em duas formações: Moeda (Wallace 1958) e Batatal (Maxwell 1958). A Formação Moeda é composta predominantemente por quartzitos, quartzitos conglomeráticos, conglomerados com pirita e localmente leitos de filitos. Já a Formação Batatal compõe-se de filitos ou micaxistos, filitos grafitosos, lentes de *metacherts* e itabiritos (Inda *et al.* 1984).

O Grupo Itabira sobrepõe-se ao Grupo Caraça em contato de transição pouco espesso e divide-se em duas formações: Cauê e Gandarela. A Formação Cauê, basal, compõe-se de itabirito de composição variada, formação ferrífera tipo Lago Superior e alguns leitos menos importantes de quartzito, filito e dolomita. O itabirito é composto por leitos bem estratificados de quartzo sacaroide e hematita (Inda *et al.* 1984). A Formação Gandarela sobrepõe-se ao Itabirito Cauê, com contato de transição e é composta quase que exclusivamente por filitos. O Grupo Piracicaba, unidade superior do Supergrupo Minas, é constituído por certa variedade de rochas metassedimentares, entre essas têm-se quartzito ferruginoso, filito, dolomito, filito dolomítico, quartzito, grauvacas e metatufos (Dorr II *et al.* 1983).

O Grupo Sabará é composto por xistos, filitos e diamictitos (Renger *et al.* 1994, Noce 1995).

2.3.2.2 SUITE BORRACHUDOS

Harder & Chamberlin (1915) foram os primeiros a mencionarem esses Granitos e interpretaram-nos como granitos intrusivos. Dorr & Barbosa (1963) denominaram-nos de Granitos Borrachudos a partir da seção-tipo na região de Itabira, considerando-os como litotipos ígneos, potássicos e mais jovens que as rochas do Supergrupo Minas. Reeves (1966) considerou esses Granitos como rochas sinmetamórficas metassomáticas de alto grau do metamorfismo regional. Os granitos da Suíte Borrachudos afloram a leste da Serra do Espinhaço, dispendo-se segundo *trend* N-S, paralelo ao eixo maior dessa serra (Dussin 1994) (Figuras 2.4, 2.5 e 2.6).

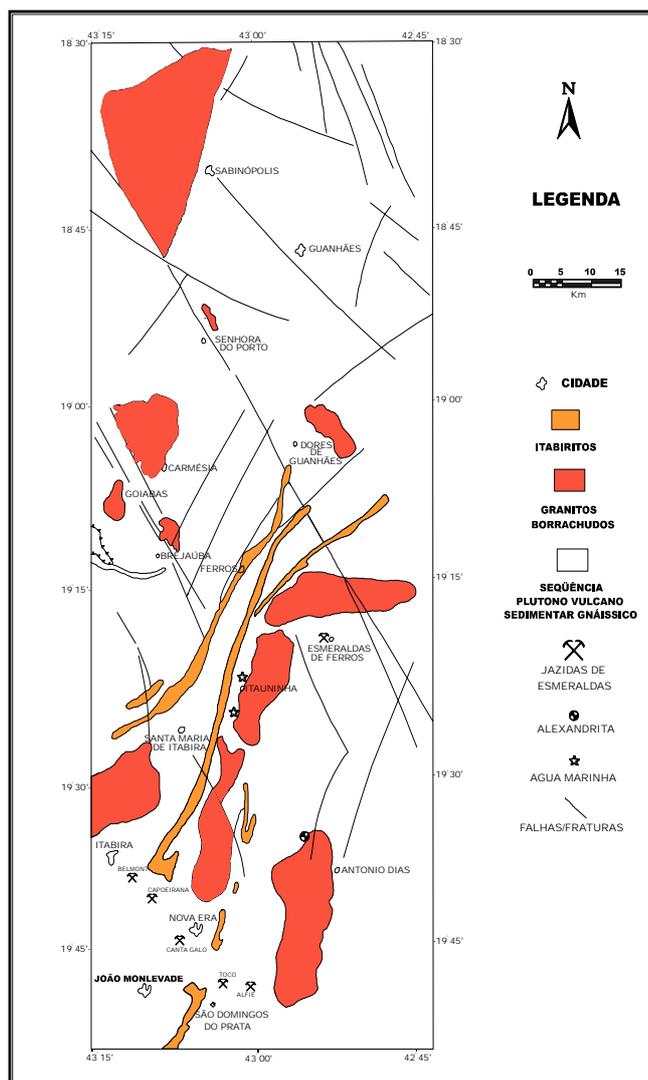


Figura 2.6: Mapa litológico apresentando os principais maciços de Granitos Borrachudos, o complexo granítico-gnáissico e as principais falhas encontradas no Cinturão Esmeraldífero do Estado de Minas Gerais (modificado de Fernandes *et al.* 1994).

Schorscher (1975) associou-os ao Complexo Gnáissico Migmatítico da região do Quadrilátero Ferrífero e que as condições de metamorfismo progradante sofridas pelos Granitos Borrachudos obliteraram as características genéticas dos granitóides originais, transformando-os em gnaisses lenticulares (*flaser*). Ele enfatiza ainda que esses corpos apresentam características fotogeológicas e petrográficas distintas dos demais terrenos graníticos.

Para Chemale Jr. (1987), essas rochas seriam produtos de magmas alcalinos anidros colocados no embasamento granito-gnáissico, em ambiente anorogênico e antes do início dos primeiros processos tectonometamórficos sofridos pelas rochas supracrustais. De acordo com esse autor, durante a primeira deformação atuante no

Distrito Ferrífero de Itabira, elas foram deformadas por cisalhamento simples, passando a apresentar uma foliação paralela às das rochas supracrustais.

Souza (1988) descreve os Granitos Borrachudos como portadores de uma mineralogia composta por microclina mesopertítica, quartzo e, subordinadamente, plagioclásio, biotita e hornblenda.

Para Fernandes *et al.* (1994), as rochas da Suíte Borrachudos podem apresentar-se gnaissificadas ou não e são representadas, em geral, por rochas de granulação predominantemente grossa, com níveis de máficos paralelos e descontínuos. As descrições ao microscópio dessas rochas por esses autores concordam com as descrições feitas por Souza (1988). De acordo com esses autores, os Granitos Borrachudos de Itabira (Granito Itabira de Grossi Sad *et al.* 1990) apresentam intensa transformação textural e mineralógica, com coloração cinza-amarelado, bastante homogêneos, leucocráticos a hololeucocráticos, com granulação média a grossa e textura granoblástica (*flaser*, facoidal), estando os feldspatos intensamente caulinizados. Esses corpos apresentam, ainda, composição álcali-feldspato granito, ricos em elementos incompatíveis. Composicionalmente mostram duas fácies petrográficas, uma composta de biotita gnaisse com anfibólio e outra por gnaisse com biotita.

César-Mendes (1998) realizou pesquisas geológicas em áreas próximas à Mina Canta Galo e observou a presença de corpos pertencentes aos Granitos Borrachudos sendo cortados por vários corpos pegmatíticos portadores de berilo (água-marinha). De acordo com esse autor, as feições texturais, mineralógicas e estruturais são muito similares às descritas para as minas Belmont e Capoeirana pelo vários autores citados anteriormente.

Iwata (2000) estudou o granito Açucena na região entre Nova Era e Esmeralda de Ferros e encontrou uma composição de ortognaisse com anfibólio e biotita. Em análises geoquímicas, essas rochas apresentam composições típicas de rochas graníticas, com teores de SiO₂ acima de 71,30%, com as amostras concentrando no campo cálcico, com enriquecimento em sílica no Ortognaisse com biotita. Já no diagrama ANK x ACNK de Maniar & Piccoli (1989), os dois constituintes apresentaram-se metaluminosos a peraluminosos.

Grossi Sad *et al.* (1990) propuseram a denominação de Suíte Borrachudos para as rochas que englobariam os Granitos Itabira, Peti, Morro do Urubu, Senhora do Porto, São Félix, Cansanção e Açucena e que esses granitos cortariam as rochas supracrustais metavulcanossedimentares. Contatos tipicamente intrusivos não foram observados,

apesar de em alguns locais os corpos Borrachudos serem descritos como injeções na encaixante vulcanossedimentar, levando os referidos autores a imaginar tratarem-se de contatos tectônicos (Figuras 2.4 e 2.6). Segundo esses autores, as rochas da Suíte Borrachudos são interpretadas como granitos alcalinos posicionados em ambientes anorogênicos e ligados a *rifteamento*.

Herz (1970) encontrou, a partir de análises em feldspatos potássicos amostrados em Granitos Borrachudos, pelo método Rb/Sr, idade de 1.230-60Ma, sendo interpretada como o período geológico em que se deu a intrusão granítica desse corpo. Dussin (1994) considera a porção sul do plutonito Açucena como um outro corpo, denominado de Itauninha. De acordo com esse autor, que realizou estudos de química mineral e isótopos radiogênicos (Sr e Nd), esses granitos teriam se originado por fusão das rochas da crosta inferior e relacionou-os ao rifteamento espinhaço. Esse mesmo autor datou os Granitos Borrachudos pelo método Pb/Pb e obteve a idade de cristalização em torno de 1.7Ga. Dossin *et al.* (1993) obtiveram idades Pb-Pb de 1729 ± 14 Ma para o Granito São Félix e de 1595 ± 10 Ma para o Granito Itauninha.

Chemale Jr. *et al.* (1997) obtiveram a idade U-Pb em zircão para o plutonito Itabira de 1670 ± 32 Ma e Fernandes *et al.* (2001) obteve para o plutonito Peti idade U-Pb em zircão de 1665 ± 5 Ma.

Fernandes (2001) em estudos nos granitos Morro do Urubu encontrou a idade de 1777 ± 30 Ma, sendo interpretada como a idade de cristalização do granito e que essa idade corresponde a mais antiga disponível para esse magmatismo, o que permitiu a autora estabelecer um intervalo de duração desse evento entre 1,78 e 1,67 Ga. De acordo com essa autora, as características químico-mineralógicas desses granitos permitem classificá-los como anorogênicos. Além disso, a ocorrência de meta-riolitos na região e dos granitos denominados São Félix de mesma idade dos borrachudos, intercalados às formações basais do Supergrupo Espinhaço levam a considerar à sua associação com a abertura do *rift* Espinhaço.

Schorscher (1991) observou dentro dos Granitos Borrachudos restos de seqüências vulcanossedimentares, abrigando rochas metaultramáficas que hospedam mineralizações de esmeraldas. Observou, ainda, foliação caracterizada pela orientação preferencial dos minerais máficos, com atitudes em torno de N70E/20 - 40NW.

2.3.3 Mesoproterozóico

2.3.3.1 UNIDADE ITAMBÉ DO MATO DENTRO

A Unidade Itambé do Mato Dentro tem grande distribuição na folha Conceição do Mato Dentro. É representada por quartzitos finos de tonalidade branca e laminados. A laminação é de espaçamento milimétrico dada por filmes sericíticos e filmes ferruginosos constituídos de opacos de granulação muito fina que se concentram em agregados lineares. Uma origem vulcânica a subvulcânica tem sido atribuída a esses corpos, com base no modo de ocorrência, elevados teores em TiO_2 (Hoppe 1978 in Grossi Sad *et al.* 1993) e preservação local de texturas e mineralogias primárias (Grossi Sad *et al.* 1993).

2.3.4 Neoproterozóico

2.3.4.1 VEIOS DE QUARTZO E PEGMATITOS

Os veios de quartzo aparecem como intercalações de dimensões centimétricas a métricas, concordantes ou discordantes com as litologias da seqüência vulcanossedimentar e os gnaisses graníticos lenticulares. Os veios de dimensões maiores são encontrados próximos aos contatos falhados com as rochas gnáissicas. Apresentam aspecto sacaroide, fraturamento intenso e domínios de grãos com contornos irregulares, reentrantes e denteados (Souza 1988).

A fase pegmatítica é representada pelo aparecimento de veios ou concentrações pegmatíticas encontradas junto às litologias gnáissicas ou nas proximidades dos contatos dessas com a seqüência vulcanossedimentar. Esses corpos pegmatíticos podem atingir até uma ou duas dezenas de metros de largura. Essas segregações, quando de dimensões centimétricas, ocorrem acompanhando a foliação e as de dimensões métricas manifestam-se sob a forma de ramificações preenchendo as fraturas e juntas (Souza 1988).

No interior da seqüência vulcanossedimentar, os veios são mais raros, indicando uma remobilização dos fluidos formadores dessas concentrações a partir dos gnaisses graníticos (Souza 1988). Nas regiões das minas, esses corpos são, em geral, totalmente intemperizados e ocorrem como concentrações de porte centimétrico a decimétrico,

próximos aos ápices de pequenas dobras ou formando ramificações estreitas preenchendo fissuras preexistentes. Como mineralogia predominante, têm-se quartzo, feldspatos e micas. Como acessório principal, tem-se berilo (água-marinha) (Souza 1988, 1991, Machado 1994).

De acordo com César-Mendes (1998), é muito comum a presença de corpos pegmatíticos na área próximo à Mina Canta Galo e que os mesmos aparecem cortando as litologias dos complexos graníticos gnáissicos, assim como as rochas da seqüência vulcanossedimentar. De acordo com esse autor, os corpos pegmatíticos são de natureza quartzo-feldspática intensamente caulinizados e portadores de cristais de berilo, sendo que alguns apresentaram “olhos” de água-marinha. Para esse autor, as esmeraldas dessa área foram geradas a partir do corpos pegmatíticos portadores de berilo em contato com a seqüência vulcanossedimentar metaultramáfica portadora dos elementos cromóforos da esmeralda.

Quanto ao material pegmatítico, as datações minerais, tanto pelo método Rb/Sr, quanto K/Ar, apresentam idades que variam entre 460 a 580 Ma, estando assim, esse material relacionado ao evento termal que ocorreu a cerca de 500Ma (Marciano *et al.* 1993). De acordo com Cordani *et al.* (1980), no evento que ocorreu entre 500-600Ma (Ciclo Brasileiro) têm-se metamorfismo regressivo, tectônica de empurrão e fraturamento regional, afetando toda a região.

De acordo com Correia Neves *et al.* (1986), os dados de geocronologia obtidos na Província Pegmatítica Oriental dão suporte para afirmar que grande parte dos pegmatitos foi gerados no final do Ciclo Brasileiro.

Para os vários corpos pegmatíticos, associados às litologias do complexo gnáissico-migmatítico, Marciano *et al.* (1993) obtiveram idades Rb/Sr em amazonita de 545 Ma, K/Ar em muscovita entre 502 – 525 Ma e 531 ± 22 Ma, idades essas consideradas pelos autores com de cristalização dos pegmatitos.

2.4 EVOLUÇÃO GEOLÓGICA REGIONAL

Uhlein (1991) e Uhlein *et al.* (1995) propuseram um modelo evolutivo para o sudeste do Cráton São Francisco. De acordo com esses autores, houve superposição de dois rifteamentos, o primeiro no final do Paleoproterozóico e início do Mesoproterozóico e o segundo no Neoproterozóico. A estrutura do Supergrupo Espinhaço é característica

de um *rift* intracontinental ou ensiálico. No Neoproterozóico ocorreu a reativação do sistema Espinhaço por um tectonismo extensional, responsável pela individualização do *rift* Araçuaí. O final do Proterozóico foi marcado pela orogenia Brasiliana, responsável pelo fechamento das bacias dos *rifts* do Espinhaço (Paleoproterozóico/Mesoproterozóico) e Araçuaí (Neoproterozóico).

Para Dussin (1994), o Ciclo Brasileiro afetou todas as unidades que compõem o Espinhaço Meridional. A Faixa Araçuaí, durante o Brasileiro, é marcada por metamorfismos e deformações relacionadas a movimentos de empurrão e transcorrência, acompanhados pela intrusão de granitos sin a tardi-tectônicos, derivados de fusões anatéticas, desencadeadas pelo espessamento crustal que se seguiu à colisão, culminante no período entre 650 e 550 Ma (Pedrosa Soares *et al.* 2000, In: Fernandes 2001).

Quanto aos granitos Borrachudos, Dussin & Dussin (1995) propuseram um modelo para geração e posicionamentos crustal dos mesmos. De acordo com esses autores, após o período de calmaria que se seguiu à Orogenia Transamazônica, 2,1 – 1,9 Ga, a crosta esteve submetida a esforços distensivos entre os períodos de 1,8 – 1,7 Ga, que provocaram o adelgaçamento e fraturamento litosférico. Durante esse período foram depositados os sedimentos fluviais que integram as unidades basais do Supergrupo Espinhaço. Esse adelgaçamento litosférico foi compensado pela ascensão do manto astenosférico, que ao fundir por decompressão, gerou magmas básicos, que ao serem colocados dentro da crosta inferior, provocou a fusão da mesma, sob condições anidras, gerando o magma Borrachudos, o qual se valendo do fraturamento induzido pelo processo de *rift* alcançou a superfície, em que é representado pelos riolitos do Serro e Conceição do Mato Dentro ou se cristalizou em profundidade, sob a forma de corpos graníticos.

2.5 MINERALIZAÇÕES DA ÁREA

O cadastramento mineral realizado pela CPRM para a região de Itabira-Ferros levou a contabilização de expressivo número de jazimentos e abrangendo um amplo espectro de substâncias metálicas (ferro, manganês, alumínio) e não metálicas (brita, areia, gemas). O produto mineral da região de Itabira-Ferros apresenta uma grande importância econômica, com destaque para o minério de ferro e gemas. (CPRM 2000).

O campo pegmatítico Itabira-Ferros é conhecido desde os tempos coloniais, mas atingiu um grande desenvolvimento no período da segunda guerra mundial, onde foram abertas várias lavras e catas visando principalmente mica (CPRM 2000). Com a descoberta de esmeralda na faixa Itabira-Nova Era, a partir da década de 70, a faixa Itabira-Ferros assumiu grande importância econômica (Figura 2.7).

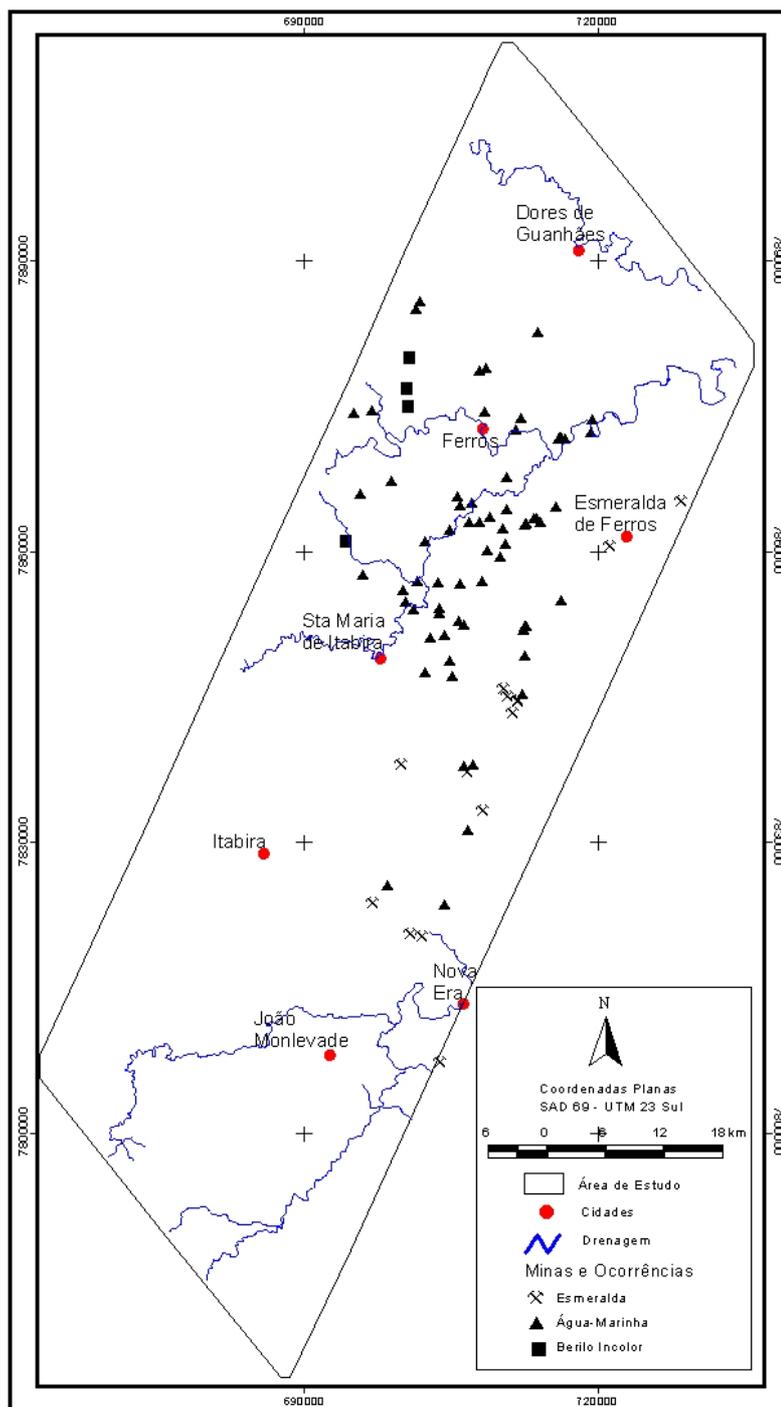


Figura 2.7: Mapa mostrando as principais ocorrências minerais de berilo (esmeralda, água-marinha e berilos incolores) da área de estudo.

2.5.1 Mineralizações de Minerais-Gemas

2.5.1.1 MINERALIZAÇÕES DE BERILO

O berílio (Be) é um elemento raro na crosta terrestre, sendo encontrado nos produtos finais da diferenciação de magmas graníticos, especialmente nos de natureza pegmatítica (Goldschmidt 1954). A história geoquímica do berílio no processo pegmatítico serve como um exemplo claro de concentração pós-magmática de um elemento altamente disseminado na fusão original. O principal fator que determina a concentração de berílio em pegmatitos é, sobretudo, a diferenciação por cristalização fracionada, na qual, à medida que o conteúdo de componentes voláteis aumenta, a concentração de berílio na parte residual do pegmatito também aumenta. Assim, a cristalização do berilo ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$) nos pegmatitos graníticos tem início sob condições de forte supersaturação em sílica e através do acúmulo do elemento sódio e componentes voláteis (Beus 1966).

A variedade do berilo reflete o tipo pegmatítico no qual ele é encontrado. As variações na composição dos berilos estão correlacionadas diretamente com as características geoquímicas e paragenéticas dos pegmatitos em que eles ocorrem (Hawthorne & Cerny 1977). As propriedades físicas e os conteúdos de metais alcalinos e de BeO do berilo variam comumente de zona para zona em um mesmo pegmatito (Page *et al.* 1953; Staatz *et al.* 1963). O berilo tem diversas variedades gemológicas, dentre elas destaca-se a esmeralda e a água-marinha.

2.5.1.1.1 Esmeralda

As mais importantes mineralizações de esmeralda em algumas regiões do mundo ocorrem em rochas do tipo *greenstone belt* (Schwarz 1987). Na Faixa Itabira-Ferros, as mineralizações de esmeraldas encontram-se localizadas dentro de formações de rochas básica-ultrabásicas metassomatizadas por fluidos hidrotermais. Esses depósitos de esmeraldas pertencem a tipos clássicos, com os pegmatitos ligados diretamente aos corpos graníticos intrusivos com extensão limitada, e estão relacionadas à Província Pegmatítica Oriental (Giuliani *et al.* 1990; Figura 2.8).

Estudos realizados na Mina Belmont (Itabira) por Machado (1994, 1998) mostraram que a esmeralda encontra-se em rochas metaultramáficas com ou sem

cromititos, em que a biotita/flogopita chega a formar verdadeiros níveis de biotitito/flogopitito nos anfibolitos metaultramáficos e nos talco-cummingtonita-cloritaxistos metassomatizados (Figura 2.8). Segundo essa autora, o aparecimento de flogopita e o aumento de seus teores caracterizam a alteração metassomática mineralizante. Isso causa a transição gradacional das rochas metaultramáficas para biotititos/flogopititos, e tais reações ocorrem em função do aporte sin-metamórfico de fluidos metassomáticos nas zonas de cisalhamento rúptil-dúctil, próximas aos contatos tectônicos das seqüências vulcanossedimentares com os granitos da Suíte Borrachudos (Figura 2.8).

Para Souza (1988), as mineralizações de esmeralda ocorrem, ainda, em associações com veios pegmatíticos quartzo-feldspáticos. Com menos freqüência, tem-se esmeraldas nos contatos ou no interior de veios quartzosos (Figura 2.8).

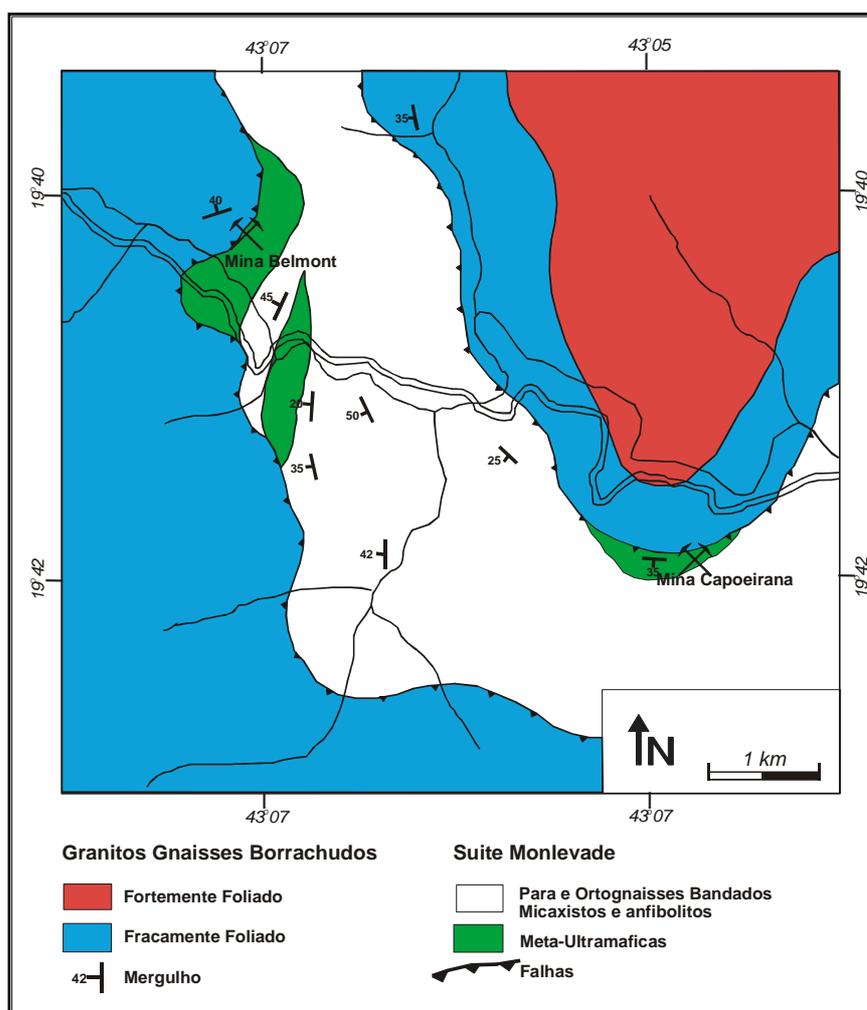


Figura 2.8: Mapa geológico mostrando detalhe da área de ocorrência das rochas vulcanossedimentares na região entre Itabira e Nova Era de acordo com a figura 2.4. Esta figura contém as principais jazidas de esmeraldas do Estado de Minas Gerais (modificado de Souza 1991).

Os cristais de esmeralda, quando em xistos, são orientados preferencialmente segundo as foliações das rochas e, quando imersas em veios de quartzo, estão restritas às bordas (Souza 1991).

Para Souza (1988), as assembléias minerais observadas indicam que as litologias das áreas das minas de esmeralda foram submetidas a metamorfismo regional progradante de fácies xisto-verde superior a anfibolito médio, com o gradiente crescendo ligeiramente de oeste para leste, caracterizadas pelas isógradas da estauroлита e sillimanita, além da zona da cordierita. Dados microtermométricos em esmeraldas forneceram valores de pressão entre 2 e 2,75 Kbar e temperatura entre 450 e 650°C.

As áreas das jazidas de esmeralda foram pouco estudadas quanto aos aspectos estruturais. Nos mapas geológicos (Figuras 2.6 e 2.8) de Fernandes *et al.* (1994) e Souza (1991) para a região Itabira-Ferros, são destacados drenagens que em geral, desenvolvem-se sobre falhas de empurrão.

Ribeiro-Althoff (1997) realizou estudo geocronológico no garimpo de Capoeirana (Nova Era), pelos métodos K-Ar e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ em flogopita e encontrou idades entre 650 e 500Ma, interpretadas como contemporâneas à geração da esmeralda. Esses resultados mostraram que as esmeraldas do garimpo de Capoeirana formaram-se durante o Ciclo Orogênico Brasileiro (650-500Ma), no domínio dos cinturões móveis do Neoproterozóico, muito depois dos Granitos Borrachudos, que se consolidaram ao final do Paleoproterozóico (Dussin 1994).

2.5.1.1.2 Água-marinha

O maior número de pegmatitos mineralizados em água-marinha situa-se nos municípios de Santa Maria de Itabira e Ferros. Os corpos pegmatíticos dessas áreas variam de pequenos a médios e, raramente, grandes (Grossi Sad *et al.* 1999).

Nessas áreas ocorrem ainda, nos veios pegmatíticos mais espessos cortando as rochas metaultramáficas. Esses veios pegmatíticos apresentam-se com formas tabulares e largura em torno de 2m. Em geral, são corpos simples, sem individualização do núcleo de quartzo, e são concordantes com as metaultramáficas. Como esses corpos encontram-se acima do lençol freático, os processos de intemperismo são muito intensos, ocorrendo a completa caulinização dos feldspatos. A composição mineralógica desses pegmatitos é bastante simples, sendo encontrado como minerais essenciais quartzo, feldspatos, moscovita e biotita. O principal acessório desses corpos é água-marinha, tanto como

cristsais que podem ser aproveitados como gema quanto para ser utilizados na indústria (Carvalho 1999; Grossi Sad *et al.* 1999).

Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos

O coração do homem pode fazer planos, mas a resposta certa dos lábios vem do SENHOR (Pv 16:1).

O processamento dos dados é parte essencial do procedimento de controle de qualidade e deve ser conduzido no campo. Isso geralmente inclui procedimentos tais como a junção de dados de diferentes fontes, validação dos dados registrados e verificação de valores ausentes ou espúrios (picos).

3.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS MAGNÉTICOS

O processamento dos dados magnéticos teve como objetivo fornecer subsídios geofísicos que colaborassem na interpretação geológico-estrutural da área em estudo e a metodologia usada para a confecção dessas imagens tiveram as seguintes etapas (Figura 3.1):

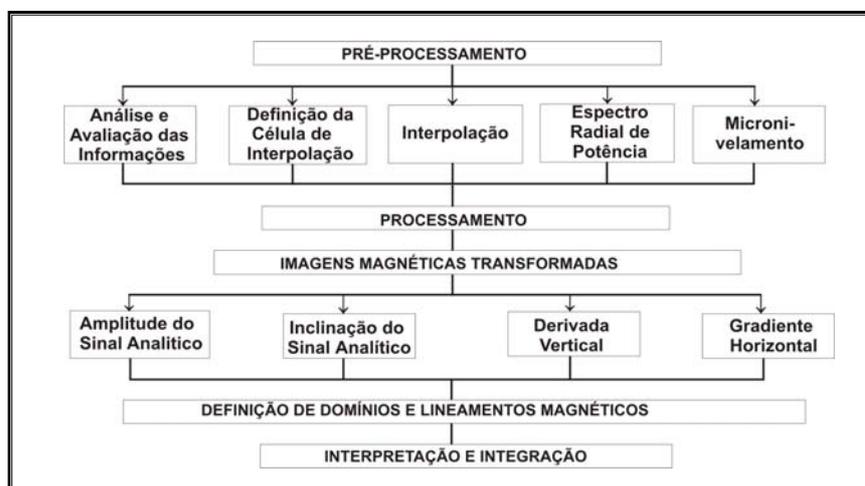


Figura 3.1: Esquema mostrando as principais etapas para obtenção dos produtos magnéticos.

3.1.1 Etapas para a Confeção da Malha Regular

3.1.1.1 AVALIAÇÃO DOS DADOS

A distribuição espacial e a densidade dos dados primários devem ser analisadas antes de se iniciar o processo de geração das imagens, uma vez que esses aspectos são preponderantes na qualidade dos resultados. Uma metodologia para avaliar o padrão de distribuição de pontos aplicados aos estudos dos fenômenos naturais classifica esses padrões em três categorias: regular, aleatória e de agrupamentos. Muitos padrões podem ter características intermediárias entre essas categorias extremas (Davis 1986).

O padrão regular caracteriza-se por possuir os pontos distribuídos segundo uma malha regular onde a distância entre o ponto i e o ponto j em relação a uma direção específica é a mesma para todos os pares de pontos i e j no mapa (Geosoft 1998). O padrão de agrupamento possui um arranjo onde os pontos distribuem-se em torno dos centros, enquanto que no padrão aleatório a posição de um ponto não exerce influência na colocação de qualquer outro ponto. A metodologia utilizada nos dados de Itabira-Ferros foi o de padrão regular.

As características onde a densidade dos pontos em uma determinada sub-área é igual as demais sub-áreas de mesma forma e tamanho são denominadas de uniformidade, tendo-se com isso, uma uniformidade dos dados tanto para padrões aleatórios como para regulares. A qualidade das imagens está relacionada diretamente com a densidade e uniformidade dos pontos de coleta. Esses parâmetros são importantes para a geração da malha regular, na dec do melhor método de interpolação dos dados e na interpretação dos mesmos.

Um primeiro passo na análise dos dados aerogeofísicos foi a retirada das linhas de controle do aerolevanteamento. Essas linhas foram retiradas a fim de evitar erros no momento da interpolação dos dados. Esses dados foram verificados e avaliados para se observar a existência de informações inconsistentes, como o efeito “pepita” ou picos espúrios (*spikes*) e observar o comportamento da distribuição das linhas de vôo. O mapa das linhas de vôo foi impresso para se verificar a distribuição em malha regular. Observou-se que algumas linhas de produção apresentavam problemas de nivelamento, desvios, essas linhas foram retiradas para evitar problemas no momento da

interpolação, porém, o padrão geral das mesmas não apresentou maiores problemas (Figura 3.2).

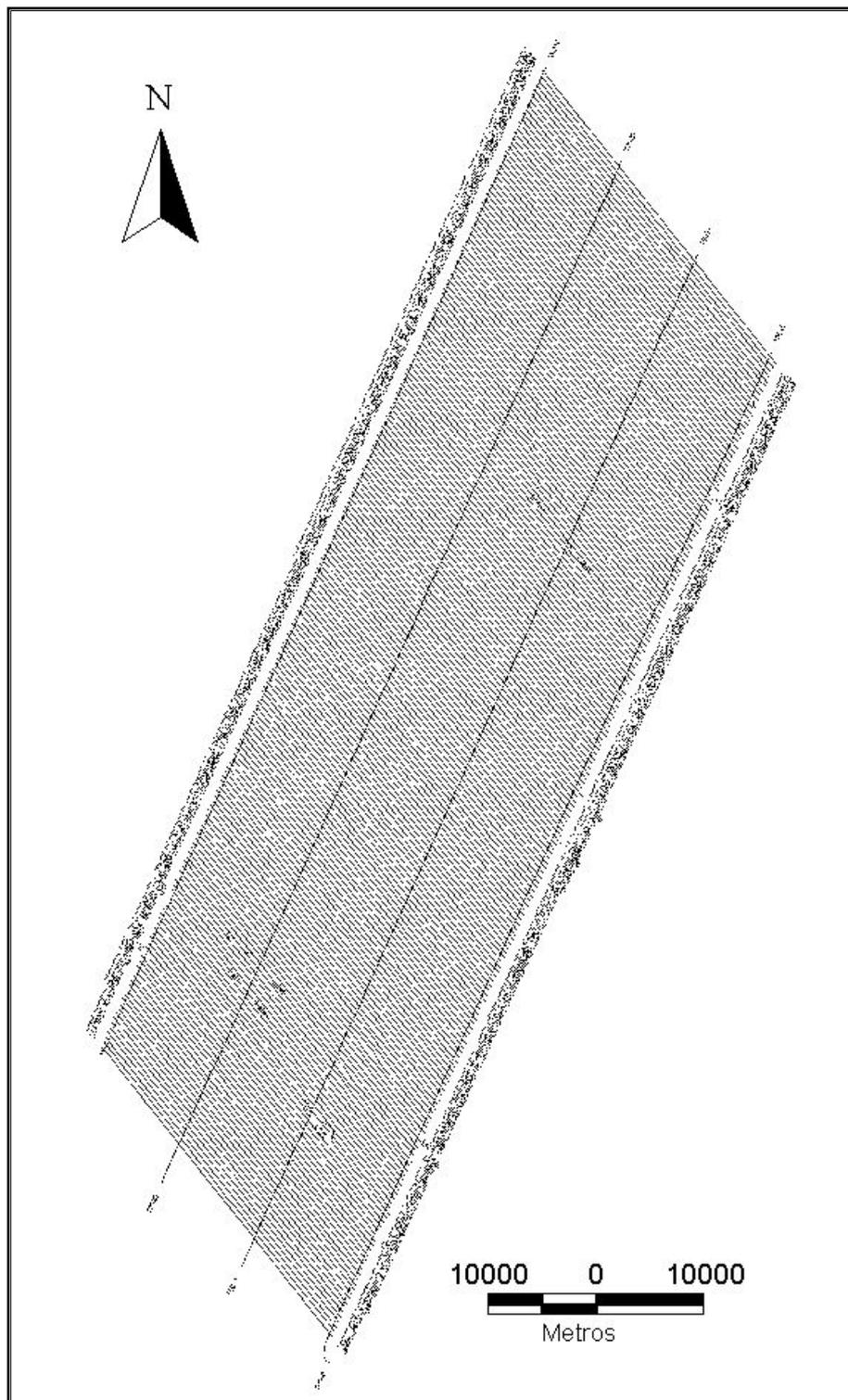


Figura 3.2: Mapa esquemático mostrando a orientação das linhas de vôo (N40W) e controle (N30E) do levantamento aerogeofísico da área em estudo.

3.1.1.2 DIFERENÇA QUARTA

A etapa realizada em seguida referiu-se a um controle adicional na qualidade dos dados e isso foi realizado utilizando-se a diferença quarta no rastreamento de valores anormais. Para calcular diferenças entre valores do campo anômalo foram especificadas quatro diferenças. Números de diferença produzem resultados localizados corretamente e números de diferença excedentes (incalculáveis) irão colocar o resultado $\frac{1}{2}$ elemento abaixo da posição atual e essa diferença quarta é eficiente para identificar ruídos nos dados (Figura 3.3). Com isso, obteve-se a derivada de quarta ordem de cada valor amostrado e apresentado na forma de perfil. Os perfis dos valores do campo anômalo e da diferença quarta foram representados juntos para análise de picos (*spikes*) (Figura 3.4).

Apesar dos dados serem provenientes de instrumentos de maior sensibilidade a rasterização dos dados mostrou uma sensível melhoria na qualidade da apresentação dos mesmos, porém não resolveram problemas como aos associados às características dos dados originais. Dados de algumas linhas mostraram picos inconsistentes e foram feitas correções através da diferença quarta, após a verificação de que os mesmos não prejudicariam a malha regular. As linhas de vôos que apresentaram problemas foram: 270, 272, 330, 331, 392, 520, 1481. Um exemplo dos problemas verificados nessas linhas pode ser visto na figura 3.4 (Linha 148).

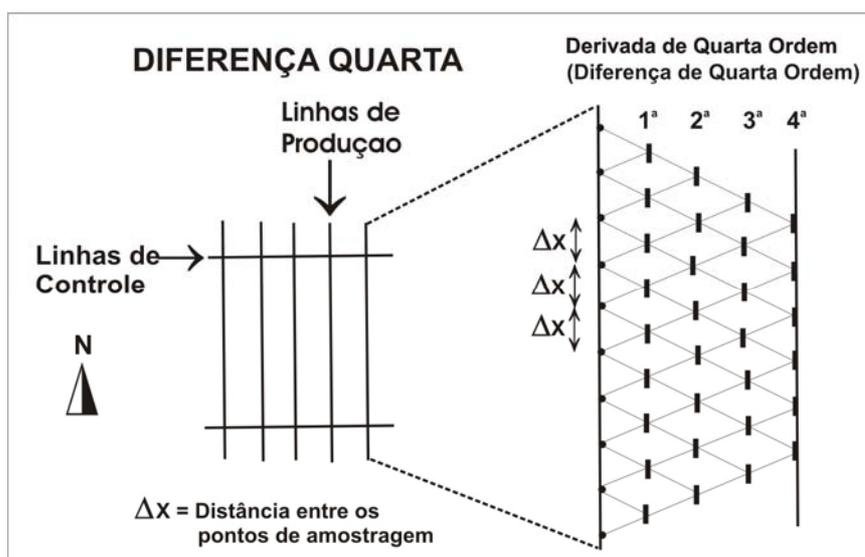


Figura 3.3: Esquema mostrando a forma da obtenção do controle de dados através da diferença quarta.

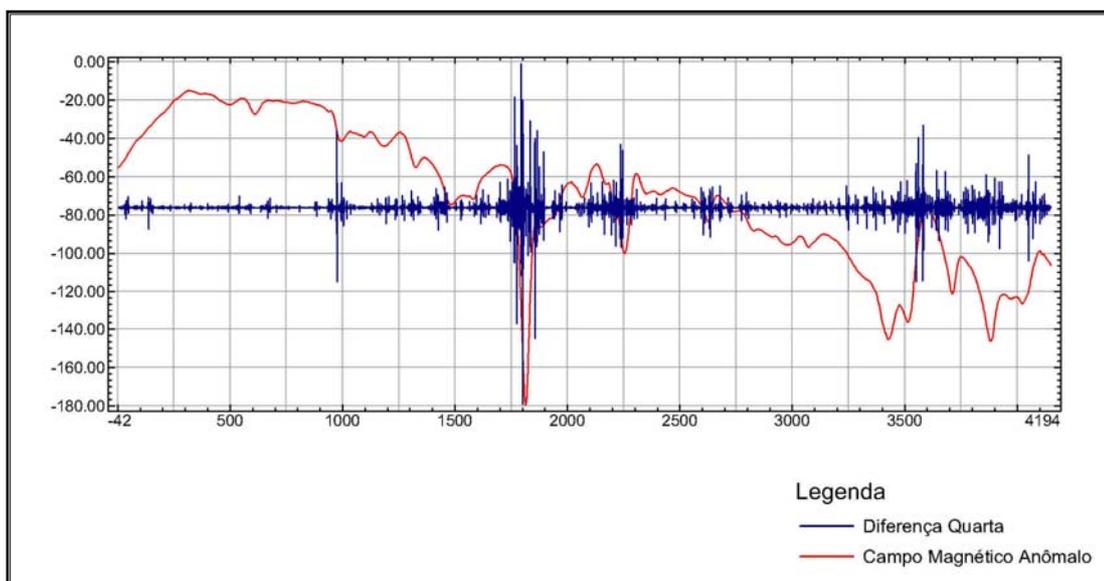


Figura 3.4: Perfil da linha 1481 mostrando os dados sem correção (linha vermelha) e respectiva diferença quarta (linha azul).

3.1.1.3 TRANSFORMAÇÃO DA MALHA ORIGINAL EM MALHA REGULAR

Dados aerogeofísicos prospectivos normalmente são realizados segundo um grau de uniformidade pré-definido, ao longo de linhas paralelas espaçadas de uma certa distância que apresentarão uma maior densidade de dados ao longo das linhas e com uma quantidade fixa de amostragem por área. Para mapas de contorno e apresentação em imagens de dados demandam a colocação dos pontos em malha regular.

O processo de confecção da malha regular se inicia com a avaliação tanto do tipo de distribuição espacial quanto da uniformidade dos dados. As distribuições mais regulares e mais uniformes permitem a geração de uma grade com um número maior de pontos em relação à densidade dos dados originais. Conseqüentemente, é necessário quantificar o grau de uniformidade da distribuição espacial original para se chegar à menor área a qual pode ser atribuída a célula.

Uma vez atribuído um valor para cada nó da malha, contornos podem ser gerados por interpolação entre os nós ou a malha pode ser diretamente apresentada como imagem. A vantagem dos valores estarem determinados em pontos localizados em nós de malha com distâncias iguais é a aplicação nos dados de vários tratamentos de duas dimensões como filtros bidimensionais, contornos e processamentos de imagens.

3.1.1.4 CÉLULA E MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO

A definição de uma célula de interpolação em dados aéreos deve-se escolher valores que estejam entre $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{8}$ do espaçamento médio entre as linhas de vôo. Isso objetiva evitar perdas de informação e recuperar a totalidade da frequência, com comprimento de onda igual a duas vezes à distância entre observações sucessivas (Vasconcelos *et al* 1994).

Para Gunn (1998), a resolução espacial não deve ser menor que $\frac{1}{5}$ do espaçamento entre as linhas de vôo, pois pode causar diversos problemas, tais como: o efeito de quebramento de anomalias estreitas, com direção de aproximadamente 45° das linhas de vôo. Outro problema está relacionado ao surgimento do fenômeno conhecido como falseamento (*aliasing*), em que as anomalias com comprimento de ondas menores do que as resoluções espaciais aparecem superpostas aos sinais medidos. Tem-se também à incorreta correlação entre as anomalias definidas nas linhas de vôo pelos processos interpolados, o que pode gerar falsos alinhamentos das anomalias.

Um fator preponderante no resultado da interpolação é o algoritmo usado na seleção dos dados em volta do ponto que está sendo estimado. Um algoritmo adequado deve honrar os valores de pontos originais ao mesmo tempo em que produz uma superfície contínua e suave. Devido a densidade de amostragem ao longo das linhas de vôo ser muito maior do que as das linhas de controle, filtros anti-falseamento (*anti-aliasing*) são geralmente aplicados ao longo das linhas de vôo para obter um conteúdo comparável de frequência espacial em ambas as direções (Luyendyk 1997). Os algoritmos utilizados com mais frequências são: bi-direcional, e krigagem.

O método bi-direcional é um algoritmo eficiente que explora a correlação linha a linha dos dados geofísicos, aplicando interpolação com *splines* cúbicos tanto ao longo como através da direção das linhas de vôo. Inicialmente, os dados são interpolados ao longo das linhas de vôo, em um intervalo igual ao espaçamento da célula definido para os dados e um filtro passa-baixa é aplicado para remover picos e prevenir o falseamento. Em seguida, esses valores são interpolados transversalmente à direção de vôo, com um espaçamento igual ao tamanho da célula. Esse método é indicado para interpolar dados que estejam em linhas aproximadamente paralelas e é rápido para dados distribuídos dessa forma e tende a intensificar tendências perpendiculares às direções das linhas de levantamento. Tem como vantagem à possibilidade de processar um

número ilimitado de dados e como desvantagem à impossibilidade de ser utilizado para dados com distribuição aleatória.

O método de curvatura mínima usa *splines* bi-dimensionais para ajustar dados de linha de vôo para uma malha regular. Ele gera uma superfície suavizada com os valores o mais próximo possível dos dados originais (Keckler 1994) e tem como base à adaptação de uma superfície de curvatura mínima aos dados pontuais, como se fosse uma placa flexível que determinasse o melhor encaixe aos valores. Ele tem a vantagem de ser rápido e eficiente para conjuntos de dados grandes, com mais de 1000 amostras.

O método de Krigagem baseia-se em geoestatística e é bastante flexível, podendo ser utilizado por quase todos os tipos de dados. Esse método faz a tentativa de expressar as tendências direcionais sugeridas pelos dados, evitando a formação de olhos de bois (*bull's-eyes*), podendo ser um método exato ou suavizado (Keckler 1994). A krigagem pode ser indicada para dados distribuídos em linha e dados com distribuição aleatória, porém é um método muito lento para conjuntos de dados muito grandes. Vários fatores compõem esse método: o modelo variograma, que mostra a correlação dos dados em função da distância (Geosoft 1995); o tipo de deriva, sem deriva, deriva linear ou quadrática; o efeito pepita com dados destoantes dos outros (Keckler 1994).

A escolha do método de interpolação para os dados magnéticos foi feita testando os vários métodos. Os testes foram feitos em toda a área de estudo, utilizando o programa OASIS MontajTM da Geosoft e o resultado é mostrado na figura: dados brutos e bi-direcional (3.5a), curvatura mínima (3.5b) e krigagem (3.5c). À primeira vista, os resultados são semelhantes e não podem ser avaliados ou comparados com facilidade de maneira visual, porém a figura 3.5d mostra que isso é possível no domínio de Fourier. Dentre os métodos testados, o bi-direcional mostrou o melhor resultado.

O Projeto Itabira-Ferros foi realizado com um espaçamento de 500 metros, ao avaliar os dados resultantes de diversas interpolações optou-se por uma célula de 250 metros de lado, após o micronivelamento esses dados foram re-interpolados com células de 50m de lado, onde se obteve uma melhor apresentação dos mesmos.

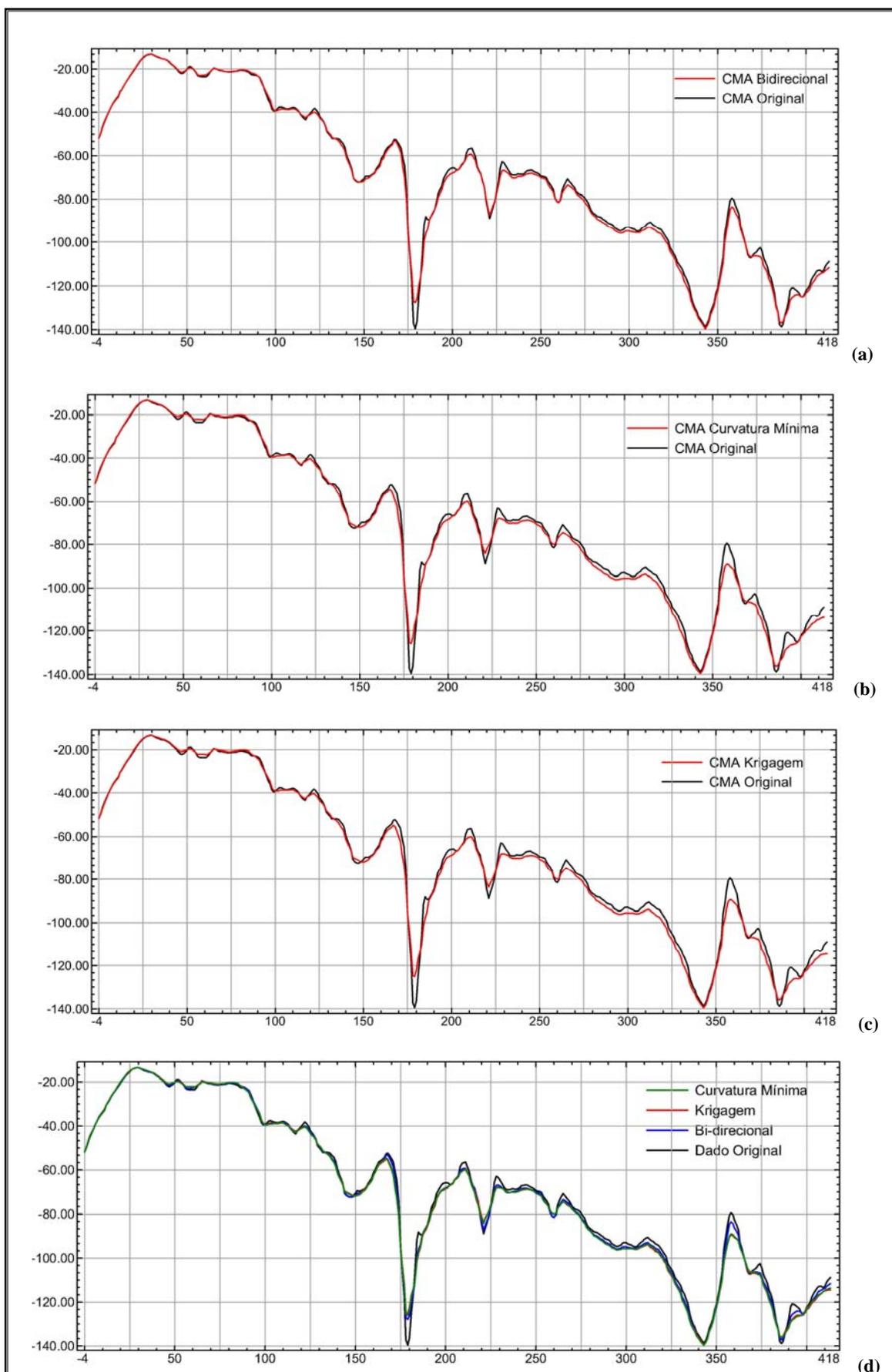


Figura 3.5: Perfil do campo magnético anômalo mostrando os métodos de interpolação: (a) original e bidirecional, (b) original e curvatura mínima, (c) original e krigagem e (d) os tres métodos de interpolação com os dados originais.

3.1.1.5 MICRONIVELAMENTO

O micronivelamento baseia-se na suposição de que erros residuais nos dados, após os procedimentos usuais de nivelamento, aparecem nos mapas como anomalias elipsoidais alongadas, segundo a direção das linhas de vôo. De modo característico, essas anomalias estão confinadas a uma linha e apresentam comprimentos de onda longitudinais maiores do que o espaçamento entre as linhas de controle e comprimentos de onda transversais de cerca de duas vezes o espaçamento entre as linhas de amostragem, além de possuírem valores que varia pouco, em torno de zero. Essas anomalias alongadas podem ser retiradas das malhas de valores interpolados por meio de filtragens unidimensionais aplicadas segundo as direções paralela e ortogonal às linhas de vôo (Minty 1991).

A vantagem de usar o micronivelamento está no fato de que essa técnica, em tese, não afeta o espectro de frequência dos dados e que, nem sempre o micronivelamento fornece resultados satisfatórios, tanto por limitações matemáticas dos filtros quanto pela natureza sutil dos erros residuais dentro de um conjunto de dados onde há grande variação de valores. Há também a incapacidade do micronivelamento distinguir entre anomalias reais que estejam paralelas às linhas de vôos e erros residuais que se deseja eliminar. Além disso, o micronivelamento foi desenvolvido para eliminar erros residuais e não desnivelamentos entre linhas ou grupo de linhas. Assim, se duas linhas adjacentes possuem valores médios semelhantes entre si, mas diferente do restante de um grupo, o micronivelamento poderá resolver os erros residuais entre essas linhas, mas não compensar o desnível entre essas duas linhas e as demais (Luyendyk 1997).

Rotinas desenvolvidas por Blum (1999) adaptadas de Minty (1991) foram utilizadas para a realização do micronivelamento. A técnica de Minty (1991) funciona da seguinte forma: aplica-se um filtro passa-baixa na direção do levantamento (malha A) e grava-se o resultado em uma segunda malha (malha B). Em seguida, usa-se um filtro passa-alta sobre a malha resultante da fase anterior, na direção perpendicular às linhas de vôo, armazenando-se o resultado em uma terceira malha (malha C). Com isso, a malha C obtida contém os erros residuais que se deseja retirar. O último passo consiste da subtração entre os valores da malha C da malha A, com o que se chega à malha dos valores corrigidos (malha D). A avaliação do resultado é feita visualmente, e a determinação dos valores de corte para os filtros passa-baixa e passa-alta é realizada por tentativa e erro.

Os dados de magnetometria apresentaram erros de nivelamentos, esses erros em geral são pequenos, porém Green (1983) ressalta que em muitos casos, eles podem possuir magnitudes maiores do que os efeitos das variações diurnas e para corrigir esses desnivelamentos foi necessário realizar o micronivelamento. De acordo com o Programa OASIS MontajTM o ideal para a realização de um bom micronivelamento as linhas de vôo teriam que ter direção N-S ou E-W, como a direção das linhas do Projeto Itabira-Ferros tem direção N40W, se fez necessário rotacionar os dados para a direção N-S, rotação esta efetuada no próprio *software* GEOSOFT 5.0 (Geosoft 1998).

No micronivelamento utilizou-se um comprimento de onda de 8.000 metros para a filtragem passa-baixa e 24.000 metros para o passa-alta. A figura 3.6 representa um perfil do campo magnético anômalo antes e após o micronivelamento e a figura 3.7a e b mostram as imagens do campo magnético anômalo antes e após o micronivelamento, respectivamente.

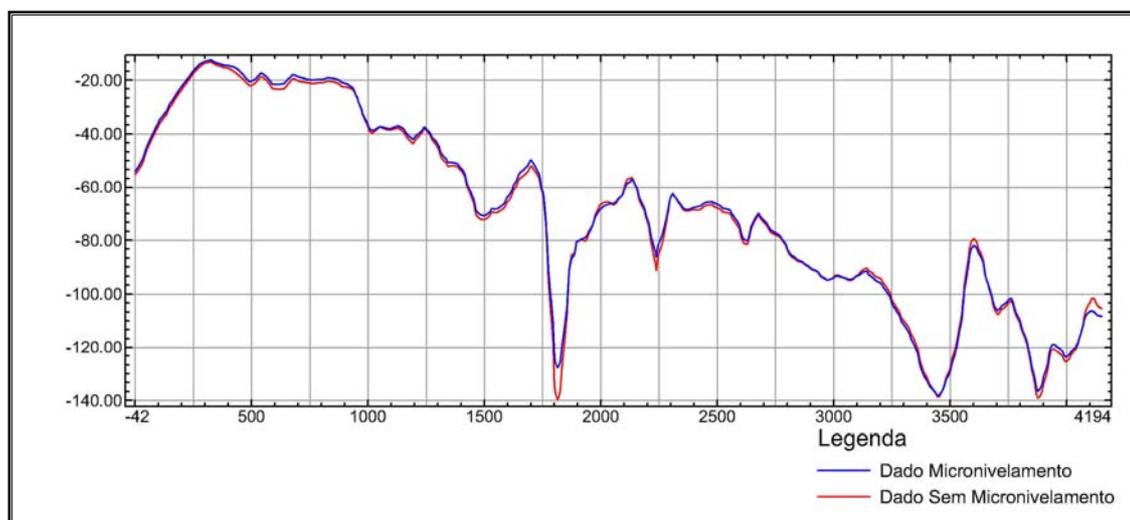


Figura 3.6: Perfil do campo magnético anômalo com os dados antes e após o micronivelamento da área estudada.

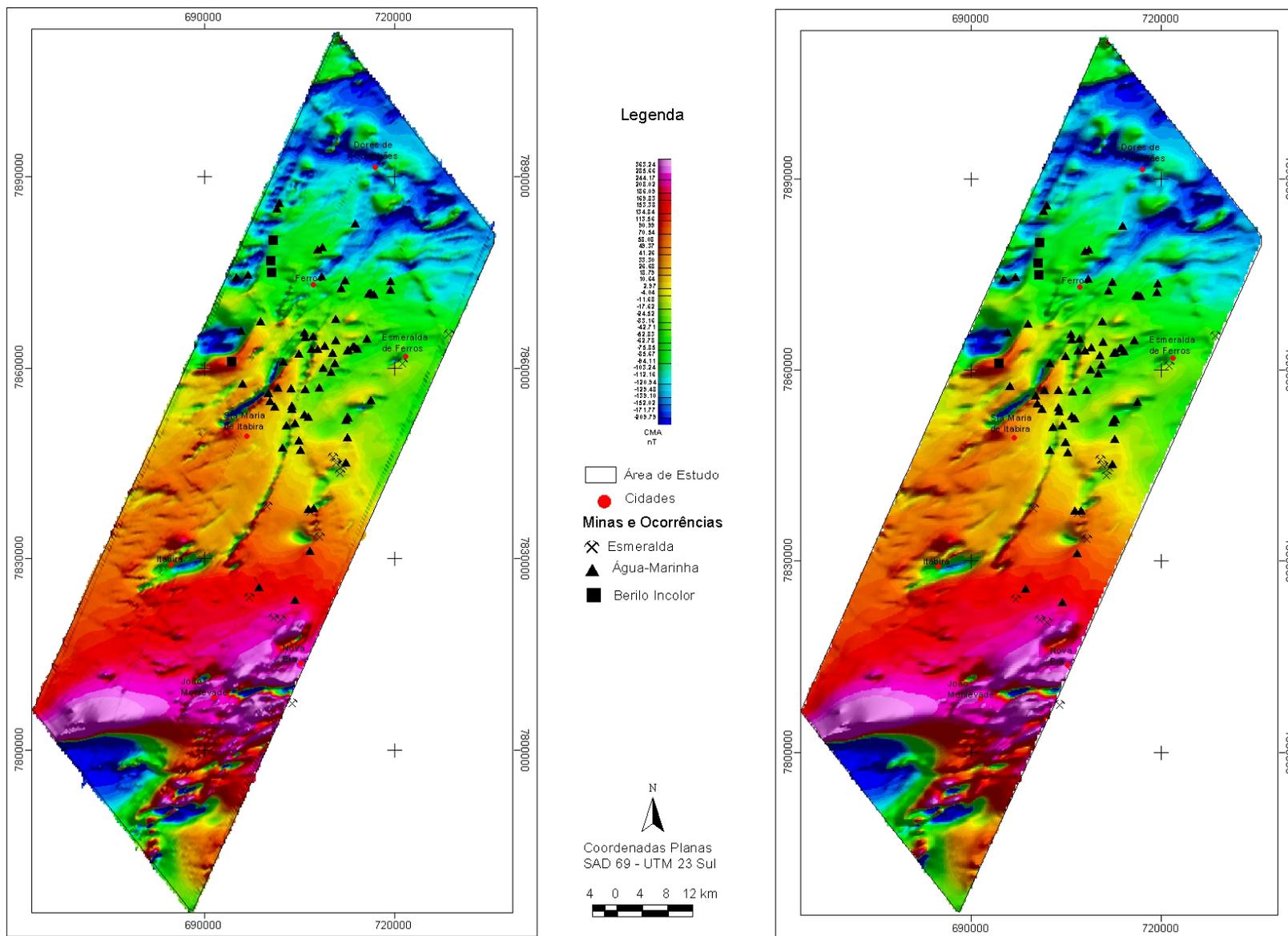


Figura 3.7: Imagem da intensidade do Campo Magnético Anômalo antes (A) e após (B) o micronivelamento.

3.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS

Com o objetivo de melhorar a qualidade dos dados, o processamento dos dados gamaespectrométricos para geração de imagens seguiu os mesmos procedimentos aplicados aos dados magnéticos. A metodologia utilizada nos dados gamaespectrométricos do Projeto Itabira-Ferros envolveu avaliação dos dados, interpolação e micronivelamento. A figura 3.8 mostra um desenho esquemático dos procedimentos realizados para os dados de gamaespectrometria.

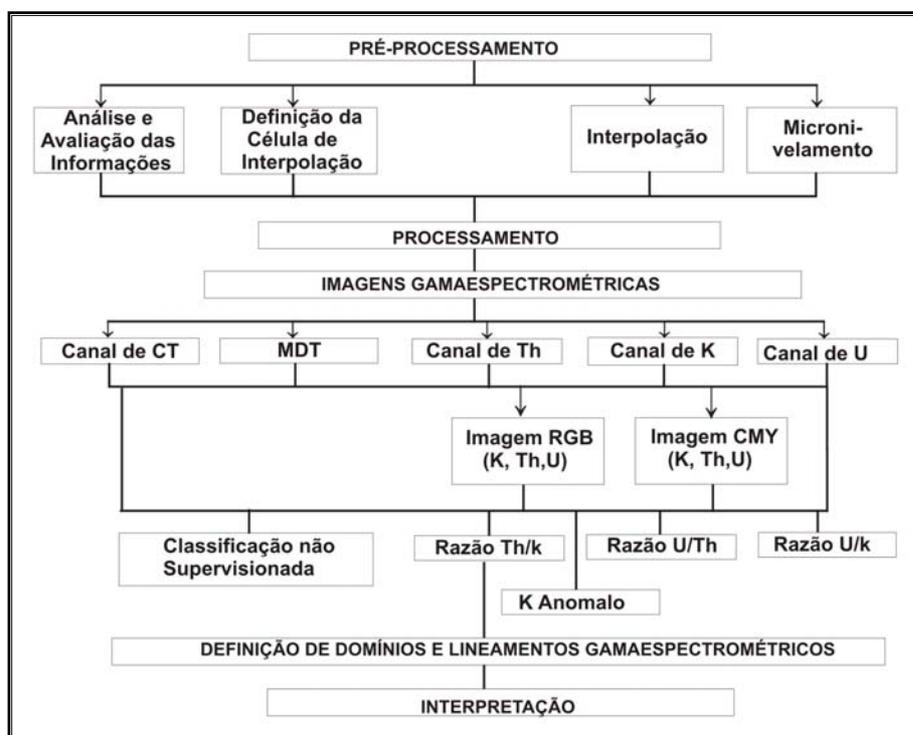


Figura 3.8: Esquema das principais integrações efetuadas para os dados gamaespectrométricos.

3.2.1 Avaliação dos Dados

O processamento dos dados gamaespectrométricos iniciou-se com a avaliação da qualidade dos dados. Ao analisar os dados do Projeto Itabira-Ferros observou-se que o padrão das linhas de vô como um todo não apresentou grandes problemas, com exceção de algumas linhas que se cruzaram (Figura 3.2), mostrando que a correção do desnivelamento não foi suficiente e partes dessas linhas foram retiradas para que os dados tivessem continuidades.

Uma avaliação detalhada dos dados gamaespectrométricos mostrou que os mesmos apresentavam concentrações negativas de radioelementos indicando que a correção atmosférica ou a calibração instrumental não foi totalmente efetiva. Esse problema foi resolvido com a adição a cada observação do valor correspondente ao menor valor negativo para um dado elemento. Desse modo, adicionou-se o valor de 0,01 a esse produto, resultando no valor mínimo de cada conjunto de observações de um dado rádio-elemento de 0,01.

3.2.2 Diferença Quarta

Como nos dados magnéticos, também foi realizado na gamaespectrometria a avaliação pela diferença quarta (ver Item 3.1.1.5) e observou-se que várias linhas mostraram picos inconsistentes e foram corrigidos, após a verificação de que os mesmos não prejudicariam a malha regular. As linhas de vôos que apresentaram problemas foram: 270, 272, 330, 331, 392, 520, 1481 e 1970 (Figura 3.9).

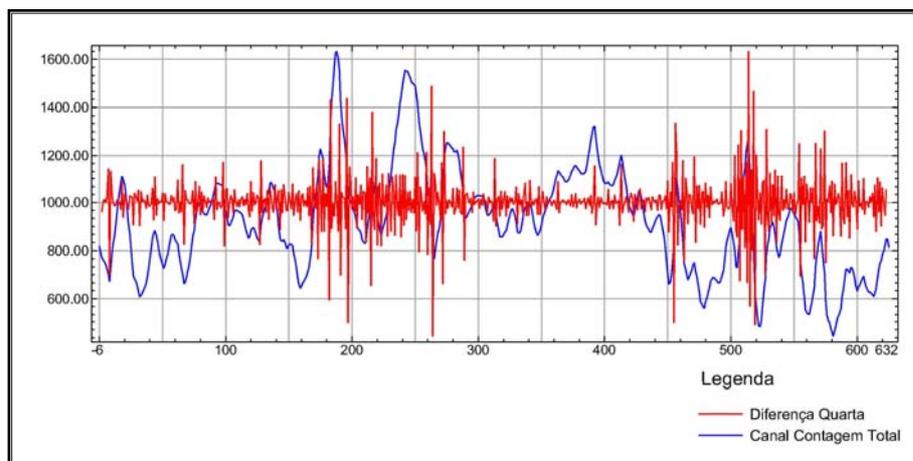


Figura 3.9: Perfil da linha 1970:0 analisado pela diferença quarta para o canal de contagem total.

3.2.3 Interpolação e Micronivelamento

A escolha do método de interpolação para os dados gamaespectrométricos foi feita testando os métodos de Curvatura Mínima, Bi-direcional e Krigagem. Os testes foram feitos em toda a área de estudo, utilizando o programa OÁSIS MontajTM da Geosoft e o resultado é mostrado na figura 3.10. Dentre as diversas técnicas de interpolação apresentadas (item 3.1.1.5), o método de interpolação por curvatura

mínima foi o selecionado porque forneceu o melhor resultado e por ser um método rápido e eficiente para esses tipos de dados. Os dados foram então transformados em malhas regulares de 250 metros de lado e, posteriormente, re-interpolados com célula de 50 metros de lado.

Para o micronivelamento foram testados diversos valores de corte para os filtros passa-alta e passa-baixa, até obter o melhor resultado. Ao final se obteve melhores resultados com filtros definidos com comprimentos de ondas para os diversos canais em 24.000 metros para o passa-alta e 8.000 metros para o passa-baixa: desse modo, foi possível eliminar boa parte dos ruídos, melhorando, com isso, a resolução espacial e a capacidade dos mapas de prover informações. A figura 3.11 mostra o canal de urânio antes e após o micronivelamento para os dados de gamaespectrometria da região de Itabira-Ferros.

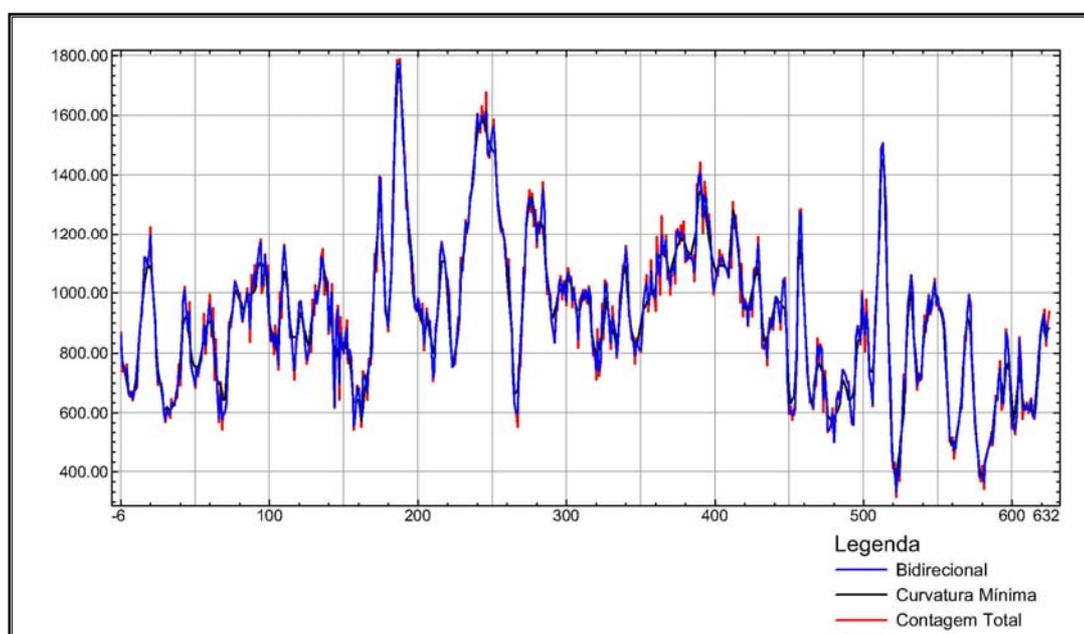


Figura 3.10: Perfil da imagem de contagem total mostrando os métodos de interpolação curvatura mínima e bi-direcional testados nos dados gamaespectrométricos.

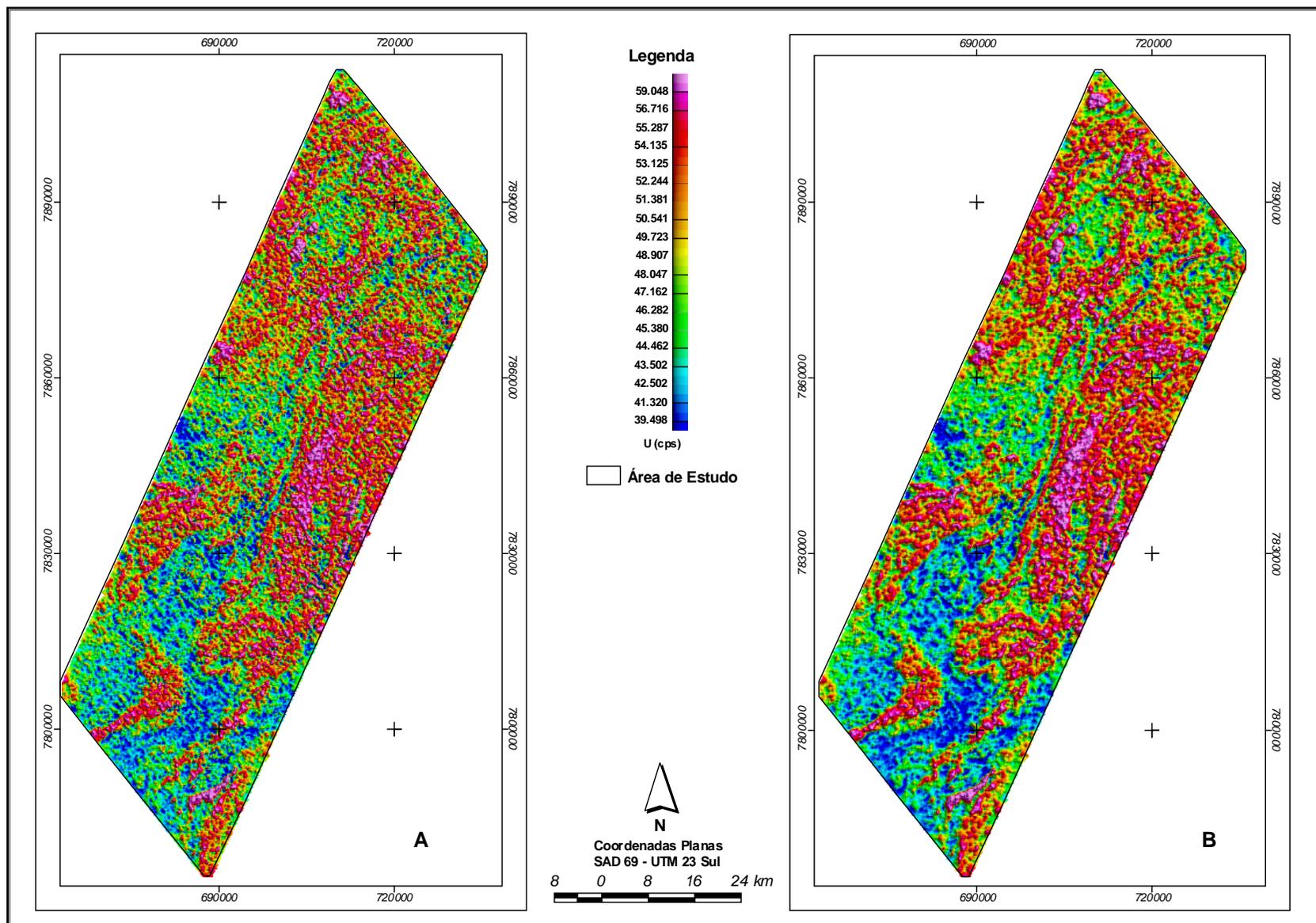


Figura 3.11: Imagem do canal de urânio antes (A) e após o micronivelamento (B).

3.2.4 Processamento das Imagens Magnéticas e Gamaespectrométricas

A partir da correção e micronivelamento dos dados originais, foram gerados os temas usuais para a interpretação magnética e gamaespectrométrica. Além dessas imagens foram gerados novos produtos, importantes na qualificação dos resultados (Anexos 1 e 2): Ressalte-se que as imagens de gamaespectrometria encontram-se em contagem por segundo (cps).

- ❖ Geração da imagem do modelo digital de elevação de terreno (MDET);
- ❖ Geração das imagens dos canais de Tório, Urânio e Potássio, individualmente e sobre o modelo digital de elevação de terreno;
- ❖ Geração da imagem de Contagem Total;
- ❖ Geração das imagens das razões U/Th, U/K e Th/K;
- ❖ Geração das imagens compostas em falsa cor RGB (K-U-Th) e CMY (K-Th-U) isoladamente e sobre o modelo digital de elevação de terreno (MDET);
- ❖ Geração de imagens Th, K e U normalizados a partir de suas malhas equivalentes;
- ❖ Geração da imagem com enriquecimento em potássio;
- ❖ Filtro de Amplitude;

Para se ter uma melhor qualidade de apresentação dos dados foram geradas imagens sombreadas e iluminadas. As imagens iluminadas permitem em geral, mostrar os aspectos estruturais, bem como serve para monitorar a qualidade dos resultados dos testes de micronivelamento, permitindo com isso, identificar os artefatos com facilidade. Essas imagens foram iluminadas com uma inclinação de 45 graus em relação ao terreno. As imagens foram iluminadas a cada 45 graus em direção a declinação (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°) e teve por finalidade verificar os aspectos de relevo e as feições lineares. As imagens com melhor resposta foram aquelas iluminadas a 45°. Desta forma, foram elaboradas imagens para os quatro canais na direção de 45° na escala de 1:500.000.

Interpretação dos Dados Gamaespectrométricos

Bendito o homem que confia no SENHOR e cuja esperança é o SENHOR (Jr 17:7).

4.1 APRESENTAÇÃO

A interpretação de levantamentos gamaespectrométricos deve ser efetuada na direção da aplicação do conhecimento sobre os processos que controlam a distribuição dos rádioelementos em rochas e solos para o realce e processamento dos dados. Esse processo de interpretação é apoiado pelo uso de sistemas de informações geográficas com atributos de processamento de imagens, permitindo a integração digital de dados gamaespectrométricos com outros tipos de dados.

4.2 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS

Os temas gerados e analisados compreenderam as seguintes etapas, resumidamente:

- ❖ **Análise da imagem do modelo digital de elevação de terreno (MDT);**
- ❖ **Análise das imagens dos canais de tório, urânio e potássio, individualmente e sobre o modelo digital de elevação de terreno com o intuito de estudar a influência do relevo sobre os dados;**
- ❖ **Análise do canal de contagem total para a definição de grandes domínios gamaespectrométricos, bem como a análise da contribuição relativa de cada um dos canais individuais;**
- ❖ **Uso das imagens das razões U/Th, U/K e Th/K na análise da sua correlação com os diversos domínios gamaespectrométricos e com as regiões onde estão mapeadas as mineralizações da área;**
- ❖ **Uso das imagens compostas RGB (K-U-Th) e CMY (K-U-Th) isoladamente e sobre o modelo digital de elevação de terreno (MDT) para definir unidades e/ou domínios com assinaturas gamaespectrométricas semelhantes;**
- ❖ **Análise de imagens Th, K e U normalizados;**
- ❖ **Análise da imagem com enriquecimento em potássio;**

- ❖ **Análise da imagem de filtro de amplitude;**
- ❖ **Mapa de interpretação das unidades e estruturas gamaespectrométricas;**

A interpretação qualitativa conjunta de todas as imagens gamaespectrométricas geradas para o projeto foi efetuada em ambiente Sistema de Informações Geográficas (SIG) e teve por fim separar as diversas unidades radiométricas presentes na área de estudo. A seguir é dada uma descrição de cada imagem utilizada no presente estudo (ver Anexo A.2).

4.2.1 Modelo Digital de Elevação de Terreno

A análise das respostas gamaespectrométricas mostrou que o relevo topográfico do modelo digital de elevação de terreno (Figura 4.1) influencia as interpretações das respostas em mapa. A topografia mais elevada, morros e platôs, partes magentas do mapa, normalmente tende a concentrar o elemento tório, enquanto que o potássio tende a concentrar nas encostas. Já nos vales e leitos dos rios tem-se uma contagem radiométrica mais baixa, com concentrações, principalmente de potássio e urânio, devido à mobilidade desses dois elementos.

4.2.2 Tório

A imagem do canal de tório (Figura 4.2) mostra a pouca mobilidade desse elemento. Através dessa imagem foi possível selecionar zonas ou unidades que apresentam altas concentrações de tório.

O uso da imagem de tório sobreposta ao modelo digital de elevação de terreno da área (Anexo A.2.6b) serviu como instrumento de avaliação do comportamento desse rádio-elemento com relação ao terreno e, por conseguinte, no auxílio da caracterização das diversas unidades gamaespectrométricas. A análise dessa figura mostra que as maiores concentrações de tório guardam estreita relação com as áreas de topografia mais elevada. Na parte central da área tem uma estrutura em forma de sigmóide que mostra baixas concentrações desse elemento. Na porção centro-leste da área há uma estrutura levemente arqueada com alta concentração de tório nas partes mais altas de sua topografia.

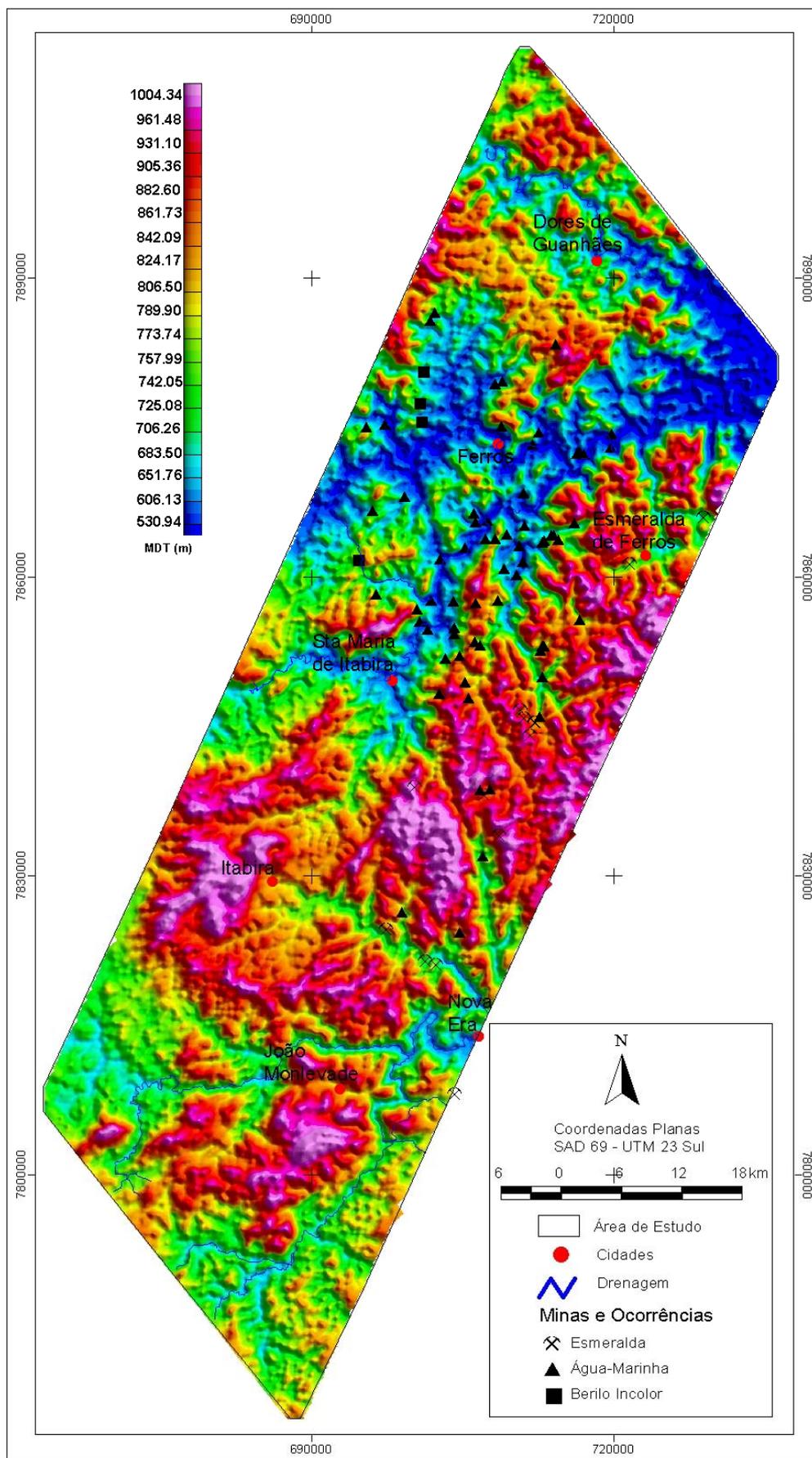


Figura 4.1: Imagem do Modelo Digital de Elevação de Terreno (MDT).

Já na porção sul, há alguns platôs com concentrações elevadas de tório, porém, predomina uma baixa concentração desse elemento nessa região. Podem ser extraídos desse canal lineamentos que se orientam, principalmente, na direção E-W (80-100°Az) e NW-SE (N30°-50°W). Outras direções foram observadas, porém com menor ocorrência. Lineamentos NE-SW são também comuns nesta região e atravessam grande parte da região norte e central da área. Já na região sul predominam os lineamentos de direção WSW-ESE.

4.2.3 Potássio

A imagem do canal de potássio (Figura 4.3) mostra áreas com concentração anômala do potássio, observadas principalmente nas porções centro-oeste e sudoeste da área. Ele mostra também um comportamento diferenciado das outras imagens e revela que grande parte desse elemento pode ter sido lixiviado.

A imagem do canal de potássio sobreposta ao modelo digital de elevação de terreno (Anexo A.2.7b) mostrou que as maiores concentrações desse radioelemento encontram-se nas encostas dos platôs. A presença de moderadas concentrações de potássio em regiões com drenagem mostram que esse elemento sofreu lixiviação, como observado anteriormente. Sua imagem mostra, também, lineamentos de direção NE-SW cortando toda a região norte e continuando na porção central da área. A presença de feições lineares de direção E-W também são muito comuns.

4.2.4 Urânio

O canal de urânio foi aquele que representou o maior desafio em se obter uma imagem espacial coerente de suas respostas e assinaturas possivelmente devido a sua alta mobilidade e o baixo teor deste elemento em rochas da crosta terrestre. Concentrações mais elevadas desse radioelemento são observadas nos platôs da área (porções sul, centro-oeste, centro-leste e NNW da área; Figura 4.4 e Anexo A.2.8). A estrutura em forma de sigmóide da parte central da área mostra concentrações elevadas desse elemento. A estrutura levemente arqueada da área centro-leste também mostra concentração elevada de urânio, como observado para a imagem de tório, porém com concentrações mais baixas do que aquele. Já na porção sul, há alguns platôs com concentrações mais elevadas de urânio, porém predomina uma baixa concentração de urânio.

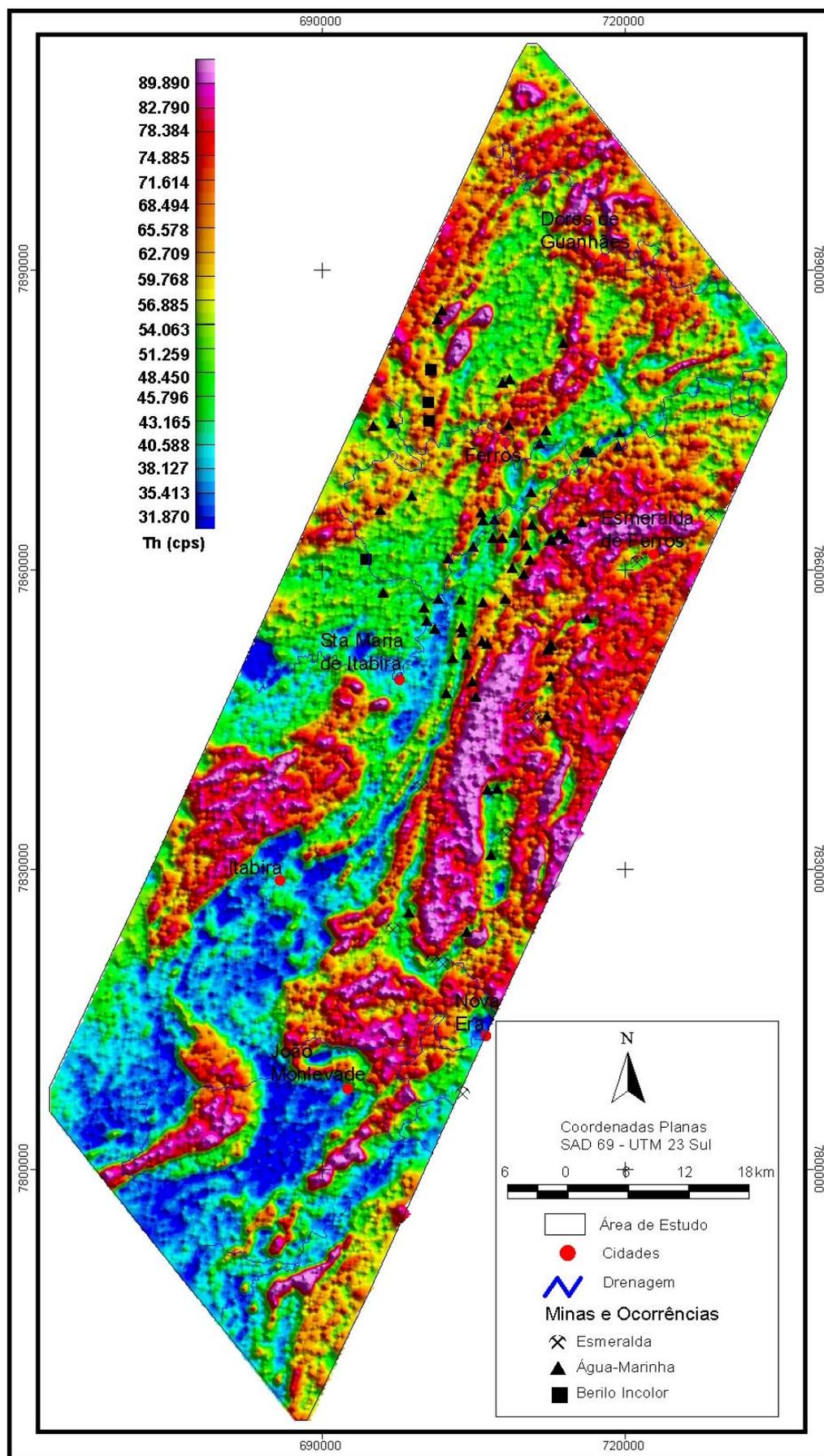


Figura 4.2: Imagem do canal de Tório.

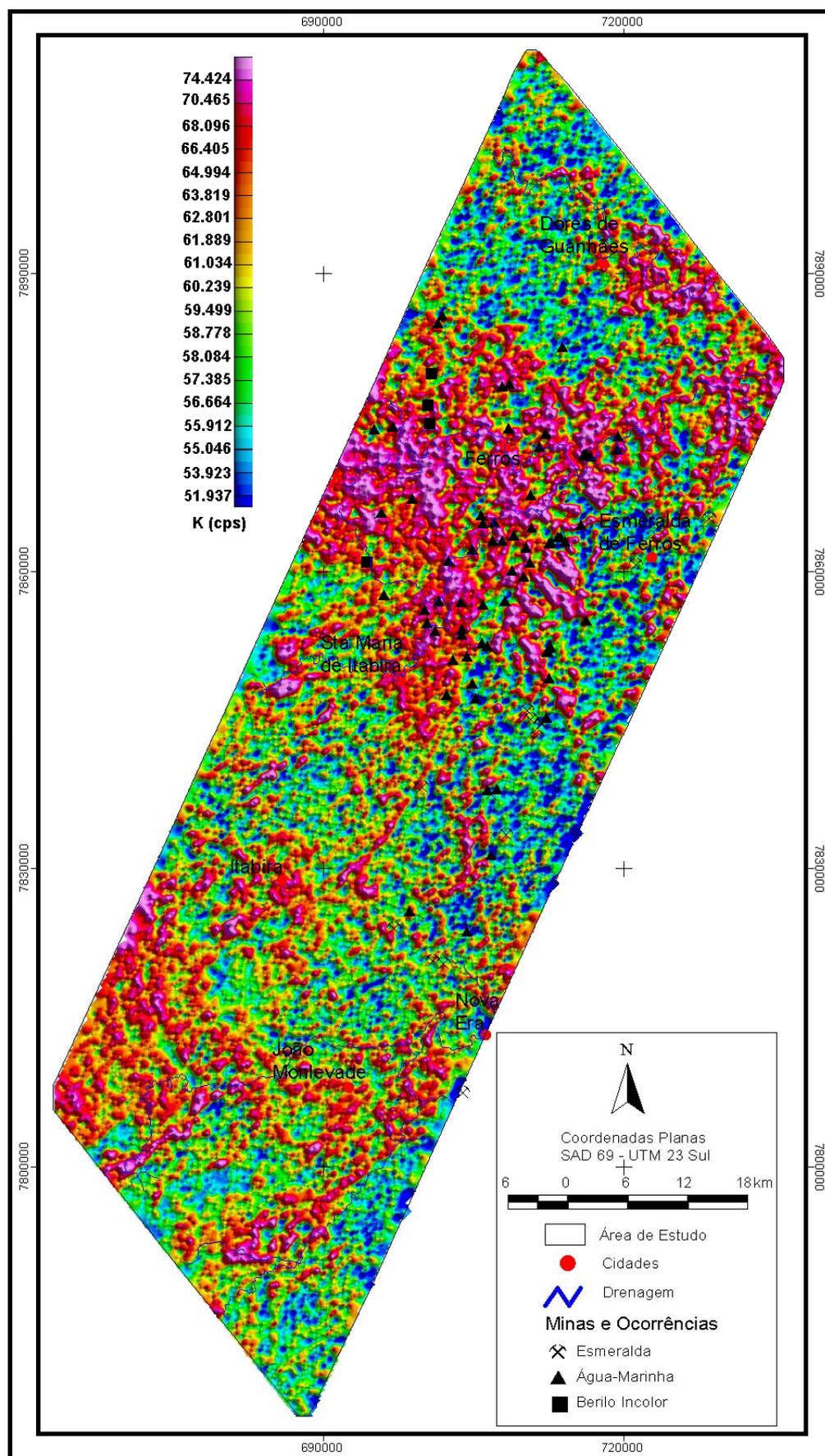


Figura 4.3: Imagem do canal de Potássio.

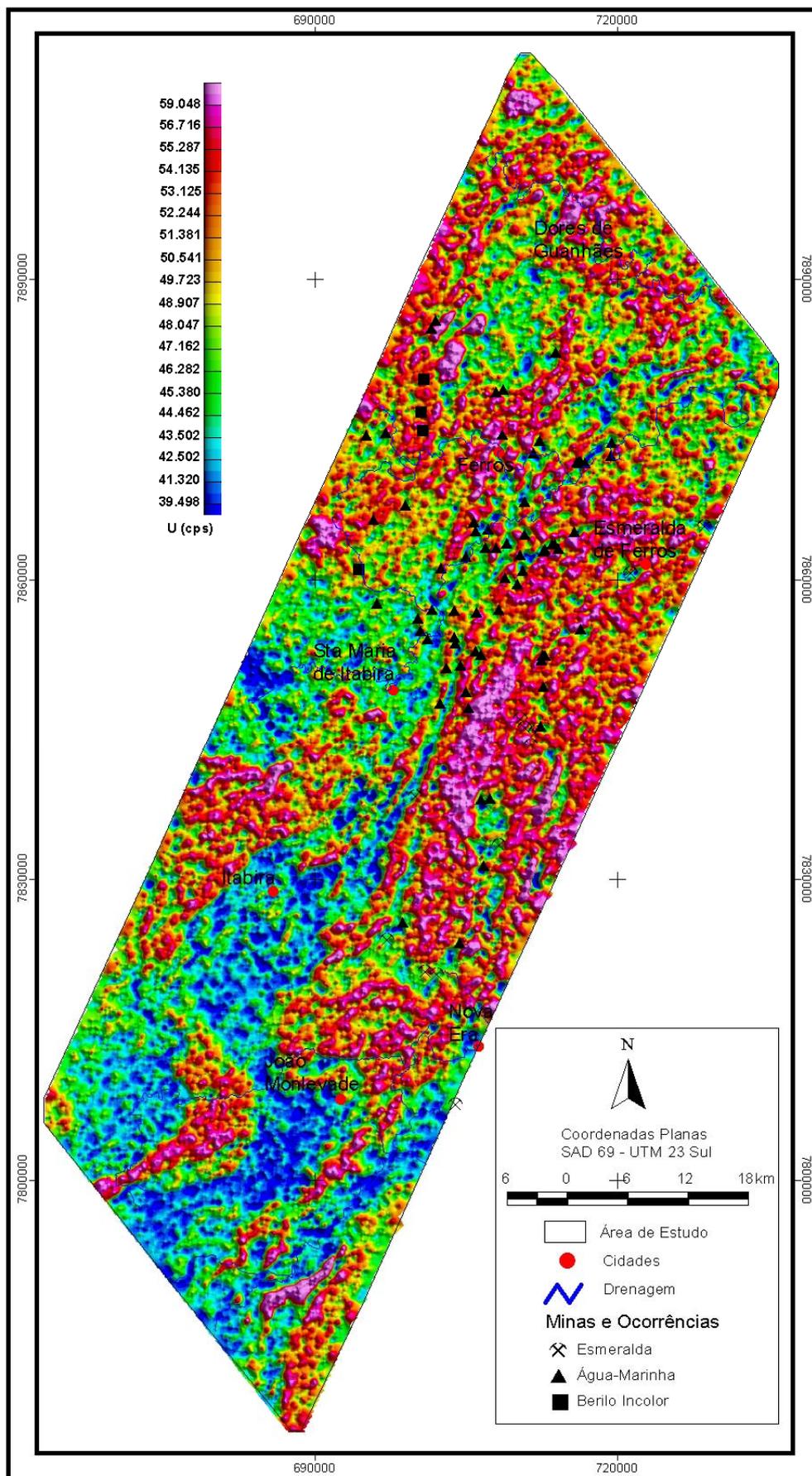


Figura 4.4: Imagem do canal de Urânio.

4.2.5 Contagem Total

A interpretação da imagem de contagem total (Figura 4.5) possibilitou a definição de um arcabouço gamaespectrométrico regional para a área (Figura 4.6). Possibilita fazer uma análise conjunta das discriminações para que se tenha uma idéia do que efetivamente contribui na formação do relevo gamaespectrométrico retratado neste canal. Nela também é possível estudar os lineamentos que, em maioria, representam contatos entre as grandes unidades. Outras regiões aparecem como áreas anômalas, com direção NE-SW. O arcabouço gamaespectrométrico definido para a área resultou em quatro grandes domínios básicos. Os domínios podem ser observados na figura 4.6 e foram assim sumarizados:

- Ct1:** Caracterizado por uma concentração variando de alta a muito alta (cor magenta) na assinatura deste canal, principalmente nos platôs e encostas da área e se deve às contribuições de tório e urânio (Figura 4.2 e 4.4, respectivamente).
- Ct2:** Caracteriza-se por contagem média, é representado pela coloração amarela e ocorre bordejando o domínio gamaespectrométrico Ct3. Esse domínio representa as encostas dos platôs e as áreas topograficamente mais baixas.
- Ct3:** Esse domínio é composto por concentração variando de média-baixa (cor verde) e tem grande extensão em área, representando em topografia diversos tipos de unidades radiométricas, principalmente as dos vales.
- Ct4:** É caracterizado por concentrações baixas (cor azul) e tem grande representatividade em área, ocorrendo exclusivamente nas áreas de topografia mais baixa, representando todo o relevo gamaespectrométrico de topografia rebaixada da mesma, como mostra a figura 4.1. Esse domínio encontra-se associado tanto com o domínio Ct2 quanto com o Ct3.

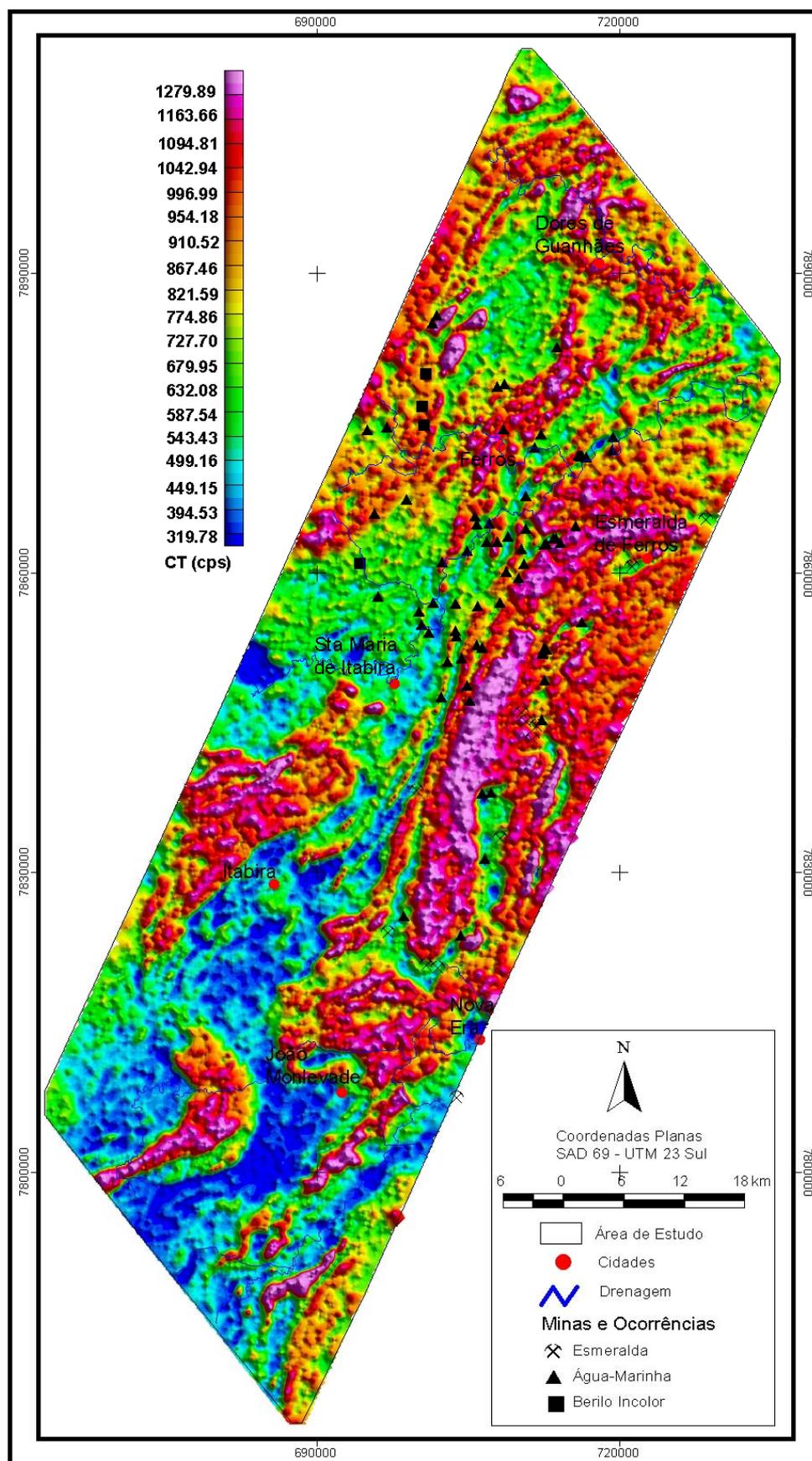


Figura 4.5: Imagem do canal de Contagem Total.

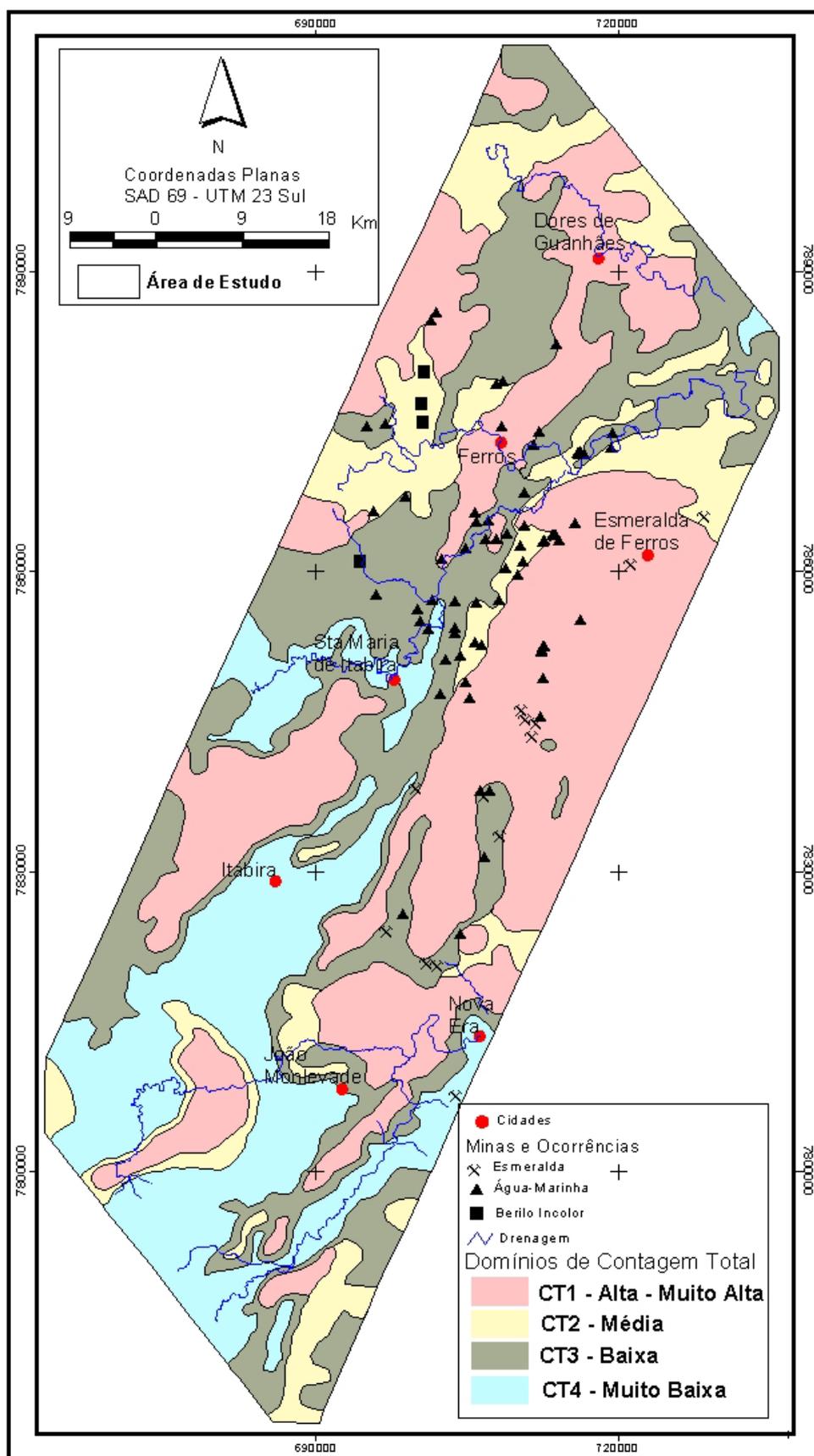


Figura 4.6: Mapa dos domínios gamaespectrométricos retirados a partir da imagem de contagem total. Com contribuições adicionais das demais imagens de gamaespectrometria. O domínio CT1 representam aquelas cotas topográficas mais elevadas, em torno de 1.000 metros. O domínio CT2 tem cota média de 800 metros, enquanto que o CT3 tem media 700 metros e o CT4 500 metros.

4.2.6 Imagens Ternárias (RGB E CMY)

Foram confeccionados dois tipos de imagens ternárias, composições RGB e CMY. Nos dois casos, cada um dos três canais gamaespectrométricos, K, U e Th foram atribuídos a um canal de cor primária, onde na imagem formada, cada pixel reproduz a tonalidade de cor que reflete os valores relativos de intensidade de radiação gama entre os três canais componentes.

Para a composição RGB foi atribuído ao canal de potássio a cor vermelha, ao canal de tório, o verde, e ao de urânio, o azul. Já no CMY, o potássio corresponde ao ciano, o tório ao magenta e ao urânio, o amarelo. Essas imagens foram utilizadas para a separação das unidades gamaespectrométricas da área estudada. A composição RGB é mais eficiente para revelar nuances em unidades com altas contagens nos canais gamaespectrométricos, enquanto que a composição CMY diferencia melhor as unidades de baixas contagens, e de modo alternado utilizaram-se as duas imagens.

As imagens ternárias se mostraram excelentes discriminadores gamaespectrométricos dentre as técnicas utilizadas. A combinação dos três elementos em apenas um mapa permitiu a distinção de variações internas das grandes unidades definidas no mapa de contagem total. A interpretação envolveu a análise visual das imagens e a partir dessas foram produzidos os mapas de estruturas e domínios gamaespectrométricos, e a integração dos dois (Figuras 4.7 e 4.8).

Essas imagens foram sobrepostas ao modelo digital de elevação de terreno (Anexos A.2.9b e A.2.10b, respectivamente), isso porque tais sobreposições emprestam mais definições às unidades gamaespectrométricas e mais subsídios à separação de unidades que mapeiam diferentes tipos de solos. O uso das imagens RGB e CMY sobrepostas ao MDT também serviu para avaliação do comportamento dos rádio-elementos com relação à topografia do terreno e, por conseguinte, na caracterização das diversas unidades gamaespectrométricas.

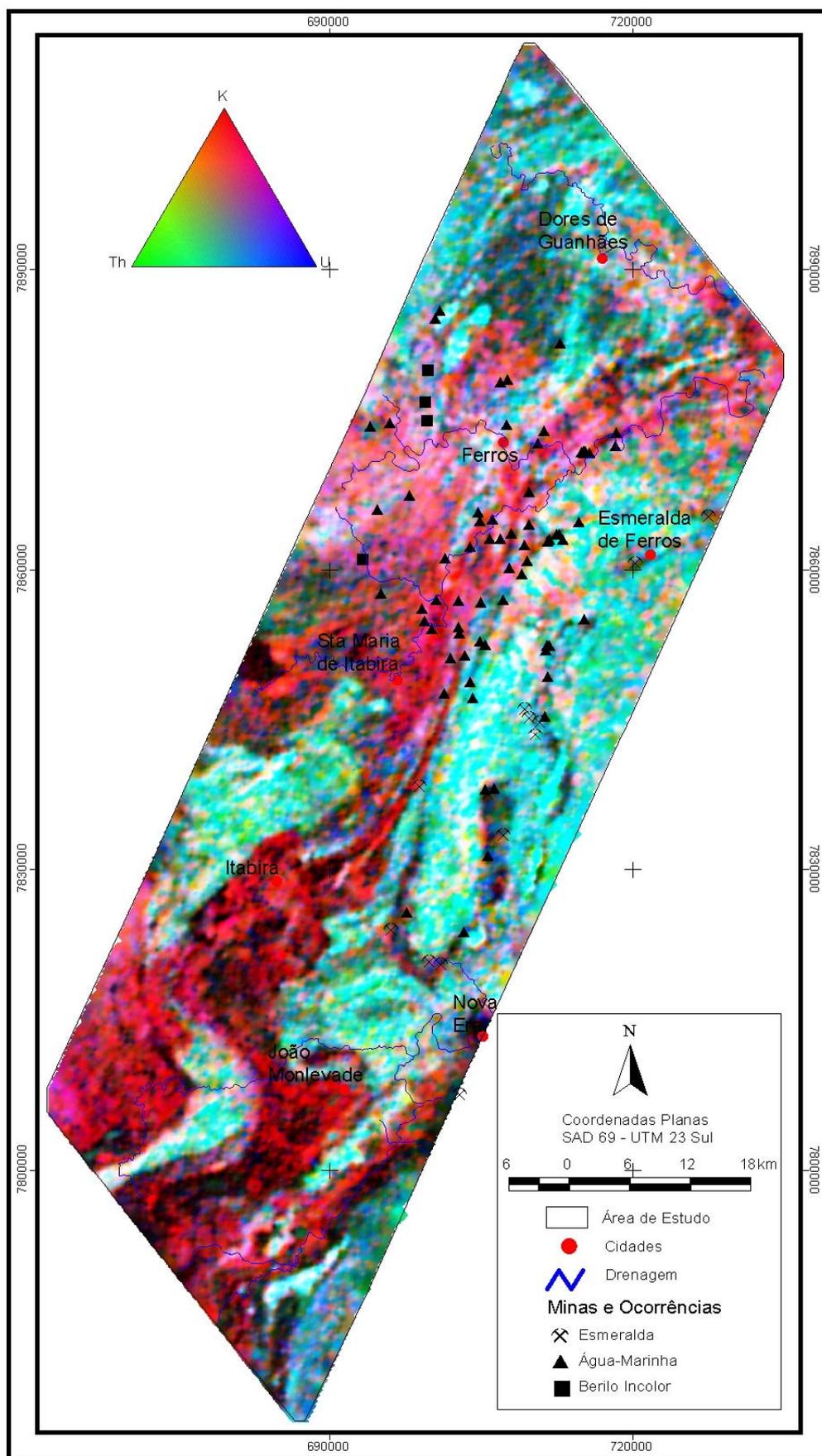


Figura 4.7: Imagem da Composição em falsa cor RGB (K-Th-U).

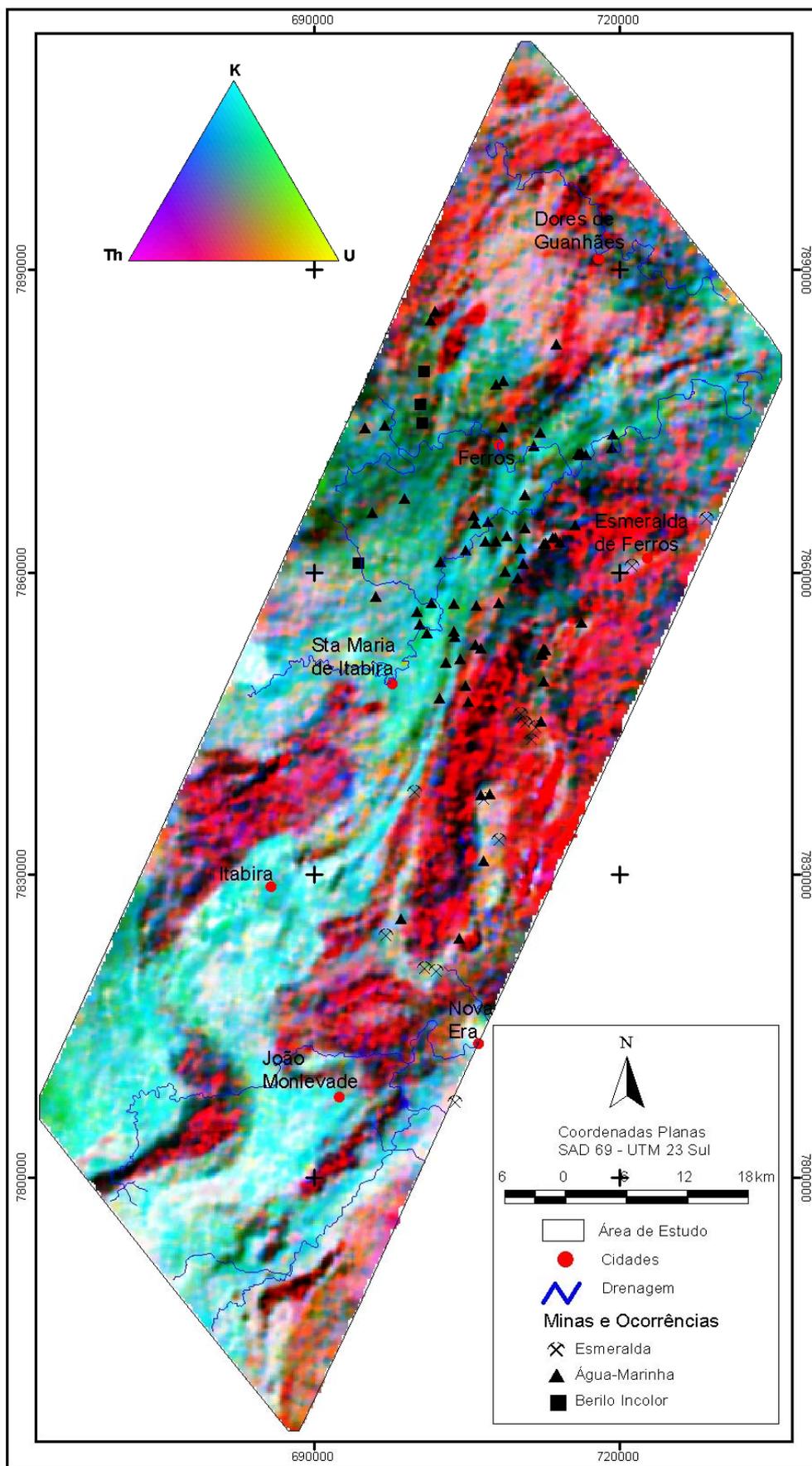


Figura 4.8: Imagem da Composição em falsa cor CMY (K-Th-U).

4.2.7 Razões Th/K, U/K e U/Th

As imagens das razões Th/K, U/K e U/Th podem ser vistas nas figuras 4.9 a 4.11 e suas interpretações são feitas a seguir:

4.2.7.1 RAZÃO TH/K

A razão entre as concentrações de tório e potássio tende a mostrar zonas em que ocorreu concentração ou empobrecimento de potássio, sem, contudo, ter havido enriquecimento em tório. A imagem da razão Th/K da área pesquisada (Figura 4.9) possibilitou interpretar a distribuição do potássio relacionado a possíveis zonas de alteração hidrotermal.

A área caracteriza-se por valores variados de concentrações dessa razão. As áreas onde o potássio é mais elevado apresentam valores mais baixos dessa razão e encontra-se em sua maioria associada a regiões de topografia mais baixa, como os vales e as drenagens. As áreas de concentração alta da razão Th/K encontram-se associadas aos platôs de toda a área. Os valores moderados são observados no extremo sul da área e as concentrações médias-baixas (verde) e baixas (azul) ocorre no restante da área.

Três conjuntos de estruturas de grande porte podem ser observados na região. O primeiro conjunto tem orientação NW-SE, um segundo conjunto de lineamentos aproximadamente E-W e um terceiro NE-SW.

4.2.7.2 RAZÃO U/K

A imagem U/K (Figura 4.10) propiciou uma boa discriminação de litotipos, marcando inclusive variações composicionais internas de algumas unidades. As áreas de topografia mais baixa, vales e drenagens, caracterizam-se por uma concentração baixa a média-baixa dessa razão. As áreas topograficamente mais altas, platôs, mostram enriquecimentos elevados de U/K.

O comportamento estrutural nessa imagem é similar ao observado para os canais individuais, com as orientações NW-SE, porém na região central há feições lineares que adentram de forma curvilínea para a região NE, cortando as unidades dessa região. Os corpos que ocorrem nessa região mostram feições curvilíneas que delinham perfeitamente as suas bordas mostrando uma espécie de deslocamento do mesmo.

4.2.7.3 RAZÃO U/Th

A razão U/Th (Figura 4.11) permitiu a identificação das unidades delimitadas no mapa de contagem total, confirmando também empobrecimento do potássio nas regiões de platôs, bem como pode se perceber que essas rochas mostram variações composicionais significativas, melhor definidas devido ao contraste que apresentam. As unidades do embasamento também podem ser identificadas, sendo separadas por concentrações diferentes dos elementos.

Uma grande faixa, com direção NE-SW mostra um enriquecimento elevado da razão U/Th, além da porção sul da área. Concentrações moderadas são observadas na porção centro-oeste e no extremo norte. Uma grande feição em forma de U é observada no centro-leste da área e mostra uma concentração moderada de U/Th. No restante da área a concentração de U/Th varia de média-baixa a baixa.

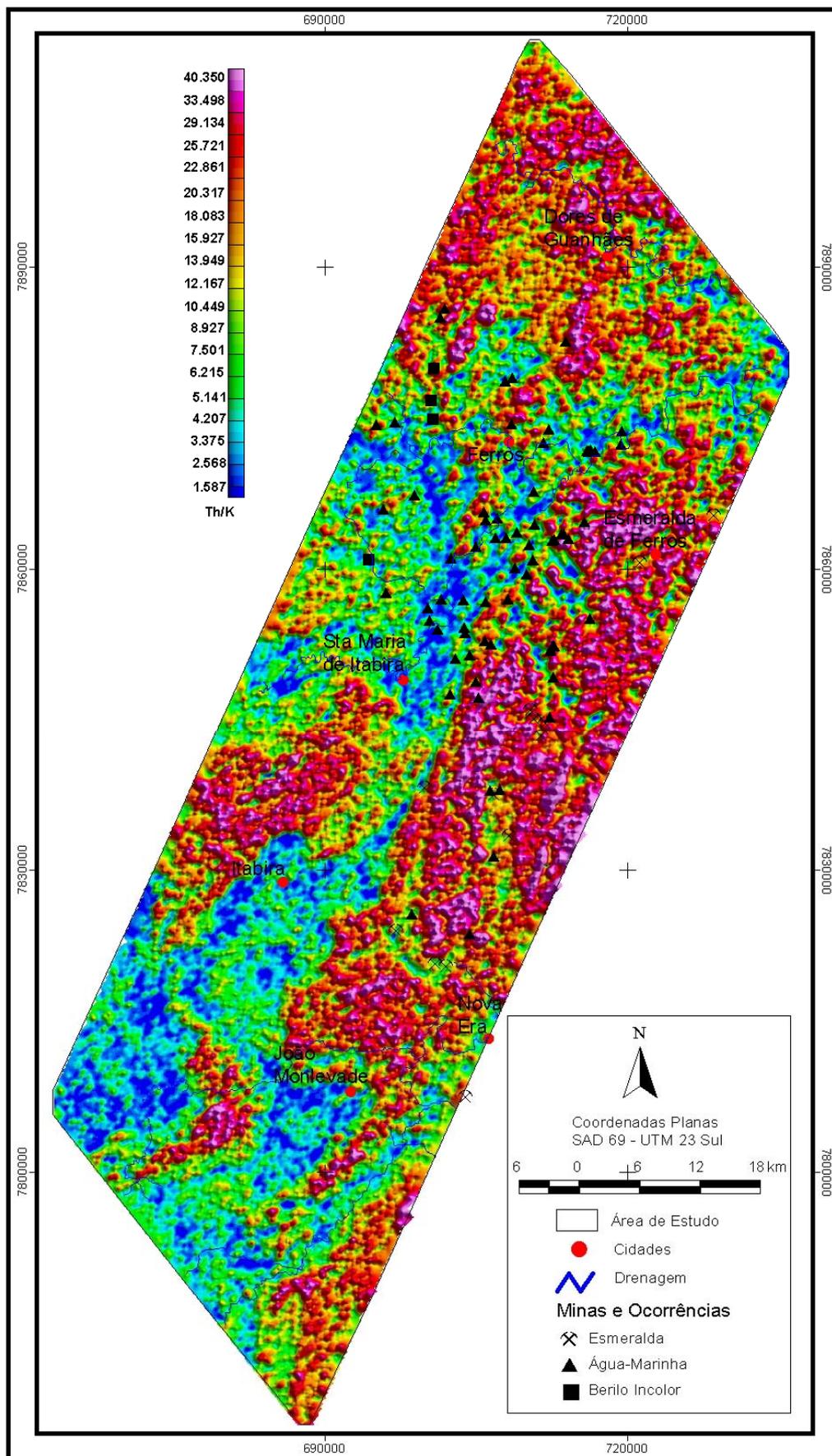


Figura 4.9: Imagem da razão Th/k.

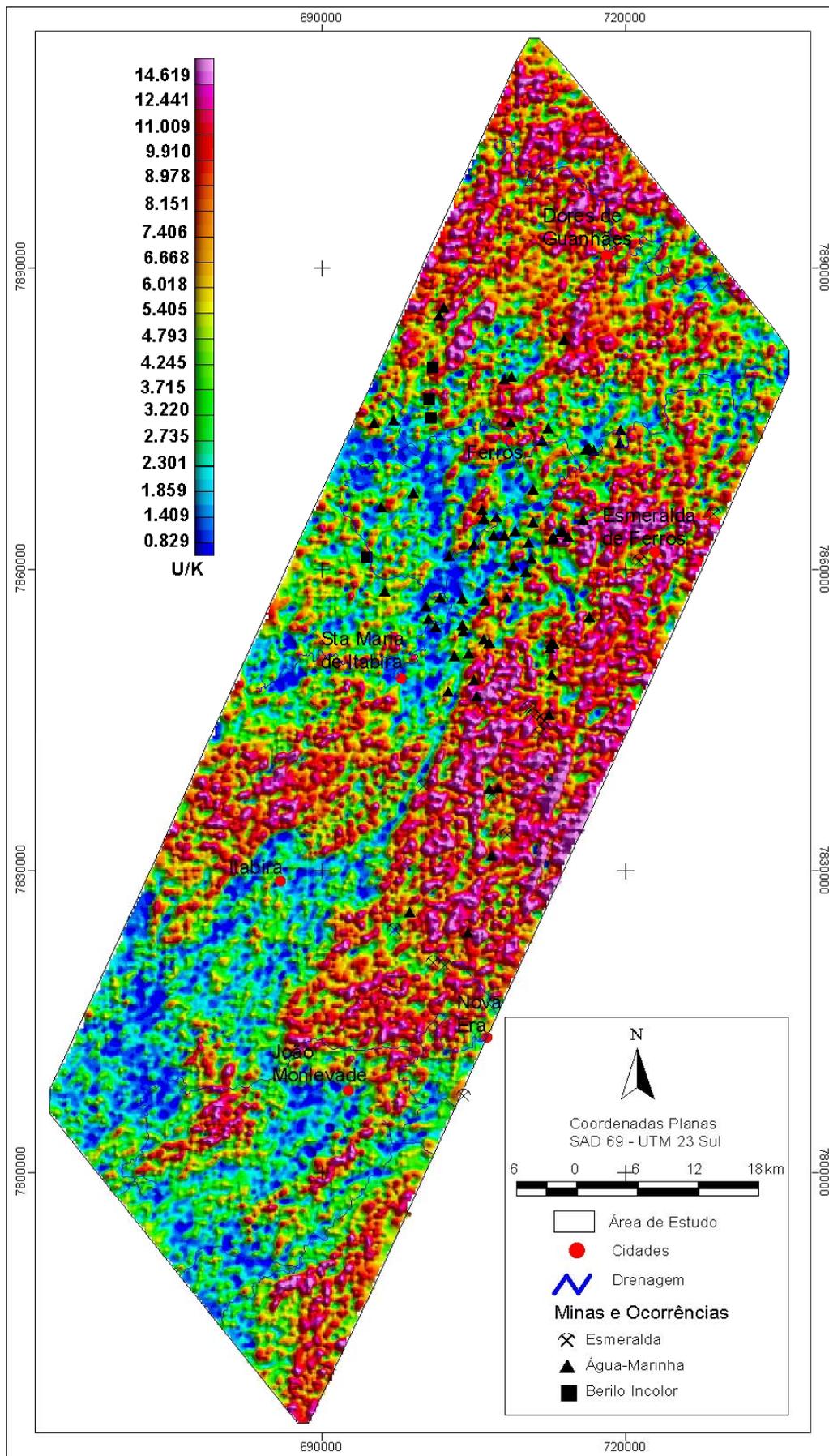


Figura 4.10: Imagem da razão U/K

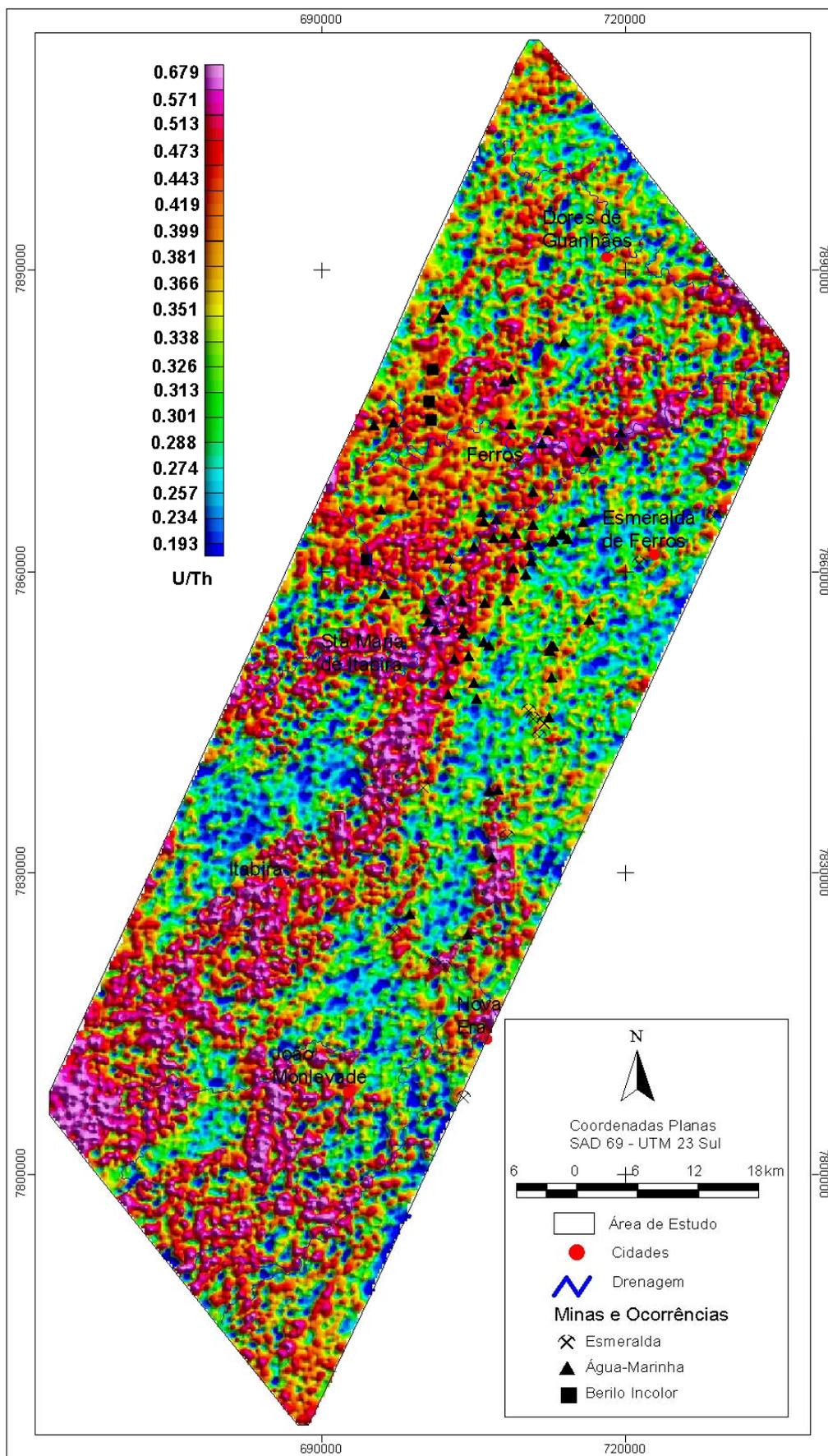


Figura 4.11: Imagem da razão U/Th.

4.2.8 Outras Imagens Gamaespectrométricas

Além das técnicas de realce, outras técnicas de processamento digital são úteis no apoio à análise de dados gamaespectrométricos. Métodos estatísticos como diferenciação pela média são usados para realçar variações sutis nos dados, além de técnicas de reconhecimento de padrões, tais como classificação e análise de grupos para identificação automática de unidades de rádio-elementos e anomalias, complementando a interpretação dos dados.

4.2.8.1 DADOS NORMALIZADOS

Os dados corrigidos dos canais de K, U e Th foram normalizados e padronizados. A normalização pode ser usada para computar concentrações relativas de K, Th e U de acordo com a fórmula:

$$\begin{aligned}K_n &= K/(K+U+Th) \\U_n &= U/(K+U+Th) \\Th_n &= (Th/4)/(K+U+Th/4)\end{aligned}$$

Essa fórmula converte a concentração dos rádio-elementos para abundância relativa. Os dados normalizados podem ser úteis para reduzir os efeitos de atenuação dos raios-gama pela vegetação ou mistura de solos.

O canal de tório normalizado (Figura 4.12) apresenta muita semelhança com a imagem não normalizada, mostrando uma mudança relativamente pequena. A imagem normalizada de potássio (Figura 4.13) foi o que melhor representou esse tipo de dado, definindo com perfeição os platôs e delimitando as grandes unidades que marcam toda a área.

As áreas de drenagem são marcadas por enriquecimento de potássio, confirmando a interpretação anteriormente feita. As feições em forma de U e o grande sigmóide na parte central da área também são delineados por essa imagem. A imagem de urânio normalizado (Figura 4.14) se mostra mais dispersa em relação à imagem não normalizada, mostrando que as drenagens também contêm algum enriquecimento em urânio, o que não ficou muito perceptível na imagem não normalizada. A feição em forma de U também mostra que há concentração moderada de urânio.

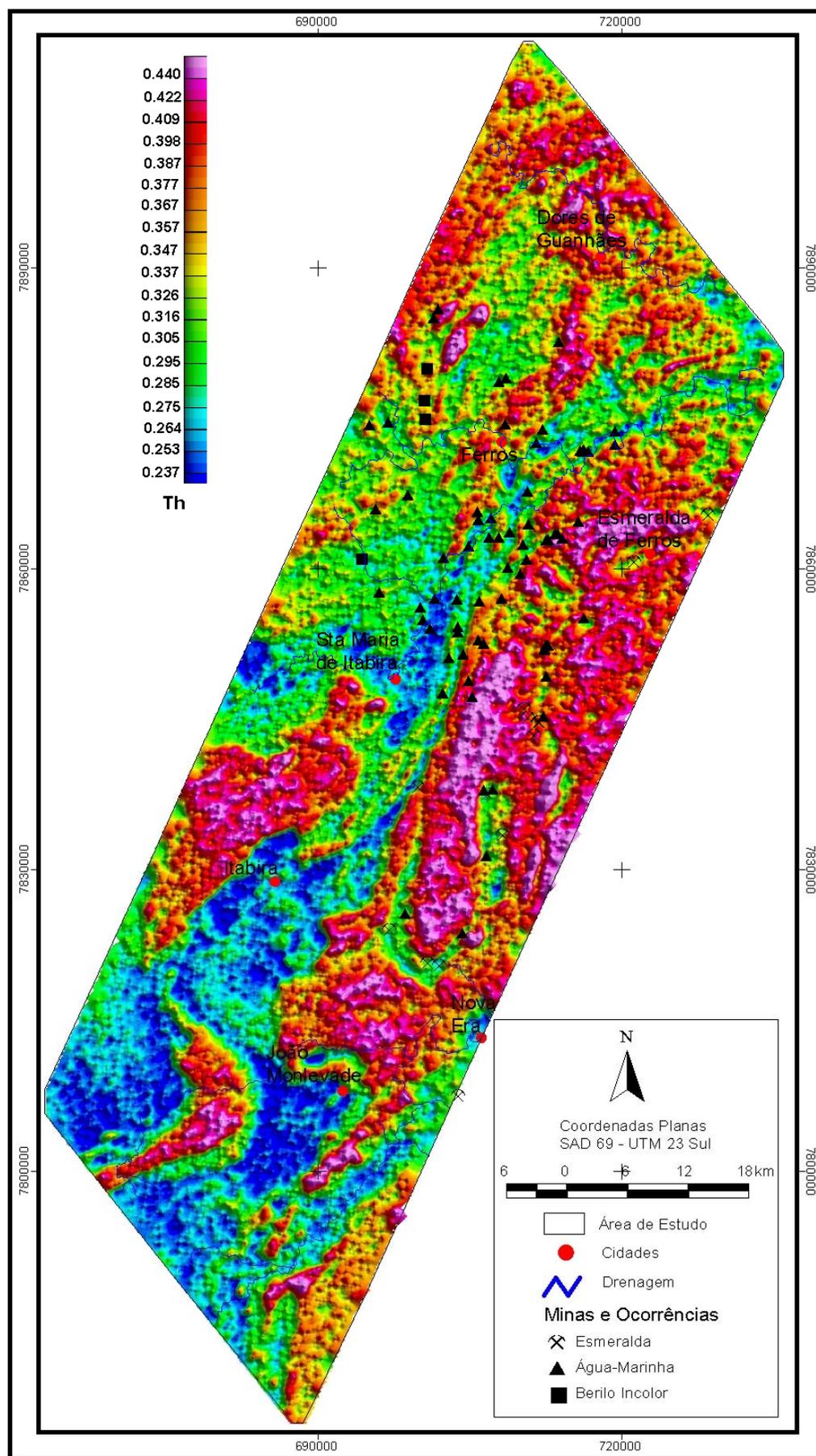


Figura 4.12: Imagem do canal de Tório Normalizado.

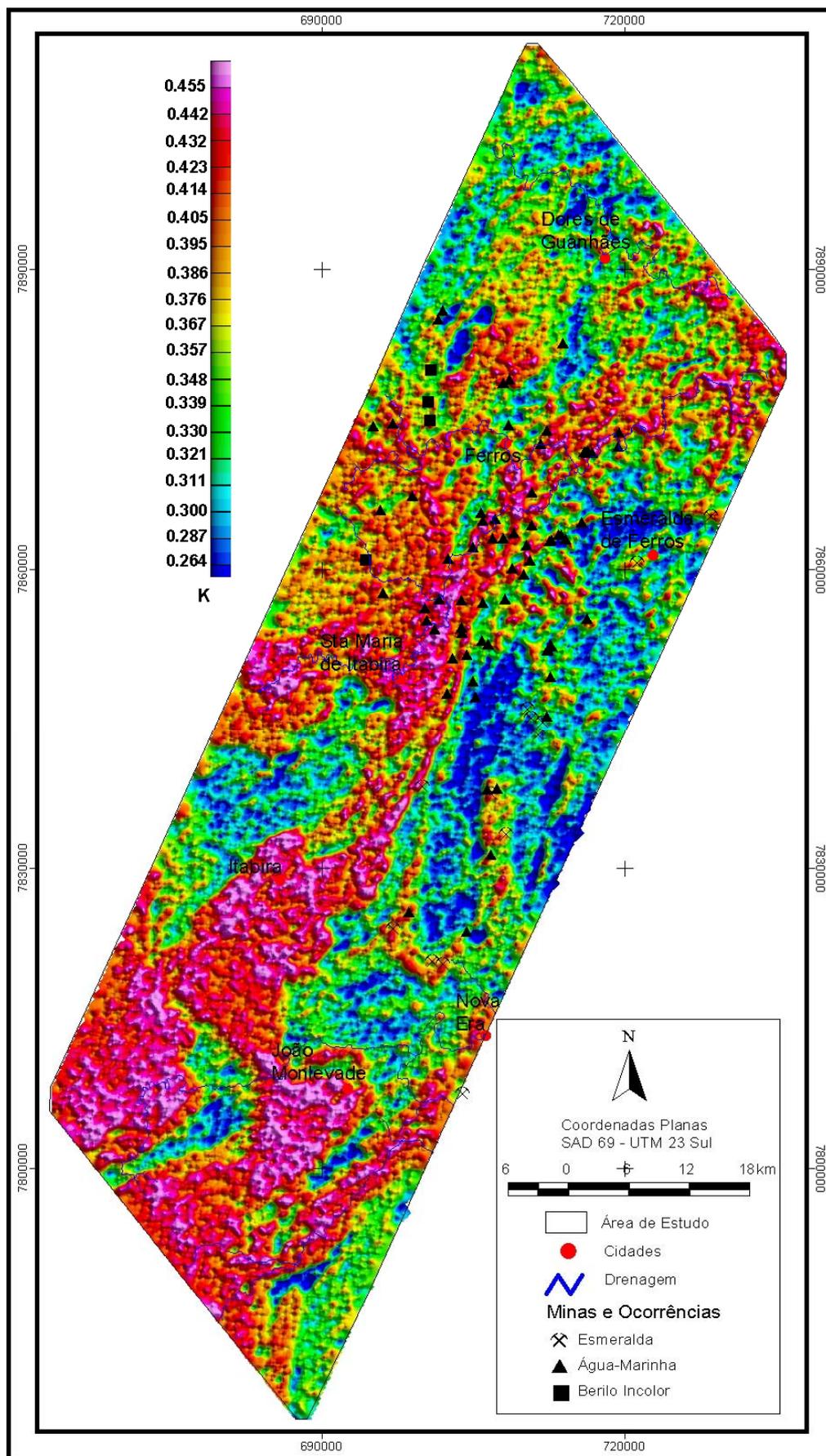


Figura 4.13: Imagem do canal de Potássio Normalizado.

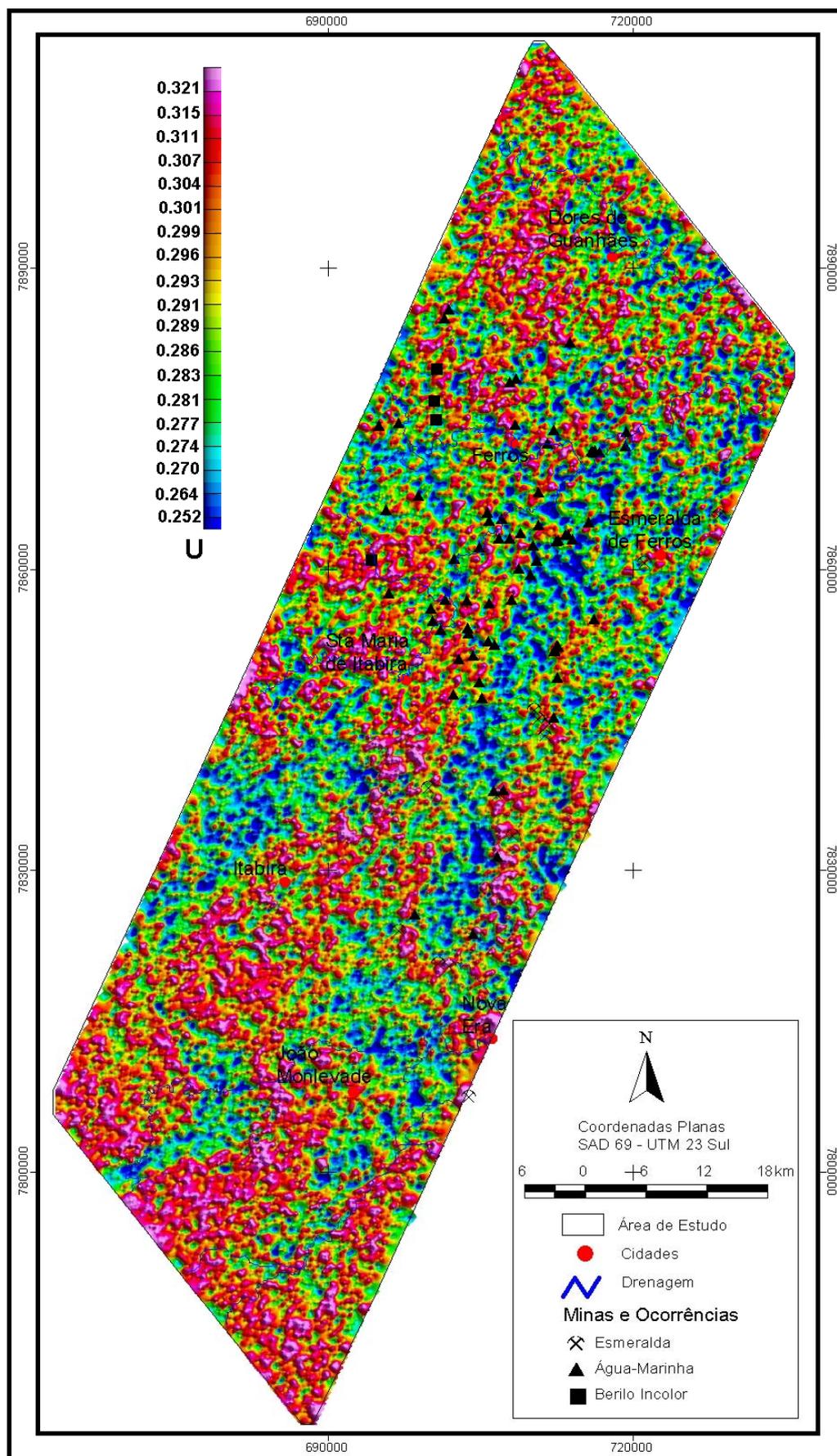


Figura 4.14: Imagem do canal de Urânio Normalizado.

4.2.8.2 FILTRO DE AMPLITUDE

Análises estatísticas de K, U e Th, dentro de cada unidade interpretada, são úteis para extrair dos dados informações sutis que não estão facilmente visíveis. A análise mais simples é verificar desvios a partir do valor médio nas unidades. Os valores médios das concentrações de K, U e Th são calculados para cada unidade interpretada. Essas médias são subtraídas dos dados e os valores residuais são imageados. Grandes desvios a partir da média podem ser devidos a erros no mapeamento dos limites das unidades. Alternativamente, desvios podem indicar alteração (mineralização) ou outros processos geológicos tais como intemperismo ou diferenciação magmática.

Buscou-se nos dados do Projeto Itabira-Ferros uma correlação das unidades gamaespectrométricas com a mineralização de esmeralda e observou-se que a unidade 6 (K Baixo-Médio, Th Baixo, U Baixo-Médio, Figura 4.21) representa a unidade que comporta a mineralização de esmeralda da área, a partir desse dado procurou-se determinar o intervalo de radiometria para essa unidade. Com a obtenção desse intervalo fez-se um cálculo estatístico para essa unidade utilizando-se o background. De acordo com esses cálculos pode-se constatar que somente as unidades com o intervalo de radiometria entre 53.3 cps e 60.0 cps (cor magenta) são representadas no mapa.

As imagens obtidas para os canais de tório, potássio e urânio (Figuras 4.15, 4.16 e 4.17, respectivamente) mostram que com essa técnica foi possível delimitar com nitidez as unidades que contém as mineralizações de esmeralda. Permite visualizar também que algumas dessas unidades são representadas em outras partes da área, como é o caso das unidades que ocorrem na porção centro-oeste e noroeste. Essa imagem também foi muito utilizada para delimitação de domínios, pois marca com muita clareza os contatos entre as grandes unidades.

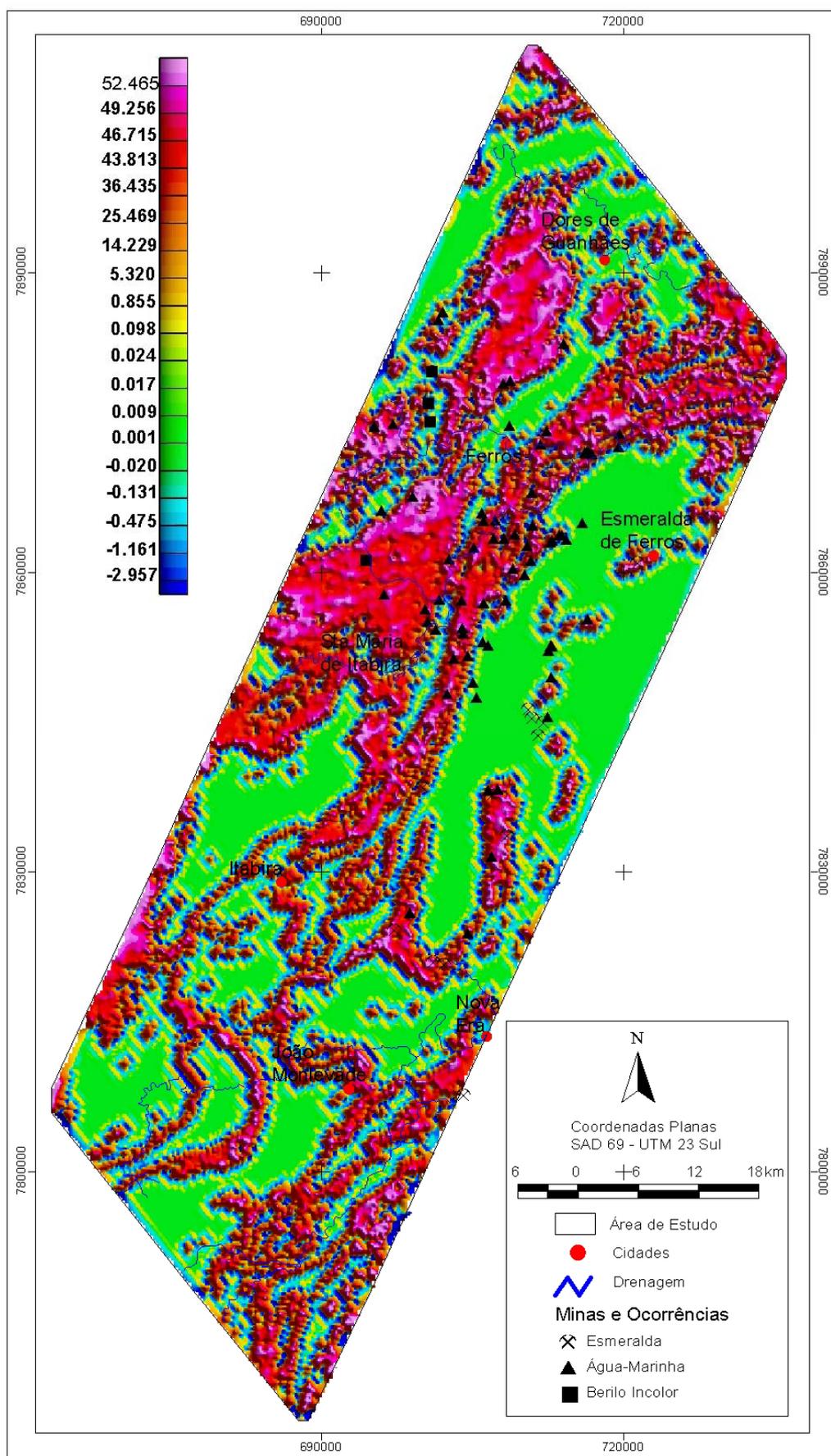


Figura 4.15: Imagem do canal de Tório utilizando filtro de amplitude. Os dados utilizados encontram-se com valores radiométricos entre 53.3 cps e 60.0 cps (cor magenta).

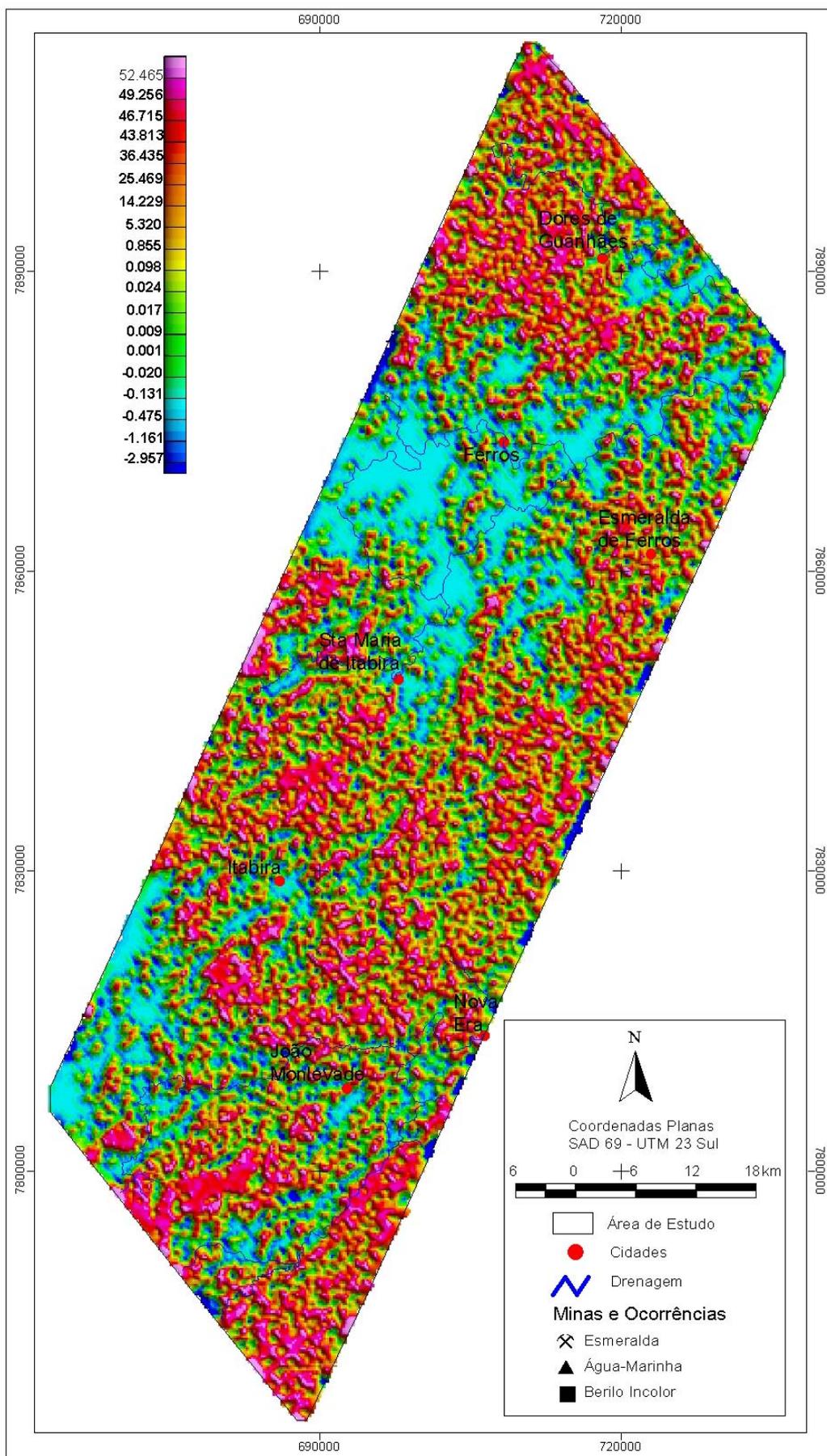


Figura 4.16: Imagem do canal de Potássio utilizando filtro de amplitude.

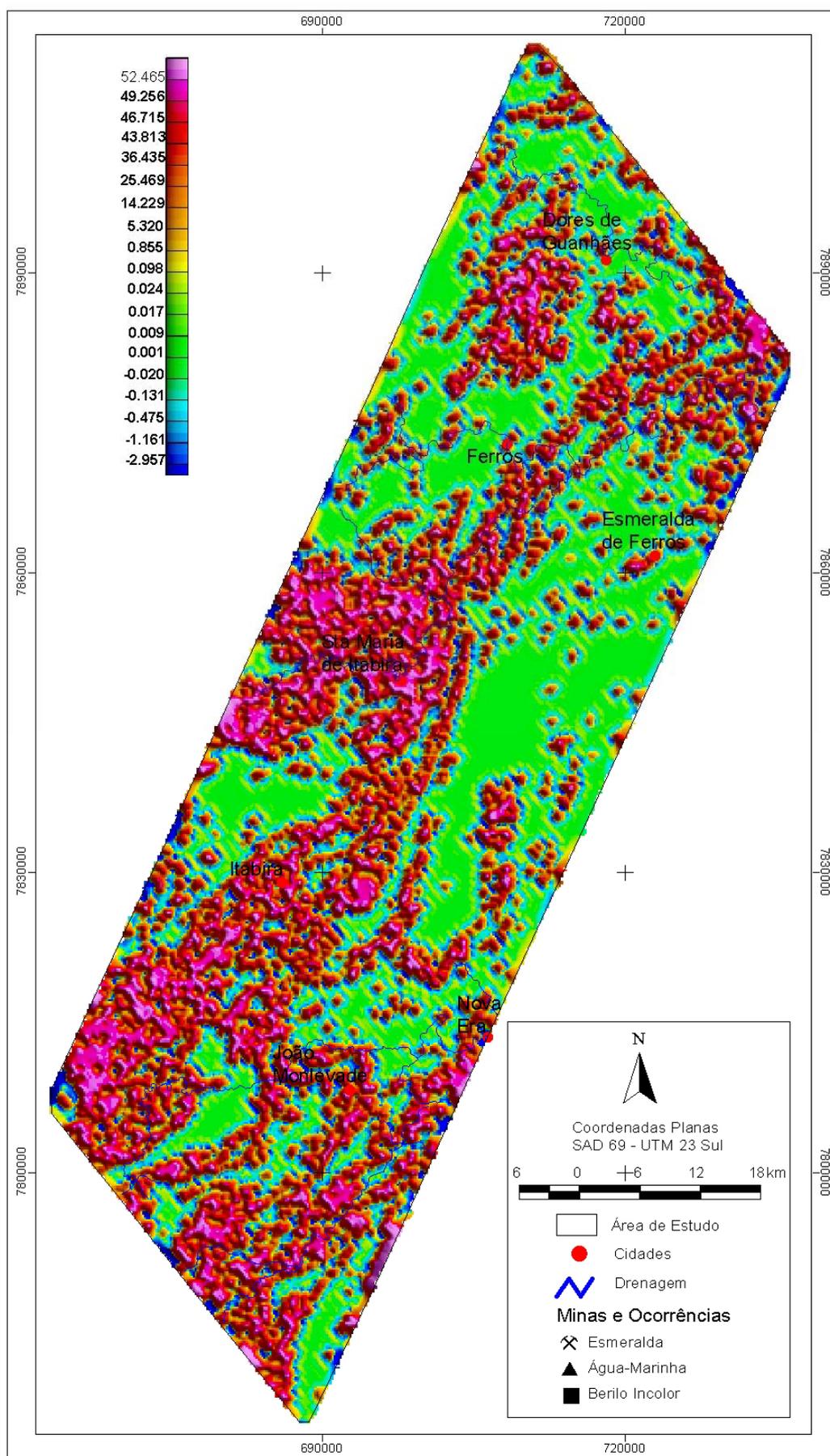


Figura 4.17: Imagem do canal de Urânio utilizando filtro de amplitude.

4.2.8.3 CLASSIFICAÇÃO NÃO SUPERVISIONADA

Análise de grupos ou classificação não supervisionada é uma técnica de reconhecimento de padrão espectral usada para encontrar grupos que ocorrem naturalmente num conjunto de dados de muitos canais (variáveis).

As regras de alocação de amostras em classes (ou grupos) são baseadas em alguma medida de distância no espaço dos dados representado pelas bandas espectrais (canais). O algoritmo K-médias é um método iterativo de agrupamento, onde o usuário especifica o número de grupos centróides iniciais dos grupos (médias) são determinados.

A classificação não supervisionada tem como objetivo de classificar polígonos delineados pela interpretação visual de imagens georreferenciadas, como fotografias aéreas etc. Esta técnica permite criar esquemas de classificação eficientes e delinear rapidamente as características dos polígonos/áreas de interesse. Por se tratar de um esquema facilmente criado e modificado, pode ser utilizado com vantagens no mapeamento gamaespectrométrico.

Essa classificação usa um sistema automatizado de classificação no qual podem ser atribuídas características quaisquer para cada feição selecionada.

Nesse trabalho foram testadas diversas combinações de informações visando definir as que melhor caracterizasse os diferentes litotipos da região estudada e conseqüentemente, as rochas hospedeiras da mineralização de esmeraldas. Os dados foram testados em diferentes classes e números de interações. As classificações estatísticas efetuadas mostraram que os dados possuem em média dezesseis unidades e foram efetuados agrupamentos em dezesseis classes, após cem interações utilizando as informações dos canais normalizados de potássio, tório, urânio, além dos canais das razões Th/K, U/K e U/Th e o canal de contagem total. Porém essas dezesseis classes mostraram apenas as unidades já observadas nos mapas de RGB e CMY, a partir daí procurou-se aumentar o número de classes para verificar uma possível unidade nas áreas de mineralizações, para isso fez-se uma nova classificação utilizando 30 classes (Figura 4.18). Neste trabalho essa classificação foi feita para separar cada domínio gama com base na quantidade padronizada de cada um dos três radionuclídeos (Th, K, U) utilizado.

De acordo com a figura 4.18, algumas unidades puderam ser melhor visualizadas nessa imagem, como é o caso da classe 16, que mostra toda a geometria da feição em U na porção centro-leste. Percebe-se que há interrupções dessa feição com movimentos

para leste, com que sendo interrompidos por estruturas NW, e que essa mesma deição tem continuidade para NE, confirmada pela imagem do filtro de amplitude.

A classe 16 (Figura 4.18) ocorre numa faixa estreita e alongada com orientação SW-NE. É possível encontrá-la também em outras partes da área do Projeto Itabira-Ferros. O interessante é que ela está sempre associada à classe 10 e marca as tendências SW-NE.

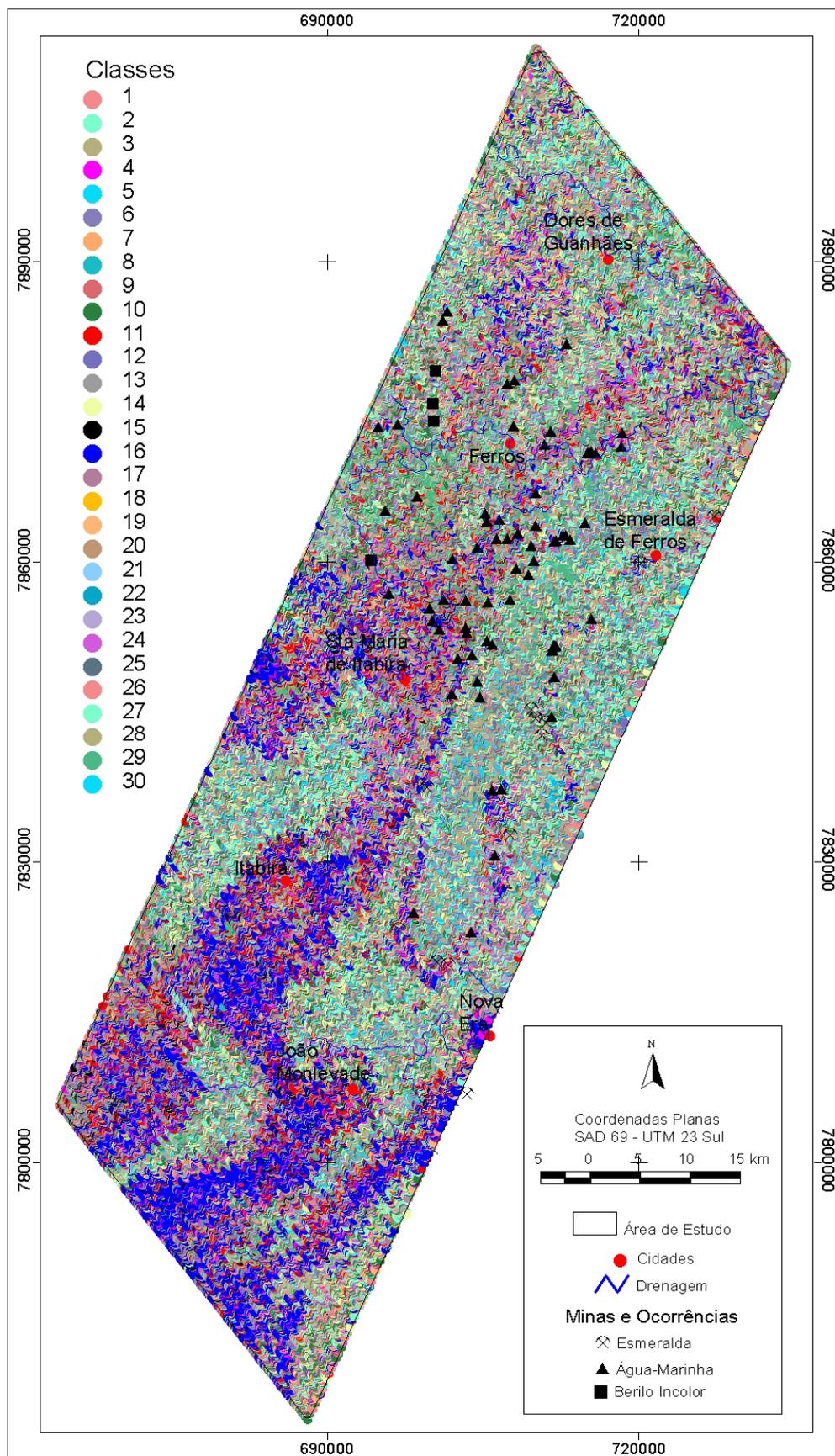


Figura 4.18: Mapa de classificação não supervisionada por médias-K dos canais de K, Th, U normalizados e as razões U/K, U/Th e Th/K e contagem total. Foram feitos agrupamentos em trinta classes após cem iterações.

4.2.8.4 POTÁSSIO ANÔMALO

Os principais fatores que atenuam a radiação gama oriunda de fontes geológicas são água e vegetação, enquanto o principal processo natural de enriquecimento deve-se à alteração hidrotermal. O potássio ocorre naturalmente concentrado em zonas de alteração hidrotermal, já o tório caracteriza-se por ser o elemento mais imóvel dentre os três detectados em gamaespectrometria, podendo ser utilizado como guia para determinar as concentrações normais de cada material. A normalização do potássio em relação ao tório permite a eliminação do efeito litológico primário e a determinação de concentrações anômalas daquele elemento.

A técnica do potássio anômalo (Pires 1995) baseia-se na análise de dados de espectrometria de raios gama, principalmente de potássio, aplicada na identificação de áreas hidrotermalizadas com expressão na superfície. Pires (1995) propõe que é possível identificar acumulações anômalas de potássio, desde que se retire dos dados estudados o efeito provocado pelas variações geológicas. Os teores de Th são utilizados como controle litológico para definir os valores ideais de U e K para cada amostra. Os efeitos litológicos e ambientais que afetam a concentração aparente de tório também afetam o urânio e o potássio de maneira previsível. Devido às similaridades no comportamento, os dados de tório podem ser usados para prever potássio a partir da determinação das relações entre os dois elementos.

A dependência da concentração de potássio em relação ao tório é representada por uma função linear que passa pela origem. A inclinação da reta é determinada pela razão entre os valores médios observados de potássio (K_S) e os de tório (Th_S) e é expressa pela equação:

$$K_I = M(K_S) / M(Th_S) \cdot Th$$

K_I é o valor ideal de potássio definido a partir do tório para o ponto de observação e M é a média (Pires 1995). Dependendo das características de cada região essa relação pode mudar e os desvios para o potássio (K_D) podem ser obtidos pela equação:

$$K_D = (K_S - K_I) / K_I$$

A técnica de potássio anômalo (Pires 1995) foi utilizada para todo o conjunto de dados gamaespectrométricos da área do Projeto Itabira-Ferros, apresentadas como as relações entre os teores de tório pelos do potássio para o conjunto de dados. A partir do gráfico de espalhamento entre K e Th (Figura 4.19) observou-se que as relações entre esses dois elementos na área não mostram dispersões elevadas e pode ser caracterizada uma população distinta. A partir dos cálculos abaixo foi possível obter o que seria o excesso de potássio para a área em estudo.

$$K_D = 0.54 Th$$

$$K_{\text{anômalo}} = K - K_D$$

Dessa maneira foi possível gerar uma nova imagem mostrando o enriquecimento potássico associado à população dos dados (Figura 4.19).

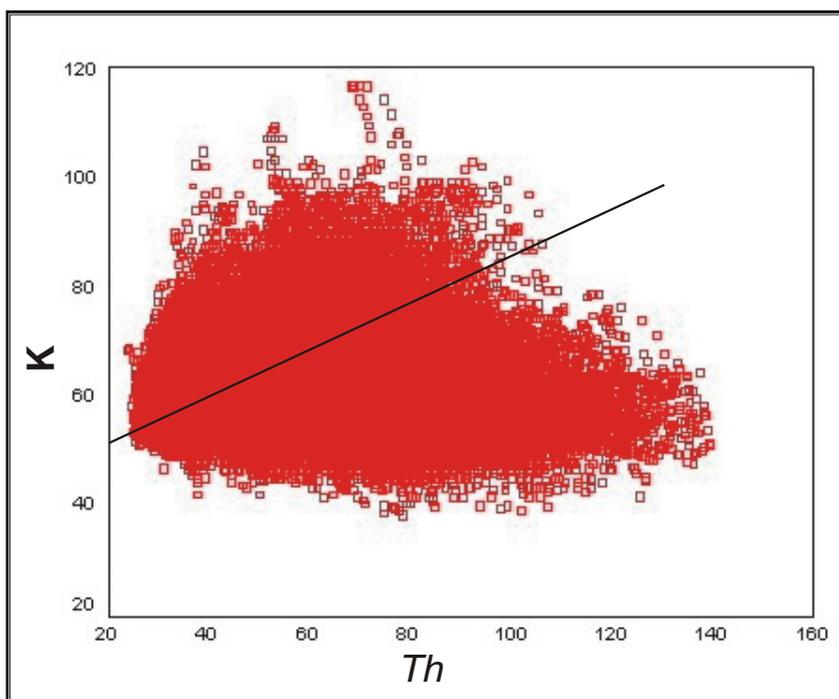


Figura 4.19: Relação Potássio x Tório para os dados gamaespectrométricos.

Na imagem do potássio anômalo (Figura 4.20), além do enriquecimento potássico que ocorre nas áreas de drenagem e no embasamento ao sul-sudeste e sudoeste da área, é importante ressaltar que a feição em forma de U na porção centro-leste da área há um enriquecimento potássico. Vale ressaltar que nessa feição está concentrada a mineralização de esmeralda da área. Ao longo das unidades delimitadas como uma

possível continuação dessa feição em forma de U também há enriquecimento potássico elevado.

Outro detalhe interessante é o que se verifica na porção centro norte da área, onde também se tem um enriquecimento potássico semelhante ao observado na porção centro-leste. Nessa área tem-se um interesse especial, pois a mesma mostra um teor dos rádio-elementos muito similar ao encontrado na unidade em forma de U, onde há a maior concentração das mineralizações da área.

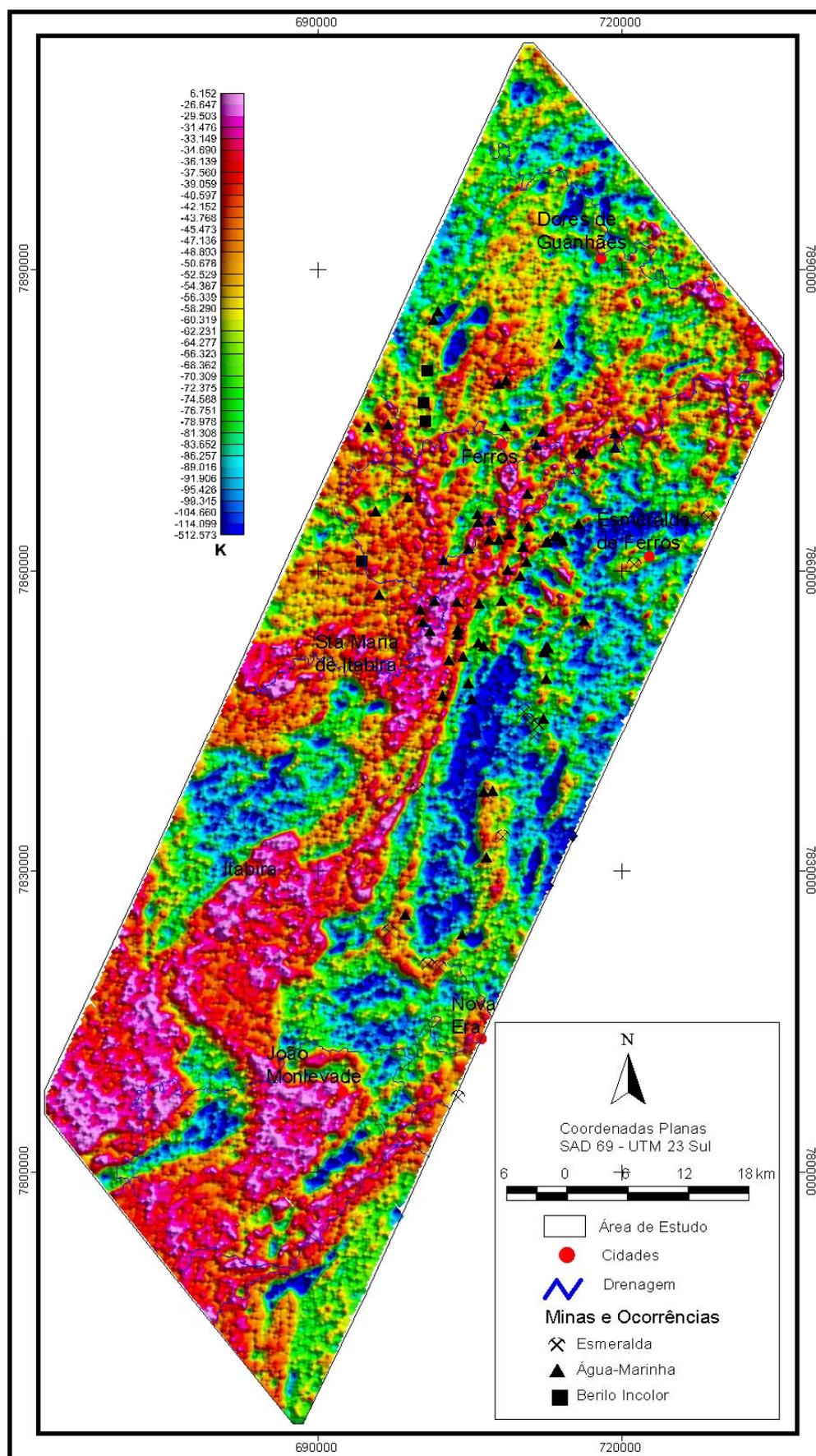


Figura 4.20: Imagem do Potássio Anômalo para os dados da área em estudo. Esta imagem mostra que grande parte das áreas com cotas topográficas baixas tem alto conteúdo de potássio enriquecido.

4.2.9 Mapa dos Domínios Gamaespectrométricos

A gamaespectrometria representa o imageamento de maior proximidade ao que é observável na superfície e é muito interessante o quadro mostrado no mapa de síntese com a interpretação de seus resultados. A análise criteriosa dos dados com os quais esta interpretação foi montada e a forma cuidadosa com que foi elaborado fornecem uma visão bastante detalhada daquilo que deverá ser comprovado pelo mapeamento geológico. O discernimento das diversas classes ou unidades foi feito por inspeção visual usando-se todo o conhecimento da física do processo. Ele mostra um retrato da complexidade lito-estrutural que se deve esperar para a área.

Os domínios gamaespectrométricos foram interpretados principalmente a partir das imagens RGB (Figura 4.7) e CMY (Figura 4.8), porém com contribuições adicionais dos canais individuais de Th (Figura 4.2), U (Figura 4.4), K (Figura 4.3) e das razões Th/K (Figura 4.9), U/K (Figura 4.10) e U/Th (Figura 4.12), além das informações das análises estatísticas anteriormente relacionadas (Figura 4.13 a 4.20).

Num primeiro passo foram definidos os domínios básicos ou mais evidentes usando o mapa de contagem total (Figura 4.5) e o do filtro de amplitude (Figuras 4.15 a 4.17) e ao todo foram quatro domínios (Figura 4.6). Em seguida, fez a correlação com as imagens de RGB e CMY (Figuras 4.7 e 4.8). Quando se faz a comparação das unidades interpretadas a partir de contagem total (Figura 4.6) com as imagens ternárias RGB e CMY (Figuras 4.7 e 4.8) observa-se que as unidades gamaespectrométricas mostram grandes variações radiométricas não sendo possível correlacionar somente a quatro domínios.

No total foram delimitadas 20 unidades gamaespectrométricas distintas para essa região. Com base nas respostas radiométricas, de acordo com as misturas de cores, vermelho, verde e azul, permitiu agrupá-las em cinco categorias:

- 1) unidades com baixas concentrações: 0-19%;
- 2) baixa-média: 20-39%;
- 3) média: 40-59%;
- 4) média-alta: 60-79%;
- 5) alta: 80-100%.

As características de cada unidade, em função de seu conteúdo de K, Th e U estão definidas na tabela 4.1 e mostrados na figura 4.21.

Tabela 4.1: Tabela com a classificação das unidades gamaespectrométricas por seus teores de K, Th e U interpretadas para o Projeto Itabira-Ferros.

Índice das Unidades Gamaespectrométricas Classificadas	Teor de Potássio	Teor de Tório	Teor de Urânio
1gm	Baixo	Médio	Médio-Alto
2gm	Baixo	Baixo-Médio	Médio
3gm	Baixo-Médio	Baixo-Médio	Baixo
4gm	Médio-Alto	Médio-Alto	Médio-Alto
5gm	Baixo	Alto	Alto
6gm	Baixo-Médio	Baixo	Baixo
7gm	Baixo-Médio	Baixo	Baixo-Médio
8gm	Médio	Baixo	Médio
9gm	Baixo	Baixo	Baixo
10gm	Baixo-Médio	Baixo-Médio	Baixo-Médio
11gm	Médio-Alto	Médio	Baixo
12gm	Alto	Médio-Alto	Baixo
13gm	Médio	Médio	Baixo-Médio
14gm	Alto	Alto	Alto
15gm	Alto	Alto	Alto
16gm	Baixo	Baixo	Baixo
17gm	Baixo-Médio	Baixo	Baixo
18gm	Médio	Médio	Baixo
19gm	Médio-Alto	Alto	Baixo
20gm	Médio	Baixo-Médio	Baixo-Médio

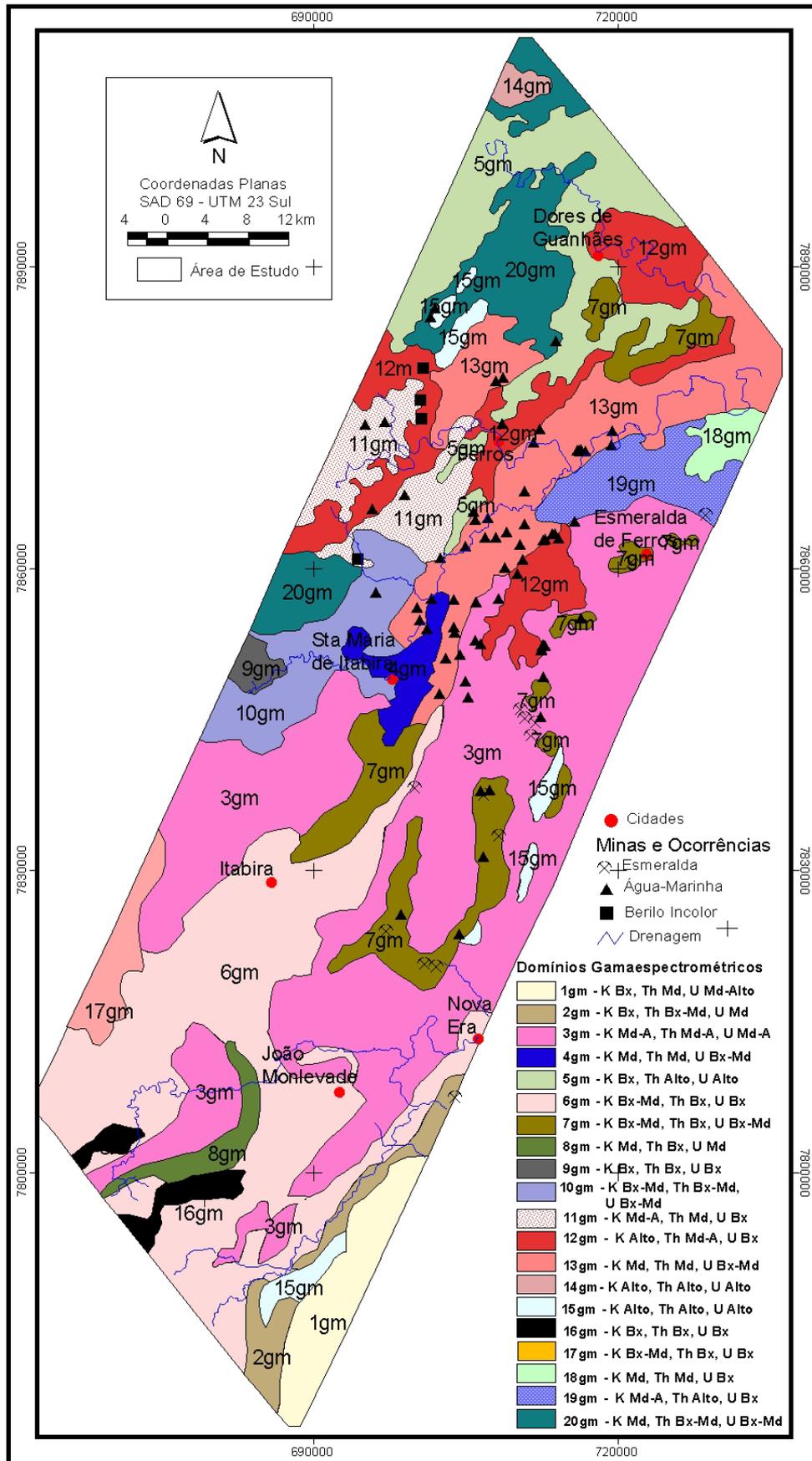


Figura 4.21: Mapa dos domínios gamaespectrométricos interpretados a partir de todas as imagens (Md-A; Médio-Alto; Bx-Md: Baixo-Médio; Md: Médio). Observa-se que os domínios 7gm comporta as principais mineralizações da área.

4.2.10 Estruturas Gamaespectrométricas

Lineamentos foram interpretados a partir dos canais de todas as imagens gamaespectrométricas, nas escalas de 1:100.000 e 1:50.000. A maioria representa contatos geológicos entre as unidades, porém grandes lineamentos, retilíneos e não retilíneos, representando grandes zonas gamaespectrométricas podem ser interpretados.

Diagrama de roseta para a interpretação dos lineamentos retilíneos foi confeccionado (Figura 4.23). Nessa Figura observa-se que o predomínio das estruturas encontra-se na direção E-W, com valores variando entre 80° - 100° Az. Um segundo conjunto de estruturas está nas direções $N30^{\circ}$ - 50° W. Um terceiro e quarto conjuntos de lineamentos retilíneos, porém em menor quantidade encontra-se nas direções N-S e NE-SW. Os lineamentos retilíneos cortam toda a área e podem ser observados na figura 4.22. Lineamentos não retilíneos são observados em toda a área, principalmente com direção NE-SW. Esse conjunto de lineamentos não retilíneo é predominante na área, como pode ser observado na Figura 4.23.

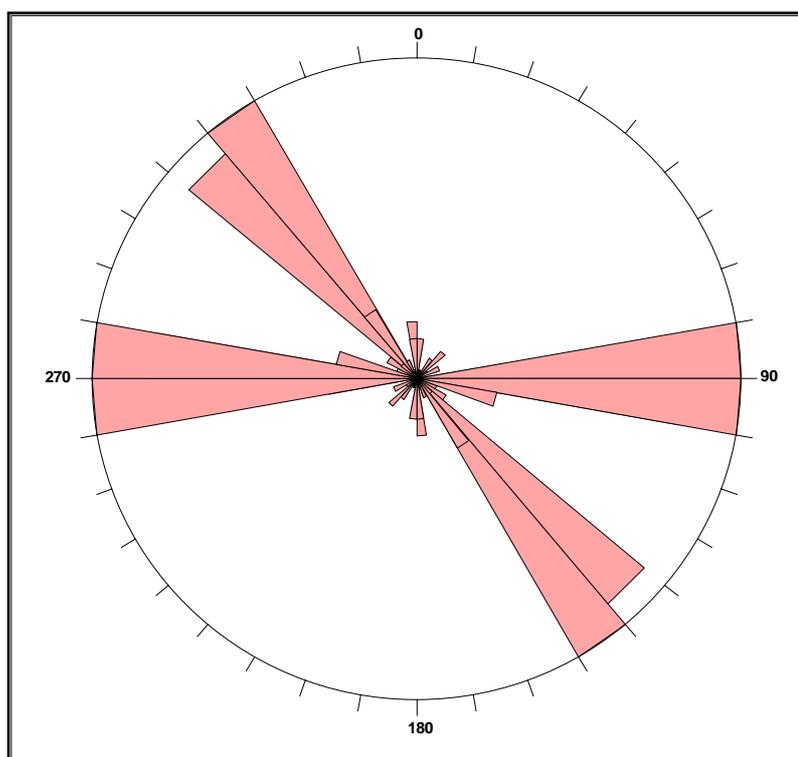


Figura 4.22: Diagrama de roseta mostrando o comportamento das estruturas lineares das imagens gamaespectrométricas. As principais estruturas situam nos quadrantes NW e E-W. Estruturas N-S também são observadas.

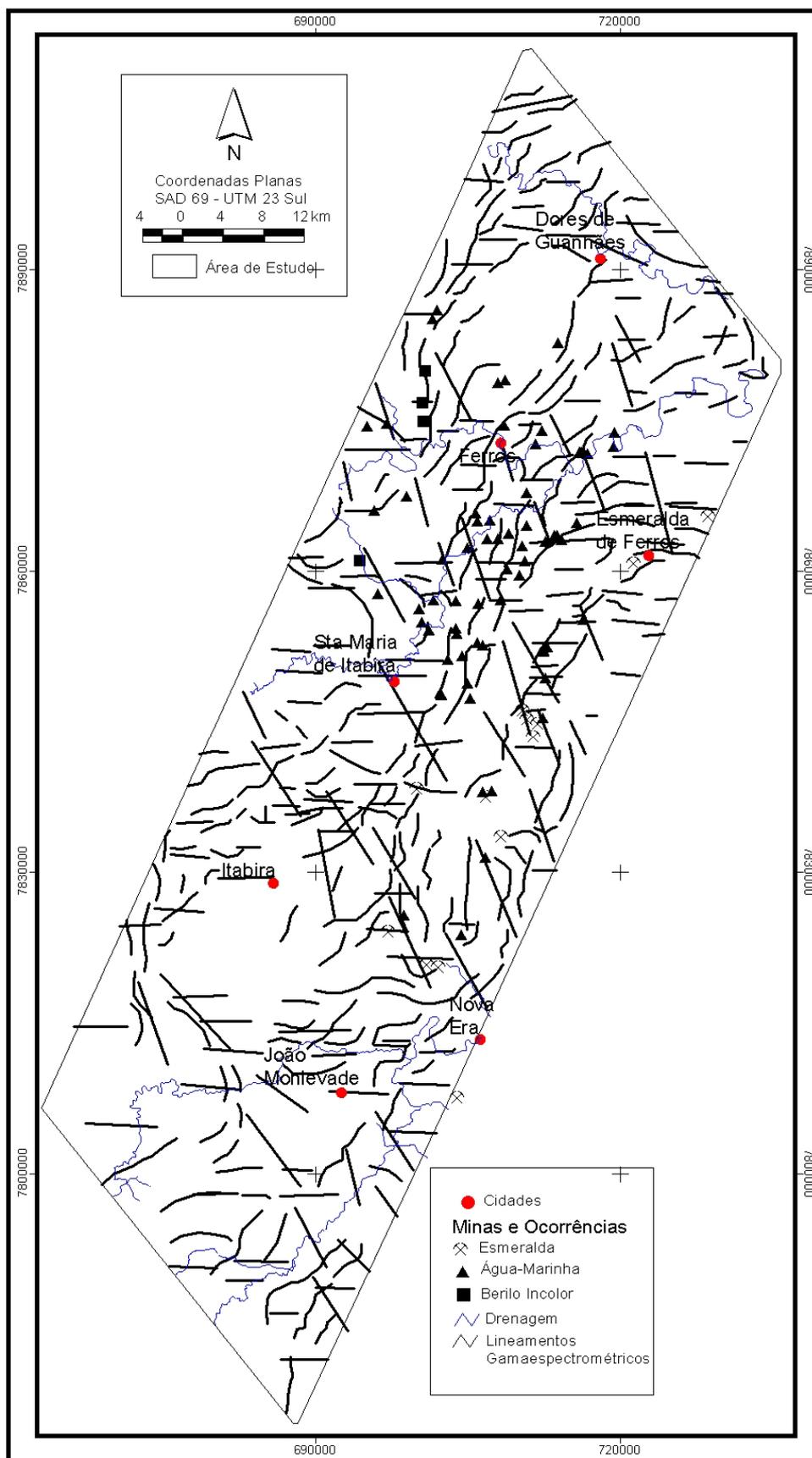


Figura 4.23: Mapa das estruturas gamaespectrométricas interpretadas. Observa-se que a principal tendência tem direção NE-SW. Estruturas NW-SE e E-W são observadas em menor quantidade.

4.2.11 Mapa dos Domínios e Estruturas Gamaespectrométricas Interpretadas

A superposição dos mapas dos domínios gamaespectrométricos (Figura 4.21) e daquele das estruturas gamaespectrométricas (Figura 4.23) gerou o mapa integrado (Figura 4.24). Mostra assim, a integração das informações discutidas acima que possibilitaram a geração de um quadro gamaespectrométrico. Este ressalta as características de emissividade gama peculiar às unidades litológicas e pedológicas aflorantes na área do levantamento. É, portanto, o quadro mais facilmente reconhecível nos trabalhos de fotointerpretação e, certamente, nos de geologia de campo. Sua extensão à subsuperfície deverá se amparar em quadro semelhante gerado a partir da intensidade do campo magnético anômalo.

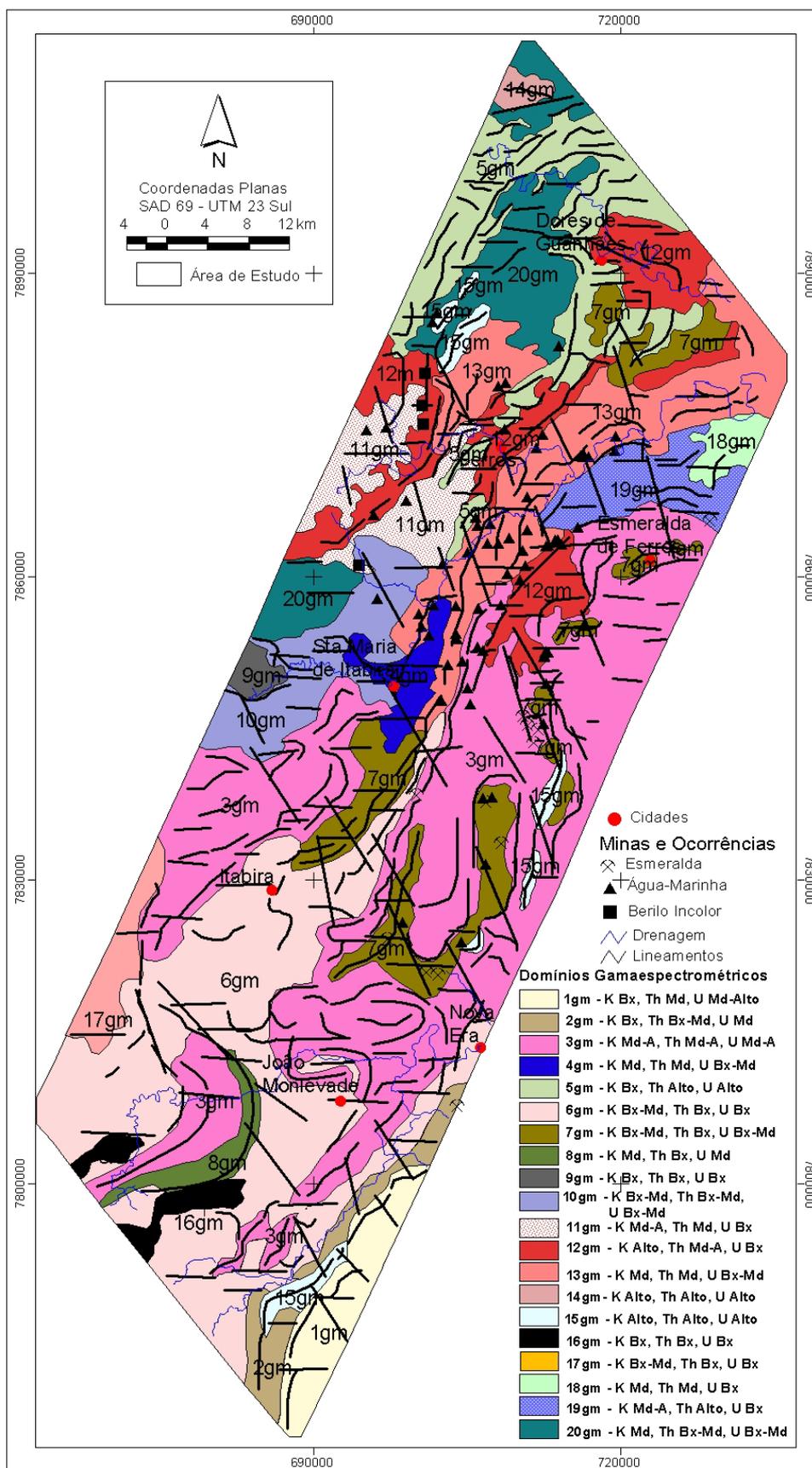


Figura 4.24: Mapa da integração dos domínios e lineamentos gamaespectrométricos interpretados dos diversos canais. Observa-se que grande parte das estruturas curvilíneas são contatos entre as unidades geofísicas.

Interpretação dos Dados Magnetométricos

A intimidade do *SENHOR* é para os que o temem, aos quais ele dará a conhecer a sua aliança.
(SI 25:14).

5.1 INTRODUÇÃO

Diversas técnicas foram aplicadas aos dados magnéticos e tiveram como principal objetivo o realce de estruturas e facilitar a discriminação das assinaturas magnéticas para melhor interpretação das diferentes unidades (ver item 3.1 e Anexo A.1).

As discussões a seguir mostram a análise e interpretação dos resultados dos dados magnéticos. Essa etapa envolveu principalmente a análise visual, que incluiu o traçado dos lineamentos, anomalias de grandes comprimentos de onda, definição de domínios magnéticos, relação com o arcabouço estrutural, correlação geológica, identificação de zonas anômalas e a definição do controle das mineralizações de esmeraldas dessa região. Com isso, foram gerados mapas das estruturas e de feições magnéticas, além de mapas de domínios magnéticos (ver item 3.1 e Anexo A.1).

5.2 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS MAGNÉTICOS

A análise compreendeu as seguintes etapas, resumidamente:

- Estudo do espectro radial de potência do campo magnético anômalo da área em estudo;
- Estudo do campo magnético anômalo;
- Estudo das feições lineares que pudessem significar elementos estruturais importantes no contexto da área (fraturamento/falhamentos e contatos);
- Estudo das unidades magnéticas profundas e rasas;
- Estudo da deconvolução de euler;
- Definição do arcabouço estrutural e das unidades magnéticas que compõem a área e elaboração do mapa de domínios e estruturas magnéticas;

Todas as interpretações e integrações que se seguiram foram feitas em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), o que facilita as fases de análise e de apresentação dos resultados finais.

5.2.1 Espectro de Potência Ponderado Radialmente

O espectro de potência ponderado radialmente da área de estudo é mostrado na Figura 5.1. Para essa região, a frequência de *Nyquist* encontra-se em 0.5 ciclos por km. Porém, as retas se ajustaram ao espectro de potência das fontes superficiais até o número de 1 ciclo por quilômetro, mostrando que o micronivelamento realizado permitiu que grande parte do ruído fosse eliminado, melhorando com isso a qualidade dos dados (Figura 5.1a).

O espectro indica também a presença de quatro fontes magnéticas facilmente distinguíveis da esquerda para a direita. A primeira parte, reta 1, representa as fontes infracrustais (as mais profundas), com média em torno de 5.000 metros de profundidade (Figura 5.1b) e, correspondem nos mapas aos maiores comprimentos de onda. A segunda parte (reta 2) reflete as fontes médias intracrustais de comprimento de onda intermediários com profundidade de aproximadamente 2.000 metros. A terceira parte (reta 3) corresponde a fontes supracrustais com profundidades em torno de 500 metros e a reta 4 as fontes superficiais com 150 metros de altura, correspondendo a altura do vôo.

Este quadro indica que as fontes magnéticas de alta frequência (Figura 5.2) podem estar ligadas ao grupo de fontes mais superficiais, enquanto os outros grupos aos de fonte intermediário e profundo (Figura 5.1 e 5.2).

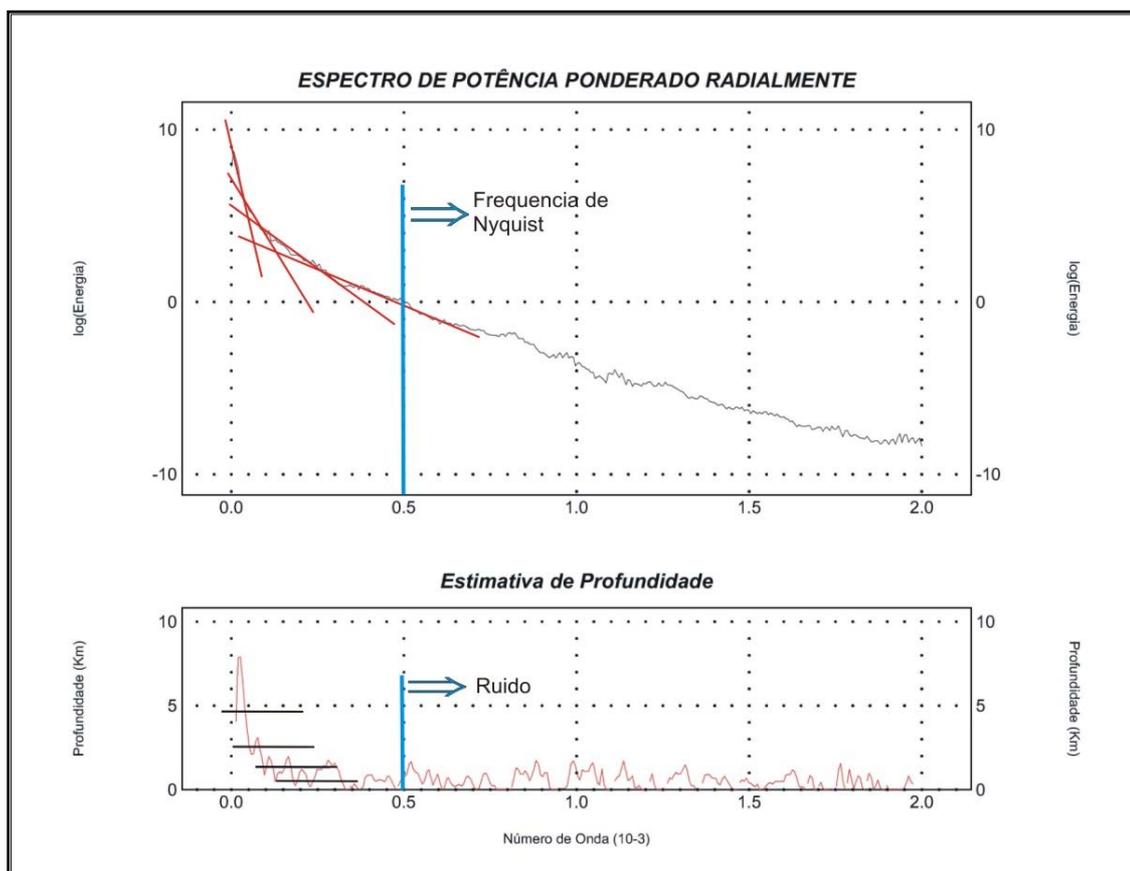


Figura 5.1: Espectro de potência ponderado radialmente para o campo magnético anômalo. Foram obtidos quatro fontes principais: a 1ª encontra-se a aproximadamente 5.000 metros de profundidade, a 2ª a 2.000 metros, a 3ª a 500 metros, enquanto que a 4ª está a 150 metros, representando a altura do vôo.

5.2.2 Campo Magnético Anômalo

A interpretação dos dados magnéticos teve início com a análise dos sinais que compunham o relevo do campo magnético anômalo (Figura 5.2), com o objetivo de demarcar padrões que individualizassem unidades com comportamentos distintos e padrões de assinaturas que pudessem traduzir feições importantes (linear ou não linear).

O relevo magnético da faixa Itabira-Ferros apresenta-se bastante movimentado. Sua análise mostra que há alternâncias de faixas com valores baixos (azuis) e altos (vermelhos), com tendência geral de orientação NE-SW e o comportamento das mesmas é bastante irregular.

Partindo-se da porção mais ao norte com predominância de valores mais baixos (azuis) tem comportamento bastante diferenciado do restante. Ele mostra valores variando entre -100nT a -50nT . Nota-se também, uma série de assinaturas magnéticas anômalas com direções preferenciais NE-SW. Enquanto outras de direção NW-SE. Na

porção nordeste há indicação de que as baixas frequências delineam uma feição dobrada (detalhe A, Figura 5.2). Essa região parece ser cortada ainda por duas feições, uma linear NW-SE e outra, não linear, aproximadamente E-W. No extremo noroeste do bloco norte, há uma feição linear de forte magnetização que corta uma série de feições de orientação E-W (Detalhe B, Figura 5.3).

Na porção central da área o relevo magnético é mais suave, com ondulações de médias frequências, em torno de 50nT. O centro dessa área é recortada por uma grande feição com assinatura mais baixa, 5nT e orientação geral SSW-NNE, numa assinatura que lembra rochas sob deformação plástica. No topo dessa feição é possível observar um grande lineamento com orientação E-W cortando o mesmo, com deslocamento para oeste (Detalhe C, Figura 5.2). A porção centro-oeste do bloco central mostra ser formado por uma mistura de sinais de baixas e de altas frequências espaciais. É possível observar ainda duas feições que lembram dobras, uma menor mais a NW e outra maior mais a SW desta área (Figura 5.2).

Na parte sul, o relevo magnético mostra dois comportamentos distintos. O mais a sul é marcado por assinaturas com valores negativos (fontes mais profundas), mostrando vales com orientação WSW-ENE (em tons de azul). Já na porção mais a norte dessa região o relevo é formado por uma série de picos fortemente marcados que se destacam de toda a área. O comportamento dessas feições é como se fossem cicatrizes bem marcadas por vales e cristas de comprimentos de ondas altos (vermelhos) de aproximadamente 200nT, porém de característica superficial (Figura 5.2). Na porção sudeste deste bloco as duas feições aparecem como que intrincadas formadas por assinaturas de feições lineares compostas por sinais de altas e baixas frequências com orientação geral WSW-ENE.

Como a área se encontra numa região de baixa latitude os valores mais negativos do relevo indicam a posição de fontes mais fortemente magnéticas ou de maior magnetização na região abrangida por estes estudos (Figura 5.3). Essa imagem mostra o comportamento dos conjuntos de fontes cujas assinaturas foram descritas no que seriam suas posições físicas verdadeiras.

De acordo com os resultados obtidos nesse estudo tem-se que a área em análise mostra-se formado por materiais com diferentes graus de magnetização e a diferença entre a disposição das fontes causadoras das diversas assinaturas fica bem evidenciada. O bloco sul é o mais magnético de toda a área, enquanto que o restante da área, fica com frequências mais baixas, em torno de 50nT (Figura 5.3).

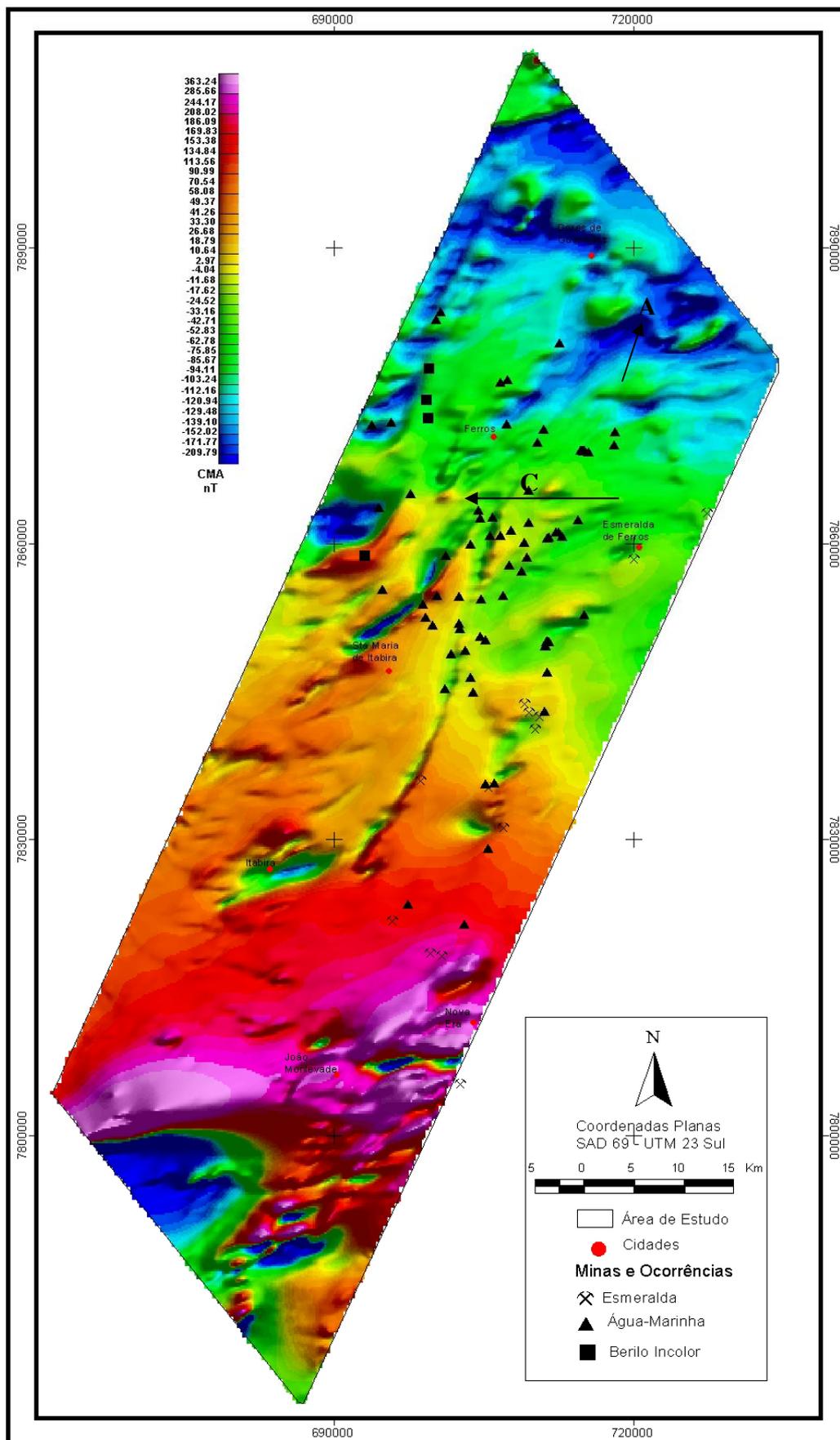


Figura 5.2: Imagem do Campo Magnético Anômalo da área de estudo.

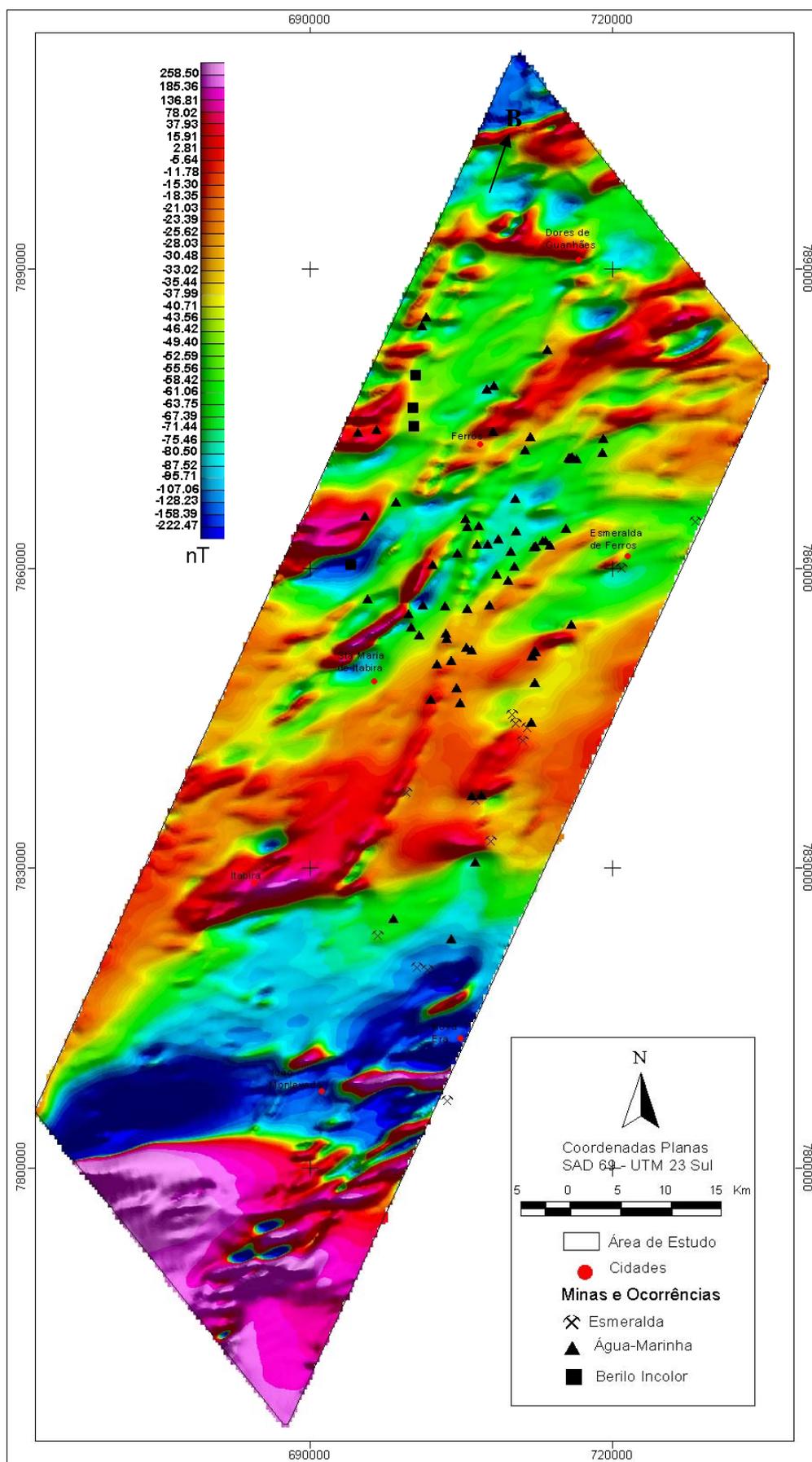


Figura 5.3: Imagem da Intensidade do Campo Magnético Anômalo reduzido ao pólo magnético.

5.2.3 Estruturas Magnéticas

A interpretação dos lineamentos magnéticos se deu a partir da análise de todos os temas magnetométricos. As imagens da inclinação do sinal analítico (Figura 5.4; Anexo A.1.4a) serviram para melhor observar as estruturas lineares, enquanto que as outras imagens serviram para as demais feições estruturais. Para a interpretação dos lineamentos utilizou escalas de semi-detalhe e detalhe (1:100.000 e 1:50.000).

5.2.3.1 INTERPRETAÇÃO DAS ESTRUTURAS MAGNÉTICAS

A partir da figura 5.4 observa-se uma grande quantidade de feições lineares e quando comparada com a figura 5.2 observa-se a coincidência de alguns valores negativos com as anomalias de maior amplitude do sinal analítico. A interpretação dos lineamentos magnéticos (Figura 5.6) permitiu observar a distinção de vários eventos estruturais magnéticos e foram demarcados aqueles que puderam ser traduzidos em assinaturas devidas às deformações que afetaram a região.

Na parte norte predomina alinhamentos orientados nas direções NE-SW e, secundariamente, NW-SE (Figuras 5.4, 5.5 e Anexo A.1.4a). A norte desta área aparece outro sistema com orientação E-W. Um outro sistema também é observado com direção NW-SE. Este sistema mostra um leve deslocamento pelos conjuntos de estruturas NE-SW e E-W.

Na região central predomina o sistema orientado NE-SW, cortado por outros menos abundantes, principalmente segundo as direções NW-SE e E-W (Figuras 5.4, 5.5 e Anexo A.1.4a). Na parte central dessa área tem-se um sigmóide que se encontra cortado por outras feições lineares de direção E-W. O que se observa nessa sigmóide é que as feições lineares de direção E-W vão mudando de orientação E-W para NE-SW a partir da porção central em direção a sua porção norte. Na porção superior desse sigmóide há uma outra feição linear de direção E-W deslocando todo esse sigmóide para a direita, num movimento para oeste. Na parte oeste dessa área ocorre uma feição que tem forma de uma dobra e acompanha toda a sinuosidade do sigmóide. Na parte leste da região central, há uma série de feições de direção NW-SE que corta todo o centro da área. Na região das principais mineralizações de esmeralda a área é levemente arqueada com vergência para NNW.

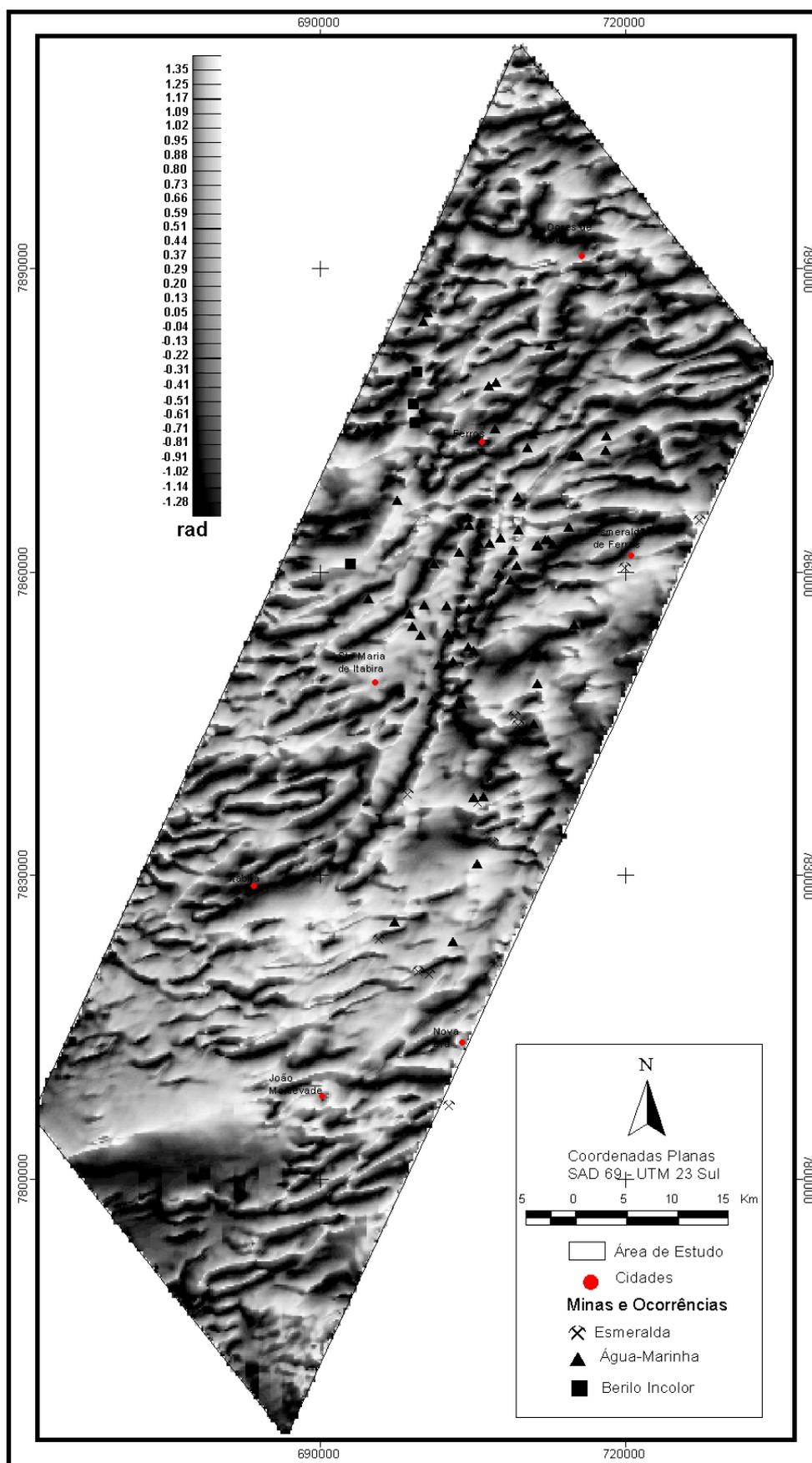


Figura 5.4: Imagem da Inclinação do Sinal Analítico (ISA) de ordem zero em tons de cinza, com iluminação a 45°.

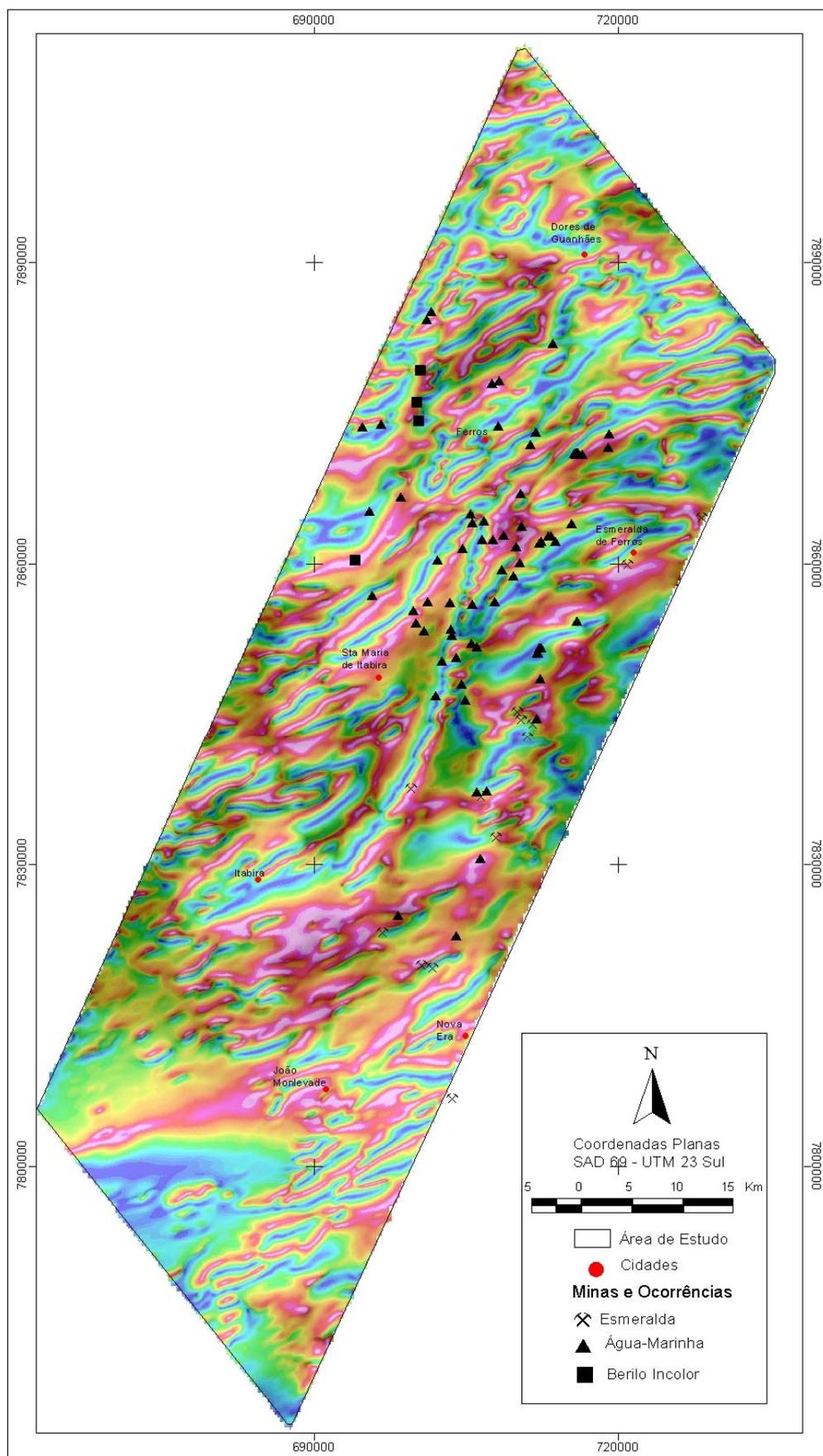


Figura 5.5: Imagem da amplitude do sinal analítico somado a imagem da inclinação do sinal analítico (ASAcinza + ISAcor).

Na porção sul da área predomina o sistema orientado WSW-ENE. O sistema segundo NW-SE também está presente, porém com manifestação mais discreta (Figura 5.4; Anexo A.1.4ba). O que chama a atenção nessa região é uma grande feição linear que corta toda a área com direção NW-SE e que separa dois tipos de relevo, um mais enrugado, centro-sul, e outro mais liso, sul-sudoeste.

O resultado (Figura 5.7) mostrou uma situação onde estes aparecem alinhados em várias direções nos quadrantes NW e NE. O estudo de sua cinemática, porém, deverá ser feito quando forem agregadas informações mais detalhadas da geologia estrutural da área em estudo. Este quadro está bem definido quando examinados em função do seu estudo estatístico (Figura 5.6). A figura 5.7 mostra os lineamentos interpretados a partir de todas as imagens magnéticas..

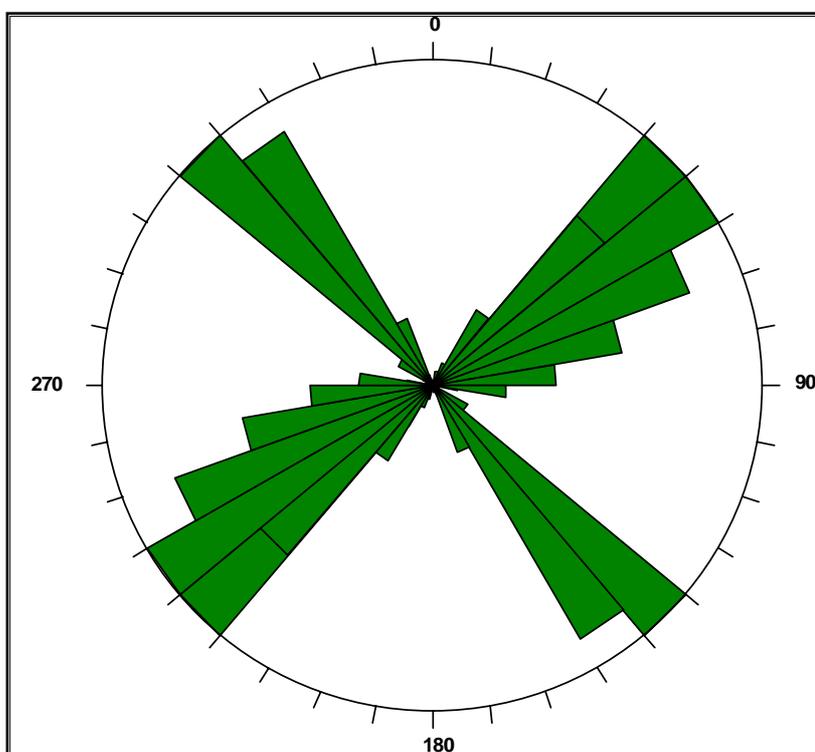


Figura 5.6: Diagrama de roseta obtida da análise dos alinhamentos magnéticos lineares. A direção principal tem direção entre $N40^{\circ} - 60^{\circ}E$. Um segundo conjunto de estruturas tem direção E-W e um terceiro conjunto de lineamentos é observado nas direções $N30^{\circ} - 50^{\circ}W$.

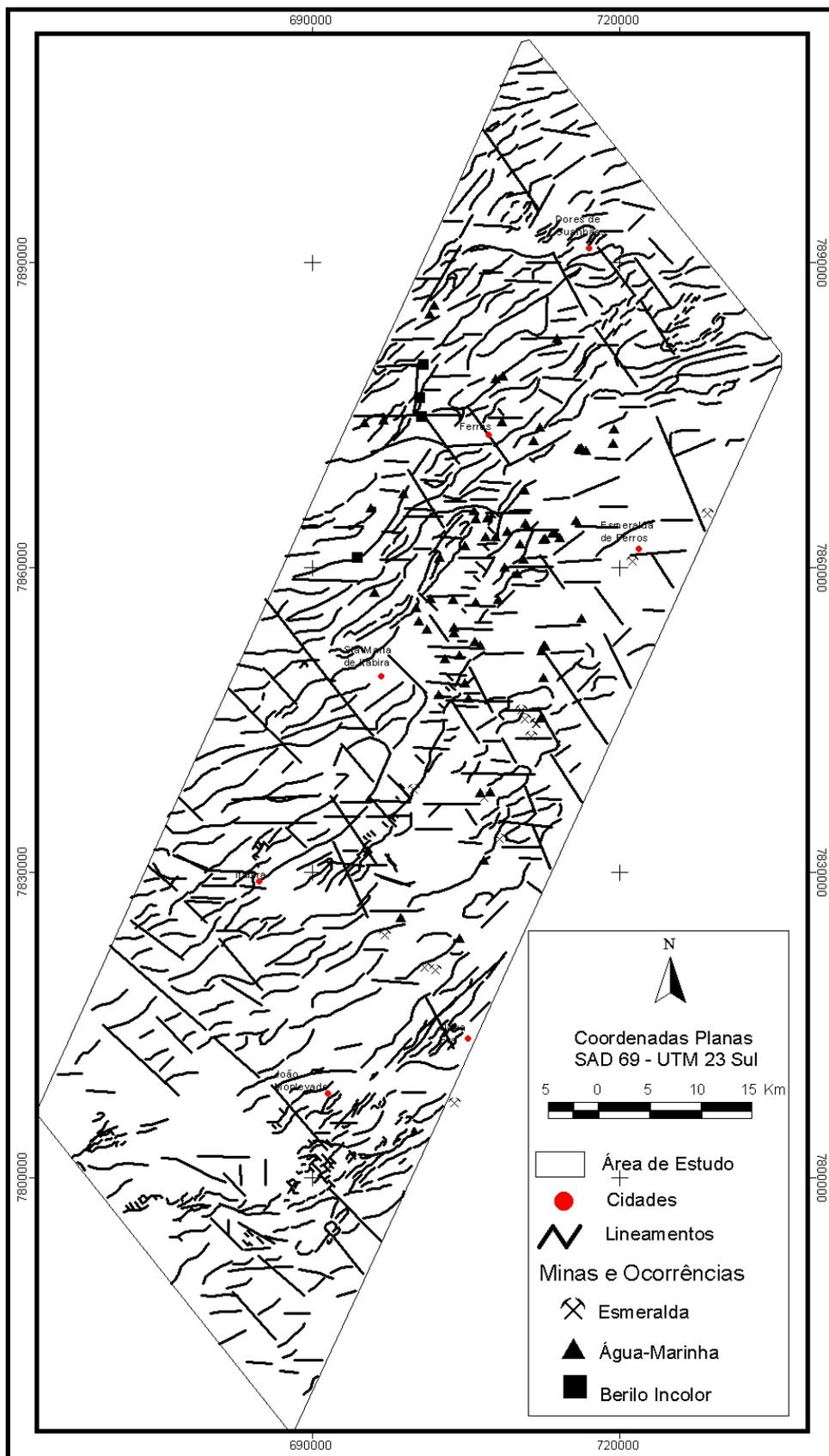


Figura 5.7: Mapa das Estruturas Magnéticas lineares interpretadas a partir de todas as imagens magnéticas. A tendência predominante encontra-se com direção NE-SW, cortados por feições E-W. Já a direção NW-SE é apresentada como evento posterior aos dois primeiros, pois em corta os mesmos em vários locais da área.

5.2.4 Caracterização dos Domínios Magnéticos

De acordo com os estudos do campo magnético anômalo (Figura 5.2) e as diferenças apontadas para as assinaturas que formam o relevo magnético mapeado, procurou representar o que seriam os domínios magnéticos presentes na área de estudo. O campo magnético anômalo e suas transformações foram utilizados neste propósito.

5.2.4.1 FONTES MAGNÉTICAS PROFUNDAS

Para estudar o comportamento do campo magnético ligado às fontes profundas, foram feitas filtragens do tipo passa-baixa a partir de continuação vertical ascendente do campo magnético anômalo (CMA, Figura 5.8).

Nessas filtragens verificam-se diminuições graduais das energias em relação ao CMA (Figura 5.2) e enfatiza-se o relevo magnético pelos comprimentos de onda maiores. Essas diminuições se dão pela perda das frequências espaciais mais elevadas e diminuindo a energia total do espectro (Figura 5.1).

Na parte norte da área em estudo tem-se um relevo marcado por assinaturas de frequências baixas a muito baixas (-115nT a -54nT). Ele é desenhado por feições sinuosas que se orientam WSW-ENE. Essas feições são delimitadas no extremo norte por uma anomalia que uma forma de corpo tabular com forte susceptibilidade magnética (ver detalhe na Figura 5.9). Outras feições com grandes comprimentos de onda, forte susceptibilidade magnética e orientação E-W cortam as feições sinuosas WSW-ENE.

A região central da área é dominado por frequências médias, em torno de 10nT. Nessa região tem-se uma feição em forma de sigmóide. Essa feição corta todo o centro dessa área central e adentra no nordeste da mesma (porção norte) em forma de escamas, com direção NE-SW e mostra em seu interior grandes comprimentos de onda (cerca de 1 km) e forte magnetização ($> 500 \times 10^{-6}$ e.m.u., ver detalhe na Figura 5.8), sendo recortado por feições E-W. Na parte centro-leste da área central, onde se encontram as principais mineralizações de esmeralda, o relevo magnético é marcado por uma transição entre médias e altas frequências, variando de 12nT a 84nT.

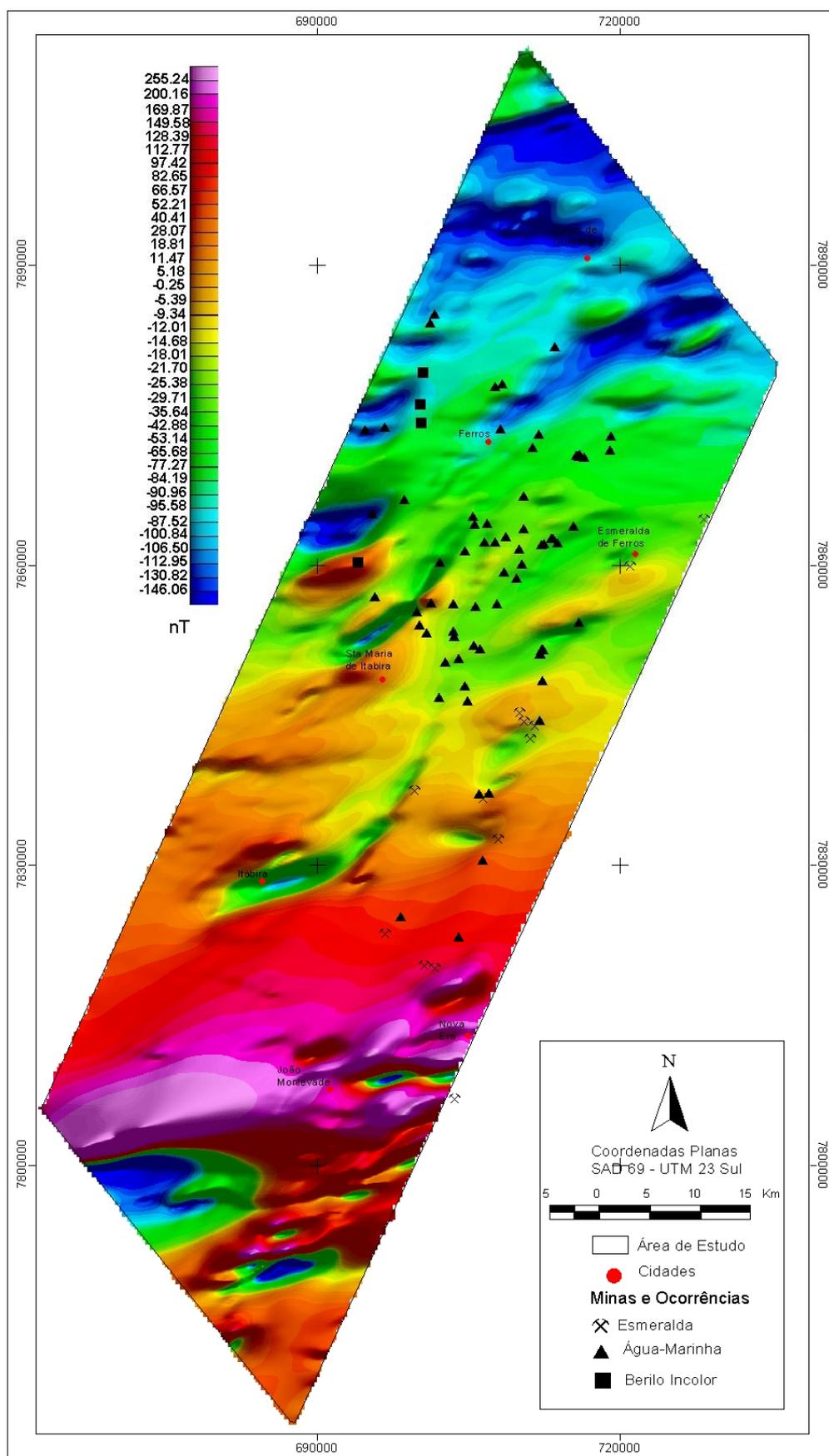


Figura 5.8: Imagem da intensidade do campo magnético anômalo continuado a uma altura de 500 metros.

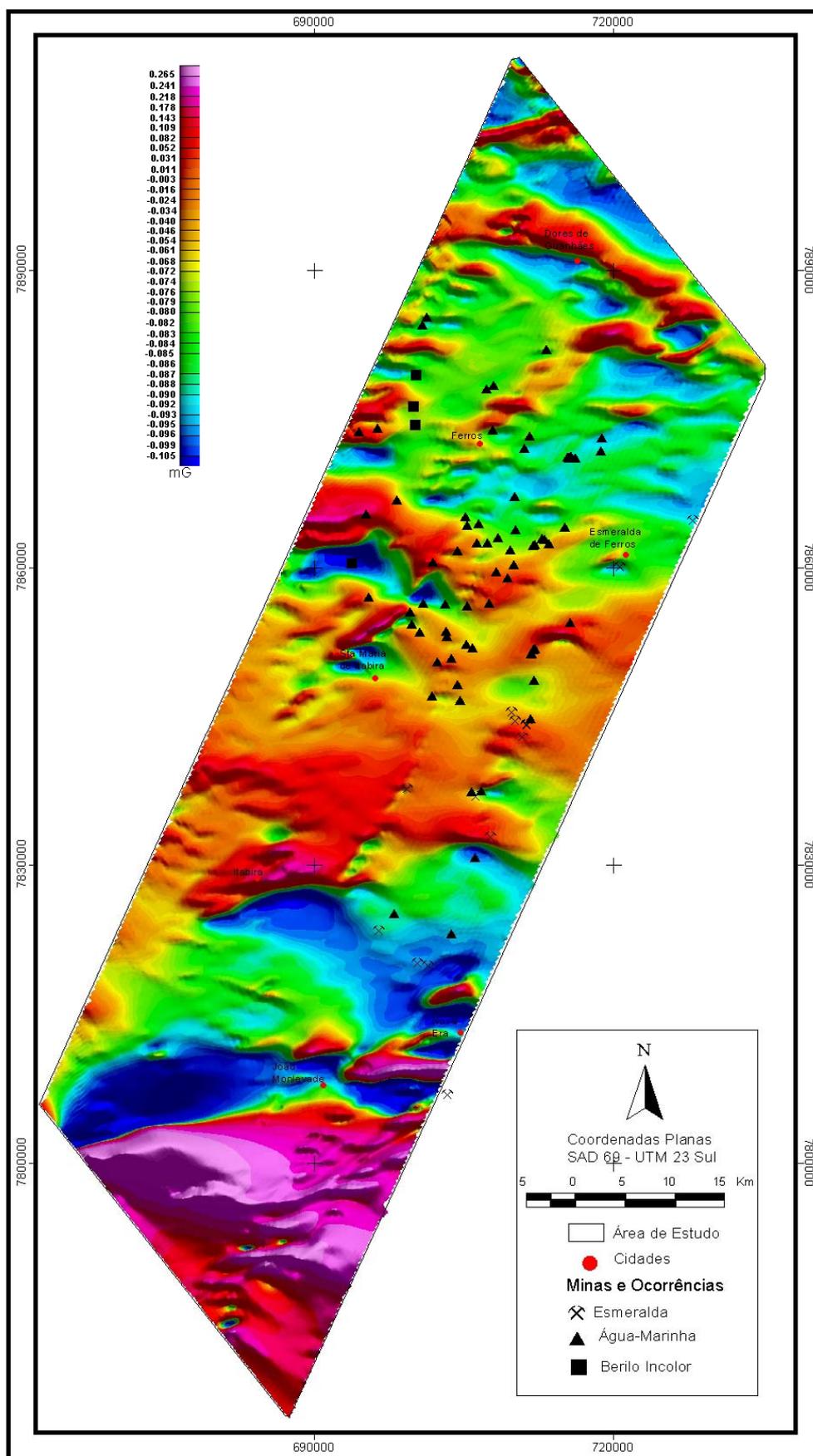


Figura 5.9: Imagem da susceptibilidade magnética aparente do campo magnético anômalo.

Observa-se que na parte oeste da área central há uma espécie de patamar com susceptibilidade magnética mais elevada que o restante de toda área central, em torno de 2,4 km, e semelhante à encontrada na parte sul e algumas porções da parte NW e norte da área, com frequências em torno de 100nT (Figura 5.9).

A anomalia com susceptibilidade magnética (alta) que corta a área com orientação WSW-NNE na sua região central (sigmóide) têm importância no arranjo da estruturação da área. Parece ser cortado por um conjunto de estruturas interessantes mostradas, principalmente, como anomalias lineares de pequeno comprimento de onda na imagem da inclinação do sinal analítico (Figura 5.4).

Na região sul da área as feições que chamam atenção são aquelas ressaltadas por faixas alinhadas com susceptibilidades magnéticas altas ($>600 \times 10^{-6}$ e.m.u). Uma série de estruturas, formada por segmentos WSW-ENE encontra-se deslocada por outras estruturas, aproximadamente N-S. Outra se situa na região um pouco mais acima, na fronteira das áreas central e sul, com direção geral SSW-ENE (Figura 5.9). O que chama a atenção para essa feição mais no centro-sul é a sua baixa susceptibilidade magnética ($< 300 \times 10^{-6}$ e.m.u), formando uma espécie de cunha que separa as duas áreas e penetrando também na porção central. Porções da feição mais a sul, com susceptibilidade magnética alta, penetram nessa unidade (ver detalhe na Figura 5.9). A figura 5.10 mostra o mapa das interpretações das unidades profundas e os domínios foram assim sumarizados:

DP1: Caracterizado por assinaturas muito baixas e tem grande representatividade em área, representando todo o embasamento cristalino da mesma. Esse domínio encontra-se intimamente associado tanto com o domínio DP2 quanto com o DP3.

DP2: Caracteriza-se por assinaturas baixas e ocorre bordejando o domínio profundo DP1.

DP3: Esse domínio é composto por assinaturas médias e tem grande extensão em área.

DP4: É caracterizado por assinaturas variando de alta a muito alta.

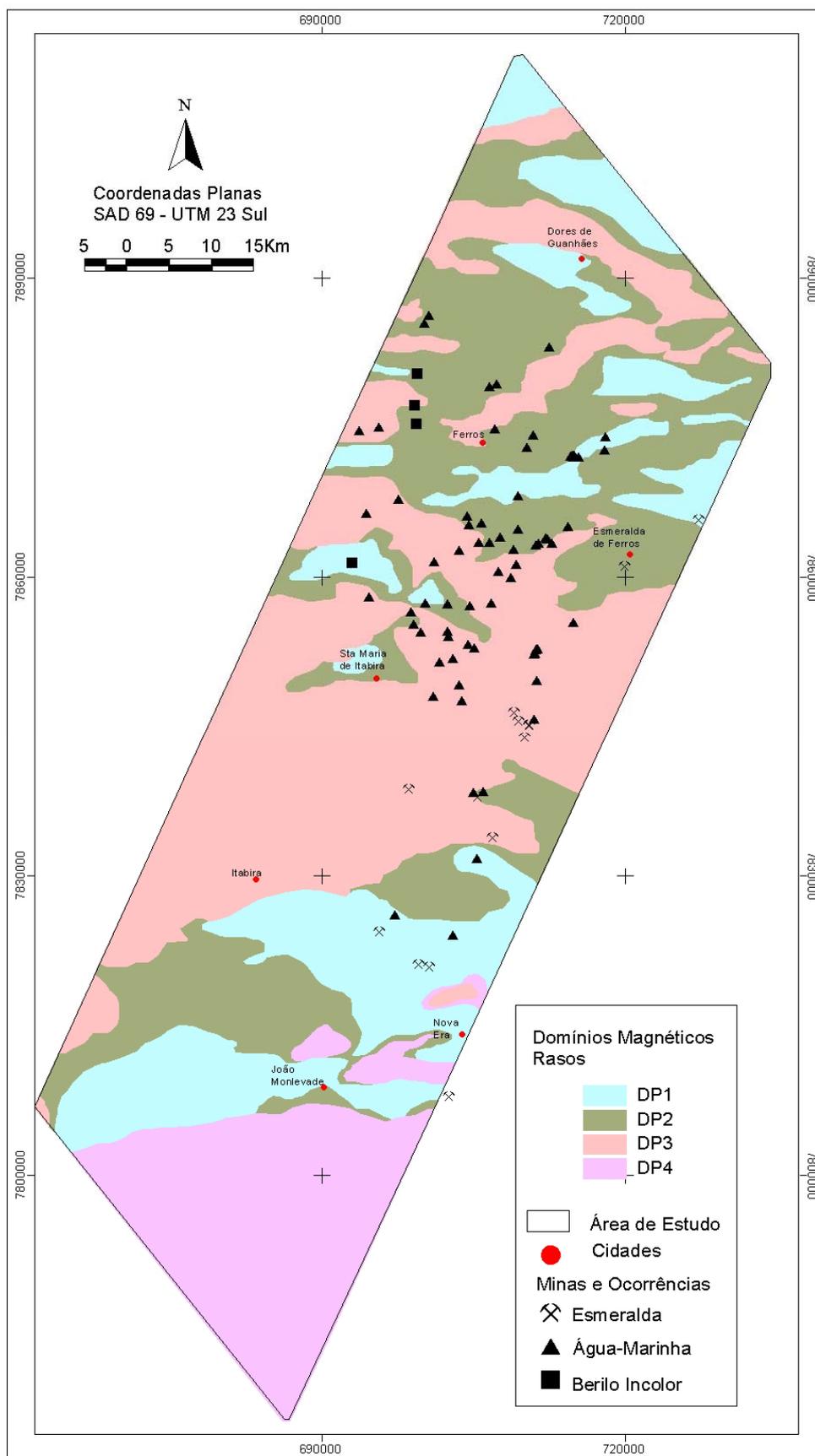


Figura 5.10: Domínios magnéticos interpretados a partir das fontes profundas. A unidade DP1 representa uma assinatura magnética muito baixa. A unidade DP2 possui assinatura baixa, enquanto que a DP3 tem assinatura média e a DP4 assinatura variando de alta a muito alta.

5.2.4.2 FONTES MAGNÉTICAS RASAS

Para obter as fontes magnéticas rasas foi utilizado um processo inverso ao anterior, tentando isolar as assinaturas de alta frequência espacial, que representa as fontes magnéticas mais rasas daquelas mais profundas. Uma forma de obter esta assinatura foi pela diferença entre os valores do campo magnético anômalo e sua versão continuada a 1000 metros de altura (Figura 5.11) e a utilização da amplitude do sinal analítico (ASA; Figura 5.12; Anexo A.1.4b). Outra forma de obter essa assinatura foi o uso dos produtos das derivadas que permite a observação das assinaturas de grande comprimento de onda (Anexos A.1.1 a A.1.3). Além desses produtos, utilizou-se também a composição da amplitude do sinal analítico com a inclinação do sinal analítico (ou fase do sinal analítico; Figura 5.13) e realça os detalhes de menor comprimento de onda do relevo magnético, que devem representar melhor o comportamento dos metassedimentos que cobrem o cristalino no local.

A partir da porção norte observa-se que aquelas feições com comprimentos de ondas maiores delimitados nos domínios profundos aqui se mostram mais magnéticos do que as assinaturas das fontes mais profundas. Já aqueles conjuntos de assinaturas lineares que dominam a parte central e norte da parte norte se mostram mais profundos.

Na região central o relevo se mostra mais suave e monótono, com exceção da feição em forma de sigmóide que corta todo o centro da área e pequenas feições que ocorrem no centro-leste desse bloco.

Já a parte sul da área mostra feições que parece ter uma profundidade maior que as demais regiões da área, principalmente a feição do centro-sul da mesma que é bem marcada por uma estrutura de direção NW-SE que separa visivelmente esse bloco do restante da área (Figura 5.12).

A observação da disposição das assinaturas anômalas de alta frequência espacial permite verificar o comportamento estrutural das feições magnéticas que formam o relevo magnético mapeado. No bloco norte observa-se um entremeado de feições vem desde o bloco central e adentra neste, algumas feições vergem para NE e outras continuam para N. No extremo WNW deste bloco uma feição linear é identificada. Essa feição é recortada por uma série de feições sinuosas com orientações E-W. Aquela feição delimitada ao norte por uma anomalia com forte susceptibilidade magnética também é identificada aqui. Além daquelas feições de orientação E-W que cortam as feições

sinuosas WSW-ENE. Vale ressaltar que no centro da área, essa feição E-W verge para leste, sendo cortada por aquelas que vem do bloco central.

Na parte NE do bloco norte ocorre uma feição semelhante a uma ferradura, com a abertura voltada para SW (Figuras 5.11, 5.13). Na imagem do CMA (Figura 5.2) essa feição tem a forma de uma pequena dobra. Outras feições de direção NW-SE também cortam a área. A figura 5.14 mostra o mapa interpretado para as unidades rasas e os domínios foram assim sumarizados, em frequências:

DR1: Caracterizado por assinaturas muito baixas e tem grande representatividade em área, representando todo o embasamento cristalino da mesma. Esse domínio encontra-se intimamente associado com todos os domínios.

DR2: Caracteriza-se por assinaturas baixas e ocorre bordejando o domínio profundo DR1.

DR3: Esse domínio é composto por assinaturas médias e tem grande extensão em área.

DR4: É caracterizado por assinaturas variando de alta a muito alta.

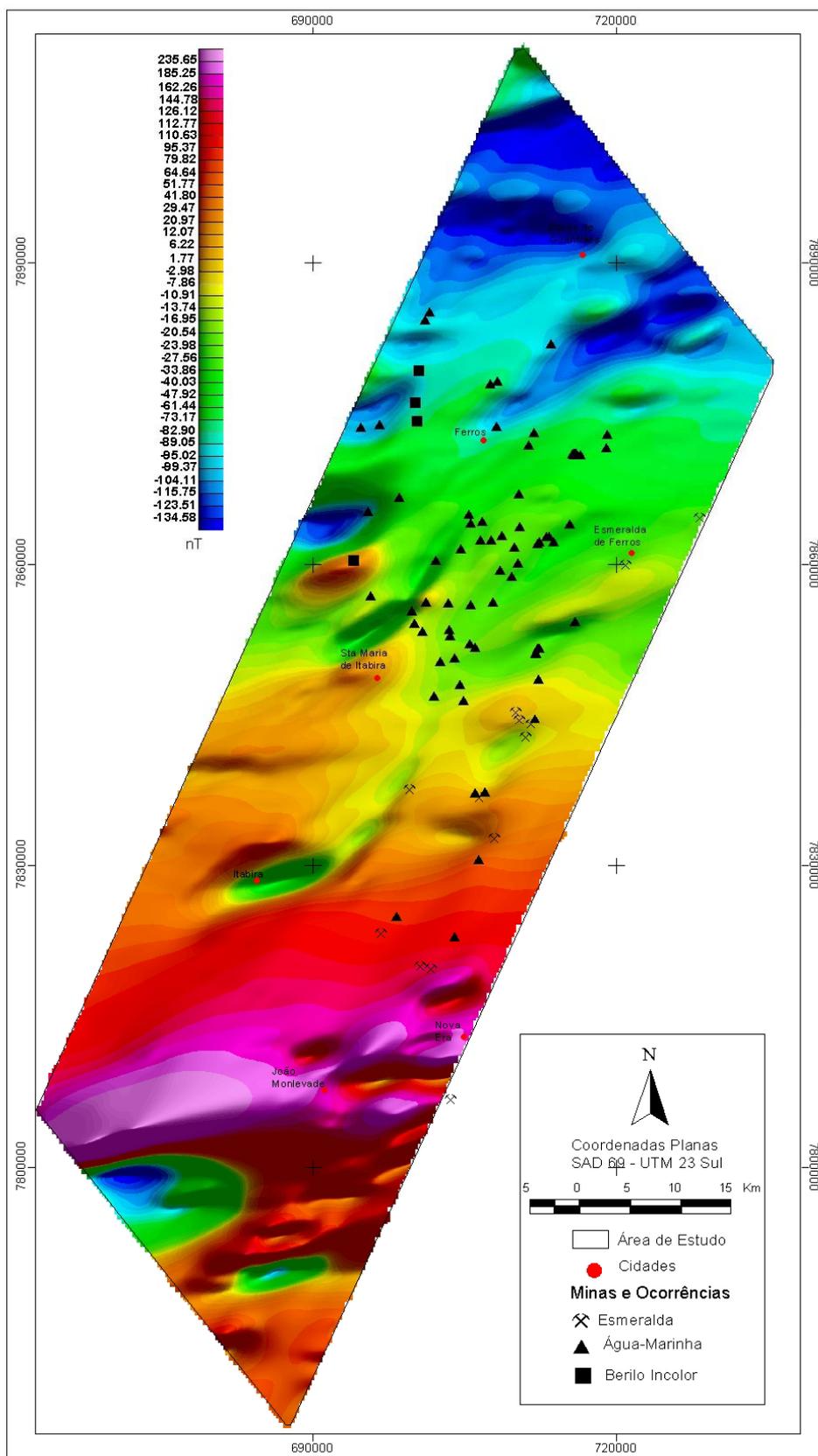


Figura 5.11: Imagem da intensidade do CMA continuado a uma altura de 1000 metros.

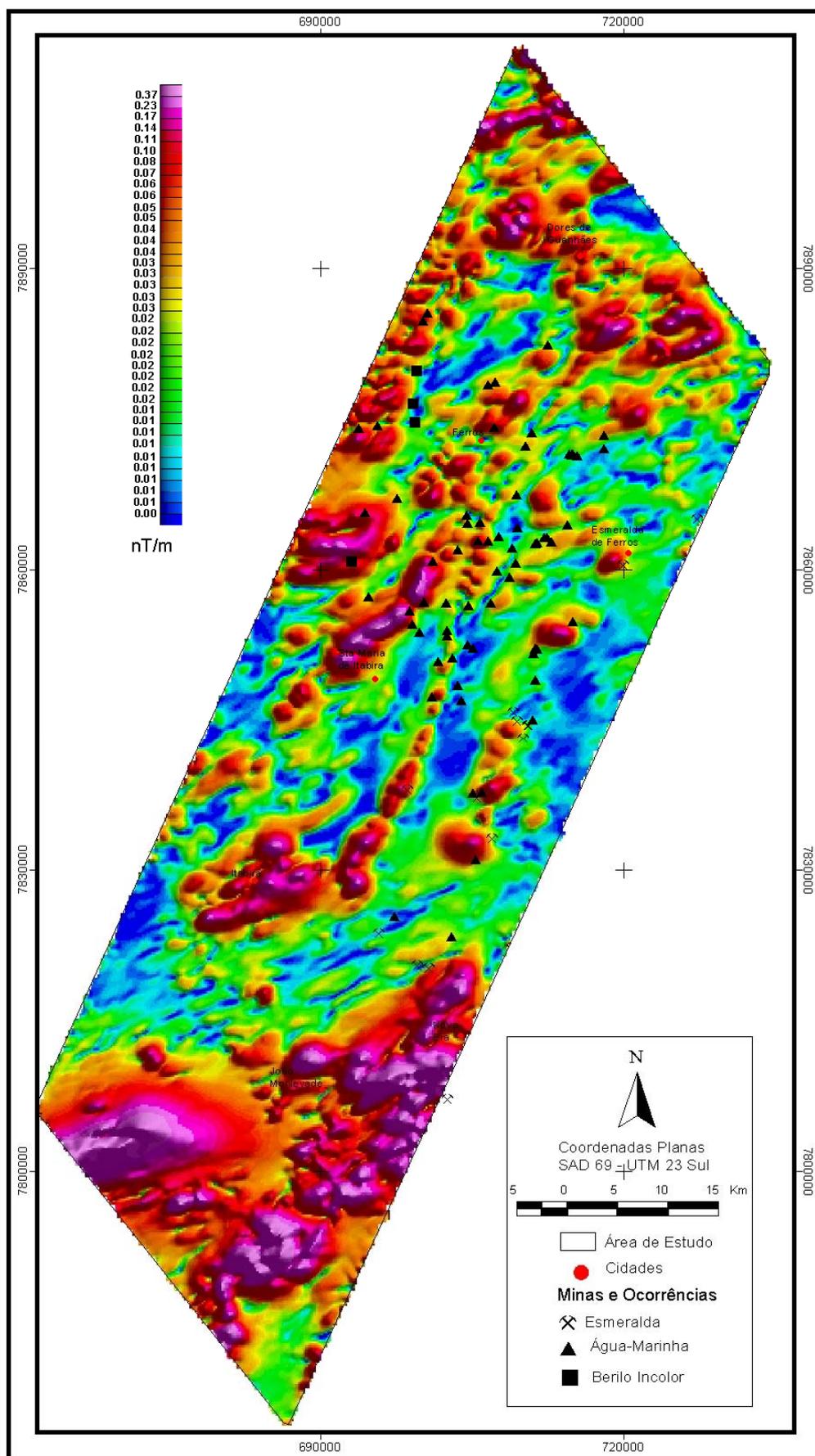


Figura 5.12: Imagem da Amplitude do Sinal Analítico de ordem zero.

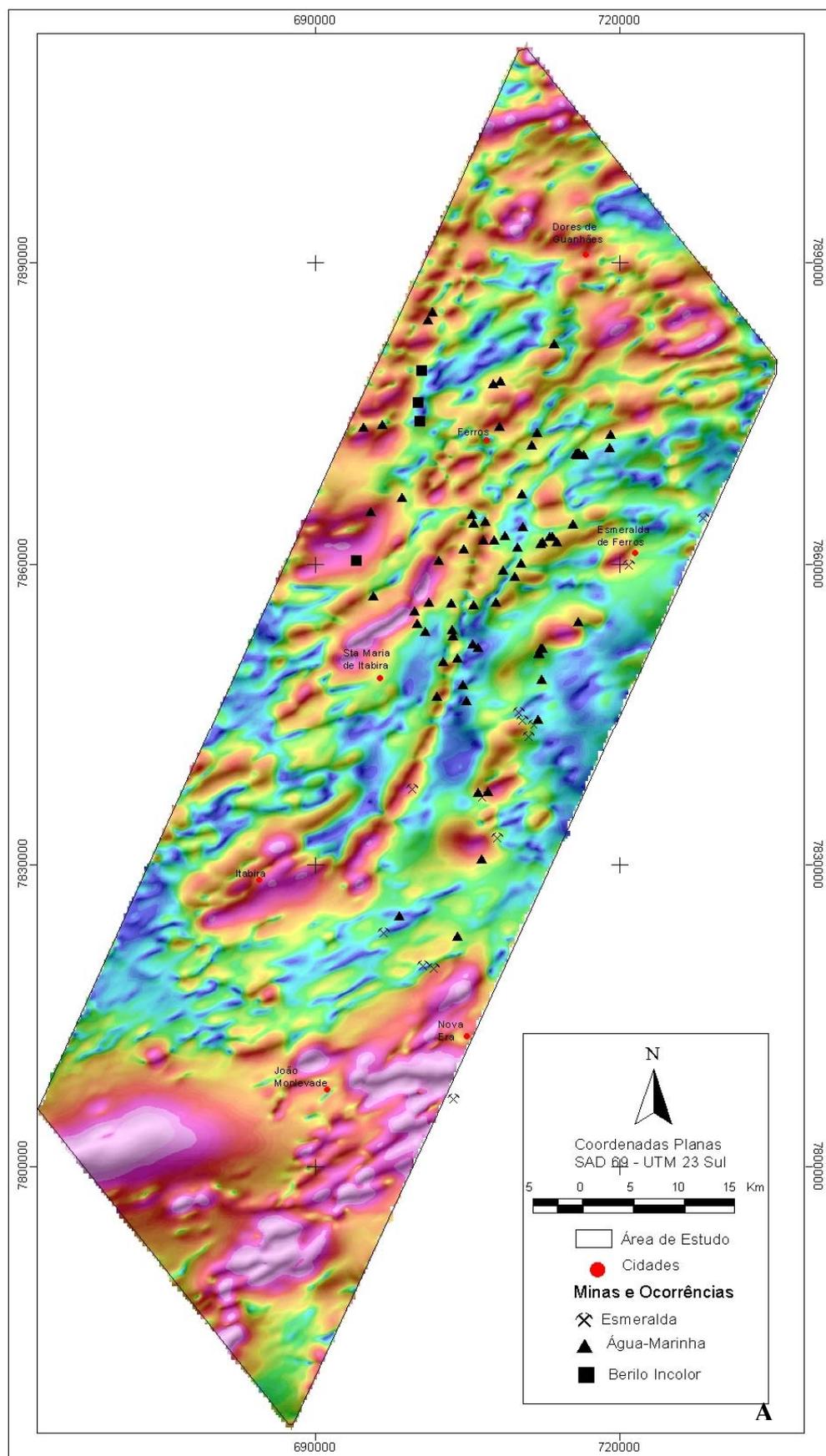


Figura 5.13: Imagem da Amplitude do sinal analítico de ordem zero somada a imagem da inclinação do sinal analítico (ASAcinza+ISAcor).

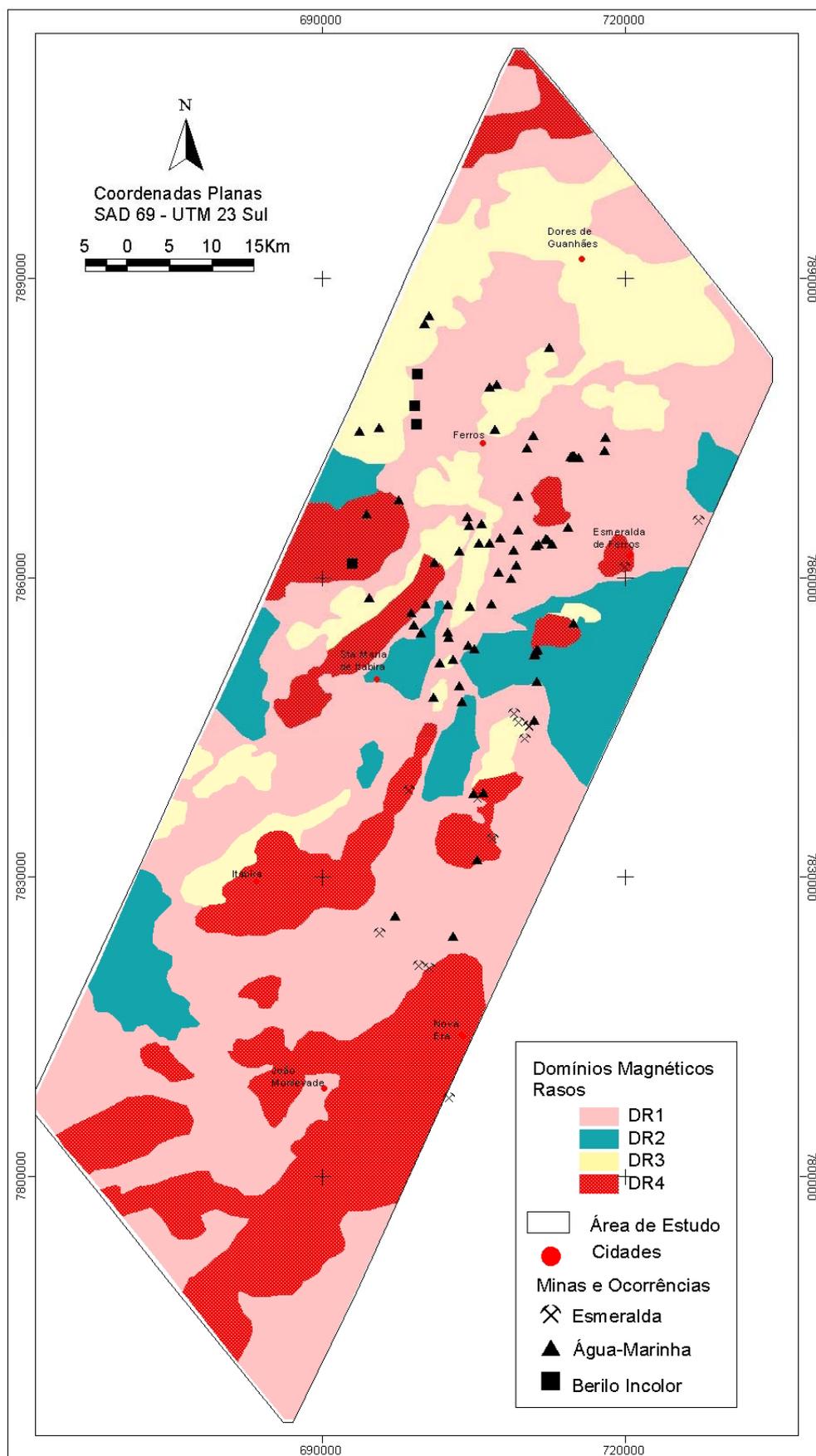


Figura 5.14: Domínios magnéticos interpretados a partir das fontes rasas. A unidade DR1 representa uma assinatura magnética muito baixa. A unidade DR2 possui assinatura baixa, enquanto que a DR3 tem assinatura média e a DR4 assinatura variando de alta a muito alta.

5.2.5 Deconvolução de Euler

Os resultados da deconvolução de Euler (Figura 5.15 e Anexos A.1.6 a A.1.8) indicaram que o índice mais apropriado para caracterizar as feições magnéticas da área (de menor dispersão) é o zero (Figura 5.15), cujo modelo físico (magnetométrico) é o de uma linha de pólos. Sua transcrição geológica seria aquele referente aos contatos.

A análise das profundidades obtidas para os quatro índices (Tabela 5.1) confirma o que está mostrado na análise do espectro de potência para o CMA (Figura 5.1), ou seja: o grupo de maior representatividade (maior energia) é o das fontes mais superficiais, com profundidade na faixa entre 77,62 metros e 4073,80 metros com média ao redor de 2000 metros (distribuição lognormal; Tabela 5.1 e Figura 5.15). É possível que esta faixa de profundidades tenha como teto a superfície do embasamento cristalino, o qual estaria cerca de 630 metros. Assim, as maiores profundidades indicadas, na faixa de 1.800 metros, devem representar feições intra-embasamento (Tabela 5.1; Figura 5.15).

Os resultados mostrados nas figuras 5.15 e Anexos A.1.6 a A.1.8 foram obtidos usando uma tolerância suficientemente baixa (3%) para que os resultados fossem encontrados e que essas profundidades pudessem ser usadas como algum guia sobre esta característica das fontes locais.

O exame das informações sobre profundidade dos corpos tabulares descritos mostra que seus topos não são aflorantes, e estão entre 165 e 600 metros.

Para o estudo destas informações sob o ponto de vista estrutural, usou-se resultados para uma deconvolução com índice zero obtida com uma tolerância de 10%. Esta aproximação provou ser útil no estudo das feições lineares, como é mostrado na figura 5.16. A figura 5.17 traz uma integração das unidades magnéticas rasas com a imagem da figura 5.16. Nessa figura é possível observar as principais feições mapeadas pela deconvolução de Euler em cada unidade.

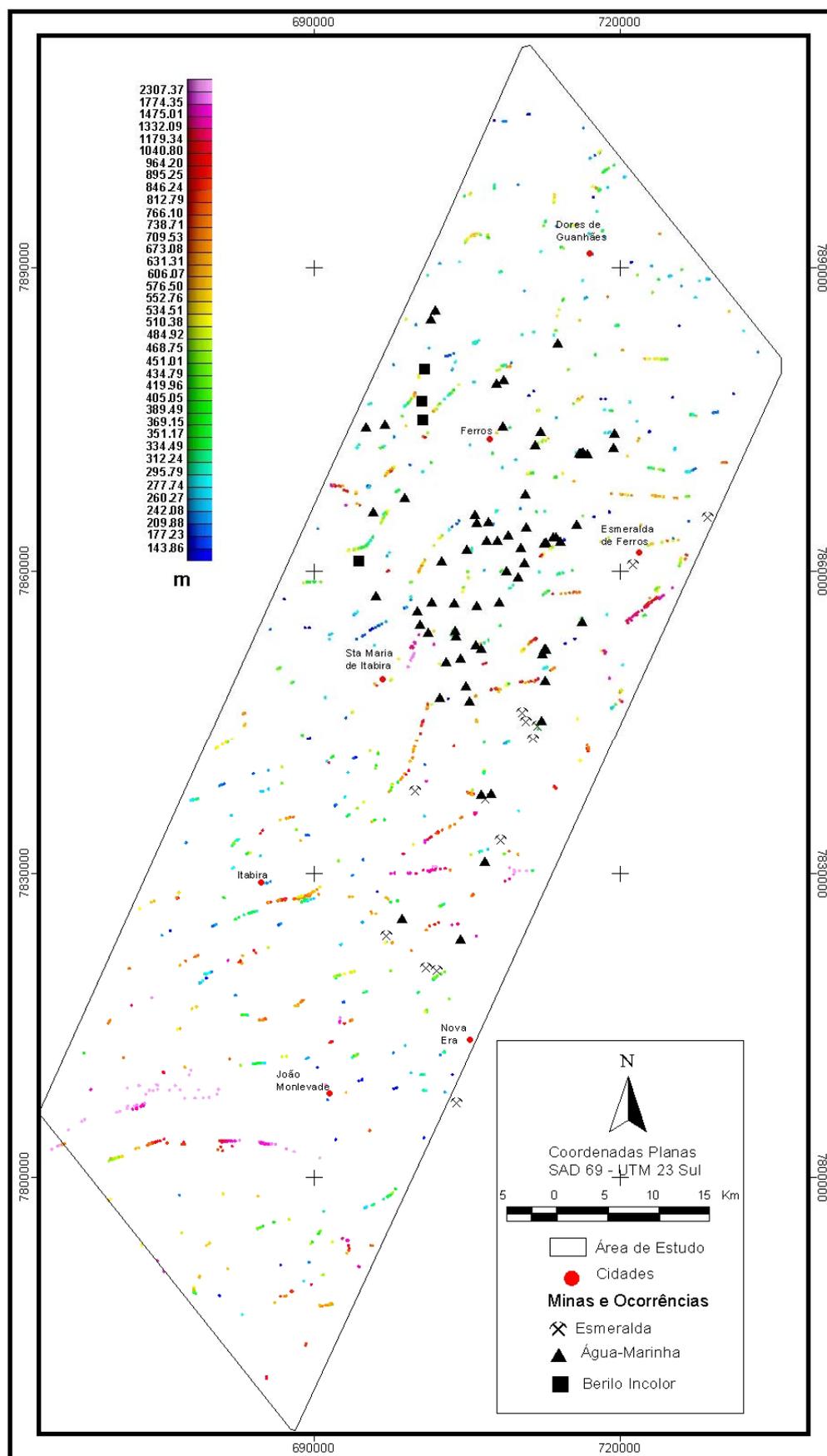


Figura 5.15: Mapa com os resultados da Deconvolução de Euler para o índice 0, obtido para uma tolerância suficientemente baixa, 3%.

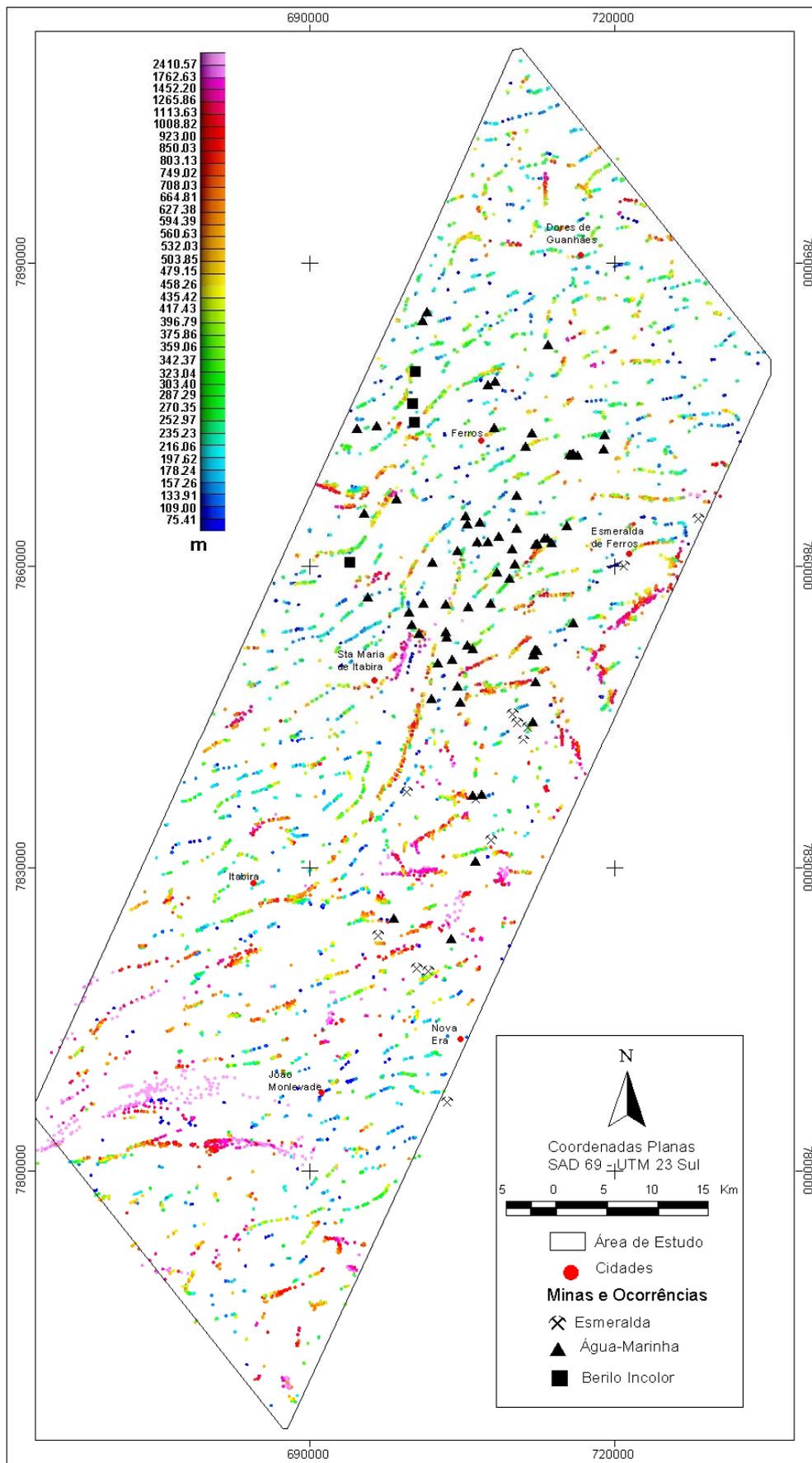


Figura 5.16: Mapa com os resultados da Deconvolução de Euler para o índice 0, obtido para uma tolerância de 10%.

Tabela 5.1 – Sumário estatístico das profundidades determinadas pela Deconvolução de Euler para os quatro índices básicos. ⁽¹⁾ Análise feita com base numa distribuição lognormal dos valores positivos da profundidade obtidos após a correção da altura de vôo (150 m).

Parâmetro	DE ₀		DE ₁		DE ₂		DE ₃	
	log	m	log	m	log	m	log	m
Determinações válidas	350	350	990	990	1,141	1,141	1,164	1,164
Valor mínimo	1,89	77,62	2,22	165,96	2,56	363,08	2,70	501,20
Valor médio –3 desvios padrões	1,99	97,72	2,18	151,36	2,42	263,03	2,63	426,58
Valor médio –2 desvios padrões	2,26	181,97	2,40	251,19	2,62	416,87	2,82	660,69
Valor médio –1 desvios padrões	2,53	338,84	2,62	416,87	2,82	660,69	3,01	1023,29
Valor médio	2,80	630,96	2,84	691,83	3,02	1047,13	3,20	1584,89
Valor médio +1 desvios padrões	3,07	1174,90	3,06	1148,15	3,22	1659,59	3,39	2454,71
Valor médio +2 desvios padrões	3,34	2187,76	3,28	1905,46	3,42	2630,27	3,58	3801,89
Valor médio +3 desvios padrões	3,61	4073,80	3,50	3162,28	3,62	4168,69	3,77	5888,44
Valor máximo	3,39	2454,71	3,79	6165,95	3,96	9120,11	4,10	12589,25
Desvio padrão ⁽¹⁾	0,27	429,05	0,22	503,28	0,20	715,35	0,19	937,50

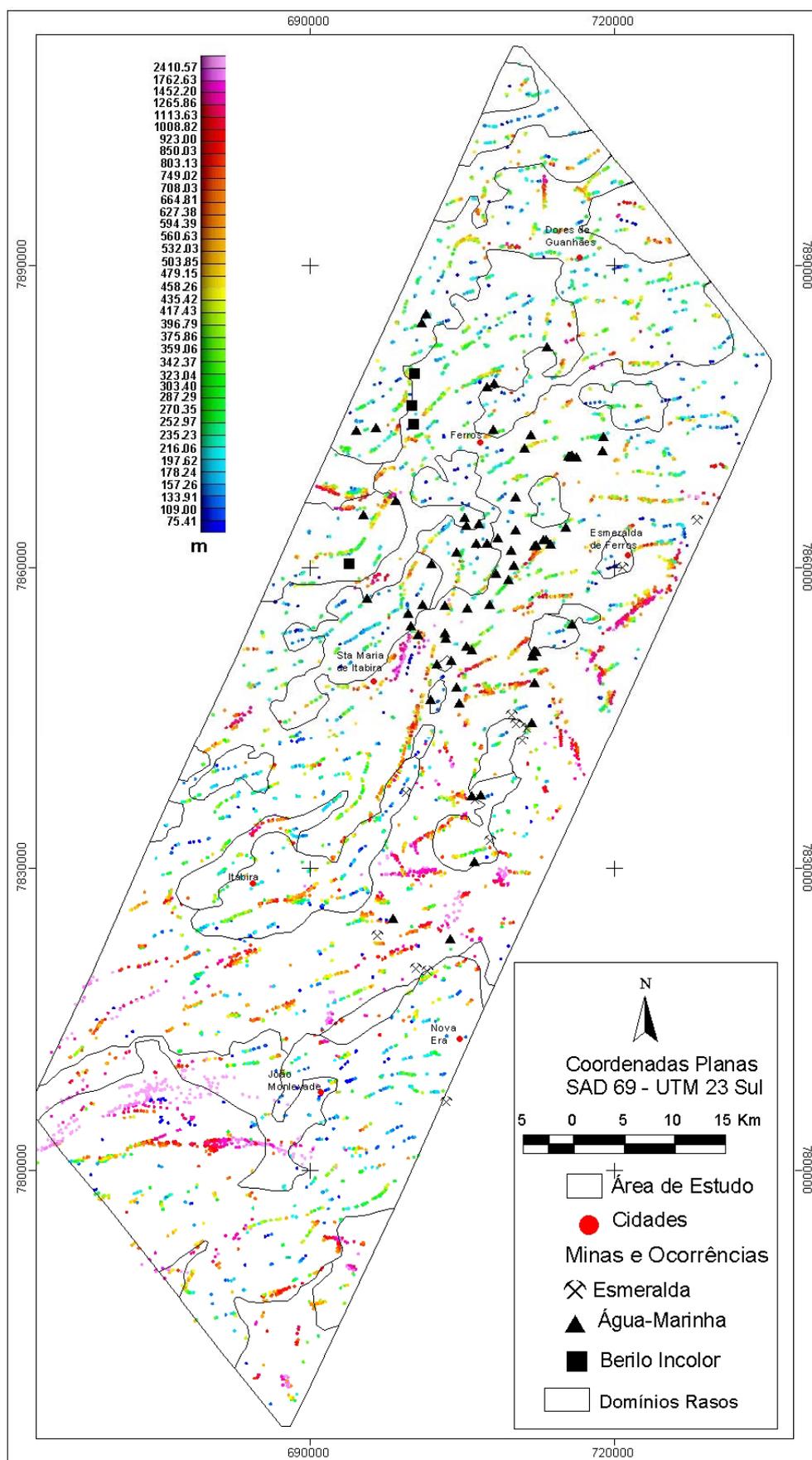


Figura 5.17: Mapa dos Domínios Magnéticos Rasos com os resultados da Deconvolução de Euler para o índice 0, obtido para uma tolerância de 10%.

5.2.6 Mapa das Unidades e Estruturas Magnéticas Interpretadas

A superposição das estruturas (Figura 5.7) e dos domínios magnéticos profundos e rasos (Figuras 5.10 e 5.14) possibilitou gerar mapas de interpretações das características e informações principais tiradas do mapeamento da intensidade do campo magnético anômalo na área de estudo (Figuras 5.18a e b). Estes mapas resumem o trabalho de interpretação feito sobre todos os temas gerados e representa uma síntese do que se considerada mais importante, do ponto de vista do mapeamento geológico.

O mapa das unidades e estruturas magnéticas interpretadas contempla informações úteis ao entendimento do arcabouço estrutural da área, dando uma idéia de sua possível compartimentação geológica, das estruturas lineares e, em alguns casos, da cinemática que esta estruturação submeteu aos litotipos locais. O mapa mostra também uma série de informações sobre a subsuperfície e, por isso, algumas delas podem não ser aparente nos estudos fotogeológicos *sensu lato* e mesmo se revelarem no mapeamento geológico. Todavia, nem por isso deixam de ser importantes no entendimento de fatos como é o caso das ocorrências de esmeralda na região.

Vale salientar que as informações estruturais dedutíveis destes dados mostram que o comportamento estrutural tem dois significados importantes: um está ligado ao comportamento das fontes magnéticas profundas e, o outro, ao das fontes mais superficiais (provavelmente, os primeiros 500 m da subsuperfície).

O primeiro representaria o caso de domínios identificados como profundos (Figura 5.18a). Esse teria comportamento mais dúctil, típico das rochas que compõem o embasamento da região em foco (unidades DP1 e DP2, Figura 5.10), capaz de exibir estruturas dobradas de formas complexas, mais de possível entendimento geral.

O segundo significado reflete um comportamento mais rúptil, considerado em um conjunto de blocos falhados e movimentados uns contra os outros, ou paralelamente entre si, tanto horizontalmente nas direções estruturais típicas (E-W e NW-SE) como verticalmente. Reproduziria, assim, uma visão do arcabouço tectônico/estrutural, a qual se procurou representar nos domínios correspondentes às fontes magnéticas rasas (Figura 5.18b).

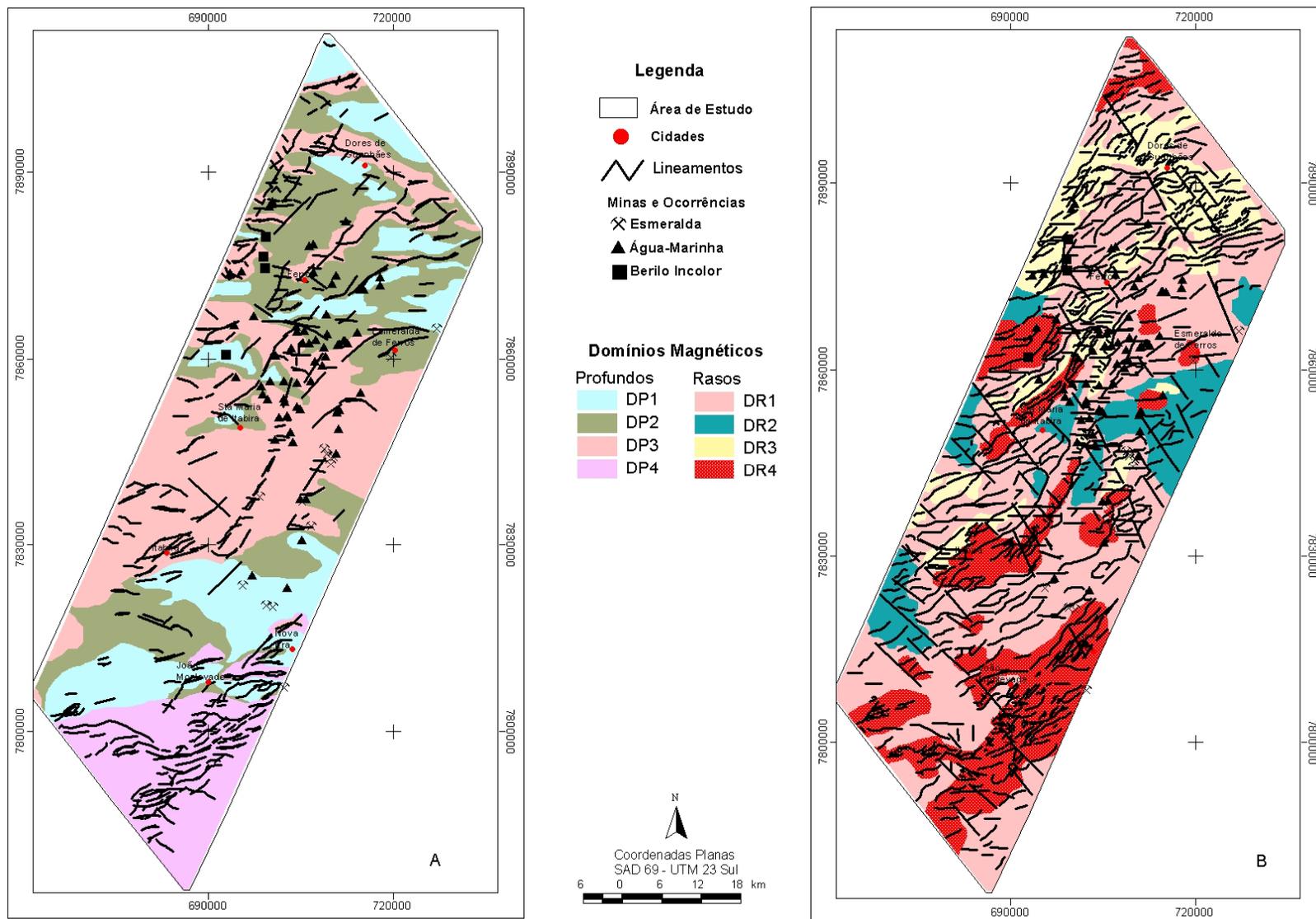


Figura 5.18: Mapa dos Domínios e Estruturas Magnéticas Interpretadas. Em (A) tem-se os Domínios Profundos e (B) Domínios Rasos. Observa-se que nos domínios profundos tem predominância de estruturas dúcteis, enquanto que nos domínios rasos tem-se estruturas dúcteis quanto rúpteis.

Integração dos Dados Geofísicos a Geologia e à Prospecção Mineral

E acontecerá que todo aquele que invocar o nome do SENHOR será salvo (At 2:21).

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é discutida a integração dos dados de interpretação magnética e gamaespectrométrica e o resultado dessa integração com a geologia. No primeiro tema foi feita uma correlação a partir observação da sobreposição dos mapas interpretativos dos dois temas. As imagens geradas a partir dos dados dos dois campos físicos medidos referem-se a fontes diferentes, baseados em princípios físicos distintos. Portanto, essa superposição de informações oriundas de suas interpretações foi feita com muito cuidado, integrando apenas aqueles dados onde se obteve a representação de unidades de caráter mais superficial da magnetometria, como no caso das derivadas de 2ª ordem e a amplitude do sinal analítico (Anexo A.1.4), a partir daí fez a composição dos dois temas. O segundo tema foi a integração desses temas geofísicos com a geologia regional conhecida.

Procura-se apresentar também neste capítulo a integração dos resultados da geofísica e geologia a mineralização. Este estudo foi refinado do ponto de vista de prospecção mineral, com a correlação da integração acima. Para tanto, fez-se um recorte na região de maior ocorrência de esmeralda, a porção leste da área. Esse novo banco de dados foi processado e interpretado numa escala de 1:25.000. Os parâmetros desse processamento foram os mesmos utilizados no capítulo 3.

6.2 INTEGRAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS

Para realizar esse tipo de interpretação deve-se ter em mente os fatores determinantes das diversas assinaturas anômalas nos métodos usados ao se examinar os resultados das superposições e interseções das informações geradas em função do que devem, em realidade, representar em termos de unidades e feições geológicas.

As informações gamaespectrométricas representam o imageamento de maior proximidade ao que é observável na superfície (Figura 6.1A). Já as informações magnetométricas geradas a partir das várias transformações feitas complementam as gamaespectrométricas no sentido de lhes conferir uma extensão em profundidade. As unidades mapeadas devem ser entendidas tanto em seu aspecto de arcabouço profundo (Figura 6.1B) como em termos das unidades mais superficiais (rasas) (Figura 6.1C). Estas últimas têm aspectos diferentes, porém complementares àquelas da gamaespectrometria.

Um primeiro critério utilizado na correlação das informações foi a sobreposição espacial entre os domínios e subdomínios gamaespectrométricos com o magnético (Figuras 6.2 A e B). Uma boa sobreposição foi indicativa de correlação. Algumas unidades não mostraram correlação entre os domínios gamaespectrométricos com os magnéticos, outros apresentam excelente correlação espacial. Aquelas unidades que não tiveram sobreposição foram consideradas os domínios gamaespectrométricos. Foram definidas no total 27 unidades de integração (Figura 6.3).

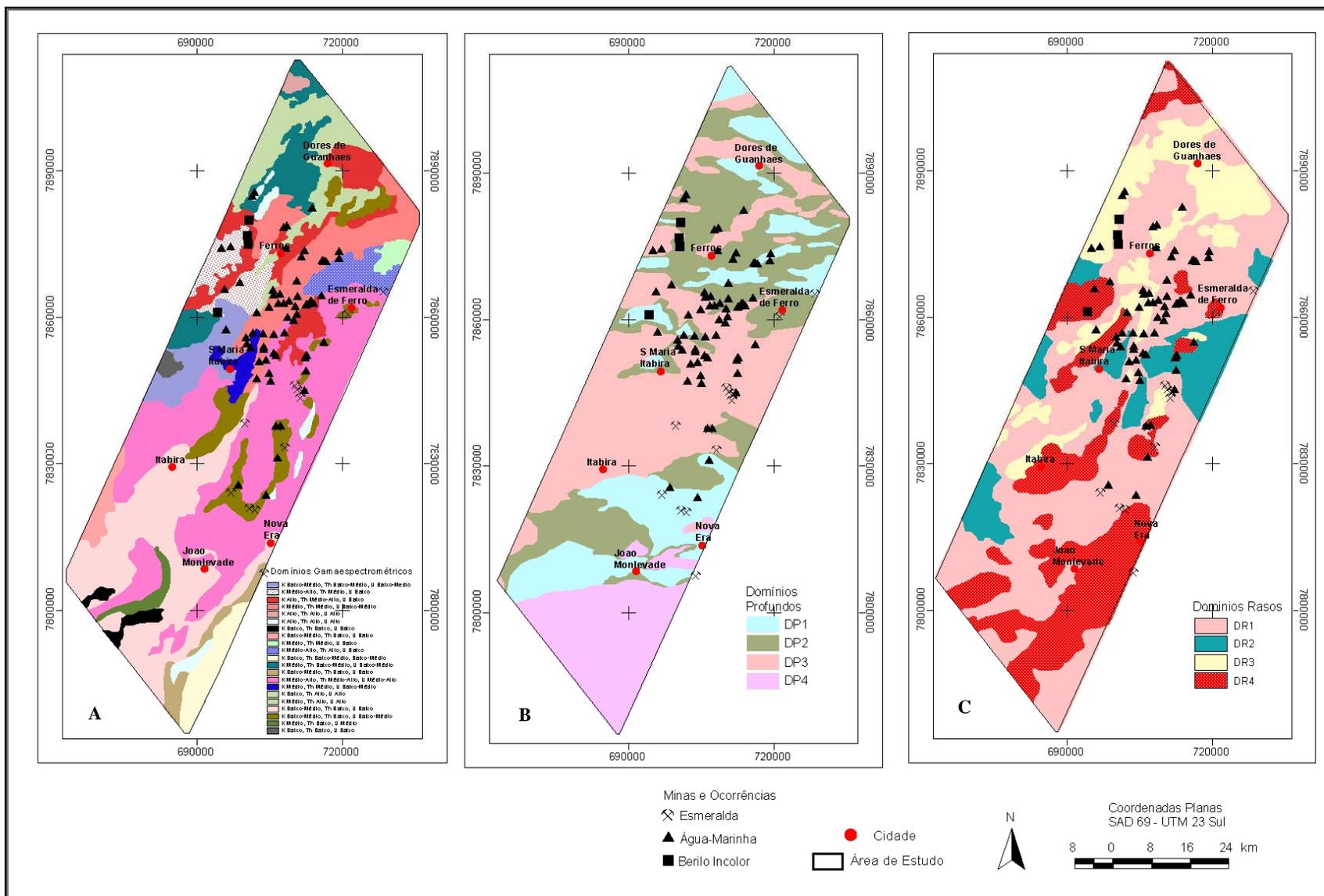


Figura 6.1: Imagem mostrando os mapas dos domínios gamaespectrométricos (A), domínios magnetométricos profundos (B) e rasos (C) utilizados na integração geofísica.

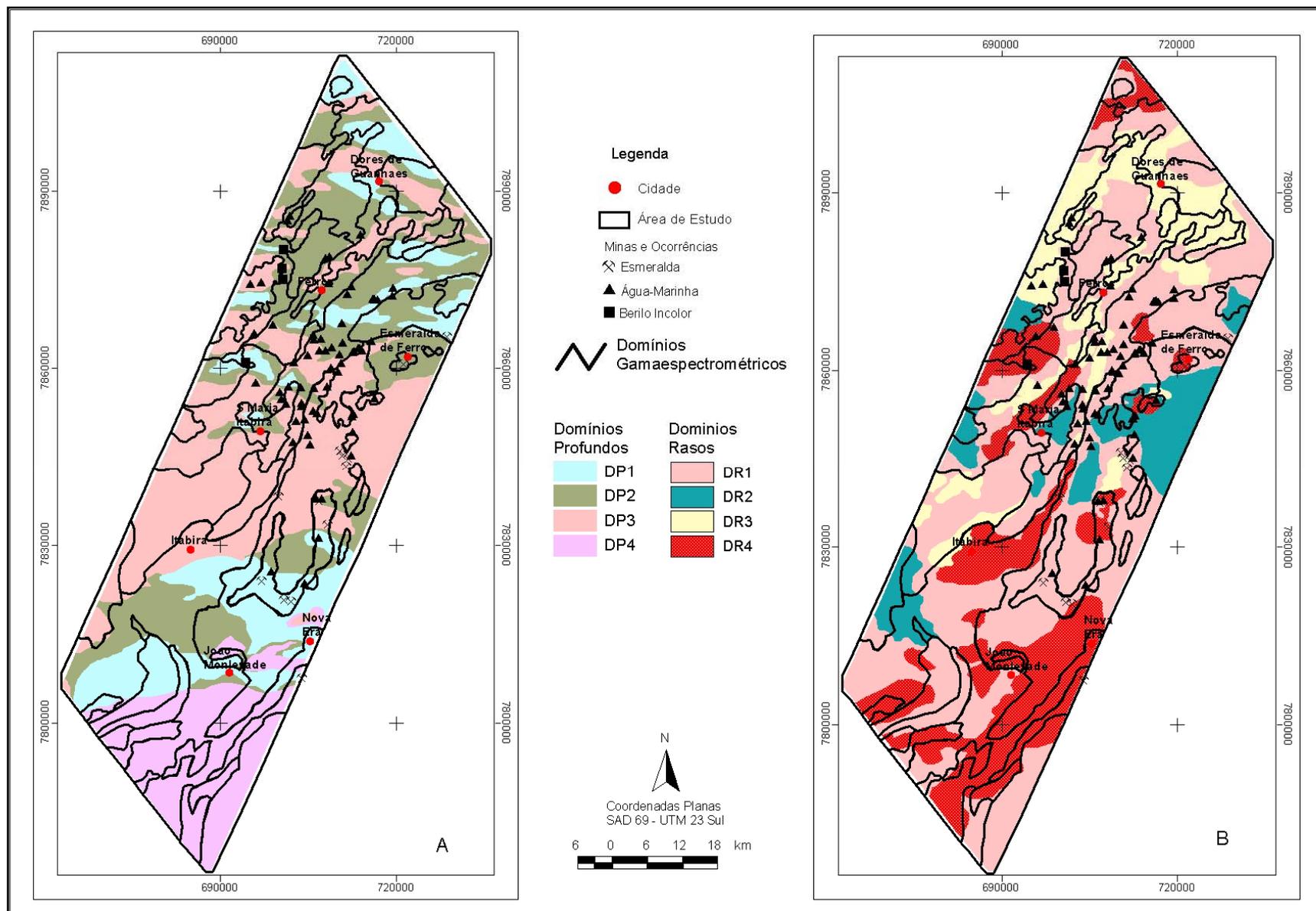


Figura 6.2: Domínios gamaespectrométricos sobre os domínios magnéticos profundos (A) e rasos (B).

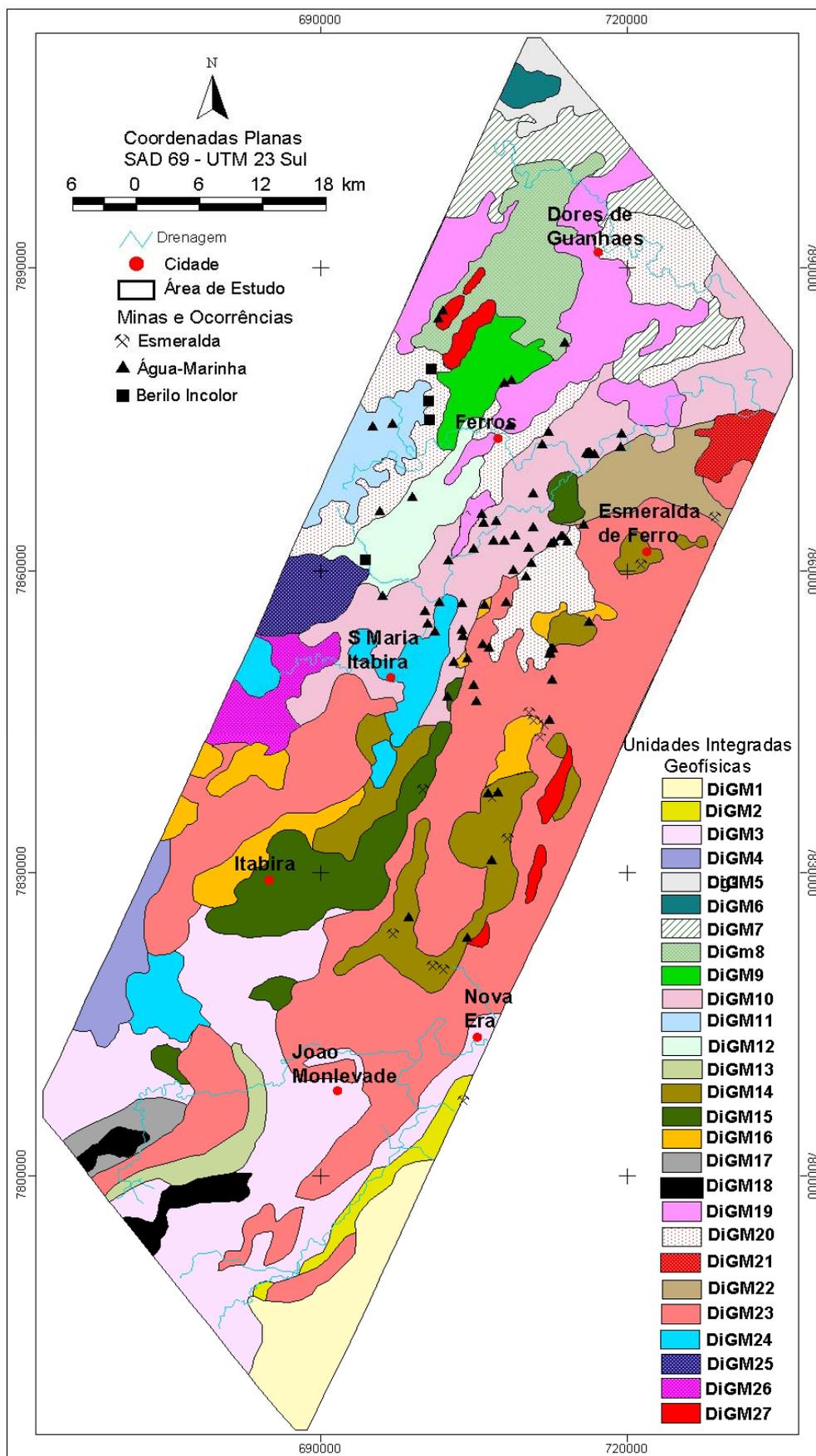


Figura 6.3: Mapa mostrando a integração dos resultados dos domínios profundos e rasos da magnetometria com os domínios obtidos a partir da gamaespectrometria (ver detalhes nas figuras 6.1 e 6.2).

6.2.1 Integração das Estruturas Geofísicas

Dá-se foco a uma integração das indicações pertinentes às diferentes feições lineares e não lineares interpretadas das diversas assinaturas aerogeofísicas. Devido a sua importância para a prospecção de esmeralda será dada uma atenção especial às áreas próximas ao centro-leste da área e adjacências.

Como já salientado, há uma boa correlação entre as assinaturas gamaespectrométricas individualizadas (Figura 6.5A) e magnetométricas (Figura 6.5B). Os principais lineamentos gamaespectrométricos e sua interpretação têm direção principal $N30^{\circ}-50^{\circ}W$, além da direção E-W. Outras feições são observadas nas direções NE-SW e NS (Figura 6.5A). Os traços dos lineamentos magnéticos e a interpretação da sua continuidade mostram que o padrão das estruturas magnéticas possui uma orientação principal para o quadrante $N50^{\circ}-60^{\circ}E$ e em menor quantidade $N30^{\circ}-50^{\circ}W$ (Figura 6.5A). Outras feições de importância fundamental encontram-se na direção $E90^{\circ}-100^{\circ}W$. Uma das feições que chamam a atenção são feições em forma de dobras que ocorrem na porção centro-oeste e nordeste da área (Figura 6.5A).

As estruturas gamaespectrométricas e magnéticas principais interpretadas mostram muitas similaridades entre si (Figuras 6.5A e B). Este padrão parece indicar que os principais lineamentos gamaespectrométricos estão associados às estruturas magnéticas. Essas por sua vez, estão diretamente associadas às estruturas tectônicas impressas na área de pesquisa. O diagrama de roseta integrado para os lineamentos magnéticos e gamaespectrométricos é mostrado na Figura 6.4.

A estrutura magnética principal corta num ângulo de 70° as estruturas gamaespectrométricas, aquelas associadas as litologias expostas na superfície. Notam-se também estruturas rúpteis de alívio nas direções E-W e N-S associadas aos lineamentos gamaespectrométricos (Figura 6.6B). Essas características podem ser visualizadas nas imagens aerogeofísicas interpretadas (Figura 6.6). A figura 6.7A apresenta a integração dos domínios geofísicos magnéticos aos gamaespectrométricos, enquanto que a figura 6.7B mostra esses domínios integrados à sua interpretação estrutural.

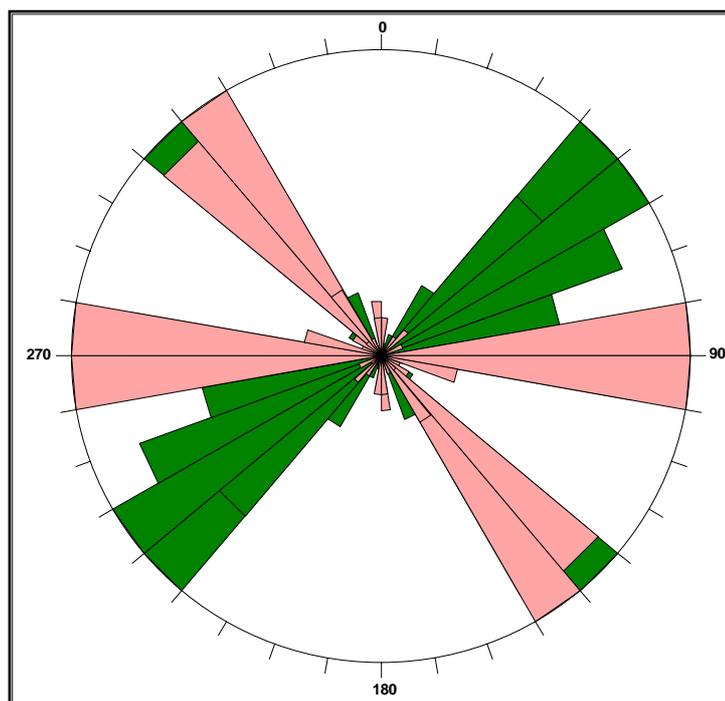


Figura 6.4: Diagrama de roseta integrado para os lineamentos magnéticos (verde) e gamaespectrométricos (rosa). Observa-se que as principais feições situam nos quadrantes NW e E-W. Estruturas N-S também são observadas. Já para a magnetometria, a direção principal encontra-se entre $N40^{\circ} - 60^{\circ}E$. Um segundo conjunto de estruturas tem direção E-W e um terceiro conjunto de lineamentos é observado nas direções $N30^{\circ} - 50^{\circ}W$.

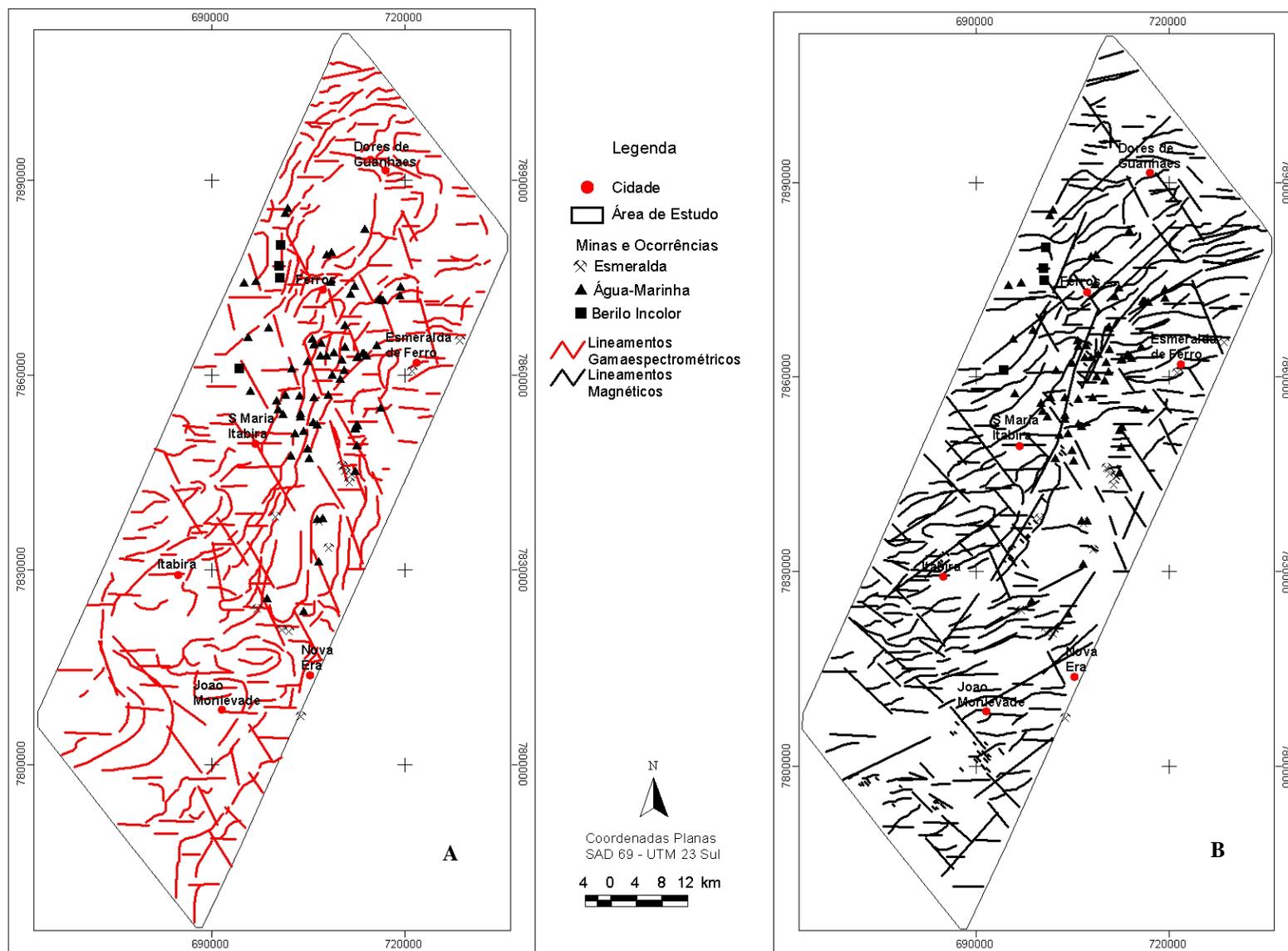


Figura 6.5: Mapa mostrando os principais lineamentos importantes para a mineralização das esmeraldas e águas-marinhas da área em estudo. Em (A) tem-se os lineamentos gamaespectrométricos e em (B) os magnéticos.

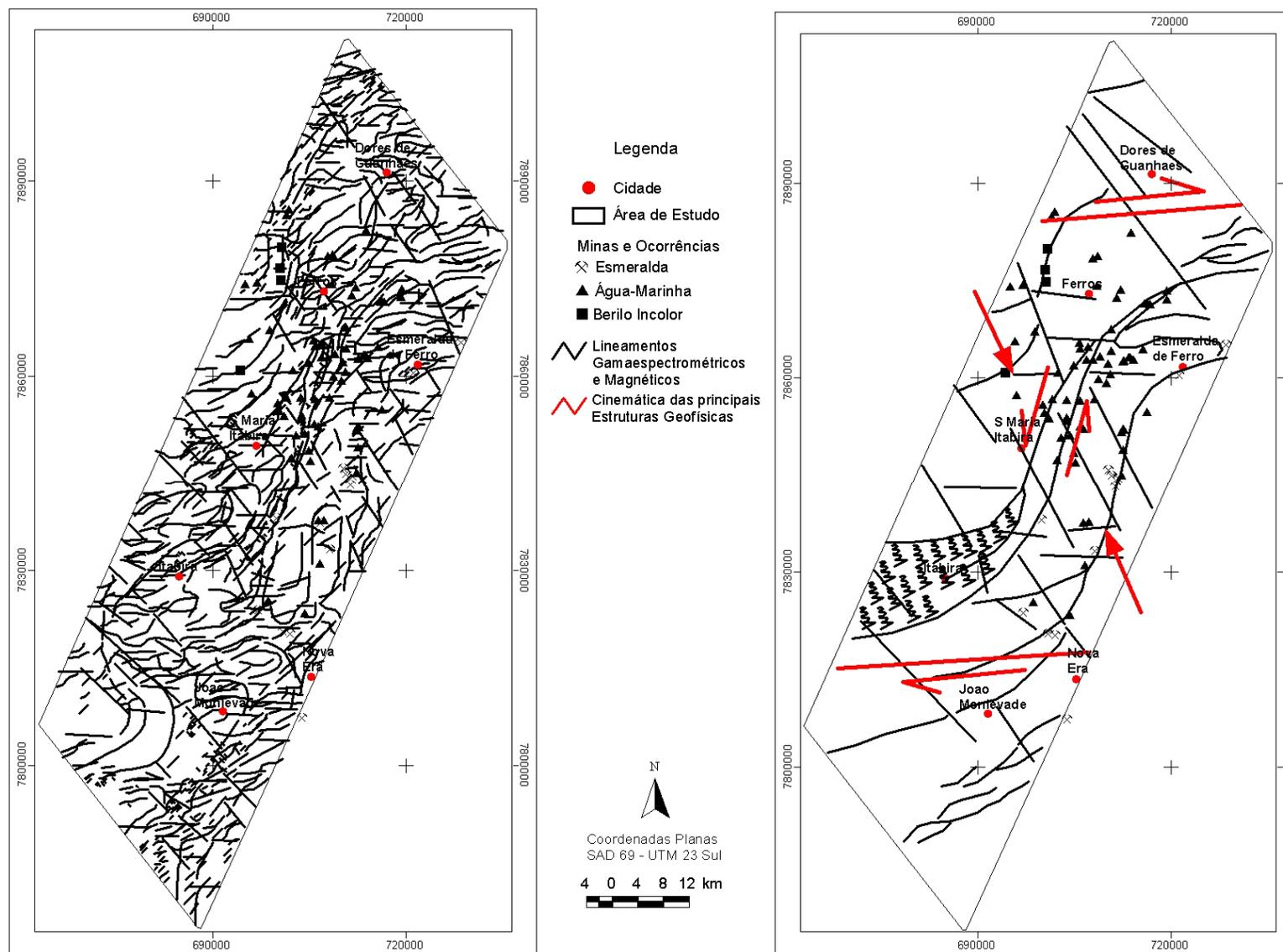


Figura 6.6: Mapa mostrando os principais lineamentos importantes para a mineralização das esmeraldas e águas-marinhas da área em estudo. Em (A) tem-se a integração dos lineamentos gamaespectrométricos e magnéticos, e em (B) o estudo de sua cinemática.

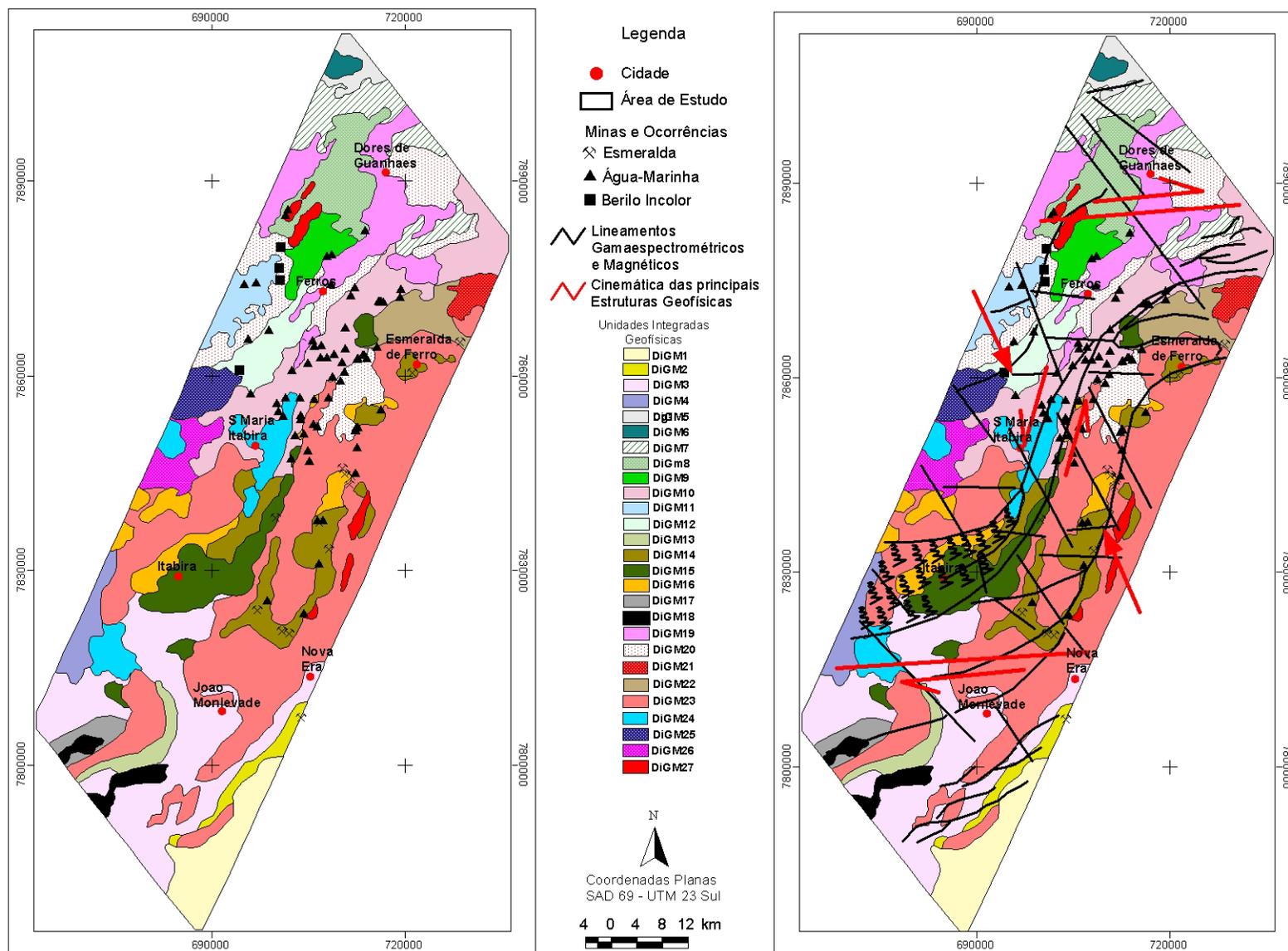


Figura 6.7: Mapa mostrando em (A) a integração dos domínios geofísicos (gamaespectrometria com magnetometria) e em (B) os domínios integrados com o estudo da cinemática dos principais lineamentos geofísicos e considerados importantes para a mineralização da área em estudo.

6.3 INTEGRAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS À GEOLOGIA

O mapa geofísico gerado foi integrado à geologia, cujo produto final é um mapa interpretado a partir da superposição observada entre as imagens dos temas interpretativos magnéticos e gamaespectrométricos à geologia conhecida (Figura 6.8). Este tema pode vir a servir como referência para mapeamentos geológicos futuros que se deseje realizar nesta área. Isto é especialmente válido nos estudos sobre a continuidade espacial das unidades interpretadas aqui para regiões vizinhas que estejam no mesmo ambiente geológico.

A integração dos dados geofísicos à geologia tem dois objetivos específicos: O primeiro ilustra a aplicação dos dados geofísicos no mapeamento geológico, e o segundo à prospecção mineral.

6.3.1 Mapeamento Geológico

A interpretação dos dados geofísicos à geologia conhecida forneceu uma visão bastante detalhada daquilo que deverá ser comprovada pelo mapeamento geológico. Ele mostra um retrato da complexidade lito-estrutural que se deve esperar para a área. Na sua aplicação aos trabalhos de campo deve-se atentar para que nem todos os detalhes possíveis de serem interpretados das imagens geradas estão nele.

O critério utilizado aqui para a correlação das informações geofísicas à geologia foi a sobreposição espacial (Figuras 6.3 e 6.10). A partir daí fez-se uma correlação destes dados e informações à geologia conhecida, com base nessa associação foi feita uma verificação do tipo rochoso ou à unidade geológica mais provável, com a correspondente unidade integrada geofísica (Figura 6.8 e Tabela 6.1). Para a confecção do mapa integrado para a área do Projeto Itabira-Ferros foi escolhido aqueles produtos que melhor apresentaram resultados nas descrições de unidades e estruturas magnéticas, gamaespectrométricas e de relevo topográfico (Figuras 4.1, 4.2, 4.5, 5.6, 5.9).

O que chama a atenção numa integração deste tipo são, primeiramente, as discordâncias entre as indicações presentes no mapa geológico de Peres *et al.* (2004; Figura 2.2) e aquele da CPRM usado como base neste trabalho (Figura 6.10). Na área de pesquisa o mapa da CPRM (Figura 6.10) mostra correspondência com algumas

unidades litológicas, já o mapa da figura 2.3 parece mais realista quanto às estruturas tectônicas, porém com poucas informações relativas à geologia.

Na área de Itabira-Ferros há uma carência de informações geológicas, principalmente nas regiões central e norte da área, o que dificultou a integração dos dados. Ao analisar o mapa geológico utilizado para fazer essa integração (Figura 6.8) observa-se que a parte centro-sul e sul desse mapa foi confeccionado com base em dados da gamaespectrometria aérea, com detalhamento somente na porção centro-sul, porém sem um refinamento adequado. Na porção centro-norte há ausência de informações geológicas. Nesses locais, os domínios integrados foram definidos de acordo com as respostas geofísicas.

Algumas unidades não mostraram correlação entre os domínios geofísicos e os de geologia, outros apresentam excelente correlação espacial. Aquelas unidades que não tiveram sobreposição foram consideradas de domínios geofísicos. Foram definidas no total 27 unidades de integração (Figura 6.8).

Vale ainda afirmar que, logicamente, é possível a identificação de um número muito maior de domínios magnéticos-gamaespectrométricos-geológicos, de acordo à escala final do trabalho de interpretação, 1:100.000, lembrando que o espaçamento entre as linhas de amostragem, 500 metros, é o de uma amostragem geofísica que representa um padrão bastante regionalizado das assinaturas identificadas. Este mapa (Figura 6.8) representa um quadro bem mais completo e complexo do que deve, em realidade, ser as assinaturas magnéticas e gamaespectrométricas locais.

Nesta análise verificou-se que algumas regiões da área de interesse, principalmente nas suas porções central e norte (Figura 6.9) estão bem intrecortadas por drenagens e apresentam elevados teores de K, Th e U. As regiões em torno das drenagens foram individualizadas como unidades radiométricas pertencentes ao Quaternário. A figura 6.11a mostra uma comparação entre os mapas com os domínios integrados a partir da geofísica com o mapa da CPRM (Figura 6.11b). Quanto à compartimentação regional, os domínios ficaram assim distribuídos (Tabela 6.1, Figura 6.8):

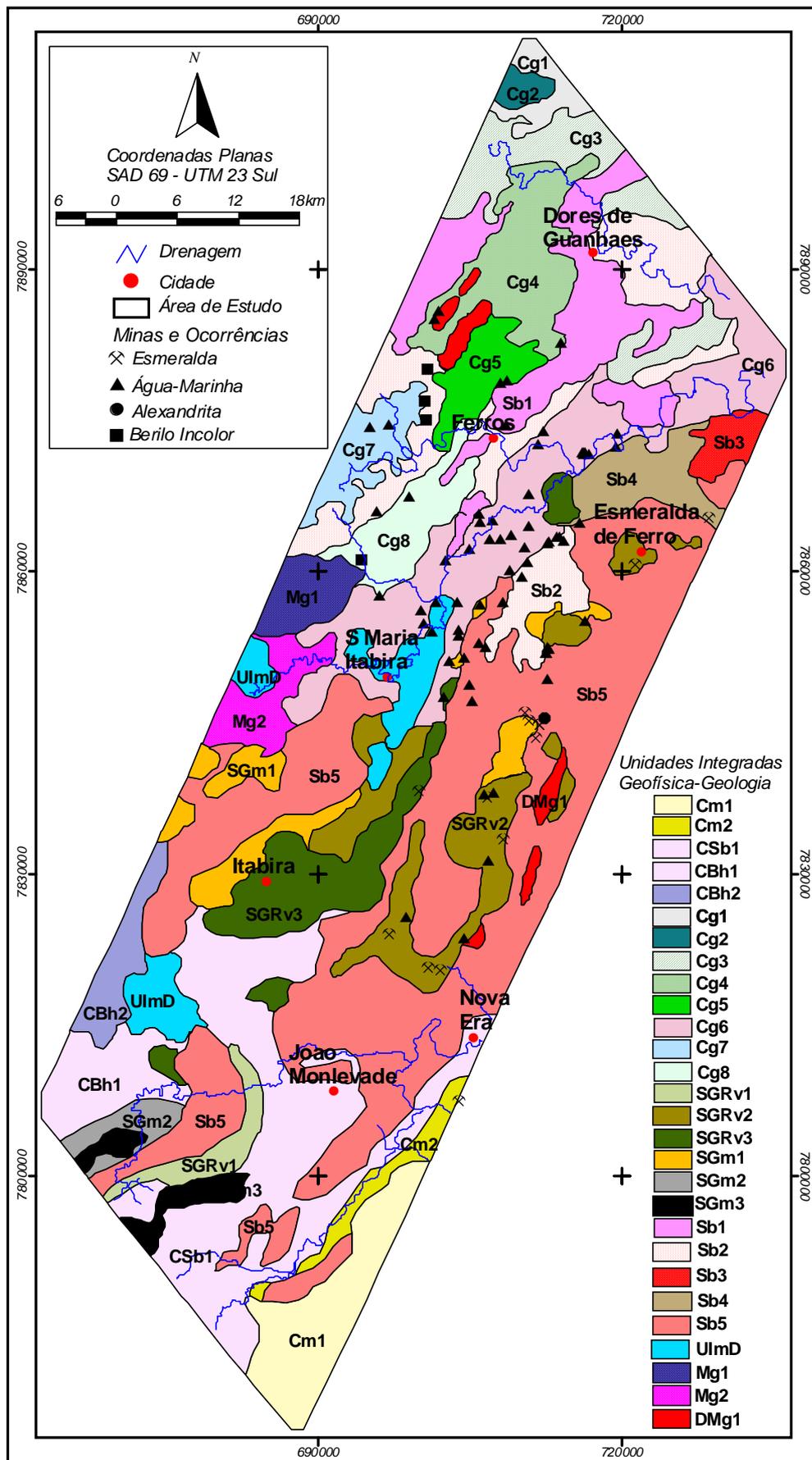


Figura 6.8: Mapa mostrando a integração dos resultados dos domínios profundos e rasos da magnetometria com os domínios obtidos para a gamaespectrometria (ver detalhes na Tabela 6.1).

Tabela 6.1 – Classificação das unidades mistas com base na gamaespectrométricas por seus teores relativos em K, Th e U e as unidades magnéticas rasas associados às unidades geológicas.

Unidades Integradas	Índice dos Domínios e Subdomínios Gamaespectrométricos		Índice das Unidades Magnéticas Rasas	Correlação Geológica
	Ct2/Ct3	2gm		
Cm1	Ct2/Ct3	2gm	Dr4	Embasamento
Cm2	Ct2/Ct3	1gm	Dr1	Embasamento
CSb1	Ct4	6gm	Dr1	Embasamento
CBh1	Ct4	6gm	Dr1	Embasamento
CBh2	Ct3	17gm	Dr2	Embasamento
Cg1	Ct3	20gm	Dr4	Embasamento
Cg2	Ct1	14gm	Dr1	Embasamento
Cg3	Ct2	5gm	Dr1	Embasamento
Cg4	Ct3	20gm	Dr1	Embasamento
Cg5	Ct2	13gm	Dr1	Embasamento
Cg6	Ct3	10gm	Dr3/Dr4	Embasamento
Cg7	Ct3	11gm	Dr4	Embasamento
Cg8	Ct3	11gm	Dr2	Embasamento
SGRv1	Ct2	8gm	Dr1	Supergrupo Rio das Velhas
SGRv2	Ct3	7gm	Dr3/Dr4	Supergrupo Rio das Velhas
SGRv3	Ct4	6gm	Dr4	Supergrupo Rio das Velhas
SGm1	Ct4	3gm	Dr4	Supergrupo Minas
SGm2	Ct4	6gm	Dr3	Supergrupo Minas
SGm3	Ct4	16gm	Dr1/Dr4	Supergrupo Minas
Sb1	Ct1	5gm	Dr1/Dr3	Suíte Borrachudos
Sb2	Ct2	12gm	Dr3/Dr1	Suíte Borrachudos
Sb3	Ct3	18gm	Dr2	Suíte Borrachudos
Sb4	Ct3	19gm	Dr1	Suíte Borrachudos
Sb5	Ct1	3gm	Dr4	Suíte Borrachudos
IMd	Ct4	9gm	Dr2	Unidade Itambé do Mato Dentro
Mg1	Ct4	20gm	Dr4	Intrusões Diversas
Mg2	Ct4	10gm	Dr1	Intrusões Diversas
DMg1	Ct2	15gm	Dr1	Intrusões Diversas

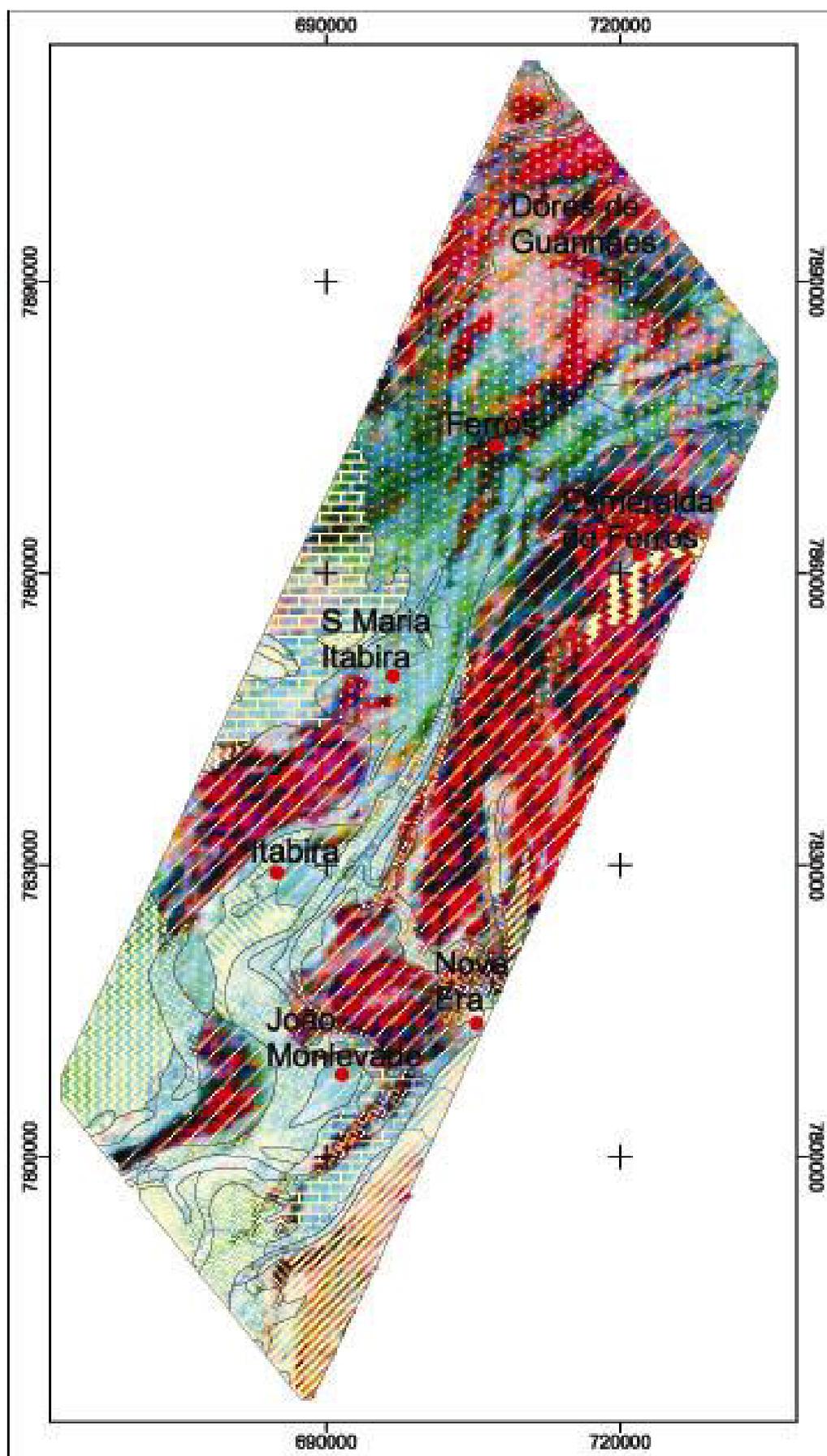


Figura 6.9a: Mapa de composição ternária CMY sobreposto pelo domínios da geologia regional obtido do mapa da CPRM (2004) para a área em estudo.



Figura 6.9b: Legenda do mapa de CMY com a geologia para a área em estudo.

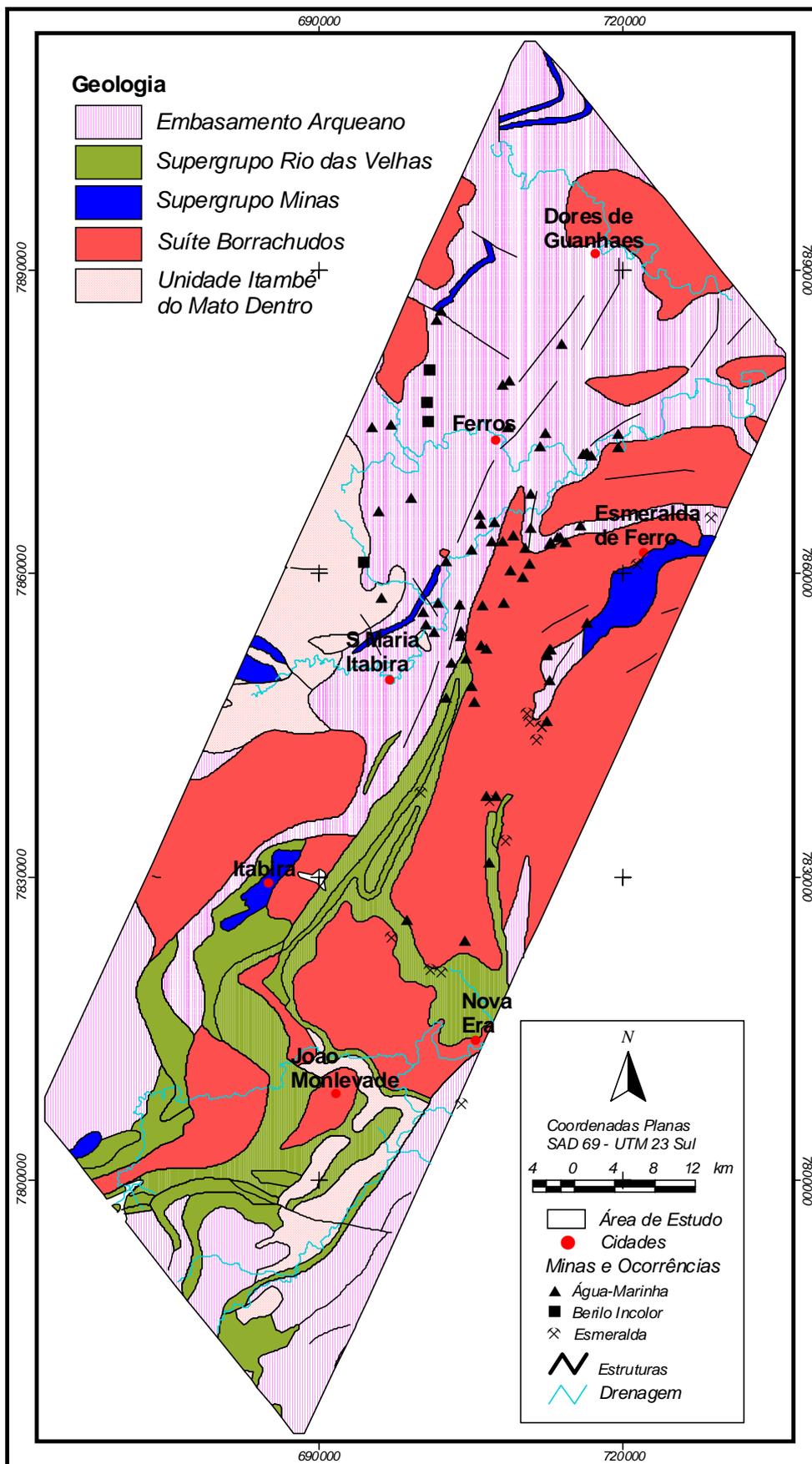


Figura 6.10: Mapa geológico da área em estudo contendo as principais compartimentações geológicas e estruturais da área do Projeto Itabira-Ferros (CPRM 2004).

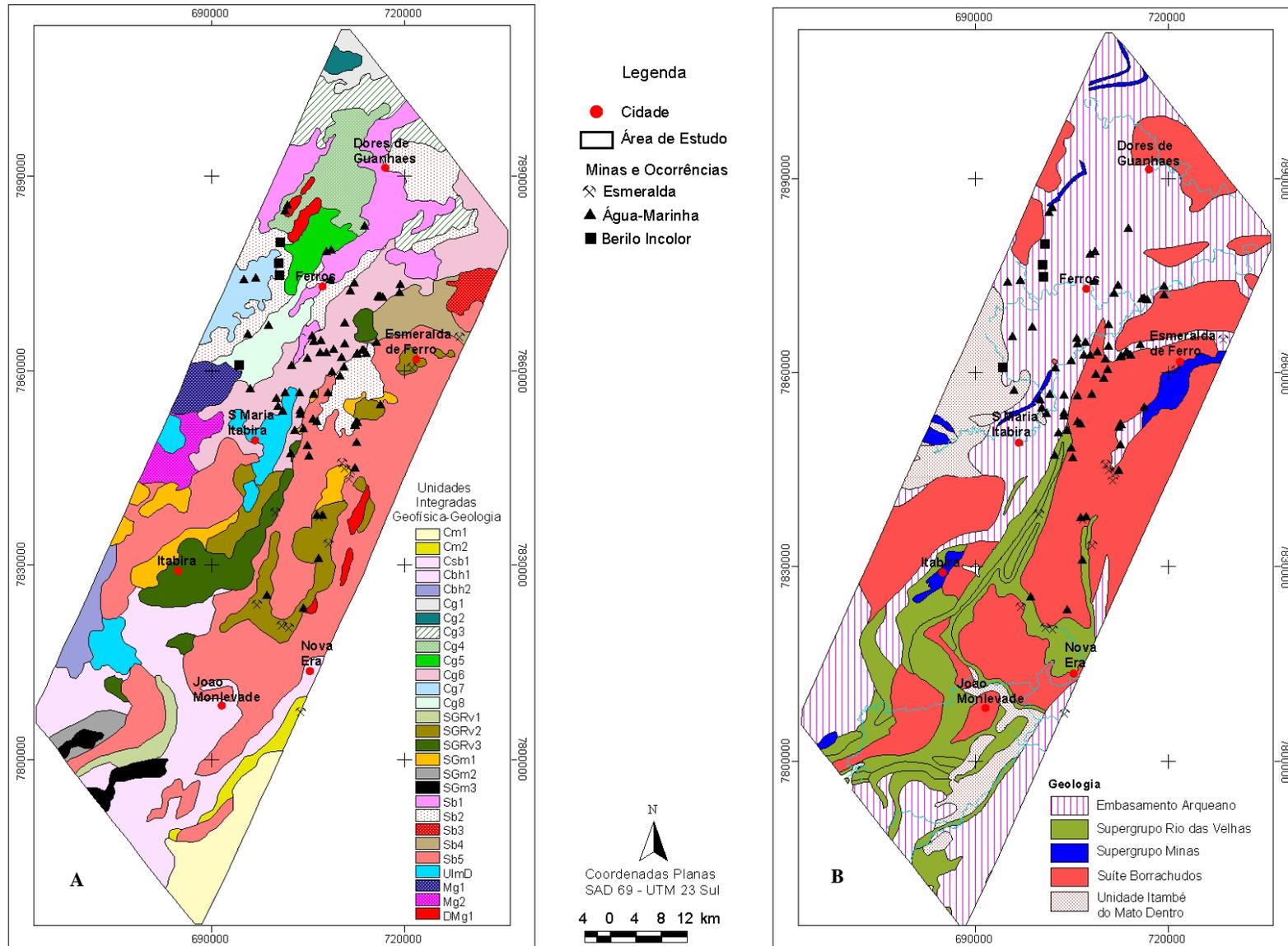


Figura 6.11: Imagem contendo em (A) o mapa integrado a partir da geofísica e em (B) o mapa geológico contendo as principais compartimentações geológicas da área do Projeto Itabira-Ferros obtido a partir da interpretação da CPRM (2004).

6.3.1.1. EMBASAMENTO

Como foi visto no capítulo 2, o termo Embasamento Arqueano é utilizado para designar o embasamento gnáissico ortoderivado da área. De acordo com a literatura, esse embasamento na porção sudeste apresenta predominância de gnaisses e granitóides (Grossi Sad *et al.* 1993). Na gamaespectrometria são esperadas intensidades moderadas nas rochas gnáissicas e radiometrias mais elevadas nos granitóides, uma vez que são rochas ricas em K, Th e U. Na magnetometria deverão ter anomalias elevadas associadas aos granitóides. Ele é representado pelas unidades Cm1 e Cm2 e mostram teores elevados em tório e urânio (ver Tabela 6.1 e Figura 6.8).

A unidade Cm1 ocupa o extremo sudeste da área e é caracterizada por uma assinatura elevada de magnetometria, unidade magnética Dr4, com um relevo movimentado. Quanto a gamaespectrometria, é representado pelos domínios Ct2 e Ct3 e o subdomínio Cm1 (K: baixo; Th: médio; U: médio-alto). Apresenta um relevo moderado a alto, com aproximadamente 800 metros, e com concentrações importantes de urânio, principalmente nas cristas e encostas. Essa unidade mostra anomalias magnéticas e respostas gamaespectrométricas esperadas para corpos granitóides.

Já a unidade Cm2 é formada por uma unidade muito estreita no extremo sudeste da área, com forma de uma língua bordejando a unidade Cm1, podendo representar uma subdivisão desta última. Com relevo moderado, ela foi subdivida da unidade Cm1 porque mostra concentrações mais baixas dos três rádioelementos. Na gamaespectrometria ela é caracterizada pelos domínios Ct3 e Ct4 e o subdomínio Cm2 (K: baixo-médio; Th: baixo-médio; U: médio) e a unidade magnética é marcada por uma intensidade baixa, Dr1. Essa unidade mostra-se entrecortada por drenagens. As respostas magnéticas e gamaespectrométricas podem representar corpos granitóides com transformação textural/mineralógico.

O embasamento da porção sul corresponde, no mapa geológico, a um conjunto de gnaisses, migmatitos, rochas graníticas e anfibolitos. Espera-se que esse complexo mostre de baixos a médios valores radiométricos e baixas assinaturas na magnetometria. Na figura 6.8 ela é representada pela unidade CSb1.

A unidade CSb1 ocupa uma área extensa na região sudeste e é composta pelo domínio Ct4, subdomínio 6gm (K: baixo-médio; Th: baixo; U: baixo), e unidade magnética Dr1 (intensidade magnética baixa, em torno de -100 nT). Essa unidade representa na gamaespectrometria o embasamento geofísico local. O relevo é muito

variado, com porções baixas, em torno dos 600 metros e em outros mais elevados, atingindo os 800 metros. Algumas drenagens importantes recortam essa unidade. Altas concentrações de potássio enriquecido são observadas, principalmente na imagem de RGB (Figura 4.7) e potássio anômalo (Figura 4.20).

O embasamento da porção sudoeste é composto por gnaisses e migmatitos de fácies anfibolito marcados por enclaves máficos. Ocorre no extremo SW da área e é representado pelas unidades CBh1 e CBh2. É esperado nesse contexto que as respostas magnéticas sejam moderadas a baixas, uma vez que são rochas que sofreram modificações em suas estruturas. Na gamaespectrometria esperam-se também intensidades dos radioelementos de moderadas a baixas.

A unidade CBh1, na gamaespectrometria, não foi possível subdividi-la da unidade CSb1. É composta pelo domínio Ct4, subdomínio 6gm (K: baixo-médio; Th: baixo; U: baixo), e unidade magnética Dr1 (intensidade magnética baixa). Ocupa uma área extensa na região sudoeste. Essa unidade também representa o embasamento geofísico local. O relevo é muito variado, com porções baixas, em torno dos 500 metros e em outros mais elevados, atingindo os 800 metros. Algumas drenagens importantes recortam essa unidade. Altas concentrações de potássio enriquecido são também observadas, principalmente na imagem de RGB (Figura 4.7) e confirmados pelo razão U/Th e potássio anômalo, respectivamente (Figuras 4.11 e 4.20).

A unidade CBh2 é composta pelo domínio Ct3 e pelo subdomínio 17gm (K: baixo-médio; Th: baixo; U: baixo). Essa unidade corresponde à unidade magnética Dr3 (intensidade moderada). Ela aparentemente poderia ser correlacionada também a unidade integrada UImD. Na gamaespectrometria, porém, a unidade CBh2 mostra uma contagem radiométrica mais baixa. A topografia é moderada a baixa, em torno dos 600 metros.

O embasamento da parte N/NE/NW e central é composto por rochas e estruturas arqueanas, representado litologicamente por uma ampla quantidade de rochas com diferentes composições que não são individualizadas (гнаisses, migmatitos, anfibolitos, granitos, granodioritos, gabros, dioritos, rochas ultrabásicas) (Figuras 2.4 e 6.10). Observa-se que dentro dessa unidade geológica ocorrem respostas geofísicas diferenciadas, que não permitirá uma boa associação entre as unidades geológicas mapeadas da figura 6.8 e aos domínios e subdomínios magnéticos e gamaespectrométricos da figura 6.1. Essas unidades estão associadas a respostas magnéticas muito baixas nos domínios profundos (Figuras 5.10 e 6.1b). Já para os

domínios rasos (Figuras 5.14 e 6.1c), elas apresentam respostas magnéticas variando de baixa a média e intensidade radiométrica também variada. No total foram discriminadas 8 unidades inseridas no embasamento norte: Cg1, Cg2, Cg3, Cg4, Cg5, Cg6, Cg7 e Cg8 (Tabela 6.1).

A unidade Cg1 é caracterizada na gamaespectrometria pelo domínio Ct3 (baixas contagens radiométricas) e subdomínio 20gm (K: médio-alto; Th: baixo-médio; U: baixo-médio). Na magnetometria, a unidade é a Dr4, intensidade alta, em média 194nT. Encontra-se intimamente associada à unidade integrada Cg2. Ocorre com pequena extensão areal e um formato de cunha com direção E-W no noroeste da área de estudo. Tem uma topografia moderada, em média 700 metros. Na borda dessa unidade ocorre uma estrutura magnética retilínea de intensidade forte, em torno de 200nT e orientação NE-SW.

A unidade Cg2 é caracterizada na contagem total pelo domínio Ct1 (altas contagens radiométricas), pelo subdomínio 14gm que representa respostas elevadas dos três elementos. Essa unidade mostra uma associação com o domínio magnético profundo, DP2 (Figura 5.10) e com o domínio magnético raso, Dr2 (Figura 5.14), com baixas respostas magnéticas (-50,52nT). Ocorre como uma estreita faixa no noroeste da área de estudo e inserida na unidade Cg1. Mostra uma topografia mais moderada nas bordas e um alto topográfico no centro, com concentração de tório nas cristas.

A unidade Cg3 é representada na gamaespectrometria pelo domínio Ct2 (médias contagens radiométricas) e subdomínio 5gm (K: baixo; Th: alto; U: alto) e a unidade magnética Dr1 (intensidade muito baixa, ~-100 nT). Ocorre como uma faixa de direção NE-SW na região noroeste da área. O relevo topográfico é marcado por uma variação de moderado a alto. Na borda sul tem-se um relevo mais elevado, enquanto do centro até a porção norte é arrasado.

A unidade Cg4 é composta pelo domínio Ct3 (baixas contagens radiométricas) e subdomínio 20gm (K: médio; Th: baixo-médio; U: baixo-médio) e a unidade magnética Dr2 e Dr1 (intensidade variando de muito baixo a médio, ~ -50 nT). Tem uma representação areal extensa na região NNW da área de estudo. Mostra um aspecto interessante: suas bordas são marcadas por fortes valores radiométricos, separando-a das unidades adjacentes, principalmente em relação à unidade Cg3. O relevo topográfico é alto, em torno de 800 metros.

A unidade Cg5 é caracterizada na contagem total pelo domínio Ct2 (médias contagens radiométricas) e pelo subdomínio 13gm (K: médio; Th: médio, U: baixo-

médio) e a unidade magnética Dr1 (intensidade baixa). Ocorre como uma faixa no noroeste da área de estudo, intimamente associada à unidade integrada Cg4, podendo ser uma subdivisão dessa última. Porém é notável nas imagens ternárias, bem como na imagem do potássio anômalo, o teor mais elevado de potássio da unidade Cg5.

A unidade Cg6 é composta pelo domínio gamaespectrométrico Ct3 e o subdomínio 10gm (K: baixo-médio, Th: baixo-médio e U: baixo-médio). A magnetometria mostra intensidades elevadas, Dr3 e Dr4. Essa unidade mostra uma grande extensão areal, compondo uma boa parte da região centra e adentrando na porção nordeste. Tem topografia baixa, em torno dos 500 metros e extensas áreas de drenagens (Figura 4.1). Um aspecto interessante nessa unidade é a alta concentração de potássio enriquecido, observadas principalmente na imagem de RGB (Figura 4.7) e confirmada pela imagem do potássio anômalo (Figura 4.20).

A unidade Cg7 é representada pelo domínio Ct3 e o subdomínio característico é o 11gm (K: médio-alto; Th: médio; U: baixo). A unidade magnética mais representativa é a Dr2, porém com alguma contribuição da Dr3. Ocorre em regiões de relevo muito baixo e com grande extensão de drenagens. Nessas áreas de drenagem observa-se enriquecimento de potássio.

A unidade Cg8 é caracterizada pelo domínio Ct3 (contagens variando de baixa a média) e parte do subdomínio gama 11gm (K: médio-alto; Th: médio; U: baixo) e parte do 12 gm (K: alto; Th: médio-alto; U: baixo). A unidade magnética mais representativa é a Dr4. Ocorre em regiões de relevo muito baixo, em torno de 500 metros e com grande extensão de drenagens. Essa unidade poderia ser uma continuação da unidade Cg7, porém esta última apresenta valores dos radioelementos mais baixos, principalmente de tório e potássio.

6.3.1.2 SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS (SGRv)

Na correlação das unidades geofísicas-geológicas integradas e correlacionadas com as unidades geológicas interpretadas como Supergrupo Rio das Velhas, foi utilizada a subdivisão do Capítulo 2 (Item 2.3.2.). O Grupo Quebra Osso é formado essencialmente por *komatiitos* peridotíticos com estruturas típicas de lavas almofadadas (*pillow* lavas), brechadas, maciças e com textura *spinifex* bem preservada. Nas seqüências superiores, observaram-se rochas metassedimentares de origem química como *cherts*, formações ferríferas bandadas e intercalações de xistos de origem máfica e

metamorfizados na fácies xisto verde. Já o Grupo Nova Lima é composto, essencialmente, por rochas máficas de origem vulcânica, vulcanoclástica e epiclástica, predominando xistos verdes derivados de rochas ígneas básicas e intermediárias, filitos e, subordinadamente, formações ferríferas portadoras de sulfeto. Enquanto o Grupo Maquiné é a unidade do topo e é composto de moscovita-quartzo xisto. Ocorrem piritas detríticas nos planos de estratificação cruzada dos quartzitos conglomeráticos e nos conglomerados (Schorscher 1979) (Figura 2.5).

Espera-se que na magnetometria as formações ferríferas apresentem altos magnéticos e que as vulcânicas mostrem magnetização induzida moderada. Já na gamaespectrometria são esperadas baixas intensidades, porque esse tipo de rocha possui baixo conteúdo de radioelementos (Dickson & Scott 1997). As unidades que representam esse supergrupo são SGRv1 a SGRv3.

Na gamaespectrometria, a unidade SGRv1 é composta pelo domínio Ct4 e subdomínio 8gm (K: médio; Th: baixo; U: médio). Espacialmente está associada ao domínio magnético Dr3 (baixa intensidade magnética, ~ - 50 nT). Situa-se em região com topografia moderada e caracteriza-se por borderjar a unidade Sb5 (Suíte Borrachudos). Outro aspecto importante é o alto teor de potássio enriquecido, principalmente nas cristas topográficas. Essa unidade apresenta-se recortado ao meio por estruturas E-W e esses falhamentos são observados tanto nos dados magnéticos quanto gamaespectrométricos (Figuras 4.10 e 4.23).

A unidade SGRv2 mostra uma perfeita correlação espacial com os domínios magnéticos Dr3 (intensidade média) e Dr4 (intensidade alta). Na gamaespectrometria ela é representada pelo domínio Ct4 (intensidade radiométrica muito baixa) e subdomínio 7gm (K: baixo-médio; Th: baixo; U: baixo-médio).

Essa unidade integrada ocorre associada à unidade Sb5, na porção centro-leste, e representa uma das mais interessantes unidades da área, pois engloba todos os alvos de mineralizações de esmeralda do setor leste da área (Figuras 2.4, 2.8 e 610). Essa unidade pode representar litologias de rochas vulcanossedimentares. Vale lembrar que as jazidas de esmeralda se encontram localizadas em contextos geológicos vulcanossedimentares de idade arqueana a paleoproterozóica.

Na região dos alvos de mineralização de esmeralda, essa unidade aparece sobre terrenos de topografia baixa a moderadas, em torno de 700 metros. Na porção central ocorre em região de topografia arrasada e associada a drenagens. Um aspecto interessante é o alto teor de potássio enriquecido que é observado nessa unidade. Ao

longo da unidade Sb5 são observadas pequenas porções dessa unidade, mostrando a interdigitação dela na Suíte Borrachudos. Os mapas de interpretações estruturais, principalmente a interpretação gamaespectrométrica, mostram que essa unidade foi dobrada/falhada (Figura 6.5 A e B).

A unidade SGRv3 ocorre na parte central da área de estudo, associada a unidade SGM2, Supergrupo Minas. Na magnetometria ela é representada pela unidade Dr4, intensidade elevada, em torno de 200nT. Já na gamaespectrometria é caracterizado pelo domínio Ct4 (conteúdo radiométrico muito baixo) e subdomínio 6gm (K: baixo-médio; Th: baixo; U: baixo). Tem relevo baixo, com aproximadamente 600 metros. Espacialmente essa unidade é associada a rochas ultramáficas.

6.3.1.3 SUPERGRUPO MINAS (SGM)

O Supergrupo Minas é composto pelos grupos Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará. Nessa tese tem-se a ocorrência dos grupos Itabira, Piracicaba e Sabará.

O Grupo Itabira divide-se em duas formações, Cauê e Gandarela. A Formação Cauê, basal, compõe-se de itabirito de composição variada, formação ferrífera tipo Lago Superior e alguns leitos menos importantes de quartzito, filito e dolomita (Inda *et al.* 1984). A Formação Gandarela sobrepõe-se ao Itabirito Cauê, com contato de transição e é composta quase que exclusivamente por filitos. O Grupo Piracicaba é constituído por certa variedade de rochas metassedimentares, entre essas têm-se quartzito ferruginoso, filito, dolomito, filito dolomítico, quartzito, grauvacas e metatufos (Dorr II *et al.* 1983). Já o Grupo Sabará é composto por xistos, filitos e diamictitos (Renger *et al.* 1994, Noce 1995). Na magnetometria deve-se esperar que a Formação Cauê do Grupo Itabira produzam altos magnéticos na imagem do ASA, e que a Gandarela mostre valores mais baixos. Já os Grupos Piracicaba e Sabará deverá mostrar valores magnéticos baixos. Na gamaespectrometria, as respostas esperadas são de intensidades baixas para os três elementos.

A unidade SGM1 na magnetometria é representada por intensidades elevadas, Dr4, em torno de 300nT. Essa intensidade magnética também pode ser observada na imagem da redução ao pólo. Na gamaespectrometria ela mostra teores baixos de radiometria, o que pode ser confirmado pelo domínio Ct4 (radiometria muito baixa) da contagem total e subdomínio 6gm (K: baixo-médio; Th: baixo; U: baixo), das imagens compostas ternárias. Observa também que essa unidade mostra um enriquecimento

relativamente elevado de potássio anômalo. Ela ocupa uma área extensa, tanto nas regiões centro-oeste, sul e centro-leste. Na região centro-leste, essa unidade mostra um aspecto interessante: está sempre associada à unidade SGRv2, Supergrupo Rio das Velhas. Nessa região ela mostra um aspecto interessante: representa uma das unidades com valores radiométricos mais altos, (~350nT). Essa unidade fortemente magnética deve representar unidades com teores elevados em magnetita, formações ferríferas, enquanto que as porções com intensidades magnéticas fracas devem corresponder às rochas quartzíticas.

A unidade SGM2 mostra respostas magnéticas moderadas, domínios Dr3, em torno de 200nT e relevo magnético suave. Na gamaespectrometria é composta pelo domínio Ct4 (conteúdo muito baixo) e subdomínio 6gm (K: baixo-médio; Th: baixo; U: baixo). Tem representação significativa em área e ocorre como vários corpos na porção centro-oeste da área.

A unidade SGM3 é composta pelo domínio Ct4 e subdomínio gama 16gm (K: baixo; Th: baixo; U: baixo). A unidade magnética que melhor representa essa unidade é a Dr1 (intensidade magnética baixa), com contribuição adicional da unidade Dr4 (intensidade magnética alta). Encontra-se no extremo SSW da área, com pequena representação em área e um relevo topográfico elevado.

6.3.1.4 SUÍTE BORRACHUDOS (Sb)

As rochas da Suíte Borrachudos são interpretadas como granitos alcalinos posicionados em ambientes anorogênicos e ligados a *rifteamento*. Elas podem apresentar-se gnaissificadas ou não e são representadas, em geral, por rochas de granulação predominantemente grossa, com níveis de máficos paralelos e descontínuos. De acordo com Grossi Sad *et al.* (1990), esses granitos apresentam intensa transformação textural e mineralógica, estando os feldspatos intensamente caulinizados. Esses corpos apresentam composição de álcali-feldspato granito, ricos em elementos incompatíveis. Composicionalmente mostram duas fácies petrográficas, sendo uma composta de biotita gnaiss com anfibólio e outra por gnaiss com biotita. Na magnetometria espera-se que não haja anomalias magnéticas associadas a esses granitos, uma vez que não são granitos magnéticos e na gamaespectrometria são esperadas intensidades elevadas, uma vez que são rochas graníticas ricas em K, Th e U.

As assinaturas desses granitos não são claramente distintas. De fato, a Suíte Borrachudos se posiciona sobre os domínios magnéticos Dr1 e Dr2.

A unidade Sb1 é composta pelo domínio gamaespectrométrico Ct1 e subdomínio 5gm (K: baixo; Th: alto; U: alto). Na magnetometria a intensidade é baixa, Dr1. Aparece como faixas englobando a unidade Cg4 no NW da área de estudo e ocorre sobre um relevo movimentado, com média em torno dos 800 metros, onde as cristas aparecem enriquecidas em Th. Essa unidade poderia representar uma extensão da unidade Sb5, porém mostra teores mais elevados de tório e urânio. A unidade integrada Sb1 na porção noroeste da área apresenta conteúdos dos três elementos relativamente similares aos encontrados para a unidade Sb5 e pode representar o granito Senhora do Porto, também pertencente à Suíte Borrachudos, de acordo com a literatura.

A unidade Sb2 é caracterizada pelo domínio Ct2 (médias contagens radiométricas) e pelo subdomínio gama 12gm (K: alto; Th: médio-alto, U: baixo) e a unidade magnética Dr1 (intensidade baixa, ~ -150 nT). Essa unidade pode representar uma extensão da unidade Sb5, porém com teores mais baixos de urânio.

A unidade Sb3 é caracterizada pelo domínio Ct2 (médias contagens radiométricas) e pelo subdomínio gama 18gm (K: médio; Th: médio, U: baixo) e a unidade magnética Dr2 (intensidade baixa, ~ -5 nT). Essa unidade pode representar uma extensão da unidade Sb4, representando uma subdivisão dessa última. Porém, o que diferencia as duas são teores mais elevados de potássio e tório da unidade Sb4.

A unidade Sb4 corresponde ao domínio Ct1 e ao subdomínio 19gm (K: médio-alto; Th: alto; U: baixo) e a unidade magnética Dr2 (intensidade magnética baixa). Essa unidade representa a borda da unidade Sb5, com teores elevados de potássio e tório. Seu relevo é mais baixo e mostra também teores anômalos de potássio. O que não se tem observado para as demais unidades que compõem essa suíte.

A unidade que melhor representa esses corpos graníticos é a Sb5. Essa unidade é caracterizada por possuir elevadas respostas gamaespectrométricas, representadas pelos domínios Ct1 (Alta a muito alta) e subdomínio 3gm (K: médio-alto; Th: médio-alto, U: médio-alto), e magneticamente associada a domínios com baixas respostas magnéticas (Dr1). As imagens magnéticas sugerem que esses corpos não são magnéticos. Ocupa uma extensa área, nas regiões centro-oeste, sul e centro-leste. Essa unidade aparece sobre terrenos de topografia elevada, ultrapassando os 1000 metros, com concentrações de tório nas cristas dos morros. O potássio e o urânio são comuns nas encostas.

Os subdomínios gamaespectrométricos que representa essa unidade mostram respostas gamaespectrométricas muito similares sugerindo que os corpos que ocorrem à oeste (Granito Itabira), centro-leste (Açucena) e sul (Peti) possam representar o mesmo corpo. O Granito Açucena encontra-se particionado e deslocado do Granito Itabira por uma grande estrutura NE-SW, a zona de cisalhamento Pedra Branca. Uma forte estrutura observada tanto em gama quanto em magnetometria, de direção NW-SE, também sugere essa interpretação (Figura 6.5).

As interpretações obtidas para as subunidades 3gm também mostram que os granitos da Suíte Borrachudos apresentam grandes variações composicionais internas, é o caso do corpo Açucena, a leste e Peti, a Sul. Nota-se, assim, que não são tão homogêneos como se depreende da geologia conhecida, com variações composicionais dentro do próprio corpo. A imagem de potássio e do potássio anômalo (Figura 4.3 e 4.20) revela que partes do potássio desses corpos foram lixiviados e concentram-se nas encostas, nas partes mais baixas dos mesmos e até mesmo migrando para as unidades do embasamento, concentrando principalmente na Zona de Cisalhamento Pedra Branca.

Observa-se também que é muito comum interdigitações de unidades do Supergrupo Rio das Velhas na maioria desses corpos. Na região centro-leste, essa unidade mostra um aspecto interessante: está sempre associada à unidade SGRv2, que é a principal hospedeira das mineralizações. Essa unidade também está associada há vários alvos de água-marinha e alexandrita. Outro aspecto interessante, principalmente nas unidades da porção centro-oeste é a interdigitação de unidades, como é o caso da unidade SGRv2, caracterizada principalmente pela magnetometria. Já na unidade da porção centro-leste ocorre à delimitação da unidade DMg1.

6.3.1.5 UNIDADE ITAMBÉ DO MATO DENTRO (UImD)

A unidade Itambém do Mato Dentro corresponde a quartzitos. Esse tipo de rocha mostra em geral, magnetismo baixo e gamaespectrometria também baixa.

Ela é composta pela unidade UImD. Essa unidade é representada pelo domínio Ct4 e subdomínio 9gm (K: baixo; Th: baixo; U: baixo) e encontra-se no extremo oeste da área, com pequena representação em área. Tem a forma de uma cunha adentrando a área e representa pequenos morrotes. Essa unidade mostra um grande enriquecimento de potássio anômalo na porção central da área (Anexo A.5.20).

6.3.1.6 INTRUSÕES DIVERSAS - METAGRANITÓIDES (Mg)

Nessa definição estão diversas unidades integradas interpretadas como intrusões, que englobam uma diversidade de termos que foram individualizados nos mapas aerogeofísicos, mas que não existem correspondentes nos mapas geológicos. Podem ocorrer intrudindo unidades interpretadas como pertencentes ao embasamento ou outras unidades. A seguir serão apresentadas as caracterizações geofísicas dessas unidades.

A unidade Mg1 ocorre cobrindo uma pequena área no extremo oeste do projeto Itabira-Ferros e é composta pelo domínio Ct3 e subdomínio gama 20gm (K: médio; Th: baixo-médio; U: baixo-médio) e unidade magnética Dr4 (intensidade elevada, ~300nT). Aparece sobre um relevo topográfico suave (~600 metros).

A unidade Mg2 composta pelo domínio Ct4 e subdomínio 10gm (K: baixo-médio; Th: baixo-médio; U: baixo-médio) e a unidade magnética Dr1. O relevo é moderado, em torno de 700 metros e com grande extensão areal.

Pequenos corpos ocorrem dentro dos corpos borrachudos. Esses corpos mostram uma composição bem mais definida com teores mais elevados dos três elementos do que os borrachudos e não mostram correlação geológica. Eles podem se correlacionados com as rochas granitóides. As unidades DMg1 podem corresponder, provavelmente, a esses corpos intrusivos. São corpos com teores altos de urânio, tório e potássio. Encontram-se dentro das unidades Sb4 e Sb5. Ela é composta pelo domínio Ct3 e a unidade gamaespectrométrica 15gm que apresenta teores elevados dos três elementos (K: alto; Th: alto; U: alto), unidade magnética Dr1. Tem representatividade areal muito pequena, porém é muito diferente das demais unidades, não sendo possível agrupá-la a uma outra unidade. O que levou a separar essa unidade da Sb5 é o alto teor dos seus radioelementos, porém ela poderia representar porções em forma de lascas ou até mesmo uma fase mais tardia da Sb5. Na região centro-leste, essa unidade encontra-se intimamente associada à unidade SGRv2. Topograficamente mostra um relevo elevado, acima dos 1000 metros.

6.3.2 Integração das Estruturas Geofísicas-Geológicas

No mapa geológico da região em foco há poucas medidas estruturais (Figura 6.). Mesmo assim indicam que a principal orientação encontra-se na direção NE-SW. Esse padrão, embora de detalhe, corrobora com aquele exibido pelos resultados da interpretação quantitativa dos dados magnéticos feitos pela Deconvolução de Euler (Figuras 5.15, 5.16 e 6.12).

É possível notar o padrão sigmoide na figura 6.12. Esse padrão é concordante com o observado nas estruturas principais que está na direção NE. Essa direção é semelhante ao encontrado nos lineamentos do mapa gamaespectrométrico (Figuras 4.23 e 6.5a).

No que concerne às estruturas mapeadas, lineares e não lineares, a visão da magnetometria é de um quadro geral bem mais detalhado e completo do que aquele visto pela gamaespectrometria, principalmente porque estão ligadas às concentrações localizadas de minerais magnéticos nas superfícies de discontinuidades ou de quebra. Assim, há superposições importantes nas duas indicações, principalmente em relação às orientadas NW-SE e E-W (Figura 6.5b).

É importante frisar a quantidade e a qualidade das indicações estruturais que puderam ser a estes agregadas (Figura 6.5b) comparativamente à base geológica disponível (ver Figuras 6.10 e 6.16). O quadro das estruturas locais está longe de haver sido esgotado, em seu traçado e detalhamento. Foram feitas apenas as indicações daquelas mais proeminentes interpretadas conforme já descrito anteriormente e atendendo a apresentação na escala básica usada (1:100.000). O que pode ser ressaltado nesta análise é o fato de que há uma separação bem visível, em toda a área levantada, de três tipos de relevo: o primeiro conjunto parece indicar que suas fontes formam tendências sinuosas e contínuas dispostos em faixas na direção NE-SW nas porções central, norte, noroeste e nordeste, observados tanto em magnetometria quanto na gamaespectrometria (Figura 6.5a e b).

O segundo conjunto na parte central predomina o sistema orientado E-W, cortado por outros menos abundantes, principalmente segundo as direções NW-SE (Figura 6.16). Na parte central da área tem-se a Zona de Cisalhamento Pedra Branca que se encontra cortado por outras feições lineares de direção E-W. O que se pode observar nessa zona é que as feições lineares de direção E-W vão mudando de orientação E-W para NE-SW a partir da parte central dessa zona de cisalhamento em

direção a sua parte norte. Na porção superior dessa zona há uma outra feição linear de direção E-W deslocando todo esse conjunto para a direita, num movimento para oeste. Na parte leste há uma série de feições de direção NW-SE que corta todo o centro da área. Na região das principais mineralizações de esmeraldas a área é levemente arqueada com vergência para NNW.

O terceiro conjunto, predomina o sistema orientado WSW-ENE. O sistema segundo NW-SE também está presente, porém com manifestação mais discreta (Figura 6.16). O que chama a atenção nesse bloco é uma grande feição linear que corta toda a área com direção NW-SE e que separa dois tipos de relevo, um mais enrugado, centro-sul e outro mais liso sul-sudoeste.

Poder-se-ia dizer que três sistemas dominam as orientações das feições lineares observadas: um com orientação NE-SW (D1) que parece formar par com D2 disposto na direção NW-SE (D2) e um terceiro, disposto segundo E-W (D3) que é bem representado e parece último evento em relação aos outros dois (Figura 6.16). O lineamento D1 representa a direção de alinhamento preferencial, NE-SW. Na região central da área, tem-se uma feição em sigmóide que, provavelmente, representa a zona de cisalhamento Pedra Branca, de movimento dextral. O lineamento D2 trunca os lineamentos de direção NE-SW, e é marcado por feições com direção aproximada de $N40^{\circ}W$, configurando, provavelmente um sistema de falhas transcorrentes de movimento sinistral, visto que alguns lineamentos D1 são deslocados por D2, isto pode ser observado no grande lineamento que cruza a área na porção central, bem como do extremo norte. De acordo com o arcabouço estrutural conhecido na literatura, esses lineamentos são atribuídos a um evento mais antigo, provavelmente Transamazônico, marcado pela abertura do processo de rifte na região (Uhlein 1991) e marcados por uma compressão E-W. Os lineamentos D2 são atribuídos ao Ciclo Brasileiro (900 Ma a 600 Ma) ou mesmo reativados nessa fase, gerando as estruturas com direção aproximadamente $N40^{\circ}W$.

A Figura 6.13 mostra um detalhe de dobras intrafoliais/parasíticas entre os estratos deslocados de biotititos e segregações de quartzo na área da mina belmont. È possível observar o movimento em que ocorreu nesses rochas. Enquanto as figuras 6.14 e 6.15 mostram estruturas de contracionais deformacionais sinmetamórficas entre os estratos de biotititos e segregações de quartzo e pegmatitos na área da mina belmont. Observa-se também a principal direção de movimento deformacional ocorrido nesses corpos. A figura 6.17 mostra uma comparação entre as

interpretações estruturais geofísicas obtidas da magnetometria e gamaespectrometria com as interpretações estruturais da geologia obtidas a partir dos geológicos disponíveis para a região.

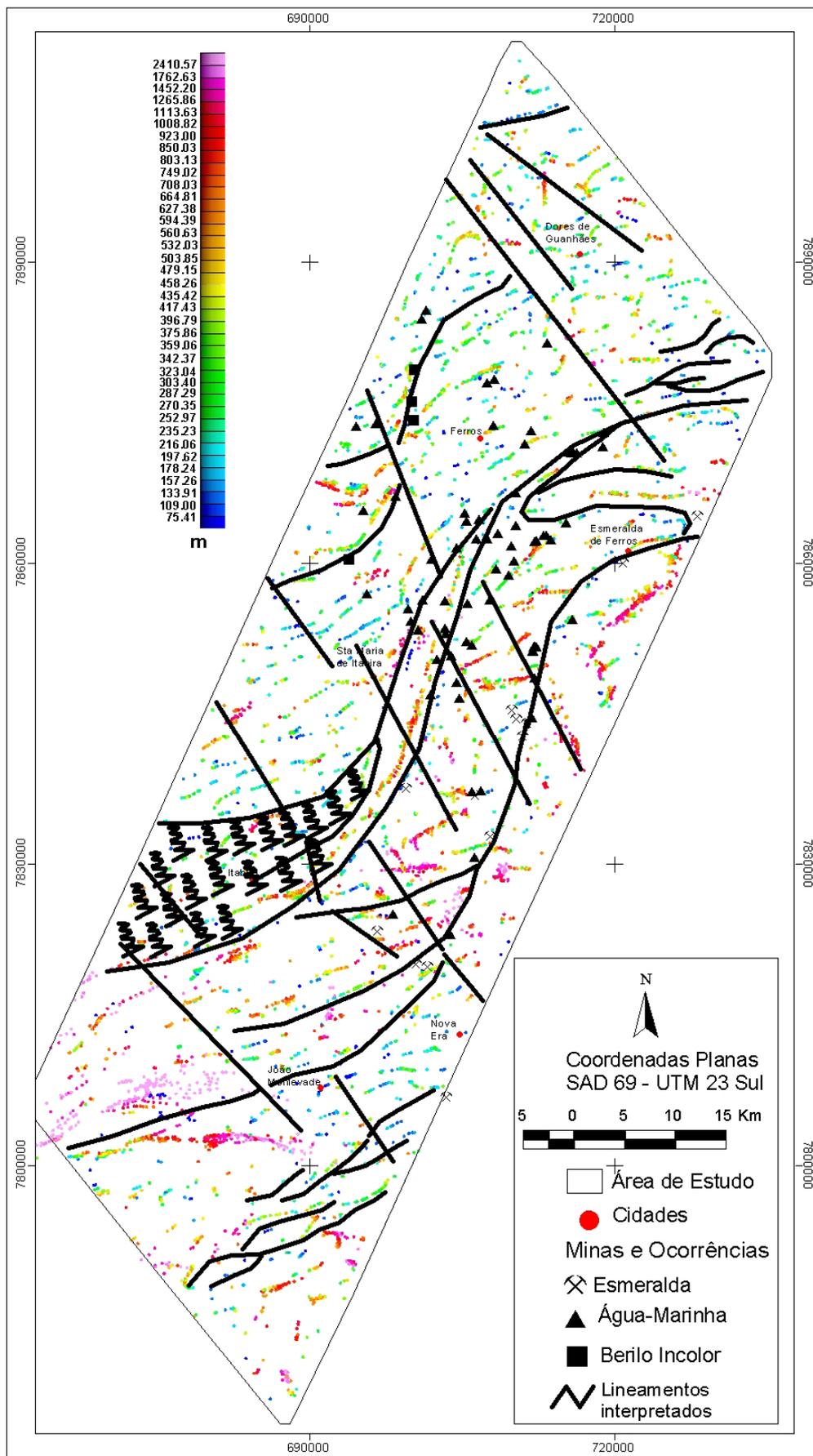


Figura 6.12: Imagem da deconvolução de Euler (Índice 0, com tolerância de 10%) com as interpretações das estruturas obtidas da geofísica.

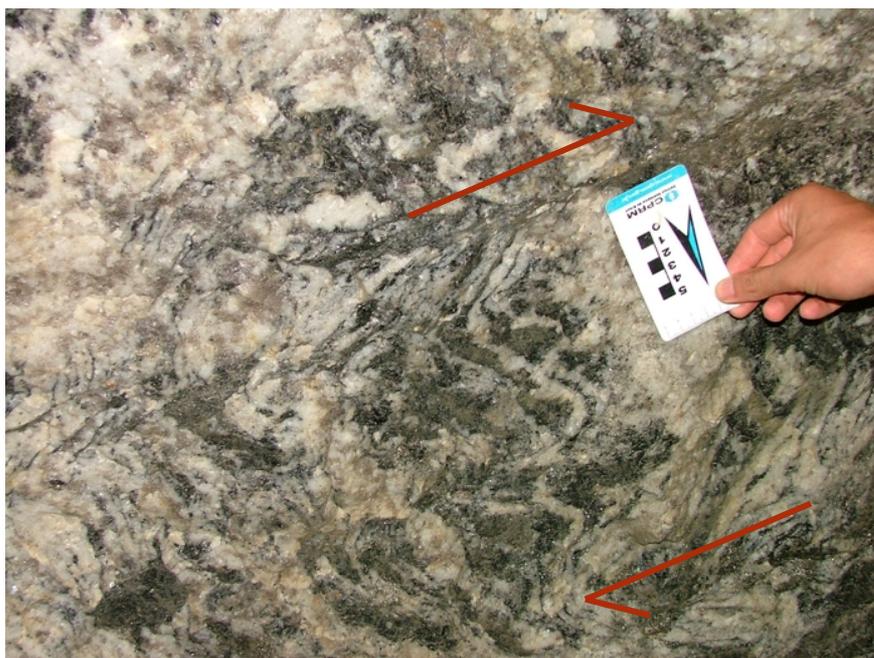


Figura 6.13: Imagem mostrando detalhes de dobras intrafoliais/parasíticas entre os estratos deslocados de biotitos e segregações de quartzo na área da mina Belmont. As setas em vermelho dão a indicação do movimento deformacional ocorrido nesses corpos.



Figura 6.14: Imagem mostrando detalhes de dobras contracionais deformacionais sinmetamórficas entre os estratos de biotitos e segregações de quartzo e pegmatitos na área da mina Belmont. As setas em vermelho dão a indicação do movimento deformacional ocorrido nesses corpos.



Figura 6.15: Outro detalhe das dobras contracionais deformacionais sinmetamórficas entre os estratos de biotititos e segregações de quartzo e pegmatitos na área da mina belmont. As setas em vermelho dão a indicação do movimento deformacional ocorrido nesses corpos.

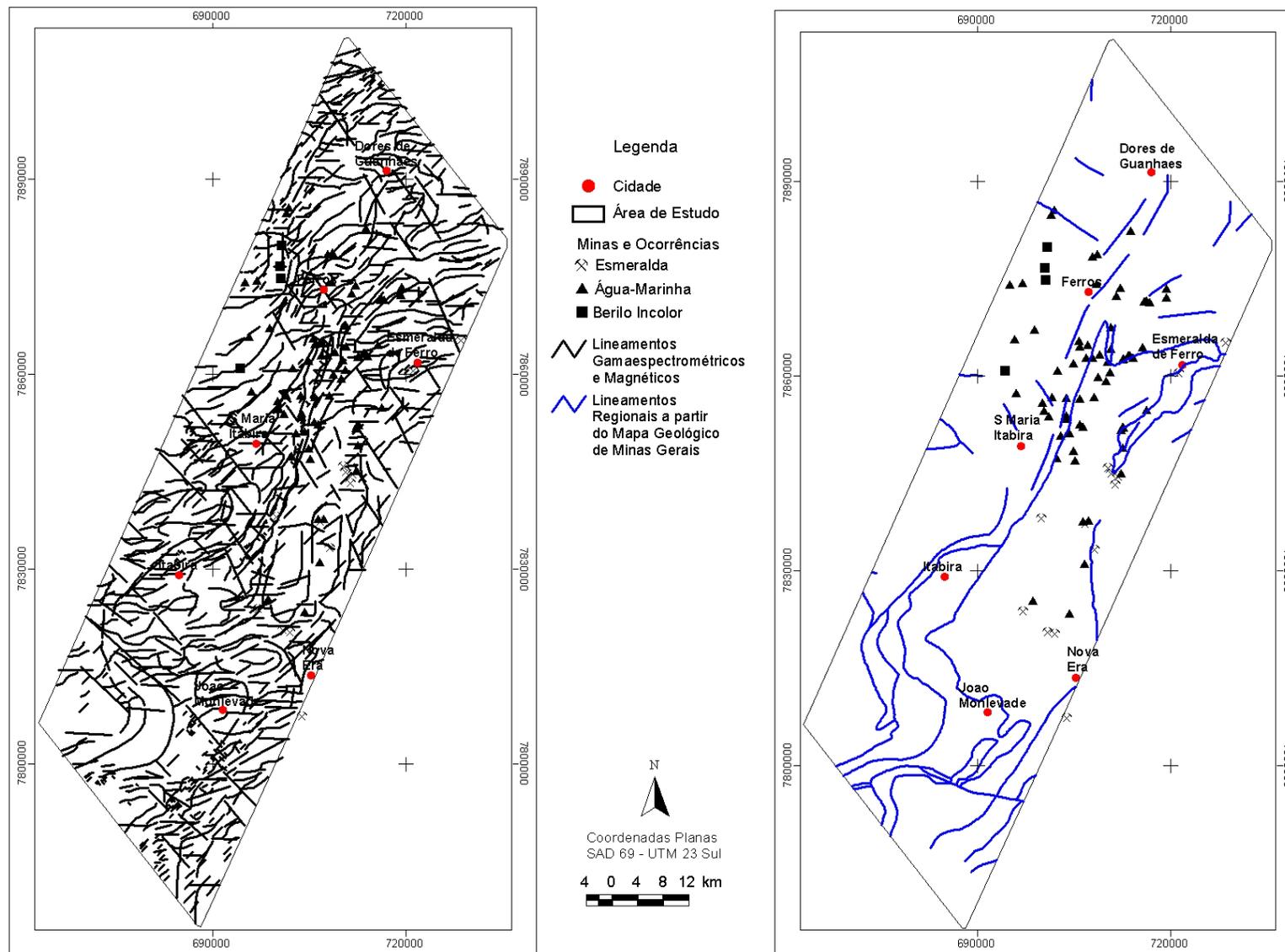


Figura 6.16: Mapa comparando os principais lineamentos gamaespectrométricos e magnéticos (A) com as interpretações estruturais do mapa geológico da CPRM (2004) para a área em estudo.

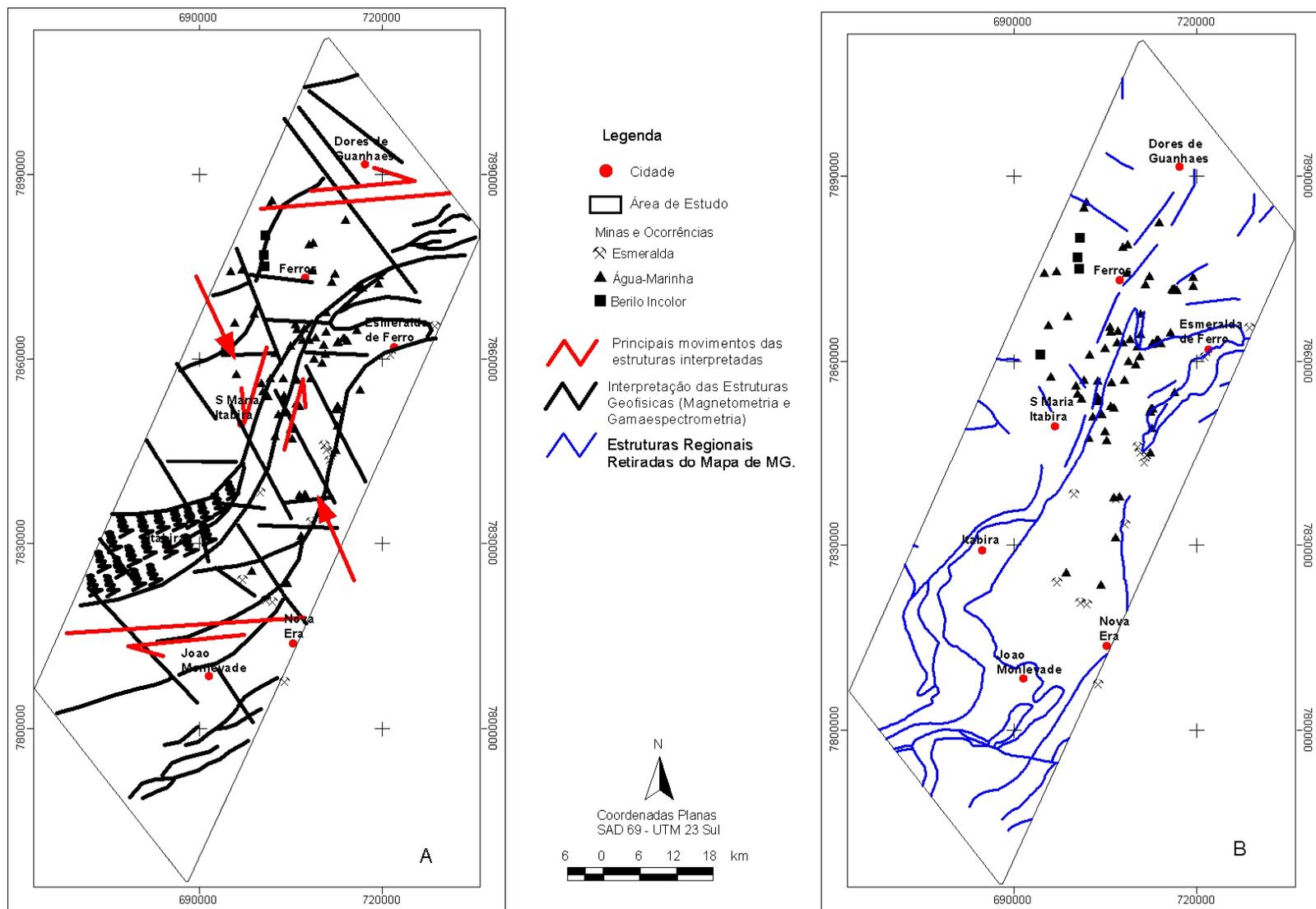


Figura 6.17: Mapa mostrando a interpretação da cinemática para as estruturas geofísicas (A) em comparação com as estruturas regionais obtidas do mapa estrutural da CPRM (2004) para a área em estudo.

6.3.3 Prospecção Mineral

Verifica-se que a prospecção geofísica usando aerolevantamentos para cobrir alvos relativos às concentrações de determinados elementos está bem balizada e a integração dos dois campos físicos medidos (gamaespectrometria e magnetometria) podem dar uma visão geral coerente e robusta de litologias e estruturas.

Para uma melhor visão das feições que abrigam as mineralizações da área, principalmente esmeralda, foi feito um recorte no banco de dados de geofísica na região de maior concentração dessas jazidas, porção centro-leste (Figura 6.18), com o objetivo de obter uma correlação dessas ocorrências com as unidades e estruturas gamaespectrométricas e magnetométricas. A partir desse recorte, foi realizado um novo processamento, utilizando uma célula de 25 metros de lado. As interpretações que se seguiram foram em escala de 1:25.000 (Figuras 6.18 a 6.22).

Para se ter uma visualização do controle das ocorrências minerais foram adicionados a esses mapas as ocorrências minerais conhecidas de esmeraldas para facilitar a visualização de possíveis correlações às unidades gamaespectrométricas e magnéticas.

Da gamaespectrometria verifica-se que as mineralizações de esmeralda encontram inseridas em litologias com baixos valores de K e Th e médio-alto de U (unidades 14 e 17, Figura 6.23). É possível observar que as unidades que representam o Supergrupo Rio das Velhas, mas especificamente a o Grupo Quebra Osso possui cores esbranquiçadas na composição CMY (Figura 6.18). Essa cor esbranquiçada representa baixo conteúdo dos radioelementos, confirmando os baixos valores de K e Th para essas rochas.

Na parte centro-leste da área é notável a unidade SGRv2 (Supergrupo Rio das Velhas), em que concentra boa parte da mineralização de esmeralda conhecida. Essa unidade encontra-se interdigitada pela unidade Sb5 (porção centro-leste) da Suíte Borrachudos e a mineralização encontra-se no contato dessa unidade (SGRv2) com a unidade Sb5. Um detalhe interessante é que a unidade SGRv2 aqui se mostra mais complexa. Ela mostra uma variação composicional dos três elementos K, U e Th. Há regiões de concentrações elevadas de cada elemento e em outras áreas ausência total dos mesmos. O que se observou também é que, em geral, as minas conhecidas encontram em locais ou próximos a fronteiras com enriquecimento em urânio, unidade 17 da figura

6.23. O mapa de potássio anômalo (Figura 6.19) mostra que a unidade SGRv2 apresenta valores anômalos de potássio nessas unidades (unidades 14 e 17), mostra também que na borda centro-norte da unidade Sb5 (Suíte Borrachudos) há enriquecimento elevado desse elemento.

O mapa das interpretações estruturais gamaespectrométricas de detalhe (Figura 6.24) mostra que as mineralizações da região ocorrem em áreas profusamente falhadas, principalmente ligadas as bordas da zona de cisalhamento Pedra Branca. É possível observar também que as mineralizações conhecidas formam uma faixa, espécie de tendência de direção NW-SE, entre duas falhas de mesma direção que vai das cidades de João Monlevade, ao sul, até Dores de Guanhães, ao norte (Figuras 6.27 e 6.28).

As mineralizações de esmeralda concentram na porção leste da zona de cisalhamento Pedra Branca, enquanto que outras mineralizações de berilo (água-marinha e outros berilos) estão ligadas diretamente a essa zona de cisalhamento, na parte central da área ou a outras feições NW que recortam essa zona de cisalhamento. Isso possibilita inferir que essas zonas de falhamento facilitam o transporte de fluidos hidrotermais.

Da magnetometria, a área mostra um relevo magnético local bastante intrincado e de difícil compreensão (Figuras 6.20 a 6.22). O desenvolvimento feito sobre esta ferramenta permite transformá-la em visões diferentes desta fábrica que, logicamente, deverão ser interpretadas da sua expressão mais simples para a mais complexa. Desta forma, pode-se ver que os produtos conseguidos permitem dar uma visão de como pode ser esta tarefa.

Partindo-se da imagem mais simplificada (Figura 6.20) pode-se trabalhar até a mais complexa (Figura 6.22) acrescentando-se os detalhes na medida em que o comportamento espacial da fonte (nível mineralizado, no caso) for sendo entendido. Assim, uma possível interpretação para a estrutura que conteria as mineralizações de berilo (esmeraldas, águas-marinhas e outros beilos) pôde ser esboçada (Figura 6.28).

Logicamente, o exercício feito acima é apenas uma das possíveis interpretações sobre a geometria do que seria o nível onde aparecem as ocorrências de esmeraldas assinaladas. A estrutura em forma de U, unidade SGRv2 seria de um nível provavelmente dobrado (numa antiforma ou sinforma complexa) como se denota da continuação da unidade da parte leste a NE. A parte NE dessa feição mostra uma continuação para áreas fora do limite da área de estudo. Há indicação da superposição de deformações locais ao seu longo não só plásticas (dobramentos) mais rúpteis

(falhamentos) o que dificulta sua interpretação. De qualquer modo, dá para notar que grande parte das ocorrências estão situadas nas bordas desta estrutura, proximamente a pontos de inflexão (eixos locais na mesma). Vale lembrar que os corpos intrusivos Borrachudos, associados às unidades do Supergrupo Rio das Velhas não foram identificados nos dados magnetométricos.

Como no caso anterior pode-se observar a que as ocorrências de água-marinha, e berilos incolores situadas mais ao centro da área (Figura 6.27), estão nas bordas da zona de cisalhamento Pedra Branca. Esta é obliterada por diversas falhas/fraturas com orientação E-W. São ainda visíveis várias feições em seu interior e traços da superposição de outras indicações estruturais que perturbam acentuadamente sua definição (Figura 6.28).

Apesar da sutileza da assinatura dos depósitos de esmeraldas, é possível construir uma assinatura para esses depósitos. Essa assinatura seria composta por:

- Anomalias magnéticas médias a altas;
- Anomalias gamaespectrométricas baixas de K e Th e elevada de U;
- Presença de falhas e lineamentos NE-SW e E-W, que podem indicar áreas de compressão.
- Presença de falhas e lineamentos N-S, que podem indicar áreas de alívio.

Diante do exposto sugerem-se algumas áreas como possíveis áreas-alvos para pesquisa e exploração desses minerais-gemas. Os alvos escolhidos são mostrados na figura 6.25.

Os alvos escolhidos destacam-se por apresentar as mesmas características observadas para os demais depósitos da área. Anomalias gamaespectrométricas baixas de K e Th e elevada de U. De fato, é possível perceber que essas áreas apresentam as mesmas intensidades de U. Tem-se também a presença de falhas e lineamentos NE-SW e E-W, como estruturas de compressão e estruturas N-S como áreas de alívio. Somem-se a isso, evidências de hidrotermalismo, observadas principalmente pela imagem de potássio anômalo e confirmada pela imagem da razão U/Th. Além do fato de que são identificadas anomalias magnéticas médias a altas encaixadas por falhas/dobras.

Outras áreas identificadas como prováveis áreas-alvos podem ser observada na parte N/NW (Figura 6.27). Elas foram identificadas a partir de assinaturas encontradas

nas imagens do filtro de amplitude para os canais de tório, potássio e urânio e classificação não supervisionada, respectivamente (Figuras 4.15 a 4.18). Outra imagem que confirma a escolha dessa área como provável área-alvo é a imagem do potássio anômalo, onde a mesma tem um alto teor de metassomatismo apontado por essa imagem (Figura 4.20). Na razão U/Th também é possível observar uma correlação muito similar ao do potássio anômalo para essa área.

Quanto aos aspectos estruturais, essas áreas são marcadas por intensos falhamentos NE-SW, E-W e recortados por feições NW-SE. Feições consideradas importantes no controle da mineralização encontram-se na direção N-S. Essas feições podem representar zonas de alívio e conseqüentemente explica a colocação dos corpos pegmatíticos mineralizados que ocorrem na região. Essas áreas são caracterizadas na magnetometria por assinaturas moderadas a altas, o que é perfeitamente compatível com o tipo de rocha, meta-ultramáficas. Essas áreas também são caracterizadas por anomalias gamaespectrométricas muito similares às encontradas para as áreas-alvos da região centro-leste, confirmando assim as contagens esperadas para esse tipo de rocha.

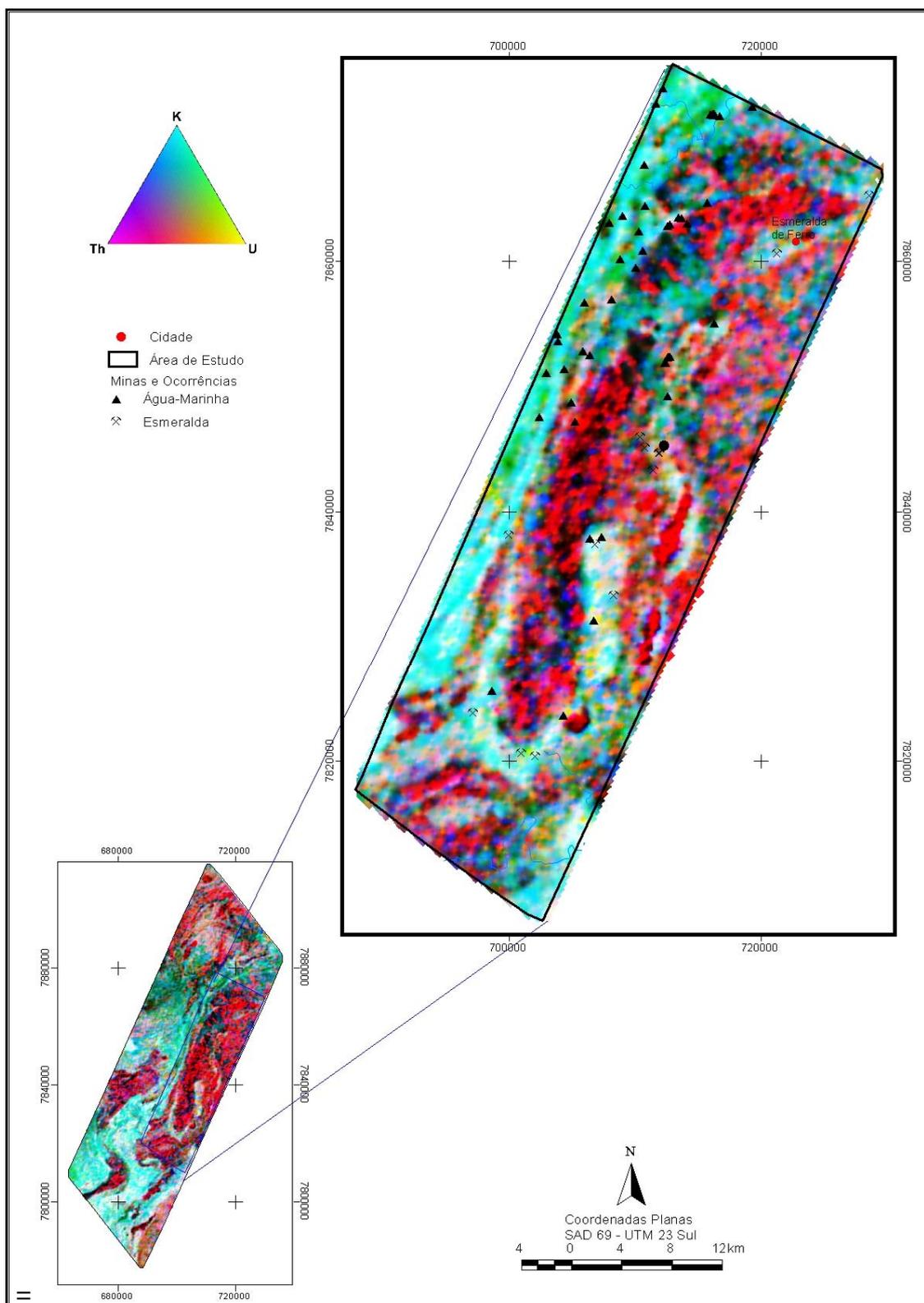


Figura 6.18: Imagem CMY mostrando o recorte utilizado para a área de principal concentração de mineralizações.

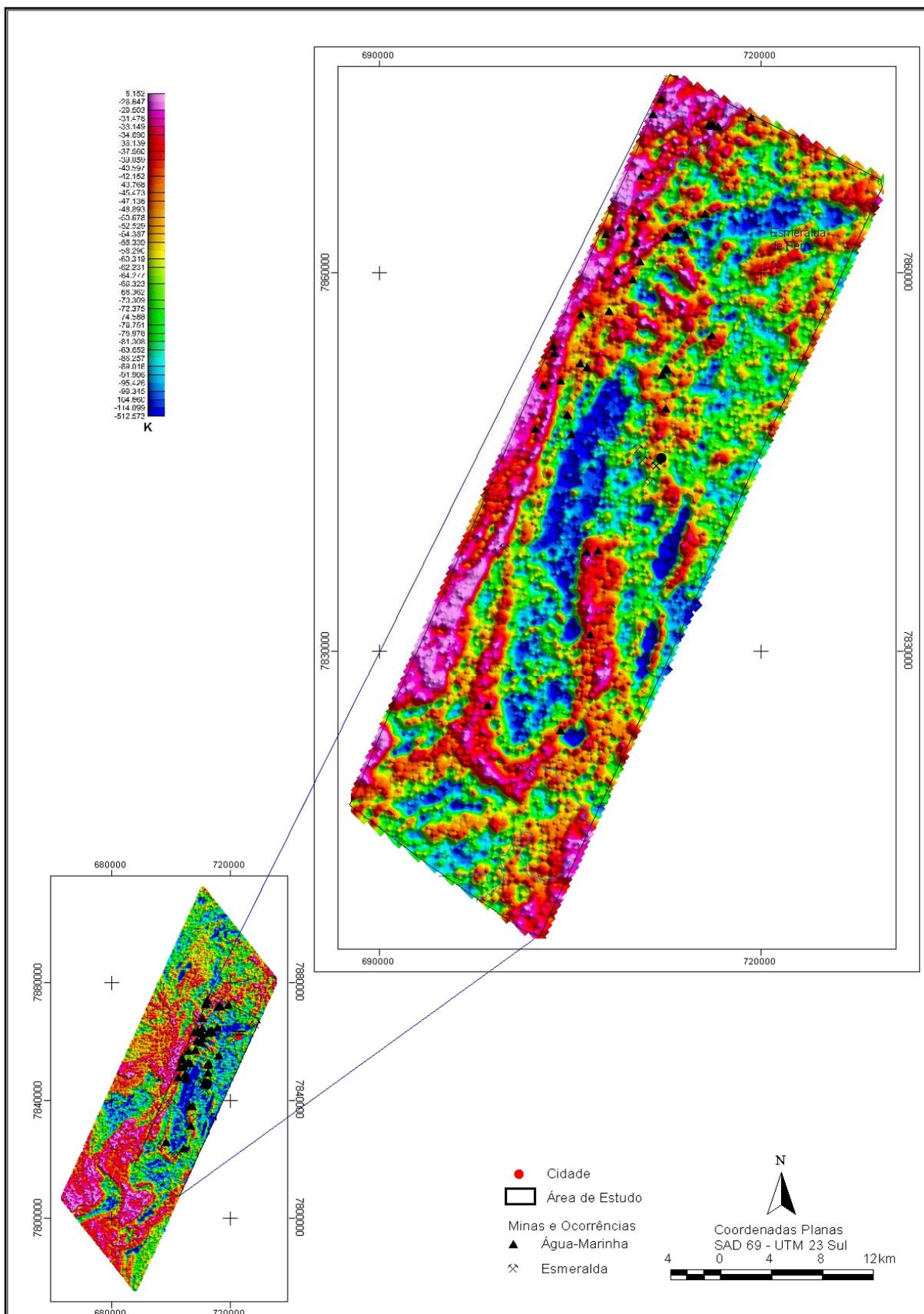


Figura 6.19: Imagem do potássio anômalo em detalhe utilizado para a área de principal concentração de mineralizações.

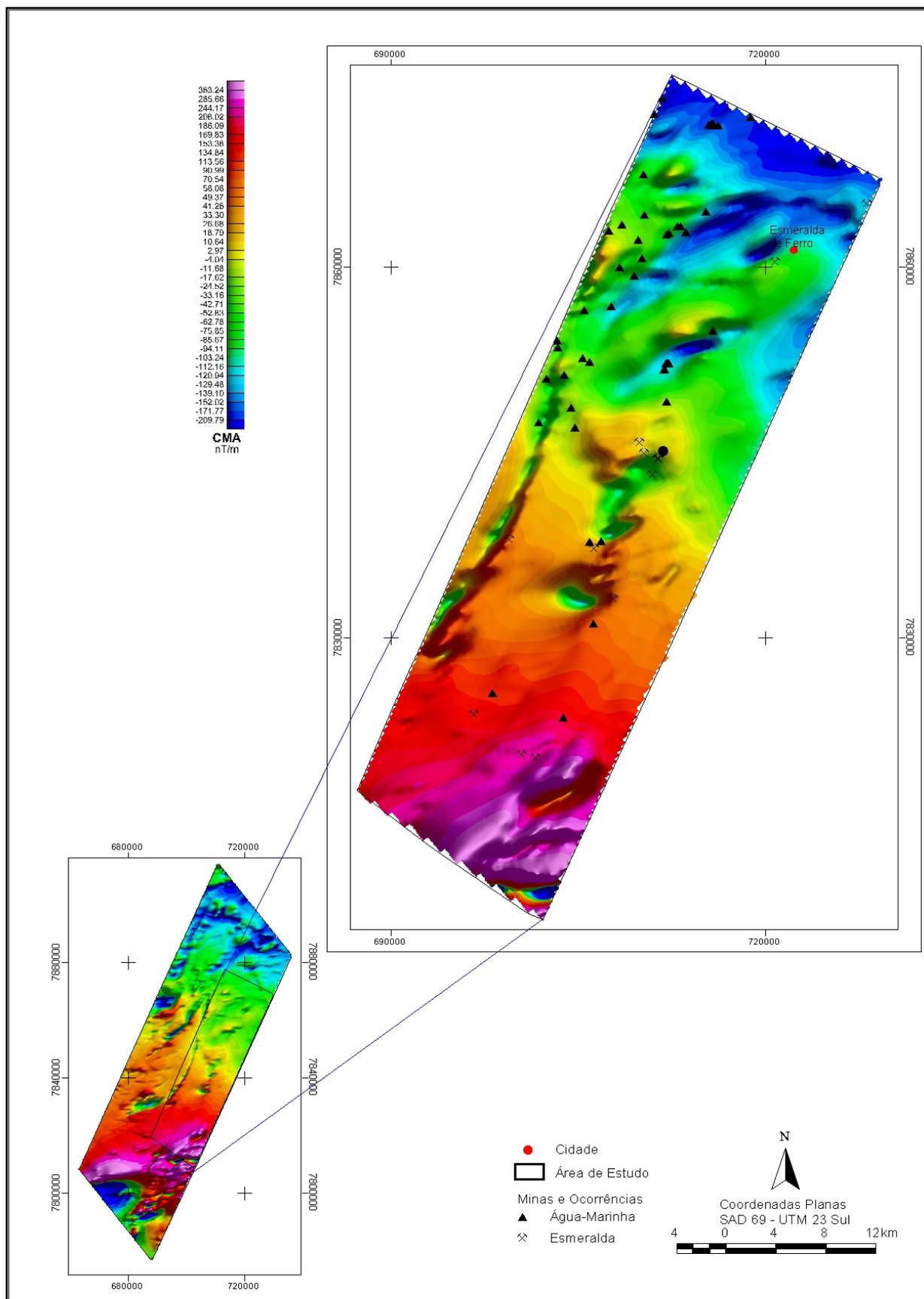


Figura 6.20: Imagem do campo magnético anômalo em detalhe utilizado para a área de principal concentração de mineralizações.

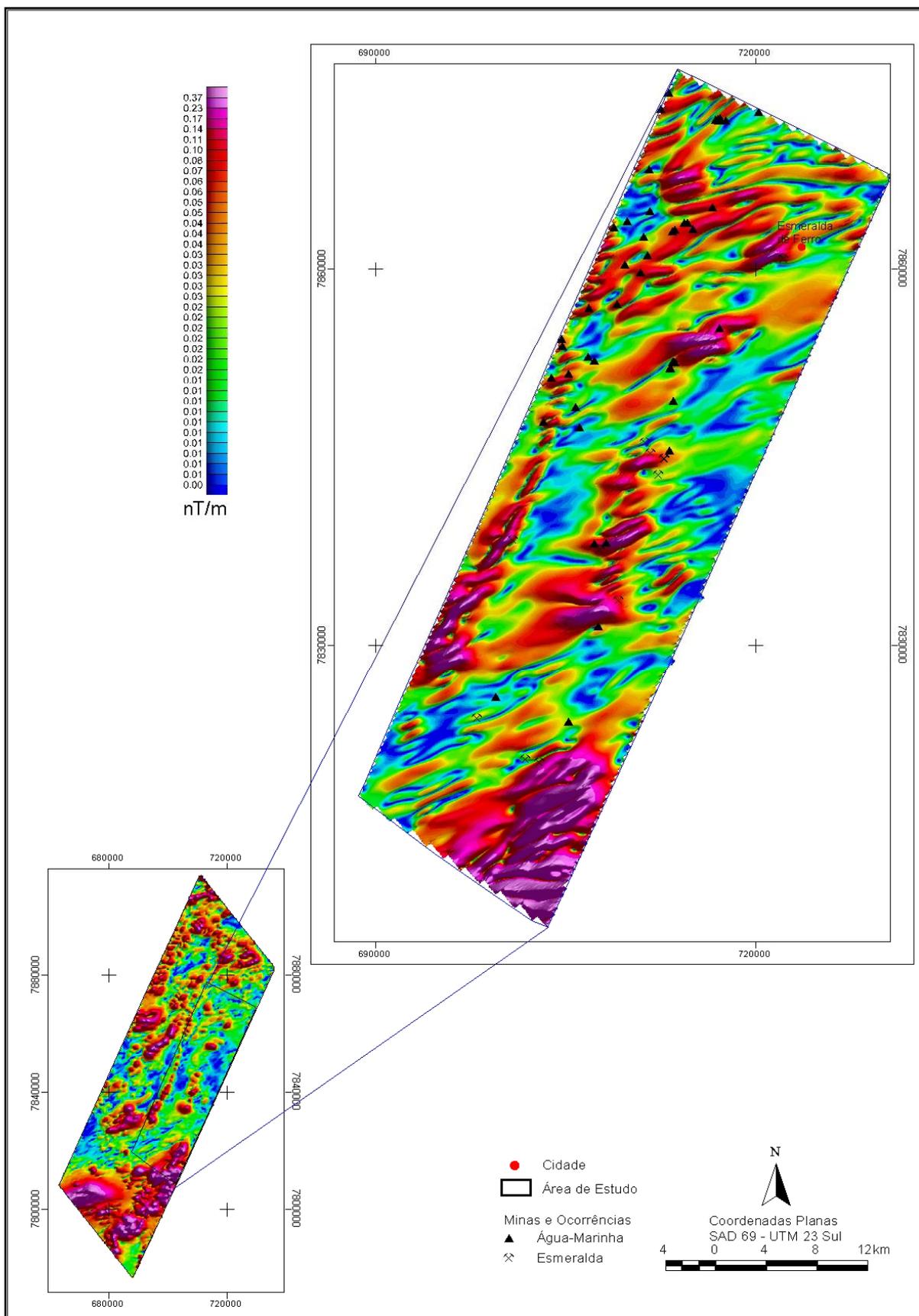


Figura 6.21: Imagem da amplitude do sinal analítico utilizado para a área de principal concentração de mineralizações.

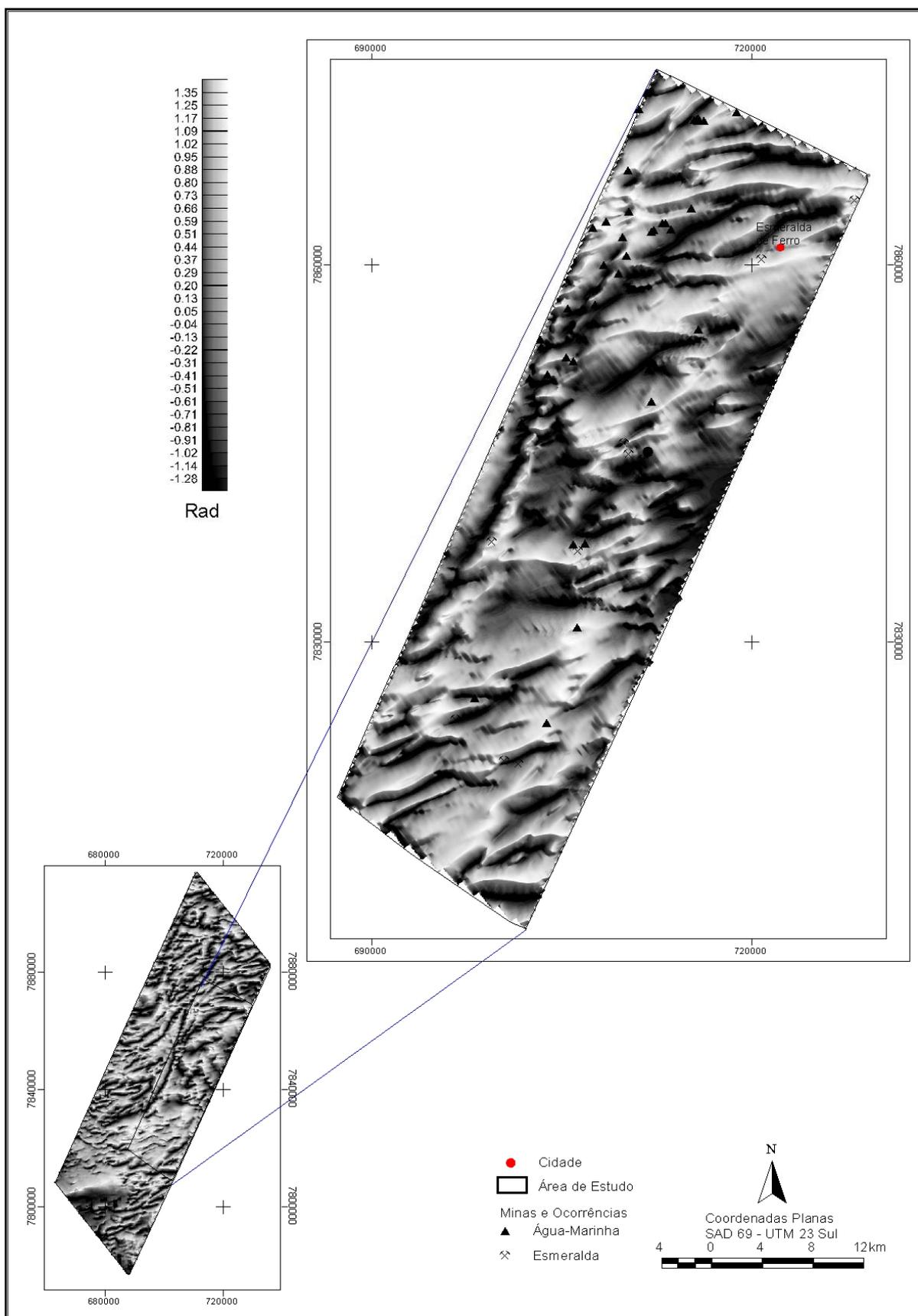


Figura 6.22: Imagem da inclinação do sinal analítico utilizado para a área de principal concentração de mineralizações.

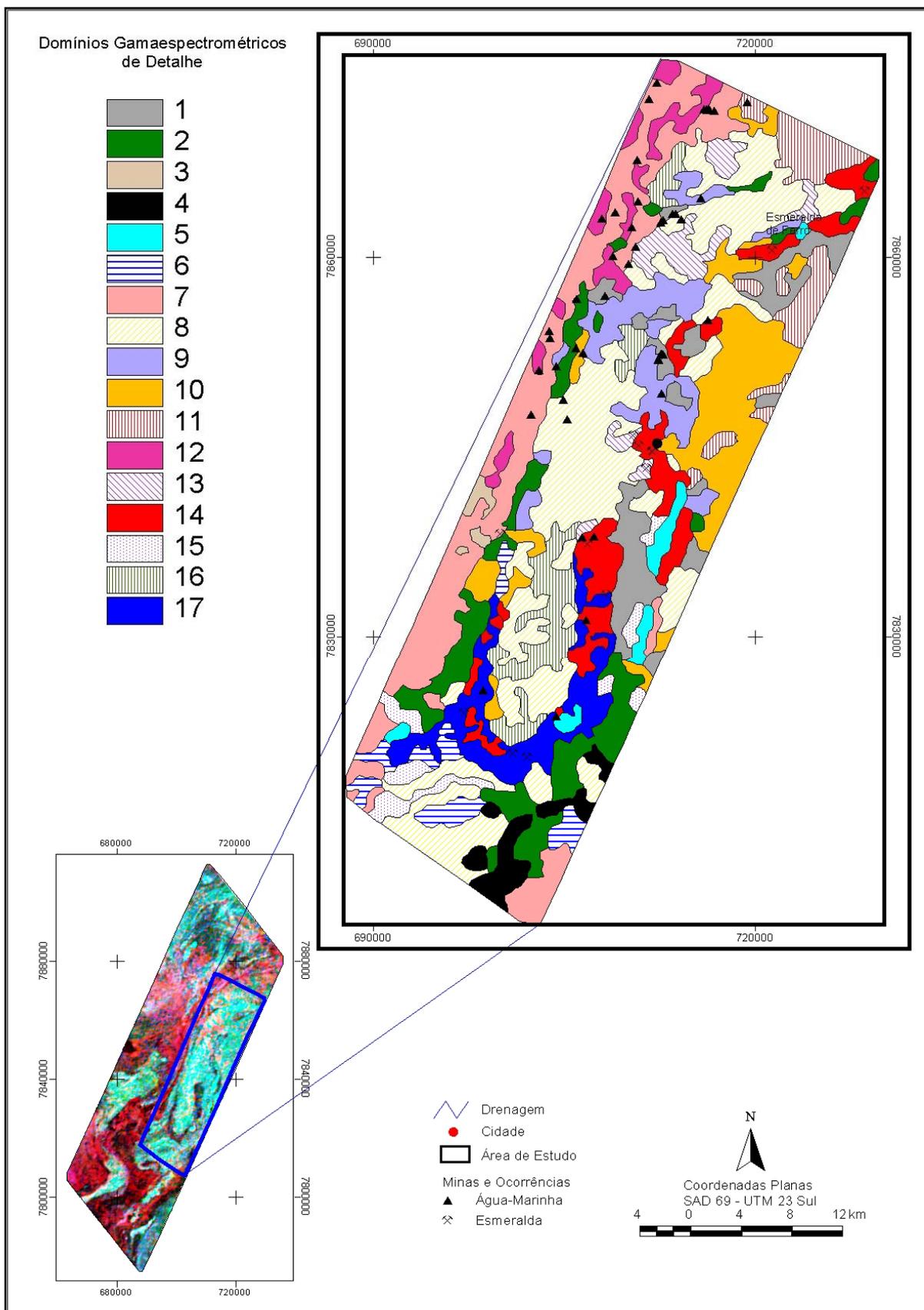


Figura 6.23: Mapa interpretado dos domínios gamaespectrométricos para a área de detalhe. Foi possível discriminar dezessete unidades de detalhe. As principais concentrações das mineralizações de esmeraldas encontram-se nas unidades 14 e 17. Jas as mineralizações de berilos e águas-marinhas encontram-se nas unidades 1 e 7.

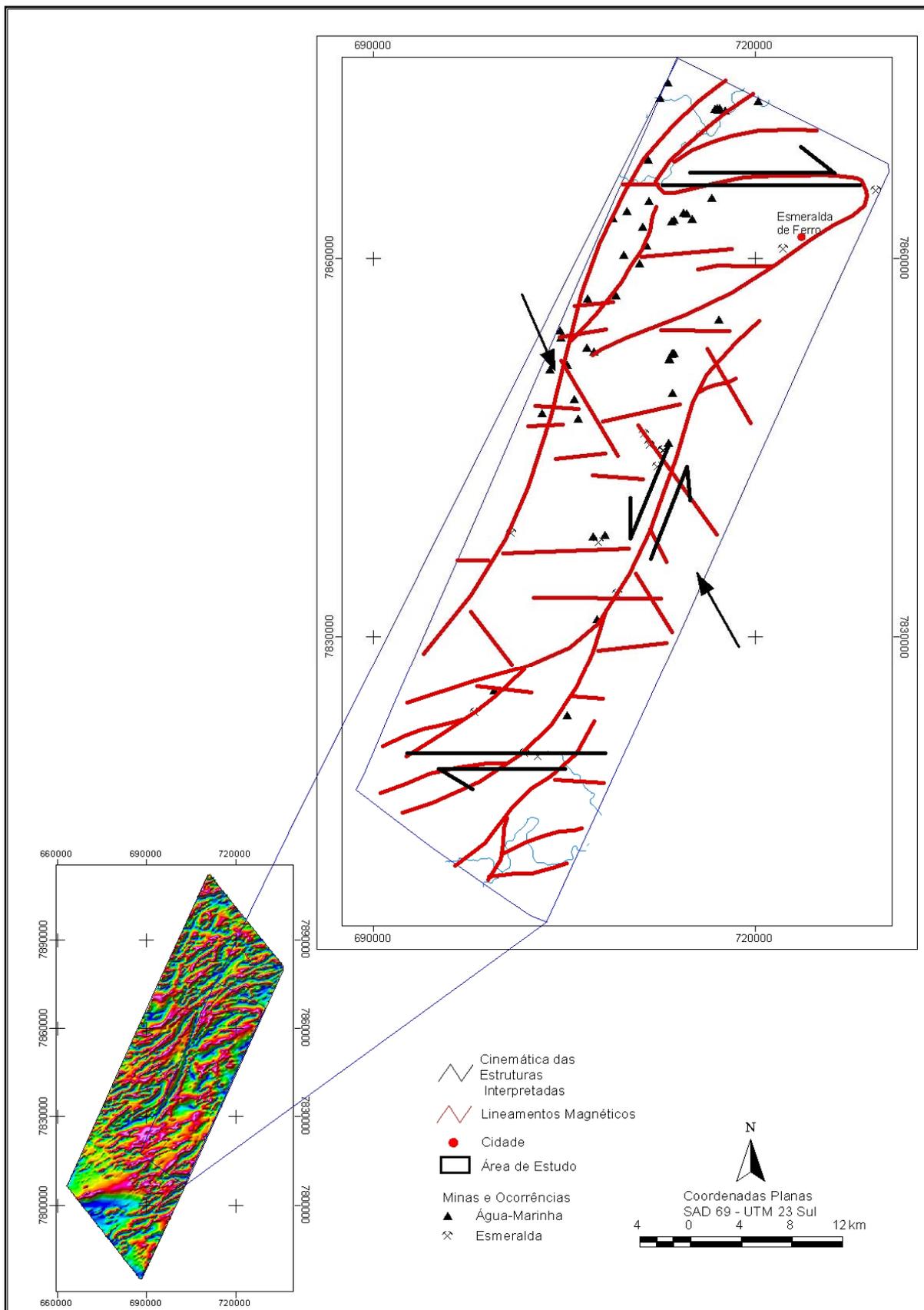


Figura 6.24: Mapa interpretado das estruturas geofísicas para área em detalhe. As setas em preto indicam a cinemática para essa região.

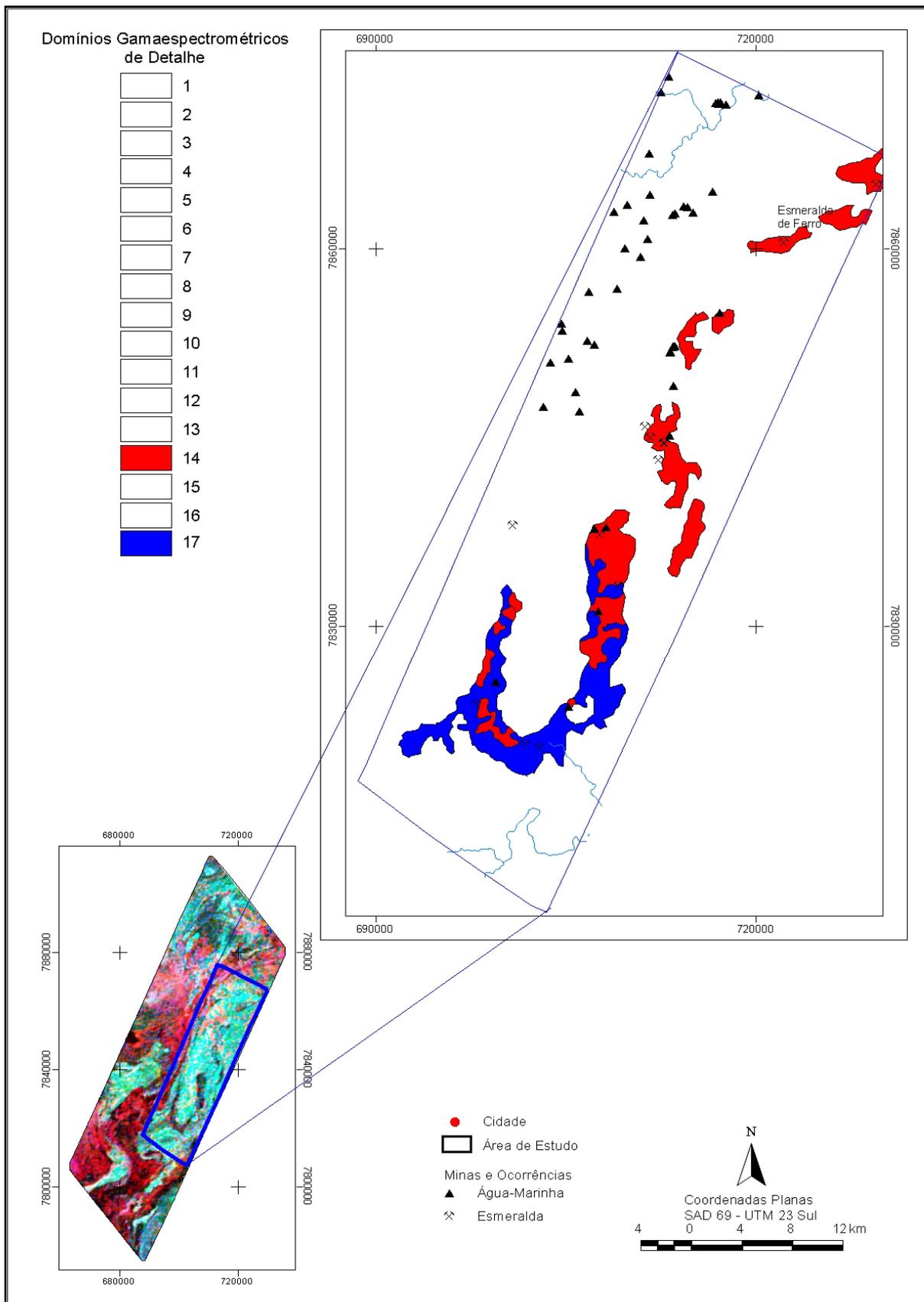


Figura 6.25: Mapa dos alvos escolhidos para prospecção de depósitos de esmeraldas na porção centro-leste.

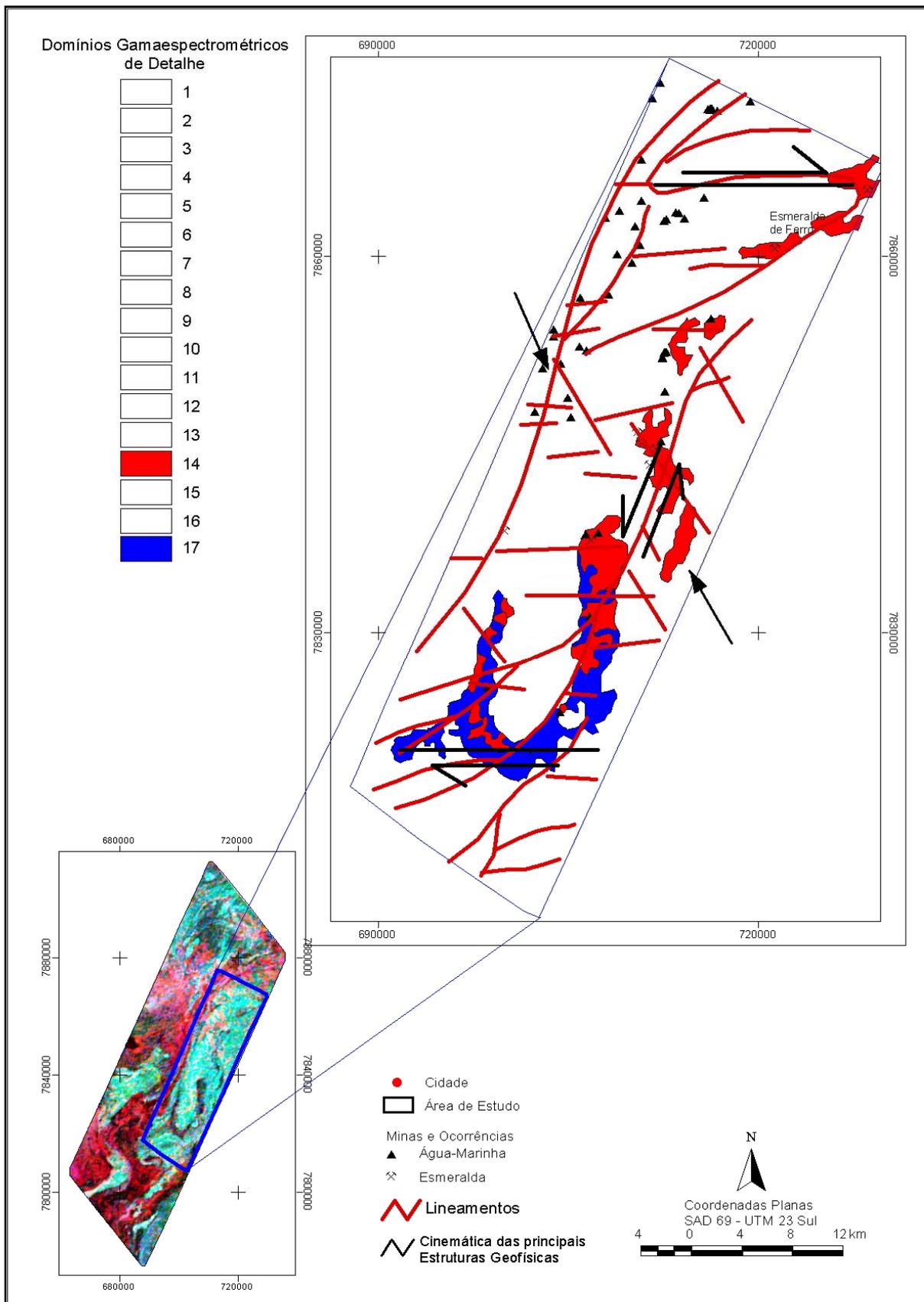


Figura 6.26: Mapa mostrando a integração dos alvos escolhidos para prospecção de esmeraldas na região de detalhe com as interpretações das estruturas geofísicas com sua cinemática.

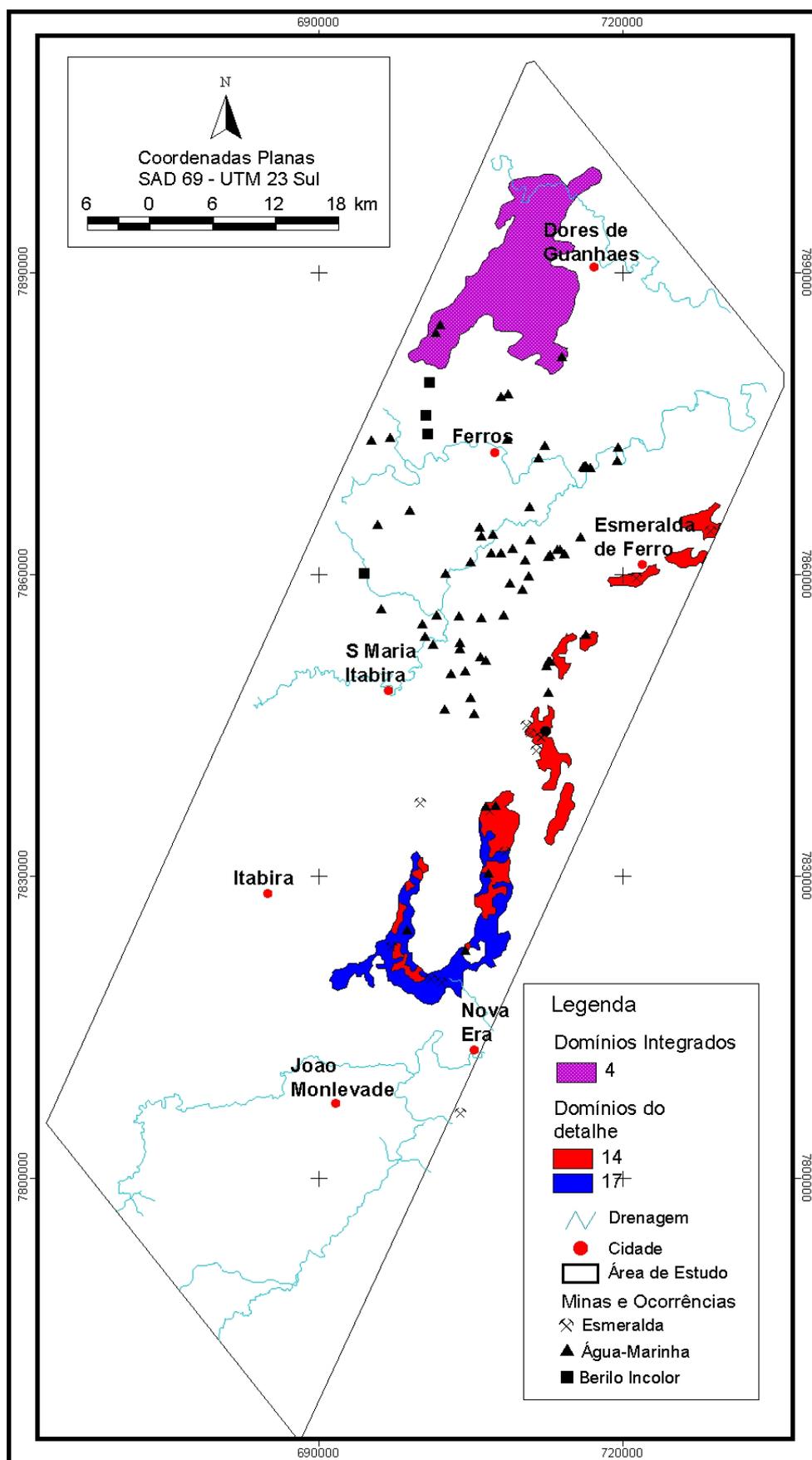


Figura 6.27: Mapa dos alvos escolhidos para prospecção de depósitos de esmeraldas e outros berilos em toda área de estudo.

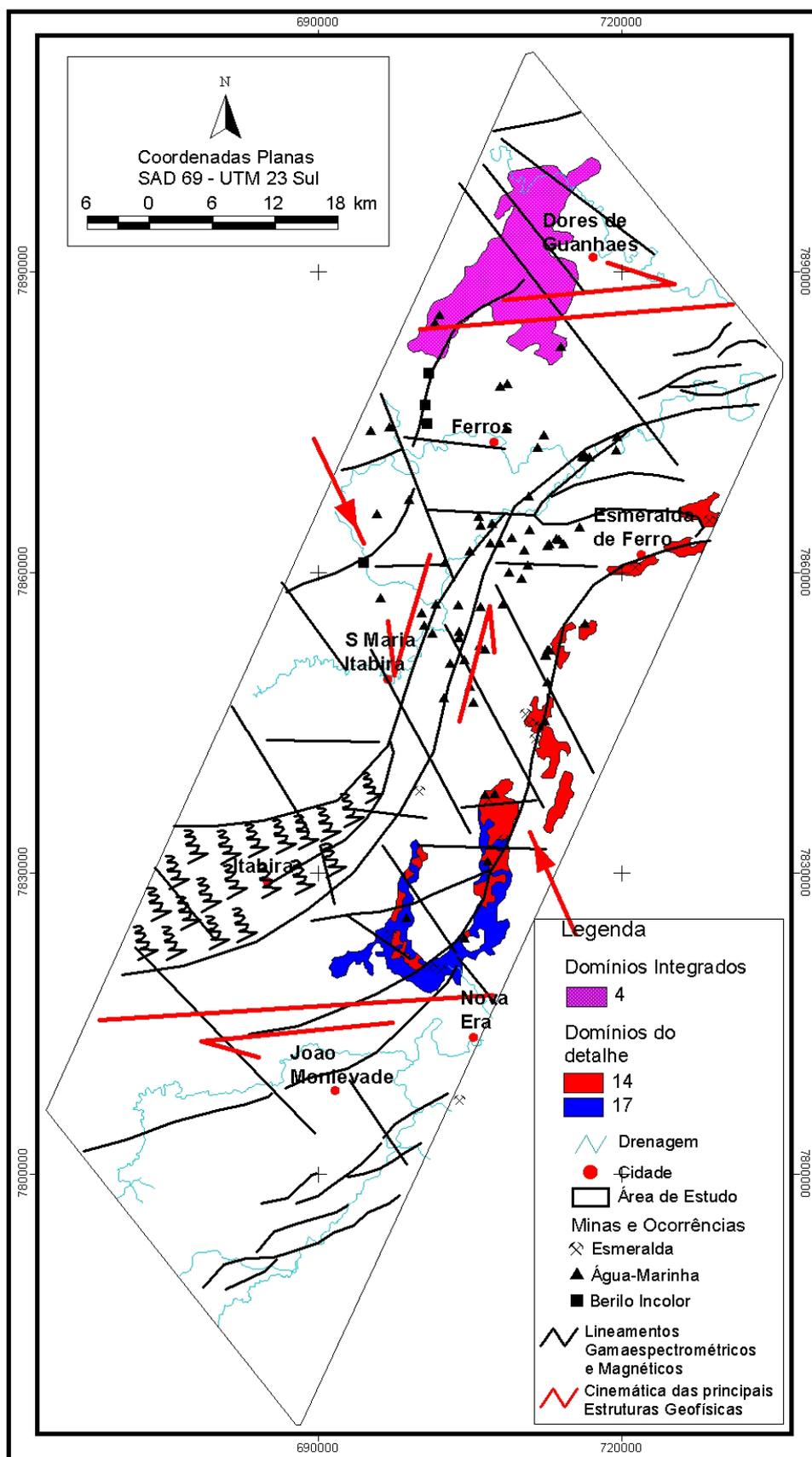


Figura 6.28: Mapa final contendo a integração dos alvos escolhidos para prospecção de depósitos de esmeraldas e outros berilos em toda área de estudo e sua interpretação estrutural. É possível observar que os principais lineamentos que controlam essas mineralizações estão na direção NE-SW.

Conclusão

Eu sou o Alfa e Omega, diz o Senhor Deus, aquele que é, que era e que há de vir, o Todo-Poderoso (Ap 1:8).

Na área pertencente ao Projeto Itabira-Ferros tem sido desenvolvido intensa atividade mineral por várias mineradoras e garimpeiros objetivando encontrar minerais-gemas de esmeraldas, águas-marinhas e outros berilos.

O estudo foi dividido em duas vertentes: (i) sua aplicação no mapeamento geológico e (ii) seu emprego na prospecção mineral.

Assim, com relação ao mapeamento geológico, a gamaespectrometria revelou um conjunto de assinaturas cuja checagem em campo pode acrescentar detalhes, e muitos, sobre a distribuição dos litotipos formadores do que seria esta geologia na região. Uma idéia do arcabouço tectônico/estrutural agregado a estes litotipos, através da magnetometria, permite complementar o quadro mostrado pela gamaespectrometria e extrapolá-lo para a subsuperfície.

Embora as unidades gamaespectroméricas sejam distintas entre si, houve uma tentativa de correlação com a geologia conhecida. Quando se faz uma comparação da geologia regional com os grandes domínios obtidos a partir das imagens da geofísica, observa-se que a imagem de contagem total mostra algumas correlações importantes, principalmente com os granitos da Suíte Borrachudos. Já as subunidades das imagens ternárias, RGB e CMY, mostraram variações internas das grandes unidades geológicas definidas no mapa de contagem total, permitindo subdividir a área em vários subdomínios.

Uma análise detalhada desses subdomínios mostrou que as unidades Sb1 a Sb5 representam os granitos da Suíte Borrachudos. Essa unidade é caracterizada por conteúdos relativamente médios de potássio e enriquecimento em tório e urânio. O potássio tende a se concentrar nas bordas e encostas, enquanto o tório tende a se concentrar nos topos. A resposta mostrou também que houve um grande lixiviamento de potássio para as unidades do embasamento, podendo ser confirmado pelas respostas de potássio anômalo. Já quando se faz uma comparação da composição entre os diversos corpos observa-se que não há grandes variações entre eles. O corpo da porção centro-leste (Corpo Açucena) é recortado pela unidade SGRv2 que representa unidade máficas,

provavelmente unidades do Supergrupo Rio das Velhas. Nessa unidade há a maior concentração das mineralizações de esmeralda. A porção N-NW da área, em mapa, é representada pelo granito Senhora do Porto (Suíte Borrachudos, Folha Conceição do Mato Dentro), porém as respostas gamaespectrométricas mostram rochas com contagens muito variadas, não sendo possível correlacionar somente a um corpo. Foram observados também rochas ricas nos elementos urânio e tório e que não têm uma representação geológica em mapa.

Pequenos corpos podem ser delimitados dentro dos subdomínios Sb5 e Cg4, com conteúdos relativamente semelhantes aos observados para os granitos da Suíte Borrachudos, porém com teores mais elevados dos três elementos, poderiam representar fases tardias desses corpos (pegmatitos?).

Os principais lineamentos gamaespectrométricos e magnéticos e sua interpretação têm direção principal N30°-50°W, além de fraturas nas direções próximas às direções NE-SW e E-W.

Poder-se-ia dizer que três sistemas dominam as orientações das feições lineares observadas: um com orientação NE-SW (D1) que parece formar par com segundo disposto na direção E-W (D2) e um terceiro, disposto segundo NW-SE (D3) que é bem representado e parece último evento em relação aos outros dois. O lineamento D1 representa a direção de alinhamento preferencial, NE-SW. Na região central da área, tem-se uma feição em sigmóide que, provavelmente, representa a zona de cisalhamento Pedra Branca, de movimento dextral. O lineamento D2 trunca os lineamentos de direção NE-SW, configurando, provavelmente um sistema de falhas transcorrentes de movimento sinistral, visto que alguns lineamentos D1 são deslocados por D2, isto pode ser observado no grande lineamento que cruza a área na porção central, bem como do extremo norte. Outras feições com direção aproximada de N40°W são encontrados na área.

No tocante à prospecção mineral, os trabalhos apresentam resultados preliminares. A análise dos dados mostra que há vários alvos importantes (ver, por exemplo, as figuras 6.23 e 6.27).

A partir das análises dos mapas de domínios e estruturas magnéticas e gamaespectrométricas, de ocorrências minerais conhecidas e da geologia conhecida, procurou-se determinar áreas potenciais para mineralizações. De acordo com os domínios magnéticos, as mineralizações de esmeralda encontram nas interfaces de baixa a média susceptibilidade magnética. A imagem da amplitude do sinal analítico mostra

uma correlação interessante com as mineralizações de esmeralda. Nessa imagem, em geral, essas mineralizações estão concentradas em altos magnéticos. Na parte centro-leste da área é notável uma feição com baixa susceptibilidade magnética em meio a unidade de susceptibilidade magnética média, que comporta as principais mineralizações de esmeralda. Essa feição em superfície corresponderia ao supergrupo Rio das Velhas.

Os mapas de gamaespectrometria confirmam que as mineralizações de esmeralda encontram inseridas em litologias com valores baixos-médios de K, Th e U (unidade SGRv2, Supergrupo Rio das Velhas).

No mapa das interpretações estruturais, observou-se que todas as mineralizações da região ocorrem em áreas profusamente falhadas, principalmente ligadas às bordas da Zona de Cisalhamento Pedra Branca, de regime deformacional dúctil a dúctil-rúptil. O interessante é que as mineralizações conhecidas formam uma faixa, espécie de tendência de direção NW-SE, entre duas falhas de mesma direção que vai da cidade de João Monlevade até Dores de Guanhões. As mineralizações de esmeraldas permanecem na porção leste da zona de cisalhamento, enquanto que outras mineralizações de berilo (água-marinha e outros berilos) estão ligadas diretamente à essa zona ou a outras feições NW e E-W que recortam a área. Isso explica a colocação dos corpos pegmatíticos mineralizados que ocorrem na região

A implementação dos trabalhos de mapeamento geológico e de prospecção mineral nas áreas vizinhas também podem revelar alvos interessantes com a metodologia descrita.

Referências Bibliográficas

Disse JESUS: Sê fiel até a morte e dar-te-ei a coroa da vida (Ap 2:10).

- Almeida, F.F.M. 1976. O Cráton do São Francisco e suas faixas marginais de dobramentos. In SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 29, Ouro Preto, *Resumos Expandidos*, 241-215.
- Atencio, D. 1999. Memória da Mineralogia Brasileira. Tese para concurso de Livre Docência, IG-USP, 214p (Inédito).
- Baltazar, O.F., Raposo, F.O., Mattos, G.M.M. de. 1993. Estratigrafia, Petrografia e Petrologia. In: Folha Mariana SF.23-X-B-I, escala 1:100.000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Brasília: DNPM/CPRM, 1993. p. 17-92.
- Beus, A.A. 1966. Geochemistry of beryllium and genetic types of beryllium deposits. 1 ed. London, W.H. Freeman and Company, 401p.
- Blum, M.L.B. 1999. Processamento e Interpretação de Dados de Geofísica Aérea no Brasil Central e sua Aplicação à Geologia Regional e à Prospecção Mineral. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 229p.
- Bragg, W.L.; Brown G.B. 1926. Die Kristallstruktur von Chrysoberyll (BeAl_2O_4). *Zeitschrift für Kristallographie*, 63:122-143.
- Carneiro, M.A.; Teixeira, W.; Noce, C.M.; Fernandes, R.A. 1996. Archean growth processes in the Quadrilátero Ferrífero: A geochronological U-Pb and Sm-Nd approach to the Rio das Velhas event (2780 - 2700 Ma). In: SBG, Symposium - Archaean Terranes of the South American Platform, 1, Brasília, *Resumos Expandidos*, 59-60.
- Carvalho, L.M.M. 1999. Aspectos mineralógicos, geoquímicos e das inclusões fluidas das esmeraldas e águas-marinhas das minas de Belmont (Itabira) e Canta Galo (Nova Era), Estado de Minas Gerais. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 159 p.
- César-Mendes, J. 1998. A ocorrência de esmeralda no Córrego do Ouro. Relatório Interno do DNPM, 22p. (Inédito).

- Chemale Jr., F. 1987. *Estratigrafia e Geologia Estrutural do Distrito Ferrífero de Itabira, Minas Gerais*. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, 12p. (Boletim Interno).
- Chemale Jr., F.; Quade, H.; Randall, W.; Van Schumus, W.R. 1994. Petrography, geochemistry and geochronology of the Borrachudo and Santa Bárbara metagranites, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Zbl. Geol. Paläont. Teil I, H. 3-6*:739-750.
- CPRM, 2002. Projeto Leste. (texto, mapas e anexos). CPRM. Rio de Janeiro.
- CPRM, 2004. Mapa Geológico do Brasil. CPRM. Rio de Janeiro.
- Cordani, U.G.; Kawashita, K.; Mueller, G.; Quade, H.; Reimer, V.; Roeser, H. 1980. Interpretação tectônica e petrológica de dados geocronológicos do embasamento no bordo sudeste do Quadrilátero Ferrífero/MG. *Academia Brasileira de Ciências*, 52(4): 785-799.
- Correia-Neves, J.M.; Soares, A.C.P.; Marciano, V.R.P.R.O. 1986. A Província Pegmatítica Oriental do Brasil à luz dos conhecimentos atuais. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(1): 106-118.
- Davis, J.C. 1986. *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley & Sons, 2. ed., U.S.A., 646p.
- Dickson, B.L. & Scott, K.M. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. *AGSO Journal* 17(2):187-200.
- Dorr II, J.V.N. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Geological Survey Professional Paper*, 641-A: 110p.
- Dorr II, J.V.N.; Barbosa, A.L.M. 1963. Geology and ore deposits of the Itabira District, MG, Brazil. *Geological Survey Professional Paper*, 341-C, 110p.
- Dorr II, J.V.N.; Gair, J.E.; Pomerene, J.B.; Rynearson, G.A. 1957. Revisão da estratigrafia Pré-Cambriana do Quadrilátero Ferrífero. Brasil. DFPM/DNPM, 81, 31p. (Avulso).
- Dorr II, J.V.N.; Simmons, G.C.; Barbosa, A.L.M.; Herz, N. 1983. Esboço geológico do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, Brasil. Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 62p. (Boletim Interno).
- Dossin, I.A.; Dossin, T.M.; Charvet, J.; Cocherie, A.; Rossi, P. 1993. Single-zircon dating by step-wise Pb-evaporation of Middle Proterozoic Magmatism in the Espinhaço

- Range, Southeastern São Francisco Cráton (Minas Gerais, Brazil). *Anais do II Simpósio do Cráton do São Francisco*, Salvador, 39-42.
- Dussin, I.A. 1994. Evolution structurale de la region de L'espinhaço Meridional, bordure sud-est du Craton São Francisco, Bresil. *Universite D'Orleans, França, Tese de Doutorado*, 252p.
- Dussin, I.A. & Dussin, T.M. 1995. Supergrupo Espinhaço: modelo de evolução geodinâmica. *Geonomos*, 3:19-26.
- Endo, I. 1997. Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da placa sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais. *Tese de Doutorado*, Universidade de São Paulo, 243p.
- Farrell, E.F.; Fang, J. H.; Newnham, R. E. 1963. Refinement of the chrysoberyl structure. *Am. Mineral.*, 48(7/8):804-810.
- Fernandes, M.L.S. 2001. O Granito Borrachudos entre Guanhães e Dores de Guanhães, MG (Plutonito Morro do Urubu): Gênese e Evolução. *Inst. de Geociências, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Tese de Doutorado*, 187p.
- Fernandes, M.L.S.; Marciano, V.R.P.R.O.; Oliveira, R.C.; Correia Neves, J.M.; Dilácio, M.V. 1994. Granitos borrachudos: um exemplo de granitogênese anorogênica na porção central do Estado de Minas Gerais. *Geonomos*, 2(2):23-29.
- Fernandes, M.L.S.; Dias, G.; Romano, A.; Lopes Nunes, J.E.; Correia Neves, J.M. 2001. Geocronologia e petroquímica do Plutonito Peti (Suíte Borrachudos), Estado de Minas Gerais, Brasil. *Resumo extendido aceito para apresentação no 7º Congresso de Geoquímica dos Países de língua Portuguesa*.
- Fischel, D.P.; Pimentel, M.M.; Fuck, R.A. 1998. Geology and Sm-Nd isotopic data for the Mantiqueira and Juiz de Fora Complexes (Ribeira Belt) in the Abreu Campo - Manhuaçu region, Minas Gerais, Brazil. In: *International Conference on Basement Tectonics*, 14. Ouro Preto. *International Basement Tectonics Association*, p.21-23.
- Foster, R.P. 1996. Gold in the Year 2000: A Global overview. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43:1-14.
- Geomag 1996. Projeto Gemas de Minas Gerais, Itabira-Ferros, no Estado de Minas Gerais. CPRM- GEOMAG S.A., 6v.
- Geosoft 1998. *OASIS Montaj 4.2*. GEOSOFT, Inc. Toronto.
- Giuliani, G.; Silva, L.J.H.D.; Couto, P. 1990. Origin of emerald deposits of Brazil. *Mineralium Deposita*, 25(1): 57-64.

- Giuliani, G.; Cheilletz, A.; Zimmermann, J.L.; Ribeiro-Althoff, A.M.; France-Lanord, C.; Feraud, G. 1997. Les gisements d'émeraude du Brésil: genèse et typologie. *Chronique de La Recherche Minière*, 526: 17-61.
- Goldschmith, V.M. 1954. Group III. Beryllium. In: GOLDSCHMITH, V.M. *Geochemistry*. Oxford, Clarenton Press, 206-213.
- Green, A. 1993. A comparison of adjustment procedures for leveling aeromagnetic survey data. *Geophysics*, 48(6):745-753.
- Grossi Sad, J.H.; Motta, E.G.M.; Baars, F.J. 1993. Formação Capelinha: uma nova entidade litoestratigráfica do Grupo Macaúbas Superior. *Anais*, 7^o Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Soc. Brás. Geologia, Núcleo MG, Bol. 12, Belo Horizonte, p.30-33.
- Grossi Sad, J.H.; Chiod Filho, C.; Fontana Dos Santos, J.; Magalhães, J.M.M.; Carelos, P.M. 1990. Duas suítes graníticas do bordo sudeste do Cráton Sanfranciscano, em Minas Gerais: Petroquímica e potencial metalogenético. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 36, Natal, *Anais*, 4: 1836-1848.
- Grossi Sad, J.H.; Mourão, M.A.A.; Guimarães, M. L.V; Knaues, L.G. 1999. Geologia da Folha Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais. Projeto Espinhaço em C-ROM (texto, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG, 2544 - 2693.
- Gunn, P.J. 1998. *Interpretation of airborne magnetic and radiometric surveys*. Course. AGSO. 150 p.
- Gunn, P.J.; Minty, B.R.S.; Milligan, P.R. 1997. The Airborne Gamma-Ray Spectrometric Response Over Arid Australian Terranes. In: EXPLORATION 97: FOURTH DECENNIAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MINERAL EXPLORATION, Proceedings..., edited by A.G. Gubins, 1997, p.733-740.
- Haralyi, N.L.E. & Hasui, Y. 1982. The gravimetric information and the Archean-Proterozoic structural framework of Eastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 12:160-166.
- Harder, E.C.; Chamberlin, R.T. 1915. The geology of central Minas Gerais, Brazil. *Journal. Of Geology*, 23: 341-424.
- Hawthorne, F.C.; Cerný, P. 1977. The alkali-metal positons in Cs-Li beryl. *Canadian Mineralogist*, 15: 414-421.
- Herz, N. 1970. Gneissic and Igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Geological Survey Professional Paper*, 641-B: 58p.

- Inda, H.A.V.; Schorscher, H.D.; Dardenne, M.A.; Schobbenhaus, C.; Haralyi, N.L.E.; Branco, P.C.A.; Ramalho, R. 1984. O Cráton do São Francisco e a faixa de dobramentos Aracuaí. In: *Geologia do Brasil*, Brasília, DNPM/MME, 193-248.
- Iwata, S.A. 2000. Aspectos genéticos e características mineralógicas do crisoberilo das lavras de esmeraldas de Ferros e Hematitas - MG. Instituto de Geociências, São Paulo, Tese de Doutorado. 131p.
- Karfunkel, J.; Wegner, R. 1993. Das Alexandritvorkommen von Esmeraldas de Ferros, Minas Gerais, Brasilien. *Zeitschrift der Deutschen Gemmologischen Gesellschaft*, 42:7-15.
- Keckler, D. 1994. *Surfer® for Windows. User's Guide*. Golden Software, Inc.
- Knauer, L.G.; Grossi Sad, J.H. 1997. Geologia da Folha Serro, Minas Gerais. Projeto Espinhaço em CD-Rom. (texto, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG, 2059 - 2316.
- Ladeira, E.A.; Roeser, H.; Tobschall, H.J. 1983. Evolução petrológica do Cinturão de Rochas Verdes Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: SBG/ Núcleo Minas Gerais, Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 2, Belo Horizonte, *Anais* (3): 149-165.
- Leal, J.M. 1998. Estudo das inclusões fluidas em esmeraldas e quartzos associados do Garimpo de Capoeirana, Nova Era, MG. Inst. de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, 95p.
- Luyendyk, A.O.J. 1997. Processing of airborne magnetic data. *AGSO journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2): 31-38.
- Luiz, J.G. & Costa e Silva, L.M. 1995. Geofísica de Prospecção. Belém, UFPA, Cejup,
- Machado, G.A.A. 1994. Geologia da região e aspectos genéticos das jazidas de esmeraldas de Capoeirana e Belmont, Nova Era - Itabira, Minas Gerais. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 134p.
- Machado, G.A.A. 1998. Jazidas de esmeraldas de Capoeirana e Belmont - MG: Geologia, petrogênese e metalogênese. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, tese de doutorado, 294p.
- Machado G.A.A.; Schorscher, H.D. 1997. Geologia da região e aspectos genéticos das jazidas de esmeraldas de Capoeirana e Belmont, MG. In: Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 8., Anais... Ouro Preto: SBG, Núcleo MG, 14:47-49.

- Machado, N.; Noce, C.M.; Oliveira, O.A.B.; Ladeira, E.A. 1989. Evolução geológica do Quadrilátero Ferrífero no arqueano e proterozóico inferior com base em geocronologia U-Pb. In: SBG/ Núcleo Minas Gerais, Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 5, *Resumos Expandidos*, 01-05.
- Maniar, P.D. Piccoli, P.M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 101:635-643.
- Marciano, V.R.P.R.O.; Svisero, D.P.; Correia Neves, J.M. 1993. Dados geocronológicos de pegmatitos da borda oriental do Cráton do São Francisco. In: Simpósio do Cráton São Francisco, 2, Salvador, *Resumos Expandidos*, 362-365.
- Marshak, S.; Alkimin, F.F. 1989. Proterozoic contraction/extension tectonics of the Southern São Francisco region, MG, Brazil. *Tectonics*, 8(3): 555-571.
- Maxwell, C.H. 1958. The Batatal Formation. *Sociedade Brasileira de Geologia*, 7(2):60-61.
- Minty, B.R.S. 1991. Simple Micro-Levelling for Aeromagnetic Data. *Expl. Geoph.* 22:591-592.
- Noce, C.M. 1995. Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, MG. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 128p.
- Oliveira, A.A.K.; Leite, C.A.S. 2000 Folha Ipatinga, Estado de Minas Gerais, Folha SE.23-Z-D-II. Escala 1:100.000 (mapas, textos e anexos). Belo Horizonte, CPRM. 51p
- Padilha, A.V. 2000. Projeto Itabira, Folha SE.23-Z-D-IV, Estado de Minas Gerais, Escala 1:100.000 (texto, mapas e anexos). Brasília, CPRM, 71p.
- Page, L.R.; Griffiths, W.R.; Barnett, P.R 1953. Pegmatite investigations, 1942-1945, Black Hills, South Dakota. *Geological Survey Professional Paper*, 247.
- Paiva, G. 1946. Províncias Pegmatíticas do Brasil., Rio de Janeiro, DNPM/DFPM 23p. (Boletim 78).
- Pedrosa Soares, A.C.; Wiedemann-Leonardos, C. M. 2000. Evolution of the Araçuaí Belt and its connection to the Ribeira Belt, Eastern Brazil, In: Cordani U.G, Milani E.J, Thomaz F.A.; Campos D.A. (ed) *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro: SBG, p. 265-285.
- Pedrosa-Soares, A.C.; Dardenne, M. A.; Hasui, Y.; Castro, F. D. C.; Carvalho, M. V. A.; Reis, A. C; 1994. Mapa geológico do Estado de Minas Gerais, escala 1:1.000.000. Belo Horizonte, Brazil, Companhia Mineradora de Minas Gerais.

- Pedrosa-Soares, A.C.; Wiedemann, C. M.; Fernandes, M. L. S.; Faria, F. L.; Ferreira, J. C. H. 1999. Geotectonic significance of the Neoproterozoic granitic magmatism in the Araçuaí belt, Eastern Brazil: a model and pertinent questions. *Revista Brasileira de Geociências*, 29: 57-64.
- Peres, G. G.; Alkimin, F. F.; Jordt-Evangelista, H. 2004. The southern Araçuaí belt and the Dom Silvério Group: geologic architecture and tectonic significance. In: *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 76(4):771-790.
- Pflug, R.; Renger, F. 1973. Estratigrafia e evolução geológica da margem SE do Cráton Sanfranciscano. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 27, Aracaju, *Anais*, 2: 05-19.
- Reeves, R.G. 1966. Geology and mineral resources of the Monlevade and Piracicaba quadrangles, MG, Brazil. *Geological Survey Professional Paper*, 341-E, 58p.
- Renger, F.E.; Noce, C.M.; Romano, A.W.; Machado, N. 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, 2(1):1-11.
- Ribeiro-Althoff, A.M. 1997. Datation des mineralisations d'éméraude du Bresil par les Methodes K-Ar et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. I'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, França, Tese de Doutorado, 190p.
- Schorscher, H.D. 1975. Zur bildung der metamorphen, itibiritischen reicherze im Raum Itabira, Minas Gerais, *Brasilien. Fortschr. Mineralogical*, 53(1): 73.
- Schorscher, H.D. 1976. Polimetamorfismo do Pré-Cambriano na região de Itabira, Minas Gerais, Brasil. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 29, Ouro Preto, *Resumos Expandidos*, 194-195.
- Schorscher, H.D. 1978. Komatiítos na estrutura *Greenstone Belt* Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, *Resumos Expandidos*, 292-293.
- Schorscher, H.D. 1979. Evolução geotectônica e petrogenética do embasamento arqueano do Quadrilátero Ferrífero. *Academia Brasileira de Ciências, Anais*, 51(4): 767-768.
- Schorscher, H.D. 1991. Quadrilátero Ferrífero e Espinhaço Meridional. In: Congresso Brasileiro de Geoquímica, 3, Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, 1, São Paulo, *Guia de Excursões*, 37 - 87.
- Schorscher, H.D. 1992. Arcabouço petrográfico e evolução crustal de terrenos precambrianos do Sudeste de Minas Gerais: Quadrilátero Ferrífero, Espinhaço

- Meridional e domínios granito-gnáissicos adjacentes. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Livre-Docência, 274p.
- Schwarz, D. 1987. *Esmeraldas: Inclusões em gemas*. 1ª ed., Ouro Preto, Imprensa Universitária, 439p.
- Shives, R.B.K.; Charbonneau, B.W.; Ford, K.L. 1997. The detection of potassic alteration by Gamma-Ray Spectrometric – Recognition of alteration related to mineralization. In: EXPLORATION 97: FOURTH DECENNIAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MINERAL EXPLORATION, Proceedings, edited by A.G. Gubins, 1997, p.741-752.
- Silva, L.C.; Armstrong, R.; Noce, C.M.; Carneiro, M.A.; Pimentel, M.; Pedrosa-Soares, A.C.; Leite, C.A.; Vieira, V.S.; Silva, M.A.; Paes, V.J.C.; Cardoso Filho, J.M. 2002. Reavaliação da evolução geológica em terrenos Pré-Cambrianos brasileiros com base em novos dados U-Pb SHRIMP, Parte II: Orógeno Araçuaí, Cinturão Mineiro e Cráton São Francisco Meridional. *Revista Brasileira de Geociências*. 32(4): 513-528.
- Souza, J.L. 1988. Mineralogia e geologia da Jazida de esmeralda de Itabira, Minas Gerais. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 192p.
- Souza, J.L. 1991. A jazida de esmeralda de Itabira, Minas Gerais. *Principais Depósitos Minerais do Brasil*, 4-A: 223-243
- Souza, J.L.; César-Mendes, J.; Bello, R.M.S.; Svisero, D.P.; Valarelli, J.V. 1992. Petrographic and microthermometrical studies of emeralds in the ‘Garimpo’ of Capoeirana, Nova Era, Minas Gerais State, Brazil. *Mineralium Deposita*, 27: 161-168.
- Staatz, M.H.; Page, L.R.; Norton, J.J.; Wilmarth, V.R. 1963. Exploration for beryllium at the Helen Beryl, Elkhorn and Tin Mountain pegmatites, Custer County, South Dakota. *Geological Survey Professional Paper*, 297-C: 129-197.
- Uhlein, A. 1991. Transição Cráton – Faixa Dobrada: um exemplo do Cráton São Francisco e da Faixa Araçuaí (Ciclo Brasileiro) no Estado de Minas Gerais. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 295p.
- Uhlein, A.; Trompette, R.R.; Egydio-Silva, M. 1995. Riftingamentos superpostos e tectônica de inversão na borda sudeste do Craton São Francisco, *Geonomos*, 3:99-107.

Vasconcelos, R.M.; Metelo, M.S.; Mota, A.C. & Gomes, R.D. 1994. *Geofísica em Levantamentos Geológicos*. Rio De Janeiro, Digeof-Cprm.

Wallace, R.M. 1958. The Moeda Formation. *Sociedade Brasileira de Geologia*, 7(2): 59-60.

Métodos Aerogeofísicos - Magnetometria

Disse Jesus: Eu sou o caminho a verdade e a vida, ninguém vem ao PAI, senão por mim. (Jo. 14:6)

A.1 FUNDAMENTOS DO MÉTODO MAGNÉTICO

A magnetometria é uma ferramenta aplicável, de maneira direta ao mapeamento de feições magnéticas, como horizontes estratigráficos e litotipos específicos que podem ou não estar mineralizados, como no caso dos depósitos de ferro, níquel e alguns tipos específicos de depósitos de metais básicos e preciosos (Carvalho 1999).

Cada rocha magnetiza-se de acordo com a sua susceptibilidade magnética, que depende da quantidade e do modo de distribuição dos minerais magnéticos presentes. A concentração de minerais magnéticos produz distorções locais no campo magnético terrestre, que podem ser detectadas e fornecem informações sobre a subsuperfície. Na magnetometria o campo físico está sempre presente, com isso, a subsuperfície não necessita ser excitada para que se obtenha uma medida do campo físico.

A.1.1 O CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE E SUA ORIGEM

O campo magnético terrestre é derivado de uma função potencial e revela anomalias causadas por contrastes em propriedades físicas das rochas em profundidade, e é usado como ferramenta de reconhecimento de áreas com potencialidade exploratória (Blakely 1996). Ele é formado por três componentes principais (Telford *et al.* 1981):

- 1) **Componente devido ao campo principal:** é responsável por 99% da intensidade do campo magnético medido na superfície da terra; o campo principal está relacionado a correntes elétricas que circulam no núcleo externo líquido, estendendo-se a uma profundidade de 2800 a 5000 km. Presumivelmente, existem células de convecção transportando cargas elétricas ao longo do material móvel do núcleo, as quais seriam controladas por diferenças de calor.

- 2) **Componente devido ao campo externo: é uma pequena contribuição ao campo total, com sua origem ligada às correntes elétricas que fluem na ionosfera e na magnetosfera. É uma resultante das variações diurnas do campo magnético e das tempestades magnéticas, varia com grande rapidez, possuindo natureza parcialmente cíclica e aleatória;**
- 3) **Componente devido ao campo local: com intensidade muito menor que o campo principal, esta componente é relativamente constante no tempo e no espaço. Resulta da variação do conteúdo de minerais magnéticos nas rochas próximas à superfície terrestre e, às vezes, possui intensidades muito fortes, porém com distribuição restrita. Constituem os alvos magnéticos principais devido ao seu posicionamento próximo à superfície terrestre (Telford *et al.* 1981).**

Medidas efetuadas na superfície da Terra sugerem que o campo magnético terrestre pode ser aproximado pelo campo produzido por um momento de dipolo localizado no seu centro. Este momento aponta para o pólo sul geográfico e se localiza sobre um eixo que forma um ângulo de aproximadamente $11,5^\circ$ com o eixo de rotação da Terra (Sheriff 1989).

Estudos diversos têm mostrado que o campo magnético observado na superfície da Terra, ou às suas proximidades, tem fontes predominantemente internas. A teoria mais utilizada para explicar a parte principal do campo baseia-se no funcionamento de um dínamo. Segundo essa teoria, o campo é produzido por correntes elétricas que circulam no núcleo líquido da Terra, o qual se acredita constituído principalmente por ferro. As correntes elétricas, de acordo com essa teoria, são mantidas pelo movimento de partículas no núcleo líquido. Tanto a variação secular do campo magnético terrestre, quanto as suas inversões de polaridade, podem ser explicadas pela Teoria do Dínamo (Sheriff 1989).

Alterações locais no campo magnético principal resultam da variação nos teores de minerais magnéticos de rochas próximas à superfície terrestre. Ocasionalmente, essas anomalias são suficientemente intensas para duplicar o campo magnético principal (Telford *et al.* 1993).

A.1.2 MAGNETISMO DE ROCHAS E MINERAIS

A.1.2.1 Diamagnetismo, Paramagnetismo e Ferromagnetismo

As anomalias magnéticas são causadas pela presença de minerais magnéticos nas rochas e esses minerais podem ser classificados em três grupos, de acordo com suas propriedades magnéticas: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.

As substâncias diamagnéticas, quando submetidas a um campo magnético, adquirem magnetização de intensidade fraca e sentido contrário ao do campo. Nas paramagnéticas, a magnetização é ainda fraca, por causa da sua baixa susceptibilidade magnética, e o seu sentido é igual ao do campo, caracterizando a susceptibilidade com o sinal positivo. Já as ferromagnéticas têm susceptibilidades magnéticas muito elevadas e positivas, o que lhes permitem magnetizações com intensidades muito fortes e no mesmo sentido do campo (Nagata 1961). Tanto nas substâncias diamagnéticas, como nas paramagnéticas, a susceptibilidade é constante. Já nas ferromagnéticas, entretanto, ela não é constante, mas depende da intensidade do campo externo. O exame da causa do diamagnetismo (o movimento de elétrons em torno do núcleo dos átomos) permite concluir que todos os materiais são diamagnéticos, em sua essência (Nagata 1961).

Em alguns materiais paramagnéticos existe uma interação muito forte entre os átomos que os constituem, favorecendo o alinhamento de momentos magnéticos do spin, mesmo na ausência de um campo magnético externo. Já nos materiais ferromagnéticos a interação é tão forte que, geralmente, somente à temperatura bem acima da ambiente, a agitação térmica consegue destruir o alinhamento dos momentos magnéticos. A temperatura a partir da qual um material perde a sua característica ferromagnética e passa a se comportar como paramagnético é denominada de Temperatura Curie (Telford 1981). O ferromagnetismo é o responsável pela magnetização observada nos materiais geológicos. As anomalias magnéticas detetadas nos trabalhos de prospecção são basicamente devidas à presença isolada ou em conjunto dos minerais como a magnetita, a pirrotita (ferrimagnéticos) e a ilmenita (antiferromagnético).

A.1.2.2 Magnetização das Rochas

A magnetização que se observa nas rochas, como resultado da presença de minerais magnéticos na sua composição, pode ser classificado em dois tipos:

magnetização induzida e magnetização residual, remanescente ou remanente. A magnetização induzida é provocada pelo campo atual da Terra, enquanto a magnetização remanescente é adquirida ao longo da história geológica da rocha (Nagata 1961).

No processo de formação de rochas ígneas, a magnetização termoremanente é a mais importante. Esse tipo de magnetização remanescente desenvolve-se a partir do resfriamento dos materiais geológicos abaixo da temperatura de Curie, na presença do campo magnético terrestre da época. Na prospecção mineral, os valores medidos representam o resultado da interação da magnetização induzida com a magnetização remanescente. Essa interação se dá através da reorientação ou do alargamento dos domínios magnéticos dos minerais ferromagnéticos (Nagata 1961).

A.1.2.3 Susceptibilidade de Rochas e Minerais

A susceptibilidade magnética das rochas depende, principalmente, da quantidade, do tamanho dos grãos e do modo de distribuição dos minerais ferromagnéticos nelas contidos. A susceptibilidade magnética das rochas e minerais é comumente determinada na presença de um campo externo. Para a prospecção mineral, a intensidade desse campo deve ser similar à do campo magnético terrestre (0,3 a 0,6 oersted), pois, nos minerais ferromagnéticos (e nas rochas que os contém), o valor da susceptibilidade depende da intensidade do campo magnético (Nagata 1961).

As rochas sedimentares são, normalmente, as que apresentam os menores valores de suscetibilidade magnética. Esses valores são geralmente inferiores a 50×10^{-6} no sistema cgs. Nas rochas vulcânicas, a susceptibilidade magnética varia, geralmente, entre 100×10^{-6} e 10.000×10^{-6} , no sistema cgs, enquanto nas plutônicas, a variação é de 100×10^{-6} a 5.000×10^{-6} (Nagata 1961). Os espécimes mais máficos das rochas, por conterem maior quantidade de ferro, são os que apresentam maiores valores de susceptibilidade magnética. Nas rochas ígneas félsicas, por exemplo, a susceptibilidade típica, no sistema cgs, é de 2.500×10^{-6} , enquanto que nas ígneas máficas o valor típico é 5.000×10^{-6} (Wright 1981). Dentre os minerais ferromagnéticos, apenas alguns têm susceptibilidade magnética suficientemente elevada para produzirem anomalias detetáveis nos trabalhos de prospecção. Esses minerais são a magnetita, a pirrotita, a ilmenita, a franklinita e amaghemita (hematita- γ). As rochas metamórficas apresentam

valores de susceptibilidade geralmente dentro da faixa de 10×10^{-6} a 500×10^{-6} , no sistema cgs (Wright 1981).

A.1.3 TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO E REALCE APLICADAS AOS DADOS MAGNETOMÉTRICOS

A.1.3.1 Relevô Sombreado

A imagem de relevô sombreado é um método comum usado para apresentar dados geofísicos. Essa técnica de apresentação cria um efeito tridimensional usando renderização bidimensional ou capacidade de plotagem (Geosoft 1997). A malha de relevô sombreado contém um coeficiente de reflexão entre +1 e -1 que indica a quantidade de luz que teria que ser refletida de um ponto na malha.

É uma técnica muito útil na verificação da qualidade dos dados, onde na interpretação dos dados realça as feições perpendiculares a direção de iluminação e pode ser aplicada tanto a dados magnéticos quanto a gamaespectrométricos.

A.1.3.2 Filtragem dos Dados

A filtragem é uma operação matemática que procura mudar uma série de dados para enfatizar feições que se tenha interesse, enquanto suprime as de caráter indesejável (ruído). Para isso, várias técnicas podem ser utilizadas, dentre elas tem-se:

A.1.3.2.1 FILTROS DERIVADAS

Os filtros derivadas permitem a análise da geometria da superfície da malha regular. São baseados em cálculos da declividade (1ª derivada) ou na razão de mudança da declividade (2ª derivada). O cálculo do gradiente poderá ser efetuado em uma direção específica, sendo denominados de filtros direcionais, ou serem calculados sem a definição de uma direção pré-definida.

Os operadores derivadas tendem a ressaltar as bordas das anomalias e realçar feições superficiais, onde cada termo derivado é convolvido com os dados da seqüência original ou utilizado como pesos na média móvel. Um grande valor da derivada (positivo ou negativo) indica uma mudança abrupta no declive, que pode ser causado por um

salto no valor médio ou pela presença de um pico nos dados. Se uma função possui muitas altas frequências, o ideal é usar operadores menores, caso contrário os ruídos estarão sendo realçados (Davis 1986).

A 1ª derivada realça feições mais regionais, enquanto que a 2ª derivada corresponde à medida da curvatura, e grandes curvaturas estão associadas com anomalias rasas (Telford *et al.* 1993).

a) Filtro derivada horizontal

O Filtro Derivada Horizontal é utilizado para realçar os gradientes horizontais e, por conseguinte, as possíveis fontes das anomalias representadas. São aplicadas para criar imagens sombreadas (Geosoft 1994) e para ressaltar as bordas dos corpos nas direções X e Y, e tem as formas no domínio de Fourier:

Derivada na Direção X

$$L(u) = (ui)^n \quad (\text{A.1})$$

Derivada na Direção Y

$$L(v) = (vi)^n \quad (\text{A.2})$$

onde n é a ordem de diferenciação.

b) Filtro derivada vertical

O Filtro Derivada Vertical amplifica a informação de comprimentos de ondas curtos em detrimento dos comprimentos longos. Geralmente a primeira derivada ou a segunda derivada acentuam os gradientes nas bordas de corpos magnéticos rasos, e é dado pela equação (Davis 1986):

$$L(r) = r^n, \quad (\text{A.3})$$

em que $r = (u^2 + v^2)^{1/2}$ e n é a ordem de diferenciação.

Os filtros derivadas Horizontal, em X e Y, e vertical, em Z, são utilizados para se obter o gradiente horizontal total, a amplitude do sinal analítico e a fase do sinal analítico.

c) Gradiente horizontal

O gradiente horizontal tende a revelar picos acima dos limites das fontes causadoras de anomalias. É usado também na estimativa do sinal analítico, no terraceamento e na fase do sinal analítico. O Gradiente horizontal de uma anomalia de campo potencial pode indicar mudanças laterais abruptas de propriedade física. É dado por:

$$h_o(x, y) = (\partial G_x / \partial x + \partial G_y / \partial y) \quad (3.1) \quad (A.4)$$

e sua magnitude é dada por

$$h_o(x, y) = [(\partial G_z(x,y) / \partial x)^2 + (\partial G_z(x,y) / \partial y)^2]^{1/2} \quad (3.2) \quad (A.5)$$

onde a magnitude do gradiente horizontal é a raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas parciais de um campo potencial $G_z(x,y)$ em relação a x e a y (Blakely 1996).

A.1.3.2.2 AMPLITUDE DO SINAL ANALÍTICO

O sinal analítico corresponde a diversos métodos automáticos ou semi-automáticos baseados no uso de gradientes (derivadas) horizontais e verticais de anomalias de um campo potencial (Roest *et al.* 1992).

A noção de sinal analítico, ou envelope de energia do sinal (Roest *et al.* 1992) para anomalias magnéticas, foi desenvolvida por Nabighian (1972) para estruturas 2-D. De acordo com esse autor, o método assume que os corpos causadores têm magnetização uniforme e que as seções transversais de todos os corpos causadores podem ser representadas por polígonos, cuja extensão em profundidade seriam finitas ou infinitas. Através de uma simples transformação no domínio da frequência, produz-se uma função analítica cuja parte real é a derivada horizontal do campo magnético e a parte imaginária seria a derivada vertical (Hsu *et al.* 1996). A grande contribuição de Nabighian (1972) foi perceber que é possível exprimir uma derivada em função de outra. Os gradientes horizontal e vertical formam um par de transformadas de Hilbert ou sinais analíticos. Uma característica importante desses gradientes é o posicionamento da amplitude do sinal analítico resultante, imediatamente acima dos limites das estruturas.

Roest *et al.* (1992) calcularam a amplitude do sinal analítico 3D a partir do campo magnético anômalo. A amplitude do sinal analítico é independente da direção da fonte de magnetização, e está relacionada à intensidade de magnetização (Nabighian 1972) e pode ser definida pela equação.

$$A(x,y) = [(\partial G / \partial x)^2 + (\partial G / \partial y)^2 + (\partial G / \partial z)^2]^{1/2} \quad (3.3) \quad (A.6)$$

E a função amplitude do sinal analítico ou seu valor absoluto pode ser expresso pela equação:

$$|A_2(x,y)| = [(G_x)^2 + (G_y)^2 + (G_z)^2]^{1/2} \quad (3.4) \quad (A.7)$$

em que G é a anomalia de campo potencial e G_x , G_y e G_z são as derivadas horizontal, X e Y, e vertical, Z.

Para um dado limite geológico, a amplitude do sinal analítico simples ou realçado torna-se pequena quando o limite geológico é próximo do equador magnético ou quando o *strike* é aproximadamente paralelo ao norte magnético (Hsu *et al.* 1996).

$$|A(x,y)| = [(\partial M / \partial x)^2 + (\partial M / \partial y)^2 + (\partial M / \partial z)^2]^{1/2} \quad (A.8)$$

onde M = anomalia magnética

Roest *et al.* (1992) calculou a amplitude do sinal analítico 3D a partir do campo magnético residual. A amplitude do sinal analítico é independente da direção da fonte de magnetização, e está relacionado à amplitude de magnetização (Nabighian 1972; Roest & Pilkington 1993).

A.1.3.2.3 INCLINAÇÃO DO VETOR SINAL ANALÍTICO

A fase do sinal analítico é definida como o ângulo formado entre as partes imaginária e real do sinal analítico e é representado pela fórmula:

$$\Phi_n(x,y) = \arctan [\text{Im}(A_n(x,y)) / \text{Re}(A_n(x,y))] \quad (A.9)$$

em que $n = 0,1,2,..$ ordem do sinal analítico.

O ângulo medido fornece a estimativa do mergulho do vetor sinal analítico no plano vertical, cujo traço na superfície é coincidente à direção da resultante do gradiente horizontal, que por sua vez, reflete um contraste de susceptibilidade (Thurston & Smith 1997).

A.1.3.3 Deconvolução de Euler

A deconvolução de Euler-3D foi proposta por Thompson (1982) e visa a localização e o cálculo de estimativa de profundidade de diferentes fontes magnéticas

simples a partir de dados magnetométricos ou gravimétricos. A relação de homogeneidade de Euler pode ser expressa pela equação:

$$(x-x_0)\partial T/\partial x + (y-y_0)\partial T/\partial y + (z-z_0)\partial T/\partial z = N(B-T) \quad (\text{A.10})$$

em que (x_0, y_0, z_0) compreende a posição da fonte cujo campo total T é detectado no pontos (x, y, z) do operador e o campo regional total é denotado pelo valor B . Os tipos de fontes magnéticas são expressos por meio do índice de homogeneidade N , interpretados como índices estruturais onde o índice 0 corresponde a contatos geológicos irregulares, o índice 1 a limites de soleiras, diques ou falhas, o índice 2 a corpos cilíndricos verticais e o índice 3 a corpos esféricos (Tabela A.1.1).

Reid *et al.* (1990) propuseram uma estratégia de utilização da deconvolução de Euler-3D que compreende os cálculos dos gradientes $\partial T/\partial x$, $\partial T/\partial y$ e $\partial T/\partial z$: determinação do tamanho da janela da malha a ser calculado; solução da equação de Euler para todos os pontos da janela; verificação da incerteza relativa ao cálculo da estimativa de profundidade não é maior que 15%; aplicação do operador deslocando sistematicamente em toda região coberta com grades de superposição e aplicação desse procedimento para todos os índices estruturais selecionados.

Tabela A.1.1: Índices estruturais usados na deconvolução de Euler e seus respectivos significados em termos de modelos físicos.

Modelo magnético simples	N
Linha de pólos (ex.: contatos)	<0,5 (0)
Linha de pólos (ex.: dique semi-infinito)	1,0
Ponto polar (ex.: chaminé vertical)	2,0
Linha de dipolos (corpos 2D)	2,0
Ponto dipolar (modelos 3D, ex.: esfera)	3,0

A.1.3.4 Redução ao Pólo Magnético

Trata-se de uma transformação de fase do campo magnético anômalo visando obter uma representação de como seria o campo magnético medido se o fosse num dos pólos magnéticos da terra. Como nesta situação e na ausência de magnetização remanescente a assinatura magnética seria simétrica e localizada sobre a fonte que a causou, esta é uma forma de demarcar a posição horizontal das fontes. É conseguida no domínio dos números de onda por um filtro de redução de fase, expresso por (Blakely, 1995):

$$\Im[\Delta T_r] = \Im[\Phi_r] \Im[\Delta T] \text{ onde}$$

$$\Im[\Phi_r] = \frac{1}{\Theta_m \Theta_r} = \frac{|k^2|}{a_1 k_x^2 + a_2 k_y^2 + a_3 k_x k_y + i |k| (b_1 k_x + b_2 k_y)}, \quad |k| \neq 0 \quad (\text{A.11})$$

$$a_1 = \hat{m}_z \hat{f}_z - \hat{m}_x \hat{f}_x$$

$$a_2 = \hat{m}_z \hat{f}_z - \hat{m}_y \hat{f}_y$$

$$a_3 = -\hat{m}_y \hat{f}_x - \hat{m}_x \hat{f}_y$$

$$b_1 = \hat{m}_x \hat{f}_z - \hat{m}_z \hat{f}_x$$

$$b_2 = \hat{m}_y \hat{f}_z - \hat{m}_z \hat{f}_y$$

e onde \hat{m}_x , \hat{m}_y e \hat{m}_z são os cossenos diretores da magnetização
 \hat{f}_x , \hat{f}_y e \hat{f}_z , os cossenos diretores do campo magnético, e
 $|k| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$, com k_x e k_y sendo os números de onda em x e y;

A.1.3.5 Susceptibilidade Magnética Aparente

Refere-se a uma transformação dos dados do campo magnético anômalo naqueles da susceptibilidade magnética. É uma outra forma de ver o campo magnético anômalo, agora sob o ponto de vista das propriedades físicas do subsolo que o geram. Permite por vezes ter uma idéia melhor das diversas unidades magnéticas que formam a região do levantamento.

As premissas que controlam sua validade baseiam-se em que as fontes causadoras do campo magnético anômalo observado podem ser expressas por prismas verticais de seção quadrada e comprimento infinito, fato possível em termos da teoria dos campos potenciais mas que tem que ser julgado ser este um modelo geologicamente plausível para a região em estudo. É também necessário que não existe remanência nas fontes magnéticas envolvidas. Sua expressão no domínio dos números de onda e em coordenadas polares é dada pela seguinte expressão (Geosoft, 2002):

$$\Im[Susc_{apar}] = \Im[\Phi_{Susc_{apar}}] \Im[\Delta T] \text{ onde}$$

$$\Im[\Phi_{Susc_{apar}}] = \frac{1}{2\pi F \cdot H(r) \Gamma(\Theta) \cdot K(r, \Theta)}$$

onde

$$H(r) = e^{-hr} \text{ corresponde a uma continuação do campo magnético para baixo;}$$

$$\Gamma(\Theta) = [\text{sen} I_a + i \cos I \cos(D - \Theta)]^2 \text{ é outra forma do operador da redução ao polo;}$$

$$K(r, \Theta) = \left[\frac{\text{sen}(\ar \cos \Theta) \cdot \text{sen}(\ar \text{sen} \Theta)}{\ar \cos \Theta \cdot \ar \text{sen} \Theta} \right] \text{ é um fator de geometria;}$$

I é a inclinação do campo geomagnético;
 I_a é a inclinação para a redução ao polo;
 D é a declinação magnética;
 r é o número de onda radial = $\sqrt{k_x^2 + k_y^2} = |k|$;
 Θ é a direção do número de onda;
 a é a metade do tamanho da célula da malha quadrática em uso com as interpolações dos valores do campo magnético anômalo.

Esta transformação, como as da redução ao pólo e da pseudogravidade, ajuda na interpretação da posição das fontes e no estudo das unidades magnéticas locais, desde que examinados sob o ponto de vista de suas limitações como algoritmos de transformação.

A.1.4 INTERPRETAÇÃO DE DADOS MAGNÉTICOS

A interpretação de dados magnéticos obedece à Teoria de Laplace e o do Potencial Magnético. Em magnetometria existe uma complexidade devida ao caráter dipolar do campo magnético. Devido a esse caráter dipolar, o campo magnético apresenta diferentes direções ao longo da superfície terrestre e tem inclinação que varia de 0° no equador magnético até 90° nos pólos e isso faz com que uma determinada fonte produza anomalias diferentes, quando localizada em diferentes latitudes.

Outro fator importante que torna complexa a interpretação magnética é a presença de magnetização remanescente, especialmente se ela é de grande intensidade e não está alinhada com a magnetização induzida. A existência de remanência pode modificar a forma da anomalia, a ponto da resposta teórica calculada para o modelo da fonte, ser completamente diferente da anomalia observada. A interpretação poderá, contudo, ter êxito se a remanência ou a forma da fonte de anomalia é conhecida *a priori*.

As medidas magnéticas podem fornecer informações sobre alinhamentos estruturais, contatos geológicos, limites de bacias sedimentares e parâmetros de um corpo mineralizado (susceptibilidade, profundidade, dimensões, mergulho, etc.).

A ambigüidade está presente também na interpretação dos dados magnéticos. Desse modo, diferentes distribuições de magnetização em subsuperfície podem ser utilizadas para explicar uma mesma anomalia.

A.1.4.1 Anomalias Magnéticas

As anomalias magnéticas são perturbações ou desvios do campo geomagnético terrestre (campo magnético normal) e são causadas por minerais magnéticos nas rochas que se encontram na porção superior da crosta. As anomalias resultam da soma de vetores do campo magnético através de dois processos: magnetização induzida e magnetização remanente natural das rochas (Gunn 1998). Fontes de anomalias magnéticas locais possuem, em média, profundidades inferiores a 40 km, pois acima

dessa profundidade as temperaturas ultrapassam a temperatura Curie e perdem suas propriedades magnéticas (Telford *et. al* 1993).

A forma e a amplitude da resposta magnética de um depósito mineral dependem principalmente da concentração dos minerais magnéticos presentes, porém a geometria e profundidade do corpo, orientação do depósito em relação ao norte magnético e a inclinação do campo magnético terrestre no local podem modificar essas respostas (Gunn 1998). Normalmente, as anomalias magnéticas locais apresentam valores de intensidades variando entre 50 nT e 5000 nT e não persistem em grandes extensões, sendo os alvos de interesse na prospecção magnética e são suficientemente intensas para duplicar o campo magnético principal. (Telford *et. al* 1993).

A.1.4.2 Domínios e Estruturas Magnéticas

Interpretações de dados aeromagnéticos envolvem fases iniciais onde os aspectos geométricos são documentados *a priori* para sua geologia principal a ser inferida. Em dados aeromagnéticos dois tipos principais de feições são identificados e documentados: unidades magnéticas e descontinuidades lineares.

As unidades magnéticas compreendem corpos geológicos com magnetismo característico ou uniforme. Elas não coincidem necessariamente com unidades geológicas, mas geralmente são consideradas como unidades magnéticas. As descontinuidades lineares, geralmente, são evidentes e representam falhas, fraturas ou tendências litológicas. Eles raramente são bem definidos como são as unidades magnéticas e sua documentação é mais subjetiva e o esqueleto geométrico deverá ser verificado para estabelecer a natureza geológica das feições identificadas.

Comumente, as fontes das feições magnéticas não estão expostas, então sua classificação no contexto da geologia conhecida geralmente, envolve um grau de generalização. Uma importante consideração em interpretação aeromagnética é que as respostas magnéticas são mais características de um grupo de unidades de rochas do que de litotipos individuais (Isles *et al.* 1996, In: Carvalho 1999).

A.1.4.3 Espectro de Potência Ponderado Radialmente

A magnetometria representa o efeito integrado de fontes situadas nas mais diversas profundidades e as distâncias laterais do ponto de amostragem influencia na

intensidade magnética medida. Fontes profundas ou distantes apresentam sinais com baixa frequência, enquanto que fontes rasas e próximas ao ponto de amostragem são responsáveis pelas mais altas frequências (Davis 1986).

A representação da variância (potência) dos sucessivos harmônicos é feita através dos espectros de potência ou periodogramas. As frequências mais altas, acima do dobro da distância entre os pontos de amostragens originais, são chamadas de frequência de Nyquist. A esses valores normalmente associam-se grandes erros padrões, geralmente devidos à incorporação de altas frequências aos dados (Davis 1986).

O espectro de potência radial do campo anômalo expressa a média da energia proveniente de todas as direções correspondentes com um determinado número de onda. As quebras na declividade da função espectral permitem a separação do topo das fontes causadoras das anomalias de acordo com a sua profundidade. A determinação da profundidade e da frequência permite que sejam utilizados filtros que separam as fontes e possa ser representado individualmente. A relação entre a profundidade e o espectro de energia é expresso pela equação (Geosoft 1996).

$$H = -s/4\pi \quad (\text{A.13})$$

H = profundidade estimada da fonte

S = declividade do logaritmo do espectro de energia

Referências Bibliográficas

E acontecerá que todo aquele que invocar o nome do SENHOR será salvo (At 2:21).

- Blakely, R.J. 1996. *Gravity & Magnetic Applications*. Cambridge University Press, 441p.
- Carvalho, M.T.N. 1999. *Integração de dados geológicos, geofísicos e geoquímicos aplicados à prospecção de ouro nos greenstone belts de Pilar de Goiás e Guarinos, GO*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de Mestrado.187p.
- Davis, J.C. 1986. *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley & Sons, 2. ed., U.S.A., 646p.
- Geosoft 1994. *GEOSOFT MAGMAP 2-D frequency domain processing*. GEOSOFT, Inc., Toronto.
- Geosoft 1995. *GEOSOFT mapping and processing system*. GEOSOFT, Inc., Toronto.
- Geosoft 1996. *MAGMAP 2-D frequency domain processing*. GEOSOFT, Inc., Toronto.
- Geosoft 1998. *OASIS Montaj 4.2*. GEOSOFT, Inc., Toronto.
- HSU, S.K.; SIBUET, J.C. & SHYU, C.T. 1996. High-resolution detection of geological boundaries from potential-field anomalies: an enhanced analytical signal technique. *Geophysics*, 61(2):373-386.
- Nabighian, M.N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37:507-517.
- Nagata, T. 1961. *Rock Magnetism*. Revised Edition, Tokyo, Maruzen Co. Ltd., 350p.
- Reid A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millet, A. J.; Somerton, I. W. 1990. Magnetic interpretation in tree dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 14: 113-130.
- Roest, W.R.; Verhoef, J. & Pilkington, M. 1992. Magnetic Interpretation Using The 3-D Analytical Signal. *Geophysics*, 57(1):116-125.
- Sheriff, R. E. 1989. *Geophysical Methods*. New Jersey, Prentice Hall. 605p.
- Telford, W.M.; Geldart, L.P. Sheriff, R.E. 1981. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge. 770p.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. 1993. *Applied Geophysics*. 2nd ed., EUA, Cambridge University Press, 770p.

- Thurston, J.B. Smith, R.S. 1997. Automatic conversion of magnetic data to depth, dip and susceptibility contrast using the SPITM method. *Geophysics*. 62(3):807-913.**
- Thompson, D. T. 1982. EULDPH, A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47, 31-37.**
- Wright, P.M.1981. Gravity and magnetic methods in mineral exploration. *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume, p.**

Imagens Magnetométricas

*A lei do SENHOR é perfeita e restaura a alma; o testemunho do SENHOR é fiel e dá sabedoria aos
simplices (SI 19:7).*
