



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA-UnB

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

Caracterização Magnética e Gamaespectrométrica de Zonas de Alteração Hidrotermal Associadas à Prospecção Aurífera, Nova Roma e Monte Alegre de Goiás

Área de Concentração em Geofísica Aplicada

Dissertação de Mestrado nº 123

Isabelle C.C.O. Serafim

Orientador:

Prof. Dra. Adriana Chatack Carmelo (UnB)

Coorientador:

Prof. Dr. Nilson Francisquini Botelho (UnB)

Banca examinadora:

Prof. Dr. Alvaro Penteadó Crósta (UNICAMP)

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges (UnB)

Brasília - 2017



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA-UnB

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

Caracterização Magnética e Gamaespectrométrica de Zonas de Alteração Hidrotermal Associadas à Prospecção Aurífera, Nova Roma e Monte Alegre de Goiás

Área de Concentração em Geofísica Aplicada

Dissertação de Mestrado

Isabelle C.C.O. Serafim

Orientador:

Prof. Dra. Adriana Chatack Carmelo (UnB)

Coorientador:

Prof. Dr. Nilson Francisquini Botelho (UnB)

Brasília - 2017

*“Não é sobre chegar no topo do mundo e saber que venceu,
É sobre escalar e sentir que o caminho te fortaleceu.”*

(Ana Vilela)

Agradecimentos

Essa jornada só foi concluída devido aos esforços e carinhos de muitas pessoas a quem sempre serei grata.

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha orientadora Dr. Adriana Chatack Carmelo, sem a qual seria impossível a realização deste projeto. Agradeço não apenas a contribuição científica e os ensinamentos passados, mas também a compreensão e a paciência durante estes dois anos.

Agradeço ao meu coorientador Dr. Nilson Francisquini Botelho que fez parte deste projeto contribuindo imensamente para o seu desenvolvimento.

Agradeço ao Professor Dr. José Oswaldo de Araújo Filho que participou de discursões enriquecedores e fundamentais para o contexto do trabalho.

Agradeço aos meus amigos da CPRM que estiverem sempre presente no dia a dia contribuindo com ideias e discursões técnicas, em especial ao André Saboia, Débora Mattos, Loiane Rocha e Marcos Vinícius Ferreira.

Agradeço a minha família, em especial a minha irmã Natália Serafim que nas horas mais difíceis sempre me apoiou a não desistir.

Agradeço ao meu companheiro Iago Costa, que me apoiou muito nesta jornada, compreendendo sempre os momentos mais difíceis e agindo com muito carinho e paciência.

Por fim agradeço a CPRM- Serviço Geológico do Brasil pela disponibilização dos dados aerogeofísicos utilizados e pela extensão do *software Oasis Montaj* que inclui a ferramenta MVI. Agradeço a Universidade de Brasília- UnB pelos recursos cedidos para ida a campo e pelo apoio dos técnicos da instituição.

Resumo

A área deste trabalho está situada na porção nordeste do estado de Goiás, inserida no contexto geológico da Faixa Brasília, na Província Tocantins. O foco desta dissertação é o estudo das assinaturas geofísicas da região, visando compreender principalmente o comportamento dos garimpos auríferos cuja formação das mineralizações está associada aos processos de alterações hidrotermais. As ocorrências auríferas abordadas são os garimpos Cícero, Tucano, Morro dos Borges, Novo Horizonte, Córrego do Brejão e a mina Aurumina. Estas mineralizações estão localizadas no contato entre as rochas metassedimentares da Formação Ticunzal e os granitos da Suíte Aurumina, e associadas a uma zona de cisalhamento formada durante o evento Transamazônico (2,5 a 1,9 Ga). Os dados geofísicos utilizados são oriundos de levantamentos aéreos recentes de alta resolução e fornecem informações magnetométricas e gamaespectrométricas da região. Os produtos magnetométricos Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e Inclinação do Sinal Analítico (ISA) permitiram a extração e análise de lineamentos e feições magnéticas com formato sigmoidal. Estas feições auxiliam na compreensão das estruturas geológicas da área e as correlaciona espacialmente com as ocorrências estudadas. Os produtos Deconvolução de Euler e Inversão dos Vetores de Magnetização (MVI) possibilitam a estimativa da profundidade da zona de cisalhamento e mostram esta feição é mais extensa em subsuperfície do que em superfície. Os produtos gamaespectrométricos Parâmetro F, Potássio Anômalo e Urânio Anômalo ressaltaram as regiões enriquecidas em potássio e urânio em relação ao tório. Este enriquecimento é comum em regiões que apresentam alterações hidrotermais. Como as mineralizações estudadas são de origem hidrotermal, as regiões dos garimpos aparecem realçadas nestes produtos. A interpretação conjunta das assinaturas magnetométricas e gamaespectrométricas definiu padrões entre as assinaturas geofísicas dos garimpos e possibilitou a classificação destes em grupos. Por fim, com base nas informações geofísicas relevantes, foi proposto um mapa de favorabilidade aurífera para a região da zona de cisalhamento, que destaca o potencial prospectivo com base nas diferenças entre as características geofísicas dos garimpos e mostra o xisto da Formação Ticunzal associado com anomalias que apresentam os maiores valores da *Fuzzy*.

Palavras-chave: Magnetometria, gamaespectrometria, ocorrências auríferas, deconvolução de Euler, Parâmetro F.

Abstract

The area of this work is located in the northeastern part of the state of Goiás, where the context geologic is inserted in Brasília Fold Belt, Tocantins Province. The focus of this dissertation is the study of geophysical signatures of region, with the aim of understanding the behavior of gold deposits. The formation of these mineralizations is related with processes of hydrothermal alterations. The gold occurrences studied are Cícero, Tucano, Morro dos Borges, Novo Horizonte, Córrego do Brejão and Aurumina mine. These mineralizations are located between Ticunzal metasedimentary rocks and Aurumina granites and associated to a shear zone formed during Transamazonian event (2,5 - 1,9 Ga) . In this work, it was used high-resolution airborne magnetometric and radiometric data. The magnetometric products Analytic Signal Amplitude and Tilt propitiated an extraction and analysis of lineaments and magnetic features with sigmoid format. These features provide informations about the geologic structures and their relation with the gold deposits studied. The products Euler Deconvolution and Magnetization Vector Inversion estimated the depth of this shear zone and show that this feature are more extensive in subsurface than in surface. The radiometric products, Factor F, K_d and U_d , highlighted regions with enrichment of potassium and uranium in relation with thorium. This enrichment is common in regions related to hydrothermal alterations. As the mineralizations studied have hydrothermal origin, the deposits regions appear emphasized in these products. The joint interpretation of the magnetometric and radiometric signatures defined patterns of the geophysical signatures of the gold deposits and allowed the classification of these into groups. Finally, a prospective model for gold mineralization for the area was proposed and highlighted already known occurrences. These model shows that the schists of the Ticunzal Formation was associated with anomalous values.

Keywords: Magnetometry, Radiometry, gold occurrences, Euler Deconvolution, Factor F.

Sumário

Lista de figuras	9
Capítulo 1 - Introdução.....	14
1.1 Introdução.....	15
1.2 Objetivos.....	15
1.3 Localização	16
1.4 Estrutura da Dissertação	17
Capítulo 2 - Contexto Regional Geofísico e Geológico	19
2.1 Contexto Geofísico Regional.....	20
2.2 Contexto Geológico Regional	20
2.2.1 Província Tocantins	20
2.2.2 Faixa de Dobramento Brasília	22
2.2.3 Bloco Crustal Cavalcante-Natividade	26
Capítulo 3 - Conceitos Teóricos e Metodologia.....	30
3.1 Conceitos Teóricos	31
3.1.1 Magnetometria.....	31
3.1.2 Gamaespectrometria	33
3.2 Metodologia.....	36
Capítulo 4 - Processamento e Natureza dos Dados	41
4.1 Dados aéreos.....	42
4.2 Pré-processamento.....	42
4.2.1 Junção dos bancos de dados	43
4.2.2 Correção dos valores negativos	44
4.3 Processamento dos dados magnéticos	45
4.3.1 Deconvolução de Euler.....	46
4.3.2 Matched Filtering	49

4.3.3 Inversão de vetor de Magnetização (MVI).....	52
4.4 Processamento dos dados gamaespectrométricos	55
4.4.1 Parâmetro F	56
4.4.2 Potássio Anômalo (K_d) e Urânio Anômalo (U_d)	58
4.5 Integração dos Dados Geofísicos	60
Capítulo 5 - Discussão dos Resultados.....	65
5.1 Interpretação Geofísica.....	66
5.2 Interpretação Geofísica Regional	66
5.2.1 Interpretação Magnética Regional.....	66
5.2.2 Interpretação Gamaespectrométrica Regional.....	73
5.3 Interpretação Geofísica da Faixa Central	77
5.3.1 Interpretação Magnética da Faixa Central.....	77
5.3.2 Interpretação Gamaespectrométrica da Faixa Central.....	80
5.4 Interpretação dos garimpos.....	84
5.4.1 Garimpos Cícero e Tucano	85
5.4.2 Garimpo Morro dos Borges.....	88
5.4.3 Garimpo Novo Horizonte	91
5.4.4 Mina Aurumina	94
5.4.5 Garimpo Córrego do Brejão	96
5.5 Interpretação dos dados geofísicos integrados	98
Capítulo 6 - Conclusões.....	102
Referências	106

Lista de figuras

Figura 1.1: Localização da área de estudo.....	16
Figura 1.2: Fluxograma da estruturação da dissertação.	18
Figura 2.1: Compartimentação geotectônica do Brasil no Ciclo Brasileiro. Representando os sistemas orogênicos (em verde), os maciços e granitoides (em bege), os crátons (rosa escuro) e as coberturas fanerozoicas (em amarelo) (Hasui, 2012).....	21
Figura 2.2: Compartimentação do Sistema Orogrênico Tocantins. (Hasui, 2012).....	22
Figura 2.3: Mapa representativo das principais unidades da Província Tocantins, em destaque o Bloco Crustal Cavalcante-Natividade (CN), Lineamento dos Pirineus (PL), Lineamento Transbrasileiro (TBL), Falha Rio dos Bois e Falha Rio Maranhão (Fuck <i>et al.</i> , 2014).....	24
Figura 2.4: Compartimentação da Faixa Brasília em domínios tectônicos. A área de estudo está delimitada pelo retângulo vermelho (Fuck, 1994).....	26
Figura 2.5: A foto evidencia a assimilação do xenólito de paragnaisse, Fm. Ticunzal, pelo granito da Suíte Aurumina (Granito Au).....	27
Figura 2.6: Mapa Geológico da área na escala 1:100.000 adaptado de Alvarenga <i>et al.</i> (2007) e Botelho e Almeida (2017, inédito).....	29
Figura 3.1: Representação de uma barra magnética sujeita a ações de um campo magnético externo. As setas representam as linhas do campo magnético, o polo S representa o polo com polaridade negativa e o polo N é o polo com polaridade positiva.	32
Figura 3.2: Abundâncias relativas dos radioelementos K, Th e U em diferentes tipos de rochas (Adaptado de Wollenberg, 1977).....	35
Figura 3.3: Representação dos espectros de linhas referentes à série de decaimento e as janelas de monitoramento dos radioelementos: a) Espectro de energia do ^{40}K ; b) Espectro de energia do ^{238}U (^{214}Bi); c) Espectro de energia do ^{232}Th (^{208}Tl).....	36
Figura 4.1: a) Malha da concentração de tório antes da correção de nivelamento; b) Malha da concentração de tório depois do nivelamento dos dados.....	44

Figura 4.2: Produtos magnéticos: a) Campo Magnético Anômalo; b) Derivada Vertical (Dz); c) Amplitude do Sinal Analítico (ASA); d) Inclinação do Sinal Analítico (ISA).	46
Figura 4.3: a) Amplitude do sinal analítico (ASA); b) resultado da Deconvolução de Euler: índice estrutural = 1, janela = 15 e tolerância máxima = 15%.	49
Figura 4.4: a) O espectro radial de potência (vermelho) e o espectro de potência gerado pelo <i>Matched Filtering</i> (preto); b) Filtros passa-banda determinados a partir da inclinação do espectro radial de potência.	51
Figura 4.5: Produtos gerados a partir do método <i>Matched Filtering</i> . a) CMA original; b) Produto referente às fontes com profundidades de 134 a 299 m; c) Produto referente às fontes com profundidades de 299 a 1286 m; d) Produto referente às fontes com 1286 a 10306 m de profundidade.	52
Figura 4.6: Representação esquemática de a) Dipolos dispostos aleatoriamente na ausência de campo magnético; b) Dipolos semi-alinhados na presença de um campo magnético (cone vermelho); c) Dipolos totalmente orientados na presença do campo magnético (Barbosa e Pereira, 2013).	53
Figura 4.7: Representação esquemática do problema inverso e direto (Barbosa and Pereira, 2013).	54
Figura 4.8: Comparação entre o produto 2D (ASA) e o produto 3D (MVI), onde: a) Imagem da Amplitude do Sinal Analítico (ASA); b) Modelo gerado pela inversão do vetor magnético (MVI).	55
Figura 4.9: Produtos gamaespectrométricos: a) Concentração do Tório (ppm); b) Concentração do Potássio (%); c) Concentração do Urânio (ppm); d) Imagem da composição ternária RGB (K/eTh/eU).	56
Figura 4.10: Parâmetro F da área de estudo.	58
Figura 4.11: a) Imagem ressaltando as diferenças entre as médias de K e eTh para três domínios gamaespectrométricos (destacados em cinza mais escuro); b) Resultado do produto K_d para toda a faixa central da área de estudo.	60
Figura 4.12: O gráfico mostra o grau de pertinência da Lógica <i>Fuzzy</i> (Bonham-Carter, 1994).	61

Figura 4.13: O fluxograma apresenta as etapas da criação do modelo a partir dos operadores e funções da Lógica <i>Fuzzy</i> , com a integração dos produtos K_d , U_d , Parâmetro F e feições sigmoidais inferidas a partir do ISA.....	63
Figura 5.1: a) Amplitude do Sinal Analítico (ASA), b) Inclinação do Sinal Analítico (ISA).....	67
Figura 5.2: Interpretação dos dados magnéticos. a) Produto ISA com destaque aos lineamentos e a faixa de textura magnética mais lisa; b) Interpretação magnetométrica da área em domínios magnéticos, com base em lineamentos e feições sigmoidais.	68
Figura 5.3: Estimativa das profundidades das fontes magnéticas a partir da Deconvolução de Euler.....	71
Figura 5.4: Interpretação do produto <i>Matched Filtering</i> . a) CMA original; b) CMA ressaltando as fontes com profundidades de 134 a 299 m; c) CMA realçando estruturas de 299 a 1286 m; d) CMA ressaltando fontes de 1286 a 10306 m.....	72
Figura 5.5: Definição das cores referentes aos domínios gamaespectrométricos relacionando a concentração dos radioelementos K, eTh, eU às cores do espaço RGB, respectivamente.	74
Figura 5.6: a) Imagem ternária RGB (K, eTh, eU); b) Interpretação dos domínios gamaespectrométricos classificados conforme a tabela de cores definida.	75
Figura 5.7: a) O Parâmetro F mostra a região central destacada devido ao enriquecimento de K e U; b) Ressalta as litologias com correlação com o Parâmetro F.	76
Figura 5.8: Modelo tridimensional gerado a partir do Vetor de Magnetização Induzida (MVI). Os círculos brancos mostram as localizações dos principais garimpos de ouro na área de estudo.	78
Figura 5.9: Perfis gerados a partir do MVI correlacionando a resposta magnética em subsuperfície dos garimpos estudados com a geologia da área.....	79
Figura 5.10: Produtos que ressaltam o enriquecimento de potássio e urânio na região da Faixa Central, com os valores correspondentes aos garimpos. a) O Parâmetro F realça o enriquecimento simultâneo de K e U em relação ao Th; b) O Potássio Anômalo destaca as regiões com enriquecimento relativo de K; c) O Urânio Anômalo enfatiza o enriquecimento relativo de U.	81

Figura 5.11: Produto Urânio Anômalo com as anomalias mapeadas pela Nuclebrás e pela CNEN. a) Anomalia Morro de Caldas; b) Anomalias ao redor do Maciço Soledade; c) Anomalias do sul de Campos Belos; d) Anomalia Alecrim; e) Região com valores elevados de urânio sem anomalias mapeadas.....	83
Figura 5.12: Perfis geofísicos da seção que intersecta o garimpo Cícero, com referência à Figura 5.9.....	86
Figura 5.13: Perfis geofísicos da seção que intersecta o garimpo Tucano, com referência à Figura 5.9.....	87
Figura 5.14: Análise em detalhe dos garimpos Cícero e Tucano, indicados por círculos brancos. a) Representação esquemática do garimpo Tucano; b) Perfil esquemático da cinemática dextral encontrado nos garimpos; c) Interpretação magnética do produto ISA; d) Parâmetro F (1,04/2,34); e) Potássio anômalo (-0,3/0,4); f) Urânio anômalo (1,18/1,35).	88
Figura 5.15: Perfis geofísicos da seção que intersecta o garimpo Morro dos Borges com referência à Figura 5.9.....	89
Figura 5.16: Análise detalhada do garimpo Morro dos Borges, indicado pelo círculo branco. a) Foto do local de formação da mineralização; b) Fenda de tração, cinemática dextral, encontrada no xisto; c) Assinatura magnética no ISA contendo a interpretação magnética; d) Parâmetro F (2,81); e) Potássio anômalo (2,32); f) Urânio anômalo (1,45).	91
Figura 5.17: Perfis geofísicos da seção que intersecta o garimpo Novo Horizonte, com referência à Figura 5.9.....	92
Figura 5.18: Análise detalhada do garimpo Novo Horizonte, indicado pelo círculo branco. a) Assinatura magnética no ISA contendo a interpretação magnética; b) Estimativas de profundidade das fontes magnéticas a partir da Deconvolução de Euler c) Parâmetro F (0,17); d) Potássio anômalo (0,08); e) Urânio anômalo (0,54).....	93
Figura 5.19: Perfis geofísicos da seção que intersecta o garimpo Córrego do Brejão, a Mina Aurumina e uma região com respostas geofísicas muito semelhantes a da mina. Com referência à Figura 5.9.	95
Figura 5.20: Análise detalhada da mina Aurumina, indicada pelo círculo branco. a) Perfil esquemático do setor da mina Aurumina; b) Esquema da fenda de tração,	

cinemática dextral, na região da mina; c) Assinatura magnética no ISA contendo a interpretação magnética; d) Parâmetro F (0,2 %); e) Potássio anômalo (-0,3 %); f) Urânio anômalo (0,3 %). 96

Figura 5.21: Análise detalhada do garimpo Córrego do Brejão, indicado pelo círculo branco a) Assinatura magnética no ISA contendo a interpretação magnética; b) Parâmetro F (0,9); c) Potássio anômalo (0,9); d) Urânio anômalo (-0,1); e) Anomalia de urânio e estruturas geológicas mapeadas..... 97

Figura 5.22: a) Áreas anômalas para o modelo Fuzzy adotado..... 99

Figura 5. 23: Correlação entre o modelo gerado pela Lógica *Fuzzy* e a litologia. 101

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Introdução

A porção nordeste do estado de Goiás é uma região constantemente estudada e mapeada. Esta região apresenta relevante importância econômica devido à presença de depósitos e ocorrências de fosfato, estanho, urânio e ouro (Dardenne e Schobbenhaus, 2001; Dardenne e Botelho, 2014).

Embora existam diversos trabalhos com enfoque na caracterização geológica, o comportamento geofísico da região permanece pouco conhecido. Os trabalhos geofísicos desenvolvidos na área abordam temas em escala regional, principalmente acerca de estudos de compartimentação e estruturação tectônica da Província Tocantins (Fuck, 1994; Soares *et al.*, 2006). A escassez de trabalhos geofísicos com objetivo prospectivo na região contrapõe-se à sua cobertura por aerolevantamentos magnéticos e gamaespectrométricos de alta resolução que possibilitam estudos em escalas compatíveis a ações prospectivas.

Dados e informações geofísicas são constantemente utilizados em trabalhos prospectivos com altas taxas de sucesso na indicação de depósitos minerais (Gunn e Dentith, 1997; Shives *et al.*, 2000). A identificação de depósitos a partir da assinatura magnética está associada à presença de materiais magnéticos existentes no depósito ou nas estruturas que o controlam (Airo e Mertanen, 2008). O método magnético possibilita o conhecimento da crosta em subsuperfície e permite a definição de assinaturas magnéticas de um depósito em profundidade, sem que este necessariamente aflore. Os dados e informações gamaespectrométricas podem apresentar correlações com depósitos que possuem expressão em superfície e podem constituir um guia direto para os alvos (Shives *et al.*, 2000).

Neste trabalho ocorreu uma etapa de campo englobando as regiões de garimpo, com o intuito de analisar e compreender as alterações hidrotermais e processos deformacionais associados. O único garimpo que não foi visitado foi o Cícero, pois não foi possível acessá-lo. Atualmente as regiões dos garimpos estão muito alteradas devido a ações antrópicas, o que dificulta alguns registros fotográficos.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como foco analisar as assinaturas geofísicas de depósitos e ocorrências auríferas localizados na região dos municípios de Nova Roma e Monte

Alegre de Goiás. Os alvos estudados foram os garimpos Cícero, Tucano, Morro dos Borges, Córrego do Brejão e Novo Horizonte e a mina Aurumina. Os dados geofísicos são utilizados com o intuito de compreender e definir as assinaturas geofísicas da região, em subsuperfície e superfície, e preferencialmente nestes garimpos auríferos. As interpretações geofísicas acrescentam relevantes informações sobre o ambiente geológico da área de estudo, contribuindo com o conhecimento metalogenético da região nordeste de Goiás.

Por fim, as assinaturas geofísicas mais relevantes foram integradas em um mapa de potencialidade aurífera baseado no comportamento dos garimpos desta região, com o objetivo de destacar novos alvos potenciais.

1.3 Localização

A área de estudo está localizada na zona 23 e é limitada pelas latitudes 8.470.000 m e 8.560.000 m e longitudes de 250.000 m e 320.000 m, com extensão aproximada de 6.600 km² (Figura 1.1). A região está situada na porção nordeste do estado de Goiás, próximo ao limite com o estado de Tocantins.

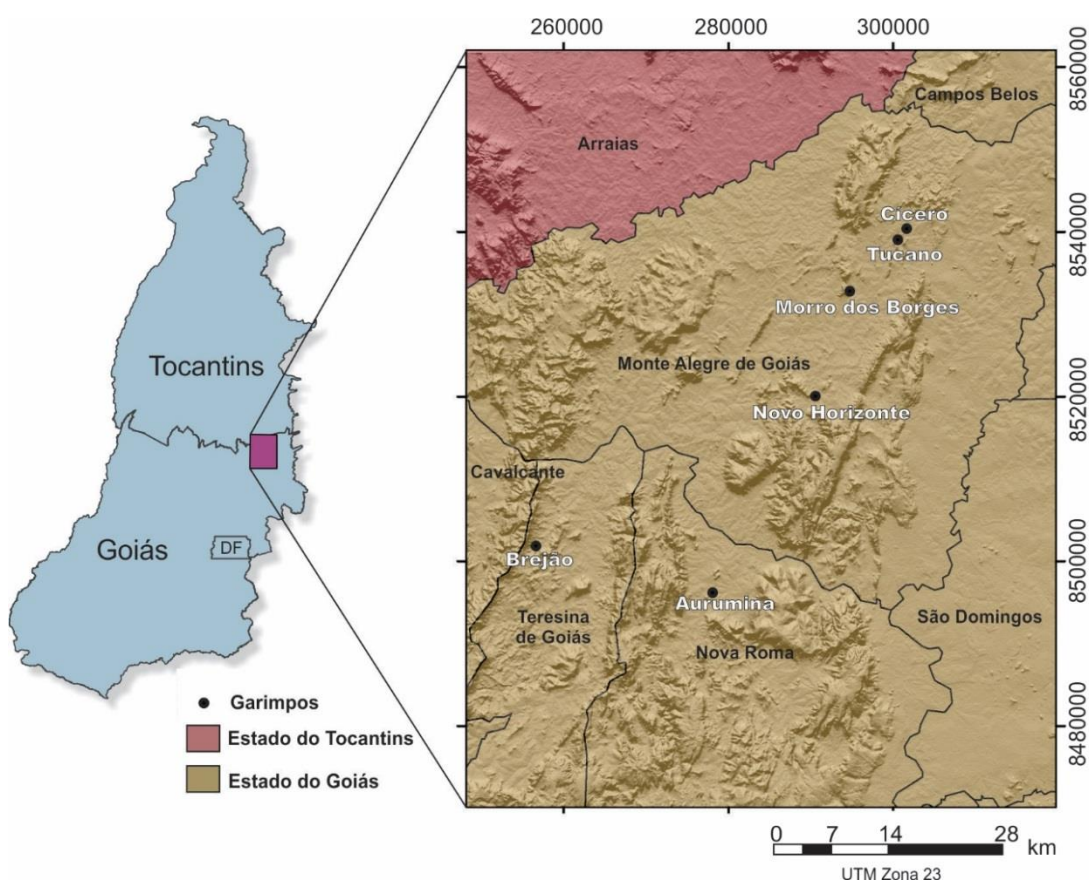


Figura 1.1: Localização da área de estudo.

O acesso aos municípios de Monte Alegre de Goiás e Nova Roma, a partir de Brasília, ocorre pelas rodovias BR-010 e GO-118. Nos municípios, o acesso aos garimpos acontece a partir de estradas não pavimentadas.

No contexto geológico, a área está inserida na porção nordeste da Faixa Brasília, localizada na Província Tocantins (Fuck *et al.* 2005).

1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação está organizada em seis capítulos que abordam os conceitos teóricos dos métodos utilizados, o processamento e a interpretação dos dados e as conclusões decorrentes da pesquisa.

O Capítulo 1 introduz o tema da dissertação ao leitor, com informações sobre a localização da área, justificativa e objetivo do trabalho. O Capítulo 2 reúne informações geofísicas e geológicas da área oriundas de estudos anteriores considerados de caráter relevante ao tema desta pesquisa.

O Capítulo 3 possui caráter teórico, com apresentação dos conceitos físicos dos métodos magnéticos e gamaespectrométricos e a abordagem da metodologia adotada, com exemplos de sua aplicação em regiões com contextos geofísicos e geológicos semelhantes ao encontrado na área de estudo.

O Capítulo 4 discorre sobre o pré-processamento e processamento dos dados. Nele são explicados os parâmetros adotados e a finalidade de cada produto. O Capítulo 5 mostra a interpretação dos produtos geofísicos, e os correlaciona com as informações geológicas da área. O Capítulo 6 apresenta as conclusões e as contribuições resultantes da pesquisa. A estruturação da dissertação é apresentada na figura 1.2.

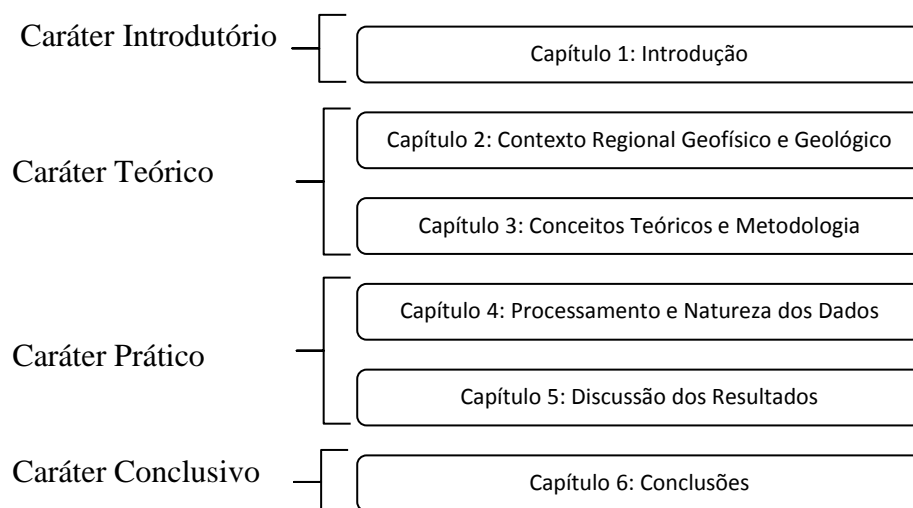


Figura 1.2: Fluxograma da estruturação da dissertação.

Capítulo 2 - Contexto Regional Geofísico e Geológico

2.1 Contexto Geofísico Regional

Na área de estudo foram desenvolvidos trabalhos geofísicos que incluem gravimetria (Fuck, 1994), sísmica de refração profunda (Soares *et al.*, 2006), função receptor (Soares, 2005) e magnetometria (Soares, 2005). No entanto, estes trabalhos apresentam escala e objetivos distintos dos apresentados nesta dissertação, pois o objetivo principal foi o estudo da formação e da estruturação da Província Tocantins. Os trabalhos existentes que abordam o contexto da mineralização, foco desta dissertação, apresentam o contexto geológico/econômico como principal tema abordado (Machado, 2008; Cunha, 2013).

2.2 Contexto Geológico Regional

A região estudada está localizada na porção nordeste do estado de Goiás e apresenta diversos fatores geológicos que a tornam promissora para exploração mineral. No contexto geológico a região está inserida na Província Tocantins, unidade de primeira grandeza no arcabouço geológico brasileiro (Almeida *et al.*, 1981). Em um contexto mais local, a área se concentra na Faixa Brasília e engloba o contato entre a Suíte Aurumina e a Formação Ticunzal, onde se formaram depósitos auríferos de idade paleoproterozoica.

2.2.1 Província Tocantins

As províncias estruturais brasileiras são grandes áreas classificadas com base nas feições estruturais, estratigráficas, metamórficas e evoluções magmáticas e que diferem das províncias limítrofes. Os limites dessas províncias podem ser bem definidos ou inferidos. No primeiro caso estão incluídos os limites estabelecidos a partir de componentes estruturais de grande porte, como falhas ou zonas de falhas, frentes metamórficas e bordas de bacias sedimentares. O segundo caso inclui limites que são geologicamente indefinidos, seja pelas condições de sua estrutura ou pela falta de conhecimento adequado, além de incluir limites transitórios de transformação de zonas marginais dobradas para coberturas deformadas de plataforma (Almeida *et al.*, 1981).

A Província Tocantins é um orógeno neoproterozoico resultante da convergência e colisão de três blocos continentais: i) Amazônico a oeste; ii) São Francisco-Congo a leste; e iii) Paranapanema a sul (Cordani *et al.*, 1984; Fuck *et al.*, 2008). Na figura 2.1 está apresentada a compartimentação do território brasileiro nestes blocos continentais,

segundo a concepção de Hasui (2012), que inclui a Província Tocantins no Sistema Orogênico Tocantins, junto com a porção sudeste do Escudo do Brasil Central.

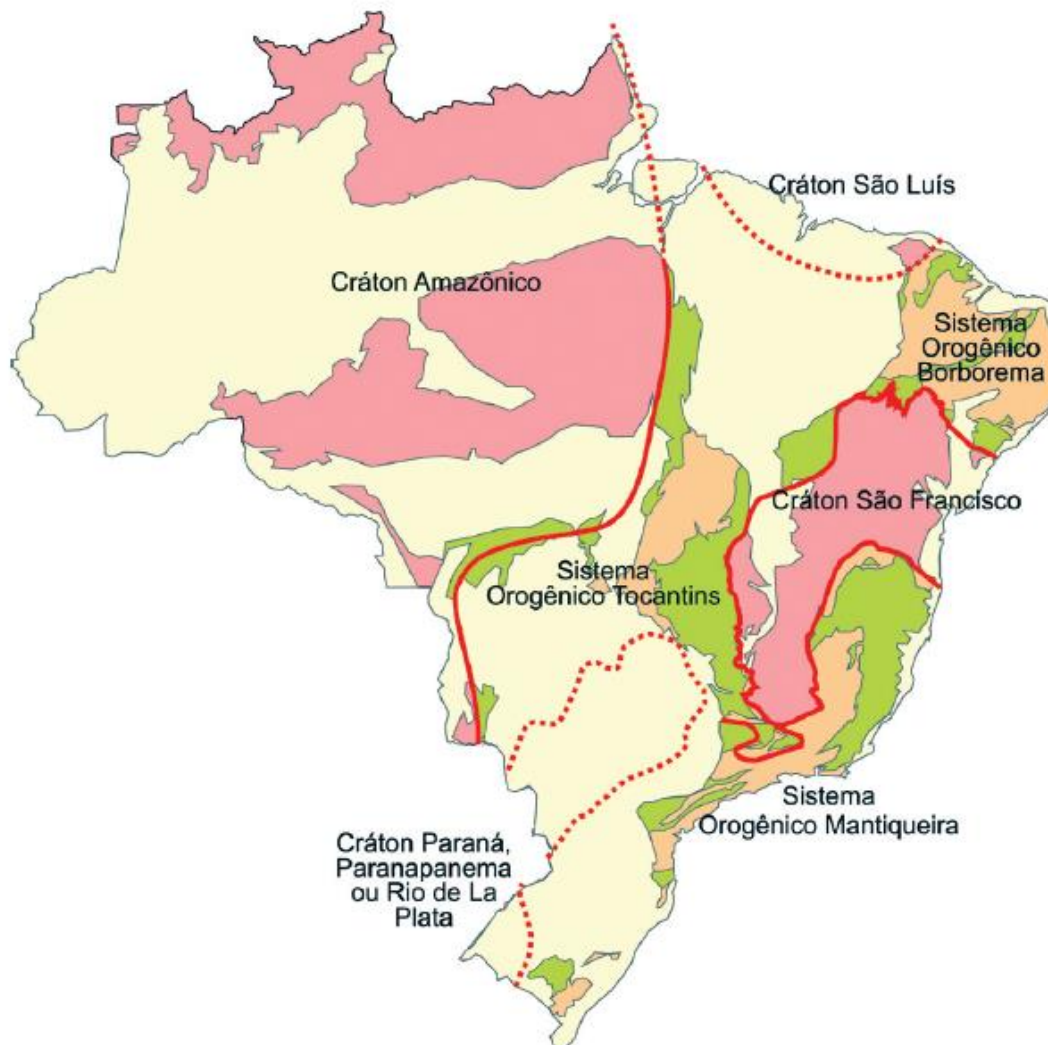


Figura 2.1: Compartimentação geotectônica do Brasil no Ciclo Brasileiro. Representando os sistemas orogênicos (em verde), os maciços e granitoides (em bege), os crátons (rosa escuro) e as coberturas fanerozoicas (em amarelo) (Hasui, 2012).

A figura 2.2 mostra a compartimentação do Sistema Orogrênico Tocantins em setores correspondentes aos cinturões orogênicos Brasília, Araguaia e Paraguai (Hasui, 2012). A área de estudo está inserida no Cinturão Brasília.

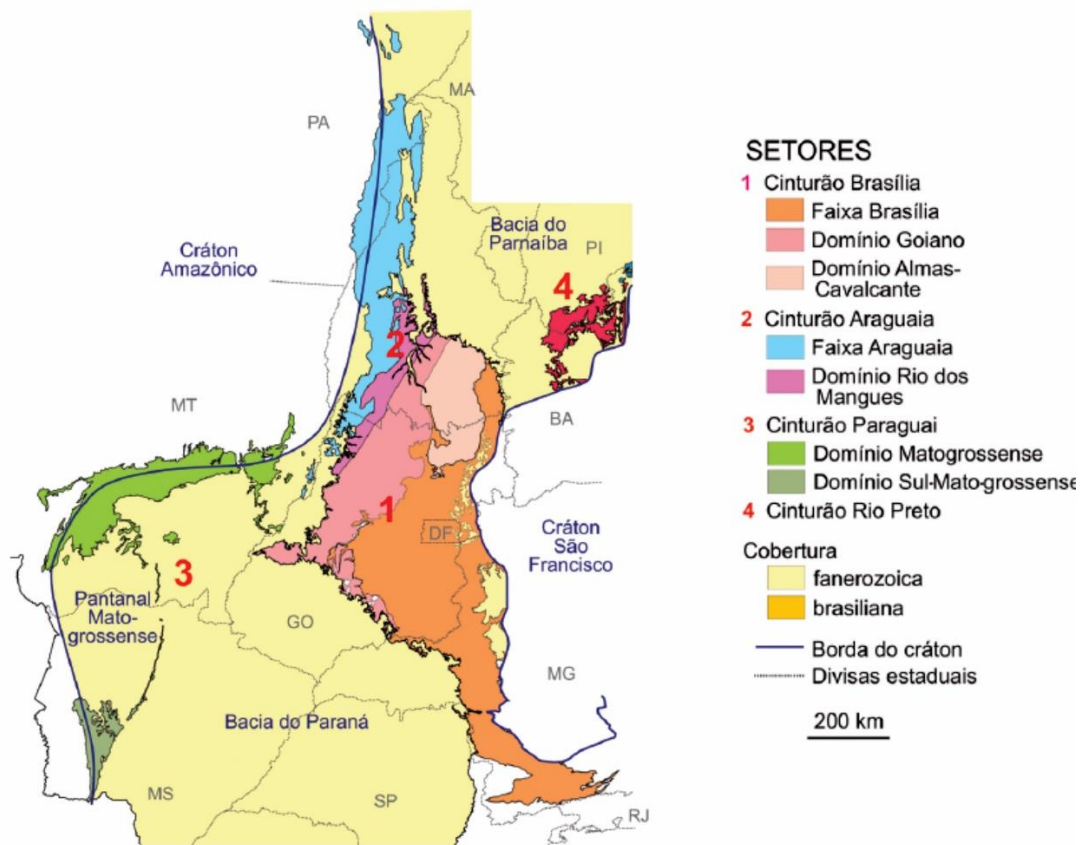


Figura 2.2: Compartimentação do Sistema Orogênico Tocantins. (Hasui, 2012).

O Cinturão Brasília abrange a Faixa Brasília e os domínios Goiano e Almas-Cavalcante, além de pequenos núcleos de rochas mais antigas associadas a unidades meso e neoproterozoicas (Hasui, 2012).

Em uma escala maior, será adotada neste trabalho a divisão geotectônica de Fuck *et al.* (2005) que denomina como Faixa Brasília todo o Cinturão Brasília descrito por Hasui (2012).

2.2.2 Faixa de Dobramento Brasília

A Faixa de Dobramento Brasília (FDB) está localizada na porção centro-leste da Província Tocantins e apresenta mais de 1000 km de extensão na direção N-S ao longo da margem ocidental do Cráton São Francisco (CSF). A Faixa é composta por espessas sequências sedimentares de margem continental, fragmentos ofiolíticos, um grande arco magmático e uma importante anomalia gravimétrica indicando a zona de sutura dos blocos continentais envolvidos (Pereira e Fuck, 2005).

A FDB apresenta duas compartimentações tectônicas: i) na direção N-S, composta pelos segmentos Setentrional e Meridional, separados pela Sintaxe dos Pirineus (Araújo Filho, 2000); e ii) na direção E-W, compartimentada em zonas Interna, Externa e Cratônica e pelas unidades geotectônicas do Arco Magmático de Goiás (AMG) e o Microcontinente de Goiás (Figura 2.3; Fuck *et al.*, 1993).

O limite entre as zonas Interna e Externa da Faixa Brasília é demarcado pela Falha Rio Maranhão (Figura 2.3). Parte da Zona Externa é constituída por uma sequência de rochas sedimentares de margem passiva que foram deformadas e metamorfasadas no fácies xisto verde e constituem o Cinturão de Dobras e Empurrões que bordeja o CSF (Figura 2.4). Ao norte da Zona Externa, está localizado o Bloco Crustal Cavalcante-Natividade formado por sequências metassedimentares dobradas e pouco espessas, e por extensas áreas de embasamento síalico exposto que incluem os terrenos granito-gnáissicos e restritas sequências vulcano-sedimentares (Fuck *et al.*, 2014).

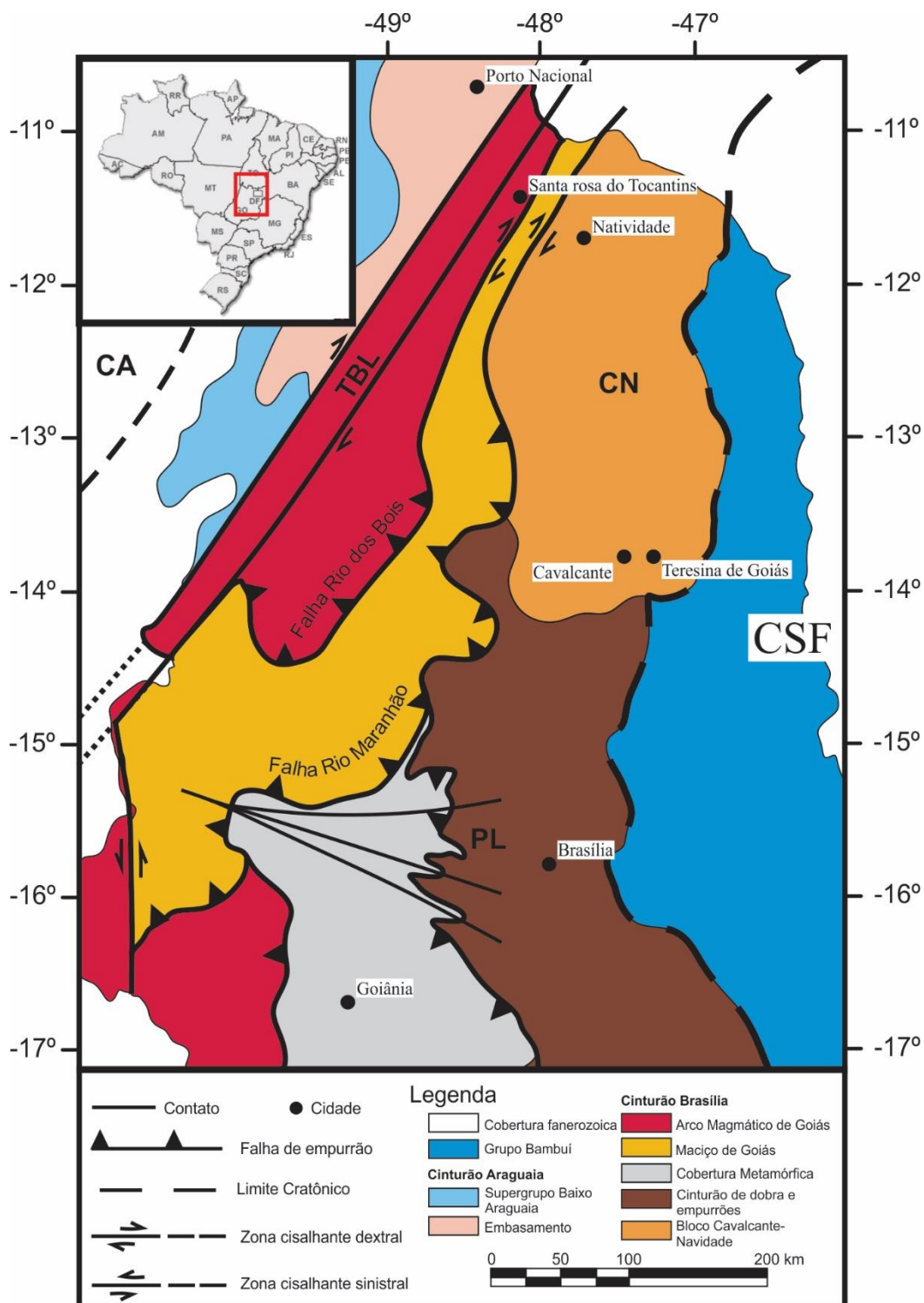


Figura 2.3: Mapa representativo das principais unidades da Província Tocantins, em destaque o Bloco Crustal Cavalcante-Natividade (CN), Lineamento dos Pirineus (PL), Lineamento Transbrasiliiano (TBL), Falha Rio dos Bois e Falha Rio Maranhão (Fuck *et al.*, 2014).

A Zona Interna da Faixa Brasília foi dividida em três domínios tectônicos: i) o Arco Magmático de Goiás, subdividido pelos segmentos Meridional e Setentrional que denominam respectivamente, ao sul o Arco de Arenópolis e ao norte o Arco de Mara

Rosa. Os arcos são formados por ortognaisses calci-alcalinos e sequências vulcano-sedimentares remanescentes com idades entre 800 a 930 Ma e intrusões de granitos pós-orogênicos; ii) o Maciço do Goiás, composto por terrenos granito-greenstone do Bloco Arqueano de Crixás-Goiás, intrusões máficas-ultramáficas acamadadas e sequências vulcano-sedimentares de idades mesoproterozoica a neoproterozoica, e ortognaisses paleoproterozoicos cobertos em grande parte por sequências metassedimentares dobradas; e iii) o Núcleo Metamórfico, composto pelos granulitos de Anápolis-Itauçu – com assembleias mineralógicas locais de ultra a alta temperaturas, pelos complexos máficos-ultramáficos acamadados e pelo Complexo Uruaçu (Dardenne *et al.*, 2000; Pimentel *et al.*, 2004). A figura 2.4 apresenta a compartimentação dos domínios tectônicos da Faixa Brasília.

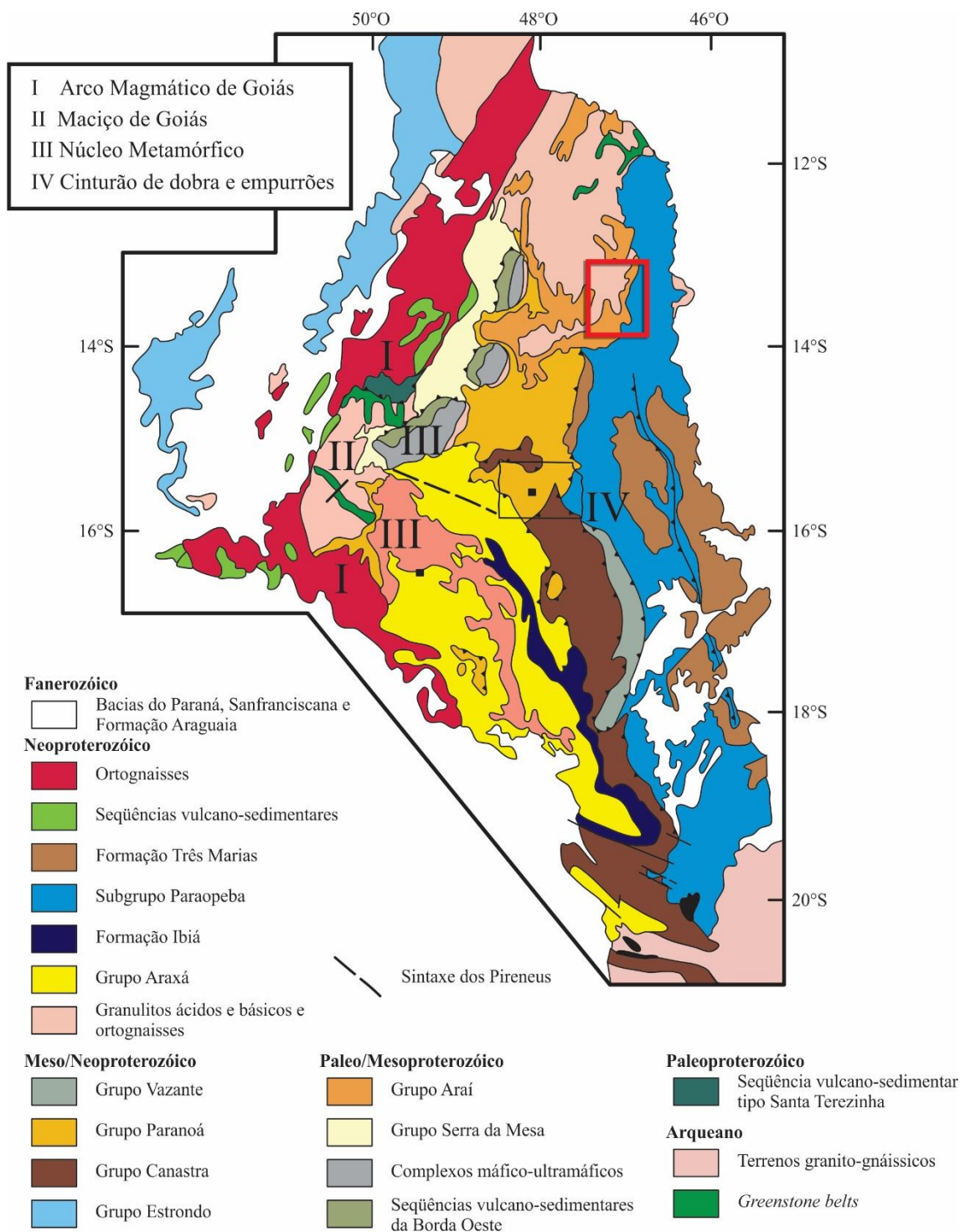


Figura 2.4: Compartimentação da Faixa Brasília em domínios tectônicos. A área de estudo está delimitada pelo retângulo vermelho (Fuck, 1994).

2.2.3 Bloco Crustal Cavalcante-Natividade

Entre as principais unidades que constituem a Província Tocantins, é destacado o Bloco Crustal Cavalcante-Natividade (Figura 2.3). Este Bloco é definido como o embasamento siálico da Faixa de Dobramentos Brasília e é formado por um Complexo

Granito-Gnáissico, sequências vulcano-sedimentares, Formação Ticunzal e a Suíte Aurumina (Fuck *et al.*, 2014).

Delgado *et al.* (2003) denominaram o embasamento gnáissico da porção setentrional da Faixa Brasília de Terreno Almas-Cavalcante ou Complexo Almas-Cavalcante. Este embasamento é constituído por um núcleo siálico formado no Paleoproterozoico e são reconhecidos dois blocos com características distintas: i) região entre Conceição do Tocantins e Almas; e ii) região de Cavalcante-Arraias.

Neste trabalho, cerca de 90% da área de estudo está localizada no Bloco Cavalcante-Arraias que é formado pela sequência de rochas metassedimentares da Formação Ticunzal (Marini *et al.*, 1978) intrudida pelos granitos peraluminosos da Suíte Aurumina, que marca o final do Evento Transamazônico na região em 2,0 Ga (Alvarenga *et al.*, 2007).



Figura 2.5: A foto evidencia a assimilação do xenólito de paragnaisse, Fm. Ticunzal, pelo granito da Suíte Aurumina (Granito Au).

A Formação Ticunzal é formada, da base ao topo, por paragnaises que gradam para xistos grafitosos e por biotita xisto feldspático intercalado por grafitita xisto. De

acordo com Alvarenga *et al.* (2007) e Marques (2009), esta formação é subdividida nas litofácies paragnaisse e xisto grafitosos e, embora sua idade não seja bem definida, sabe-se que é superior a 2,15 Ga, pois esta é a idade apresentada pelas intrusões graníticas da Suíte Aurumina nesta formação.

A Suíte Aurumina é composta por intrusões sin-, tardi- e pós-tectônicas constituídas de monzogranito a tonalito peraluminosos, que apresentam elevada concentração de biotita e muscovita magmática (Botelho *et al.*, 1999). Posteriormente, Botelho *et al.* (2006) definiram seis fácies para a Suíte Aurumina: muscovita granito, biotita-muscovita granito, tonalito, biotita granito, migmatitos e turmalina-muscovita granito. Mais recentemente Cuadros *et al.*, (2017) definem a Suíte Aurumina como uma associação de rochas graníticas peraluminosas, sin-tectônicas, formadas por hibridização entre magmas máficos e rochas sedimentares.

O domínio dos granitos peraluminosos da Suíte Aurumina e os xistos e paragnaises da Formação Ticunzal hospeda depósitos e ocorrências minerais de ouro, platinóides, urânio, estanho e tântalo. Os depósitos de ouro apresentam idade paleoproterozoica e ocorrem em veios de quartzo associados às zonas de cisalhamento subverticais dúcteis-rúpteis com cinemáticas dextral N70E e sinistral N50W (Botelho *et al.*, 2006).

No final do Paleoproterozoico, este embasamento foi afetado por rifteamento continental, evento expresso na área pelas intrusões de granitos tipo Pedra Branca, pertencentes à Subprovíncia Estanífera do Rio Paranã (Marini e Botelho, 1986), pela sedimentação do Grupo Araí (Fm. Arraias) e pelo vulcanismo associado (Alvarenga *et al.*, 2007) (Figura 2.6).

No Neoproterozoico, após um longo período de erosão e ação de uma tectônica rígida, ocorreu a sedimentação da Formação Jequitaí e do Grupo Bambuí, que em algumas regiões ultrapassou o limite ocidental da Zona Externa da Faixa Brasília. Na região o pico do Evento Brasileiro, final do Neoproterozoico (0,63 Ga), é caracterizado por dobramentos e falhamentos, metamorfismo de baixo grau e transporte de oeste para leste em direção ao Cráton São Francisco (Alvarenga *et al.*, 2007).

A área de estudo apresenta impresso os esforços provenientes de dois eventos deformacionais: i) o Evento Transamazônico (2,5 a 1,9 Ga) e ii) o Evento Brasileiro (1,0 a 0,44 Ga). De acordo com Alvarenga *et al.* (2007), as zonas de cisalhamento

foram formadas durante o Evento Transamazônico. Na região, estas zonas estão associadas às principais mineralizações auríferas, que foram remobilizadas posteriormente no Evento Brasileiro (ca. 0,6 Ga).

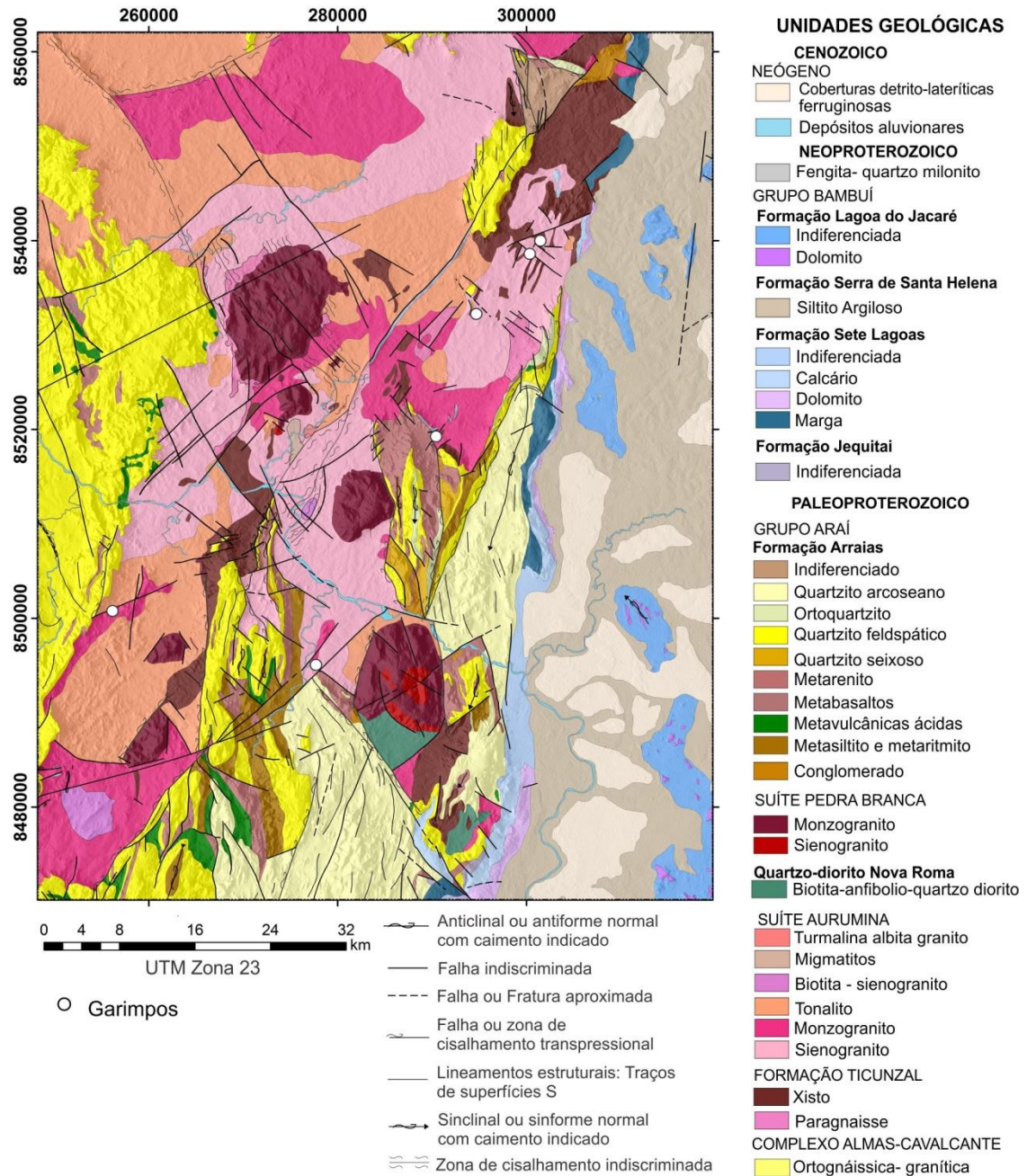


Figura 2.6: Mapa Geológico da área na escala 1:100.000 adaptado de Alvarenga *et al.* (2007) e Botelho e Almeida (2017, inédito).

Capítulo 3 - Conceitos Teóricos e Metodologia

3.1 Conceitos Teóricos

A geofísica é uma ciência que se baseia no contraste entre as propriedades físicas oriundas das rochas e do solo para estudo da subsuperfície terrestre. Estuda principalmente as propriedades elásticas, magnéticas, radiométricas, elétricas e gravimétricas do meio ou rochas. Devido à sua versatilidade e sucesso alcançado em diversas áreas das geociências tem apresentado crescente aplicação nos últimos anos (Holden et al., 2012; Campos, 2016).

3.1.1 Magnetometria

A magnetometria é um método geofísico fundamentado nas propriedades magnéticas do meio para fornecer informações principalmente da subsuperfície. Este é um método passivo que detecta as variações naturais do campo magnético da Terra, controladas principalmente pela susceptibilidade magnética das rochas. Essas variações são diagnosticadas em estruturas minerais, bem como em estruturas regionais, e podem ser utilizadas na indicação de diferentes tipos de depósitos minerais (Telford *et al.*, 1990).

O magnetismo é uma característica intrínseca do material, ou seja, este pode apresentar uma natureza magnética ou estar sujeito a ações de um campo magnético externo que causará um magnetismo induzido. Esses dois tipos de magnetismo são denominados, respectivamente, de magnetismo permanente e magnetismo induzido. Alguns materiais possuem simultaneamente os dois tipos de magnetismo, enquanto em outros prevalece um tipo específico. Entretanto, há materiais que são incapazes de se tornarem magnéticos (Dentith e Mudge, 2014).

O magnetismo pode ser descrito em termos de um polo magnético, que pode apresentar polaridade positiva ou negativa, e são capazes de se repelirem ou se atraírem conforme sua polaridade. Os polos que possuem a mesma intensidade e polaridades opostas se atraem e formam os dipolos magnéticos. Para compreender os princípios do magnetismo é conveniente utilizar uma barra magnética sob a influência de um campo magnético externo (Figura 3.1). Quando esta barra é quebrada em pedaços, são formados novos dipolos menores. Caso estes novos dipolos se quebrem o processo volta a ocorrer, ou seja, sempre que um dipolo é quebrado são gerados dipolos magnéticos menores (Dentith e Mudge, 2014).

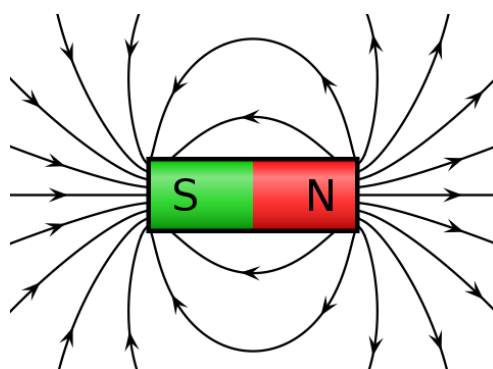


Figura 3.1: Representação de uma barra magnética sujeita a ações de um campo magnético externo. As setas representam as linhas do campo magnético, o polo S representa o polo com polaridade negativa e o polo N é o polo com polaridade positiva.

O campo magnético de um dipolo é formado pela combinação dos efeitos causados pelos campos dos dois polos. Conforme representado na figura 3.1, a direção de um campo magnético é conduzida do polo norte (polo positivo) em direção ao polo sul (polo negativo). O dipolo magnético interage com o campo magnético da Terra, de forma que o seu polo norte é atraído pelo polo norte geográfico (Dentith e Mudge, 2014).

A maior parte do campo magnético terrestre é originada no interior da Terra, e apenas uma pequena parcela é gerada na crosta. A parcela criada na crosta engloba as variações de campo magnético produzidas pelos materiais magnéticos de interesse para exploração mineral. A intensidade média do campo magnético terrestre é de aproximadamente 50.000 nT, enquanto as variações geológicas normalmente atingem valores de 10 ou 100 nT. O estudo do campo magnético terrestre é essencial na determinação da intensidade e do formato das anomalias magnéticas crustais (Dentith e Mudge, 2014).

Os minerais mais comuns possuem baixa susceptibilidade magnética e, portanto, o caráter magnético das rochas está relacionado a minerais que geralmente aparecem em menores proporções. O mineral magnético mais comum é a magnetita. Em decorrência disto, é possível classificar o comportamento magnético da rocha com base no conteúdo total deste mineral. O tamanho, o formato e a distribuição dos grãos magnéticos também influenciam no caráter magnético da rocha (Kearey *et al.*, 2009).

3.1.2 Gamaespectrometria

O método gamaespectrométrico detecta a emissão natural de raios gamas (γ) oriunda de rochas superficiais. Este método é muito utilizado em mapeamentos geológicos devido às distintas assinaturas radioativas emitidas pelos diferentes tipos de rochas e seus minerais (Dentith e Mudge, 2014).

A emissão de radiação gama ocorre durante o processo de desintegração nuclear ou decaimento radioativo de um átomo instável cujo objetivo é atingir um estado energético mais estável. Quando dois átomos apresentam o mesmo número de prótons e diferente número de nêutrons eles são denominados isótopos. Os isótopos têm as mesmas características químicas, porém as diferenças entre suas propriedades físicas geram isótopos estáveis ou instáveis (IAEA, 2003).

O decaimento de um isótopo instável, denominado de radioisótopos, segue os princípios da Lei do Decaimento Radioativo proposta por Rutherford e Soddy (Equação 3.1) (IAEA, 2003).

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Em que:

N_t = número de átomos presentes após o tempo t

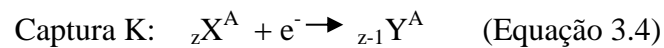
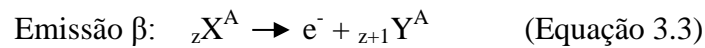
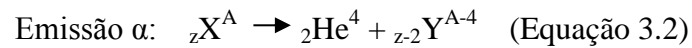
N_0 = número de átomos presentes no tempo $t = 0$

λ = constante de decaimento do radioisótopo

Os decaimentos radioativos podem ocorrer por meio de emissões de radiação alfa, beta e gama (radiação eletromagnética). O decaimento alfa emite uma partícula α , que é composta por dois prótons e dois nêutrons e corresponde ao núcleo de ^4He (Equação 3.2). O decaimento beta emite uma partícula β equivalente a um elétron (β^-) oriundo da instabilidade de um nêutron presente no núcleo de um radioisótopo (Equação 3.3). Nestes dois casos a emissão da partícula altera o número atômico e consequentemente forma-se um novo elemento. No decaimento por raios gama ocorre emissão de radiação eletromagnética de alta frequência e não de partícula. Em geral, a emissão de radiação gama é precedida por decaimentos que emitem partículas alfa ou beta (Dentith e Mudge, 2014).

A radiação gama também pode ser produzida durante o processo denominado captura de elétron (K). Neste processo um elétron é capturado pelo núcleo, onde ele se

funde a um próton, e conseqüentemente é gerado um nêutron. Um novo elemento é criado e ocorre a emissão de raio gama para que este isótopo alcance seu estado de equilíbrio energético (Equação 3.4) (Kearey et al., 2009).



Em que:

X = isótopo pai

Y = isótopo filho

Z = número de prótons

A= número atômico

Nos levantamentos gamaespectrométricos os principais elementos utilizados como fonte da radiação gama são o potássio (^{40}K), o urânio (^{238}U e ^{235}U) e o tório (^{232}Th). Durante seu decaimento, estes radioisótopos emitem radiação gama de alta intensidade, que permite a detecção dos mesmos. As concentrações na crosta do K variam de 2 a 2,5 %, a variação do U é de 2 a 3 ppm e a do Th é de 8 a 12 ppm (IAEA, 2003). Na figura 3.2 é apresentado um diagrama com as concentrações desses três radioelementos em diferentes tipos de rocha.

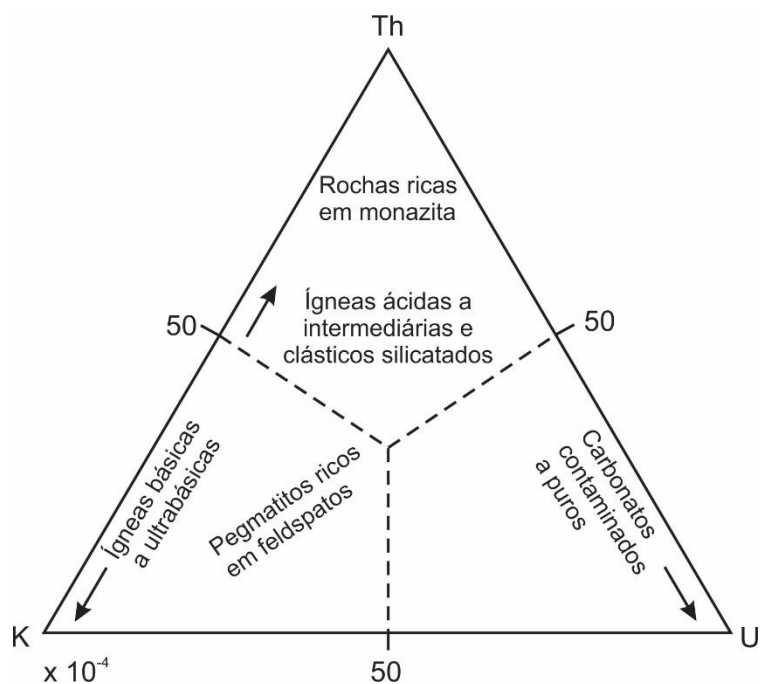


Figura 3.2: Abundâncias relativas dos radioelementos K, Th e U em diferentes tipos de rochas (Adaptado de Wollenberg, 1977).

A energia decorrente da emissão de raios gamas, durante uma série de decaimento, é representada na forma de um espectro de linhas, onde cada linha corresponde à energia emitida por um decaimento da série. Cada elemento possui um espectro de linhas e um fotopico característico, o que permite a diferenciação dos elementos pelo gamaespectrômetro. Na detecção de um radioelemento é determinada uma janela de monitoramento centrada no fotopico do espectro deste radioelemento. A janela de monitoramento do K está centrada em 1,46 MeV, a janela do U em 1,76 MeV e a do Th em 2,62 MeV (IAEA, 2003).

O Th e o U não emitem raios gamas durante o seu decaimento, e por isso são detectados por meio da emissão de raios gamas oriundas do decaimento de seus isótopos filhos. O fotopico mais energético da série de decaimento do Th é emitido pelo isótopo ^{208}Tl , enquanto o U é detectado pelo fotopico emitido pelo isótopo ^{214}Bi (Dickson and Scott, 1997). Na figura 3.3 estão representados os espectros de linhas dos radioelementos K, U e Th.

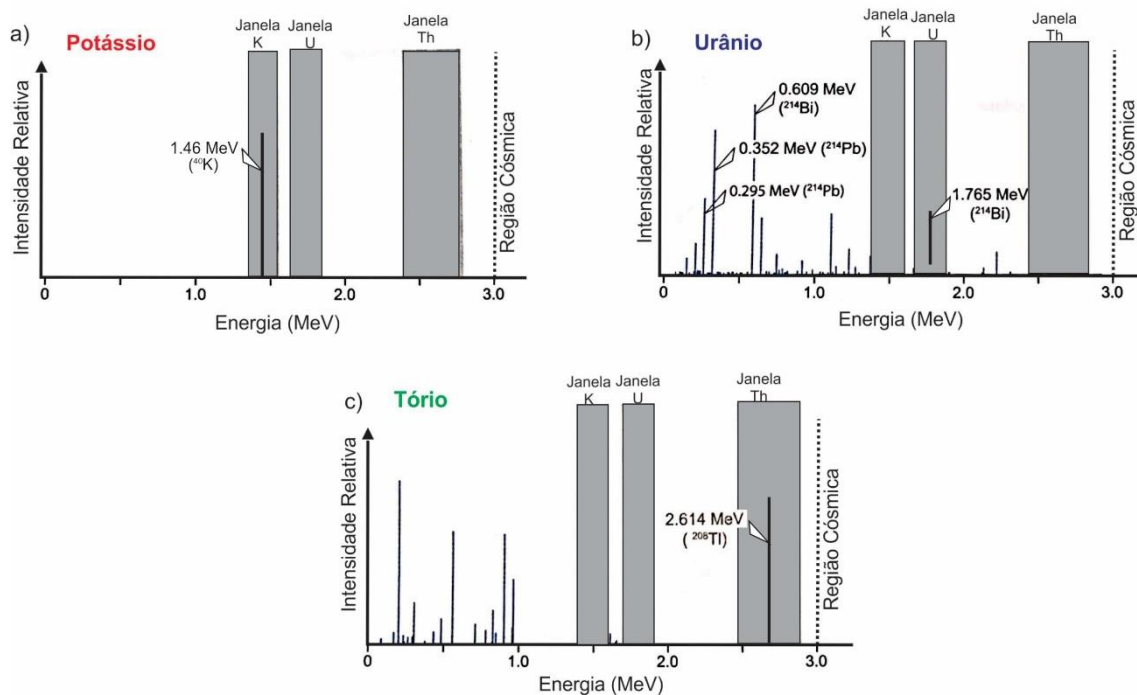


Figura 3.3: Representação dos espectros de linhas referentes à série de decaimento e as janelas de monitoramento dos radioelementos: a) Espectro de energia do ^{40}K ; b) Espectro de energia do ^{238}U (^{214}Bi); c) Espectro de energia do ^{232}Th (^{208}Tl) (Dentith and Mudge, 2014).

3.2 Metodologia

Para o desenvolvimento da metodologia empregada nesta dissertação foi realizada uma revisão bibliográfica para compreender o contexto geológico e metalogenético dos depósitos estudados e buscar novos produtos geofísicos que contemplem o contexto abordado. Os trabalhos estudados são classificados em dois grupos: i) os que abordam o contexto geológico de Goiás e ii) os que utilizam produtos geofísicos específicos para depósitos com características semelhantes aos existentes na área.

Entre os trabalhos mais relevantes para compreensão geológica estão os relatórios das folhas Cavalcante, Monte Alegre do Goiás e Nova Roma (mapeadas em convênio entre a UnB e a CPRM), o trabalho desenvolvido por D'el-Rey e Senna Filho (1998) e o trabalho de Botelho *et al.* (2006).

D'el-Rey e Senna Filho (1998) descreveram o controle estrutural da região da Mina de Cavalcante (GO), localizada no centro de uma zona de cisalhamento com direção ENE, e as rochas originadas pela ação de fluidos que contribuíram com o aumento nos conteúdos de ouro, platina e na formação de uma nova assembleia de minerais que marcam as bordas da zona de alteração hidrotermal. Esta zona de

cisalhamento se estende para nordeste abrangendo a área de estudo onde foram descritos por Botelho *et al.* (2006) os garimpos Cícero, Tucano, Morro dos Borges, Novo Horizonte, Córrego do Brejão e a mina Aurumina. Esses trabalhos foram essenciais para compreensão do comportamento estrutural e uma posterior correlação entre a cinemática vista em campo e a interpretada a partir de produtos magnéticos regionais.

Gunn e Dentith (1997) estudaram alguns tipos de depósitos minerais a partir de suas associações minerais magnéticas e apresentaram um guia de estudo fundamentado nas respostas magnéticas esperadas para cada tipo de depósito. Entre os tipos de depósitos apresentados neste guia, o mais relevante para esta dissertação é o depósito aurífero. Devido às baixas concentrações de ouro, os autores definem que a magnetometria se torna mais eficiente quando associada a outros métodos, especialmente a geoquímica. As informações magnéticas auxiliam no mapeamento estratigráfico, litológico e estrutural e na detecção de minerais magnéticos decorrentes de eventos associados à formação de depósitos auríferos. Os autores utilizaram o Cráton Yilgran (Austrália) para contextualizar a relevância de estruturas magnéticas na detecção de depósitos auríferos. Nesta região, a ocorrência está condicionada a uma estrutura regional demarcada nos produtos magnéticos. O segundo exemplo citado é o depósito aurífero North Orchin (Austrália), cuja formação da mineralização é resultado da ação de fluidos hidrotermais. Este depósito possui assinatura associada a uma anomalia positiva magnética de 100 nT. A mineralização neste exemplo é controlada por falhas.

Holden *et al.* (2012) destacaram a importância de dados aeromagnéticos, em estudos de terrenos granitos-*greenstone* com elevado número de depósitos de ouro orogênico, por fornecerem informações relevantes à compreensão do arcabouço estrutural da área. Os autores trabalharam com um método automático de extração de lineamentos magnéticos que auxiliaram na identificação de estruturas geológicas complexas. Nesta dissertação, assim como no trabalho citado, os dados aeromagnéticos foram utilizados para obter informações relevantes da estrutural da área e relacioná-las com os depósitos auríferos. A extração dos lineamentos foi realizada manualmente devido ao tamanho da área de estudo.

Após a extração dos lineamentos magnéticos, que atuam como indicador de estruturas geológicas, os autores analisaram a complexidade estrutural local a partir da densidade de intersecções entre falhas e a orientação de zonas de cisalhamento dúctil e

de falhas de menor ordem. As zonas de cisalhamento ou falhas funcionam como corredores para a passagem dos fluidos e sua direção e mergulho podem aumentar o espaço de percolação dos fluidos hidrotermais e, conseqüentemente, a possibilidade de formação das zonas de alteração hidrotermal. Os ambientes geologicamente favoráveis à formação de depósitos hidrotermais estão associados à mudança da assinatura magnética da rocha, que pode ser evidenciada nos produtos magnéticos. Os autores se basearam em depósitos arqueanos de ouro orogênico, mas ressaltaram que a técnica pode ser aplicada em outros tipos de depósitos.

Os dois trabalhos citados descrevem a importância do controle estrutural para a formação de depósitos auríferos e mostram que falhas e zonas de cisalhamento podem aparecer bem marcadas em produtos magnéticos regionais. Na área de estudo se destaca uma grande estrutura magnética regional, cuja direção é a mesma do alinhamento dos garimpos e, juntamente com outras estruturas menores, pode estar associada à formação dos depósitos. Nesta dissertação, será realizada a extração de lineamentos magnéticos e estimadas as profundidades das fontes magnéticas. As informações magnéticas também corroboram, em uma escala regional, com padrões estruturais e cinemáticos vistos em campo.

Embora os produtos magnéticos acrescentem muitas informações relevantes, eles não são suficientes para atingir o objetivo do estudo e, portanto, foram utilizados produtos gamaespectrométricos para complementar a pesquisa.

Shives *et al.* (2000) exemplificaram a importância de dados gamaespectrométricos na complementação de dados magnéticos durante o estudo de depósitos descrevendo os depósitos Pilley's Island, Lou Lake, Mt. Milligan e Casino, todos localizados no Canadá. Os autores utilizaram as razões entre K/eTh e eU/eTh para destacar estes depósitos, e concluíram que o potássio é o radioelemento que melhor auxilia na identificação das ocorrências. O depósito de Lou Lake é do tipo polimetálico hidrotermal e foi descoberto a partir de levantamentos gamaespectrométrico e magnético. A pesquisa revelou diversas ocorrências minerais (Au-Co-Cu-Bi-W-As) distribuídas dentro de um contexto de um grande sistema hidrotermal polimetálico enriquecido em potássio e ferro. A anomalia de potássio coincidiu com uma anomalia magnética com um pico de intensidade que excede 2000 nT. No depósito de Mt. Milligan, as anomalias aparecem mais destacadas no produto concentração do potássio do que na assinatura magnética regional.

Os depósitos estudados nesta dissertação apresentam influências de fluidos hidrotermais, e podem apresentar resposta em produtos gamaespectrométricos que discriminam principalmente halos de alteração potássica. Pires (1995) utilizou, pela primeira vez em território brasileiro, uma metodologia para identificar áreas submetidas à ação de processos hidrotermais por meio da análise da concentração de potássio, urânio e tório. A metodologia foi aplicada nos *greenstone belts* Crixás (GO) e Guarinos (GO) para o estudo de acumulação secundária de potássio e de urânio. Para retirar os efeitos causados pelas contribuições primárias (litologia, tipo de solo, condição ambiental), foi realizada a normalização da concentração de potássio e de urânio em relação à de tório. Estas normalizações geraram os produtos denominados de potássio anômalo (K_d) e urânio anômalo (U_d) (Saunders *et al.* 1987). A partir da análise destes produtos foi observado que jazimentos, principalmente de ouro, estão associados às concentrações anômalas de potássio.

Na Província Juruena Teles Pires (MT), Ferreira *et al.* (2008) utilizaram o método aerogamaespectrométrico para identificar possíveis depósitos auríferos de formação hidrotermal. Além do K_d e do U_d , foi utilizado o Parâmetro F (Efimov, 1978), que consiste na normalização simultânea das concentrações de potássio e de urânio pelos valores do tório. A fim de minimizar os efeitos de acumulação primária, cada litologia foi estudada individualmente, e a partir das suas estatísticas (média e desvio padrão) foram determinados os valores de K_d , U_d e Parâmetro F considerados anômalos. Este trabalho determinou áreas potenciais para acúmulo de ouro na Província Juruena Teles Pires utilizando o padrão geofísico de garimpos conhecidos na região.

Os trabalhos citados ressaltaram a importância de correlacionar os radioelementos K, Th e U entre si, destacando que na formação de depósitos hidrotermais é comum utilizar a concentração de Th como valor normalizador. Devido ao sucesso do uso destas relações, os produtos K_d , U_d e Parâmetro F serão utilizados nesta dissertação. Para diminuir a influência das acumulações primárias dos radioelementos K e U, a área foi dividida em domínios gamaespectrométricos para os quais os produtos K_d e U_d foram gerados individualmente.

Knox-Robinson (2000) estudou fatores relevantes para a formação de depósitos auríferos em Kalgoorlie Terrane (Austrália) e empregou a Lógica Booleana, a Lógica Fuzzy e o Método Algébrico de Combinações para gerar mapas de favorabilidade mineral. Estas técnicas foram aplicadas para correlacionar fatores que apresentavam

relações espaciais com os depósitos conhecidos na região. Os depósitos de ouro orogênico são predominantemente controlados por estruturas, e por isso o número de estruturas geológicas e o seu comportamento são elementos relevantes no estudo das mineralizações. O autor descreve que os fatores importantes para a formação aurífera são: i) uma fonte de energia que conduza o fluido mineralizado para dentro do sistema mineral, ii) canais para o fluxo do fluido, e iii) um local onde o fluido possa se depositar. Para gerar os mapas de favorabilidade de Kalgoorlie Terrane, o autor considerou a litologia, a proximidade com contatos geológicos e falhas crustais.

Campos (2016) estudou as mineralizações auríferas hidrotermais Cascavel e Tinteiro, localizadas no *Greenstone Belt* de Faina (GO). Assim como no trabalho de Knox-Robinson (2000), Campos (2016) aplicou a Lógica *Fuzzy* para gerar mapas de favorabilidade aurífera. Entretanto, em sua pesquisa foram utilizados dados de naturezas distintas, incluindo dados geoquímicos, geofísicos e geológicos. Na formulação destes mapas foram empregados produtos magnéticos e gamaespectrométricos, análises geoquímicas oriundas de testemunho (Au, Ag, Cu, Fe, Co, Mn, Li) e informações geológicas.

Com base no estudo dos métodos de integração, a Lógica *Fuzzy* será utilizada nesta dissertação para associar dados relevantes na formação de um depósito aurífero. Os fatores empregados serão: i) análise de enriquecimento relativo de potássio e urânio e ii) estruturas magnéticas que podem estar associadas às estruturas controladoras das zonas mineralizadas.

Capítulo 4 - Processamento e Natureza dos Dados

4.1 Dados aéreos

Os dados aerogeofísicos utilizados nesta dissertação resultam de dois aerolevantamentos: i) o Paleo-Neoproterozoico do Nordeste de Goiás; e ii) o Complemento do Tocantins.

O levantamento Paleo-Neoproterozoico do Nordeste do Goiás foi realizado entre os dias 01/05/2006 e 01/09/2006 pela empresa Lasa Engenharia e Prospecções. Estes dados são provenientes do convênio entre o Estado de Goiás, representado pelas Secretaria de Indústria e Comércio (SIC) e Secretaria de Geologia e Mineração (SGM), e no âmbito do Governo Federal, pelo Ministério de Minas e Energia, representado pela Secretária de Geologia e Transformação Mineral com participação da CPRM. O levantamento apresenta linhas de voos na direção N-S, com espaçamento de 0,5 km entre elas, e linhas de controle na direção E-W com espaçamento de 5 km. O voo foi realizado a uma altura média de 100 metros (Lasa Engenharia e Prospecções, 2006).

O Complemento do Tocantins também foi realizado pela empresa Lasa Engenharia e Prospecções no período de 06/12/2006 a 12/01/2007. Este aerolevantamento apresenta a mesma direção e espaçamento das linhas de voo do levantamento Paleo-Neoproterozoico do Nordeste do Goiás. As linhas de controle apresentam direção E-W e estão espaçadas em 10 km. A altura média do voo foi de 100m (Lasa engenharia e Prospecções, 2007).

Os dados provenientes desses aerolevantamentos são de alta densidade, suas aquisições apresentam intervalo de 0,1 s entre as medições consecutivas do magnetômetro e de 1,0 s entre as medições do gamaespectrômetro (Lasa engenharia e Prospecções, 2007, 2006).

4.2 Pré-processamento

Esta etapa consiste na análise e organização dos bancos de dados. Seu caráter é de alta relevância, pois nesta fase os dados são avaliados quanto à sua consistência. Caso algum dado seja considerado inapropriado é possível corrigi-lo e, conseqüentemente, os produtos gerados serão mais consistentes.

4.2.1 Junção dos bancos de dados

A área de trabalho está localizada em uma região cujos dados aerogeofísicos foram adquiridos em dois aerolevantamentos distintos, como apresentado no item 1.1. A primeira etapa do pré-processamento consistiu na junção dos bancos de dados.

A junção dos bancos de dados foi realizada a partir do *software Oasis Montaj* por meio da ferramenta *Grid Knitting*. Esta ferramenta possibilitou gerar uma malha uniforme do Campo Magnético Anômalo (CMA). O objetivo era produzir uma malha com excelente nivelamento entre os dados dos dois aerolevantamentos, no qual não fosse possível identificar a área de intersecção. Como esse resultado foi alcançado para os dados magnéticos, nenhum outro procedimento foi aplicado. Entretanto, nas malhas gamaespectrométricas a área de intersecção ficou evidente. Isto ocorre devido à maior sensibilidade da resposta gamaespectrométrica em relação à variação de sazonalidade e modelos de aeronaves utilizados durante a aquisição. A junção dos dados gamaespectrométricos foi feita separadamente para cada canal de radioelemento.

Para corrigir as diferenças causadas pelas variações de equipamento e de sazonalidade, uma pequena área de intersecção entre as malhas foi recortada dos dois projetos e analisada separadamente. Como a região é a mesma em ambas as malhas, espera-se que as respostas gamaespectrométricas sejam iguais, porém isso não ocorreu devido às variações citadas anteriormente. A partir desta área de intersecção foi estabelecida uma equação de regressão linear para nivelar os seus valores, determinando uma resposta única para esta área. Por abranger uma porção maior da área de estudo, o levantamento Paleo-Neoproterozoico do nordeste do Goiás foi utilizado como padrão para a definição dessa equação, que foi aplicada para os dados do levantamento Complemento do Tocantins. A figura 4.1 mostra as malhas antes e o depois da aplicação da técnica e ressalta a área de intersecção.

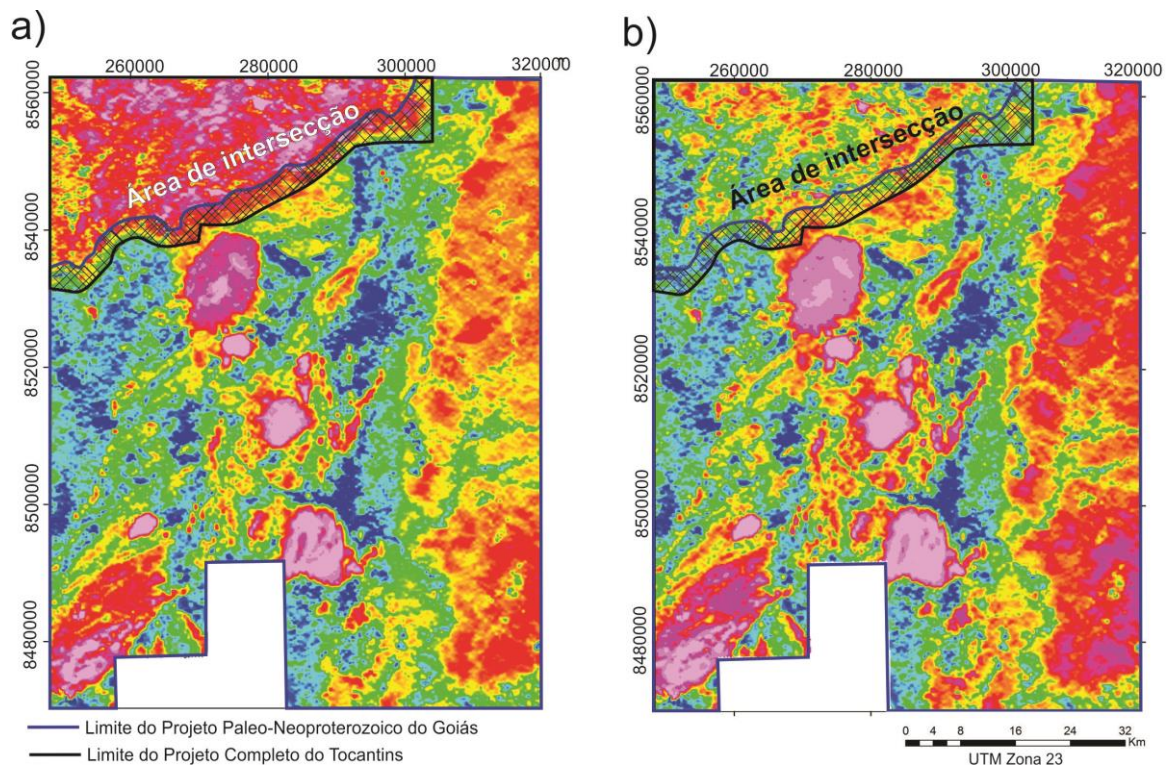


Figura 4.1: a) Malha da concentração de tório antes da correção de nivelamento; b) Malha da concentração de tório depois do nivelamento dos dados.

4.2.2 Correção dos valores negativos

A segunda etapa do pré-processamento foi a verificação da consistência dos valores presentes no banco de dados gamaespectrométricos relativo aos dois aerolevantamentos. De posse de um banco de dados unificado, foram analisadas as médias, os valores mínimos e os valores máximos de concentração do K, eTh e eU.

A partir desta análise foi observado que os três canais possuíam valores negativos, o que não é compatível com o comportamento físico possível para uma fonte de radiação. A maior parte dos valores negativos presentes nos canais de tório e de potássio está localizada em regiões próximas a drenagens. Desta forma, optou-se por substituir os valores negativos pela constante 0,001, por ser muito baixo este valor não altera a média dos dados. No canal do urânio, os valores negativos apresentaram uma maior dispersão espacial na área, resultado do caráter ruidoso do canal. Para a retirada destes valores foram utilizados três intervalos de substituição, sem que nenhum deles interferisse no valor da média do canal. Os intervalos foram: i) $x < -1 = 0,001$; ii) $-1 < x > -0,5 = 0,002$; e iii) $-0,5 < x > 0 = 0,003$. A adoção de três intervalos evitou a perda de suavidade das feições nas regiões com baixos valores de concentração de urânio.

4.3 Processamento dos dados magnéticos

Após realizar a junção dos bancos dos dois aerolevantamentos que recobrem a área, os dados magnéticos foram processados. Inicialmente, foram criados os produtos Campo Magnético Anômalo (CMA), Derivada Vertical (Dz), Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e Inclinação do Sinal Analítico (ISA).

Estes produtos foram gerados por meio do *software Oasis Montaj* a partir do interpolador bi-direcional, com células de interpolação de 125 x 125 metros. A primeira malha originada foi o Campo Magnético Anômalo (CMA) correspondente ao campo magnético reduzido do IGRF (Figura 4.2a).

O segundo produto gerado foi a Derivada Vertical (Dz) do CMA (Figura 4.2b). Este produto foi essencial para a interpretação magnética da área, pois ressalta as feições magnéticas lineares.

Em seguida, foi criada a malha da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) (Figura 4.2c). Resultado da combinação dos gradientes horizontais e vertical do CMA, este produto promove a centralização da anomalia magnética. Por fim, foi originada a Inclinação do Sinal Analítico (ISA) (Figura 4.2d), que equaliza as respostas das feições magnéticas (Ferreira *et al.*, 2010).

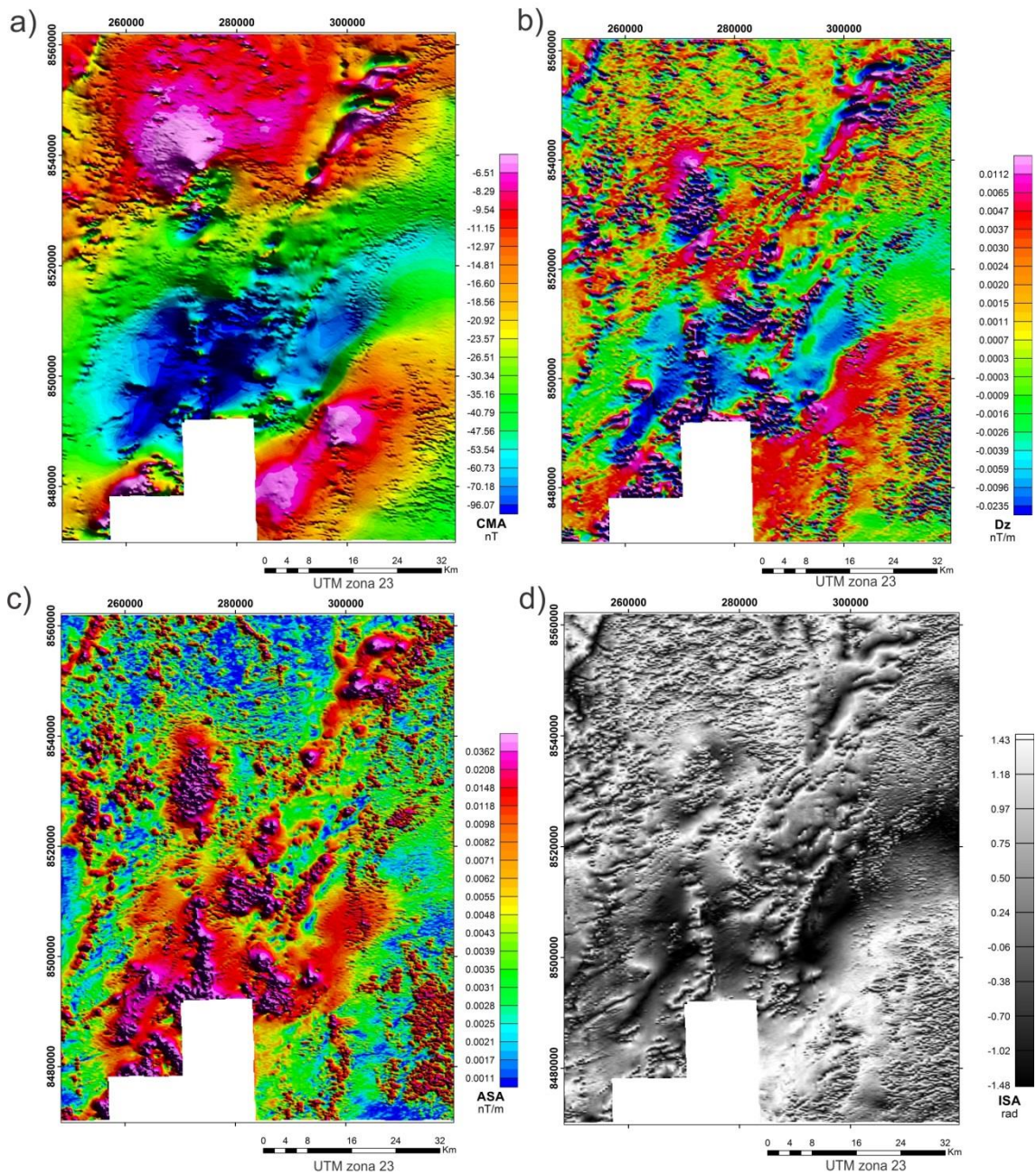


Figura 4.2: Produtos magnéticos: a) Campo Magnético Anômalo; b) Derivada Vertical (Dz); c) Amplitude do Sinal Analítico (ASA); d) Inclinação do Sinal Analítico (ISA).

4.3.1 Deconvolução de Euler

A Deconvolução de Euler é uma técnica que utiliza as derivadas do Campo Magnético Anômalo para estudar a geometria das fontes magnéticas localizadas em subsuperfície. Esta técnica tem sido muito aplicada na interpretação de dados aeromagnéticos, pois não requer um conhecimento prévio da direção de magnetização das fontes e não assume um modelo de interpretação particular (Barbosa *et al.*, 1999).

O processo assume que o campo magnético é homogêneo e obedece a equação diferencial de Euler:

$$(x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = N(B - T) \text{ (Equação 4. 1)}$$

Em que:

T = campo magnético total no ponto (x,y,z)

N = índice estrutural

B = valor regional do campo

x, y, z = posição onde o campo magnético total está sendo medido

x₀, y₀, z₀ = posição da fonte magnética

O produto Deconvolução de Euler foi gerado no *software Oasis Montaj* (versão 9.0), com a escolha dos parâmetros índice estrutural, tamanho da janela e tolerância máxima.

O índice estrutural (SI) é um parâmetro que está relacionado com a geologia e fornece informação da geometria do corpo que causa a anomalia magnética. Seu valor varia de acordo com as dimensões do corpo, adquirindo valor igual a 0 para estruturas planares, valor igual a 1 para estruturas lineares, valor 2 para corpos bidimensionais e valor 3 para corpos tridimensionais (Reid *et al.*, 1990).

Se este índice não for escolhido adequadamente, soluções difusas com problemas na estimativa de profundidade poderão ser criadas, o que se agrava se houver interferência de uma anomalia na outra (Hsu, 2002). Caso o valor do índice estrutural seja menor do que o adequado, as profundidades podem ser subestimadas, caso seja maior, as profundidades podem ser superestimadas (Reid *et al.*, 1990).

Como o objetivo da Deconvolução de Euler para este trabalho é realçar as estruturas lineares magnéticas da área, permitindo melhor compreensão das profundidades e do comportamento destas fontes, o valor do índice escolhido foi igual a 1.

O tamanho da célula da malha deve ser o maior possível desde que isso não altere a consistência dos dados. Uma interpolação com células muito pequenas, além de não acrescentar informações relevantes, ocasiona um aumento no tempo de processamento dos dados e subestima a confiabilidade das soluções. Tal fato foi

comprovado pelas formulações de Thompson (1982) e Reid *et al.* (1990). O problema surge porque os cálculos de limites de erro assumem que todos os valores dos dados em uma janela são estimativas independentes não correlacionadas com nenhuma covariância cruzada. Isto normalmente não é verdade para malhas bem amostradas, portanto essas incertezas são quase sempre subestimadas (Reid *et al.*, 2014).

Na tentativa de escolher o tamanho de célula mais adequado para a interpolação da malha, ou seja, que não diminuísse a consistência dos dados ou subestimasse a confiabilidade das soluções, foram comparadas as soluções geradas para o CMA com célula de 125, 250 e 500 metros. A célula escolhida foi a de 250 metros, pois a malha de 500 metros apresentou uma perda significativa de informações do Campo Magnético Anômalo, e a malha com célula de 125 metros mostrou muitas soluções espúrias que mascararam as fontes reais.

A escolha do tamanho da janela está relacionada com as soluções numéricas estáveis e de alta resolução, bem como com a profundidade de investigação adequada. O tamanho ideal de janela é aquele que engloba uma única fonte magnética, diminuindo assim a interferência das demais anomalias e, conseqüentemente melhorando a resolução espacial. Embora uma janela menor incremente a resolução espacial, é necessário que ela seja significativamente maior do que o espaçamento das linhas de voo, medindo ao menos duas vezes mais que o mesmo (Reid *et al.* 2014). Nos parâmetros de entrada da Deconvolução de Euler, o tamanho da janela corresponde à quantidade de células da malha. Para este processamento, optou-se por utilizar um tamanho de janela igual a 15.

A tolerância máxima é um valor em porcentagem que determina as soluções que serão aceitas a partir da estimativa de erro. Neste produto foi utilizado o valor de 15 %, ou seja, soluções que apresentam erros maiores do que este valor serão descartadas. A tolerância é diretamente proporcional ao número de soluções apresentadas, e o grau de confiabilidade do resultado aumenta conforme a o percentual da tolerância diminui. Após vários testes, a escolha deste parâmetro foi feita com base no equilíbrio entre o número de soluções e a confiabilidade das mesmas.

O produto Deconvolução de Euler utilizando os parâmetros mencionados acima está representado na figura 4.3b.

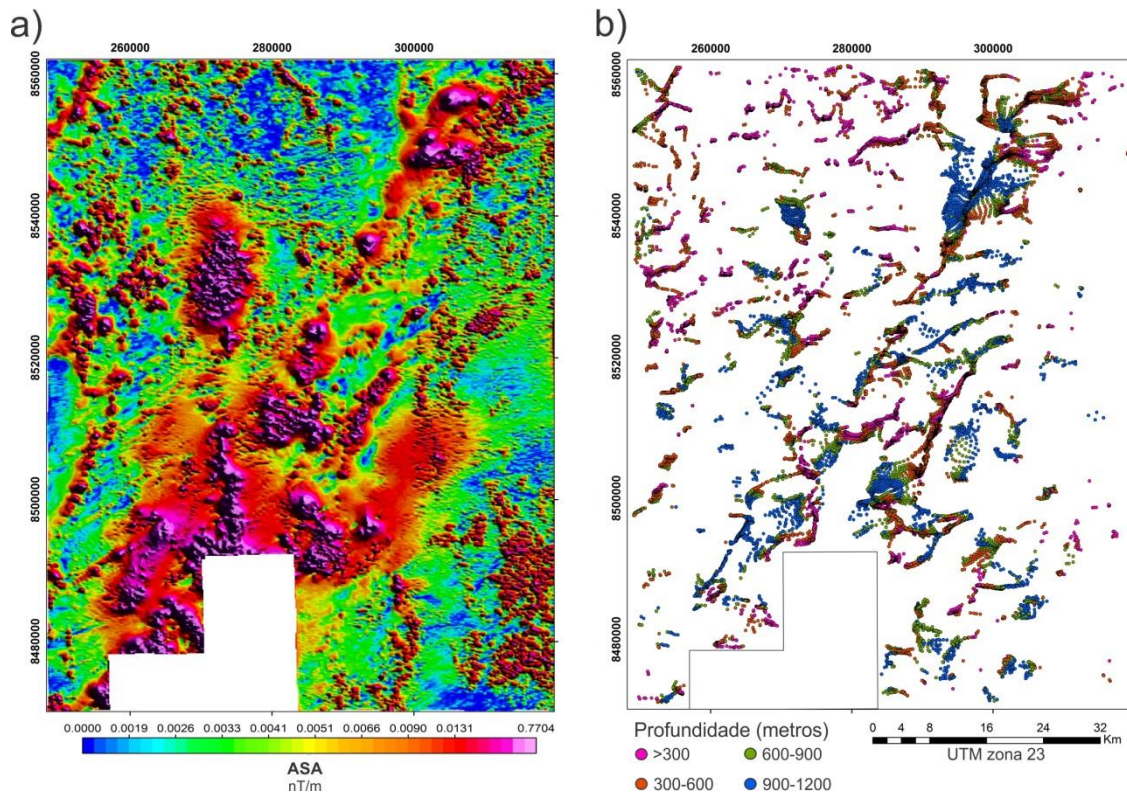


Figura 4.3: a) Amplitude do sinal analítico (ASA); b) resultado da Deconvolução de Euler: índice estrutural = 1, janela = 15 e tolerância máxima = 15%.

4.3.2 Matched Filtering

O *Matched Filtering* é uma técnica que propicia a modelagem de camadas fictícias abaixo da superfície a partir de fontes de magnetização equivalente. Estas fontes equivalentes são classificadas em profundas, intermediárias e rasas.

Spector e Grant (1970) foram os primeiros a propor a identificação das camadas magnéticas a partir da inclinação do espectro de potência. Os autores demonstraram que fontes de origens equivalentes possuem diferentes respostas magnéticas quando apresentam profundidades distintas. Assim, em um gráfico logarítmico, cada inclinação do espectro de potência radial corresponde a uma camada composta por um conjunto de fontes com profundidades semelhantes.

O termo *Matched Filtering* foi introduzindo por Syberg (1972), que propôs este filtro para os domínios do espaço e da frequência. O uso deste filtro permite a divisão do Campo Magnético Anômalo em bandas de frequência correspondentes às principais profundidades médias das fontes observadas.

O espectro radial de potência é gerado para cada célula e é aplicado para estimar a profundidade do topo e da base das camadas magnéticas das células (Guimarães *et al.*, 2014).

Nesta dissertação, foi aplicado o algoritmo do *Matched filtering* desenvolvido por Phillips (2001) e disponível no *site* da USGS. Esta extensão foi utilizada no *software Oasis Montaj* para estimar as profundidades das camadas por meio da aplicação de dois modelos: *dipole layer* ou *half-space magnetic* (Figura 4.4).

Neste estudo os dois modelos foram aplicados para estimar as profundidades das camadas. Para a camada mais rasa, que apresenta caráter muito ruidoso, foi utilizado o modelo *dipole layer*, enquanto que para as demais camadas foi utilizado o modelo *half-space magnetic*. Conforme Phillips (2007), as inclinações foram traçadas no espectro de potência da direita para a esquerda, ou seja, das camadas mais rasas para as mais profundas.

A reta que se ajusta aos maiores números de onda está relacionada com os ruídos de superfície de alta frequência. Geralmente esses valores são descartados do espectro, gerando um espectro residual dos demais números de onda. A reta que se ajusta aos maiores números de onda do espectro residual determina o topo da camada que contém as fontes rasas. O ajuste continua para as camadas sucessivamente mais profundas, até que o segmento mais íngreme, que representa a camada mais profunda, seja definido (Guimarães *et al.*, 2014).

A figura 4.4 mostra que o modelo interpretado é composto por três camadas com contraste em suas propriedades magnéticas. A quarta camada é descartada por apresentar caráter ruidoso. A análise do espectro de potência mostra que o coeficiente angular das retas é diretamente proporcional às profundidade das fontes.

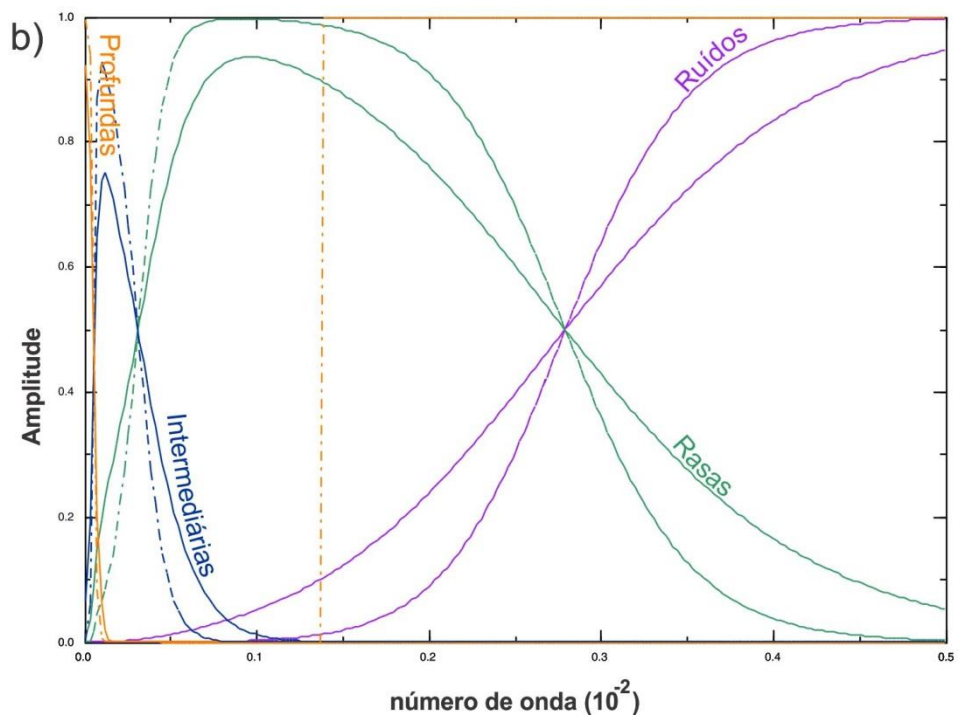
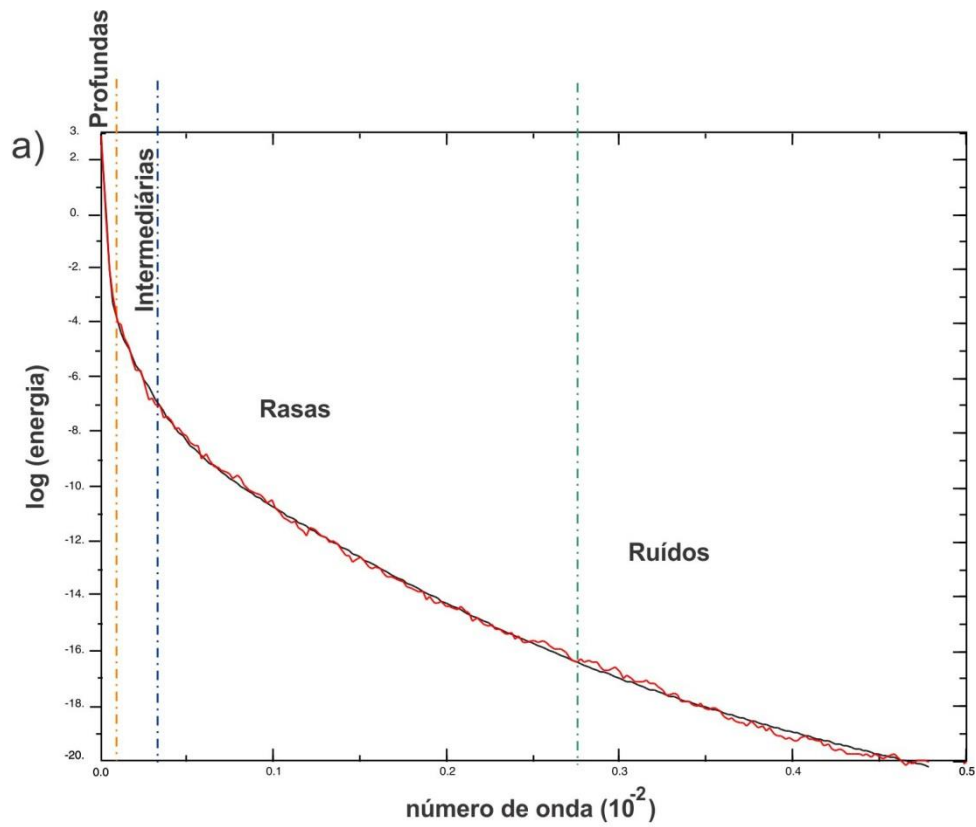


Figura 4.4: a) O espectro radial de potência (vermelho) e o espectro de potência gerado pelo *Matched Filtering* (preto); b) Filtros passa-banda determinados a partir da inclinação do espectro radial de potência.

As inclinações do espectro permitiram a criação de filtros passa-banda utilizados para decompor o Campo Magnético Anômalo (CMA). Foram gerados três produtos constituídos por fontes com intervalos de profundidades distintos (Figura 4.5).

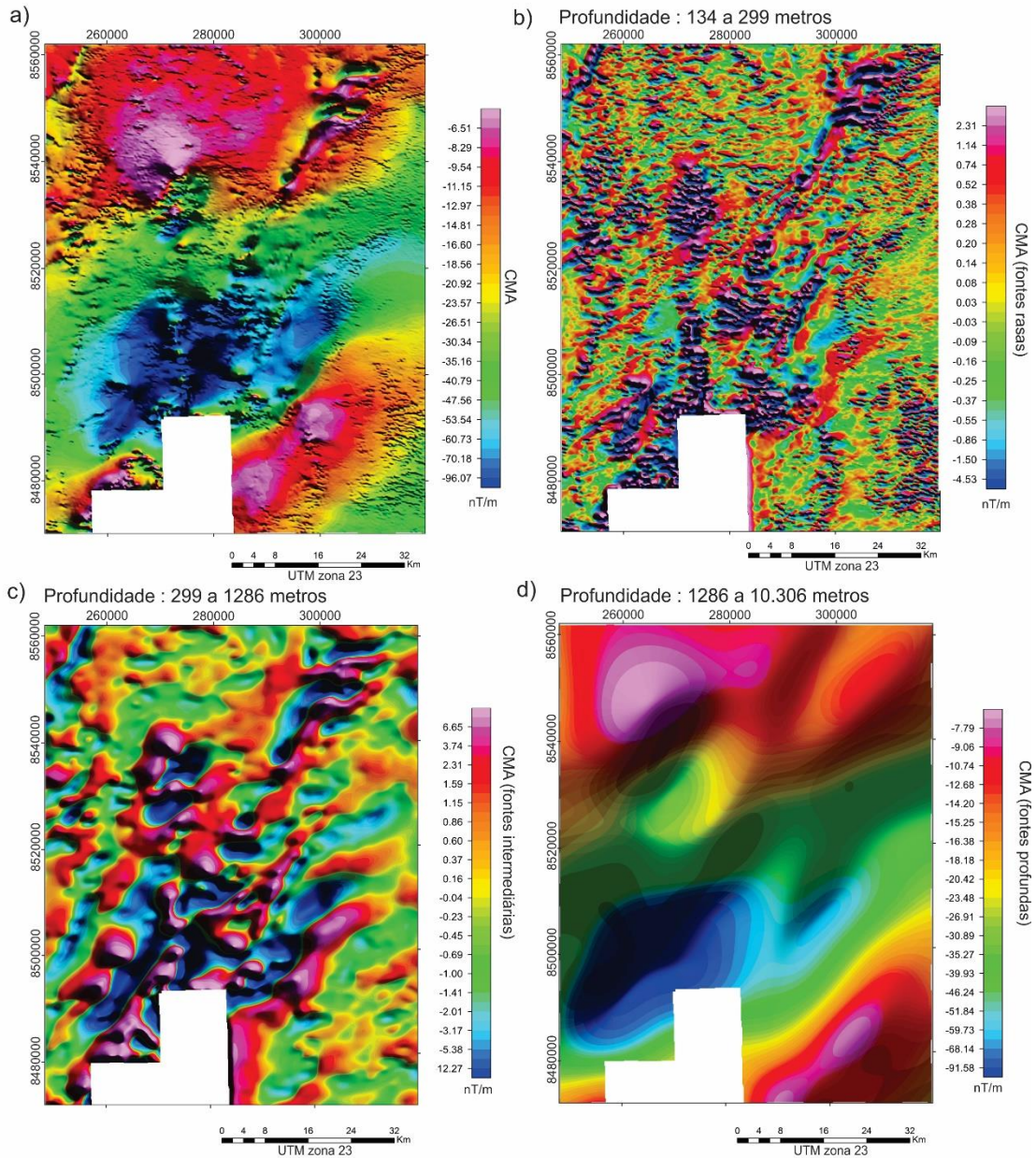


Figura 4.5: Produtos gerados a partir do método *Matched Filtering*. a) CMA original; b) Produto referente às fontes com profundidades de 134 a 299 m; c) Produto referente às fontes com profundidades de 299 a 1286 m; d) Produto referente às fontes com 1286 a 10306 m de profundidade.

4.3.3 Inversão de vetor de Magnetização (MVI)

A técnica de inversão do vetor de magnetização (MVI) consiste na criação de um modelo 3D para estudo de fontes magnéticas em subsuperfície, cujos dipolos

magnéticos estão alinhados de acordo com o campo geomagnético da Terra. Na ausência deste campo, os dipolos se orientam de maneira aleatória, enquanto que na sua presença apresentam um comportamento mais ordenado (Figura 4.6). As características do campo magnético que alteram a ordem desses dipolos são indução, remanescência, anisotropia, desmagnetização e outras (Telford et al., 1990). Portanto, estes fatores devem ser considerados na criação do modelo. Em geral, os *softwares* convencionais apresentam funções que realizam a inversão de susceptibilidade sem considerar estes fatores e assumem que os domínios magnéticos sempre estão orientados paralelamente ao campo, o que não é verdadeiro (Barbosa e Pereira, 2013).

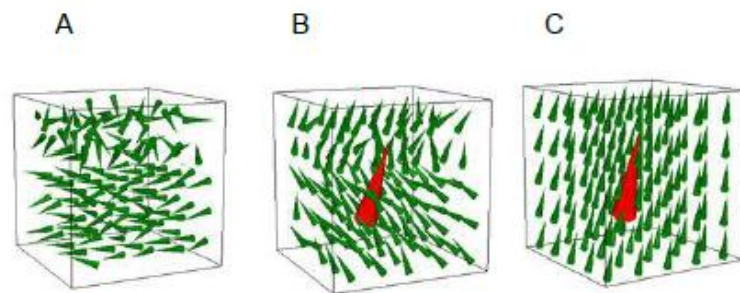


Figura 4.6: Representação esquemática de a) Dipolos dispostos aleatoriamente na ausência de campo magnético; b) Dipolos semi-alinhados na presença de um campo magnético (cone vermelho); c) Dipolos totalmente orientados na presença do campo magnético (Barbosa e Pereira, 2013).

O campo magnético \mathbf{B} é calculado pela equação 4.2 (Ellis *et al.* 2012):

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}_j) = \nabla \int_V \mathbf{M}(\mathbf{r}) \cdot \nabla \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|} d\mathbf{r}^3 \quad (\text{Equação 4.2})$$

Em que:

$\mathbf{M}(\mathbf{r})$ = magnetização

\mathbf{r}_j = ponto em que o campo está sendo calculado

V = volume contendo a magnetização

\mathbf{r} = ponto em que a magnetização está sendo medida

A equação 4.2 mostra que o vetor de magnetização é o parâmetro natural para a inversão (Ellis *et al.*, 2012). Desta forma, a formulação do problema direto para o campo magnético \mathbf{B} nos pontos \mathbf{r}_j ($j=1, \dots, M$) pode ser simplificada como:

$$B = GM(r) \quad (\text{Equação 4.3})$$

Enquanto no problema direto calcula-se \mathbf{B} a partir da magnetização $M(r)$, no problema inverso define-se a magnetização $M(r)$ a partir do campo \mathbf{B} (Zdhanov, 2002).

O MVI consiste na solução de um problema inverso, no qual calculamos a susceptibilidade magnética (parâmetro físico) a partir de dados obtidos (campo magnético anômalo). A representação esquemática de problema inverso e direto é apresentada na figura 4.7.

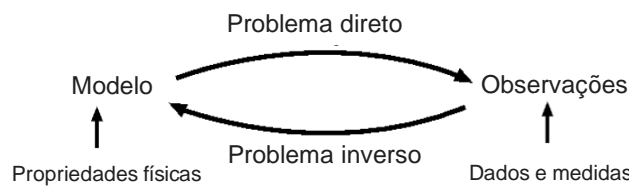


Figura 4.7: Representação esquemática do problema inverso e direto (Barbosa and Pereira, 2013).

O avanço computacional permitiu a implementação de algoritmos de inversão de dados magnéticos para gerar modelos de *voxel* 3D, ampliando seu uso na interpretação geofísica. O modelo mais comum de inversão de dados magnéticos gera o parâmetro susceptibilidade magnética, que mostra uma forte correlação com o campo induzido, limitando seu uso em caso de remanescência, desmagnetização e regiões situadas em baixas latitudes. Com o intuito de suprir essas limitações, a técnica MVI considera estes fatores durante o cálculo de amplitude e direção dos dipolos (Aisengart, 2013).

Ao invés de fornecer a susceptibilidade magnética, a técnica MVI fornece a contribuição do campo magnético induzido e remanescente em forma de vetores. Os três vetores escalares mais importantes são denominados de amplitude do vetor de magnetização, vetor projetado e vetor perpendicular, sendo os dois últimos relacionados com as componentes do campo magnético da Terra. Como demonstrado na equação 4.3, o vetor escalar mais significativo é a amplitude do vetor de magnetização, que é independente de quaisquer suposições relativas ao campo da Terra. O vetor perpendicular, que representa a amplitude de magnetização das componentes do campo magnético perpendicular ao campo da Terra, é um indicador aproximado de magnetização não induzida (Ellis *et al.*, 2012).

O modelo gerado pelo MVI apresenta grande correlação com a Amplitude do Sinal Analítico (ASA), produto 2D que é utilizado como uma alternativa a redução ao polo em regiões de baixa latitudes. Essa substituição ocorre devido aos resultados ambíguos gerados pela aplicação da redução ao polo em baixas latitudes, e por isso o produto ASA é um dos temas mais utilizados nestas regiões (Macleod *et al.*, 1993). A técnica MVI foi utilizada para gerar o *voxel* 3D da susceptibilidade magnética (Figura 4.8).

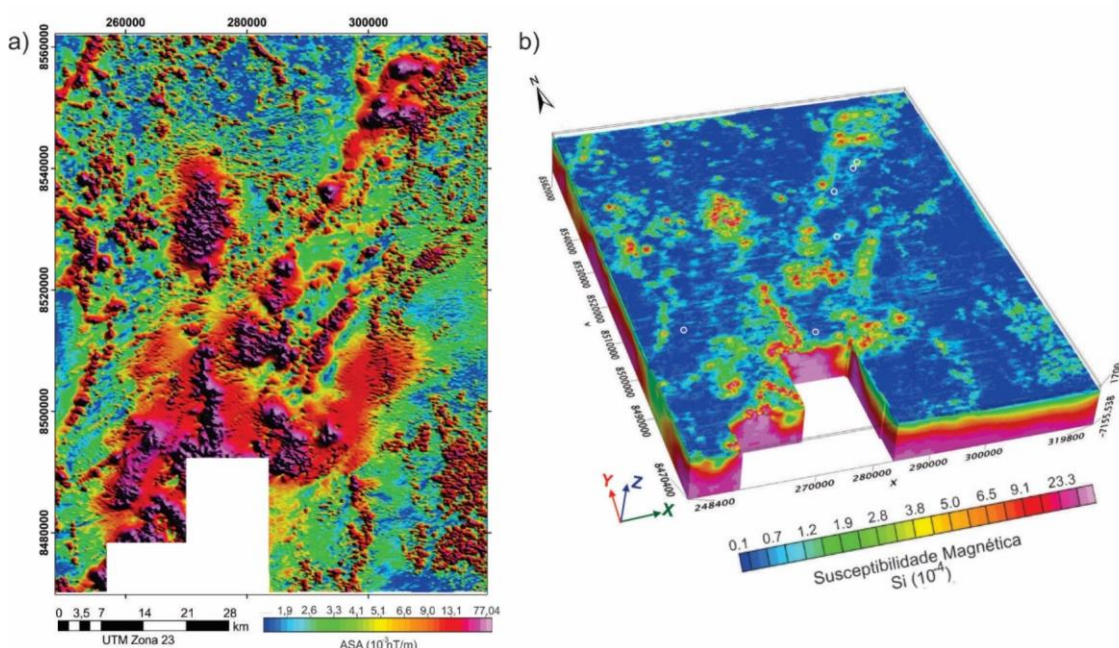


Figura 4.8: Comparação entre o produto 2D (ASA) e o produto 3D (MVI), onde: a) Imagem da Amplitude do Sinal Analítico (ASA); b) Modelo gerado pela inversão do vetor magnético (MVI).

4.4 Processamento dos dados gamaespectrométricos

Assim como os dados magnéticos, os dados gamaespectrométricos foram processados no *software Oasis Montaj*. Os principais produtos gamaespectrométricos foram as concentrações dos radioelementos: tório (eTh; Figura 4.9a), potássio (K; Figura 4.9b) e urânio (U; Figura 4.9c); e a imagem ternária RGB gerada a partir da combinação destes três elementos (Figura 4.9d).

Para gerar as malhas das concentrações dos três radioelementos foi utilizado o interpolador mínima curvatura e células de interpolação de 125 x 125 metros.

A imagem RGB é uma composição ternária em que o padrão da exibição é composto pelas concentrações de potássio, tório e urânio associadas, respectivamente, aos canais vermelho, verde e azul.

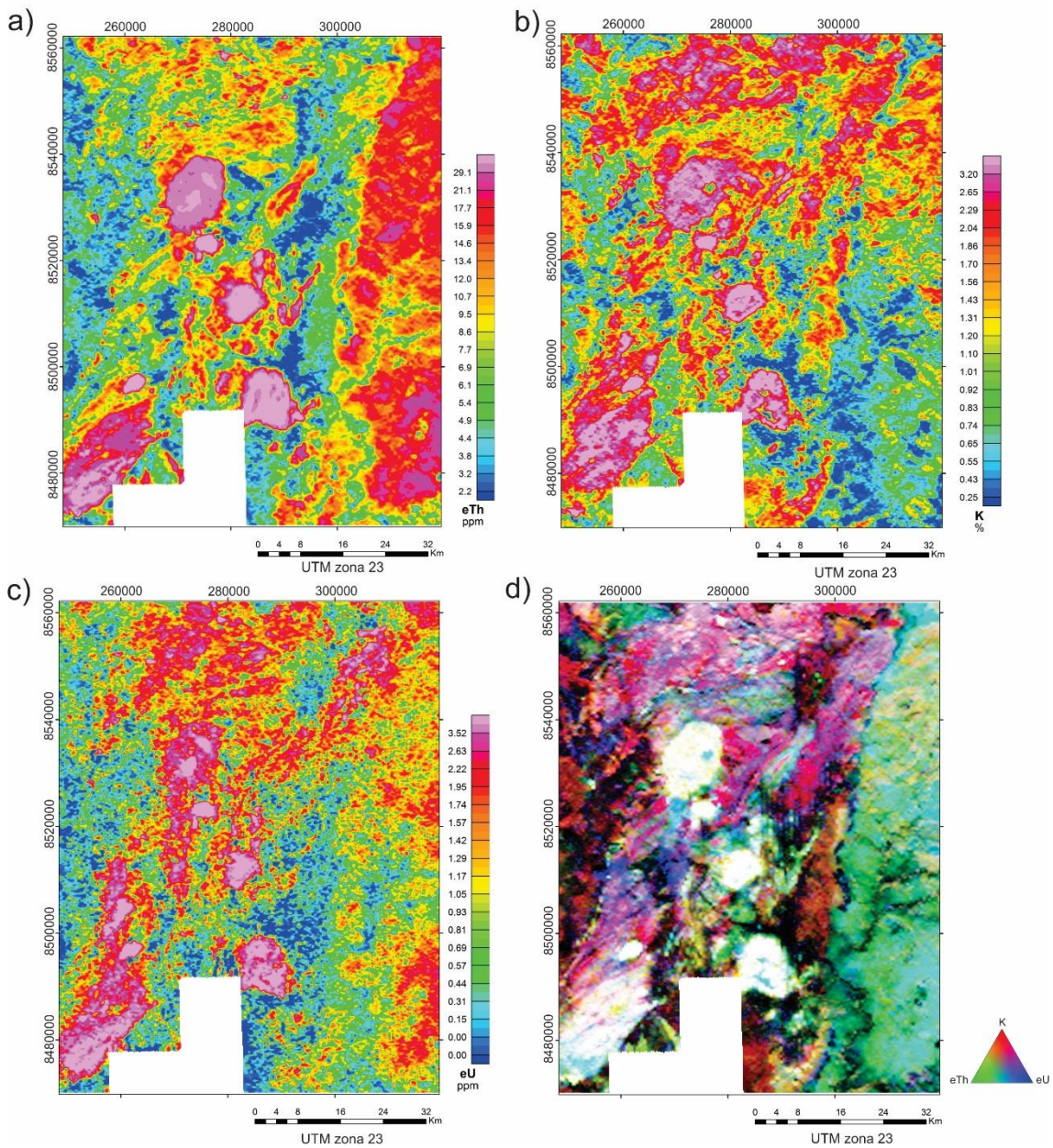


Figura 4.9: Produtos gamaespectrométricos: a) Concentração do Tório (ppm); b) Concentração do Potássio (%); c) Concentração do Urânio (ppm); d) Imagem da composição ternária RGB (K/eTh/eU).

4.4.1 Parâmetro F

O Parâmetro F foi descrito por Efimov (1978 *apud* Gnojek e Prichystal, 1985) com o intuito de correlacionar os radioelementos K, Th e U. O produto aborda duas importantes características das rochas: i) a abundância do potássio em relação à razão

tório e urânio; e ii) a abundância do urânio em relação à razão tório e potássio(Equação 4.5)

$$F = \frac{K.U}{Th} = \frac{K}{Th/U} = \frac{U}{Th/K} \quad (\text{Equação 4.3})$$

Esta relação é amplamente utilizada em estudos de ambientes geológicos relacionados com mineralizações auríferas de origem hidrotermal, pois o enriquecimento de potássio pode indicar a presença de alterações potássicas ou fílicas (Dickson e Scott, 1997). O urânio, assim como o potássio, é um radioelemento que apresenta elevada mobilidade e é comum que ele acompanhe o potássio durante os processos hidrotermais. O tório, devido à sua baixa mobilidade, se comporta em processos hidrotermais de maneira antagônica à do potássio (Ostrovskiy, 1975), o que resulta em concentrações baixas deste elemento em zonas alteradas. A diferença entre as mobilidades dos radioelementos é a principal causa do enriquecimento simultâneo do potássio e urânio em relação ao tório.

Efimov (1978 *apud* Gnojek e Prichystal, 1985) quantificou o Parâmetro F mostrando que valores em torno de 1,2 % a 1,3 % são comuns em rochas não alteradas. Em rochas alteradas, os valores variam de 2 % a 5 %, e em alguns casos, excepcionalmente até 10 %.

O Parâmetro F foi gerado por meio do *software Oasis Montaj* a partir dos dados aerogamaespectrométricos da área (Figura 4.10).

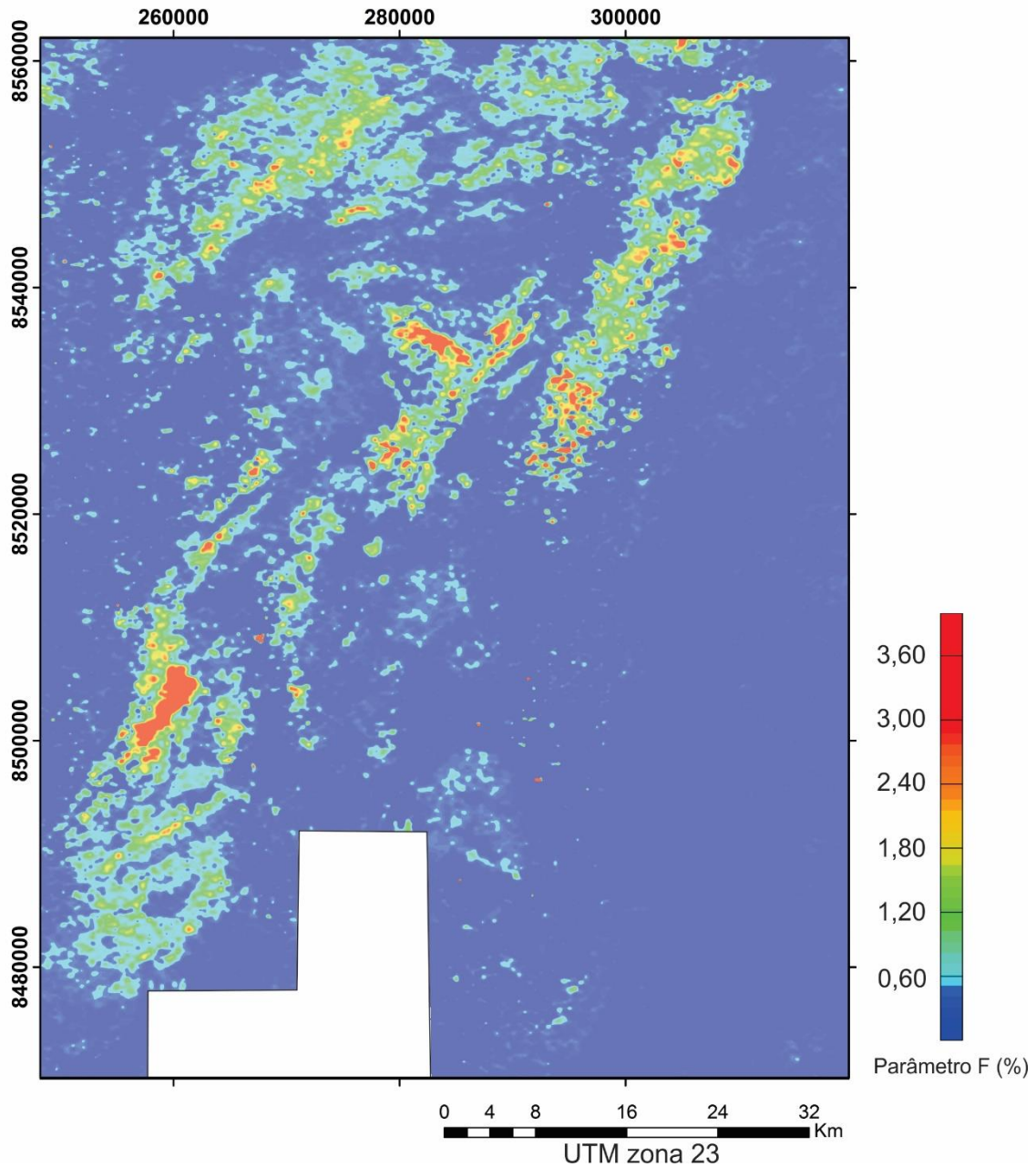


Figura 4.10: Parâmetro F da área de estudo.

4.4.2 Potássio Anômalo (K_d) e Urânio Anômalo (U_d)

As concentrações dos radioelementos K, Th e U variam a partir de fatores primários e secundários. Os primários estão associados a ações de pedogênese, geomorfologia, geoquímica e variações litológicas (Dickson e Scott, 1997), enquanto os fatores secundários podem estar relacionados aos processos responsáveis pela formação de minérios como, por exemplo, a alterações hidrotermais. A acumulação destes radioelementos causada por variações secundárias pode indicar a localização de

ocorrências auríferas. Antes da análise dos efeitos originados por processos secundários é necessário reduzir os efeitos causados pelas variações primárias (Pires, 1995).

Para diminuir os efeitos oriundos das variações primárias e obter valores ideais de potássio e urânio, Saunders *et al.* (1987) apontaram que os efeitos litológicos e ambientais que influenciam o tório afetam o urânio e o potássio de maneira previsível. Assim, propuseram a normalização dos elementos K e U pelos valores de Th. O tório foi escolhido como padrão normalizador devido à sua baixa mobilidade geoquímica. Saunders *et al.* (1994), observaram que a relação entre as concentrações de potássio e tório é representada por uma função linear que passa pela origem. As concentrações de urânio podem ser relacionadas às de tório de forma análoga.

Dessa forma, foram propostas fórmulas para calcular os valores ideais de K e U a partir da normalização pelo Th (Saunders *et al.*, 1987):

$$K_i = \left(\frac{\text{média de } K_s}{\text{média de } Th_s} \right) \times Th_s \quad (\text{Equação 4.4})$$

$$U_i = \left(\frac{\text{média de } U_s}{\text{média de } Th_s} \right) \times Th_s \quad (\text{Equação 4.5})$$

A partir das equações 4.6 e 4.7 foram calculados os desvios sofridos pelos valores ideais:

$$K_d = \frac{(K_s - K_i)}{K_i} \quad (\text{Equação 4.6})$$

$$U_d = \frac{(U_s - U_i)}{U_i} \quad (\text{Equação 4.7})$$

Em que:

K_s , Th_s e U_s = valores aferidos

K_i e U_i = valores ideais obtidos a partir da normalização em relação ao Th

K_d e U_d = desvios dos valores ideais

A variação da concentração oriunda de processos secundários é estudada a partir dos desvios dos valores ideais denominados de Potássio Anômalo (K_d) e Urânio Anômalo (U_d). Nestes produtos, os valores mais elevados indicam um enriquecimento dos elementos K e U decorrente de fatores secundários. Nesta dissertação, o K_d e o U_d

foram empregados com o intuito de indicar áreas atingidas pela ação de processos hidrotermais potenciais para a formação de depósitos auríferos.

As fórmulas utilizadas para gerar o K_d e o U_d consideram a média dos radioelementos em uma área e, portanto, para diminuir os efeitos causados pelas variações primárias, o ideal é que estes produtos sejam aplicados em uma região com características gamaespectrométricas bem definidas. Para atingir este propósito, a área foi dividida em domínios gamaespectrométricos para os quais o K_d e o U_d foram gerados individualmente. Os valores médios dos radioelementos variam muito entre os domínios gamaespectrométricos. Assim se os produtos K_d e o U_d fossem gerados para a área inteira, estas diferenças poderiam ocasionar falsos realces. Estes produtos foram originados apenas para a região central da área (Figura 4.11).

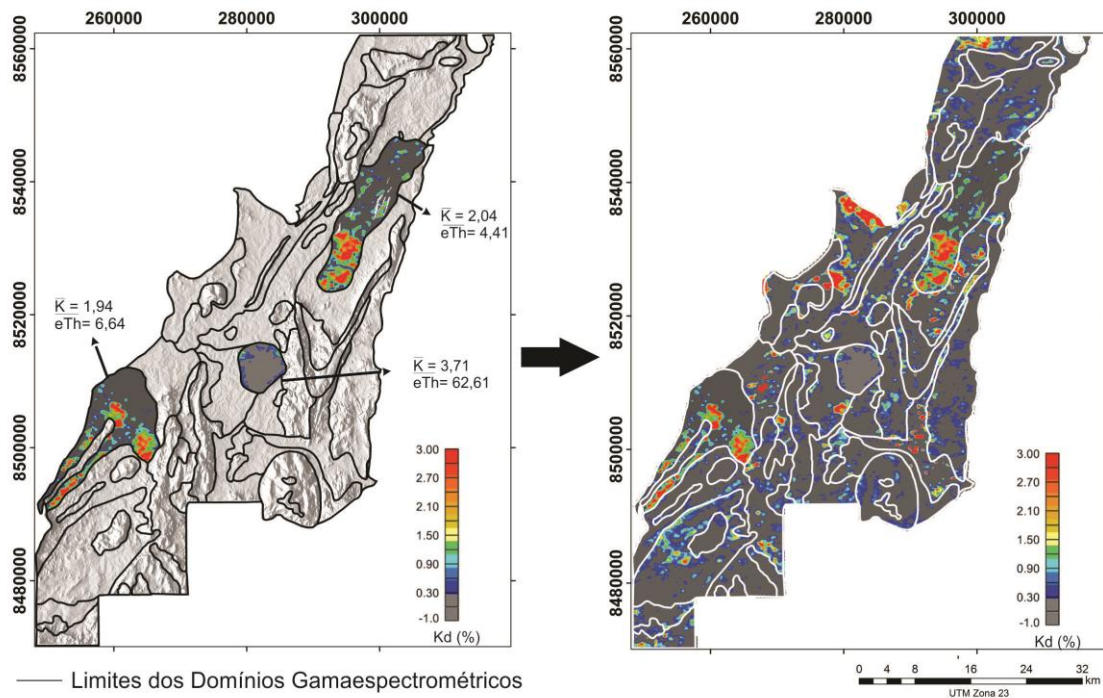


Figura 4.11: a) Imagem ressaltando as diferenças entre as médias de K e eTh para três domínios gamaespectrométricos (destacados em cinza mais escuro); b) Resultado do produto K_d para toda a faixa central da área de estudo.

4.5 Integração dos Dados Geofísicos

A integração de dados geofísicos de naturezas distintas permite criar mapas que indiquem a localização de possíveis alvos de interesse por meio da análise conjunta de

dados denominados planos de informação. Os métodos que permitem esta integração são divididos em empíricos e conceituais (Bonham-Carter, 1994).

Os métodos empíricos se baseiam nos dados para calcular um modelo a partir de ocorrências conhecidas. Entre estes métodos destacam-se o Peso de Evidência, a Regressão Logística e as Redes Neurais (Bonham-Carter, 1994).

Os métodos conceituais são guiados pelo conhecimento do pesquisador, que define quais parâmetros serão utilizados no modelo e como serão empregados na criação de mapas de potencial mineral. O *Index overlay*, a Teoria Dempster-Shafer, a Lógica Booleana e a Lógica *Fuzzy* são exemplos de métodos conceituais (Bonham-Carter, 1994). Enquanto a Lógica Booleana apresenta apenas duas possibilidades para relacionar um produto à existência de um depósito (favorável e não favorável), a Lógica *Fuzzy* utiliza valores de pertinência entre 0 e 1 para correlacioná-los. Estes valores são diretamente proporcionais à chance de existência de um depósito, onde 0 indica ausência e 1 indica presença (Bonham-Carter, 1994) (Figura 4.12). A flexibilidade da Lógica *Fuzzy* a transforma em uma ferramenta eficiente na pesquisa de novos alvos minerais de diversos tipos e escalas (Nykänen, 2008) e, portanto, este método foi o escolhido para integrar os dados considerados mais relevantes.

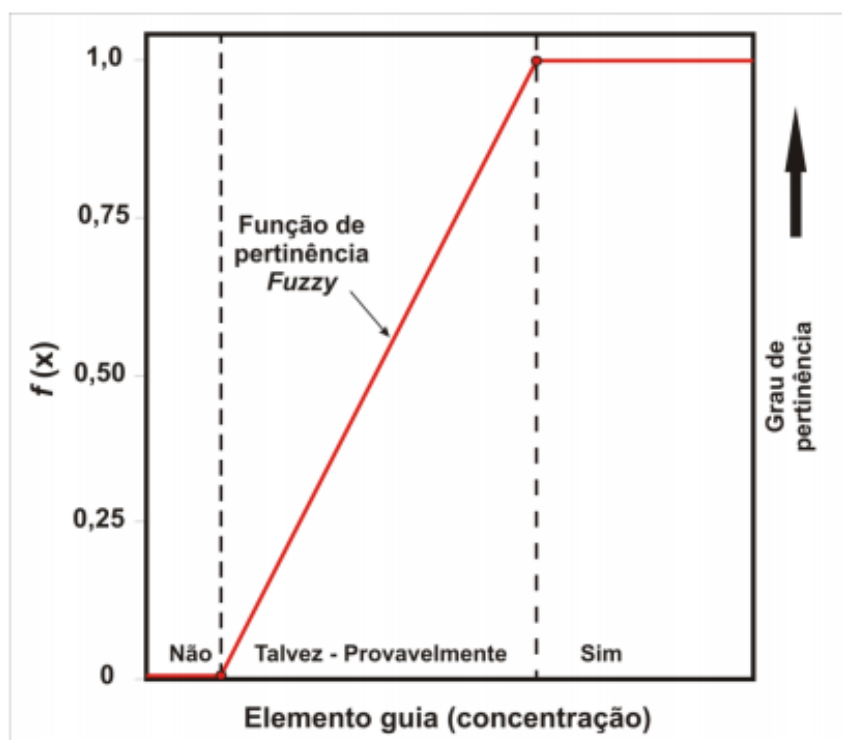


Figura 4.12: O gráfico mostra o grau de pertinência da Lógica *Fuzzy* (Bonham-Carter, 1994).

Neste estudo, a integração dos dados foi realizada a partir de diversos operadores que somam ou multiplicam conjuntos de dados quantitativos correlacionados com a existência de um depósito de forma diretamente proporcional (função *Large*) ou inversamente proporcional (função *Small*). Os produtos utilizados foram K_d , U_d , Parâmetro F e a interpretação extraída dos dados magnéticos (Figura 4.13). Esta integração foi realizada com o auxílio da extensão *Arc-SDM* para *ArcGis* 10.0.

Antes da integração, cada produto foi analisado e correlacionado com a mineralização a partir das funções *Small* e *Large*, que atribuem alto valor de pertinência *fuzzy* aos menores e maiores valores, respectivamente. Os produtos gamaespectrométricos foram associados com a função *Large*, pois as mineralizações estão relacionadas com áreas anômalas no Parâmetro F, no K_d e no U_d . Para inserir no modelo as feições sigmoidais interpretadas a partir dos produtos magnéticos, foi necessário criar um arquivo *raster* originado a partir do cálculo da distância euclidiana de 1 km do seu centro. Como as mineralizações aparecem próximas a pequenas feições sigmoidais, foi adotado que quanto menor a distância até estas feições, maior a pertinência *fuzzy*. Por isso foi utilizada a função *Small* para integrá-los ao modelo.

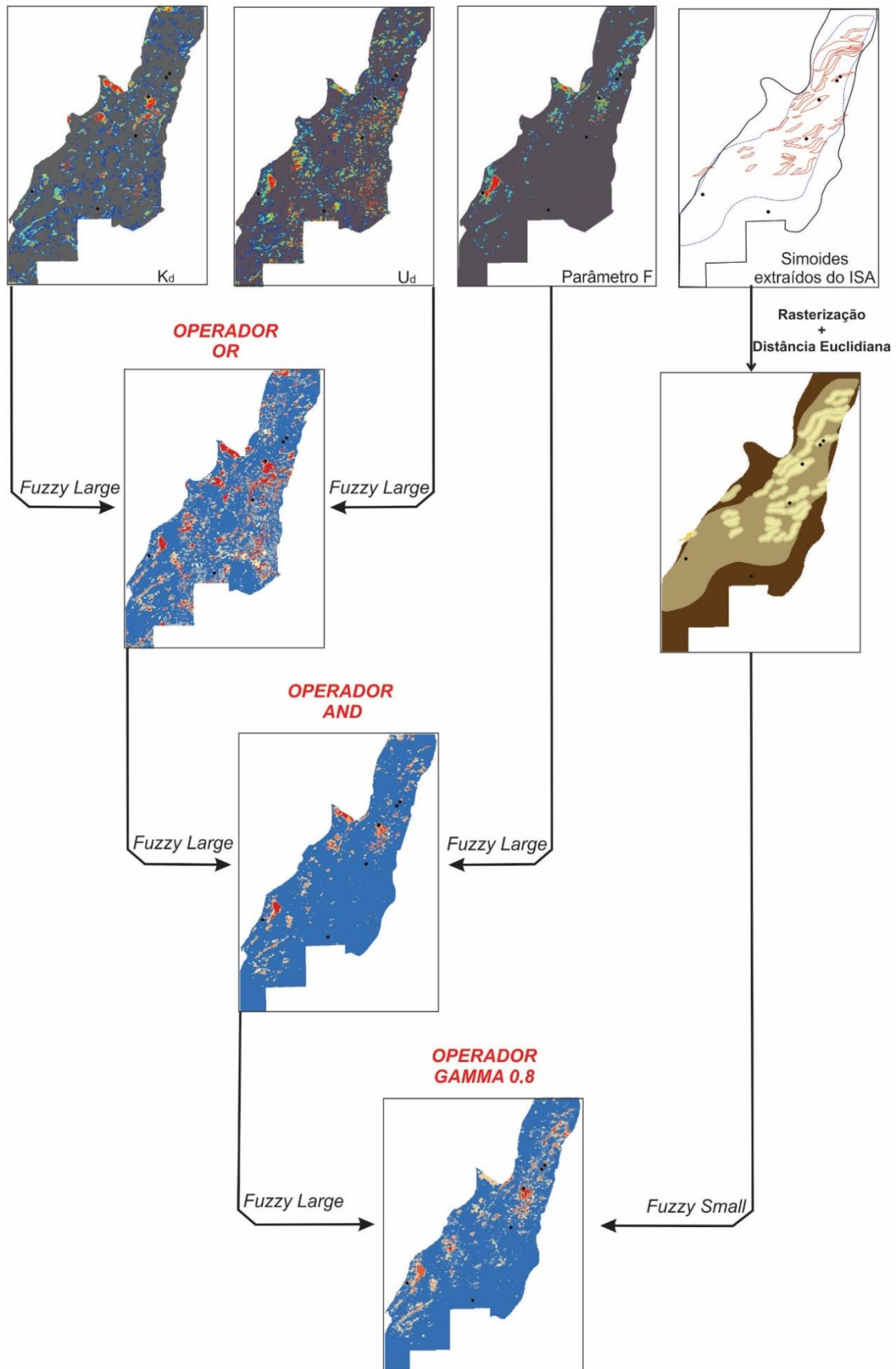


Figura 4.13: O fluxograma apresenta as etapas da criação do modelo a partir dos operadores e funções da Lógica Fuzzy, com a integração dos produtos K_d , U_d , Parâmetro F e feições sigmoidais inferidas a partir do ISA.

Na primeira etapa do modelo foi utilizado o operador OR para integrar os produtos K_d e U_d . Este operador apresenta a função de união de conjuntos de dados e tende a gerar um maior número de áreas anômalas. Como não foi possível atribuir uma maior relevância ao enriquecimento de potássio ou ao de urânio para a formação das mineralizações, utilizou-se este operador para equalizar a importância desses dois produtos.

Em seguida, o produto gerado na primeira etapa foi integrado com o Parâmetro F por meio do operador AND. Este operador é mais conservador que aquele utilizado na primeira etapa e ressalta apenas as áreas de intersecção de conjuntos de dados (Bonham-Carter, 1994). Nesta fase, apenas as regiões com enriquecimento simultâneo de potássio e urânio, em relação ao tório, se tornaram alvo potencial.

Por fim, as feições sigmoidais interpretadas a partir do ISA foram agregadas ao modelo por meio da operação *gamma fuzzy* com índice γ de 0,8, definido a partir de métodos empíricos. O operador *gamma* representa uma combinação ponderada entre os operadores denominados *soma algébrica* e *produto algébrico*. Esta combinação está relacionada com o índice γ , que pode variar de 0 a 1. Quando o valor deste índice é igual a 1, a resposta do operador *gamma* será igual à do operador *soma algébrica*. Se o valor do índice for igual a 0, a resposta será a mesma gerada pelo operador *produto algébrico* (Nykänen, 2008).

Capítulo 5 - Discussão dos Resultados

5.1 Interpretação Geofísica

A interpretação geofísica da área iniciou-se a partir do contexto regional para posteriormente atingir detalhamento compatível com a caracterização dos garimpos. Isso está em concordância com a formação de depósitos hidrotermais constituídos a partir de feições estruturais pré-existentes, que podem servir de condutos para circulação dos fluidos.

5.2 Interpretação Geofísica Regional

A primeira etapa da interpretação consiste em apresentar o contexto geofísico e geológico regional da área. A caracterização das assinaturas geofísicas regionais permite selecionar áreas alvos importantes para o contexto da pesquisa em uma escala de maior detalhe.

5.2.1 Interpretação Magnética Regional

Os produtos empregados na interpretação regional foram a Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e a Inclinação do Sinal Analítico (ISA).

No produto ASA, a região central é limitada por faixas magnéticas contínuas de alta intensidade (0,013 a 0,77 nT/m) que possuem a mesma direção apresentada pelo alinhamento dos garimpos (NE-SW). O restante da área mostra respostas de baixa a média intensidade magnéticas (0,0019 a 0,006 nT/m), com alguns lineamentos com intensidade magnética mais alta (0,009 a 0,013 nT/m). Na porção superior oeste, há um corpo com formato aproximadamente elipsoidal cujo eixo maior mede 17 km. Sua assinatura magnética é elevada (0,054 a 0,077 nT/m) e seus maiores valores estão concentrados no núcleo deste corpo (Figura 5.1a).

O produto ISA mostra que a região central apresenta textura magnética lisa contrastante com o relevo magnético rugoso do restante da área. Esta faixa com direção NE-SW possui comprimento de aproximadamente 110 km e largura média de 28 km. Os garimpos estudados se situam nesta Faixa, o que a torna relevante no contexto da pesquisa (Figura 5.1b).

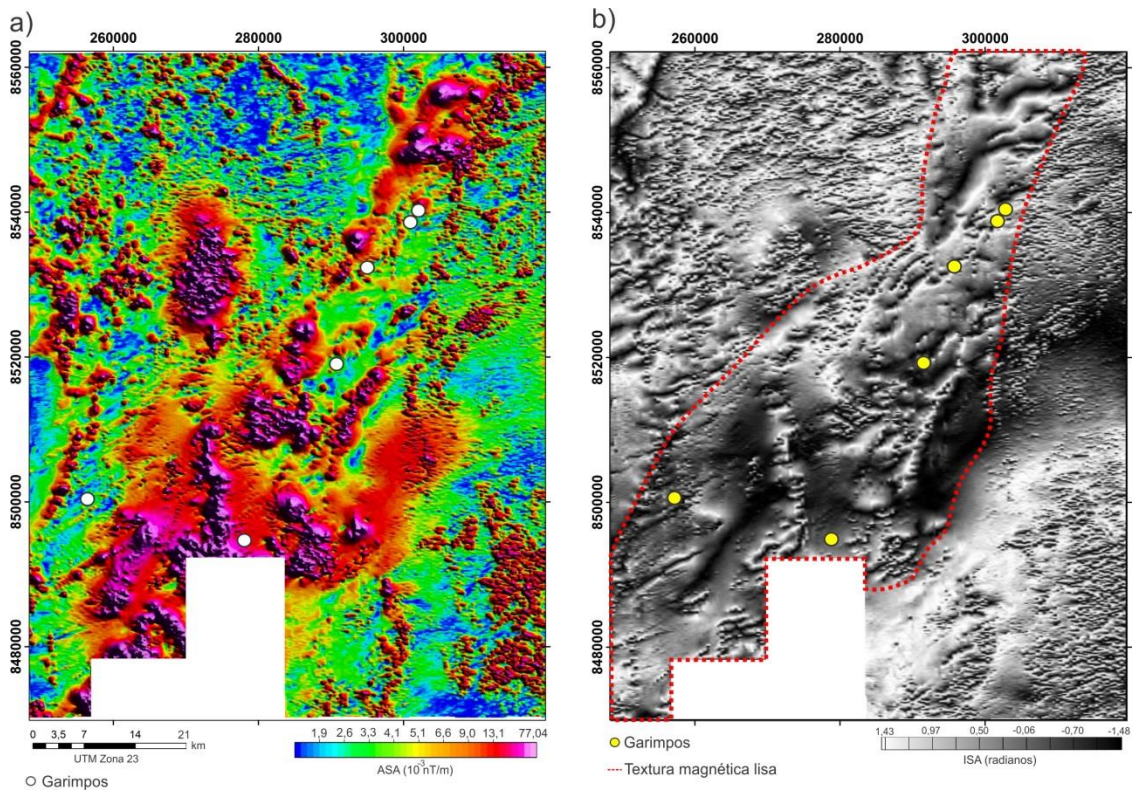


Figura 5.1: a) Amplitude do Sinal Analítico (ASA), b) Inclinação do Sinal Analítico (ISA).

Os produtos magnéticos podem apresentar lineamentos coincidentes com estruturas geológicas pré-existent, com possíveis indicações das relações de corte e ordem cronológica de eventos geológicos. A interpretação magnética se baseou principalmente no ISA, pois esse produto ressalta os lineamentos magnéticos. Deste produto foram extraídas feições sigmoidais e lineamentos magnéticos que caracterizam domínios magnéticos (Figura 5.2b).

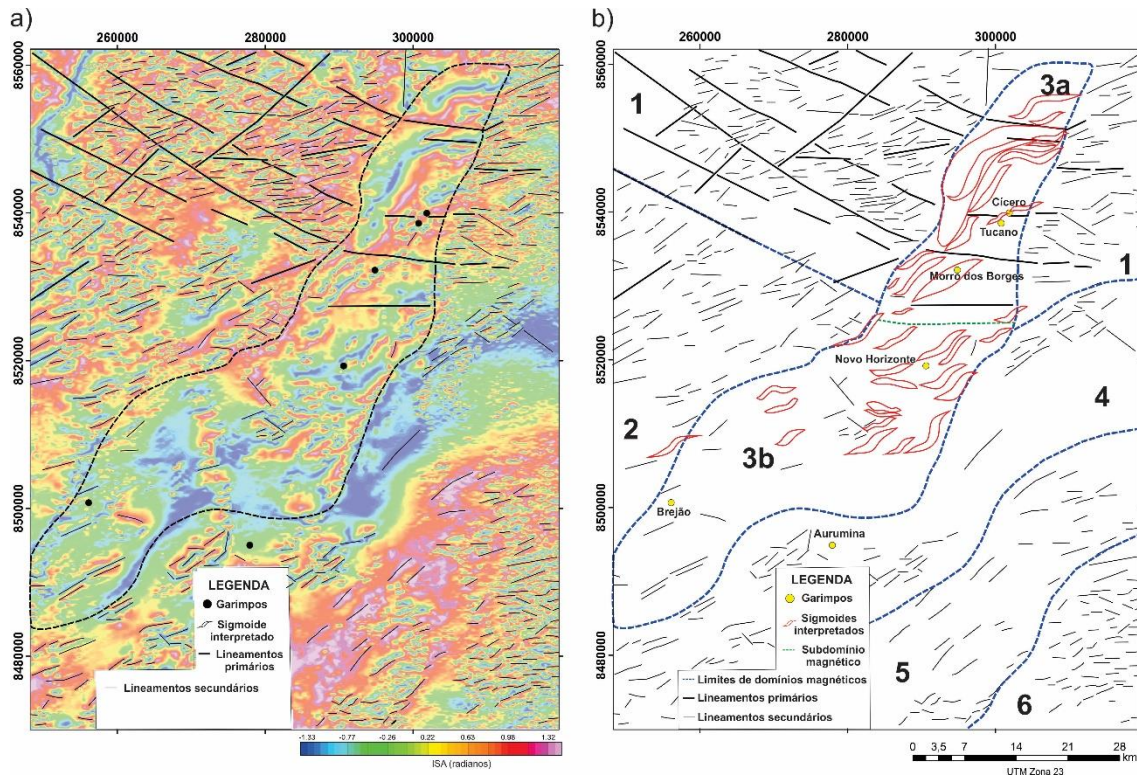


Figura 5.2: Interpretação dos dados magnéticos. a) Produto ISA com destaque aos lineamentos e a faixa de textura magnética mais lisa; b) Interpretação magnetométrica da área em domínios magnéticos, com base em lineamentos e feições sigmoidais.

A área foi fracionada em seis domínios magnéticos distintos. Nessa divisão foram consideradas as características dos lineamentos como densidade, dimensão e direção. Em razão de sua extensão, estes lineamentos magnéticos foram classificados em primeira e segunda ordem. As feições sigmoidais interpretadas, em sua maioria com cinemática dextral, mostram uma deformação rúptil-dúctil.

O Domínio 1 engloba lineamentos magnéticos com direções NE-SW, E-W e NW-SE, com os principais apresentando extensão média de 20 km. Estes segmentos são correlacionáveis com lineamentos estruturais em superfície que caracterizam feições formadas a partir de eventos deformacionais rúpteis. O Domínio 2 apresenta principalmente lineamentos magnéticos com comprimentos entre 1 km e 5 km e direção preferencial NE-SW.

O Domínio 3 coincide com a faixa de textura magnética lisa mostrada na figura 5.1b e possui um formato aproximadamente sigmoidal. Este domínio apresenta geometria fractal composta por feições sigmoidais de tamanhos distintos alinhadas principalmente na direção NE-SW. Estas feições possuem cinemática dextral e aparecem limitados por lineamentos com direção E-W. Este domínio apresenta

assinaturas magnéticas distintas nas porções norte e sul, e por isso foi dividido em dois subdomínios denominados 3A e 3B. O Subdomínio 3A é composto por feições sigmoidais maiores que medem aproximadamente 10 km e apresentam inclinação magnética positiva (1,0 radianos). Neste subdomínio estão localizados os garimpos Cícero, Tucano e Morro dos Borges. O Subdomínio 3B, onde estão os garimpos Novo Horizonte e Córrego do Brejão, possui inclinação magnética predominantemente negativa (-0,2 a -1,2 radianos) e feições sigmoidais com extensão de 5 km. A divisão em subdomínios apresenta um limite próximo ao definido pelo Domínio 1.

Na região sudeste da área, o Domínio 4 é definido por uma extensa faixa com valores de inclinação magnética negativos (-0,9 radianos) e baixa densidade de lineamentos magnéticos. O Domínio 5 é caracterizado por uma faixa magnética alongada na direção NE-SW com valores positivos de inclinação magnética (0,98 a 1,32 radianos) que se estende por todo o domínio. O Domínio 6 apresenta alta densidade de lineamentos com comprimento de aproximadamente 2 km e direção E-W.

A partir da interpretação geofísica dos domínios e dos lineamentos magnéticos é inferida a existência de uma zona de fraqueza com direção NE-SW gerada durante o Evento Transamazônico. O primeiro evento é de direção NW-SE, seguido por um evento de direção E-W. Por fim ocorreu reativação da direção NE-SW durante o Evento Brasileiro ocasionando um pulso com cinemática predominantemente dextral, e um segundo pulso mais local com cinemática sinistral. Dentro da faixa é possível perceber que os lineamentos com direção NW-SE mudaram para lineamentos com direção E-W. É comum a predominância de lineamentos na direção NE-SW na maioria dos domínios magnéticos, o que reforça a ideia de que estes resultam do evento mais recente, o Evento Brasileiro.

A zona de cisalhamento foi apresentada nos mapas geológicos 1:100.000 das folhas Cavalcante (Botelho *et al.*, 2007), Monte Alegre de Goiás (Dardenne *et al.*, 2007), Nova Roma (Alvarenga *et al.*, 2007) e Porto Real (Botelho e Almeida, 2017, inédito) realizados a partir do convênio entre a UnB, a FINATEC e a CPRM. Os relatórios e mapas geológicos das folhas citadas não apresentam caracterização dessa feição a partir de assinaturas geofísicas. Nos produtos magnéticos essa zona é definida e delimitada indicando que a resposta obtida em subsuperfície converge com as feições geológicas mapeadas em superfície.

A Deconvolução de Euler reforça algumas informações obtidas a partir da interpretação dos lineamentos magnéticos e acrescenta informações sobre a profundidade dessas fontes magnéticas. O produto gerado a partir da deconvolução mostra a correlação direta com os domínios magnéticos, principalmente por realçar as diferentes respostas magnéticas que caracterizam cada domínio. Na figura 5.3a, estão destacadas as direções principais dos lineamentos da área: NE-SW, E-W e NW-SE. Os lineamentos com direção NE-SW intersectam os demais lineamentos e, portanto são interpretados como formados pelo evento mais recente ocorrido na área. Nessa direção há lineamentos profundos (900 a 1200 m) e rasos (inferiores a 300 m). Os lineamentos com direção NW-SE são oriundos de fontes com profundidades médias de 600 – 900 m, superiores as estimadas para as fontes associadas aos lineamentos com direção E-W. Estes lineamentos são mais rasos (inferiores a 300 m), menos frequentes e intersectam os lineamentos magnéticos com direção NW-SE.

O Domínio 3 (Figura 5.2b), coincidente com a faixa magnética de textura lisa, concentra o maior número de soluções decorrentes da Deconvolução de Euler. Neste domínio, os lineamentos com direção NE-SW são extensos e com forma semelhante à das feições sigmoidais interpretadas na figura 5.2b. Estas feições podem resultar de fontes com profundidades superiores a 900 m ou inferiores a 300 m, respectivamente nas figuras 5.3b e 5.3c.

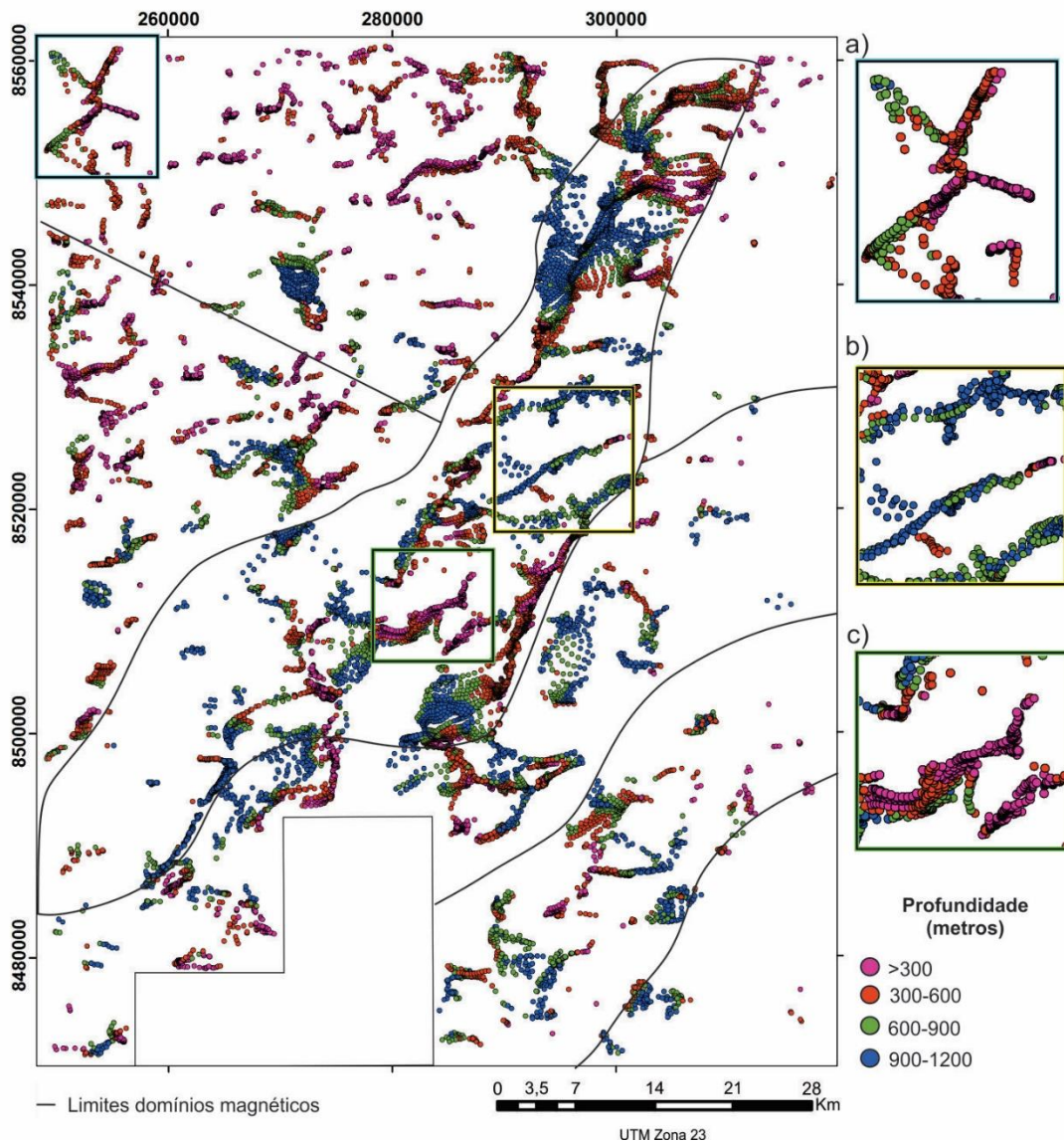


Figura 5.3: Estimativa das profundidades das fontes magnéticas a partir da Deconvolução de Euler.

As soluções da Deconvolução de Euler foram definidas em função da presença de minerais magnéticos existentes nos lineamentos, portanto lineamentos estruturais sem a presença destes minerais não são aparecem neste produto. As estruturas mostradas neste produto se restringem às mais superficiais devido à limitação de profundidade apresentada pela Deconvolução de Euler. No intuito de estudar estruturas mais profundas foi utilizado o *Matched Filter*, que atinge maiores profundidades, e portanto é mais indicado para a análise do contexto de formação da área.

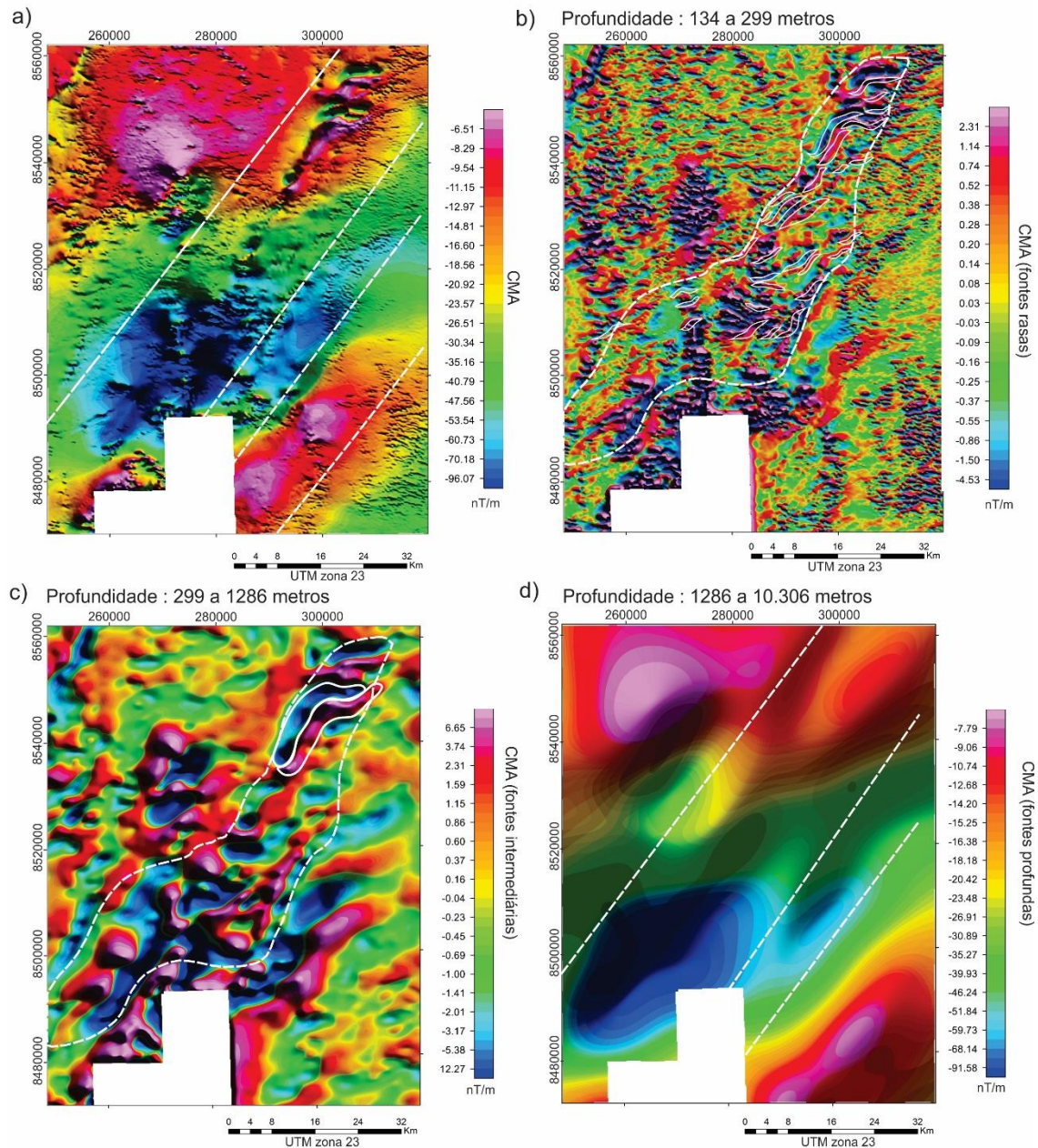


Figura 5.4: Interpretação do produto *Matched Filtering*. a) CMA original; b) CMA ressaltando as fontes com profundidades de 134 a 299 m; c) CMA realçando estruturas de 299 a 1286 m; d) CMA ressaltando fontes de 1286 a 10306 m.

O produto CMA mostra que as feições magnéticas estão preferencialmente orientadas na direção NE-SW (Figura 5.4a). O *Matched Filtering* aplicado sobre o produto CMA, classificou as fontes magnéticas em três intervalos de profundidades: i) fontes rasas (134 m a 299 m), ii) intermediárias (300 m a 1286 m) e, iii) profundas (1287m e 10.306 m). A figura 5.4b apresenta as respostas magnéticas oriundas das fontes mais rasas, onde ocorre boa correlação com as feições magnéticas observadas nos produtos ISA e Deconvolução de Euler. As pequenas feições sigmoidais interpretadas

aparecem apenas neste intervalo de profundidade, o que indica correlação direta com feições superficiais. Embora a feição sigmoidal coincidente com a faixa magnética de textura lisa apareça neste produto, sua resposta magnética aparece melhor definida no intervalo das fontes intermediárias (Figura 5.4c), onde estão os valores máximos atingidos pela Deconvolução de Euler. Neste intervalo, as respostas magnéticas das feições sigmoidais maiores estão bem demarcadas, o que permite interpretar que sua extensão pode estar relacionada diretamente com a profundidade. A figura 5.4d abrange o intervalo das fontes magnéticas profundas (1287 m e 10.306 m), onde não é possível identificar as feições sigmoidais ou os pequenos lineamentos. Esta figura mostra que a direção NE-SW é a mais relevante em profundidades elevadas e, portanto apresenta grande importância no contexto de formação da área.

5.2.2 Interpretação Gamaespectrométrica Regional

A interpretação se baseou na concentração dos elementos potássio, tório e urânio e na imagem ternária RGB, cujos canais estão associados respectivamente ao potássio, tório e urânio. Estes produtos foram utilizados na divisão e classificação da área em domínios com comportamentos gamaespectrométricos distintos, que foram denominados de domínios gamaespectrométricos.

A imagem ternária RGB sobreposta ao relevo facilita a visualização das relações complexas entre as respostas gamaespectrométricas e a morfologia do terreno. Portanto, a imagem do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) foi utilizada para destacar os domínios gamaespectrométricos. O relevo influencia no grau de intemperismo e erosão do terreno, que são fatores que interferem na concentração dos radioelementos ou nas assinaturas gamaespectrométricas. Durante o processo de alteração do intemperismo, o K, Th e U são retirados de seus minerais primários e poderão ser incorporados em minerais secundários como argilo-minerais, óxidos e hidróxidos de ferro. O K é removido de feldspatos potássicos e micas e poderá constituir argilo-minerais ou ser lixiviado. O urânio é retirado de ambientes oxidantes e precipitado em ambientes redutores, principalmente onde há presença de matéria orgânica. O Th é solúvel quando combinado a complexos orgânicos em águas subterrâneas. Estes radioelementos apresentam solubilidades distintas e conseqüentemente diferem em suas mobilidades. Por apresentar alta solubilidade o potássio é o radioelemento mais sujeito a

remobilização, enquanto o Th é o menos solúvel e, portanto, menos móvel (Wilford *et al.*, 1997).

As concentrações destes elementos foram classificadas em baixa, média e alta. Nesta pesquisa, as cores dos domínios foram definidas a partir da correlação entre a concentração dos radioelementos e o espaço de cor RGB (*Red-Green-Blue*). As concentrações baixa, média e alta dos radioelementos foram relacionadas respectivamente aos valores 0, 128 e 255 do espaço de cor RGB (Chiarini *et al.*, 2013). Na tabela de cores dos domínios, os radioelementos foram associados aos mesmos canais da imagem ternária RGB, ou seja, o potássio foi associado ao *red*, o tório ao *green* e o urânio ao *blue*. A figura 5.5 mostra a tabela com as cores atribuídas aos domínios gamaespectrométricos com base nas concentrações dos três radioelementos.

CANAIS ESPECTROMÉTRICOS			COMPOSIÇÃO	CORES
[K]*	[eTh]*	[eU]*	R.G.B**	
1	1	1	R= 0; G= 0; B= 0	111
1	1	2	R= 0; G= 0; B= 128	112
1	1	3	R= 0; G= 0; B= 255	113
1	2	1	R= 0; G= 128; B= 0	121
1	2	2	R= 0; G= 128; B= 128	122
1	2	3	R= 0; G= 128; B= 255	123
1	3	1	R= 0; G= 255; B= 0	131
1	3	2	R= 0; G= 255; B= 128	132
1	3	3	R= 0; G= 255; B= 255	133
2	1	1	R= 128; G= 0; B= 0	211
2	1	2	R= 128; G= 0; B= 128	212
2	1	3	R= 128; G= 0; B= 255	213
2	2	1	R= 128; G= 128; B= 0	221
2	2	2	R= 128; G= 128; B= 128	222

CANAIS ESPECTROMÉTRICOS			COMPOSIÇÃO	CORES
[K]*	[eTh]*	[eU]*	R.G.B**	
2	2	3	R= 128; G= 128; B= 255	223
2	3	1	R= 128; G= 255; B= 0	231
2	3	2	R= 128; G= 255; B= 128	232
2	3	3	R= 128; G= 255; B= 255	233
3	1	1	R= 255; G= 0; B= 0	311
3	1	2	R= 255; G= 0; B= 128	312
3	1	3	R= 255; G= 0; B= 255	313
3	2	1	R= 255; G= 128; B= 0	321
3	2	2	R= 255; G= 128; B= 128	322
3	2	3	R= 255; G= 128; B= 255	323
3	3	1	R= 255; G= 255; B= 0	331
3	3	2	R= 255; G= 255; B= 128	332
3	3	3	R= 255; G= 255; B= 255	333

* Índice de concentração espectrométrica
1 = baixa; 2 = média; 3 = alta
** Concentrações nos canais R.G.B

Figura 5.5: Definição das cores referentes aos domínios gamaespectrométricos relacionando a concentração dos radioelementos K, eTh, eU às cores do espaço RGB, respectivamente.

Na tabela de cores, o domínio destacado apresenta alto valor de K (*red* = 255) e concentrações baixas de eTh (*green* = 0) e de eU (*blue* = 0). Este domínio é representado pela cor vermelha e corresponde ao domínio gamaespectrométrico 311, em que 3 indica concentração elevada e 1 representa concentração baixa (Figura 5.5).

Na figura 5.6, a área de estudo está classificada em domínios gamaespectrométricos definidos a partir das variações de concentrações dos radioelementos.

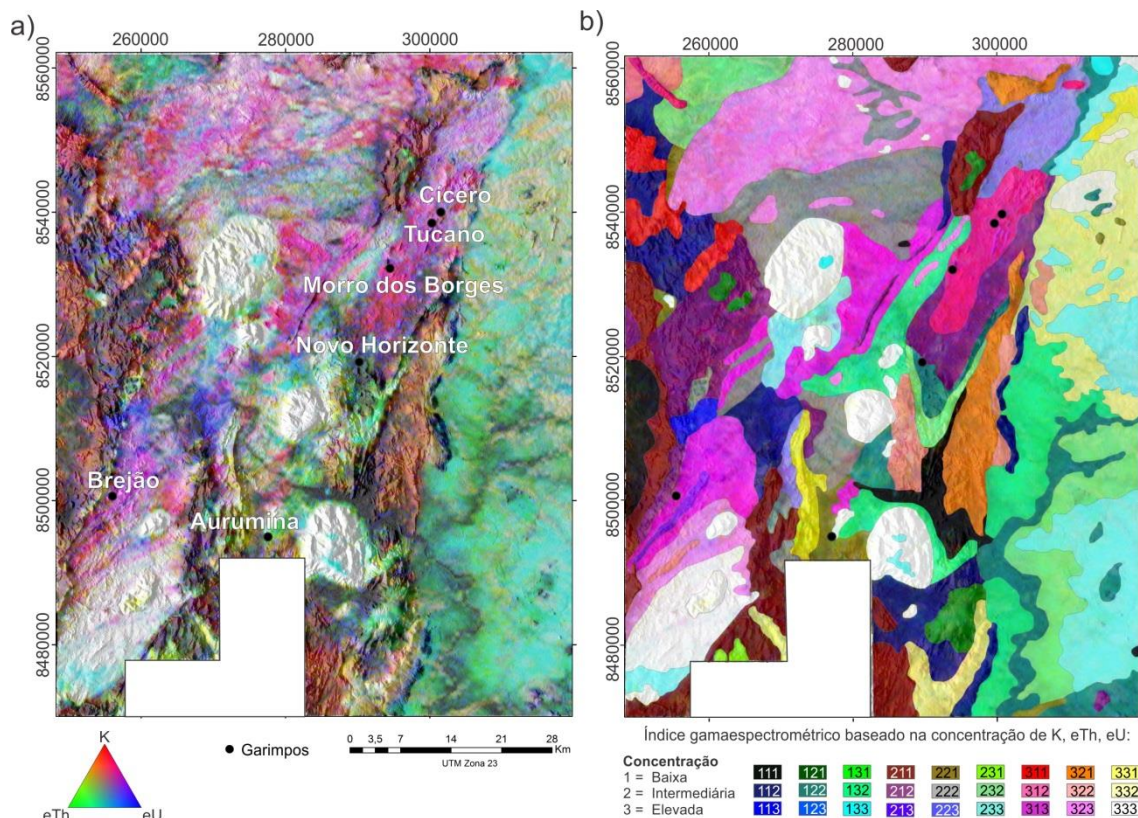


Figura 5.6: a) Imagem ternária RGB (K, eTh, eU); b) Interpretação dos domínios gamaespectrométricos classificados conforme a tabela de cores definida.

Na interpretação da imagem ternária RGB, a região central possui a maioria dos domínios alongados na direção NE-SW. Nesta região, os domínios que não apresentam essa característica correspondem aos granitos paleoproterozoicos da Suíte Pedra Branca (1,77 Ga), conforme apresentado na figura 2.6. Essa interpretação mostra que os corpos graníticos situados nas bordas da faixa possuem formatos elipsoidais, enquanto os localizados na parte interna apresentam forma aproximadamente circular. Isto pode indicar que a faixa foi uma região mais preservada em relação à deformação, não sendo sujeita ao pico da deformação Brasileira.

Na porção leste da área, estão concentrados os domínios em tons de verde (132 e/ou 232) e azul (123 e/ou 223), com respostas associadas às concentrações de baixo K, elevada de Th e média de U. Esses domínios correspondem à cobertura sedimentar do Grupo Bambuí e apresentam assinaturas gamaespectrométricas menos heterogêneas, que estão associadas às extensas áreas constituídas por calcários (Fm. Sete Lagoas).

O produto Parâmetro F, determinado pela expressão $F = K.eU/ eTh$ (Efimov, 1978 *apud* Gnojek e Prichystal, 1985), foi aplicado em toda a região. A fórmula utilizada para gerar o Parâmetro F utiliza valores pontuais dos radioelementos e,

portanto, as variações de concentrações primárias decorrentes da litologia não afetam de maneira significativa o produto. Isso possibilitou gerar o Parâmetro F sem individualizar cada litologia.

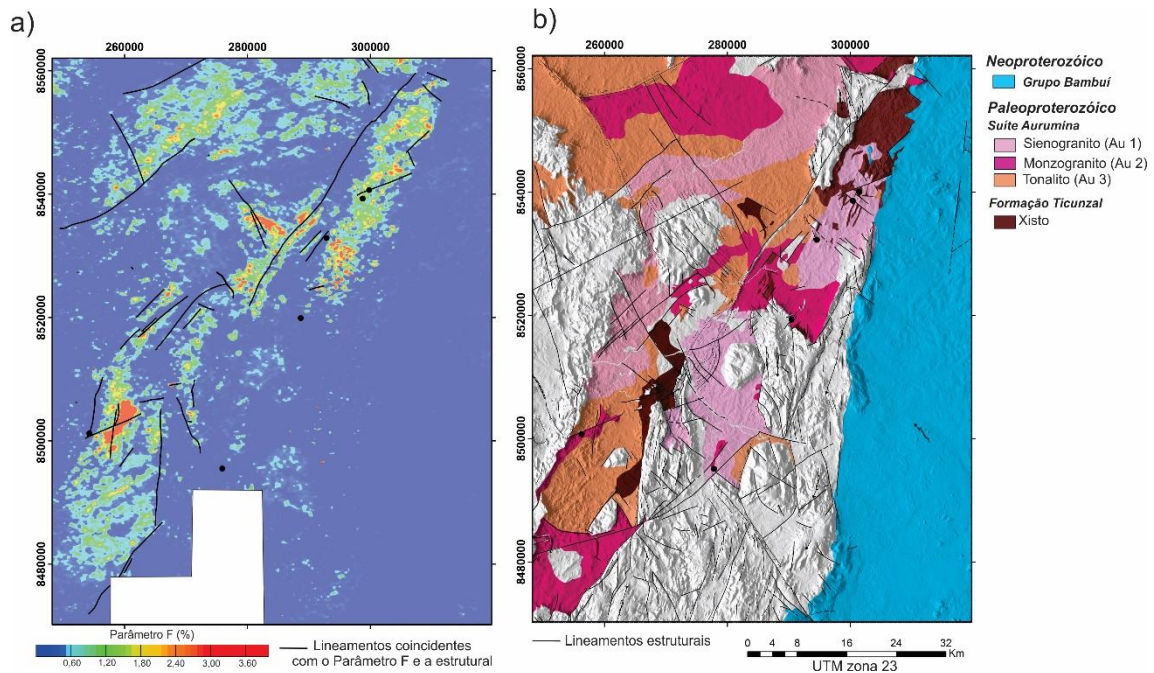


Figura 5.7: a) O Parâmetro F mostra a região central destacada devido ao enriquecimento de K e U; b) Ressalta as litologias com correlação com o Parâmetro F.

O produto destaca a região central, coincidente com a faixa magnética de textura lisa, onde aparecem concentrados os valores associados ao enriquecimento de potássio e urânio, relativo ao tório, com resposta elevada no Parâmetro F (1,20 a 3,60 %).

As figuras 5.7a e 5.7b, relacionam os valores obtidos no Parâmetro F e as litologias da área, onde se destaca o comportamento do Grupo Bambuí, da Formação Ticunzal e da Suíte Aurumina. O Grupo Bambuí apresenta um caráter homogêneo nesse produto com valores de enriquecimento não relevante, abaixo de 0,6 %. Na porção norte da área, o contato entre os xistos da Formação Ticunzal e o sienogranito da Suíte Aurumina aparece bem delimitado, com valores entre 1,20 % a 3,00 %. As demais porções enriquecidas em K e U estão associadas às rochas que formam a Suíte Aurumina. As regiões com resposta elevada no Parâmetro F podem estar relacionadas com zonas de alteração hidrotermal.

Na figura 5.7a, estão inseridos os lineamentos estruturais coincidentes com a resposta apresentada pelo Parâmetro F. Estes lineamentos mostram uma forte correlação entre áreas enriquecidas relativamente em K e U, quando normalizados pelo Th, e as

estruturas mapeadas. Estas feições parecem limitar as regiões enriquecidas e podem funcionar como corredores para os fluidos.

5.3 Interpretação Geofísica da Faixa Central

A interpretação regional possibilitou delimitar, a partir das assinaturas magnética e gamaespectrométrica, uma Faixa Central com comportamento geofísico distinto do restante da área e orientação na direção NE-SW. Na Faixa estão localizados os garimpos auríferos alvos desta pesquisa e, portanto, se tornou a subárea foco da pesquisa. Essa região apresenta comportamento magnético caracterizado por uma textura lisa e é constituída por feições magnéticas com formato de sigmóides fractais, onde a maior feição tem dimensão aproximada a da Faixa Central. Excetuando os domínios gamaespectrométricos correspondentes aos granitos paleoproterozoicos, os demais domínios presentes na Faixa apresentam forma alongada ou elipsoidal, com eixo maior orientado na direção NE-SW. As regiões com enriquecimento relativo de K e U estão associadas às rochas da Suíte Aurumina.

5.3.1 Interpretação Magnética da Faixa Central

O Mapa Geológico que compreende as folhas Cavalcante, Monte Alegre, Nova Roma e Porto real apresenta a área denominada de Faixa Central como uma grande zona de cisalhamento (Botelho *et al.*, 2007; Dardenne *et al.*, 2007; Alvarenga *et al.*, 2007; Botelho *et al.*, 2017, no prelo). Nesta pesquisa, a assinatura magnética dessa Faixa caracteriza essa feição em subsuperfície e reforça sua importância na região estudada. Foram utilizados os produtos Deconvolução de Euler e Inversão do Vetor Magnético (MVI) para estimar a profundidade das fontes magnéticas.

A Deconvolução de Euler é um produto 3D que estima as profundidades das fontes magnéticas. Esse produto destaca faixas magnéticas contínuas classificadas em função de intervalos de profundidades. O MVI resulta em um produto 3D que apresenta um modelo magnético de subsuperfície para a área (Figura 5.8). Além de estimar a profundidade das fontes, o MVI permite inferir valores de susceptibilidade magnética das feições presentes na área. O modelo magnético gerado consiste em um bloco diagrama em 3D onde, a princípio, é possível visualizar apenas sua superfície.

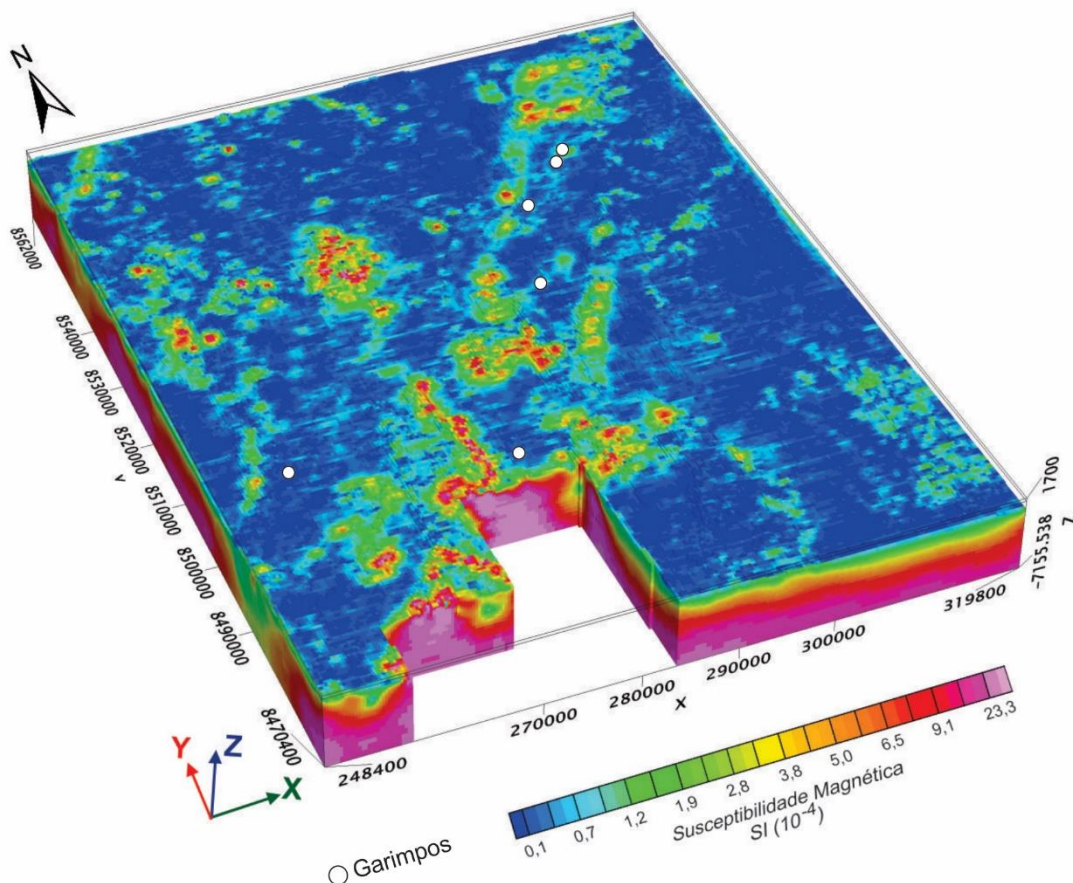


Figura 5.8: Modelo tridimensional gerado a partir do Vetor de Magnetização Induzida (MVI). Os círculos brancos mostram as localizações dos principais garimpos de ouro na área de estudo.

A visualização em subsuperfície desse bloco diagrama foi realizada a partir da extração de perfis que atravessam toda Faixa Central com direção aproximadamente perpendicular a mesma. Como o intuito desta pesquisa é definir os padrões geofísicos dos garimpos, esses perfis foram coincidentes com planos que continham essas ocorrências auríferas (Figura 5.9).

Os perfis traçados apresentam aproximadamente a mesma direção, porém o perfil localizado ao sul possui azimuth distinto, devido à necessidade do plano de corte englobar dois alvos, o garimpo Córrego do Brejão e a mina Aurumina.

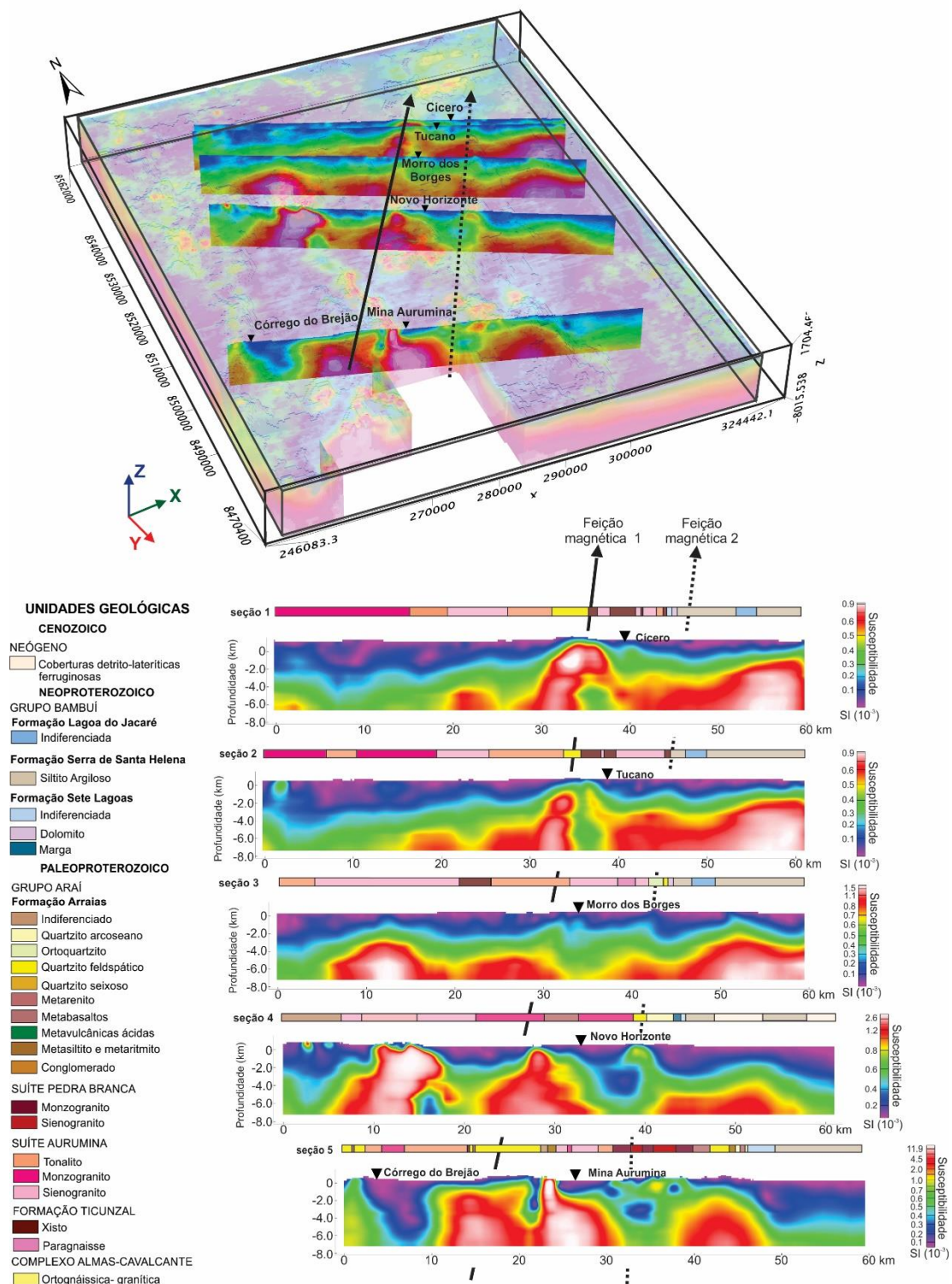


Figura 5.9: Perfis gerados a partir do MVI correlacionando a resposta magnética em subsuperfície dos garimpos estudados com a geologia da área.

Na figura 5.9, a Faixa Central é delimitada por duas feições magnéticas regionais contínuas presentes na superfície do *voxel* e nos perfis magnéticos empilhados. Estas feições regionais apresentam direção NE-SW e mostram diferentes

valores de susceptibilidade e posicionamento em profundidade. A seta contínua corresponde à Feição Magnética Regional 1 (FMR 1), que possui valores de susceptibilidade magnética na faixa de $0,7 \cdot 10^{-3}$ a $4,5 \cdot 10^{-3}$ SI e aflora em todos os perfis extraídos. A seta tracejada indica a Feição Magnética Regional 2 (FMR 2) que mostra valores de susceptibilidade magnética na faixa de $0,5 \cdot 10^{-3}$ a $1 \cdot 10^{-3}$ SI, inferiores às da primeira feição. A FMR 2 não aflora em toda área de estudo.

No produto ASA, a assinatura geofísica dessas feições regionais é distinta: a FMR 1 mostra continuidade em toda a Faixa Central e a FMR 2 é contínua apenas na porção mais ao sul da área (Figura 5.1a). No produto ISA as Feições Regionais se assemelham e aparecem contínuas, delimitando a Faixa Central a oeste e a leste.

Ao comparar as informações obtidas a partir do modelo MVI com o mapeamento das feições estruturais, verifica-se que as Feições Magnéticas 1 e 2 estão associadas aos limites da zona de cisalhamento apresentada no Mapa Geológico apenas na região onde afloram. Consequentemente, seu limite é contínuo a oeste, enquanto a leste é mapeado somente na porção sul da área. A região onde a FMR 2 não aflora está associada em superfície ao Grupo Bambuí, o que sugere que as rochas supracrustais deste grupo encobriu as evidências da zona de cisalhamento em superfície. Essa hipótese é sustentada pela idade dos eventos formadores da zona de cisalhamento (Paleoproterozoico) e do Grupo Bambuí (Neoproterozoico) (Alvarenga *et al.*, 2007).

5.3.2 Interpretação Gamaespectrométrica da Faixa Central

Nessa etapa da pesquisa, foram interpretados os produtos Parâmetro F (F), Potássio Anômalo (K_d) e Urânio Anômalo (U_d). Os produtos correlacionam os radioelementos a partir da normalização de K e U em função do Th e ressaltam o enriquecimento relativo dos dois primeiros elementos.

O Parâmetro F foi interpretado para toda a área no item 5.2.2 e seus valores mais elevados foram associados à região da Faixa Central. Nesta etapa o produto foi recortado para a área da Faixa com o intuito de ressaltar anomalias mais pontuais (Figura 5.10a). O Potássio Anômalo (K_d) e o Urânio Anômalo U_d foram gerados apenas para os domínios gamaespectrométricos pertencentes à Faixa Central. Estes produtos não correspondem às concentrações de potássio e urânio, mas ao enriquecimento destes elementos em relação ao tório. Nos produtos K_d e U_d , os valores negativos

correspondem respectivamente ao empobrecimento de potássio e urânio, em relação ao Th (Figura 5.10b e 5.10c).

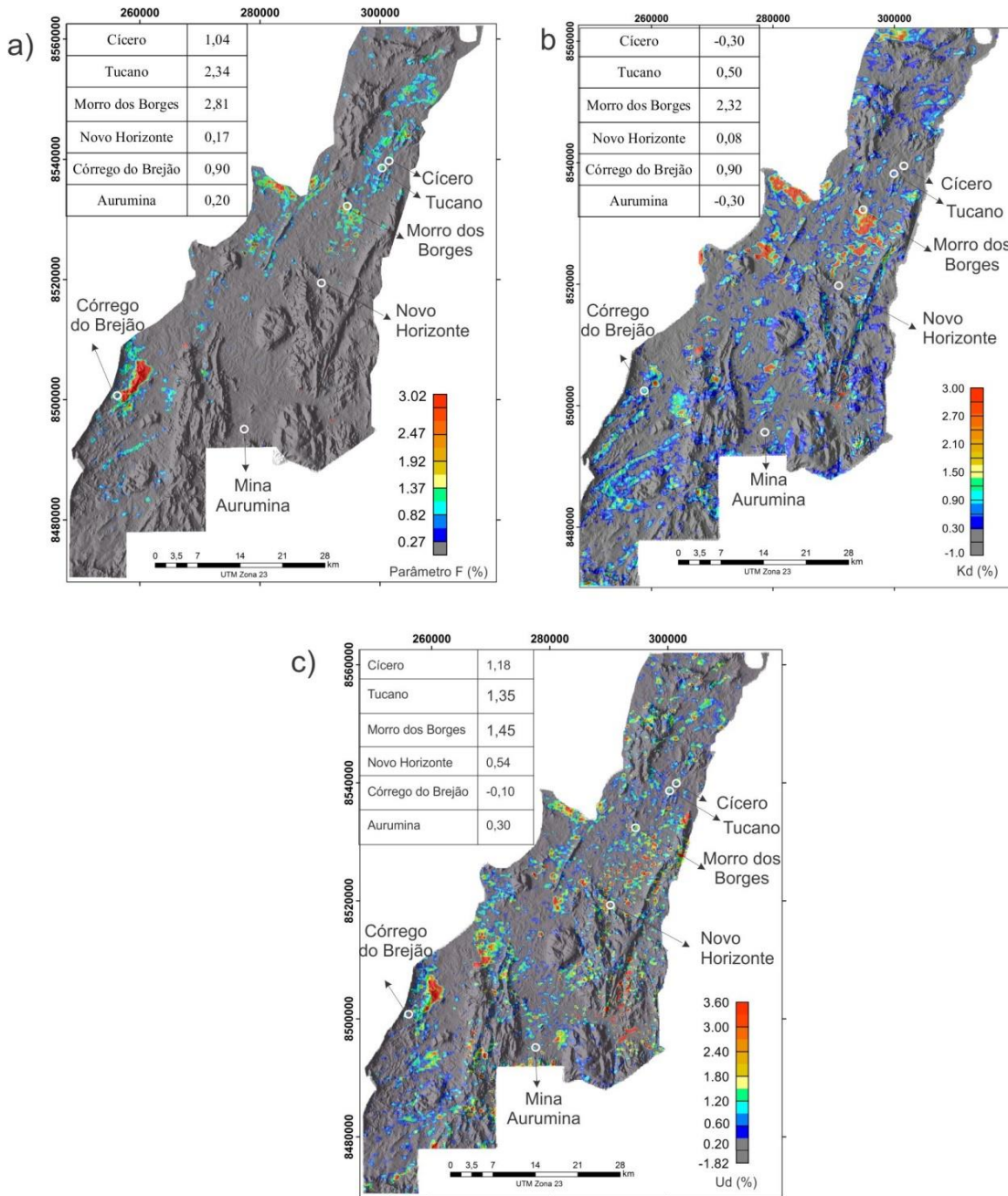


Figura 5.10: Produtos que ressaltam o enriquecimento de potássio e urânio na região da Faixa Central, com os valores correspondentes aos garimpos. a) O Parâmetro F realça o enriquecimento simultâneo de K e U em relação ao Th; b) O Potássio Anômalo destaca as regiões com enriquecimento relativo de K; c) O Urânio Anômalo enfatiza o enriquecimento relativo de U.

Os três produtos mostram que a Faixa Central apresenta zonas gamaespectrométricas anômalas com direção NE-SW associadas a valores elevados, indicando enriquecimentos simultâneos de potássio e urânio. Algumas dessas zonas

anômalas coincidem espacialmente com falhas. Isso pode indicar que essas feições anômalas foram geradas durante ou posteriormente ao evento NE-SW devido à percolação e/ou preenchimento dessas por fluidos enriquecidos. Nos três produtos ocorrem zonas anômalas seccionadas ou limitadas abruptamente por lineamentos gamaespectrométricos com direção NW-SE.

O relevo apresenta forte correlação com as zonas anômalas destes produtos, exercendo um controle sobre suas direções e limites. As anomalias se concentram nas regiões mais baixas, e bordejam as serras e os granitos (Figura 5.10).

O estudo das respostas gamaespectrométricas indica que alguns garimpos possuem padrões semelhantes entre si. Com base nessas semelhanças, os garimpos foram classificados em três grupos: i) Garimpos do Norte que inclui o Cícero, Tucano e Morro dos Borges; ii) Garimpos do Sul que contém o Novo Horizonte e a mina Aurumina; e iii) o Garimpo Córrego do Brejão.

Os Garimpos do Norte estão próximos espacialmente e apresentam valores anômalos nos três produtos, com valores mais elevados no Parâmetro F e no Urânio Anômalo. Em relação ao produto K_d , as assinaturas desses garimpos divergiram, já que o garimpo Cícero apresentou empobrecimento de potássio em relação ao tório, representado pelo valor negativo no produto K_d .

O garimpo Novo Horizonte e a mina Aurumina apresentam comportamentos distintos ao do primeiro grupo, e foram caracterizados por valores mais baixos no Parâmetro F e no K_d e valores intermediários no U_d . O garimpo Novo Horizonte correspondeu a valores de 0,17 % no Parâmetro F, 0,08 % no K_d e 0,54 % no U_d , enquanto a mina Aurumina apresentou respectivamente 0,20 %, -0,30 % e 0,30 % (Figura 5.10).

O garimpo Córrego do Brejão não foi classificado em grupo, pois trata-se de uma ocorrência de ouro coluvionar, em que a proveniência do ouro ainda não é conhecida. Seu comportamento único é definido por valores intermediários no Parâmetro F (0,9%) e no K_d (0,9 %), e valor negativo no U_d (-0,3 %).

A divisão em grupos a partir das assinaturas gamaespectrométricas remete à interpretação magnética regional (Figura 5.2), na qual a subdivisão do Domínio Magnético 3 engloba os Garimpos do Norte no Subdomínio 3A, o Córrego do Brejão e o Novo Horizonte no Subdomínio 3b, e a mina Aurumina no Domínio Magnético 4.

A região foi estudada para urânio na década de 1980 (Sousa e Pontes, 1977) e foram mapeadas diversas anomalias de 1ª, 2ª e 3ª ordens pela Nuclebrás, localizadas nas folhas Cavalcante, Monte Alegre de Goiás e Porto Real. Estas anomalias foram utilizadas para validar o produto Urânio Anômalo (U_d) (Figura 5.11).

As anomalias de urânio indicadas na área apresentam suas gêneses associadas a zonas de cisalhamento, a fenômenos hidrotermais-pneumatolíticos (provavelmente pela remobilização desse elemento), a intrusivas ácidas de composição granítica e a xistos grafitosos, provavelmente devido à atuação dos processos de enriquecimento supergênico (Sousa e Pontes, 1977).

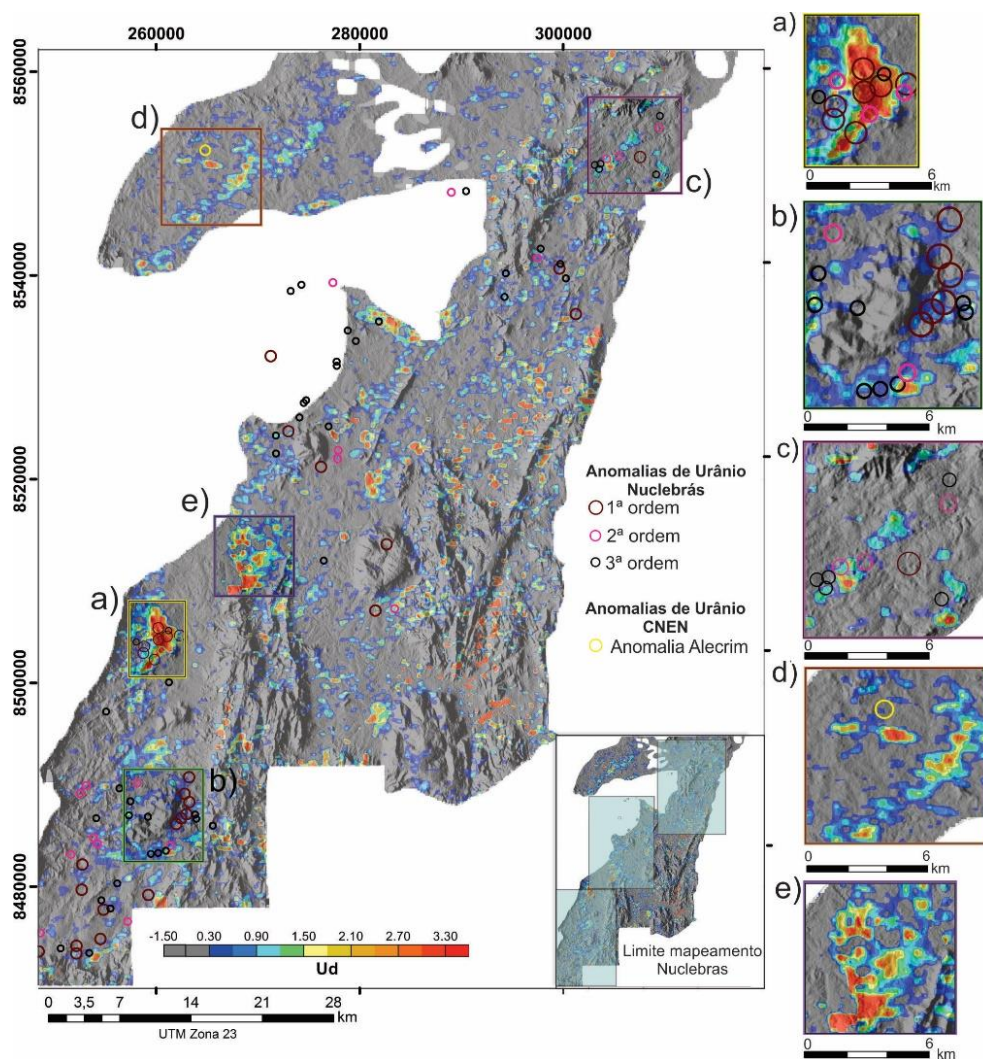


Figura 5.11: Produto Urânio Anômalo com as anomalias mapeadas pela Nuclebrás e pela CNEN. a) Anomalia Morro de Caldas; b) Anomalias ao redor do Maciço Soledade; c) Anomalias do sul de Campos Belos; d) Anomalia Alecrim; e) Região com valores elevados de urânio sem anomalias mapeadas.

As anomalias mapeadas pela Nuclebrás apresentaram correlação direta com o produto U_d (Figura 5.11). A maior anomalia de urânio detectada pelo produto

corresponde à anomalia denominada Morro de Caldas, com amostras que variam de 1,5 até 4 vezes o teor normal. Essas anomalias apresentam distribuição em forma radial, com área de cobertura abrangendo o maciço e áreas próximas, podendo indicar que a intrusão é área fonte do urânio (Figura 5.11a) (Sousa e Pontes, 1977). A figura 5.11b mostra a borda do Maciço Soledade da Suíte Pedra Branca com valores anômalos referentes às anomalias de 1^a, 2^a e 3^a ordens mapeadas pela Nuclebrás (Sousa e Pontes, 1977). Essas anomalias variam de 1,5 a 4 vezes o teor normal de urânio. Na figura 5.11c, as amostras com teores anômalos de urânio foram coletadas em córregos de 1^a e 2^a ordens com teores variando de 1,5 a 3 ppm. A área de influência apresenta distribuição linear orientada próxima à direção estrutural da zona de cisalhamento. Essas anomalias de urânio são denominadas de anomalias ao sul de Campos Belos (Sousa e Pontes, 1977).

A figura 5.11d apresenta a ocorrência denominada de anomalia de Alecrim. Essa região foi destacada no produto gamaespectrométrico Urânio Anômalo (U_d) por indicar uma área com elevado potencial metalogenético para urânio. A figura 5.11e não apresenta anomalias mapeadas, porém é apresentada com destaque por mostrar assinatura gamaespectrométrica similar àquela da anomalia Morro de Caldas (Figura 5.11a).

5.4 Interpretação dos garimpos

Os garimpos Cícero, Tucano, Morro dos Borges, Novo Horizonte e a mina Aurumina são classificados com depósitos AU-EGP paleoproterozoicos (Dardenne e Botelho, 2014). Esses garimpos estão localizados próximo ao contato entre granitos peraluminosos e xistos e paragnaises da Formação Ticunzal, com ocorrências associadas às zonas de cisalhamento verticais rúpteis- dúcteis dextrais N70E e sinistrais N50W (Botelho *et al.*, 2006).

As assinaturas geofísicas analisadas no contexto da Faixa Central sugerem a divisão dessas ocorrências em três grupos: i) Garimpos do Norte: Cícero, Tucano e Morro dos Borges; ii) Garimpos do Sul: Novo Horizonte e mina Aurumina; iii) Garimpo Córrego do Brejão (Figuras 5.2, 5.9 e 5.10). Neste item serão abordadas as características geofísicas individuais de cada garimpo.

5.4.1 Garimpos Cícero e Tucano

Os garimpos Cícero e Tucano estão localizados a uma distância de cerca de 1 km entre si. A proximidade e a semelhança de suas características geológicas indicam que o Cícero é um prolongamento do Tucano. Com essas informações advindas de pesquisas anteriores, as assinaturas geofísicas desses garimpos foram analisadas simultaneamente. Em campo, as mineralizações são controladas pela foliação S, com direção N320W e mergulho subvertical, e estão associadas com a presença de níveis grafitosos. Essas observações foram feitas no garimpo do Tucano e são estendidas ao Cícero.

A análise dos perfis geofísicos que intesectam o garimpo Cícero indica que a concentração de K é de 1,6 %, correspondendo a aproximadamente o valor médio deste elemento na seção. O Th apresenta um valor baixo quando comparado ao restante da seção, com concentração de 6 ppm. A região do garimpo corresponde ao segundo maior pico de concentração de U, na seção, com valor de 3,5 ppm. As respostas do Parâmetro F, do U_d e do K_d estão diretamente relacionadas às concentrações dos radioelementos, e conseqüentemente o U_d possui resposta elevada (1,18), enquanto o K_d apresenta valor baixo (-0,3). O Parâmetro F mostra resposta elevada (1,08) devido aos valores alto do U e baixo de Th na região. No perfil referente ao ASA, o garimpo Cícero possui um baixo valor ($\sim 0,005$ nT/m.), e está localizado entre feições magnéticas relacionadas a picos de valores no ASA ($\sim 0,01$ nT/m.). A primeira feição está localizada no quilômetro 35, apresenta valores de $0,6 \cdot 10^{-3}$ S.I. e seu topo está a 1 km de profundidade. A segunda feição se localiza no quilômetro 42, possui valores de susceptibilidade magnética de $0,5 \cdot 10^{-3}$ S.I. e apresenta profundidade do topo de 4km. No item 5.1 “Interpretação Magnética Regional” dessa dissertação, essas feições são interpretadas como feições magnéticas associadas à zonas de cisalhamentos e falhas que possibilitaram a ascensão de fluidos mineralizantes.

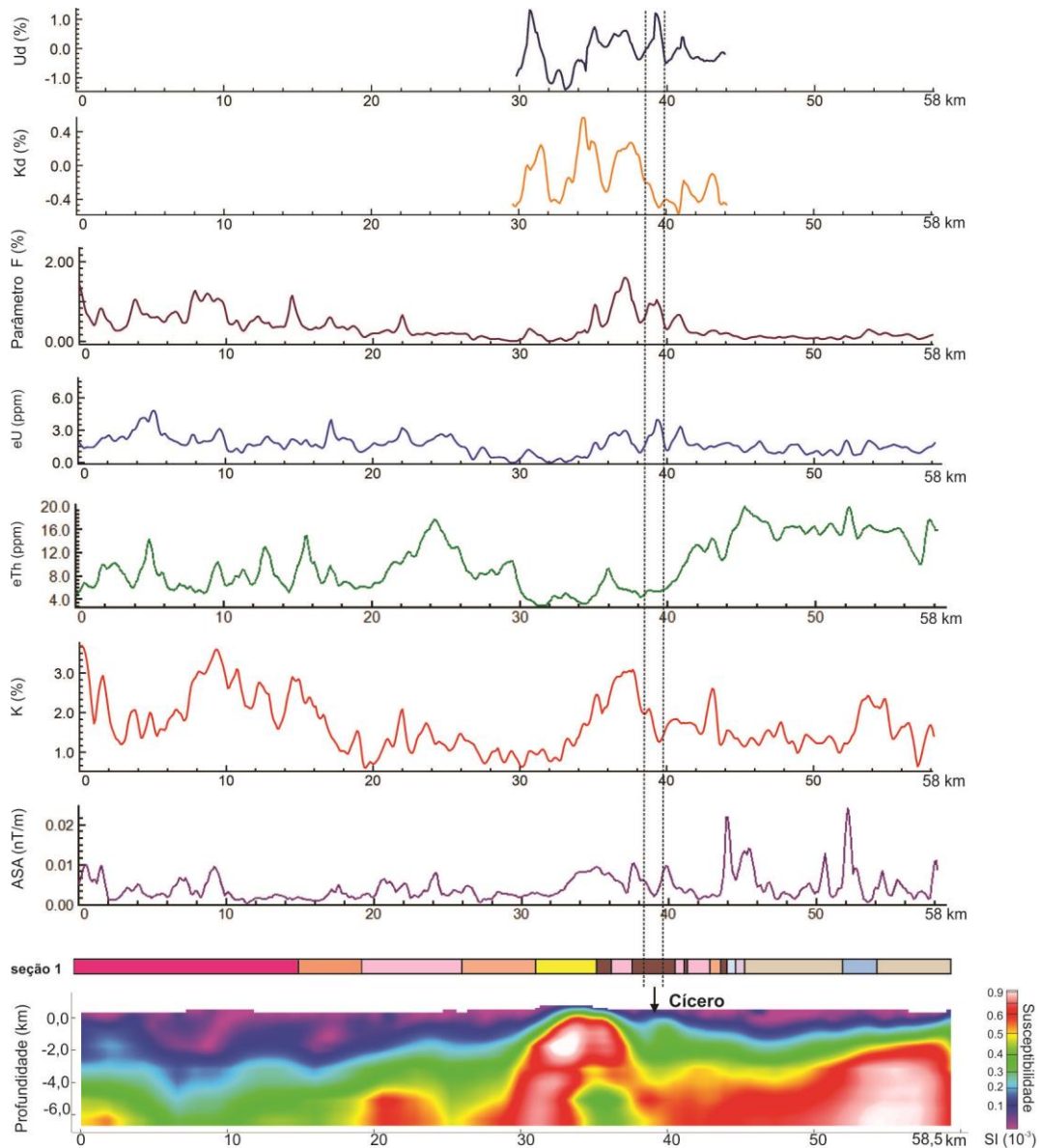


Figura 5.12: Perfis geofísicos da seção que intersecta o garimpo Cícero, com referência à Figura 5.9.

O garimpo do Tucano apresenta um valor de 2,2% de K e um pico bem delimitado de U, que atinge cerca de 3 ppm. Na região do garimpo, o Th possui um dos valores mais baixos da seção, com concentração de 6 ppm (Figura 5.13). A baixa concentração de Th implica em picos elevados de assinaturas de F, K_d e U_d , que delimitam a região do garimpo. Embora o U_d e o K_d apresentem picos no garimpo, o Urânio Anômalo possui valores mais expressivos que o Potássio Anômalo. Quando comparado ao garimpo Cícero, esse garimpo possui valores mais elevados de Parâmetro F (2,34) devido às elevadas concentrações de K na região. O perfil do produto ASA indica um valor de 0,05 nT/m e no MVI são identificadas a noroeste do garimpo feições

magnéticas com valores mais elevados de susceptibilidade (0,5 S.I.) a 1 km de profundidade (Figura 5.13).

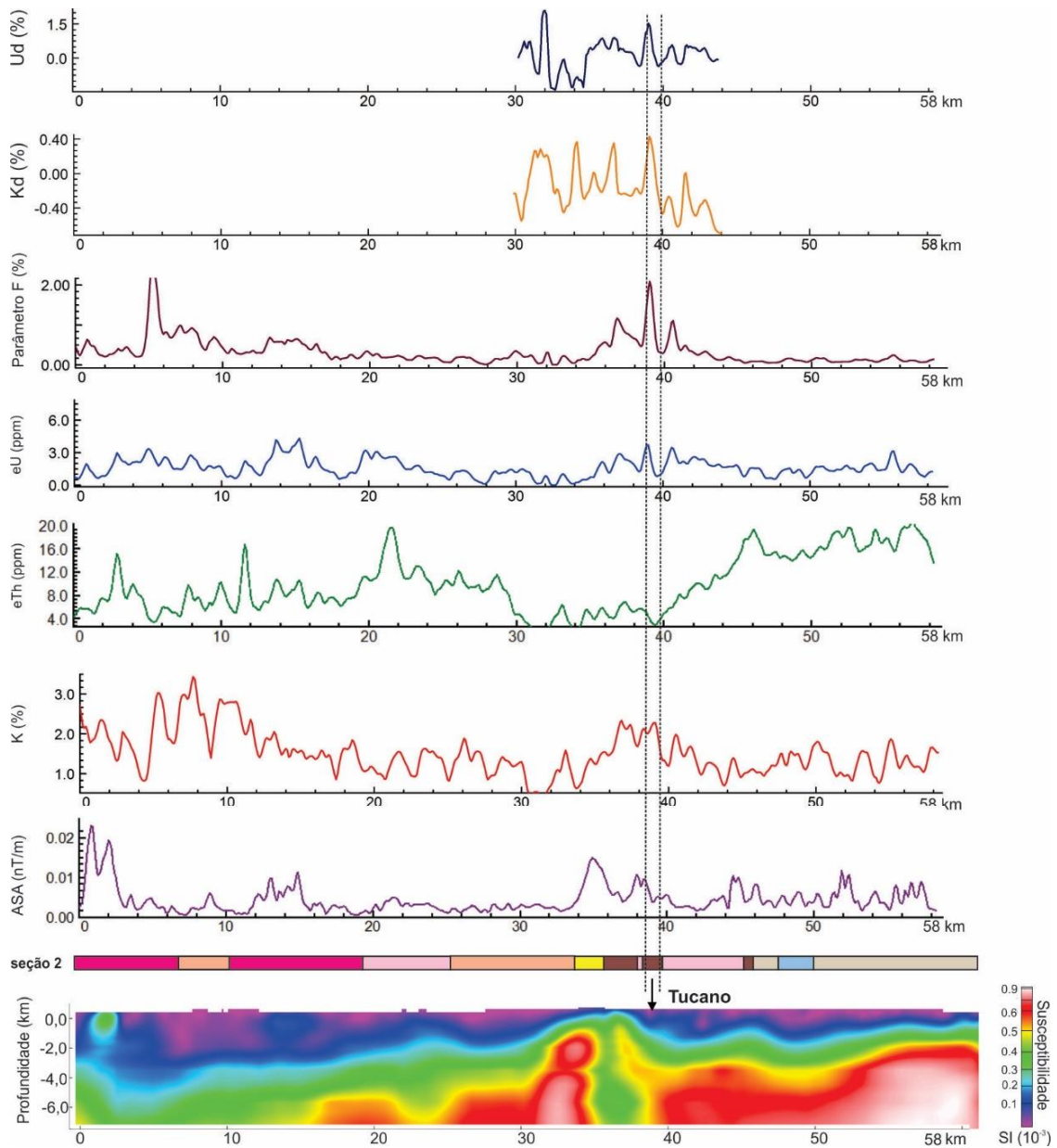


Figura 5.13: Perfis geofísicos da seção que intersecta o garimpo Tucano, com referência à Figura 5.9.

A figura 5.14a é uma representação esquemática do garimpo Tucano, que realça a zona de mineralização em veios localizados na proximidade do contato entre a Suíte Aurumina e a Formação Ticunzal. A figura 5.14b mostra a fenda de tração resultante da deformação ocorrida na região dos garimpos Cícero e Tucano, com movimento cinemático dextral. Na figura 5.14c, o produto magnético ISA interpretado mostra as feições sigmoidais magnéticas regionais que coincidem com a deformação e a

cinemática dextral encontrada em campo. As figuras 5.14d, 5.14e e 5.14f apresentam as assinaturas gamaespectrométricas referentes ao enriquecimento relativo de potássio e urânio na região dos garimpos, onde o Cícero não mostra enriquecimento relativo em K. O Parâmetro F indica feições anômalas contínuas na direção NE-SW, que sugerem continuidade espacial e a possível formação dos garimpos a partir de um mesmo evento geológico.

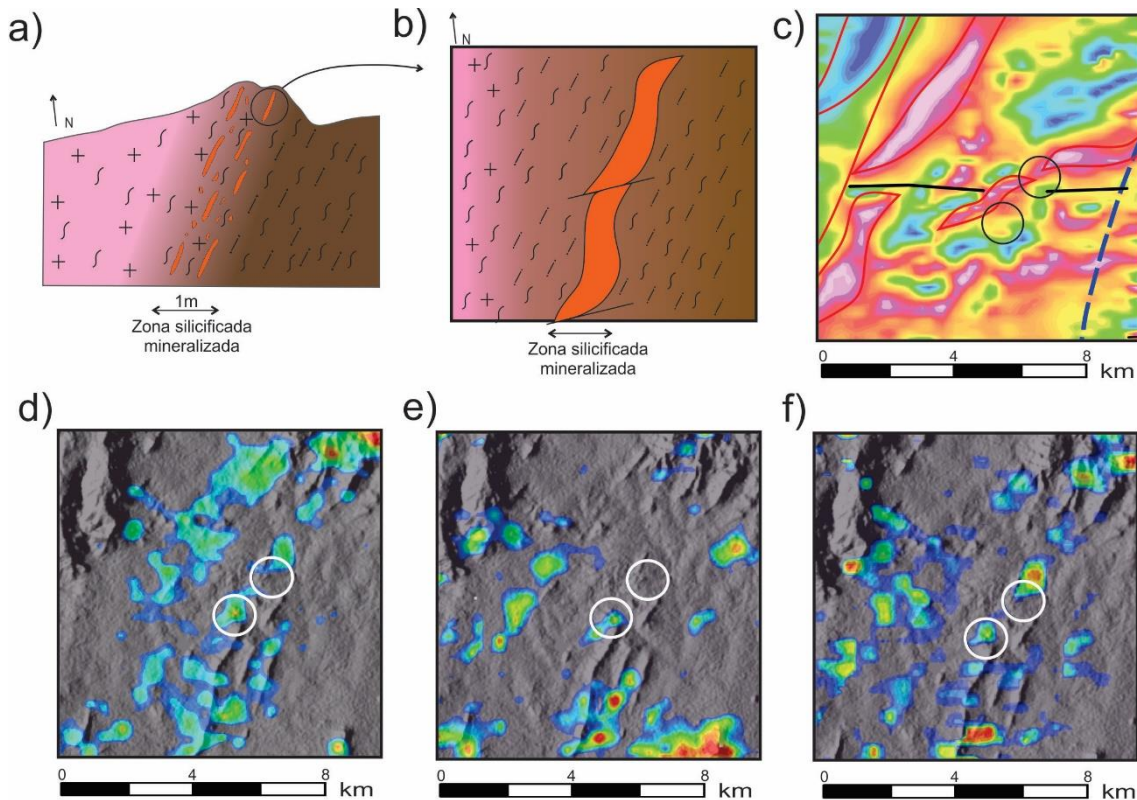


Figura 5.14: Análise em detalhe dos garimpos Cícero e Tucano, indicados por círculos brancos. a) Representação esquemática do garimpo Tucano; b) Perfil esquemático da cinemática dextral encontrado nos garimpos; c) Interpretação magnética do produto ISA; d) Parâmetro F (1,04/2,34); e) Potássio anômalo (-0,3/0,4); f) Urânio anômalo (1,18/1,35).

5.4.2 Garimpo Morro dos Borges

O garimpo Morro dos Borges está localizado em uma zona de cisalhamento, no contato entre o xisto da Formação Ticunzal e granito da Suíte Aurumina. Neste garimpo, o granito está milonitizado e a mineralização está relacionada com o par S-C da zona de cisalhamento, onde a foliação C tem direção N30E e a foliação S, direção N10E. Nesta área, o xisto está alterado devido aos processos hidrotermais que causaram principalmente alterações potássicas. Embora essa alteração seja predominante, a

alteração sílica caracteriza-se como mais importante, pois está associada à mineralização aurífera.

A figura 5.15 mostra os padrões gamaespectrométricos e magnéticos do garimpo Morro dos Borges a partir de perfis e do MVI. Na região do garimpo, ocorrem picos de concentrações dos radioelementos K e U com valores mais elevados que os médios da seção. O pico do K alcança valores de 4 % devido à intensa alteração potássica ocorrida na área. O U apresenta um pico bem delimitado que atinge valores de 3 ppm. As assinaturas apresentadas nos produtos Parâmetro F, K_d e U_d são elevadas, o que confirma a intensa ação dos processos hidrotermais associados a este garimpo (Figuras 5.15 e 5.16). Nos produtos magnéticos MVI e ASA, as assinaturas mostram baixa resposta magnética na região do garimpo.

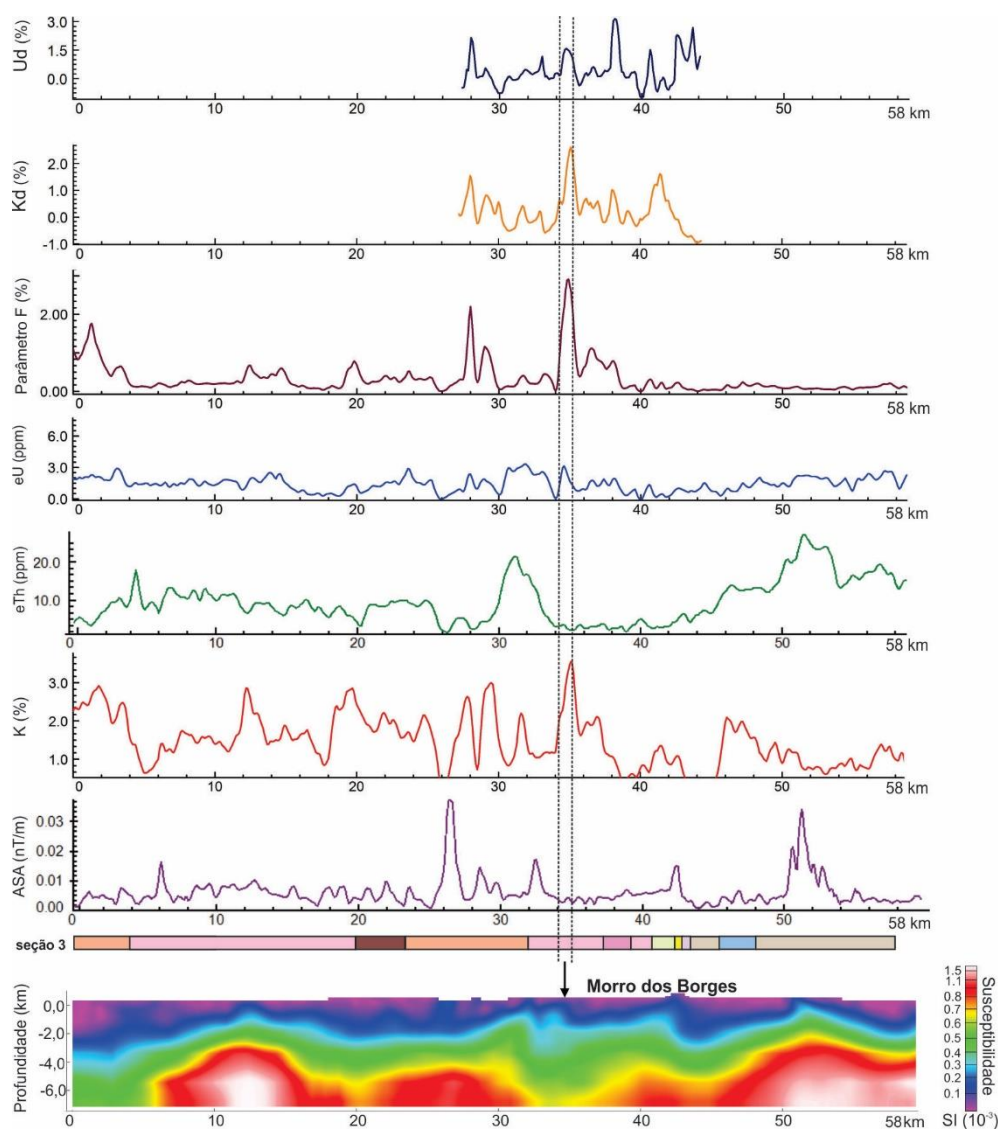


Figura 5.15: Perfis geofísicos da seção que intersecta o garimpo Morro dos Borges com referência à Figura 5.9.

A figura 5.16 mostra os produtos mais relevantes para a compreensão do garimpo Morro dos Borges. Na figura 5.16 a, o afloramento com a zona mineralizada é apresentado no contato entre o xisto da Fm. Ticunzal e o granito da Suíte Aurumina. A figura 5.16b mostra o esquema da fenda de tração ou *tension gash* (Jackson, 1997), com cinemática dextral, com evidência vista em campo. As foliações C e S foram representadas e a zona silicificada mineralizada aparece associada com a foliação S. Na figura 5.16 c, o produto magnético ISA interpretado ressalta a existência de feições sigmoidais, com cinemática dextral, limitadas por lineamentos magnéticos de direção E-W e a proximidade do garimpo com estas feições. Esta característica também foi observada nos garimpos Cícero e Tucano. As figuras 5.16d, 5.16e e 5.16f mostram o enriquecimento de K e U na região do garimpo, respectivamente para o Parâmetro F (2,81%), K_d (2,32%) e U_d (1,45%). Correlacionando os produtos K_d e U_d , observa-se que o enriquecimento em K é mais expressivo que o enriquecimento em U, com indicação para o predomínio da alteração potássica nessa região. A anomalia apresentada no Parâmetro F é muito semelhante à mostrada no produto K_d , o que indica que o potássio é mais expressivo nesta anomalia do que o urânio. Esse garimpo possui os maiores valores de K_d e U_d entre os garimpos da região, o que mostra a eficiência destes produtos na identificação de regiões com relevantes zonas de alteração potássica.

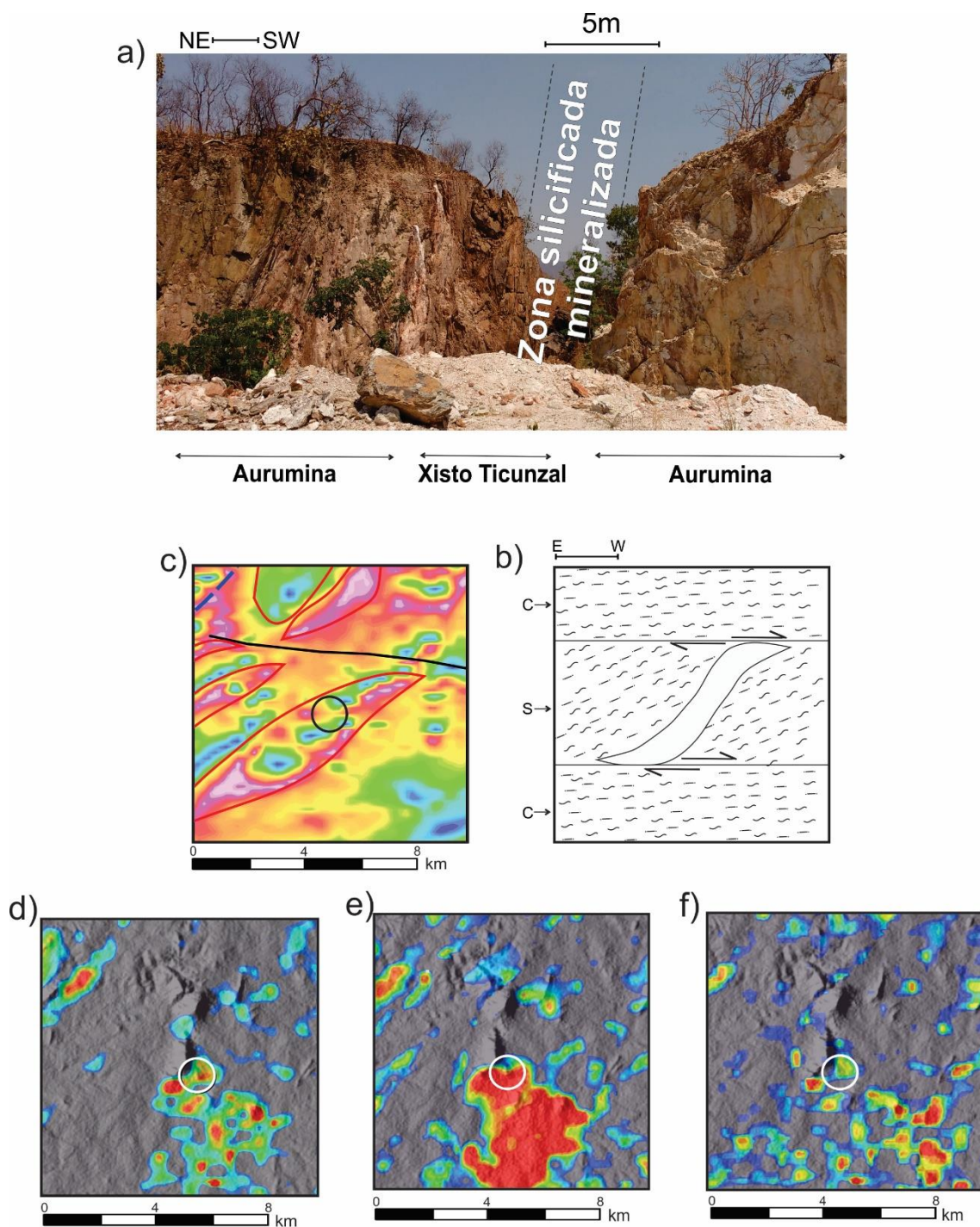


Figura 5.16: Análise detalhada do garimpo Morro dos Borges, indicado pelo círculo branco. a) Foto do local de formação da mineralização; b) Fenda de tração, cinemática dextral, encontrada no xisto; c) Assinatura magnética no ISA contendo a interpretação magnética; d) Parâmetro F (2,81); e) Potássio anômalo (2,32); f) Urânio anômalo (1,45).

5.4.3 Garimpo Novo Horizonte

O garimpo Novo Horizonte está localizado próximo ao contato entre o xisto da Formação Ticunzal e o granito da Suíte Aurumina (Monzogranito-Au 2), onde a

mineralização se hospeda no xisto. A alteração hidrotermal predominante é do tipo silicificação, com ocorrências de arsenopirita, malaquita, hematita e ocasionalmente azurita.

A assinatura gamaespectrométrica deste garimpo é distinta das apresentadas pelas ocorrências anteriores. O Novo Horizonte possui concentrações de K e U inferiores às médias da seção, com valores de 0,6 % para o potássio e de 1,5 ppm para o U. As concentrações destes elementos são baixas quando comparados às dos demais garimpos. A concentração de Th atinge valores de 6 ppm. A região do garimpo não é enriquecida em K e U, representado por baixos valores nos produtos Parâmetro F (0,17%), Kd (0,08 %) e Ud (0,54 %). Os produtos ASA e MVI também apresentam padrões magnéticos baixos, entretanto, no produto MVI, o garimpo mostra proximidade a oeste com uma feição de alta susceptibilidade magnética ($1,2 \cdot 10^{-3}$ SI) (Figura 5.17).

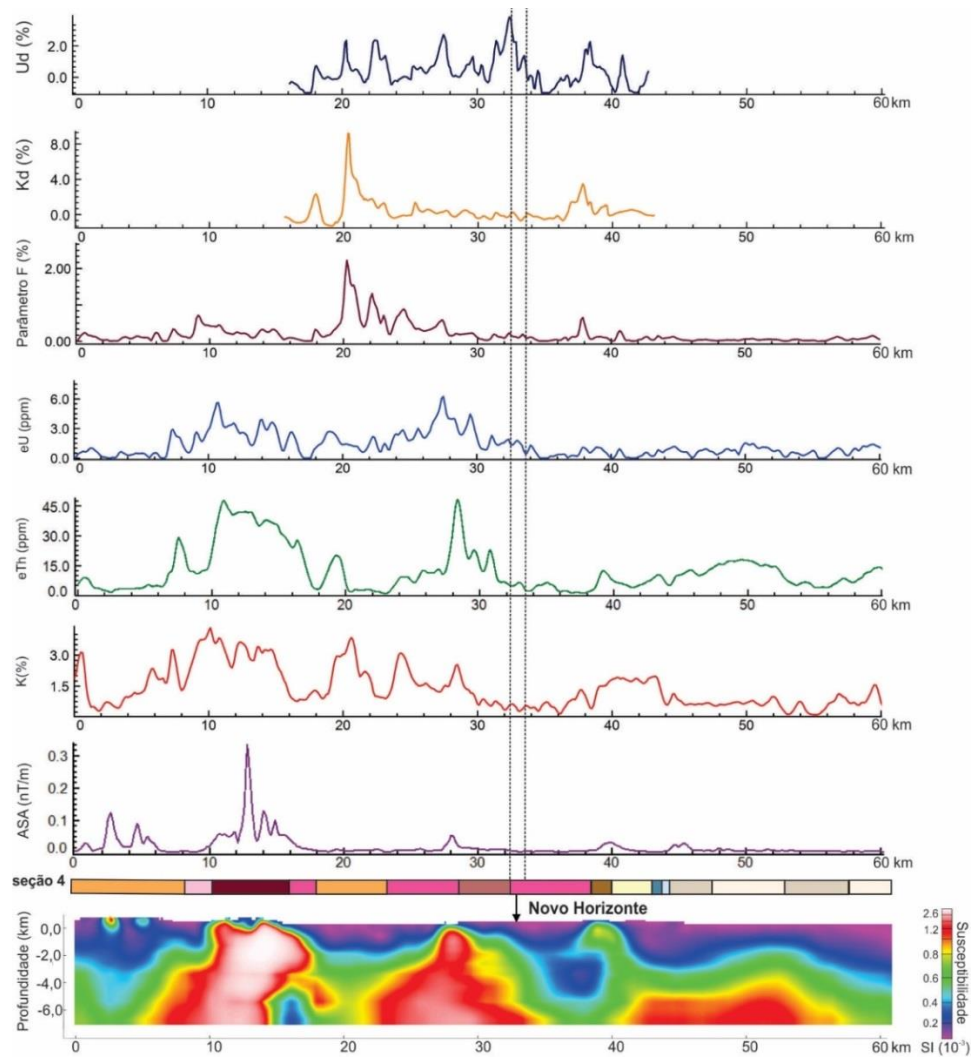


Figura 5.17: Perfis geofísicos da seção que intersecta o garimpo Novo Horizonte, com referência à Figura 5.9.

A figura 5.18 é composta pelos produtos que apresentaram maior relevância na compreensão do padrão geofísico do garimpo Novo Horizonte. A interpretação do ISA mostra que este garimpo apresenta comportamento similar ao dos estudados anteriormente, localizado próximo a feições sigmoidais com cinemática dextral. Entretanto, nesta região os valores de inclinação magnética destas feições variam entre positivos e negativos (Figura 5.18a). A Deconvolução de Euler apresenta estimativas de profundidades das fontes magnéticas próximas ao garimpo, indicando lineamentos magnéticos com direção E-W que intersectam o garimpo e possuem profundidade estimada entre 600 m e 1200 m (Figura 5.18b). As figuras 5.18c e 5.18d mostram, respectivamente, que a região onde está o garimpo não apresenta valores anômalos no Parâmetro F e no K_d (0,08 %). A figura 5.18e exibe resposta elevada no U_d (0,54 %) para a região. As baixas respostas nos Parâmetro F e no K_d podem indicar que estes produtos não são eficientes na identificação de zonas de alteração sílica.

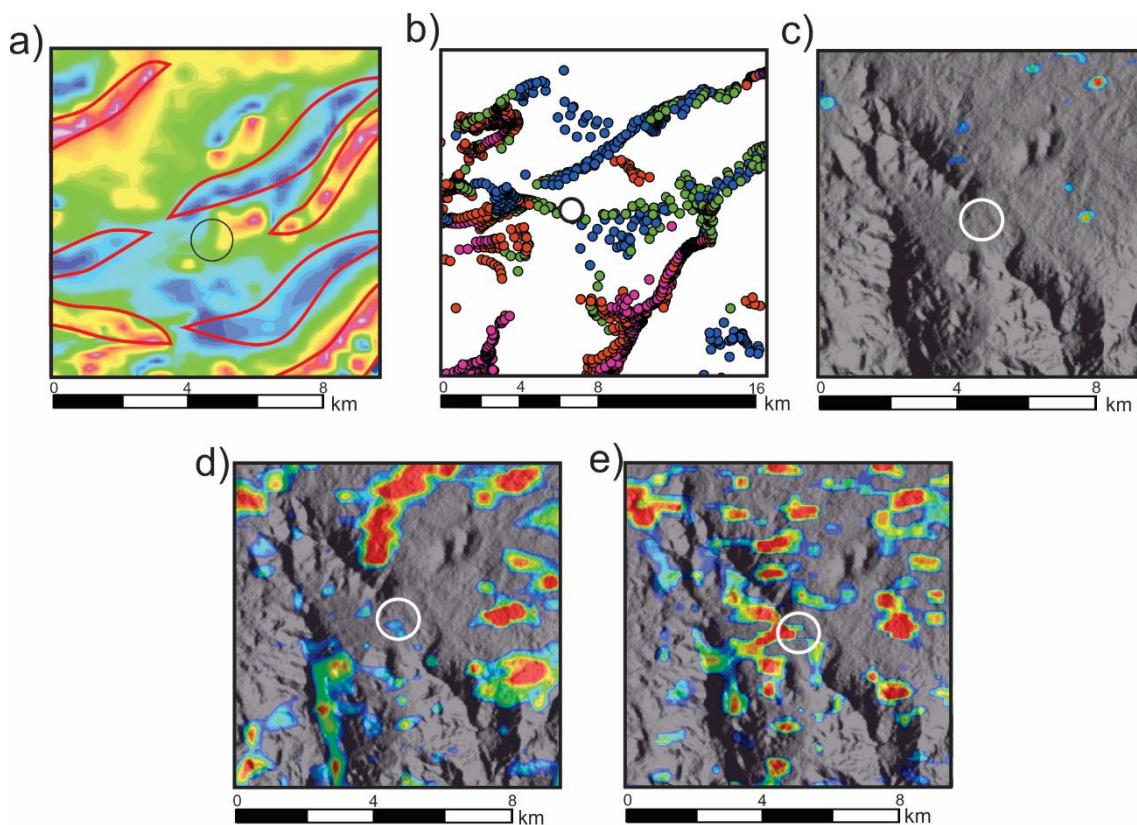


Figura 5.18: Análise detalhada do garimpo Novo Horizonte, indicado pelo círculo branco. a) Assinatura magnética no ISA contendo a interpretação magnética; b) Estimativas de profundidade das fontes magnéticas a partir da Deconvolução de Euler c) Parâmetro F (0,17); d) Potássio anômalo (0,08); e) Urânio anômalo (0,54).

5.4.4 Mina Aurumina

A mina Aurumina é composta por diferentes veios denominados de VL 1.2, VL 1.3 e VL 1.6, localizados também em zona de cisalhamento no contato entre xisto grafitoso da Formação Ticunzal e granito da Suíte Aurumina. Os dois primeiros veios estão localizados na cava principal, suas mineralizações são de formação tardia, controladas pela foliação C e estão dispostas em filões que acompanham os níveis de grafita. Nesse caso, o ouro é transportado de um ambiente oxidante e depositado em um ambiente redutor. Os veios são sub-horizontais em superfície e mergulham 40° interceptando o granito da Suíte Aurumina. Esse ambiente é rico em sulfetos de Ag, Cu, Zn, Pb, As, Cd, Sb, Bi. A alteração mais relevante nesta região é a alteração sílica (Cunha, 2013).

A mina Aurumina está localizada sobre uma feição a cerca de 2 km de profundidade que apresenta alta susceptibilidade magnética com valores máximos de 0,0119 SI. Em superfície, essa feição aflora a noroeste da mina a uma distância aproximada de 5 km (Figura 5.19). A concentração de tório na região é maior do que nos demais garimpos com valores na faixa de 25 ppm. Os valores de concentração de potássio são baixos aproximadamente 1,6 %. A mina corresponde a um pico de urânio que atinge concentrações de 4 ppm. Os altos valores de U podem estar associados ao ambiente redutor, que atua na diminuição de mobilidade deste elemento que conseqüentemente sofrerá precipitação. Os produtos K_d , U_d e Parâmetro F são normalizados a partir do tório e portanto, a alta na concentração deste radioelemento na área reflete em respostas pouco expressivas nesses produtos. A baixa concentração de potássio associada aos altos valores de tório resulta em valores negativos no produto K_d (Figura 5.19).

Na figura 5.19 é marcada uma área-alvo indicada por uma interrogação e delimitada por traços vermelhos pontilhados. Esta área possui assinaturas geofísicas semelhantes às da mina Aurumina. Assim como a mina, a área alvo apresenta valores pouco expressivos no Parâmetro F (0,11 %), no K_d (-0,46 %) e no U_d (0,12 %).

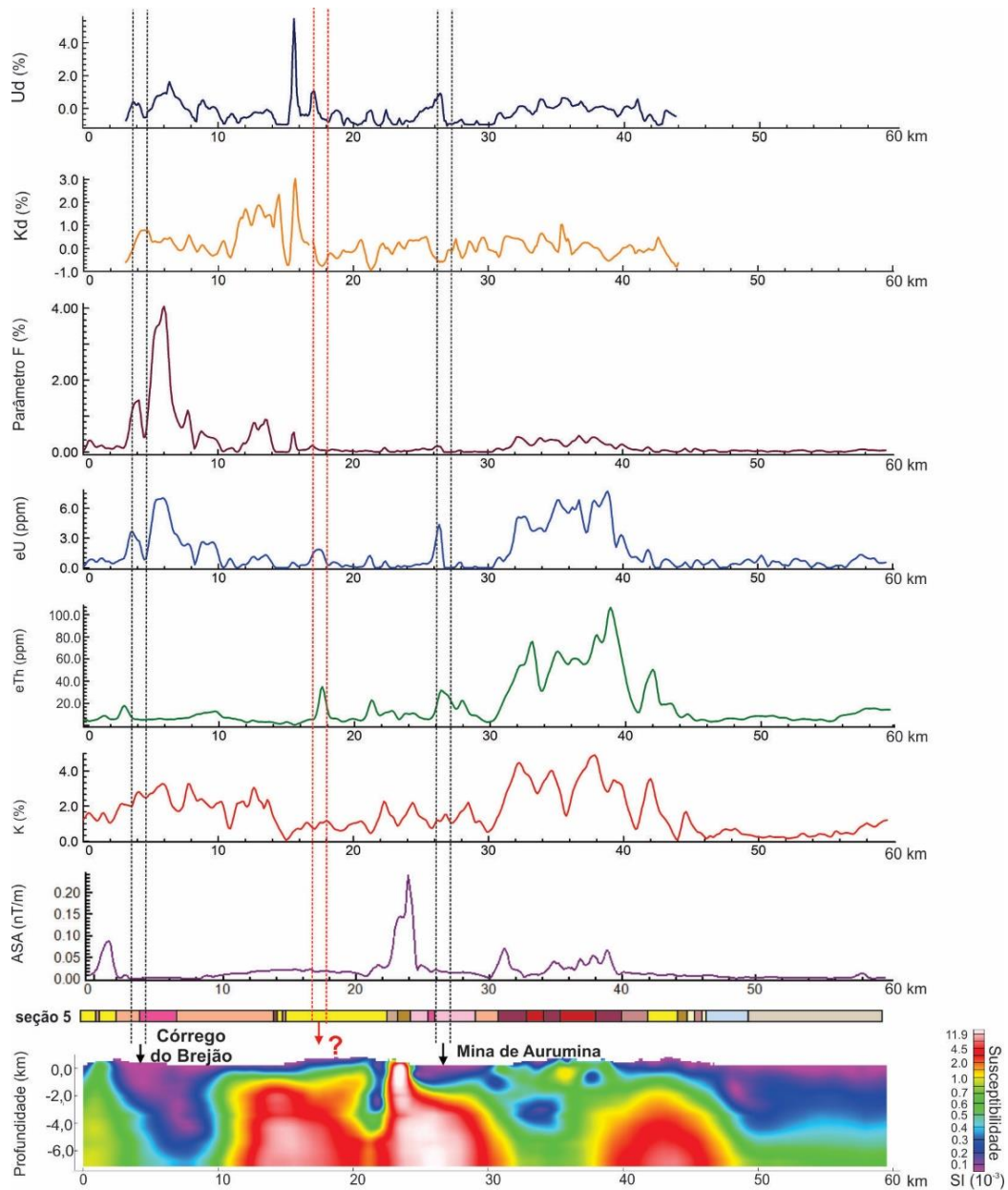


Figura 5.19: Perfis geofísicos da seção que intersecta o garimpo Córrego do Brejão, a Mina Aurumina e uma região com respostas geofísicas muito semelhantes a da mina. Com referência à Figura 5.9.

A figura 5.20a ilustra o perfil esquemático da cava principal da mina, que engloba os veios VL 1.2 e VL 1.3. A cava principal está preenchida com água e a mineralização está disposta em um veio localizado no contato da Formação Ticunzal com a Suíte Aurumina (Sienogranito-Au 1). A figura 5.20b apresenta o esquema da fenda de tração, com cinemática dextral, observado em campo e concordante com os garimpos Cícero, Tucano, Morro dos Borges e Novo Horizonte. A figura 5.20c mostra a interpretação do produto ISA, onde não há provável correlação entre as estruturas magnéticas identificadas e a mina. No Parâmetro F (Figura 5.20d) e no K_d (Figura

5.20e) não há assinaturas expressivas. Apenas o produto U_d sugere valores anômalos para parte da área da mina Aurumina (Figura 5.20f).

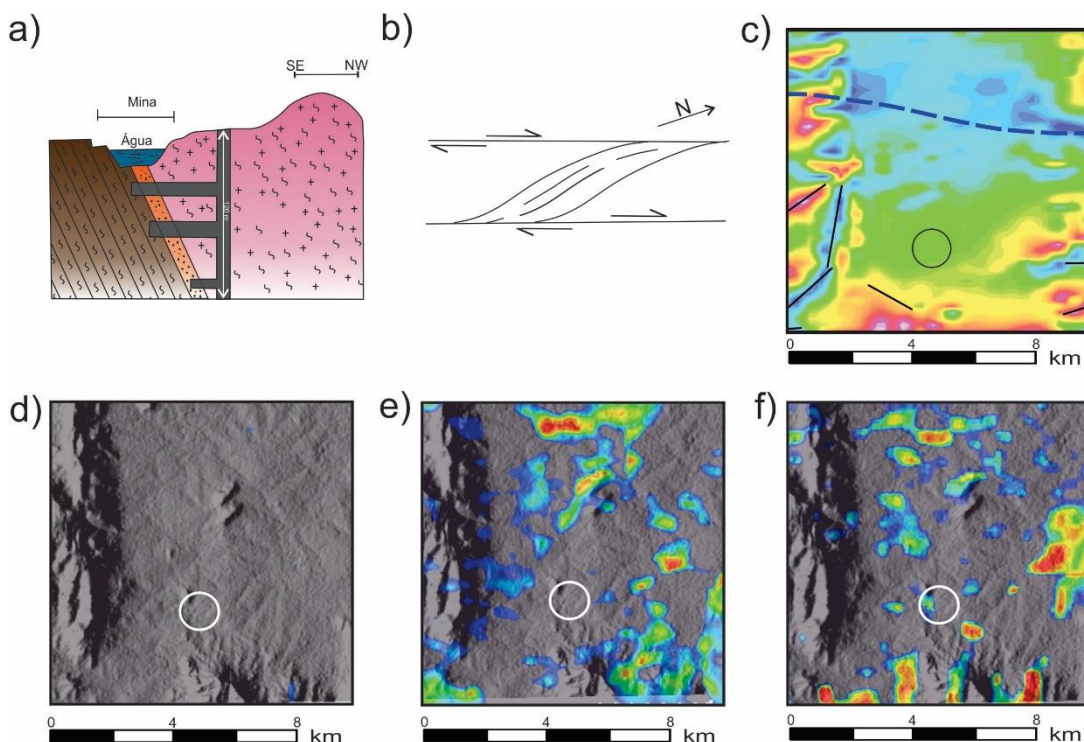


Figura 5.20: Análise detalhada da mina Aurumina, indicada pelo círculo branco. a) Perfil esquemático do setor da mina Aurumina; b) Esquema da fenda de tração, cinemática dextral, na região da mina; c) Assinatura magnética no ISA contendo a interpretação magnética; d) Parâmetro F (0,2 %); e) Potássio anômalo (-0,3 %); f) Urânio anômalo (0,3 %).

5.4.5 Garimpo Córrego do Brejão

O Córrego do Brejão é um garimpo aurífero com minério acumulado em cascalhos, cuja fonte da mineralização é desconhecida. Nesta região existem ocorrências de uraninita, torita e monazita.

A seção que intersecta este garimpo é a mesma que engloba a mina Aurumina e seus perfis geofísicos estão representados na figura 5.19.

O Córrego do Brejão está situado sobre uma feição com baixa susceptibilidade magnética ($0,1 \cdot 10^{-3}$ SI) que atinge profundidade de 6 km. Esse garimpo está localizado próximo ao contato entre o monzogranito (Au 2) e o tonalito (Au 3) da Suíte Aurumina, que apresentam diferenças nas concentrações dos radioelementos, expressas principalmente no urânio. A concentração do K apresenta valores de 3%, enquanto a do Th está na faixa dos 5 ppm. Estes dois radioelementos mostram valores semelhantes aos encontrados nos outros garimpos. O urânio sofre uma variação de 0,5 a 3 ppm, com

valores mais altos associados ao tonalito da Suíte Aurumina. A variação nos valores deste elemento reflete na assinatura do Parâmetro F e do U_d , que correspondem respectivamente a faixa de valores de 0,2 % a 1,5 % e -0,5 % a 0,5 %. Nos dois produtos há um forte pico próximo ao garimpo, que corresponde a anomalia de urânio denominada Morro de Caldas. O produto K_d possui valores próximos a 0,9 % (Figura 5.19).

A figura 5.21a contém a interpretação oriunda do produto ISA, que não indica correlação direta entre feições magnéticas e o garimpo Córrego do Brejão. As assinaturas elevadas no Parâmetro F (Figura 5.21b), no K_d (Figura 5.21c) e no U_d (Figura 5.21d) correspondem a anomalia de urânio Morro de Caldas descrita no item 5.2.2 deste capítulo. Na figura 5.21e constam as estruturas geológicas mapeadas sobre o produto U_d , que relaciona a localização do garimpo com um par de cisalhamento composto por falhas indiscriminadas. Essa correlação sugere que as estruturas condicionaram esta anomalia servindo como corredores para ascensão e circulação dos fluidos ou como uma barreira física. A fonte primária deste garimpo coluvionar é desconhecida, no entanto a interpretação inferida deste par de cisalhamento associado com os produtos geofísicos é de que esta anomalia pode estar relacionada com a fonte primária deste garimpo.

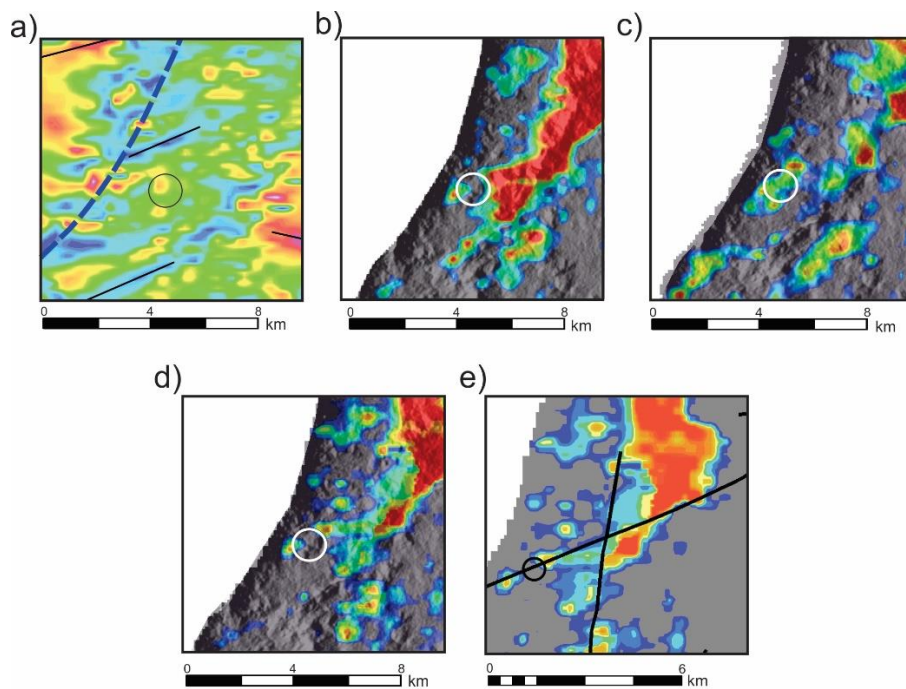


Figura 5.21: Análise detalhada do garimpo Córrego do Brejão, indicado pelo círculo branco a) Assinatura magnética no ISA contendo a interpretação magnética; b) Parâmetro F (0,9); c) Potássio anômalo (0,9); d) Urânio anômalo (-0,1); e) Anomalia de urânio e estruturas geológicas mapeadas.

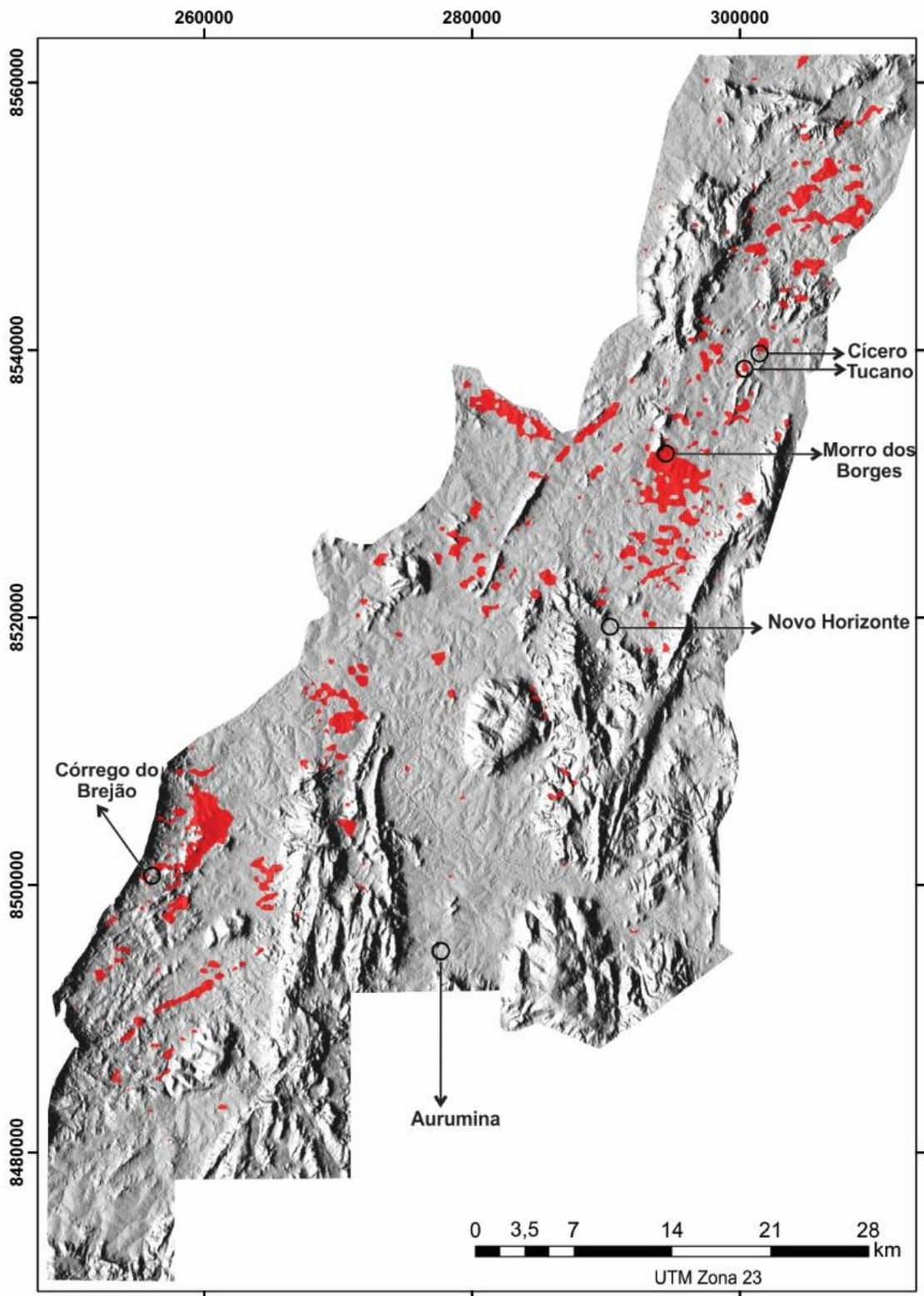
5.5 Interpretação dos dados geofísicos integrados

Na integração dos dados geofísicos foram consideradas as assinaturas magnéticas e gamaespectrométricas observadas na análise dos garimpos. Como suas respostas geofísicas foram distintas, optou-se por ajustar o modelo ao maior número possível de garimpos.

A magnetometria foi inserida no modelo a partir da interpretação das feições sigmoidais. A análise destas feições em conjunto com os garimpos mostrou que as menores feições aparecem próximas aos garimpos Cícero, Tucano, Morro dos Borges e Novo Horizonte, enquanto a maior, que corresponde a quase toda a Faixa Central, não engloba apenas a mina Aurumina. Dessa forma foi interpretado que a presença dos garimpos, onde em alguns foram observadas fendas de tração, está relacionada com as feições sigmoidais magnéticas. Portanto, no modelo foi adotado que as regiões próximas às feições sigmoidais magnéticas apresentam maior probabilidade de ocorrência aurífera.

A informação oriunda da gamaespectrométrica foi o enriquecimento de K e U em relação ao Th. A análise da assinatura gamaespectrométrica dos garimpos associou os garimpos Cícero, Tucano, Morro dos Borges e Córrego do Brejão a áreas enriquecidas em potássio e urânio. Portanto, o modelo foi gerado para regiões relacionadas com altos valores nos produtos Parâmetro F, K_d e U_d .

O modelo gerado a partir da Lógica Fuzzy e das informações adquiridas nesta dissertação é apresentado na figura 5.22.



■ Áreas correlacionadas com o modelo *Fuzzy*

Figura 5.22: a) Áreas anômalas para o modelo Fuzzy adotado.

O modelo gerou um Mapa Geofísico Integrado para Potencial Mineral Aurífero com regiões destacadas para os garimpos Cícero, Tucano, Morro dos Borges e Córrego

do Brejão. Embora o último não apareça exatamente sobre uma região anômala, ele está relacionado com lineamentos estruturais que acompanham a direção de uma grande anomalia (Figura 5.21e). O garimpo Novo Horizonte e a mina Aurumina não apresentaram correlação com o modelo indicado, o que ressalta as diferenças entre as assinaturas geofísicas que levaram à classificação dos garimpos em grupos.

As duas maiores anomalias destacadas aparecem próximas a garimpos: a primeira relacionada com o Córrego do Brejão e a segunda próxima ao Morro dos Borges (Figura 5.22). A anomalia próxima ao Córrego do Brejão está relacionada principalmente com altos valores de urânio e foi mapeada pela Nuclebrás como anomalia Morro de Caldas. A anomalia próxima ao Morro dos Borges não aparece descrita na literatura, entretanto este garimpo apresenta alteração hidrotermal potássica significativa que possivelmente está relacionada com a região anômala.

A figura 5.23 relaciona o modelo gerado com a geologia da área, onde aparecem em destaque os xistos da Formação Ticunzal e os tonalitos e sienogranitos da Suíte Aurumina. As áreas anômalas aparecem concentradas nestas três litologias, sendo possível diferenciar a resposta de cada uma delas. O xisto está relacionado com anomalias bem distribuídas que apresentam os maiores valores de relação com a *Fuzzy* (0,72 a 1,21). O sienogranito apresenta anomalias concentradas próximo ao garimpo Morro dos Borges, que apresenta relevante alteração hidrotermal potássica com a área de influência demarcada no modelo da *Fuzzy*. No monzogranito, as anomalias estão mais espaçadas e possuem valores menores (0,43 a 0,91) na relação com a *Fuzzy*. Essas diferenças ressaltadas nas litologias são provenientes apenas das respostas geofísicas, pois a geologia não foi incluída neste modelo.

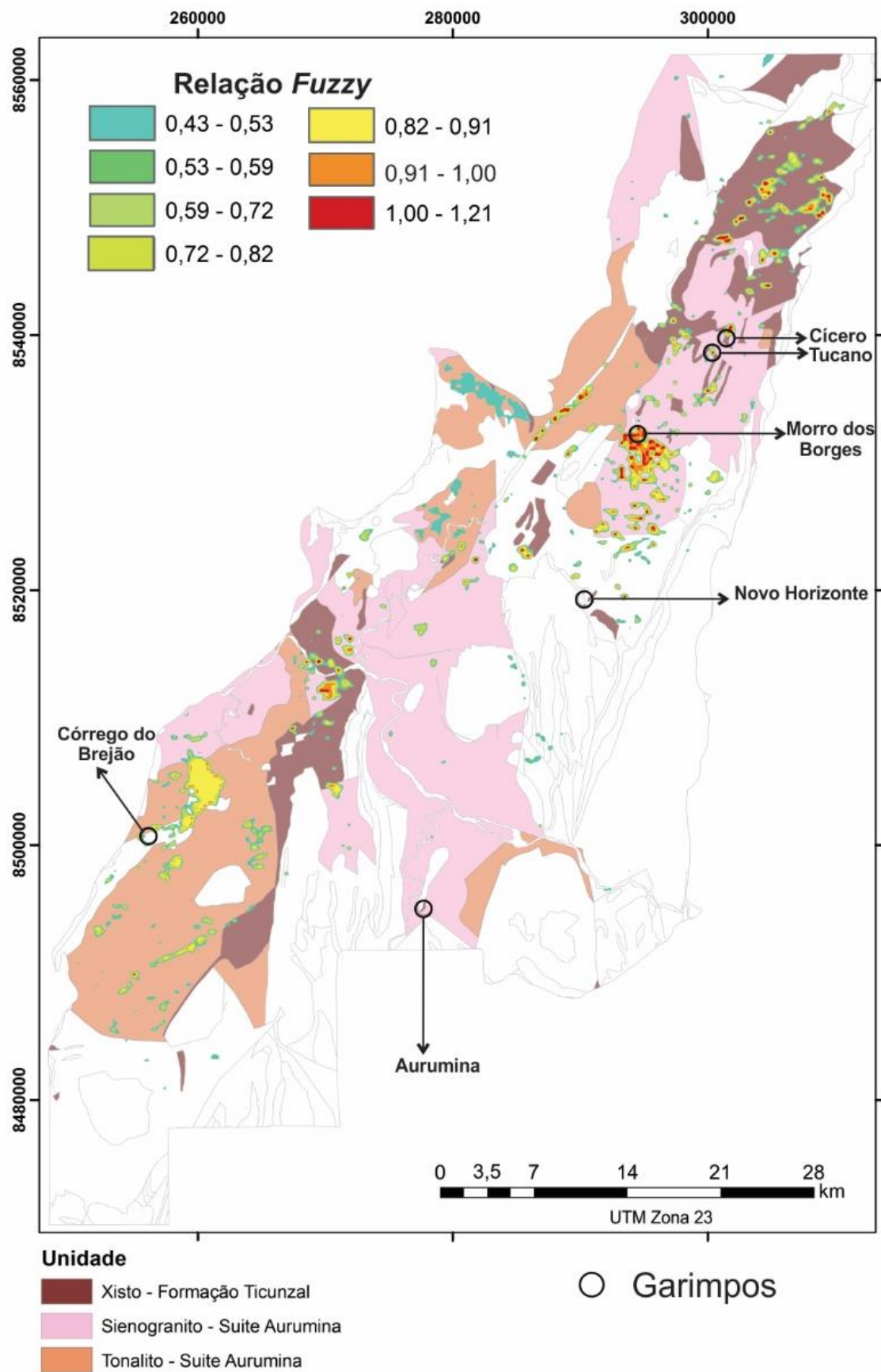


Figura 5. 23: Correlação entre o modelo gerado pela Lógica *Fuzzy* e a litologia.

Capítulo 6 - Conclusões

A área foi classificada em seis domínios magnéticos compostos por lineamentos magnéticos com características distintas. As relações de corte destes lineamentos marcam a ordem de acontecimentos geológicos e sugerem a influência dos eventos Transamazônico e Brasileiro atuando principalmente nas direções NW-SE e NE-SW. Entre os domínios magnéticos se destaca o localizado no centro da área, que apresenta geometria fractal composta por feições sigmoidais, com cinemática predominantemente dextral, e coincidente com uma grande zona de cisalhamento mapeada. Os garimpos Cícero, Tucano, Morro dos Borges e Novo Horizonte estão localizados próximos a estas feições sigmoidais magnéticas, o que pode indicar sua correlação com a formação de depósitos auríferos.

A Faixa Central coincide com uma zona de cisalhamento mapeada e apresenta uma assinatura geofísica distinta do restante da área de estudo. Sua resposta magnética apresenta textura lisa e os limites são bem marcados nos produtos magnéticos ASA e ISA. Os domínios gamaespectrométricos foram afetados pela ação dos eventos deformacionais, apresentando formas alongadas na direção NE-SW. Em relação à concentração dos radioelementos, é observado um enriquecimento simultâneo de potássio e urânio em relação ao tório. O enriquecimento se concentra principalmente na Suíte Aurumina e está limitado pelo relevo e por falhas.

A Faixa Central é limitada pelas feições magnéticas 1 e 2, com direção aproximada N30E, que apresentam expressão em superfície e em subsuperfície. O produto MVI mostrou que estas feições não afloram nas regiões onde a litologia corresponde ao Grupo Bambuí. Isso pode indicar que este grupo, por ser mais recente, encobriu as expressões superficiais da zona de cisalhamento, localizadas no embasamento ou rochas da base do Grupo Bambuí.

O produto Urânio Anômalo (U_d) aplicado para a Faixa Central foi validado por meio de anomalias de urânio mapeadas pela Nuclebrás e pela CNEN. O produto apresentou respostas para as anomalias Morro de Caldas, Alecrim, as localizadas ao sul de Campos Belos e as situadas ao redor do Maciço Soledade. Esta alta correlação entre os produtos oriundos de dados aerogamaespectrométricos e a análise química de amostras de campo mostra o potencial da gamaespectrometria como ferramenta para indicar áreas afetadas por ação hidrotermal, em ambientes redutores (xisto da Fm. Ticunzal).

Os garimpos auríferos estão localizados na Faixa Central e apresentam alinhamento condizente com o da zona de cisalhamento na direção NE-SW. Com base nas assinaturas magnéticas, a Faixa Central foi dividida em dois subdomínios magnéticos que agrupou os garimpos Cícero, Tucano e Morro dos Borges na porção norte e os garimpos Novo Horizonte e Córrego do Brejão e a mina Aurumina, ao sul.

Os garimpos apresentam respostas distintas nos produtos Parâmetro F, K_d e U_d . Os garimpos Cícero, Tucano e Morro dos Borges apresentaram valores elevados, o garimpo Novo Horizonte e a mina Aurumina não apresentam valores expressivos e o Córrego do Brejão possui um comportamento distinto dos outros. Dessa forma, as assinaturas magnetométricas e gamaespectrométricas sugerem a divisão dessas ocorrências em grupos: i) Garimpos do Norte: Cícero, Tucano e Morro dos Borges; ii) Garimpos do Sul: Novo Horizonte e mina Aurumina; iii) Garimpo Córrego do Brejão.

No grupo Garimpos do Norte, o que apresentou melhor resposta para os produtos Parâmetro F, K_d e U_d foi o Morro dos Borges. Embora todos os garimpos deste grupo tenham sido afetados por alteração hidrotermal, o Morro dos Borges apresenta a alteração potássica mais significativa. Isto mostra a eficiência dos produtos gamaespectrométricos na identificação de áreas com alteração hidrotermal potássica.

Os Garimpos do Sul apresentaram resposta mais expressiva no produto U_d . Os dois garimpos deste grupo apresentam grafita, que é um indicativo de ambiente redutor e onde é comum o elemento urânio se tornar solúvel e se precipitar, o que justifica o enriquecimento de urânio.

Por se tratar de um garimpo coluvionar, o Córrego do Brejão foi analisado separadamente. Sua assinatura gamaespectrométrica é associada à grande anomalia de urânio Morro de Caldas, localizada nas proximidades do garimpo. Esta anomalia é intersectada por um par de cisalhamento composto por falhas na direção NNE-SWS e ENE-WSW, que limita e divide a anomalia em porções norte e sul. A fratura com direção ENE-WSW se estende até a região do garimpo. Com base nestas feições estruturais e nos produtos geofísicos, foi interpretado que a área fonte desta ocorrência, até então desconhecida, pode estar relacionada à anomalia Morro de Caldas.

Devido às diferenças de assinaturas geofísicas dos garimpos, não foi possível gerar um modelo *Fuzzy* com alta correlação para todas as ocorrências. O modelo gerado nesta dissertação teve como base as assinaturas geofísicas do garimpo Córrego do Brejão e, principalmente, do grupo Garimpos do Norte. O modelo destaca as diferenças

entre as assinaturas dos garimpos e corrobora com a proposta de divisão das ocorrências em grupos. Este modelo realça os padrões distintos para as litologias, com destaque para o tonalito e o sienogranito da Suíte Aurumina e o xisto da Formação Ticunzal. Estas litologias apresentam alta correlação com o modelo criado a partir da Lógica *Fuzzy*, aqui denominado de Mapa Geofísico Integrado para Potencial Mineral Aurífero.

Referências

- AIRO, M.-L.; MERTANEN, S. **Magnetic signatures related to orogenic gold mineralization, Central Lapland Greenstone Belt, Finland.** Journal of Applied Geophysics, v. 64, n. 1, p. 14–24, 2008. Elsevier.
- AISENGART, T. **3D Inversion of Magnetic Data at Low Magnetic Latitudes.** 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 26–29 August 2013. p. 326–330, 2013. Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society.
- ALMEIDA, F. F. M. DE et al. **Brazilian structural provinces: an introduction.** Earth-Science Reviews, v. 17, n. 1–2, p. 1–29, 1981. Elsevier.
- ALVARENGA, C. J. S. et al. **Relatório final das folhas Monte Alegre de Goiás, Cavalcante e Nova Roma.** Programa Geologia do Brasil (PGB/CGB). Escala 1:100.000. Goiânia: CPRM; UnB, 2007.
- ALVARENGA, C. J. S. et al. **Mapa Geológico Folha Nova Roma, SD.23-V-C-VI.** Programa Geologia do Brasil (PGB/CGB). Escala 1:100.000. Goiânia: CPRM; UnB, 2007.
- ARAÚJO FILHO, J. O. DE. **The Pirineus Syntaxis: an example of the intersection of two brasiliano Fold-Thrust belts in central Brazil and its implications for the tectonic evolution of western Gondwana.** Revista Brasileira de Geociências, v. 30, n. 1, p. 144–148, 2000.
- BARBOSA, R. D.; PEREIRA, J. G. **Inversão 3D de dados Magnéticos na Região de Mara Rosa-Goiás, Brasil, utilizando Geosoft VOXI.** 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 26–29 August 2013. p. 520–525, 2013. Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society.
- BARBOSA, V. C. F.; SILVA, J. B. C.; MEDEIROS, W. E. **Stability analysis and improvement of structural index estimation in Euler deconvolution.** Geophysics, v. 64, n. 1, p. 48–60, 1999. Society of Exploration Geophysicists.
- BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS.** Computer methods in the Geosciences, v. 13, p. 398, 1994.

BOTELHO, N. F. et al. **Mapa Geológico Folha Cavalcante, SD.23-V-C-V**. Escala 1:100.000. Goiânia: CPRM; UnB, 2007.

BOTELHO, N. F. et al. **Suíte Aurumina: Uma suíte de granitos paleoproterozoicos, peraluminosos e sin-tectônicos na Faixa Brasília**. SBG/Núcleo Centro Oeste e Minas Gerais, Simpósio de Geologia do Centro Oeste, v. 7, p. 49, 1999.

BOTELHO, N. F. et al. **The Paleoproterozoic peraluminous Aurumina granite suite, Goiás and Tocantins, Brazil: geological, whole rock geochemistry and U-Pb and Sm-Nd isotopic constraints**. In: ALKMIM, F.F., NOCE, C.M. The Paleoproterozoic record of the São Francisco Craton, Brazil. Field guide and abstracts. IGCP: Paleoproterozoic Supercontinents & Global Evolution, v. 509, p. 92, 2006.

CAMPOS, D. S. DE. **Caracterização dos alvos cascavel e tinteiro, Greenstone Belt de Faina, GO: implicações na identificação de novos alvos potenciais para exploração mineral**. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 72p., 2016.

CHIARINI, M. F. N. et al. **Proposição de Métodos de Representação e de Interpretações de Aerogamaespectrometria e Aeromagnetometria**. Brasília: CPRM, Relatório Interno, 29p., 2013.

CORDANI, U. G. et al. **Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras**. Petrobrás, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello, Setor de Informação Técnica e Propriedade Industrial, v. 15, 1984.

CUADROS, F. A. et al. **The peraluminous Aurumina Granite Suite in central Brazil: an example of mantle-continental crust interaction in a Paleoproterozoic cordilleran hinterland setting**. Precambrian Research, v. 299, p. 75 -100, 2017. Elsevier.

CUNHA, L.M. **Gênese e controle da mineralização de Au e Ag associada a granitos peraluminosos na mina de Aurumina, Goiás**. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Brasília, 103 p., 2006.

D'EL-REY, L. J. H.; SENNA FILHO, V. **Ouro em sericita-quartzo hidrotermalitos controlados por cisalhamentos conjugados na região de Cavalcante (Go), Brasil Central**. Revista Brasileira de Geociências, v. 28, n. 3, p. 405–408, 1998.

- DARDENNE, M. A. et al. **Mapa Geológico Folha Monte Alegre de Goiás, SD.22-Z-A-III**. Programa Geologia do Brasil (PGB/CGB). Escala 1:100.000. Goiânia: CPRM; UnB, 2007.
- DARDENNE, M. A.; BOTELHO, N. F. **Metalogênese da Zona Externa da Faixa Brasília**. In: M. G. Silva; M. B. R. Neto; H. Jost; R. M. Kuyumjian; *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. 1ª ed., Belo Horizonte: CPRM, p.431–454, 2014.
- DARDENNE, M. A. et al. **The Brasília fold belt**. In: Cordani U.G. et al. *Tectonic Evolution of South America*. 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, p. 231-236.
- DARDENNE, M. A.; SCHOBENHAUS, C (Eds.). **Metalogênese do Brasil**. Editora Universidade de Brasília/CNPq, Brasília, 322p, 2001.
- DELGADO, I. M. et al. **Província Tocantins**. In: Bizzi, L. A. et al. (Eds). *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*: Rio de Janeiro, CPRM, p. 281–292, 2003.
- DENTITH, M.; MUDGE, S. T. **Geophysics for the mineral exploration geoscientist**. Cambridge University Press, 438p., 2014.
- DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. **Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors**. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, v. 17, p. 187–200, 1997. Australian government publishing service.
- EFIMOV, A. N. **Multiplikativnyi pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud po aerogamma-spektricheskim dannym**. Naucno-proizvodatvennoje objedinenie “Geofizika” Leningrad, 1978.
- ELLIS, R. G.; WET, B. DE; MACLEOD, I. N. **Inversion of magnetic data for remanent and induced sources**. ASEG Extended Abstracts 2012. p.1–4, 2012. Australian Society of Exploration Geophysicists (ASEG).
- FERREIRA, F. J. F.; ABRAM, M. B.; SILVA, M. DA G. **Interpretação dos Dados Geofísicos**. In: SILVA, M. DA G., ABRAM, M. B.(Eds). *Projeto Metalogenia da Província Aurífera Juruena- Teles Pires, Mato Grosso*, Programa Geologia do Brasil. p. 57-83, 2008.
- FERREIRA, F. J. F. et al. **Realce do gradiente horizontal total de anomalias magnéticas usando a inclinação do sinal analítico. Parte I-Aplicação a dados sintéticos**. IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, Brasília, Anais, p. 1-6, 2010.

- FUCK, R. A. **A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins**. SBG, Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, v. 4, p. 184–187, 1994.
- FUCK, R. A. et al. **Paleoproterozoic crust-formation and reworking events in the Tocantins Province, central Brazil: A contribution for Atlantica supercontinent reconstruction**. Precambrian Research, v. 244, p. 53–74, 2014. Elsevier.
- FUCK, R. A. et al. **As faixas de dobramentos marginais do Cráton do São Francisco: síntese dos conhecimentos**. O Cráton do São Francisco, p. 161–185, 1993.
- FUCK, R. A.; NEVES, B. B. B.; SCHOBENHAUS, C. **Rodinia descendants in South America**. Precambrian Research, v. 160, n. 1, p. 108–126, 2008. Elsevier.
- FUCK, R. A. et al. **Compartimentação da Faixa Brasília**. SBG, Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, v. 9, p. 26–27, 2005.
- GUIMARÃES, S. N. P.; RAVAT, D.; HAMZA, V. M. **Combined use of the centroid and matched filtering spectral magnetic methods in determining thermomagnetic characteristics of the crust in the structural provinces of Central Brazil**. Tectonophysics, v. 624, p. 87–99, 2014. Elsevier.
- GUNN, P. J.; DENTITH, M. C. **Magnetic responses associated with mineral deposits**. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, v. 17, p. 145–158, 1997. Australian government publishing service.
- HASUI, Y. **Sistema orogênico Tocantins**. In: Hasui, Y. et al. Geologia do Brasil, 1ª ed., São Paulo, Beca Editora, p. 289–326, 2012.
- HOLDEN, E. J. et al. **Identifying structural complexity in aeromagnetic data: An image analysis approach to greenfields gold exploration**. Ore Geology Reviews, v. 46, p. 47–59, 2012. Elsevier.
- HSU, S. **Imaging magnetic sources using Euler's equation**. Geophysical prospecting, v. 50, n. 1, p. 15–25, 2002. Wiley Online Library.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). **Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data**. Áustria, 173 p., 2003.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de exploração**: Tradução Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo, Oficina de Textos, 438 p., 2009.

KNOX-ROBINSON, C. M. Vectorial fuzzy logic: a novel technique for enhanced mineral prospectivity mapping, with reference to the orogenic gold mineralisation potential of the Kalgoorlie Terrane, Western Australia. Australian Journal of Earth Sciences, v. 47, n. 5, p. 929–941, 2000. Wiley Online Library.

LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÕES. Relatório final do Levantamento e processamento dos dados do Projeto Aerogeofísico Paleo-Neoproterozoico de Goiás. Levantamento Aerogeofísico do Estado De Goiás - 3ª Etapa. 138p., 2006.

LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÕES. Relatório final do Levantamento e processamento dos dados do Projeto Aerogeofísico Complemento do Tocantins. Programa Geologia do Brasil. 124 p., 2007.

MACHADO, J.M. Depósito de Au, Pd e Pt associado a granito, mina buraco do ouro, cavalcante, Goiás: caracterização e modelo da mineralização. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Brasília, 182 p., 2008.

MACLEOD, I. N.; VIEIRA, S.; CHAVES, A. C. Analytic signal and reduction to the pole in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. 3rd International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 1993.

MARINI, O. J.; BOTELHO, N. F. A província de granitos estaníferos de Goiás. Revista Brasileira de Geociências, v. 16, n. 1, p. 119–131, 1986.

MARINI, O. J. et al. Nova unidade litoestratigráfica do Pré-Cambriano do estado de Goiás. SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, v. 30, Recife, Brasil, Abstracts, p.126–127, 1978.

MARQUES, G.C. Geologia dos grupos Araí e Serra da Mesa e seu embasamento no sul do Tocantins. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 116 p., 2009.

NYKANEN, V. Spatial data analysis as a tool for mineral prospectivity mapping: Espoo. Geological Survey of Finland, 27p., 2008

OSTROVSKIY, E. Y. Antagonism of radioactive elements in wallrock alterations fields and its use in aerogamma spectrometric prospecting. International Geology Review, v. 17, n. 4, p. 461–468, 1975. Taylor & Francis.

PEREIRA, R. S.; FUCK, R. A. Archean nucleii and the distribution of kimberlite and related rocks in the São Francisco craton, Brazil. Revista Brasileira de Geociências, v. 35, n. 3, p. 93–104, 2005.

PHILLIPS, J. D. **Designing matched bandpass and azimuthal filters for the separation of potential-field anomalies by source region and source type.** ASEG Extended Abstracts, v. 2001, n. 1, p. 1–4, 2001. CSIRO.

PHILIPS JD. **Geosoft eXecutables (GX's) developed by the U.S. Geological Survey, Version 2.0, with notes on GX development from FORTRAN code (Open-File Report 2007-1355), 111p, 2007.**

PIMENTEL, M. M. et al. **O embasamento da Faixa Brasília e o arco Magmático de Goiás.** Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, Beca São Paulo, p. 355–358, 2004.

PIRES, A. C. B. **Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás.** Revista Brasileira de Geociências, v. 21, n. 1, p. 61–68, 1995.

REID, A. B. et al. **Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution.** Geophysics, v. 55, n. 1, p. 80–91, 1990. Society of Exploration Geophysicists.

REID, A. B.; EBBING, J.; WEBB, S. J. **Avoidable Euler Errors—the use and abuse of Euler deconvolution applied to potential fields.** Geophysical Prospecting, v. 62, n. 5, p. 1162–1168, 2014. Wiley Online Library.

SAUNDERS, D. F.; BRANCH, J. F.; THOMPSON, C. K. **Tests of Australian aerial radiometric data for use in petroleum reconnaissance.** Geophysics, v. 59, n. 3, p. 411–419, 1994. Society of Exploration Geophysicists.

SAUNDERS, D. F.; TERRY, S. A.; THOMPSON, C. K. **Test of national uranium resource evaluation gamma-ray spectral data in petroleum reconnaissance.** Geophysics, v. 52, n. 11, p. 1547–1556, 1987. Society of Exploration Geophysicists.

SHIVES, R. B. K.; CHARBONNEAU, B. W.; FORD, K. L. **The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry—recognition of alteration related to mineralization.** Geophysics, v. 65, n. 6, p. 2001–2011, 2000. Society of Exploration Geophysicists.

SOARES, J. E. et al. **Seismic characteristics of central Brazil crust and upper mantle: a deep seismic refraction study.** Journal of Geophysical Research: Solid Earth, v. 111, n. B12, 2006. Wiley Online Library.

- SOARES, J. E. P. **Estudos de refração sísmica profunda, função do receptor e gravimetria na Província Tocantins, Brasil Central.** Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2005.
- SOUSA, E. L.; PONTES, J. B. **Projeto Campos Belos - Cavalcante.** Relatório Interno GEOMITEC, 1977.
- SPECTOR, A.; GRANT, F. S. **Statistical models for interpreting aeromagnetic data.** Geophysics, v. 35, n. 2, p. 293–302, 1970. Society of Exploration Geophysicists.
- SYBERG, F. J. R. **A fourier method for the regional-residual problem of potential fields.** Geophysical Prospecting, v. 20, n. 1, p. 47–75, 1972. Wiley Online Library.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied geophysics.** Cambridge university press, 744p., 1990.
- THOMPSON, D. T. **EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data.** Geophysics, v. 47, n. 1, p. 31–37, 1982. Society of Exploration Geophysicists.
- WILFORD, J. R.; BIERWIRTH E, P. N.; CRAIG, M. A. **Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology.** AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, v. 17, n. 2, p. 201–216, 1997.
- ZDHANOV, M. S. **Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems.** Method in Geochemistry and Geophysics, v.36. Amsterdam, 2002. Elsevier Science.