UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE GEOFÍSICA DA FALHA DE CATA BRANCA, REGIÃO CENTRO-NORTE DO SINCLINAL MOEDA, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG.

Maria José Campos de Oliveira

MONOGRAFIA nº 279

Ouro Preto junho de 2018.

ANÁLISE GEOFÍSICA DA FALHA DE CATA BRANCA, REGIÃO CENTRO-NORTE DO SINCLINAL MOEDA, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG.

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.ª Dr.ª Cláudia Aparecida Marliére de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.ª Dr.ª Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Dr. Marco Antônio Fonseca

MONOGRAFIA

Nº 279

ANÁLISE GEOFÍSICA DA FALHA DE CATA BRANCA, REGIÃO CENTRO-NORTE DO SINCLINAL MOEDA, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG

Maria José Campos de Oliveira

Orientadora

Prof.ª Dr.ª Maria Sílvia Carvalho Barbosa

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2018/1

OURO PRETO

2018

Universidade Federal de Ouro Preto – http://www.ufop.br
Escola de Minas - http://www.em.ufop.br
Departamento de Geologia - http://www.degeo.ufop.br/
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.
Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Maria José Campos de Oliveira

Catalogação elaborada pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do
Sistema de Bibliotecas e InFormação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

O482a Oliveira, Maria José.
Análise geofísica da falha de Cata Branca - Região centro-norte do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero [manuscrito] / Maria José Oliveira. - 2018.

82f.: il.: color; tabs; mapas.

Orientador: Profa. Dra. Maria Sílvia Carvalho Barbosa.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia.

1. Geofísica. 2. Magnetometria. 3. Radiometria. I. Barbosa, Maria Sílvia Carvalho. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Titulo.

CDU: 550.3

Catalogação: ficha@sisbin.ufop.br

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Análise Geofísica da Falha de Cata Branca, Região Centro Norte do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, MG

AUTORA: MARIA JOSÉ CAMPOS DE OLIVEIRA

ORIENTADORA: Profa. Dra. Maria Sílvia C. Barbosa

Aprovada em: 10 de julho de 2018

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Maria Sílvia C. Barbosa _____ DEGEO/UFOP

Prof. MSc. Edison Tazava _____ DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Leonardo Eustáquio da Silva Gonçalves _____ DEGEO/UFOP

Ouro Preto, 10/07/2018

Agradecimentos

Agradeço à todos que de maneira direta ou indireta contribuíram na minha caminhada durante a graduação na UFOP. À minha família, minha mãe, meu pai e meu irmão pelo apoio e confiança. À geologia 12.2, à SGA e as amizades construídas durante esses anos.

À professora Maria Sílvia, pela orientação, paciência e ensinamentos, além do enorme exemplo de profissional apaixonado pelo que faz. Por fim, agradeço ao Departamento de Geologia, à Escola de Minas, e à Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino público superior de qualidade oferecido durante toda a minha graduação.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 APRESENTAÇÃO 1
1.2 LOCALIZAÇÃO 1
1.3 OBJETIVOS 2
1.4 JUSTIFICATIVA 3
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS 4
1.5.1 Revisão bibliográfica 4
1.5.2 Levantamento de banco de dados 4
1.5.3 Análise qualitativa 4
1.5.4 Integração geofísica-geológica 5
1.5.5 Análise quantitativa 5
2 CONTEXTO GEOLÓGICO 7
2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO 7
2.1.1 O Cráton São Francisco 8
2.2 O QUADRILÁTERO FERRÍFERO 9
2.3 CONTEXTO LITOESTRATIGRÁFICO 11
2.1.1 Complexos metamórficos 12
2.1.2 Supergrupo Rio das velhas 13
2.1.3 Supergrupo Minas 13
2.4 EVOLUÇÃO TECTÔNICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO 14
2.5 GEOLOGIA ESTRUTURAL E EVOLUÇÃO DO SINCLINAL MOEDA 15
2.6 CONTEXTO ECONÔMICO DO SINCLINAL MOEDA 17
2.7 CONTEXTO HISTÓRICO 17
3 MÉTODOS GEOFÍSICOS 25
3.1 INTRODUÇÃO 25
3.2 MAGNETOMETRIA 25
3.2.1 O campo magnético terrestre 25
3.2.2 O Magnetismo das rochas e minerais 27
3.2.3 Tratamento dos dados 28
3.2.4 Deconvolução de Euler 29
3.3 RADIOMETRIA 30

3.3.1 Radioatividade Natural 30
3.3.2 Radioatividade das rochas e minerais 32
3.3.3 Integração geológica dos dados radiométricos 33
4 TECTÔNICA DISTENSIVA E COMPRESSIVA - FALHAS 35
4.1 INTRODUÇÃO 35
4.2 SISTEMAS DE FALHAS 35
4.2.1 Sistema de falhas distensionais 36
4.2.2 Sistema de falhas compressionais 37
4.2.3 Sistema de falhas transcorrentes 37
5 ANÁLISE QUALITATIVA 39
5.1 INTRODUÇÃO 39
5.2 BANCO DE DADOS 40
5.3 METODOLOGIA 41
5.4 ANÁLISE MAGNETOMÉTRICA 41
5.5 ANÁLISE RADIOMÉTRICA 47
6 INTEGRAÇÃO GEOFÍSICO-GEOLÓGICA 53
6.1 INTRODUÇÃO 53
6.2 INTEGRAÇÃO GEOFÍSICA-LITOLÓGICA 54
7 ANÁLISE QUANTITATIVA 57
7.1 INTRODUÇÃO 57
7.2 METODOLOGIA 57
8 DISCUSSÃO 61
8.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 61
8.1.1 Apresentação dos resultados 61
8.1.2 Visualização em 3D 71
CONCLUSÕES 73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 75
ANEXOS

INDÍCE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Localização da área de estudo....2

Figura 2.1 - O cráton São Francisco e seus limites marginais....7

Figura 2.2 - Mapa geológico simplificado do Cráton São Francisco....9

Figura 2.3 - Localização do Quadrilátero Ferrífero no estado de Minas Gerais, e o cinturão mineiro ao sul do Cráton São Francisco....10

Figura 2.4 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero....11

Figura 2.5 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero....12

Figura 2.6 - Mapa geológico simplificado da estrutura do Sinclinal Moeda....16

Figura 2.7 - Vista da falha de Cata Branca e do contato geológico das rochas do Supergrupo Rio das Velhas com o Supergrupo Minas. Ao fundo a BR 356....18

Figura 2.8 - Esboço da área da Mina de Cata Branca (Fonte: Hirashima 2003, in Ruchkys 2007)....19

Figura 2.9 - A)Vista geral da área da mina e da falha de Cata Branca (Retirado de Ruchkys 2007) B) Vista geral da geomorfologia....20

Figura 2.10 - A)Contato de falha entre a Formação Moeda doSupergrupo Minas e o Supergrupo Rio das Velhas B) Mergulho das rochas....20

Figura 2.11-- A) Instalações da Mina de Cata Branca B)Ruínas 21

Figura 2.12 -A) Acessos ao piso subterrâneo da Mina B) Entrada principal....22

Figura 2.13 - Vista das antigas ruínas da Mina de Cata Branca....23

Figura 3.1- Movimento de fluido condutor e geração do campo dipolar, indicado pelas linhas de força....26

Figura 3.2- Elementos geomagnéticos....26

Figura 3.3 - Capacidade de penetração das partículas radioativas....31

Figura 0.1 - Representação dos experimentos de cisalhamento....35

Figura 4.2. - Movimentação nas camadas superficiais sem envolvimento do embasamento....36

Figura 4.2.A - Movimentação das camadas mais profundas de sal, gerando extensão nas camadas mais superficiais....36

Figura 4.2.B - Sistema desenvolvido devido à compressão ocorrida no embasamento profundo....37

Figura 4.2.C - Estrutura em flor positiva relacionado ao movimento transcorrente....38

Figura 4.2.D - Sistema de falhas direcionais em um sistema de falhas transcorrentes....38

Figura 5.1 - Localização da área segundo Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero....39

Figura 5.2 - Localização da Área 2 situada no bloco Oeste do Programa de levantamento aerogeofísico de Minas Gerais....40

Figura 5.3 - Fluxograma do desenvolvimento dos mapas temáticos segundo metodologia utilizada 42
Figura 5.4 – A) Mapa de Amplitude de sinal analítico.B) Magnetofácies 43
Figura 5.5 - Lineamentos magnéticos traçados sobre o ASA.....46
Figura 5.6 - Sobreposição de imagens (ASA e mapa de magnetofácies) 47
Figura 5.7 – Apresentação dos mapas temáticos radiométricos 48
Figura 5.8 - Mapa radiométrico do Canal de Tório 49
Figura 5.9 - Descrição das radiofácies e divisão dos domínios presentes 50
Figura 5.10 - Lineamentos radiométricos traçados sobre o mapa do Canal de Tório. 51
Figura 5.11 - Sobreposição de imagens (Canal de Th e mapa de radiofácies) 52
Figura 6.1 – Mapa geológico da área.....53
Figura 6.2 - Sobreposição das radiofácies com o mapa radiométrico geofísico temático do canal de Th e a imagem ternária, e os mapa geológico. 55
Figura 7.1 - Perfis Deconvolução de Euler sobre mapa magnetométrico, ASA 58
Figura 7.2 - 1 - Interface do software Euler 1.0. A) Caixa de entrada dos dados. B) Caixa de processamento de dados 59
Figura 7.3 - Deconvolução de Euler realizada no perfil 01 59
Figura 7.4 - Perfis de deconvolução unidos em única shapefile. 60
Figura 7.5 Apresentação do perfil de profundidade. A falha de Cata Branca aparece como (Falha CB) sobre o Mapa de Amplitude de Sinal Analítico. 60
Figura 8.1 - Deconvolução de Euler realizado no perfil 02.....62
Figura 8.2 - Deconvolução de Euler realizado no perfil 03.....63
Figura 8.3 - Deconvolução de Euler realizado no perfil 19.....64
Figura 8.4 - Deconvolução de Euler realizado no perfil 20.....65
Figura 8.5 - Deconvolução de Euler realizado no perfil 07.....67
Figura 8.6 - Deconvolução de Euler realizado no perfil 08.....68
Figura 8.7 - Deconvolução de Euler realizado no perfil 14.....69
Figura 8.8 - Deconvolução de Euler realizado no perfil 15.....70
Figura 8.9 – Visão da Falha de Cata Branca em profundidade 72
Figura 8.10 Perfil de profundidade da área, com sobreposição do mapa de Amplitude de Sinal Analítico. 72

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Valores de susceptibilidade magnética das rochas no sistema c.s.g. 27

Tabela 3.2 - - Filtros de Fourrier e finalidades geofísicas tratamento. 29

Tabela 3.3 - Relação do índice estrutural com os modelos físicos e geológicos. 30

Tabela 3.4 - Relação de penetratividade das diversas partículas radioativas.....31

Tabela 3.5 - Ocorrência dos minerais com elementos radioativos e suas principais ocorrências.....32

Tabela 5.1 – Identificação dos domínios e das magnetofácies descritas. 44

Tabela 5.2 – Descrição das radiofácies e dos domínios determinados na área com base no canal de Tório 49

Tabela 6.1 – Unidades litológicas presentes na região 54

Tabela 6.2 – Correlação das magnetofácies com as litologias presentes na área, com base nos mapas geológicos e de Amplitude de Sinal Analítico.....56

Resumo

A falha transcorrente de Cata Branca, localizada na porção centro-norte da Sinclinal Moeda, corresponde a uma interessante estrutura de estudo no Quadrilátero Ferrífero (QFe), situado no extremo sul do Cráton São Francisco. No estado de Minas Gerais, o QFe é uma província bastante estudada devido à ocorrência de diversos bens minerais e de sua complexidade geológica, envolvendo múltiplos eventos deformacionais e uma gama diversa de estruturas geológicas. A área de estudo está localizada na BR-356, rodovia dos Inconfidentes entre as cidades de Ouro Preto e Itabirito. A falha de Cata Branca de orientação praticamente E-W, apresenta um traço de aproximadamente 7 km de extensão e é marcada no relevo por um vale que desloca o contato entre as rochas da Formação Moeda e os xistos do Grupo Nova Lima do Supergrupo Rio das Velhas, em subsuperficie os limites de profundidade variam de 475 a 1250 metros.. A região é bem conhecida também pela exploração de ouro expressiva nos séculos XIX e XX, estando os depósitos auríferos associados a veios de quartzo verticais, paralelos à falha e cortam ortogonalmente os quartzitos da Formação Moeda. O objetivo deste trabalho é mostrar a continuidade da falha de Cata Branca em profundidade, utilizando da geofísica como ferramenta aplicada de estudo que permite que os contrastes entre as propriedades físicas das litologias sejam estudadas através das assinaturas anômalas dos campos físicos. Logo análises geofísicas qualitativas e quantitativas de dados magnetométricos e radiométricos permitiram respectivamente a caracterização da falha de Cata Branca em subsuperfície, e a caracterização cartográfica litológica em superfície. A modelagem em 3D da estrutura foi realizada após processamento geofísico dos dados mediante aplicação de filtros para obter comprimentos de onda definidos para cada profundidade desejada.

Palavras chave: geofísica, geologia estrutural, Sinclinal Moeda, Falha de Cata Branca.

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero (QFe) localizado no extremo sul do Cráton São Francisco (CSF) envolvido por faixas de dobramentos brasilianos (Almeida 1967) é uma importante entidade tectônica, sendo estudado desde o século XIX, muito pesquisado durante o ínicio e meados do século passado com trabalhos realizados por Derby (1906), Harder & Chamberlin (1915), Barbosa (1949) e Dorr (1969), e constantemente revisado, sendo assim elaborados modelos evolutivos novos, como em Endo (1997), Alkmim & Marshak (1998) e Hippert & Davis (2000).

Dada à complexidade geológica do QFe e a necessidade de compreender melhor os processos de Formação e deFormação das rochas, a relação espacial das principias feições estruturais e o comportamento reológico da crosta terrestre, a geofísica tem um papel extremamente relevante ao adquirir informações de subsuperficie para compor com os estudos geológicos estruturais uma interpretação precisa dos modelos geotectônicos de uma região tão complexa como o Quadrilátero Ferrífero.

Deste modo, o presente trabalho pretende apresentar uma interpretação geofísica da falha de Cata Branca uma feição estrutural do Quadrilátero Ferrífero marcada no relevo por um vale que desloca o contato entre as rochas da Formação Moeda e os xistos do Grupo Nova Lima do Supergrupo Rio das Velhas, localizada na porção centro-norte da Sinclinal Moeda.

O processamento de dados magnetométricos e radiométricos aerolevantados por meio da utilização de *softwares* será utilizado para a geração de mapas temáticos sobre os quais análises qualitativas serão realizadas, e posteriormente uma visualização 3D da falha transcorrente será obtida pelo método de inversão dos dados dos métodos potenciais.

1.2 LOCALIZAÇÃO

A região de estudo (Figura 1.1) encontra-se na região extremo sul do Quadrilátero Ferrífero na porção Centro-norte da Sinclinal Moeda. A área se encontra entre os limites 618000, 7761000; 618000, 7766000; 628000, 7761000; 628000,7766000 (Coordenadas UTM Zona 23S). Localizada as margens da rodovia BR-356 (Rodovia dos Inconfidentes) a falha transcorrente de Cata Branca posiciona-se a cerca de 50km de Belo Horizonte e a 20km do município mais

próximo, Itabirito, disposta no contato entre as rochas da Formação Moeda e as rochas do Grupo Nova Lima.

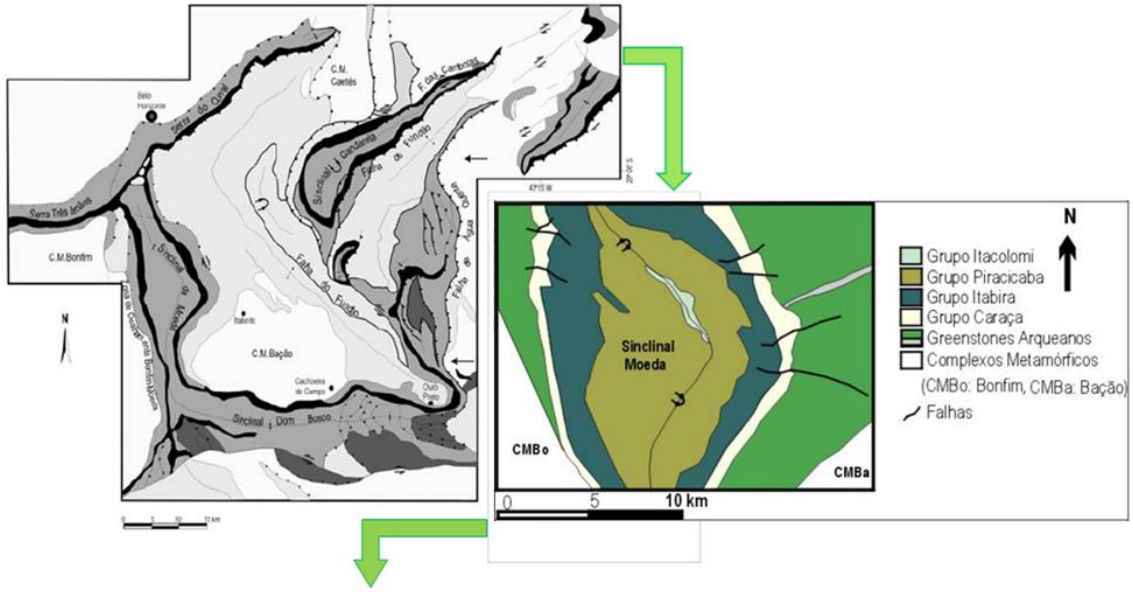


Figura1.1 - Localização da área de estudo. Mapa geológico regional do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Dorr 1969 e chemale *et. al*, 1992), e da região do Sinclinal Moeda (adaptado de Dorr 1969 e extraído de Braga 2006), com seus respectivos limites demarcados nas proximidades da cidade de Itabirito. (Fonte: Google Earth pro/2018).

1.3 OBJETIVOS

Os principais objetivos do presente trabalho são listados a seguir:

1) Aa visualização da Falha de Cata Branca em profundidade de forma a verificar a sua continuidade em profundidade, por meios da análise geofísica da região de estudo, a partir do processamento dos dados geofísicos (magnetometria e radiometria), integrado ao arcabouço geológico da falha de Cata Branca, estrutura geológica que favoreceu a concentração do ouro e deslocou rochas do Supergrupo Minas.
2) A confecção de mapas radiométrico e magnetométrico temáticos, no intuito de realizar a análise quali-quantitativa da magnetometria e qualitativa da radiometria e integrar os dados geofísicos com as feições estruturais geológicas,
3) Caracterizar em subsuperfície por modelamento em três dimensões o comportamento da falha e entender a concentração de ouro na zona de cisalhamento na qual se encontra a falha transcorrente de Cata Branca.

1.4 JUSTIFICATIVA

O Quadrilátero Ferrífero (QFe) possui um histórico extremamente importante de pesquisa e exploração de bens minerais. A importância econômica foi de caráter decisivo para que diversos trabalhos fossem realizados na região. Na porção centro – norte do QFe está localizado o Sinclinal Moeda, com vergência norte-sul e flanco oriental com curvatura para oeste (Dorr 1969). A evolução tectônica do Sinclinal é proposta por Silva (1999), que caracteriza três eventos deformacionais; um distensivo e dois de caráter compressivo. O primeiro evento é responsável pela abertura da calha que forma a mega estrutura. Os eventos compressionais por sua vez são responsáveis pelas principais estruturas da região.

Uma dessas estruturas geradas pela tectônica compressional é a Falha de Cata Branca de caráter transcorrente, estrutura de zona de cisalhamento que coloca em contato o Supergrupo Minas e o Supergrupo Rio das Velhas e que marca a ocorrência de depósitos auríferos. Na região está localizada a antiga Mina de Cata Branca explorada por companhias inglesas durante o século XIX, e que hoje está com as atividades paralisadas e encontra-se sob proteção do IPHAN.

A importância da geofísica no estudo dessa estrutura em subsuperfície justifica-se na obtenção de informações sobre a continuidade dessa estrutura e de seu comportamento. Sabe-se que a mineralização de ouro ocorreu na zona de cisalhamento da região, com o estudo em profundidade da Falha é possível estabelecer sua possível continuidade e a possível extensão da mineralização de ouro presente.

Visto isto, faz-se necessário a interpretação dos dados geofísicos para a compreensão e o entendimento do comportamento da falha de Cata Branca em profundidade. O processamento dos dados aerolevantados de magnetometria contribuirá para a compreensão da estrutura em

subsuperficie; enquanto a radiometria, para o detalhamento do mapa geológico da região e o ajuste com o perfil geológico da região, confirmando os contatos geológicos nem sempre possíveis de se observar no mapeamento em campo.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado seguindo um cronograma de atividades proposto no início da disciplina e conforme os itens descritos a seguir.

1.5.1 Revisão bibliográfica

A primeira fase da pesquisa bibliográfica envolveu o levantamento de textos e artigos sobre o Quadrilátero Ferrífero. A principal base de consulta bibliográfica foi a tese de mestrado Modelagem Estrutural e geofísica da porção centro-norte do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais (Braga 2006), por possuir os estudos mais abrangentes da geologia regional do Sinclinal Moeda. Realizou-se também a leitura de textos e artigos com temas relacionados à geofísica e à tectônica extensional para um entendimento mais abrangente dos métodos aplicados ao longo da pesquisa, assim como textos gerais sobre a geologia da área.

1.5.2 Levantamento de banco de dados

O banco de dados aeromagnetométricos e aeroradiométricos utilizados neste trabalho, foi disponibilizados pela Secretaria de Estado de Minas e Energia do Governo de Minas Gerais – SEME, correspondendo a Área 2 do programa de levantamento aerogeofísico de Minas Gerais, compreendendo cerca de 35.176km^2 de superfície, realizado entre os anos 2000 e 2001 (Lasa Engenharia e Prospecções S. A 2001).

1.5.3 Análise qualitativa

Os mapas temáticos gerados para cada método geofísico utilizado foram produzidos a partir do *software* Oasis Montaj 7.0.1 do sistema GEOSOFT. Posteriormente utilizou-se o *software* ArcGis (versão 10.3), para integrar os mapas georreferenciados aos dados geológicos em ambiente SIG, com vista à interpretação qualitativa dos dados.

1.5.4 Integração geofísica-geológica

Realizada a análise qualitativa, ocorreu a integração dos dados obtidos para realização de interpretações das anomalias geofísicas de acordo com as estruturas e litologias mapeadas na região, sobrepondo os dados geofísicos aos geológicos.

1.5.5 Análise quantitativa

Realizou-se a inversão dos dados magnetométricos por meio da Deconvolução de Euler (3D) nos perfis de direção norte-sul, escolhida essa direção dado que a orientação da falha é leste-oeste, para que toda sua extensão pudesse ser cortada pelos perfis, utilizando a versão livre do *software* Euler, visando a interpretação quantitativa dos dados para estimar a profundidade das fontes das anomalias. De posse dos dados da Deconvolução de Euler, foi possível a modelagem 3D para a visualização da estrutura em profundidade.

CAPÍTULO 2

CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO

A área de estudo encontra-se situada na porção centro-norte do Sinclinal Moeda, ao extremo sul do Quadrilátero Ferrífero, por sua vez situado na seção meridional do Cráton São Francisco, uma entidade geotectônica do final do Ciclo Transamazônico (Almeida 1977) e relativamente preservada dos eventos do Ciclo Brasiliano (Alkmim & Marshak 1998). As remobilizações orogênicas neoproterozoicas que ocorreram na plataforma sul americana por sua vez, deram origem as faixas brasilianas que limitam o Cráton. (Figura 2.1).

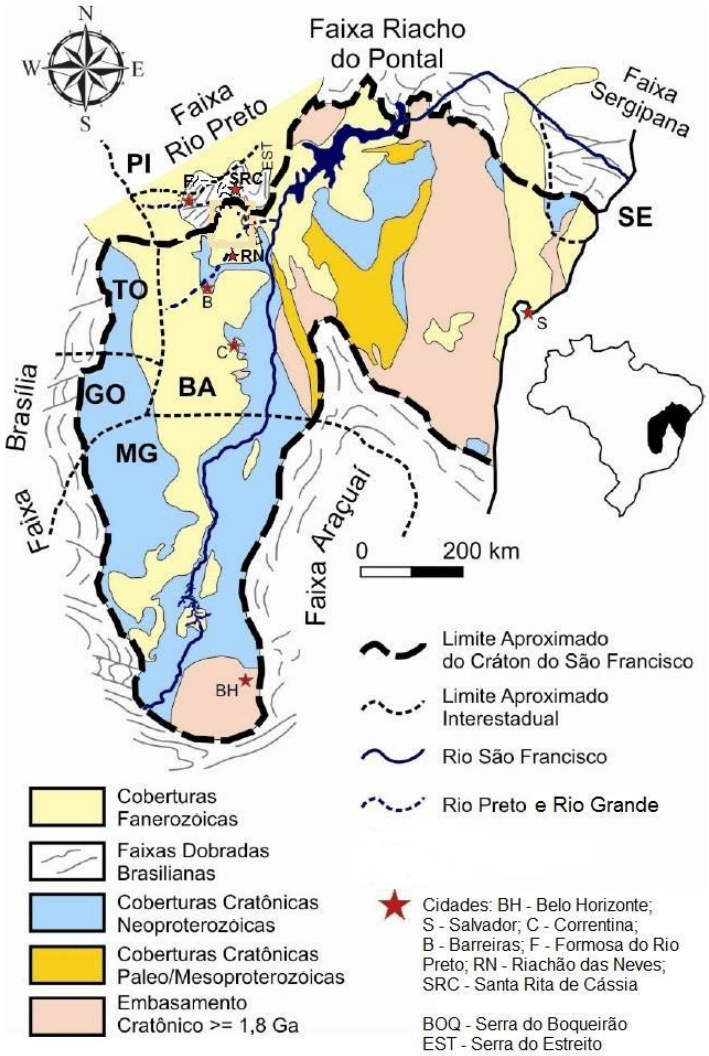


Figura 2.1 O cráton São Francisco e seus limites marginais. Adaptado de Alkmin (2004)

2.1.1 O Cráton São Francisco

A primeira descrição do Cráton São Francisco foi feita por Barbosa (1966) que definiu o cráton como "uma feição que se consolidou no Arqueano e comportou-se como uma plataforma estável no Pré-Cambriano e posteriormente foi submetido a uma tectônica de falhamentos generalizados e dobramentos limitados às adjacências das falhas" (Figura 2.2).

Almeida (1977) definiu o cráton como um dos quatro segmentos arqueanos e paleoproterozoicos que não foram diretamente impactados pelos efeitos da orogenia Brasiliana, mas é circundado pelas faixas móveis brasilianas que são os limites do cráton, revisados por Alkmim (1993), sendo elas: Faixa Sergipana, Faixa Riacho do Pontal, Faixa Rio Preto Faixa Araçuaí, Faixa Brasília e Faixa Ribeira. Os domínios do cráton são denominados: Setentrional, localizado ao norte e Meridional localizado ao sul, onde se encontra a área de estudo deste trabalho.

O embasamento do cráton São Francisco foi definido por Almeida (1977) como rochas arqueanas e paleoproterozoicas e feições tectônicas mais antigas que 1.8Ga, disposto em duas grandes regiões: o cráton São Francisco Setentrional e o cráton São Francisco Meridional. As unidades mais novas sobre as rochas arqueanas e paleoproterozoicas foram distinguidas por Alkmim *et al.* (1993) como uma cobertura Proterozoica que marca o registro de várias bacias superpostas a partir de 1.8Ga, e uma cobertura Fanerozoica: a bacia do São Francisco no setor ocidental e o Aulacógeno Espinhaço no setor central.

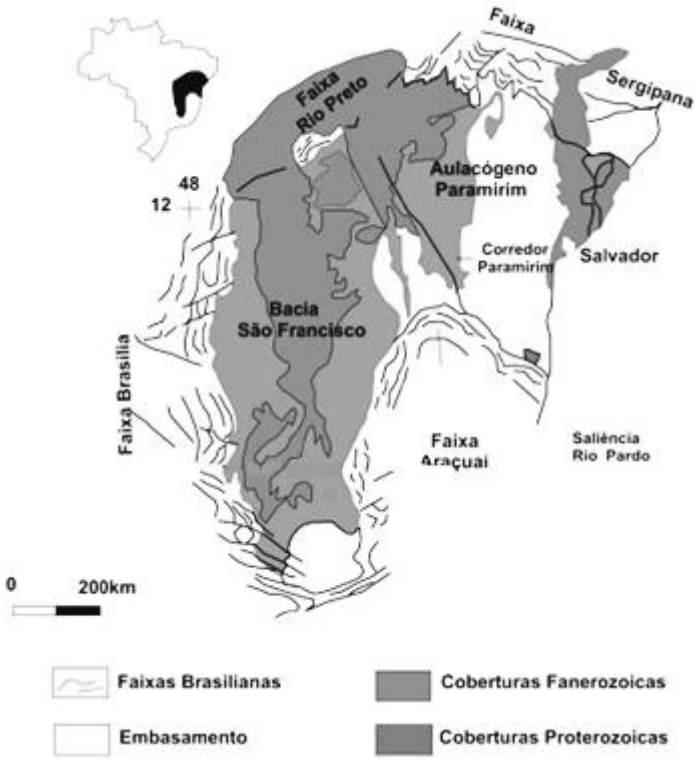


Figura 2.2 - Mapa geológico simplificado do Cráton São Francisco. Mostrando o embasamento e as coberturas proterozoicas e fanerozoicas. Adaptado de (Cruz & Alkmim, 2006)

2.2 O QUADRILÁTERO FERRÍFERO

O Quadrilátero Ferrífero, localizado no estado de Minas Gerais é uma estrutura geológica que se estende entre as cidades de Belo Horizonte (NW), Itabira (NE), Ouro Preto (SE) e Congonhas (SW), ao sul do cráton São Francisco, na porção denominada Cinturão Mineiro (Figura 2.3), como parte de um orógeno que resultou da convergência de fragmentos neoarqueano, encurtamento litosférico e colisão (Machado *et al.* 1992, Alkmim & Marshak 1998, Endo 1997, Oliveira 2004) compreendendo uma área de aproximadamente 7000km^2.

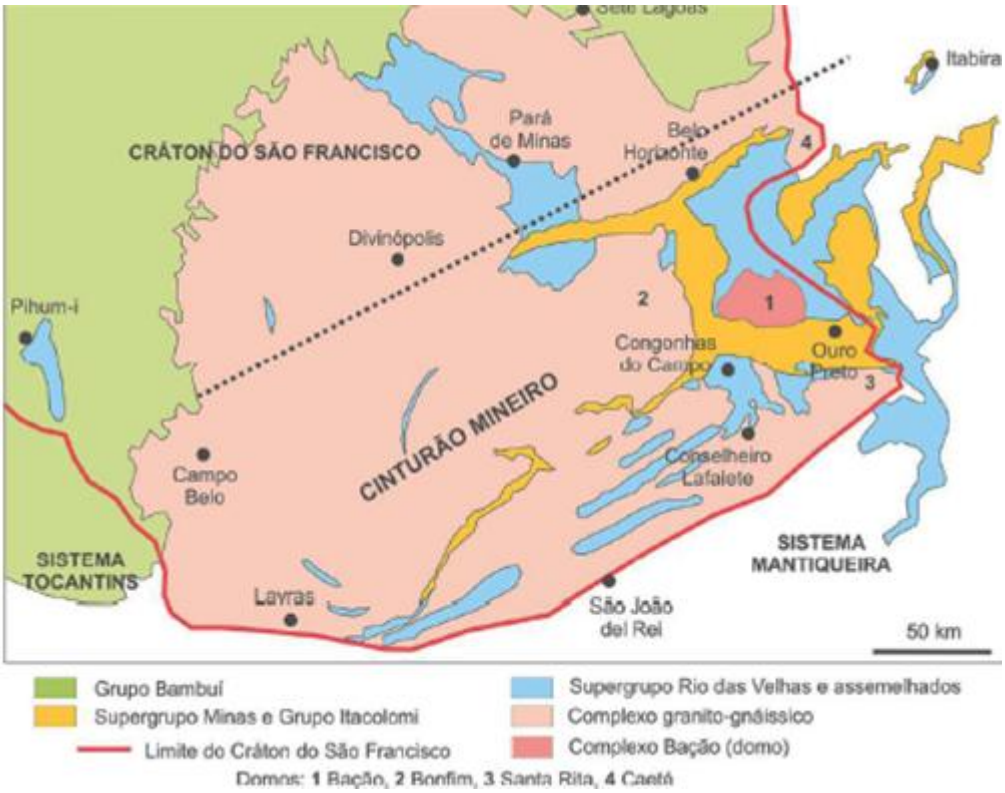


Figura 2.3 -– Localização do Quadrilátero Ferrífero no estado de Minas Gerais, e o cinturão mineiro ao sul do Cráton São Francisco (Heilbron *et al.* 2016).

A importância do Quadrilátero Ferrífero remonta ao século XVIII, desde que foram descobertas mineralizações de ouro em Ouro Preto e arredores, antes mesmo da importância das mineralizações de ferro da região. A importância econômica sempre foi um determinante para a movimentação das pesquisas na região, entretanto poucos trabalhos foram desenvolvidos sobre a evolução tectônica da área, recebendo destaque os trabalhos de Dorr (1969), Ladeira & Viveiros (1984), Carneiro (1992), Endo (1997), Alkmim & Marshak (1998) e Endo & Rocha Filho (2003). A figura 2.4 mostra o mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero.

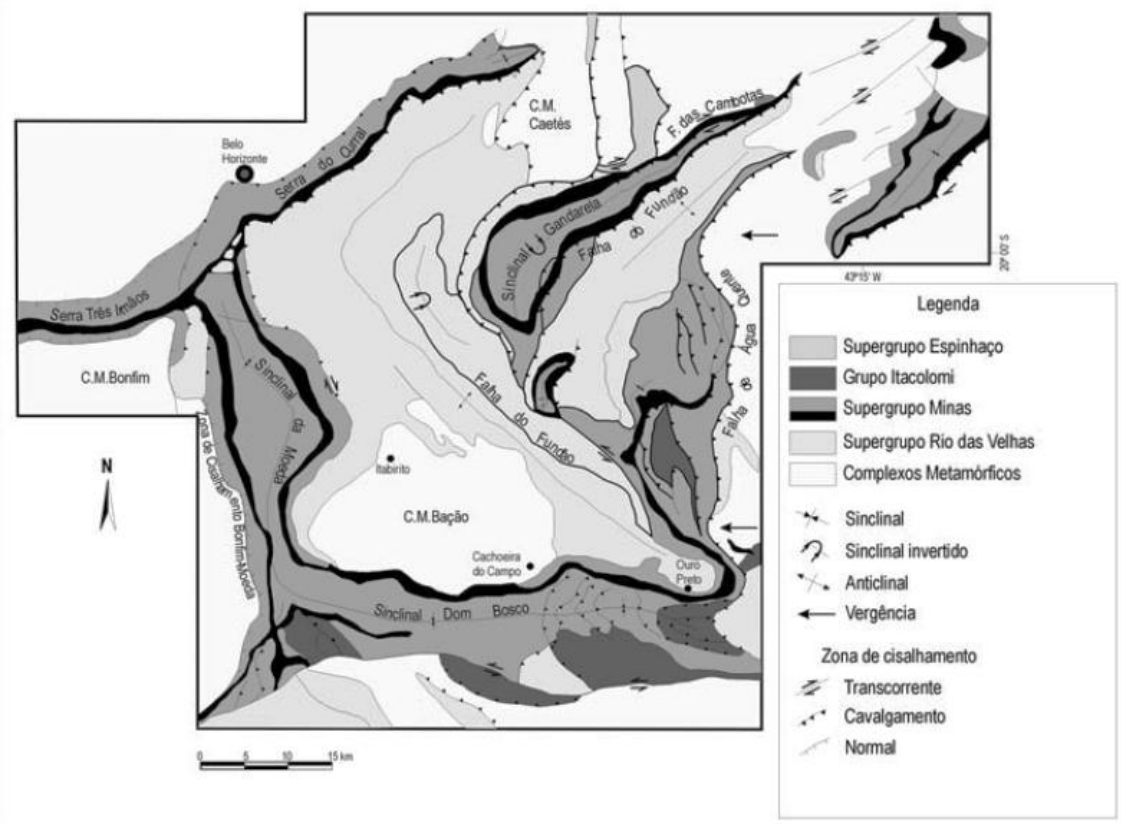


Figura 2.4 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Dorr 1969 e Chemale *et al.* 1992).

2.3 CONTEXTO LITOESTRATIGRÁFICO

A estratigrafia do QFe foi proposta e subdividida por Alkmim & Marshak (1998) e revisado por Alkmim & Noce (2006). As litologias da área são caracterizadas por unidades mais antigas de idade arqueana: os Complexos metamórficos (Carneiro 1992), seguido de seqüências supracrustais meta vulcanossedimentares e metassedimentares clásticas a químicas respectivamente do Supergrupo Rio das Velhas, do Supergrupo Minas e dos Grupos Sabará e Itacolomi, de litologia metarenítica e metaconglomerática e corpos ultramáficos, máficos e félsicos intrudindo especialmente as litologias arqueanas (Dorr 1969, Renger *et al.* 1994) Além disto, registram-se ocorrências restritas de depósitos sedimentares clásticos cenozoicos. A figura 2.5 apresenta a coluna estratigráfica proposta por Alkmim & Marshak (*op. cit.*).

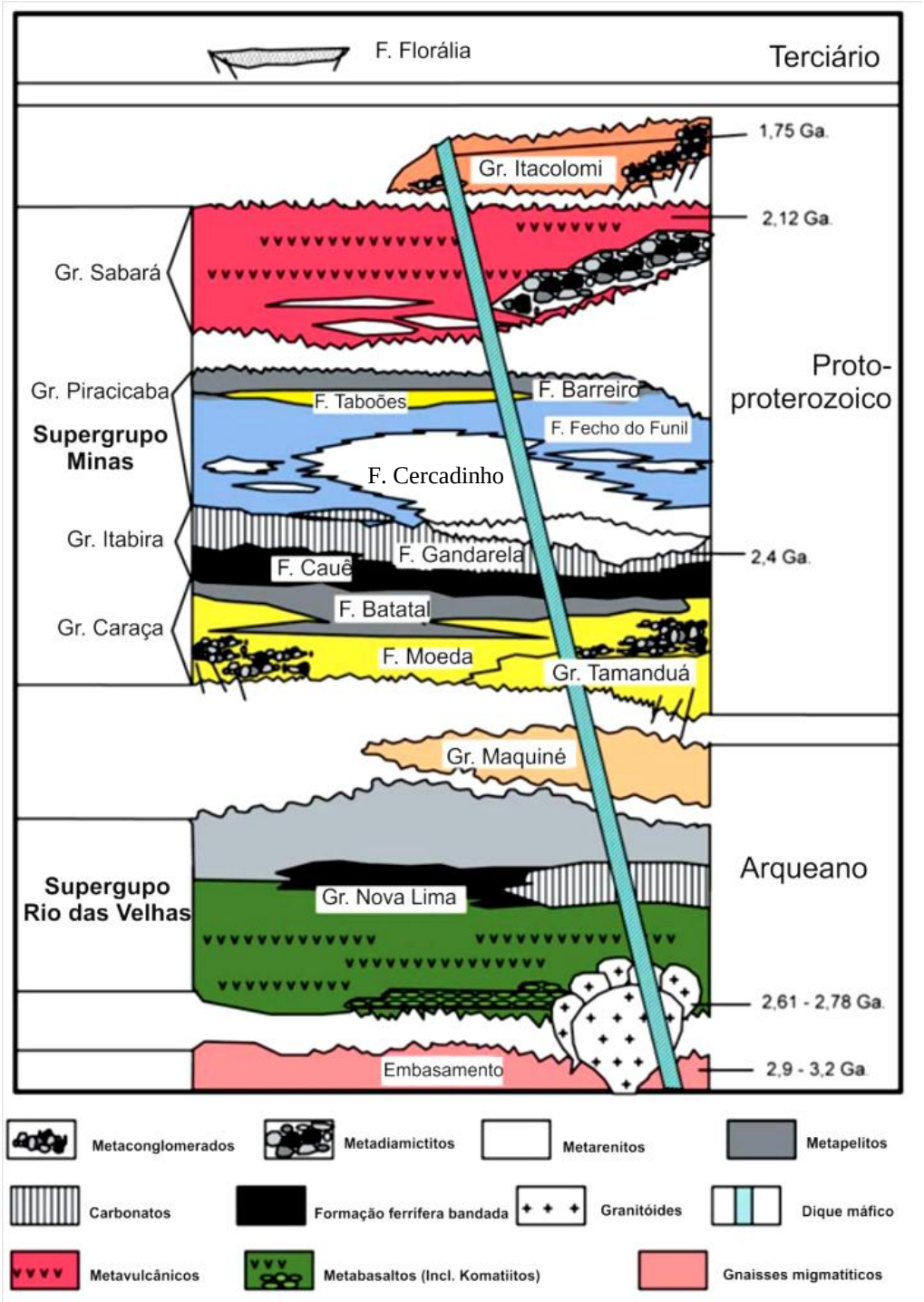


Figura 2.5 – Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Alkmim & Noce (2006)

2.1.1 Complexos metamórficos

Os terrenos granito-gnáissicos constituem os diversos Complexos metamórficos, os quais Herz (1970) denomina como: Complexos Caeté, Bonfim, Bação, Belo Horizonte, Moeda, Congonhas e

Santa Rita. Estes Complexos representam terrenos polideformados de composição tonalítica a granítica, subordinadamente presentes encontram-se granitos, granodioritos, anfibolitos e intrusões máficas à ultramáficas (Herz 1970, Cordani *et al.* 1980, Ladeira *et al.* 1983, Teixeira 1982, Jordt Evangelista & Muller 1986). A natureza tectônica das bordas desses Complexos, com as supracrustais adjacentes é observada nas zonas de cisalhamento, representando porções de um antigo embasamento retrabalhado por eventos posteriores (Almeida 1978, Cordani *et al.* 1980, Ladeira *et al.* 1983, Teixeira 1982, Jordt Evangelista & Muller 1986). As idades mínimas desses terrenos são de 2.9Ga, com duas gerações de plútons do Neoarqueano: 2.78 - 2.77Ga e 2.73 – 2.62Ga (Carneiro 1992, Carneiro *et al.* 1995)

2.1.2 Supergrupo Rio das velhas

O Supergrupo Rio das velhas é constituído por uma sequencia metavulcano e metassedimentar características de terrenos granito-greenstone Arqueanos, (Machado *et al.* 1992, Zucchetti *et al.* 1998, Noce *et al.* 2005).

Segundo Dorr (1969), o Supergrupo Rio das velhas é comumente dividido em dois Grupos: Nova Lima (base) e Maquiné (topo). É litologicamente caracterizado por rochas vulcânicas ultramáficas, do tipo komatiitos peridotíticos, basaltos toleíticos com textura *spinifex* e corpos félsicos (Ladeira 1981) sobreposto por rochas metassedimentaares químicas, formações ferríferas (BIF´s) do tipo Algoma, carbonatos e siliciclásticos; e por rochas metassedimentares clásticas: quartzitos, metaconglomerados e filitos cloríticos pertencentes ao Grupo Nova Lima. O Grupo Maquiné é subdivido por Dorr (1969) em duas formações: Palmital (base); constituída por quartzitos sericíticos e filitos quartzosos, e pela Formação Casa Forte (topo) definida originalmente por Gair (1962); constituída por quartzitos sericiticos, cloriticos a xistosos, filitos e pelos metaconglomerados que marcam um contato gradacional com a Formação Palmital. Análises geocronológicas disponíveis para o Supergrupo Rio das velhas, marcam idades entre 2.77 – 2.85Ga.

2.1.3 Supergrupo Minas

O Supergrupo Minas foi definido inicialmente por Derby (1906) como Série Minas e desde então vem sofrendo modificações em vista dos novos conhecimentos adquiridos e do avanço nas pesquisas da região. É um espesso pacote sedimentar de margem passiva e sin-orogênico limitado no topo e na base por discordâncias angulares e dividido em cinco Grupos: Grupo Tamanduá, Grupo Caraça, Grupo Itabira, Grupo Piracicaba e Grupo Sabará (Barbosa 1968, Dorr 1969, Chemalle Jr. *et al.* 1994, Renger *et al.* 1994, Alkmim & Marshak, 1998).

Simmons & Maxwell (1961) definiram o Grupo Tamanduá como um pacote de quartzitos, filitos, xistos quartzosos e argilosos, itabiritos filíticos e dolomíticos, conglomerados e quartizitos grosseiros. Já o Grupo Caraça é constituído por metaconglomerados, filitos e quartzitos na Formação Moeda que marca um contato basal estruturalmente e estratigraficamente discordantes com o Supergrupo Rio das Velhas (Dorr 1969); e pela Formação Batatal (Maxwell 1958, Endo 1997) constituída de filitossericíticos e metacherts, BIFs e filitos grafitosos em contato gradacional com as rochas do Grupo Itabira (Dorr 1969).

Dorr (1969) subdividiu o Grupo Itabira em duas formações: Formação Cauê (base) representada predominantemente pela Formação ferrífera do tipo lago superior e por itabiritos dolomíticos e anfibolíticos; e pela Formação Gandarela, constituida por rochas carbonáticas e subordinamente por itabiritos e filitos dolomiticos. Segundo Gair (1962), o Grupo Piracicaba é composto por rochas metassedimentares clásticas e químicas, quartzitos puros e ferruginosos, metasiltitos, filitos grafitosos, dolomíticos e ferruginosos, agrupadas nas quatro formações nas quais é subdividido: Cercadinho, Formação Fecho do Funil, Taboões e Barreiro. O pacote de rochas constituído por Clorita xistos, metagrauvacas, metaconglomerados, quartzitos, filitos e metatufos marcado por discordância erosiva e sobreposto a este é classificado como Grupo Sabará.

O Grupo Itacolomi é uma sequencia de metassedimentos clásticos composta principalmente por quartzitos e metaconglomerados dispostos em discordância angular sobre as demais rochas do Supergrupo Minas (Alkmim *et al.* 1988).

2.4 EVOLUÇÃO TECTÔNICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Existe uma série de trabalhos a respeito da evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero, dentro os principais trabalhos estão os de Dorr (1969), Marshak & Alkmim (1998), Chemalle Jr. *et al.* (1994), Endo (1997) e Endo & Machado (1998).

Para Dorr (1969), a evolução tectônica do QFe cocorreu em três eventos responsáveis por sua estruturação. O primeiro evento afetou o pacote de rochas do Supergrupo Rio das Velhas. O segundo evento deformacional de caráter adiastrófico (causas não tectônicas) ocorreu durante a deposição do Supergrupo Minas, causando soerguimentos e arqueamentos. O evento de maior expressão tectônica deformacional, entretanto foi o terceiro e último, afetando todas as sequencias pré-cambrianas e causando dobramentos sinformais e antiformais de eixos N-S, NE-SW, E-W, NW-SE, devido ao soerguimento do Complexo metamórfico do Bação e pelos cavalgamentos responsáveis por inverter os flancos leste e sudoeste das megadobras.

Já Alkmim & Marshak (1998) propões quatro fases de deformação na complexa evolução do Quadrilátero. A primeira fase, denominada D1 gerou dobras e zonas de cisalhamento com transporte tectônico dirigido para NW. A fase D2 deu origem às estruturas dômicas do Quadrilátero Ferrífero. Correlaciona-se as fases D1 e D2 ao evento Transamazônico. Uma terceira fase denominada D3, desenvolveu dobras e falhas como resposta de uma compressão no sentido E-W. E uma última fase D4 deu origem a falhas normais e juntas de tração com orientação NS. Já s fases finais, D3 e D4 correspondem ao evento Brasiliano.

Chemalle Jr.*et al.* (1994) consideram que a estruturação do Quadrilátero Ferrífero ocorreu em dois eventos, um relacionado a orogenia Transamazônica e outro à orogenia Brasiliana. Ao primeiro evento atribui-se natureza compressional e a Formação das estruturas sinformes contínuas: Sinclinal Moeda, sinclinal Dom Bosco, Santa Rita e Serra do Curral. Relaciona-se a este evento a Formação de zonas de cisalhamento com vergência leste e sudoeste, e ao soerguimento dos Complexos metamórficos e abatimento das sequencias supracrustais que deram assim origem aos sinclinais e anticlinais da área. Chemalle Jr. *et al.* (*op cit.*) consideram três fases deformacionais para o segundo evento, de origem Brasiliana. Na primeira fase D1, ocorre metamorfismo de baixo a médio grau e desenvolvimento de zonas de cisalhamento relacionadas a falhas de empurrão. A fase D2 tem menor grau metamórfico e formam-se dobras mesoscópicas com crenulação E-W e falhas transcorrentes. A fase D3 ocorre sobre a influência do mesmo grau metamórfico da anterior gerando as mesmas dobras, porém com crenulação N-S e falhas inversas.

Por fim, Endo (1997) e Endo & Machado (1998) consideram três ciclos deformacionais principais responsáveis por estruturas o QFe. O primeiro ciclo é nomeado Ciclo Jequié, considerado o resultado de três eventos deformacionais sucessivos desenvolvidos em regime transpressional (Endo 1997). O segundo ciclo está relacionado à orogênese Transamazônica, e se manifesta através de eventos deformacionais que se alternam entre compressionais e extensionais.

E o último ciclo relaciona-se a orogênese Brasiliana, e é caracterizada por dois eventos tectônicos em regimes transpressionais e grau metamórfico em fácies xisto-verde. Tendo em mente os modelos de evolução dos terrenos do Quadrilátero Ferrífero, pode-se partir para um detalhamento do contexto geológico da área de estudo do Sinclinal Moeda.

2.5 GEOLOGIA ESTRUTURAL E EVOLUÇÃO DO SINCLINAL MOEDA

O Sinclinal Moeda (Figura 2.6) localiza-se na porção centro-norte do Quadrilátero Ferrífero com orientação N-S e com vergência, da estrutura sinformal, para oeste, e quando observado em planta, o flanco oriental possui curvatura voltada para oeste (Dorr 1969). Exceto pelas rochas do

Grupo Sabará, todo o pacote do Supergrupo Minas se encontra no interior da estrutura sinformal. Vários eventos tectônicos de extensão são descritos no QFe e fundamentam a hipótese da Formação de uma bacia sedimentar chamada de Bacia Minas (Alkmim & Marshak 1989, Chemale Jr. *et al.* 1994, Renger *et al.* 1994).

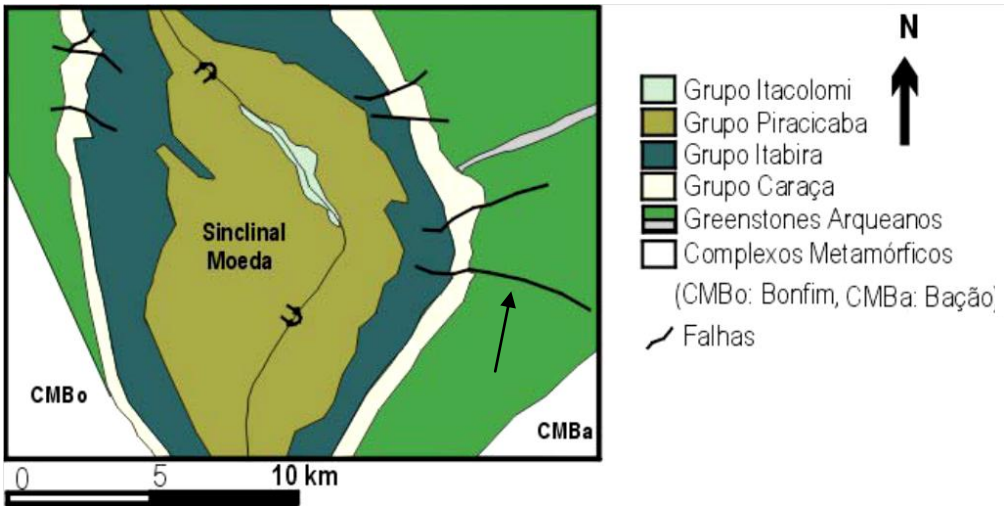


Figura - 2.6 - Mapa geológico simplificado da estrutura do Sinclinal Moeda. Adaptado de Dorr (1969) e extraído de Braga (2006). Indicada pela seta está o objeto de estudo deste trabalho, a Falha de Cata Branca.

O flanco oeste da megaestrutura possui acamamento paralelo ao desenvolvimento de uma xistosidade S1 enquanto o flanco leste tem ângulo de mergulho do acamamento sedimentar entre 50º e 80º nos sentidos NE, E e SE, mostrando uma relação estrutural de um flanco inverso (no flanco oeste o mergulho é de 50° a 60º para E) (Braga, 2006), e em ambos flancos observam-se traços de falhas direcionais.

Para Silva (1999), o Sinclinal Moeda tem uma história evolutiva marcada por três eventos deformacionais: O primeiro é de caráter distensivo, atribui-se à Formação de uma calha sob condições dúcteis e dúcteis-rúpteis, sendo formado assim a mega estrutura denominada de Sinclinal Moeda por meio da acomodação das supracrustais sobre um sistema de falhas extensionais. O segundo evento deformacional descrito tem caráter compressivo e gerou as dobras com vergência para norte que redobram o sinclinal. E o último evento descrito por Silva (1999) também de natureza compressiva, esta associado à inversão brasiliana e seria responsável pelas principais estruturas da região. A Zona de cisalhamento Moeda-Bonfim caracteriza essa inversão tectônica com feições descritas por Endo & Nalini (1992) e Hippertt *et al.* (1992) como feições tanto compressivas quanto distensivas.

Quando observado em planta é nítida a curvatura do flanco oriental para oeste. O mecanismo causador desta inflexão, entretanto é um ponto de discussão ainda em aberto. Chemale Jr. *et al.* (1994) relaciona a curvatura do flanco a um cavalgamento do bloco Bação sobre o sinformal. Para Gomes (1996) e Endo (1997), pré-existente a megaestrurura sinformal, já era existente um alto estrutural que

induziu a forma da bacia de acordo com a forma pré-existente. Já Alkmim & Marshak (1998) introduziram a hipótese dos Complexos metamórficos do QFe representarem uma província de Domos e Quilhas, deste modo os altos estruturais (Domos) se estabeleceram após a Formação da Bacia Minas. Trabalhos mais recentes de Gomes & Silva (2001) mostraram através de um estudo da deFormação em pacotes da Formação Moeda que os dois flancos do Sinclinal Moeda foram submetidos a deformações diferentes, logo ocorreu uma deFormação por transpressão no domínio leste e uma compressão pura no interior e no domínio oeste da sinclinal. Tal estudo corrobora para a aceitação da tese do cavalgamento do Complexo metamórfico do Bação sobre o sinclinal.

2.6 CONTEXTO ECONÔMICO DO SINCLINAL MOEDA

Sabe-se que o Quadrilátero Ferrífero é uma região no território brasileiro que vem sendo explorada desde o século XVII devido a ocorrência de diversos bens minerais como o Ouro, Ferro e Manganês. A falha de Cata Branca, estrutura de estudo em questão, encontra-se inserida no QFe num ambiente de contato entre as rochas da Formação Moeda do Supergrupo Minas e as rochas do Grupo Nova Lima do Supergrupo Rio das Velhas associados a zonas de cisalhamento e a veios de quartzo verticais que marcam a ocorrência de depósitos auríferos.

Historicamente reconhece-se a ação exploratória de ouro na região que remonta a atividades do século XIX. A mina de Cata Branca pertenceu a companhias mineradoras inglesas que exploraram ouro até meados do século XIX até o encerramento das atividades dado a um grande desmoronamento da galeria principal que findou as atividades de lavra da mina, e a uma grande depressão da cidade de Itabirito que tinha sua economia vinculada diretamente às atividades mineradoras.

2.7 CONTEXTO HISTÓRICO

O contexto histórico da Mina de Cata Branca assim como da falha de mesmo nome, está intimamente relacionado a exploração dos bens minerais da rica região do Quadrilátero Ferrífero (QFe). A falha geológica (Figura 2.7) que atravessa o local é de extrema importância do ponto de vista acadêmico para a compreensão da dinâmica do tectonismo no território brasileiro, em especial na região do Sinclinal Moeda no QFe. A Mina de Cata Branca, atualmente desativada localiza-se em propriedade da MBR, nas vizinhanças da Rodovia dos Inconfidentes, no interior da Área de Proteção Ambiental Estadual Sul RMBH, inserida assim em uma Área de Proteção Permanente.

Figura 2.7 - Vista da falha de Cata Branca e do contato geológico das rochas do Supergrupo Rio das Velhas com o Supergrupo Minas. Ao fundo a BR 356 Evidenciado os Supergrupos deslocados pela falha (SGRV – Supergrupo Rio das Velhas e SGM – Supergrupo Minas) (Excursão Virtual pela Estrada Real no Quadrilátero Ferrífero, ponto 7, www.cprm.gov.br, acesso em 3/12/2017).

Nomeado "Sítio Arqueológico de Cata Branca" é um sítio de mineração proveniente da primeira metade do século XIX. Composto por várias ruínas ainda da época da exploração, algumas das paredes da mina ainda se encontram em bom estado de conservação, além das galerias de exploração e das redes de longos canais com escoaras de pedra. Segundo um Relatório de Vistoria (RPPN – Reserva Particular do Patrimônio Natural) de 2015 realizado pela Secretaria de Estado de meio Ambiente e desenvolvimento sustentável do Governo de Minas Gerais, Diretoria de Áreas Protegidas, em dadas áreas do sítio, encontram-se ainda vestígios de estruturas habitacionais de suporte a atividade mineraria tais como fragmentos de louças inglesas, louças de vidro e objetos feitos de esteatito, rocha comum na região dos inconfidentes para confeccionar objetos de uso doméstico ou de decoração.

Atualmente, não existem atividades econômicas ou de pressão antrópica de qualquer categoria sendo desenvolvidas na região. O IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional) e o MPE (Ministério Público Estadual) recomendam que a área seja destinada apenas para atividades de conservação e educação patrimonial.

Historicamente, a documentação sobre as primeiras atividades extrativas no sítio provém de Eschewege (1833) que em um quadro, no volume II do Pluto Brasiliense, o primeiro grande estudo e livro sobre a geologia brasileira publicado em Berlim, indica a região como propriedade do Sr. Francisco de Medeiros, e o sítio era fiscalizado por meio de oficiais de cavalaria. Nessa época a exploração era realizada por técnicas básicas e pouco desenvolvidas, sem nenhum tipo de investimento e contanto com um Grupo pequeno de escravos para trabalhar. Após uma análise feita por Sr. Shüch, curador do Museu Imperial de Viena, e responsável pela coleção de minerais da princesa Leopoldina, que durante sua estadia no Brasil visitou diversas Minas de ouro em Minas gerais, a mina foi dada como subaproveitada, passando assim para as mãos do Segundo Conde de Linhares em 1830, o qual vendeu a concessão de lavra do local ao anglo-americano Dr. Cliffe que partilhou os direitos exploratórios com a companhia inglesa The Brazilian Company Ltd. A qual explorou ouro na Mina até

1844. Devido a brechas favoráveis na legislação brasileira da época para a entrada de empresas estrangeiras para exploração de recursos minerários no Brasil, era comum empresas, principalmente mineradoras Inglesas abrirem filiais em solo Brasileiro. Como foi o caso da The Brazilian Company Ltda (Ruchkys 2007) A figura 2.8 mostra um desenho realizado por Stephan em 1840 e publicado por Carl P.F Von Martius. A imagem mostra o acesso e a área da Mina de Cata Branca.

Figura 2.8 - Esboço da área da Mina de Cata Branca (Fonte: Hirashima 2003 *in* Ruchkys 2007)

Sobre as características e descrições da mina e do minério de Cata Branca, sabe-se que eram únicas, já que o filão de quartzito ao qual se associava o veio de ouro mergulhava próximo dos 90º o que fazia com que os serviços realizados fossem no sentido praticamente vertical. Registros mostram que por volta do ano de 1842 a profundidade atingida era de cerca de 230 metros (Ruchkys 2007).

Geologicamente, a mina teve sua primeira descrição publicada em 1843 pelo geólogo D'Orsey (1843 *in* Ruchkys 2007), que constatou a presença de xistos argilosos intercalados em estratos verticais com uma espécie de arenito talcoso descrito como itacolumito. Burton (1869 *in* Ruchkys 2007) por sua vez, constatou que a litologia da mina era composta por um quartzo micáceo granular que comportava ouro visível, e no veio aurífero se encontrava também pequena quantidade de ferro, arsênico e óxido de bismuto. Sua morfologia era estreita, à 7 metros da superfície, e alargava-se a medida que a

profundidade aumentava. Calógeras (1938 *in* Ruchkys 2007) por sua vez descreveu um veio praticalmente vertical atravessando filitos de direção 15° NW. O ouro estaria associado a veios de quartzo verticais que cortavam de forma ortogonal os quartzitos Moeda. Tais veios são paralelos a estrutura de estudo nesse trabalho, a falha de Cata Branca. As Figuras 2.9 e 2.10 mostram a visão geral da área, e a região de contato entre os Supergrupos envolvidos em detalhe.

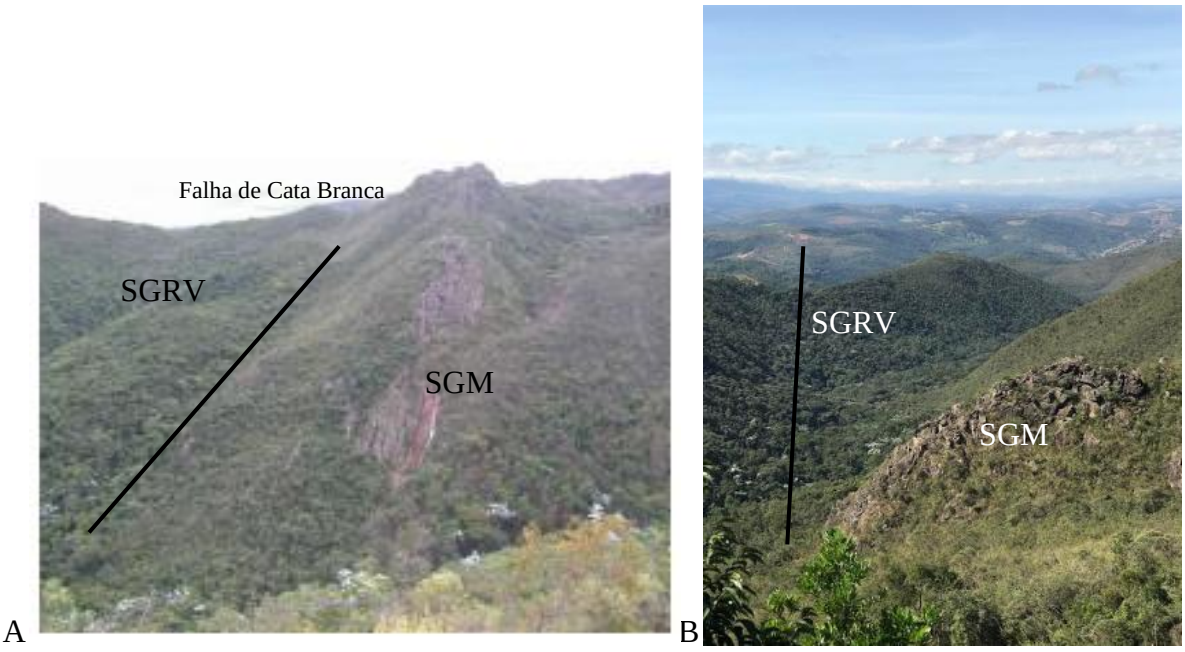


Figura 2.9 – A) Vista geral da área da mina e da falha de Cata Branca (Retirado de Ruchkys 2007) B) Vista geral da área e da geomorfologia local. (Nas figuras o traço em preto delimita a localização da falha, SGRV – Supergrupo Rio das Velhas e SGM – Supergrupo Minas)

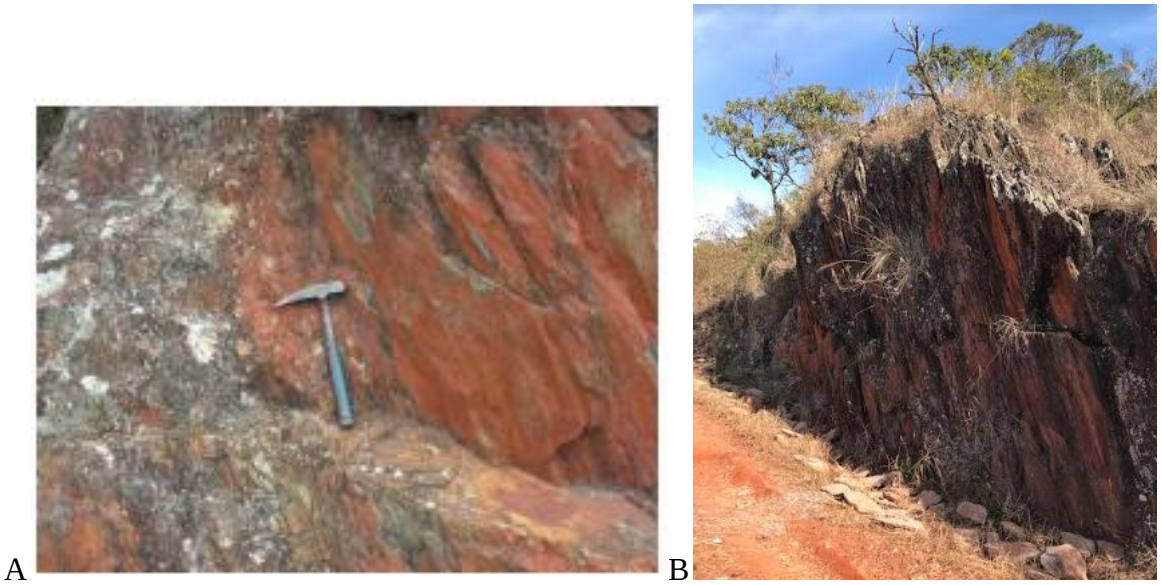


Figura 2.10 – A) Contato de falha entre a Formação Moeda do Supergrupo Minas e o Supergrupo Rio das Velhas (Retirado de Ruchkys 2007) B) Mergulho das rochas praticamente na vertical

Outra particularidade da exploração na região era o maquinário utilizado (Figura 2.11-A e B), o grau de mecanização de Cata Branca durante a administração pelos ingleses atingiu patamares tecnológicos vistos em poucas Minas no território brasileiro. O beneficiamento do minério de Ouro era realizado na superfície nas adjacências da mina. E a planta de tratamento de ouro segundo relatos históricos era monumental. Todos os processos de fragmentação primária, britagem, triagem e concentração, além do uso do mercúrio e do fogo para a obtenção do ouro, eram realizados em Cata Branca

Figura 2.11 -A - Moinhos d'água, maquinário e instalações da Mina de Cata Branca. Disponível em www.org.ufmg.br/nehcit/itabirito/mina.php

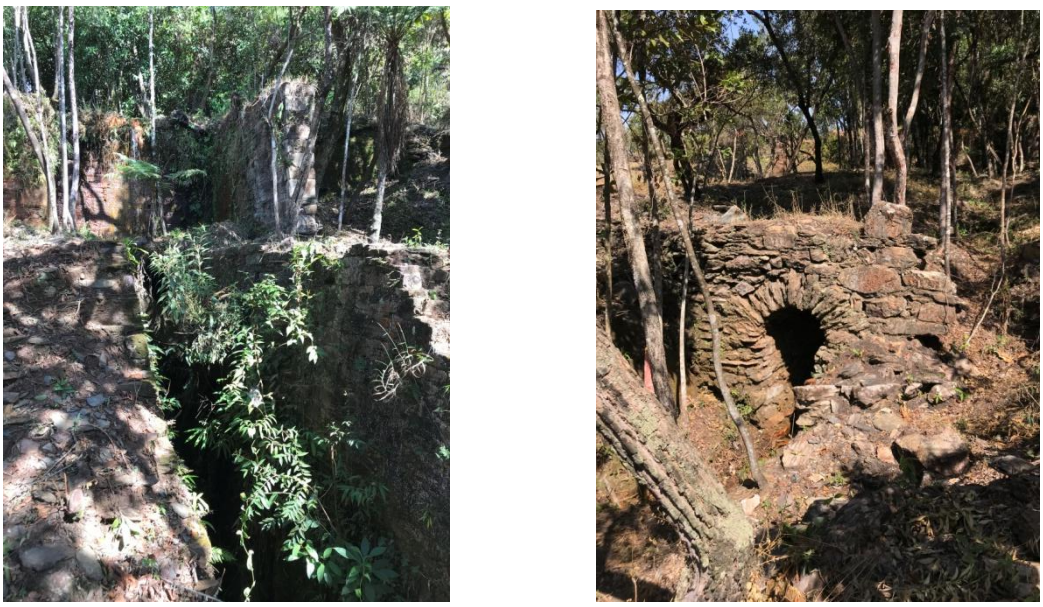


Figura 2.11 – B – Ruínas das antigas instalações da Mina de Cata Branca

Apesar de todo o avanço em relação ao maquinário utilizado na Mina, seu desfecho se deu de maneira trágica, com um acidente fatal que encerrou as atividades mineradoras na região até os dias atuais. Ocorrido no ano de 1844 um grande desmoronamento da galeria principal, matou soterrados ou afogados os trabalhadores que escavavam os patamares subterrâneos da mina. A causa do desmoronamento é atribuída ao mal escoramento das paredes e do teto da mina, além do descuido dos engenheiros ingleses, não acostumados a exploração de ouro em terreno ferrífero, e ao pouco conhecimento sobre a rocha, um xisto-quatzitico que ao se fragmentar tende a gerar blocos tabulares difíceis de serem sustentados. Atualmente é possível em visita ao local visualizar algumas ruínas da mina e os antigos acessos, como mostrados nas Figuras 2.12 A e B e 2.13.

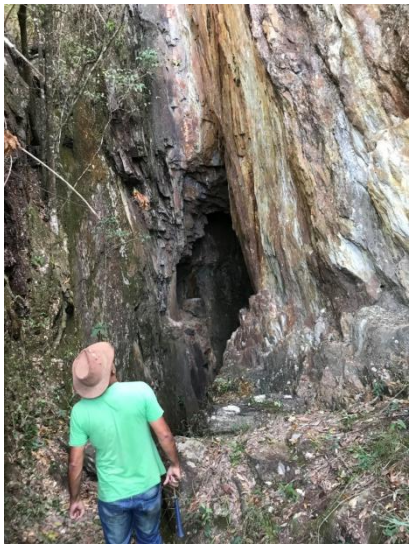
A B 

Figura 2.12 A)- Um dos acessos ao piso subterrâneo da Mina de Cata Branca (Retirado de Ruvhkys 2007) B) Entrada principal da Mina, atualmente as galerias são preenchidas por água.

Figura 2.13 - Vista das antigas ruínas da Mina de Cata Branca

CAPÍTULO 3

MÉTODOS GEOFÍSICOS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão conceituados os métodos geofísicos (magnetometria e radiometria) utilizados na elaboração deste trabalho. A geofísica é a ciência aplicada para investigar a subsuperfície terrestre através das diferentes propriedades físicas das rochas. Embora sejam passíveis as ambiguidades e incertezas na interpretação, existem medidas que podem minimizar este problema (Keary *et al.* 2009).

Existem dois ramos principais da geofísica: A geofísica de prospecção e a global. Dentro dos ramos da geofísica existem vários tipos de levantamentos de acordo com o método de investigação escolhido e cada um é sensível a uma propriedade física das rochas. Neste trabalho, utilizaram-se os métodos: magnetométrico, que faz uso do campo magnetométrico natural da terra e o radiométrico que considera a emissão natural de radiação dos elementos Tório (Th), Urânio (U) e Potássio (K) assim como a contagem total, para o estudo da falha em profundidade e das rochas e ocorrências aflorantes da região em estudo.

3.2 MAGNETOMETRIA

A magnetometria baseia-se no estudo das variações locais do campo magnético natural terrestre, que já está presente, ou seja, não é necessário que as rochas em subsuperfície sofram algum tipo de estimulação para que se obtenha uma medida do campo físico.

A grande parte dos minerais formadores de rochas não é magnética, e cada rocha tem um potencial de magnetização diferente, logo a concentração destes minerais magnéticos é responsável por produzir distorções locais no campo magnético da Terra e é através destas anomalias que é possível entender e interpretar as variações do campo.

3.2.1 O campo magnético terrestre

O campo magnético terrestre foi observado e estudado pela primeira vez pelo físico e médico inglês William Gilbert (século XVII), ele considerou a Terra como um globo magnético uniforme.

Com a evolução da ciência e da tecnologia, Blackett (1947) explicou a origem do campo magnético se daria pela rotação da Terra em torno do seu eixo, Bullard (1949) considera a origem do

campo terrestre através de mecanismos parecidos a dínamos. Yukutake (1962) propõe um sistema de dois dínamos, considerando um meio não homogênio. Lowes & Wilkinson (1963) propuseram um dínamo contínuo, o mais próximo do que poderiam ser nas interações do que acontecem no interior da Terra. (Figura 3.1)

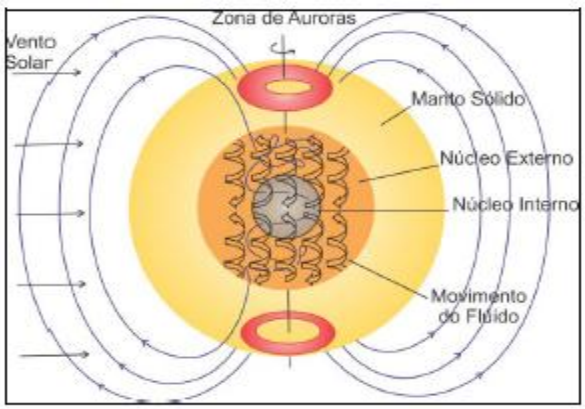


Figura 3.1- Movimento de fluido condutor e geração do campo dipolar, indicado pelas linhas de força. (Jeanloz, 1983)

O campo magnético pode ser representado por um vetor no espaço com as seguintes componentes: O campo magnético total (T) que é decomposto em componentes vetoriais denominadas componente horizontal (H) e componente vertical (V). O ângulo entre T e H denomina-se inclinação magnética (I) e o ângulo entre H e o norte geográfico denomina-se declinação magnética (D). conforme Figura 3.2 a seguir.

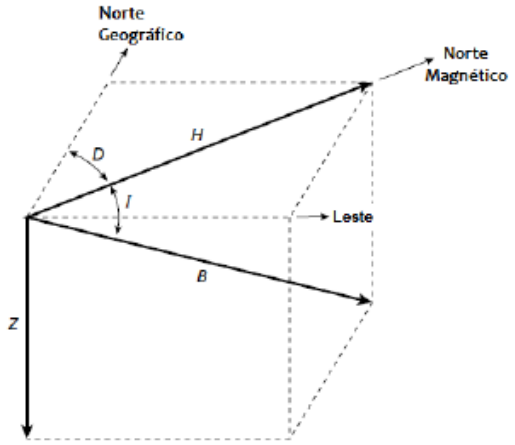


Figura 3.2- Elementos geomagnéticos, modificado de Kearey *et al.* 2002

Por convenção o campo magnético é positivo no polo Norte e negativo no polo Sul, e a intensidade do campo magnético é medida em Tesla (T), no sistema SI (Telford *et al.* 1990). O campo

magnético é vertical no polo Norte e no polo Sul e no equador magnético o campo é horizontal, paralelo à superfície da Terra.

3.2.2 O Magnetismo das rochas e minerais

Diferentes materiais terrestres apresentam diferentes comportamentos quando submetidos a um campo magnético. Quando certo tipo de material é exposto a um campo magnético ele pode adquirir uma magnetização na direção do campo que é perdida quando o material é removido do campo, sofrendo assim uma polarização magnética. A intensidade de magnetização induzida no material é proporcional à sua susceptibilidade magnética e a estimulação magnética externa do material.

A susceptibilidade magnética refere-se ao modo como a magnetização de um material responde a um campo externo quando aplicado. Esta propriedade varia dependendo do processo de Formação e da mineralogia magnética da rocha, em geral, as rochas sedimentares, metamórficas e ígneas ácidas tem baixa susceptibilidade magnética, ao passo que as ígneas básicas apresentam alta susceptibilidade magnética.

Tabela 3.1 – Valores de susceptibilidade magnética das rochas no sistema c.s.g (Telford et al. 1990).

Rochas	Variação	Média
Dolomita	0-75	10
Calcáreo	2-280	25
Arenito	0-1660	30
Folhelho	5-1480	50
Anfibolito	-	60
Xisto	25-240	120
Filito	-	130
Gnaisse	10-2000	-
Quartzito	-	350
Ardósia	0-3000	500
Granito	0-4000	200
Riolito	20-3000	-
Dolerito	100-3000	1400
Diabásio	80-13000	4500
Gabro	80-7200	6000
Basalto	20-14500	6000
Diorito	50-10000	7000
Piroxênito	-	10500
Peridotito	7600-15600	13000
Andesito	-	13500

A magnetização de uma rocha pode ser de dois tipos: a magnetização induzida e a residual. A magnetização induzida é provocada pelo campo atual da Terra, já a residual ou remanescente é

adquirida ao longo da história geológica da rocha, logo a história geológica da rocha é muito importante principalmente para o estudo do paleomagnetismo.

3.2.3 Tratamento dos dados

Os dados depois de coletados passam por um tratamento com o objetivo de eliminar as variações devidas a causas não geológicas e para a filtragem para eliminar efeitos geológicos produzidos por heterogeneidades que podem vir a distorcer o reconhecimento das anomalias.

As operações de tratamento são: a discretização e a transFormação de domínios, para modificar a apresentação das medidas de campo, o que facilita a manipulação, filtragem e empilhamento para melhorar a qualidade dos dados (Luiz & Silva 1995). A tabela 3.4 a seguir evidencia os filtros e suas finalidades.

No método magnetométrico, são realizadas as seguintes correções: correção da variação diurna, remoção do IGRF (*International Geomagnectic Reference Field*) e a correção topográfica. A variação diurna independe da geologia terrestre, e é causada pela interação da ionosfera com os ventos solares e sua correção é realizada para verificar-se a variação ocorrida durante o levantamento de dados. A remoção do IGRF permite identificar as anomalias causadas por corpos magnéticos (Silva & Barbosa 2011). E por fim, a correção topográfica é realizada, pois a topografia pode alterar os dados magnetométricos levantados, levantamentos aéreos são feitos com uma altura de voo constante em relação ao nível do mar, porém quando em continente, uma serra ou um vale pode aumentar ou diminuir a intensidade do alvo.

Os dados magnéticos podem ser filtrados e processados para ressaltar diferentes aspectos das anomalias e retirar ruídos. No presente trabalho a filtragem foi executada no *software* Geosoft.

Tabela 3.2 - Filtros de Fourrier e finalidades geofísicas no tratamento e interpretação dos dados aerolevantados

Tipo	Filtro	Finalidade
Frequência	Passa Baixa	Retira altas frequências obtendo informações de fontes profundas
	Passa Alta	Retira dados de baixa frequência, obtendo informações mais superficiais.
	Passa Banda	Determina intervalo de frequência.
Continuação	Para cima	Retira anomalias superficiais
	Para baixo	Retira anomalias mais profundas
Derivadas	Gradiente vertical (1ª derivada)	Evidencia estruturas superficiais
	Gradiente residual (2ª derivada)	Remove anomalias regionais e realça anomalias locais
	Gradiente horizontal em X	Evidencia estruturas N-S
	Gradiente vertical em Y	Evidencia estruturas E-W
	ASA	Projeção em superfície das anomalias em profundidade

ASA: Amplitude do Sinal Analítico

3.2.4 Deconvolução de Euler

A deconvolução de Euler foi proposta por Thompson (1982) e aprimorada por Reid *et al.* (1990), e é um método matemático que visa a homogeneização das soluções de um sistema de equações com múltiplas soluções. Consiste em homogeneizar as respostas efetuando comparações de respostas em Grupos.

Reid *et al.* (1990) realizaram vários estudos com a equação de Euler que correlaciona a distribuição de densidade e/ou heterogeneidade de susceptibilidade magnética das fontes geradoras com sua geometria em profundidade (Equação 3.1).

$$(x - x_0)\frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0)\frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0)\frac{\partial T}{\partial z} = -\eta T \qquad \text{(Equação 3.1)}$$

Da equação 3.1, tem-se que x_0, y_0, z_0 é a localização da fonte magnética e x, y, z é o ponto de levantamento, T é a anomalia de campo total, η é uma medida de taxa de variação que depende da fonte magnética (Kearey *et al.* 2009).

O processamento dos dados ocorre por meio da inversão dos mínimos quadrados calculados a partir da equação de Euler, um programa de computador fornece o perfil de profundidade da área demarcada, a partir de dados potenciais. No programa, entra-se com os seguintes dados: valores das anomalias do perfil, o índice estrutural e a profundidade máxima que define a área de influência, quanto maior o seu valor, menos pontos serão registrados para a representação do perfil.

Tabela 3.3 – Relação do índice estrutural com os modelos físicos e geológicos (Reid *et al.* 1990).

Índice estrutural	Modelo físico	Modelo geológico
1,0	Monopolo	Contato
1,5	Dipolo	Dique fino
2,0	Prisma	Dique
2,5	Cilindro	Pipe
3,0	Esfera	Diápiro

Por ser um método matemático, não se leva em consideração nenhum critério geológico, logo para o método ter viabilidade geológica, deve-se conhecer o arcabouço geológico da área estudada.

3.3 RADIOMETRIA

Os métodos radiométricos utilizam da radioatividade natural de três elementos: urânio (^{235}U), tório (^{238}Th) e um isótopo do potássio (^{40}K). Existem mais de 50 elementos naturalmente radioativos, mas os citados anteriormente são expressivamente mais úteis para a prospecção mineral. A radiometria é de grande auxilio em levantamentos geológicos que visam mapear certa área, dada à possibilidade de caracterizar diferentes tipos de rochas e delimitar precisamente o contato entre as litologias (Kearey *et al.* 2009).

3.3.1 Radioatividade Natural

Denominam-se isótopos os elementos que possuem o mesmo número de prótons e diferentes números de nêutrons no seu núcleo. Alguns isótopos são instáveis e podem se desintegrar para formar outros elementos, a radioatividade natural é originada da desintegração espontânea desses elementos químicos, com emissão de partículas alfa (α) e beta (β), liberando fótons gama (γ).

As partículas alfa (α) são núcleos de hélio emitidos durante as desintegrações dos isótopos e possuem carga positiva. As partículas beta (β) são por sua vez negativas, e praticamente não tem

massa, são emitidas quando o nêutron se desintegra em um núcleo instável, resultando em um elétron ejetado e um próton que permanece no núcleo. Os fótons (γ) são radiações eletromagnéticas liberadas por núcleos excitados pela emissão de uma partícula (α) ou (β).

Alfa (α), beta (β), e gama (γ) têm diferentes capacidades penetrativas como explicitadas na tabela 3.4. Observa-se que os fótons gama tem frequências de ordem 1016Hz dentro do espectro, logo são mais utilizados nos levantamentos radiométricos por serem mais penetrativos (Kearey *et al.* 2009). Porém para os raios gama não se pode definir um alcance específico, dado que sua atenuação é exponencial e depende da energia.

Tabela 3.4 – Relação de penetratividade das diversas partículas radioativas

Tipo	Natureza da partícula	Alcance em ar	Barreiras físicas
Alfa	Composta de dois prótons e dois nêutrons	Centímetros	Folha de papel
Beta	Elétron de alta energia	Dezenas de centímetros	Folha de alumínio (com espessura milimétrica)
Gama	Radiação eletromagnética de alta energia	Centenas de metros	Paredes de concreto (espessura superior a 1 metro)

A figura 3.3 mostra uma representação esquemática do poder penetrativo das partículas radioativas citadas anteriormente.

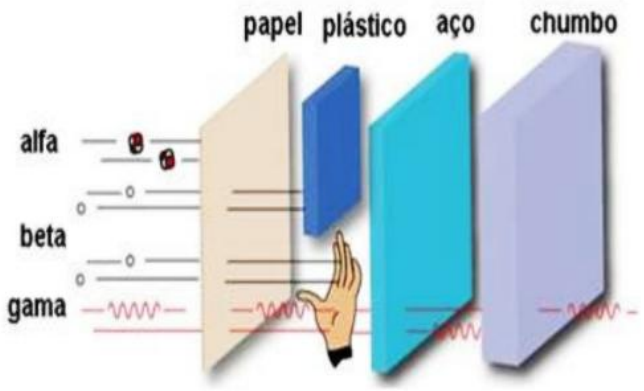


Figura 3.3 - Capacidade de penetração das partículas radioativas (Fonte: https://pt.slideshare.net/oficina-de-radiaes)

3.3.2 Radioatividade das rochas e minerais

Traços de minerais radioativos podem ser encontrados em todos os tipos de rocha, sendo mais fortes em umas que outras. Nas rochas sedimentares e nos sedimentos metamorfisados em geral, a radioatividade é maior do que nas rochas ígneas e metamórficas. Em linhas gerais, nas rochas meta sedimentares a radioatividade é maior do que nas rochas meta ígneas, e quando a analise é realizada apenas dentro do Grupo das metasedimentares, quanto maior a argilosidade presente maior é a concentração de isótopos, já para as meta ígneas o aumento da concentração de isótopos esta relacionado ao aumento do teor de sílica (Telford *et al.* 1990). A exceção existe quando se compara uma rocha sedimentar e um granito rico em potássio, ou as rochas ígneas ácidas no geral.

Os principais minerais de potássio ocorrem em rochas ígneas ácidas e são eles: ortoclásio/microclína e a moscovita. Já os principais minerais de urânio são: uraninita, carnotíta e a gummita. E por fim, os principais minerais de Tório são o zircão e a monazita, encontrados ocmumnete em granitos, gnaisses e pegmatitos. (Telford *et al.* 1990)

A tabela 3.5 sintetiza as principais fontes minerais desses elemntos radioativos e suas ocorrências respectivamente.

Tabela 3.5 - Ocorrência dos minerais com elementos radioativos e suas principais ocorrências (Telfod *el al.* 1990)

POTÁSSIO	**Mineral**	i - Ortoclásio e microclina $KALSi_3O_8$ ii - Muscovita $H_2KAl(SiO_4)_3$ iii - Alunita $K_2Al_6(OH)_{12}SO_4$ iv - Silvita e Carnalita $KCl.MgCl_{12}.6H_2O$
	Ocorrência	i – principais constituintes de granitos ácidos e pegmatitos . ii – constituintes de granitos ácidos e pegmatitos. iii – alteração de vulcânicas ácidas. iv – depósitos sedimentares salinos.
TÓRIO	**Mineral**	i – Monazita ThO_2 + fosfatos de terras raras ii – Torianita $(Th,U)O_2$ iii – Torita, Uranotorita $ThSiO_4$ + U
	Ocorrência	i – Granitos, pegmatitos e gnaisses ii – Granitos, pegmatitos e depósitos de aluvião
URÂNIO	**Mineral**	i – Uraninitas (óxidos de U, Pb, Ra + Th, terras raras) ii – Carnotita $(K_2O.2UO_3.V_2O_5.2H_2O)$ iii – Gumita (alteração de uraninitas)
	Ocorrência	i – Granitos, pegmatitos e veios com Ag, Pb, Cu etc. ii – Arenitos iii- Associados com uraninitas

3.3.3 Integração geológica dos dados radiométricos

Quando se integra os dados radiométricos e geológicos, junto à aplicação de algum outro método geofísico, para a confecção de mapas temáticos como o de concentração absoluta com os canais de U, Th e K; o de suas razões (U/K, U/Th e Th/K); o de imagem ternária em cores RGB e o de fator F, tem-se uma importante ferramenta pois é possível a visualização dos tipos de rochas, trends estruturais, contatos geológicos e, claro, a distribuição dos teores, sendo de grande interesse inclusive para o ramo da pesquisa mineral.

O mapa de contagem total apresenta todos os raios gama de interesse geológico, o canal de potássio caracteriza áreas com a ocorrência de rochas ricas em K, o de tório permite a identificação de áreas com alto intemperismo químico, já o canal de urânio, percebe rochas ricas em U e identifica níveis e ambientes propícios a sua acumulação. Outros mapas temáticos importantes são os de razões e fator (F) são usados para ressaltar um elemento radioativo em relação a outro medido.

CAPÍTULO 4

TECTÔNICA DISTENSIVA E COMPRESSIVA - FALHAS

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda aspectos teóricos sobre a geometria e os processos deformacionais envolvidos em uma região submetida a tectônica distensiva ou compressiva. As falhas são estruturas planares em que se observa um movimento relativo entre os blocos, paralelo ao plano da estrutura. As falhas podem ser iniciadas a partir de juntas pré-existentes (Engelder 1987, Willemse *et al.* 1997, Mansfield & Cartwright 2001) ou de fissuras microscópicas quando reativadas por deslizamento sob tensão cisalhante (Engelder 1987).

Engelder (1987) propõe que, para que ocorra o início e a propagação de falhas a tensão diferencial deve ser mais alta do que as diferenças das tensões regionais médias no interior da crosta. Os trabalhos pioneiros sobre as falhas tem origem nos testes de cisalhamento simples usando camadas de argila sobre tábuas de madeira adjacentes que deslizavam uma em relação a outras, realizados por H. Cloos (1885) e W. Riedel (1920). A figura 4.1 a seguir representa o experimento de cisalhamento.

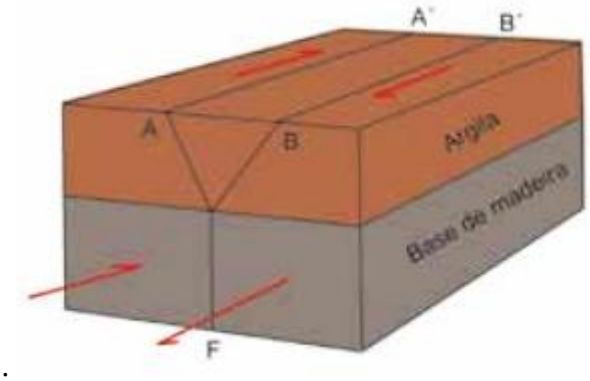


Figura 4.1 - Representação dos experimentos de cisalhamento de Cloos e Riedel. O embasamento é representado por dois blocos de madeira que apresentam movimento relativo direcional segundo o plano F. (Zerfass & Chemale Jr. 2011).

4.2 SISTEMAS DE FALHAS

As falhas tendem a se organizar em sistemas que são reconhecidos em mega-escala observadas por meio de técnicas geofísicas e sensoriamento remoto e quando nesta escala o estudo permite associar os sistemas de falhas ao campo de tensões regional, produzido pela interação entre as placas tectônicas, por exemplo. Já em afloramento é possível observar os sistemas de meso-escala.

4.2.1 Sistema de falhas distensionais

Neste sistema as falhas são formadas pela ação de uma tração remota (σ3) que assim como (σ2) também é horizontal, enquanto (σ1) por sua vez é vertical (Zerfass & Chemale Jr. 2011). Os sistemas distensionais dão origem a bacias do tipo rift por exemplo.

Mandl (1988) caracterizou dois tipos de sistemas distensionais, baseando-se no nível crustal: O primeiro envolve apenas as camadas mais superficiais, com horizontalização das falhas normais em direção a uma superfície de descolamento inferior. O segundo tipo envolve a movimentação do substrato que se reflete como falhas normais nas camadas superiores. As figuras 4.2. e 4.2.A mostram esquematicamente como se dá a evolução deste dois sistemas caracterizados.

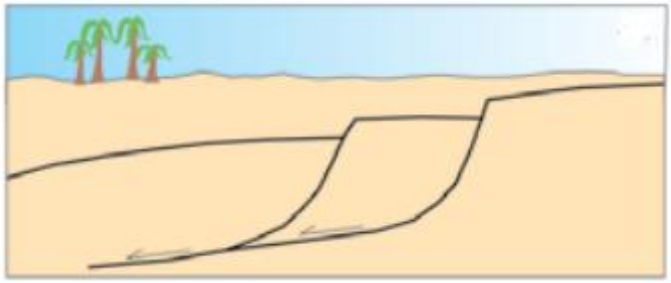


Figura 4.2. - Movimentação nas camadas superficiais sem envolvimento do embasamento (Modificado de Mndl (1988) e retirado de H. Zerfass, F. Chemale Jr., (2011)).

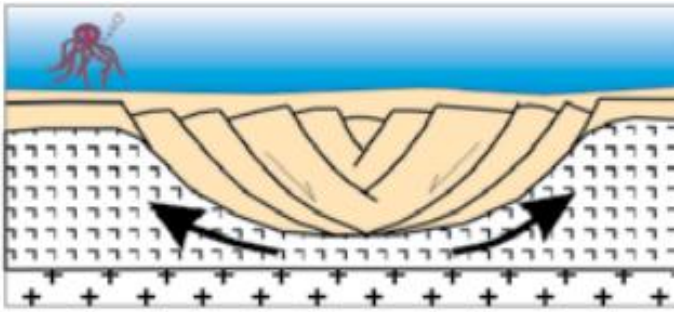


Figura 4.2.A - Movimentação das camadas mais profundas de sal, gerando extensão nas camadas mais superficiais (Modificado de Mndl (1988) e retirado de H. Zerfass, F. Chemale Jr., (2011)).

Sistemas distencionais podem gerar falhas de transferência, pela ruptura de blocos durante a evolução da distensão. Outras falhas possíveis de serem geradas por um sistema distencional são as falhas oblíquas onde a tração remota (σ3), ocorre como um componente significativo de deslocamento direcional (Crider 2001). Deve-se observar, entretanto, que uma falha de transferência terá movimentação vertical apenas se a falha normal principal tiver mergulho vertical (Young *et al.* 2011), se não ela será oblíqua quanto mais suavizado for o mergulho da falha principal.

Quando vistos em planta, esses sistemas podem ser anastomosados ou sub-paralelos apresentando falhas de transferência em alto ângulo ou perpendiculares em relaçao a falha principal (Zerfass & Chemale Jr., 2011).

4.2.2 Sistema de falhas compressionais

Quando se tem uma situação de encurtamento crustal, o eixo da tensão principal máxima (σ1) é horizontal e paralelo ao encurtamento, ao passo que a tensão principal mínima (σ3) é vertical, desse modo ocorre grande alívio de tensão na vertical.

Mandl (1988) caracterizou dois tipos básicos de sistemas compressionais em função da profundidade da crosta em que o processo ocorre. Logo, em sistemas profundos, o encurtamento crustal domina no embasamento profundo, o que causa um soerguimento ao longo de falhas subverticais. A figura 4.2.B ilustra a situação descrita anteriormente.

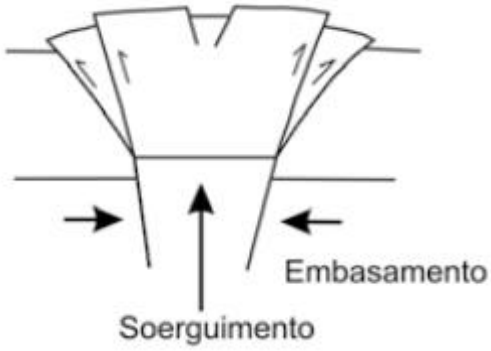


Figura 4.2.B - Sistema desenvolvido devido à compressão ocorrida no embasamento profundo (Mandl 1988).

Já nos sistemas rasos, o encurtamento crustal ocorre nas camadas mais superficiais, não afetando, portanto, as rochas do embasamento. As falhas que são geradas nesse sistema iniciam-se por uma superfície de descolamento sub-horizontal.

4.2.3 Sistema de falhas transcorrentes

Neste sistema de falhas os eixos principais são horizontais (σ1 e σ3) e o intermediário é vertical (σ2). Este arranjo pode produzir regimes tanto distencionais quanto compressionais (Zerfass & Chemale Jr. 2011).

Em planta os sistemas de falhas direcionais exibem padrão anastomosado,com ocorrência de zonas de transtração e transpressão, que são respectivamente os casos especiais de distensão e compressão associados a um sistema de falhas transcorrentes (Davison 1994). Já em perfil é muito comum observar a geometria semelhante às estruturas de flor positiva, como ilustrado na Figura 4.2.C.

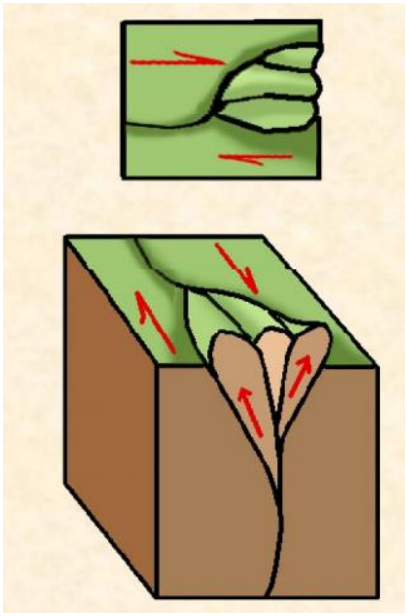


Figura 4.2.C - Estrutura em flor positiva relacionado ao movimento transcorrente. Vista em planta e em perfil. (Retirado de http://www.neotectonica.ufpr.br/aula-geologia/aula7.)

As falhas transcorrentes podem ocorrer às margens da falha principal, formando assim grábens e zonas com falhas de empurrão e dobras em ângulos oblíquos em relação à falha principal. A Figura 4.2.D ilustra essa situação descrita anteriormente

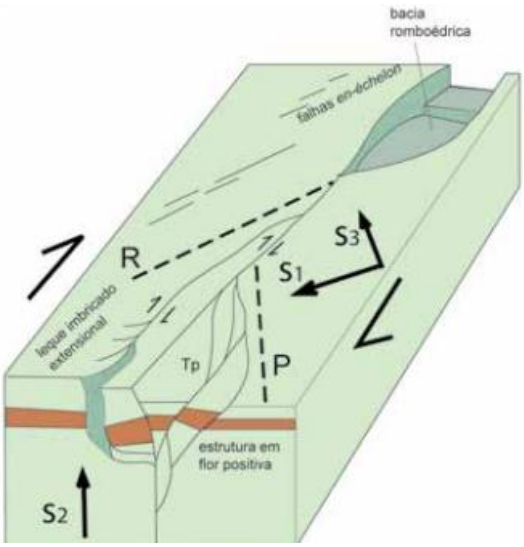


Figura 4.2.D - Sistema de falhas direcionais em um sistema de falhas transcorrentes (Davison 1994).

...

CAPÍTULO 5

ANÁLISE QUALITATIVA

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada a análise geofísica qualitativa da área estudada, sendo realizada a interpretação dos mapas temáticos magnetométricos e radiométricos. Esse estudo visa uma posterior integração dos mapas geológicos 1:50000 do Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero realizado pela parceria CODEMIG/UFMG (Figura 5.1) com os mapas temáticos utilizando o *software* Oasis Montaj 7.0.1 do sistema GEOSOFT gerados através do banco de dados citados a seguir.

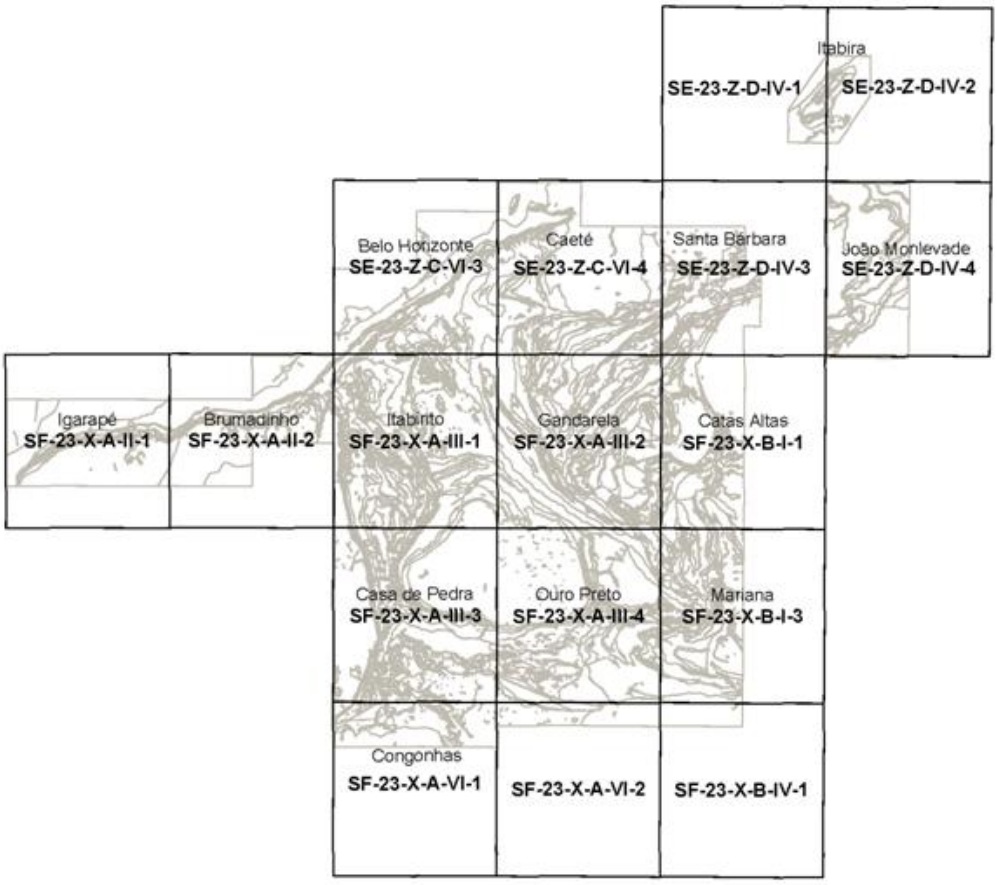


Figura 5.1 - Localização da área segundo Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero (CODEMIG 2005).

A área do presente estudo está localizada na Área 2 no bloco oeste do Programa de Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais realizado pela Secretaria de Estado de Minas e Energia do Estado de Minas Gerais – SEME, compreendendo cerca de 35.176km^2 de superfície, conforme indicado na Figura 5.2.

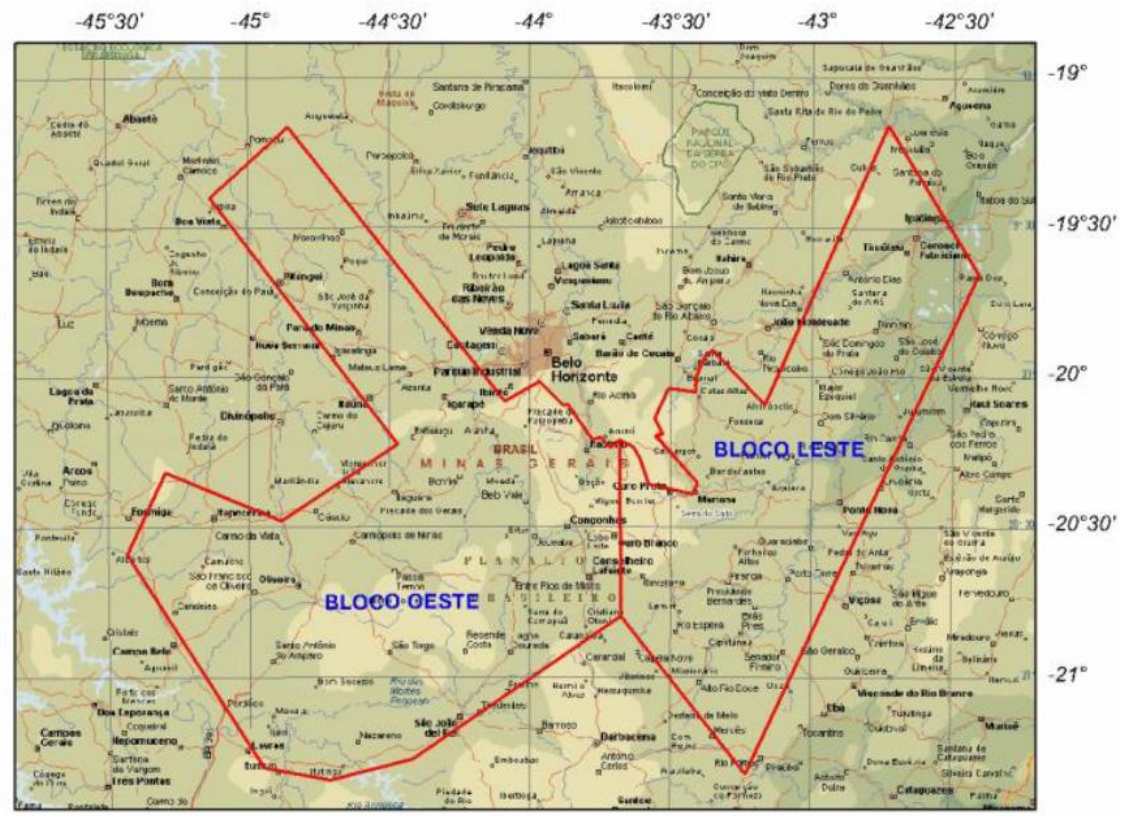


Figura 5.2 - Localização da Área 2 situada no bloco Oeste do Programa de levantamento aerogeofísico de Minas Gerais. (Lasa Engenharia e Prospecções S. A 2001).

5.2 BANCO DE DADOS

A base de dados geofísicos aeromagnéticos e aeroradiométricos utilizados neste estudo foram disponibilizadas pela Secretaria de Estado de Minas e Energia do Governo de Minas Gerais – SEME, através dos dados obtidos pelo projeto Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais – Área 2 – Pitanguí/ São João Del Rei/ Ipatinga, realizado pela Lasa Engenharia e Produções S.A., entre os meses de agosto de 2000 e março de 2001.

A Área 2 foi subdividida em duas áreas: bloco oeste e bloco leste. A região de estudo se encontra no bloco oeste que compreende uma superfície de 21.564km² com direção de linhas de produção N30E e linhas de controle N60W. O espaçamento entre as linhas de produção foi de 250 m e entre as linhas de controle de 2.500 m.

O levantamento dos dados foi realizado por duas aeronaves Cessna, modelo 404 – Titan, que sobrevoavam a uma altura média de voos fixada em 100 metros acima do terreno e equipadas com magnetômetro de bombeamento ótico de vapor de césio da Geometrics, modelo G-822A,

gamaespectrômetro Exploranium, modelo GR-820, e sistema de navegação GPS Sercel NR-103 de 10 canais (Lasa Engenharia e Prospecções S. A 2001).

5.3 METODOLOGIA

Os mapas temáticos foram gerados através do processamento dos dados pelo *software* Oasis Montaj versão 7.01, importou-se o banco de dados referente à Área 2 de estudo e posteriormente gerou-se o arquivo gdb. Os dados da área de estudo foram então interpolados para a geração das imagens temáticas em malha regular de 300 metros. Os mapas temáticos confeccionados foram de ordem magnetométrica (Campo Magnético Anômalo; Gradiente Vertical de Primeira e Segunda Ordem; Gradientes Horizontais em X e Y; amplitude do sinal analítico – Figura 5.3) e de ordem radiométrica (Canais de K, Th, U e Contagem Total; Razões Th/K, U/K, U/TH; Imagem Ternária; Parâmetro F – Figura 5.7).

O uso de outro *software*, ArcGis (versão 10.3) permitiu a integração dos mapas georreferenciados com os dados geológicos em ambiente SIG, do Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero realizado pela parceria CODEMIG/UFMG. O objetivo foi a realização de uma análise qualitativa integrada dos dados.

5.4 ANÁLISE MAGNETOMÉTRICA

A susceptibilidade magnética das rochas é responsável pela demarcação das heterogeneidades na região. Quando gerados os mapas magnetométricos, o objetivo é por meio dos filtros aplicados entender o comportamento magnético das rochas da região, assim como o comportamento estrutural e litológico. A filtragem dos dados magnetométricos visa realçar as estruturas em profundidade de acordo com uma direção preferencial. Os dados são tratados por um programa de computador através de um processo conhecido como discretização de grandezas físicas (comprimentos de onda).

O *software* Oasis Montaj permite (ferramenta MAGMAP) tratar os dados aerolevantados, empregando-se uma sequencia de filtros para a geração dos mapas de derivadas (mapa de gradiente vertical de primeira e segunda ordem em Z e de primeira e segunda ordem em X e Y) e do mapa de amplitude do sinal analítico (ASA), Figura 5.3.

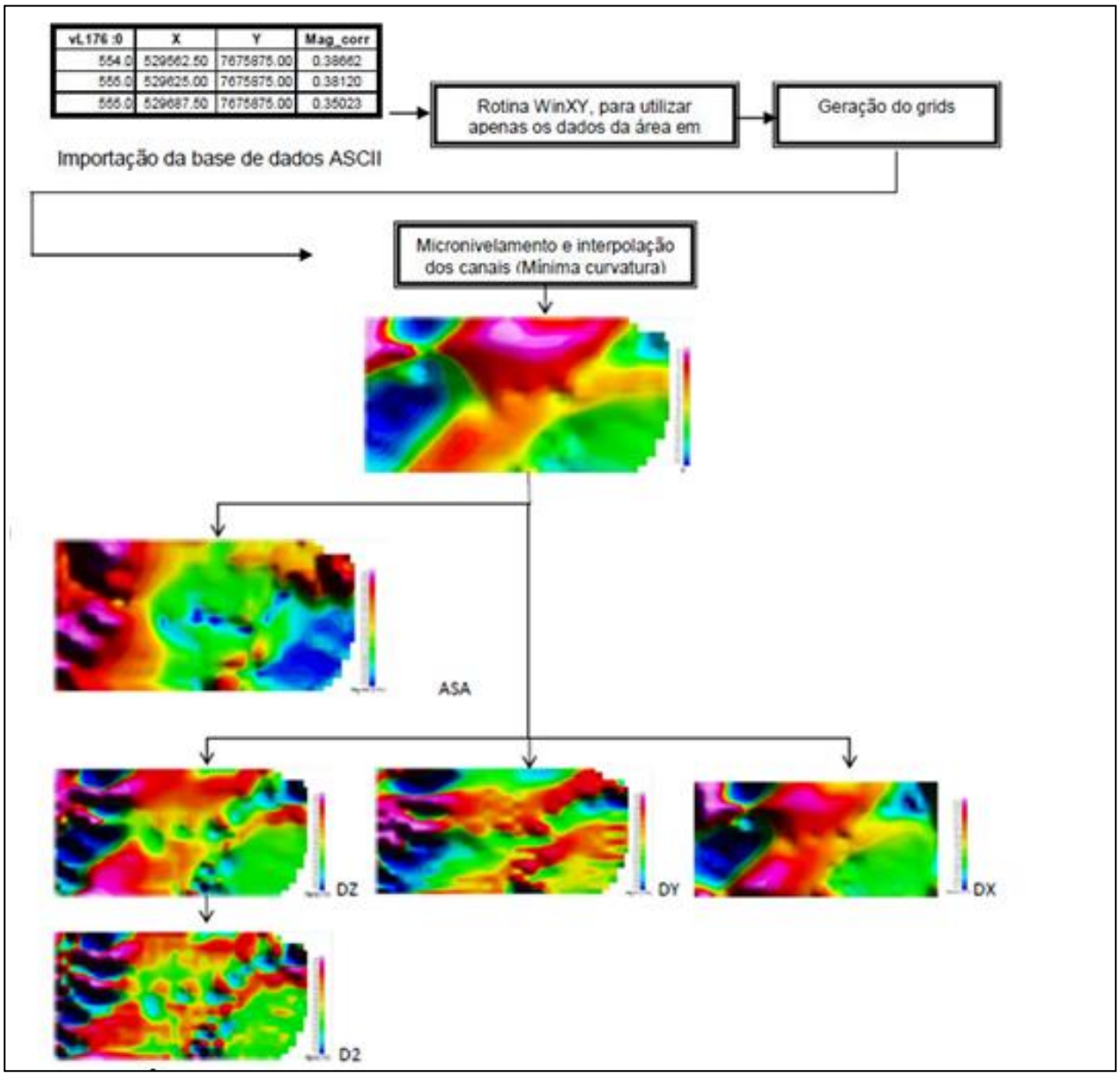


Figura 5.3 - Fluxograma do desenvolvimento dos mapas temáticos segundo metodologia utilizada. Do mapa de Campo anômalo obtêm-se as derivadas: DX, DY, DZ e D2(remover as anomalias regionais-mapa residual); assim como o mapa de Amplitude do sinal analítico.

A interpretação dos dados magnetométricos consistiu no traçado das características (comprimento de onda e amplitude), magnetofácies, sobre o mapa ASA (Figura 5.4B). A interpretação magnetométrica qualitativa da área fundamentou-se principalmente sobre o mapa de amplitude do sinal analítico, devido a sua característica monopolar.

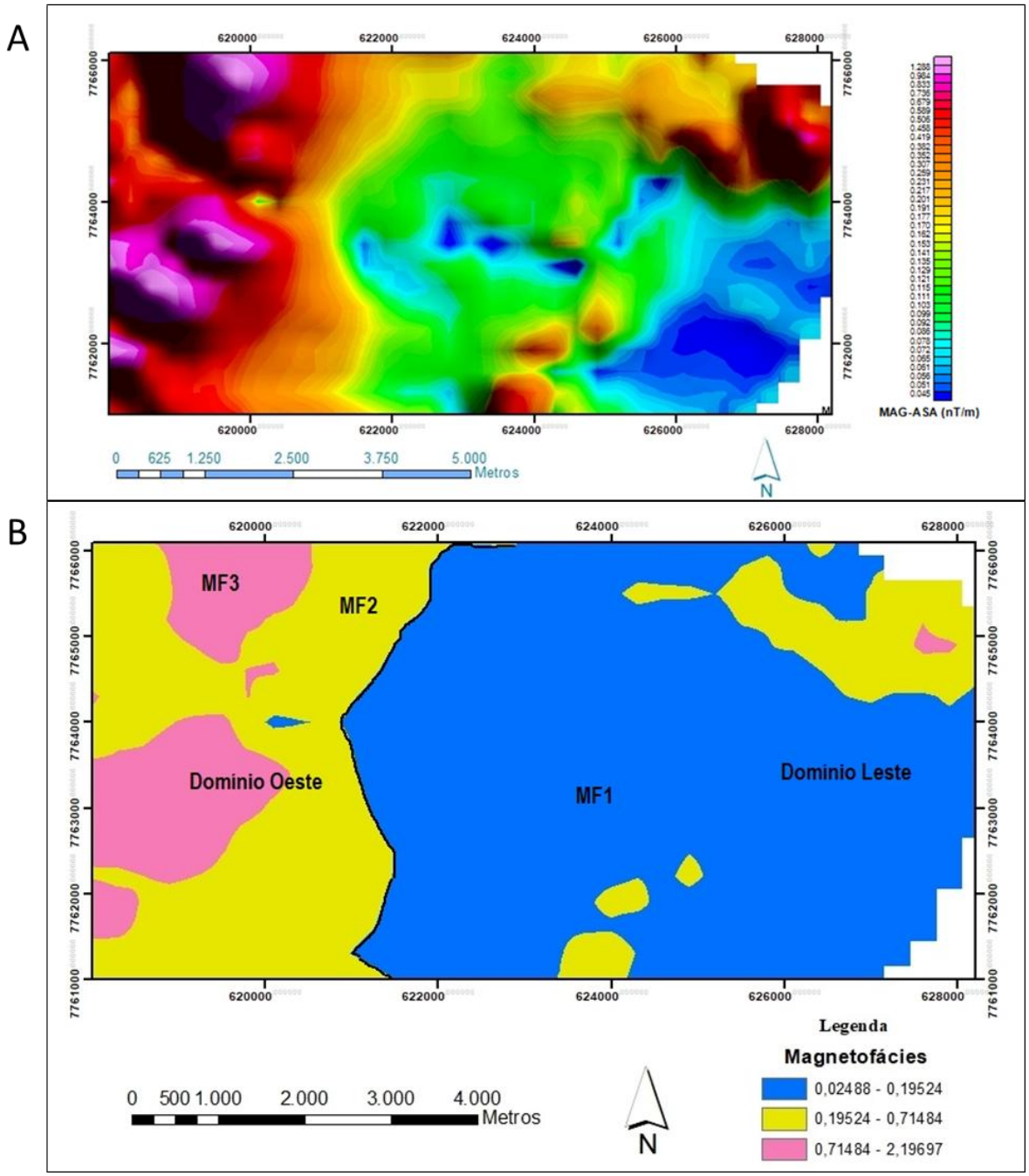


Figura 5.4 – **A**) Mapa de Amplitude de sinal analítico. Os tons em azul e verde indicam um baixo magnético local, enquanto os tons em vermelho e magenta são os altos magnéticos. Em tons de amarelo e laranja, têm-se os intermediários. **B**) Determinação dos domínios leste e oeste da área; assim como as fácies magnéticas presentes. MF1: magnetofácies 1, MF2: Magnetofácies 2, MF3: Magnetofácies 3.

O estudo das anomalias magnéticas da área foi realizado, através da descrição das fácies magnéticas individualizadas de acordo com o comportamento semelhante das anomalias.

Foram identificados 3 magnetofácies em dois domínios, os quais foram enquadrados de acordo com seu grau de magnetização segunda tabela a seguir.

Tabela 5.1 – Identificação dos domínios e das magnetofácies descritas

Domínio	Magnetofácies	Magnetização
Domínio Leste	Magnetofácies 1	Baixa
Domínio Oeste	Magnetofácies 2	Intermediária
	Magnetofácies 3	Alta

No domínio oeste (Figura 5.4B) prevalecem as magnetofácies de alta a intermediária magnetização, enquanto no domínio leste, a fácies magnética que prevalece é a de baixo grau de magnetização. A magnetofácies 1 (Figura 5.4B), caracteriza-se por baixa resposta do sinal magnético, identificada majoritariamente no do domínio leste na coloração azul com valores que variam entre 0,02488 e 0,19524 nT/m, sendo marcada por baixas amplitudes e altos comprimentos de onda. No mapa da Amplitude de Sinal Analítico (Figura 5.4A), a resposta é nos tons de verde e azul, basicamente a litologia presente no domínio Leste são rochas do Supergrupo Rio das Velhas e rochas do Complexo Bação. Contudo, a discussão da integração geofísico-geológica será reservada para o capítulo seguinte.

A magnetofácies 2 representa uma magnetização intermediária, com valores que variam de 0,19524 a 0,71484 nT/m. encontra-se principalmente no domínio Oeste, com acontecimentos esporádicos no domínio leste, na Figura 5.4B é caracterizada pela cor laranja, enquanto no ASA (Figura 5.4A) são marcadas pelas respostas nas colorações em tons que vão do vermelho ao alaranjado.

Por fim a magnetofácies 3 é bastante representativa da área do domínio Oeste, seus valores variam entre 0,714841 e 2,19697 nT/m, caracterizados na Figura 5.4B pela coloração magenta e no mapa da Amplitude de Sinal Analítico, a resposta são nos tons que variam do vermelho ao fúcsia. O fato de ser encontrada uma elevada susceptibilidade magnética pode ser explicado pelas unidades presentes, depósitos paleógenos elúvio-coluviais , com a presença de capeamento limonítico, com seixos, calhaus e matacões de Formação ferrífera; e ainda rochas da Formação Cauê do Grupo Itabira, com Itabiritos com lentes de hematita compacta e pulverulenta.

Ainda sobre o mapa da Amplitude do Sinal Analítico foram traçados os lineamentos magnéticos, porém todos os outros mapas foram utilizados como auxílio, e os dados obtidos foram tratados no programa OpenStereo. Desta forma, determinou-se a orientação principal dos lineamentos, conforme observado na figura 5.5.

A Figura 5.6 mostra a integração dos mapas ASA e de magnetofácies, de modo que se nota de maneira didática a sobreposição das anomalias correlacionadas com as delimitações das magnetofácies.

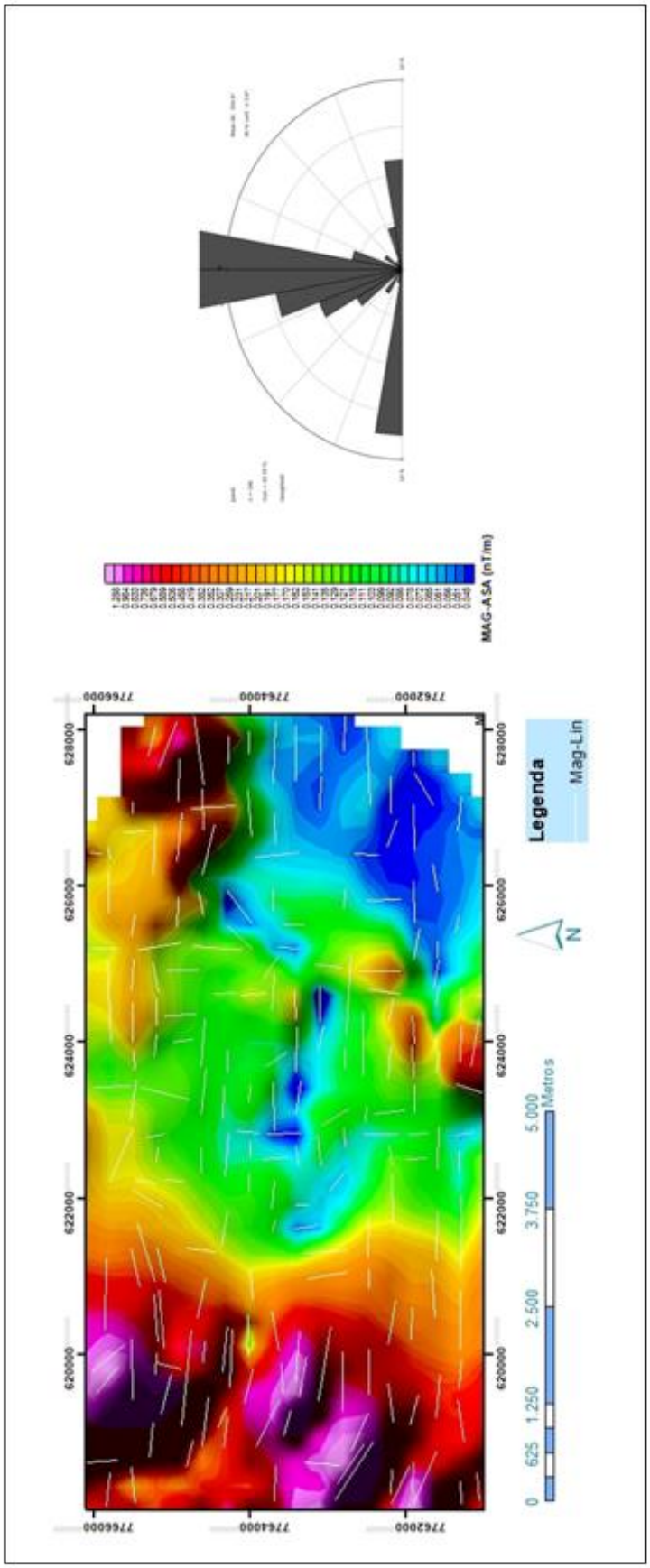


Figura 5.5 – Lineamentos magnéticos traçados sobre o ASA e roseta da orientação preferencial dos lineamentos, mostrando um comportamento predominante nas direções N-S e E-W

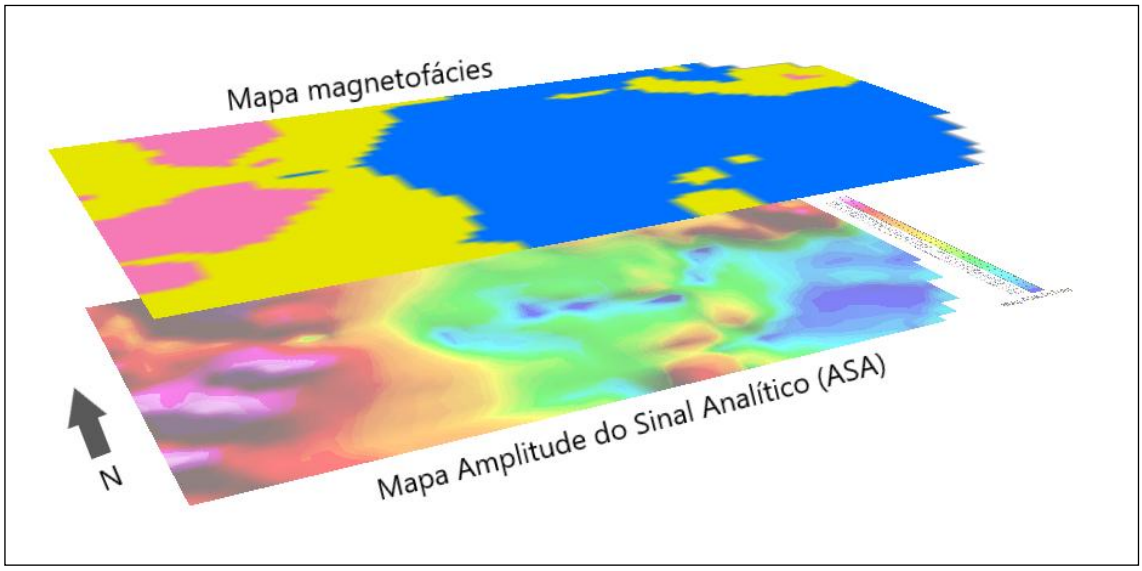


Figura 5.6 - Sobreposição de imagens (ASA e mapa de magnetofácies) para a observação da coerência da demarcação das magnetofácies.

5.5 ANÁLISE RADIOMÉTRICA

A metodologia empregada para gerar os mapas temáticos radiométricos (canais de Th, U, K, contagem total, fator F, razões entre os radioelementos e imagem ternária – Figura 5.7) é semelhante à empregada na elaboração dos mapas magnetométricos, contudo não há necessidade da ferramenta MAGMAP.

Devido a baixa penetrabilidade da radiometria, os mapas temáticos refletem diretamente as rochas em superfície ou a uma profundidade centimétrica, sendo assim a grande aplicabilidade está na correlação dos padrões anômalos de radioatividade do Tório (^{232}Th), Urânio (^{238}U), e Potássio (^{40}K) com a litologia descrita em superfície. Configura, portanto um passo crucial na integração geológico-geofísica.

A Figura 5.7 apresenta a descrição dos passos realizados para a geração dos mapas temáticos radiométricos. Primeiramente, geram-se os grids e efetua-se o micro nivelamento e a interpolação dos dados através dos métodos por mínima curvatura, procede-se então com a rotina semelhante a já descrita no tópico 5.4.

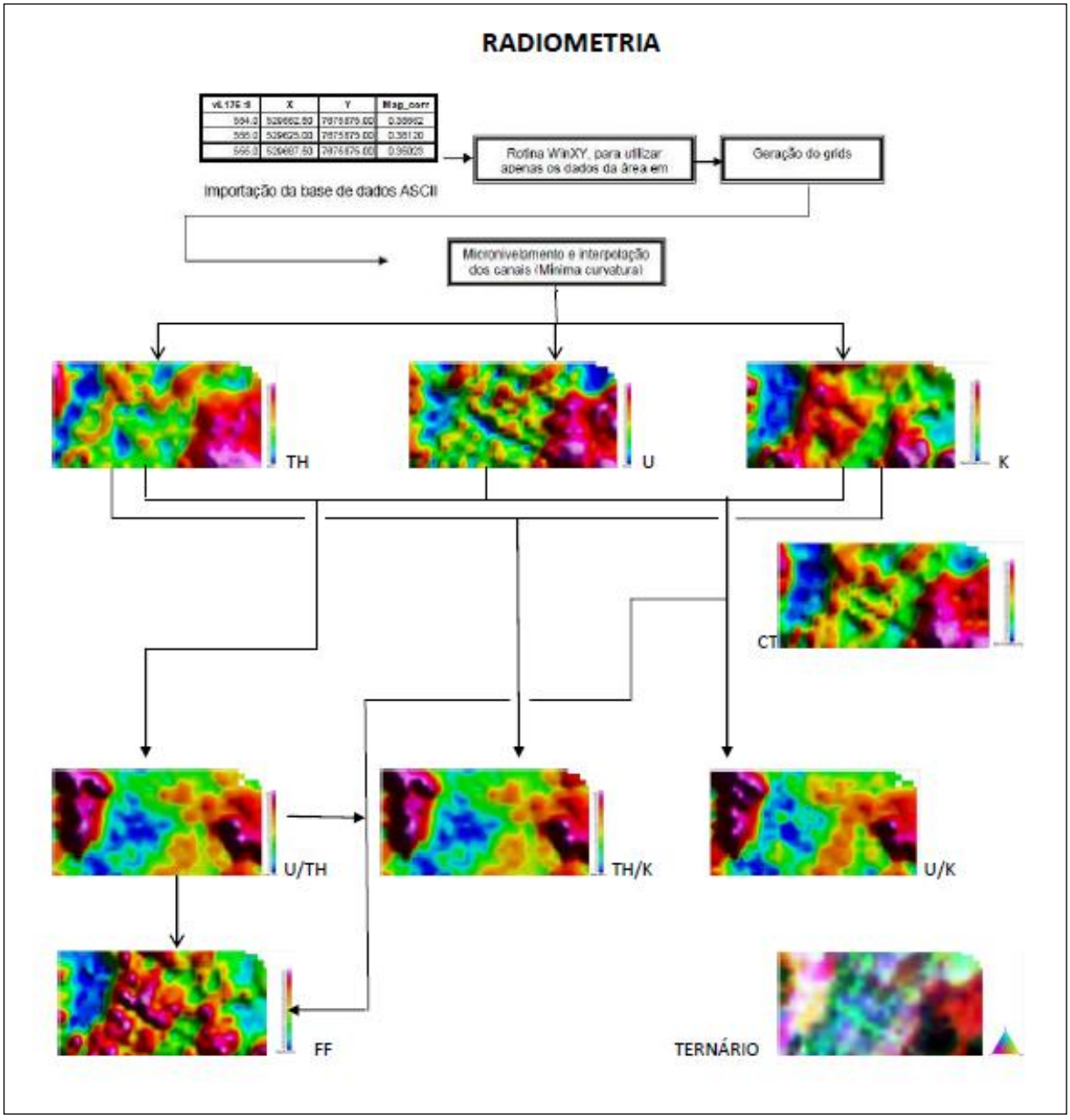


Figura 5.7 – Apresentação dos mapas temáticos radiométricos.

De maneira semelhante, individualizaram-se as radiofácies com o auxílio principalmente do canal de Tório e da Imagem ternária, foram determinados três domínios e descritas cinco radiofácies conforme Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Descrição das radiofácies e dos domínios determinados na área com base no canal de Tório

Domínio	Anomalia de Th	Anomalia de U	Anomalia de K
Domínio Leste	Alta	Baixa	Baixa
Dominio Central	Intermediária	Intermediária	Intermediária
Dompinio Oeste	Baixa	Alta	Alta

O domínio Leste é característico por apresentar a maior concentração de Tório entre eles, e valores relativamente menores de Urânio e Potássio. O domínio central é marcado por anomalias intermediárias de Th, U e K. Já o domínio Oeste é marcado por uma baixa concentração de Tório, ao passo que as concentrações de Urânio e Potássio são altas. A Figura 5.8 mostra o mapa radiométrico do Canal de Tório. Figura 5.9 mostra a divisão dos domínios e as fácies radiométricas identificadas.

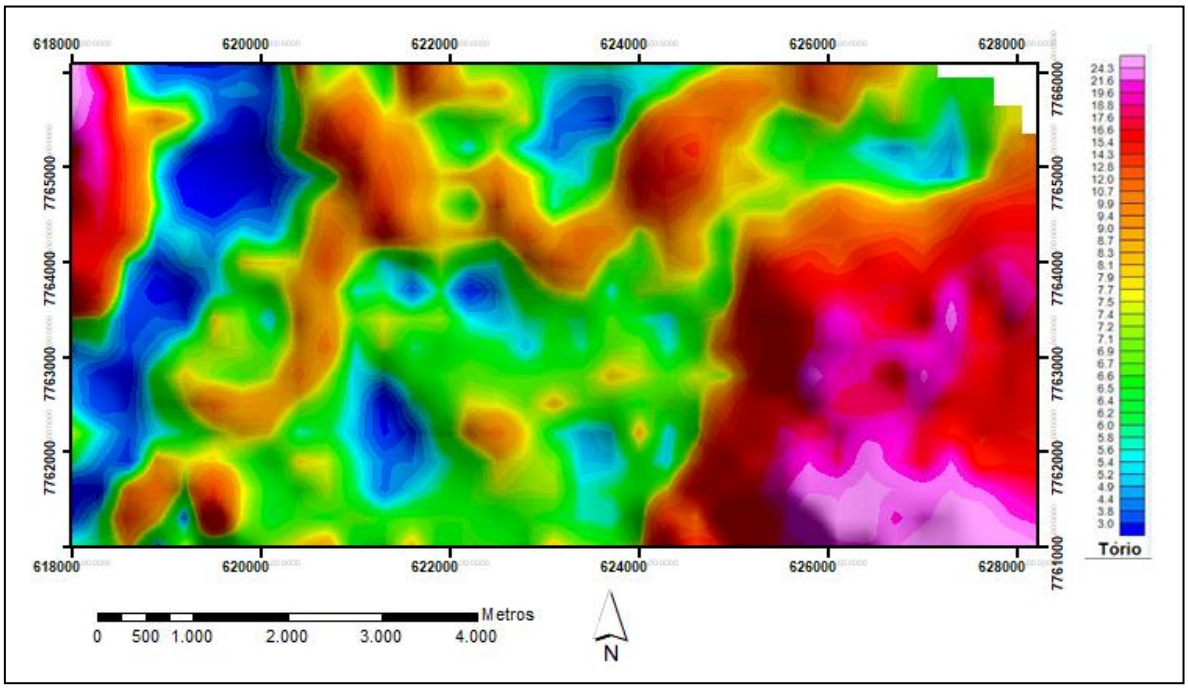


Figura 5.8 - Mapa radiométrico do Canal de Tório

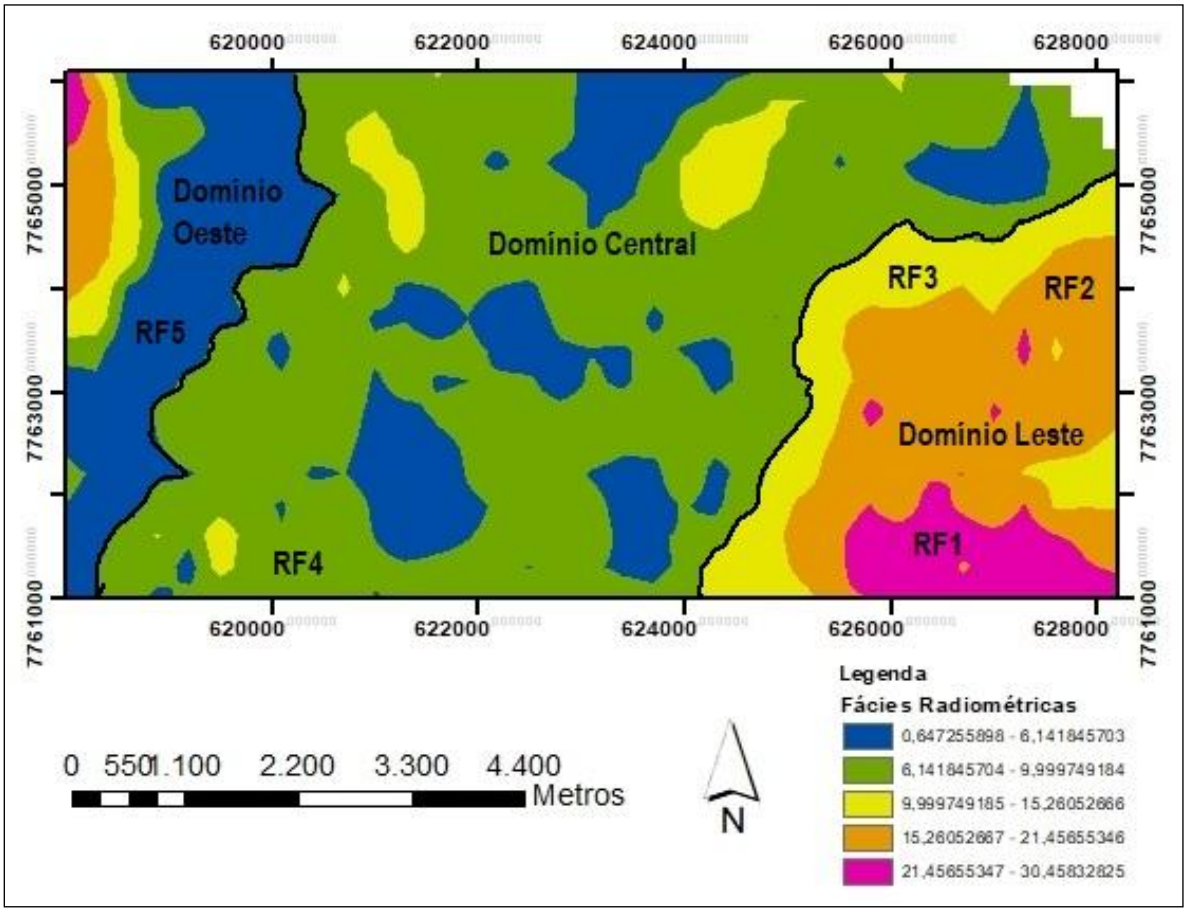


Figura 5.9 - Descrição das radiofácies e divisão dos domínios presentes. RF1: radiofácies 1, RF2: radiofácies 2, RF3: radiofácies 3, RF4: radiofácies 4, RF5: radiofácies

Os lineamentos foram traçados baseados em todos os mapas temáticos radiométrico, porém são apresentados sobrepostos ao mapa do canal de Tório. Posteriormente gerou-se uma roseta, com o objetivo de caracterizar essas estruturas superficiais, como observado na Figura 5.10. A análise qualitativa das principais radiofácies deu-se sobre a imagem ternária, escala CMY, com o auxilio dos demais mapas temáticos.

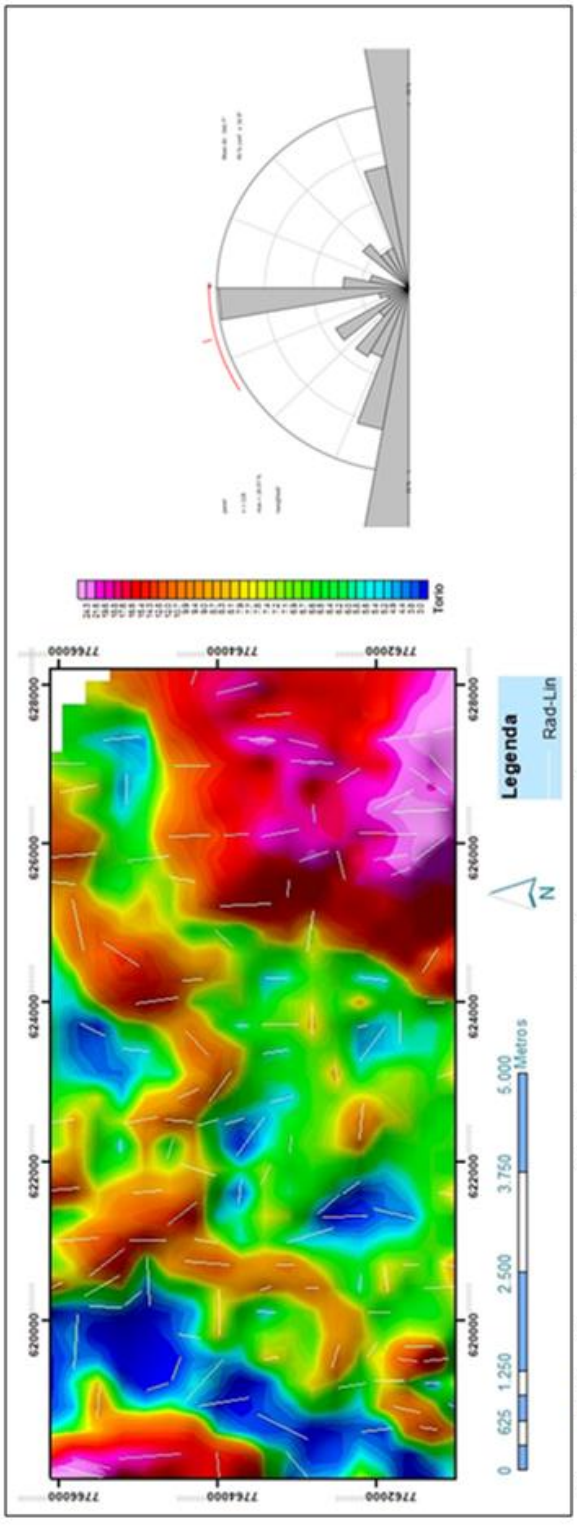


Figura 5.10 - Lineamentos radiométricos traçados sobre o mapa do canal de tório, e roseta da orientação preferencial dos lineamentos, mostrando um caráter predominantemente E-W.

A Figura 5.11 de maneira semelhante traz a integração dos mapas do Canal de Tório e de radiofácies, de modo que se pode notar de maneira didática a sobreposição das anomalias correlacionadas com as delimitações das radiofácies.

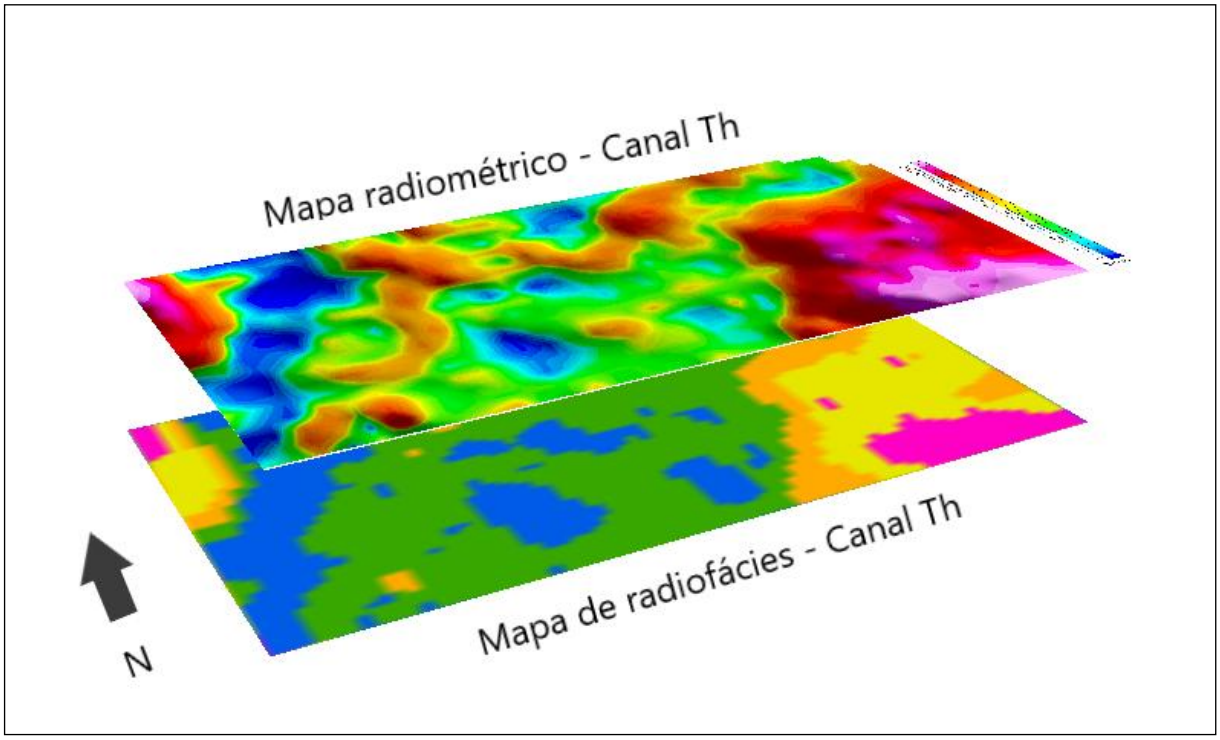


Figura 5.11 - Sobreposição de imagens (Canal de Th e mapa de radiofácies) para a observação da coerência da demarcação das radiofácies com base nas anomalias de Th.

CAPÍTULO 6

INTEGRAÇÃO GEOFÍSICO-GEOLÓGICA

6.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta os resultados da integração entre os mapas geofísicos temáticos expostos no capítulo anterior com o mapa geológico da região, do projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero da UFMG/CODEMIG. Nessa etapa foram realizadas correlações entre as assinaturas geofísicas das anomalias magnéticas e radiométricas e as litologias.

O mapa litológico simplificado da área será apresentado na Figura 6.1 a seguir, assim como na Tabela 6.1 a relação das unidades litológicas descritas na área.

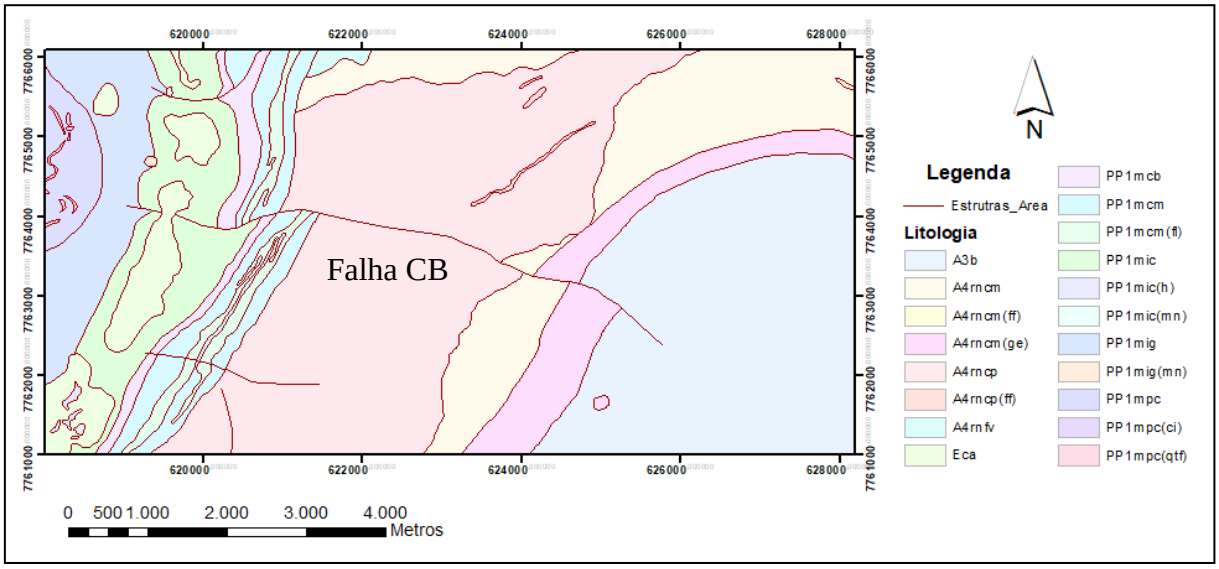


Figura 6.1 – Mapa litológico simplificado da área. A descrição da legenda do mapa encontra-se na Tabela 6.1.(No mapa a Falha de Cata Branca aparece como Falha CB)

Tabela 6.1 – Unidades litológicas presentes na região

Sigla	Supergrupo	Grupo	Formação
A3b	Complexo Bação		
A4rncm	Rio das Velhas	Nova Lima	
A4rncm (ff)			
A4rncm (ge)			
A4rncp			
A4rncp (ff)			
A4rnfv			
Eca	Depósitos elúvio-colúviais		
PP1mcb	Minas	Caraça	Batatal
PP1mcm			Moeda
PP1mcm (ff)			
PP1mic		Itabira	Cauê
PP1mic (h)			
PP1mic (mn)			
PP1mig			Gandarela
PP1mig (mn)			
PP1mpc		Piracicaba	Cercadinho
PP1mpc (ci)			
PP1mpc (qtf)			

6.2 INTEGRAÇÃO GEOFÍSICA-LITOLÓGICA

A região é distintamente marcada por rochas dos Supergrupos Minas e Rio das velhas, assim como os migmatitos e gnaisses do Complexo Bação. Parte do Supergrupo Minas, dentro do Grupo Itabira, a presença de corpos de minério de hematita e de capeamentos limoníticos é característica da Formação Cauê, enquanto os itabiritos dolomíticos e os calcários magnesianos estão presentes na Formação Gandarela. Ambas as formações são caracteristicamente marcadas por apresentarem uma alta anomalia magnética de resposta. Já quando se trata das rochas do Supergrupo Rio das velhas a resposta característica das anomalias magnéticas varia de intermediária a baixa. Xistos com mica, clorita, estaurolita e feldspatos, assim como em auréolas de metamorfismo de contato, são característicos do Grupo Nova Lima.A falha de Cata Branca coloca em contato as unidades litológicas desses dois Supergrupos, e esse será o parâmetro para entender como ela se comporta em superfície.

Ao realizar o estudo das concentrações de minerais ferromagnéticos, realizou-se a análise do mapa de caráter monopolar de Amplitude do Sinal Analítico. Com o auxilio das magnetofácies definidas no capítulo anterior, observou-se que ao sobrepor as magnetofácies sobre o mapa geológico da área a região com a maior resposta do sinal de intensidade magnética (magnetofácies 3) apresenta as litologias com maior concentração de minerais ferromagnéticos, e aquelas onde estão presentes depósitos elúvio-coluviais, com uma canga de capeamento limonitico, com presença de matacões de Formação ferrífera e localmente de hematita. Por sua vez a magnetofácies 1 apresenta a menor resposta às anomalias magnéticas, sendo litologicamente representada por xistos do Supergrupo Rio das Velhas e do Complexo Bação. A tabela 6.2 traz a integração realizada das magnetofácies com os Grupos associados e as litogias correspondentes.

Sabe-se que os métodos radiométricos tem maior acurácia ao delimitar os contatos litológicos das unidades baseando nos mapas temáticos gerados. A análise aqui apresentada se deu sobre o mapa do canal de Tório e a Imagem Ternária. Conforme a Figura 6.2, é visível como as anomalias de Th são correspondentes com as radiofácies individualizadas previamente, e como a imagem ternária quando sobreposta ao mapa geológico, mostra como os contatos litológicos podem ser traçados de maneira precisa.

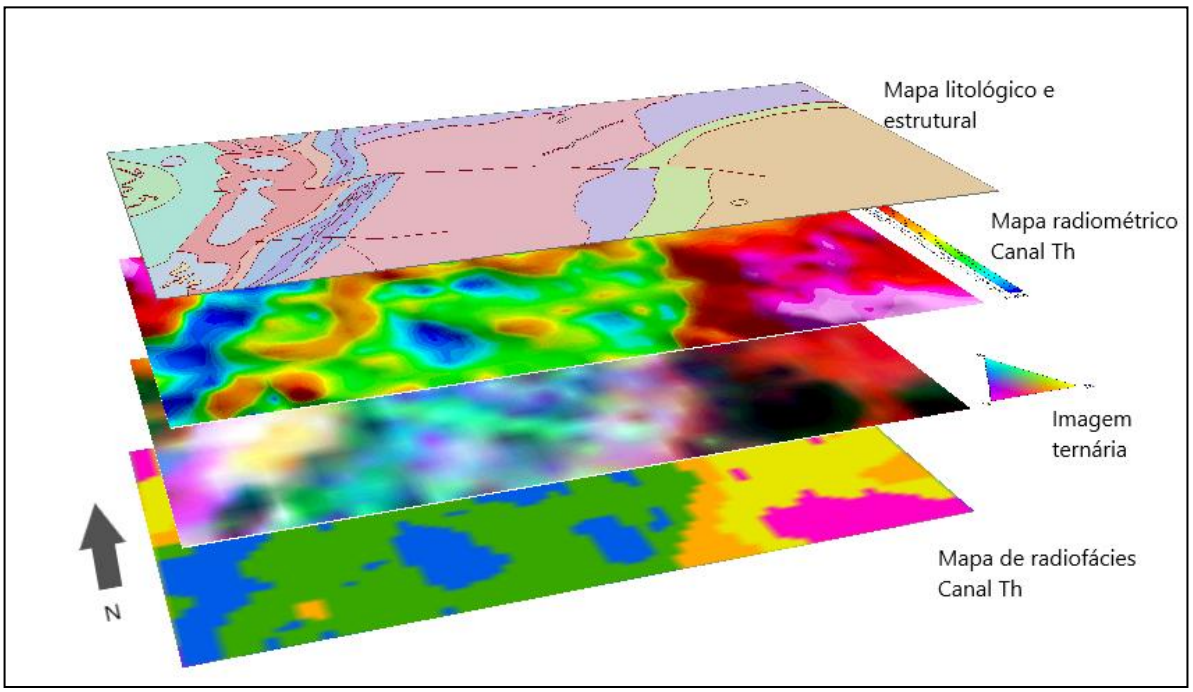


Figura 6.2 - Sobreposição das radiofácies com o mapa radiométrico geofísico temático do canal de Th.

Tabela 6.2 – Correlação das magnetofácies com as litologias presentes na área, com base nos mapas geológicos e de Amplitude de Sinal Analítico.

Magnetofácies	Supergrupo	Grupo	Formação	Litologia
3	Minas	Itabira	Cauê	Itabirito com lentes de hematita compacta e pulverulenta
	Minas	Itabira	Gandarela	Itabirto dolomítico, filito dolomítico e argiloso, dolomito, calcário magnesiano; filito e quartzito no quadrante noroeste
	Minas	Caraça	Batatal	Filito cinza a marrom
	Minas	Caraça	Moeda	Quartzito cinza, granulação média a muito grossa, com lentes de conglomerado e estratificação cruzada
	Rio das Velhas	Nova Lima		Granada-estaurolita xisto em auréolas de metamorfismo de contato
	Depósitos elúvio-coluviais - Canga: capeamento limonítico, contendo seixos, calhaus e matacões de Formação ferrífera e, localmente, de hematita			
2	Minas	Caraça	Batatal	Filito cinza a marrom
	Minas	Piracicaba	Cercadinho	Filito cor de alumínio, quartzito; quartzito ferruginoso; lentes de dolomito no quadrante noroeste
	Minas	Itabira	Gandarela	Itabirto dolomítico, filito dolomítico e argiloso, dolomito, calcário magnesiano; filito e quartzito no quadrante noroeste
	Rio das Velhas	Nova Lima		Carbonato-quartzo-feldspato-biotita-clorita xisto, sericita-biotita-clorita-quartzo xisto, quartzo-clorita xisto, rocha calcissilicática, metaconglomerado e Formação ferrífera
	Rio das Velhas	Nova Lima		Granada-estaurolita xisto em auréolas de metamorfismo de contato
	Minas	Caraça	Moeda	Quartzito cinza, granulação média a muito grossa, com lentes de conglomerado e estratificação cruzada
	Minas	Caraça	Moeda	Filito multicolorido arenoso intercalado
	Rio das Velhas	Nova Lima		Quartzo-mica-clorita xisto, clorita xisto, biotita-muscovita xisto feldspático; Formação ferrífera subordinada
	Rio das Velhas	Nova Lima		Clorita-quartzo xisto feldspático, biotita-sericita-clorita xisto feldspático, biotita-muscovita xisto, rocha calcissilicática e metargilito carbonoso
1	Rio das Velhas	Nova Lima		Quartzo-mica-clorita xisto, clorita xisto, biotita-muscovita xisto feldspático; Formação ferrífera subordinada
	Rio das Velhas	Nova Lima		Carbonato-quartzo-feldspato-biotita-clorita xisto, sericita-biotita-clorita-quartzo xisto, quartzo-clorita xisto, rocha calcissilicática, metaconglomerado e Formação ferrífera
	Rio das Velhas	Nova Lima		Granada-estaurolita xisto em auréolas de metamorfismo de contato
	Complexo Bação:			

CAPÍTULO 7

ANÁLISE QUANTITATIVA

7.1 INTRODUÇÃO

A análise quantitativa faz uso da metodologia da Deconvolução de Euler, que constitui um método de interpretação e fornece estimativas de posição e profundidade de fontes magnéticas, através de operações matemáticas para dados levantados em coordenadas cartesianas (x, y) para em um passo seguinte realizar a interpolação pelo método de krigagem no *software* ArcScene. Deste modo, cria-se o modelo tridimensional da área de estudo. O objetivo dessa análise é compreender e visualizar a geometria e sua relação estrutural das fontes causadoras das anomalias magnéticas em profundidade.

7.2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do modelo 3D da falha de Cata Branca, seguiu-se a seguinte metodologia:

1) foram criados perfis em duas dimensões através do *software* Euler 1.0, desenvolvido na School of Geoscience – University of Witwatersrand, processam-se os dados para realizar a inversão pelo método dos mínimos quadrados, e a partir dos valores do campo magnético anômalo e de um índice estrutural de valor pré-definido, resolve as equações de Euler, para as variáveis de posição e profundidade das anomalias magnéticas existentes;

2) os perfis 2D, tem como base os dados do mapa de amplitude de sinal analítico (ASA), sobre o qual foram traçados 21 perfis de direção N-S equidistantes de 500 metros em uma área de aproximadamente 50km^2 (Figura 7.1).

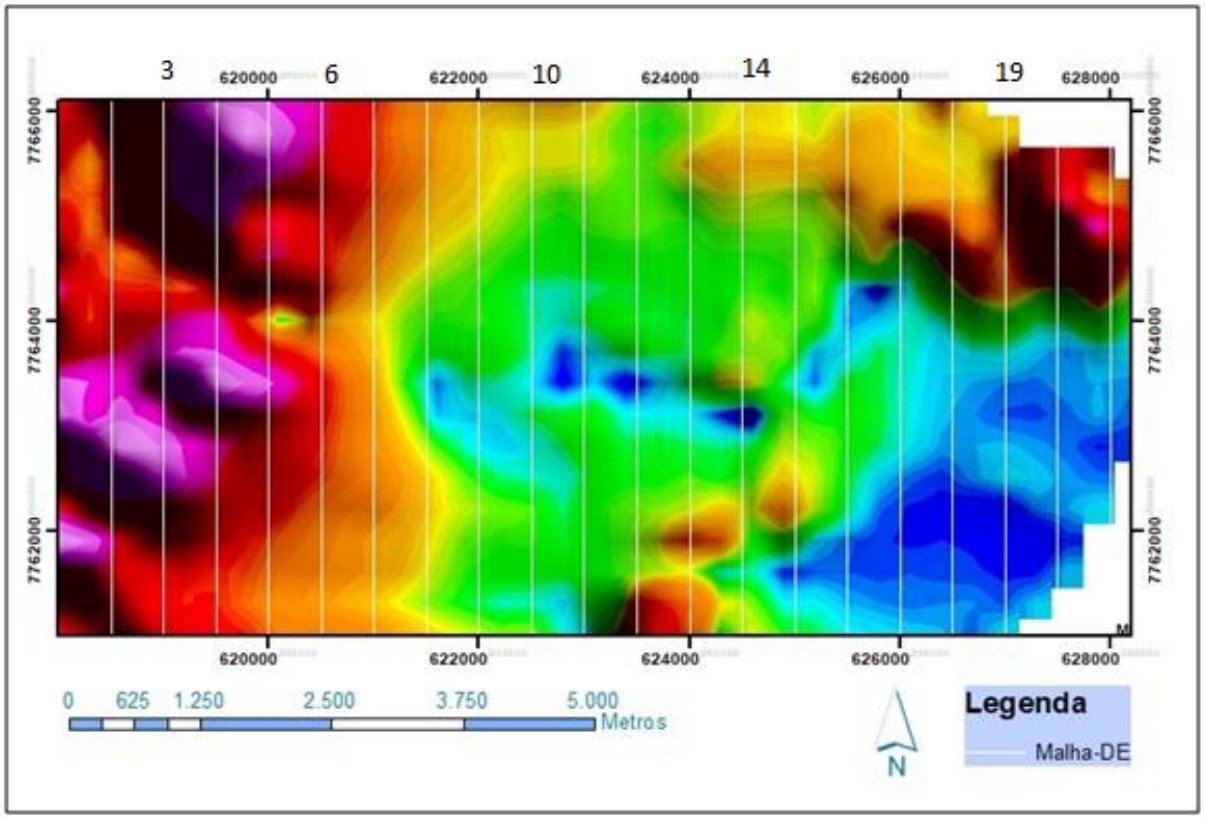


Figura 7.1 - Perfis Deconvolução de Euler sobre mapa magnetométrico, ASA Os perfis 3,6,10,14 e 19 estão em destaque.

Os dados exportados no formato .csv são convertidos para .dta para que possam ser processados pelo *software* Euler 1.0, abre-se o arquivo com as informações dos perfis e seleciona-se a opção para trabalho com dados de amplitude de sinal analítico Na realização da inversão dos dados foram utilizados para todos os perfis os seguintes parâmetros: índice estrutural: 1,0 (para evidenciar estruturas planares0 e tamanho da janela: 13, a figura 7.2 e 7.3 respectivamente mostram a interface desse programa.

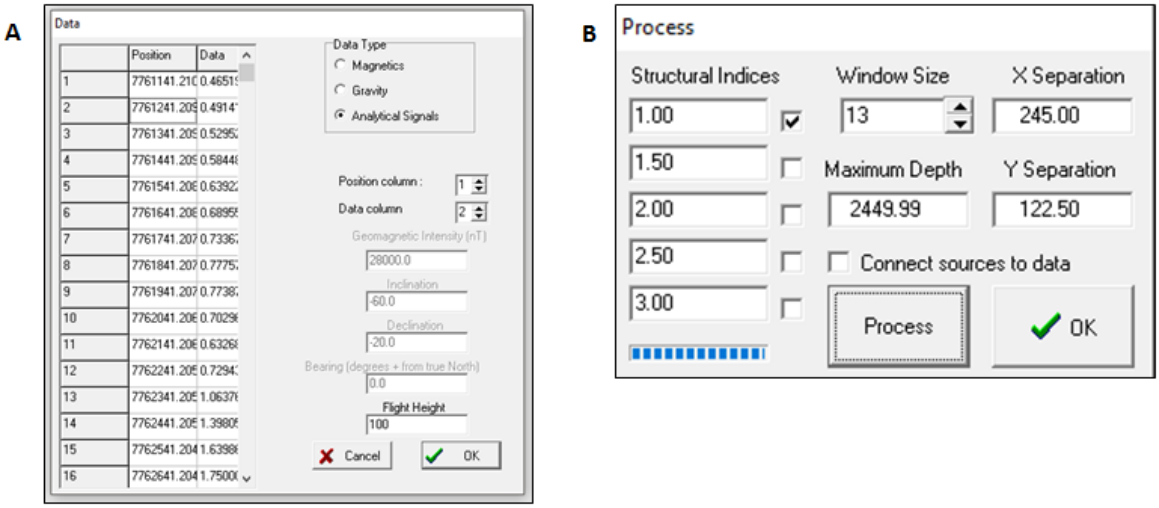


Figura 7.2 - 1 - Interface do *software* Euler 1.0. **A**)Caixa de entrada dos dados. **B**) Caixa de processamento de dados. Atenção para o índice estrutural marcado (1) e para o tamanho da janela 13.

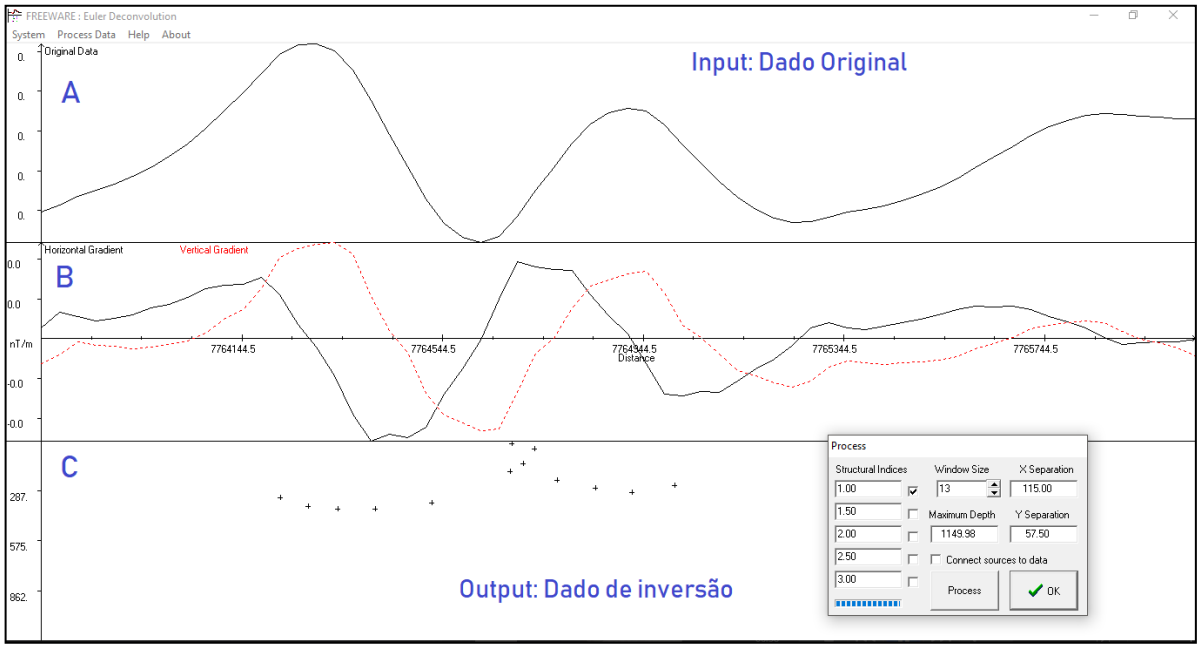


Figura 7.3 - Deconvolução de Euler realizada no perfil 01. A) Apresenta o dado gerado no mapa de Amplitude de sinal Analítico B) Mostra os gradientes verticais e horizontais, em vermelho e preto respectivamente. C) A estimativa da profundidade do corpo que gerou a anomalia detectada.

Após as inversões os arquivos gerados (x, y, z) são abertos no *software* ArcGis, integrados e exportados como uma única *shapefile* (Figura 7.4) por meio da função *merge*, fez-se uma interpolação dos dados pelo método krigagem, gerando-se um modelo 3D no *software* ArcScene (Figura 7.5), com o objetivo de visualizar a continuidade da estrutura em profundidade.

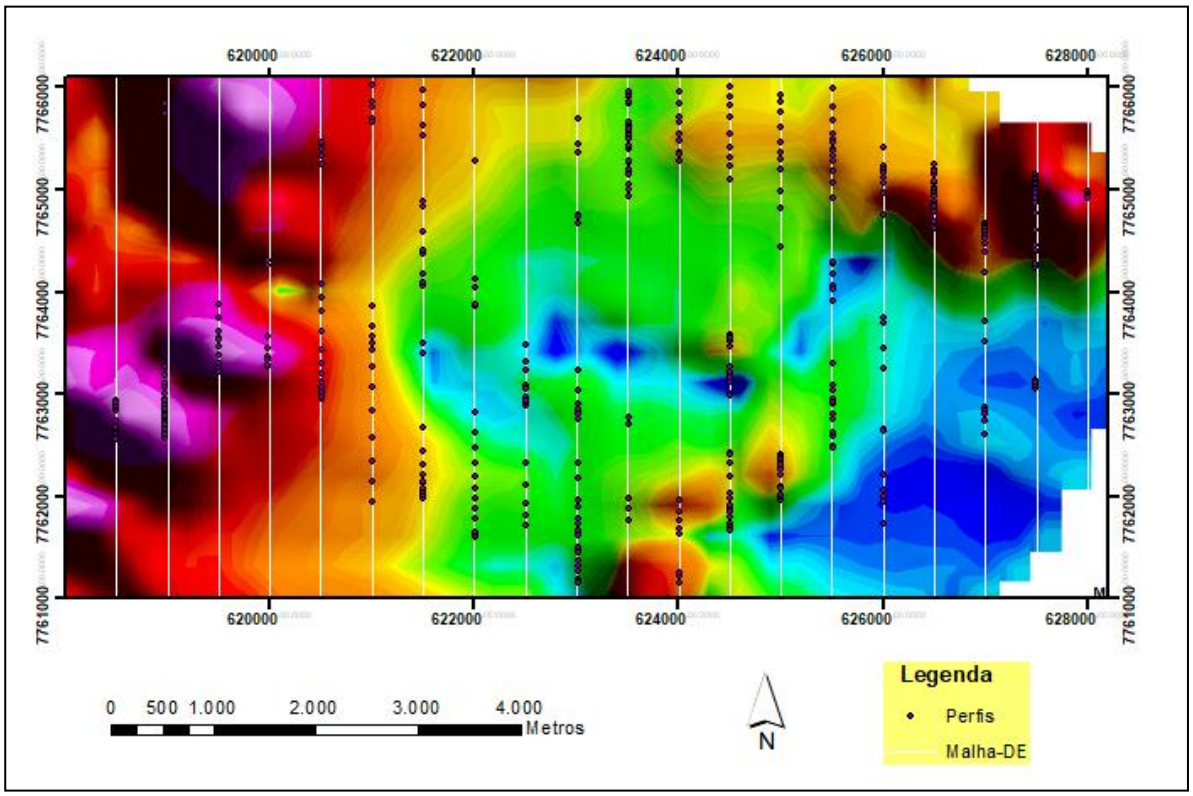


Figura 7.4 - Perfis de deconvolução unidos em única *shapefile*.

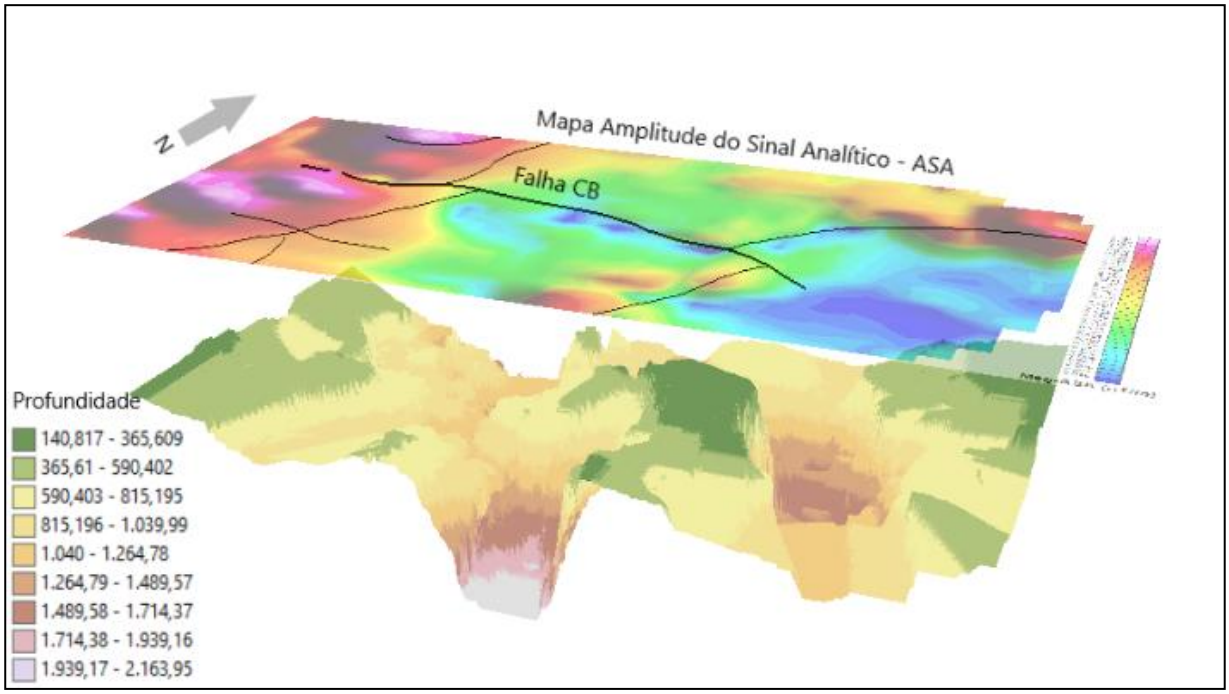


Figura 7.5 Apresentação do perfil de profundidade gerado após a interpolação dos dados. A falha de Cata Branca aparece como (Falha CB) sobre o Mapa de Amplitude de Sinal Analítico.

CAPÍTULO 8

DISCUSSÃO

8.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

8.1.1 Apresentação dos resultados

Dentre os vinte e um perfis gerados, selecionaram-se quatro perfis (07, 08, 19 e 20) como os representativos da feição estrutural em análise, uma vez que favorecem a visualização da geometria da falha em profundidade. Ressalta-se que os perfis 02, 03, 14 e 15 interceptam as mais altas amplitudes magnéticas. Tais perfis são importantes para entender a continuidade da falha, que como observado, continua em profundidade além da área mapeada em superfície.

Partindo da análise dos perfis onde as anomalias magnéticas são destaque, os perfis 02 e 03 localizam-se na porção oeste da área de estudo. Observa-se no perfil 02 (Figura 8.1) uma estrutura de profundidade aproximada de 600 metros, assemelhando-se a uma falha, contudo, segundo o mapa geológico-estrutural da área, a região onde se encontra o perfil 02 a Falha de Cata Branca não está mapeada. Pode-se então, prolongar a continuidade da estrutura para além da que se está mapeada em superfície em cerca de 480 metros à oeste. O perfil 03 (Figura 8.2) por sua vez, por meio do índice estrutural utilizado para determinar superfícies planares, mostra uma estrutura de feição característica de superfície de falha, com profundidade aproximada de 600 metros. A estrutura em questão é o objeto de estudo deste trabalho, a mapeada falha transcorrente sinistral de Cata Banca Mais ao norte, o desenvolvimento discreto de outra superfície de falha está presente também, porém a uma profundidade menor, cerca de 100 metros. Ambos os perfis 02 e 03 atravessam uma área com expressivas anomalias de susceptibilidade magnética, porém como visto no perfil em três dimensões, as fontes dessas anomalias não são profundas, mas sim superficiais provenientes de depósitos elúvio-colúviais, onde a canga é composta por um capeamento limonítico, contendo fragmentos de Formação ferrífera e localmente hematita.

Os perfis 19 e 20 por sua vez se encontram na porção extremo leste da área de estudo e não atravessam a Falha de Cata Branca. Contudo à Norte passam por um área de menor susceptibilidade magnética detectada do que os perfis descritos anteriormente, porém como o caso anterior, as anomalias não são provenientes de corpos em grande profundidade. O perfil 19 (Figura 8.3) evidencia duas estruturas planares, a primeira localizada na mesma região onde se localiza a falha de Cata Branca nos outros perfis gerados, e a segunda na porção norte da área. Já o perfil 20 (Figura 8.4) evidencia à norte duas estruturas planares porém com profundidade relativamente baixa, aproximadamente 475 metros.

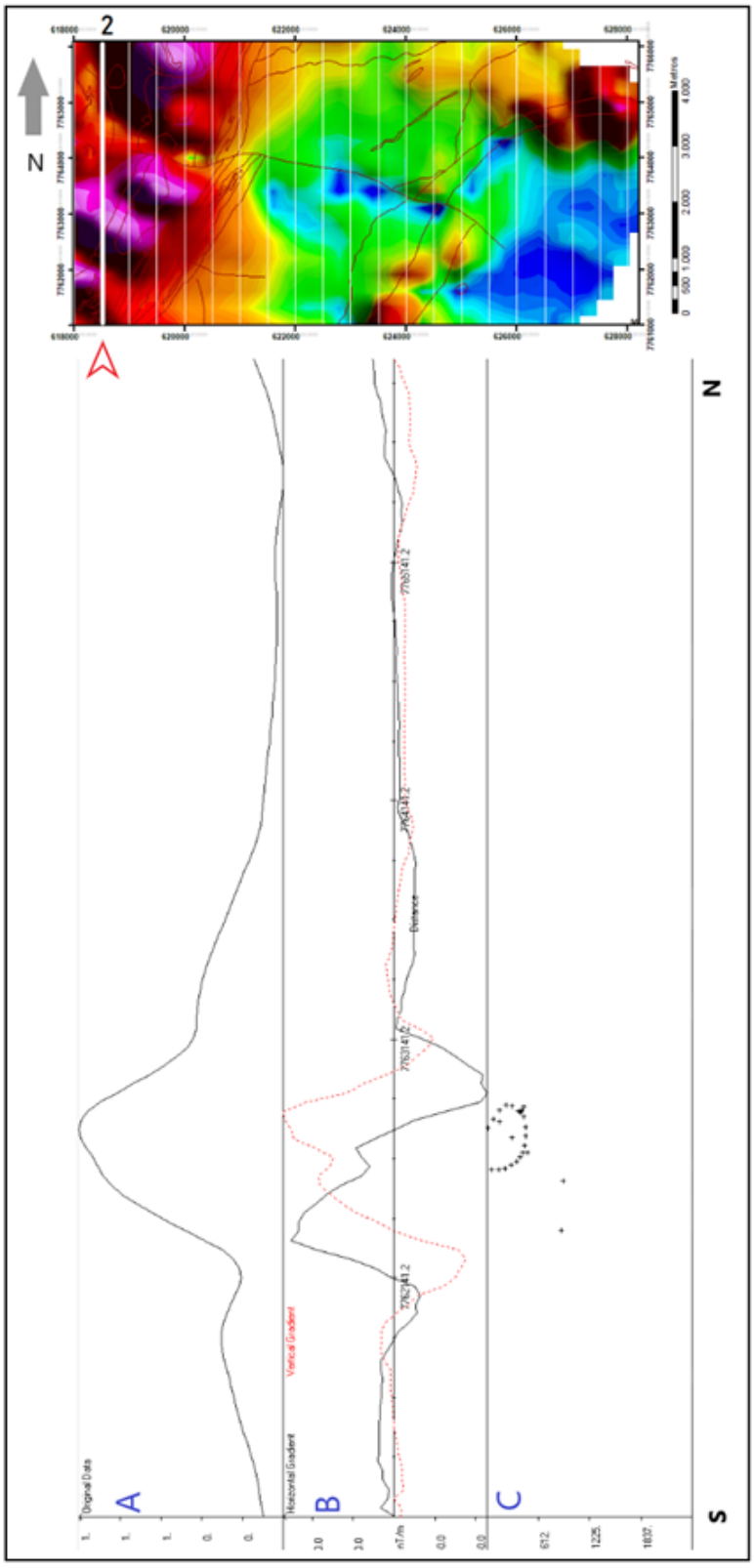


Figura 8.1- Deconvolução de Euler realizada no perfil 02. A) Apresenta o dado gerado no mapa de Amplitude de sinal Analítico B) Mostra os gradientes verticais e horizontais, em vermelho e preto respectivamente. C) A estimativa da profundidade do corpo que gerou a anomalia detectada..D) O mapa de Amplitude de Sinal analítico, com a malha de Perfis de Deconvolução sobreposta, nota-se perfil 02 evidenciado.

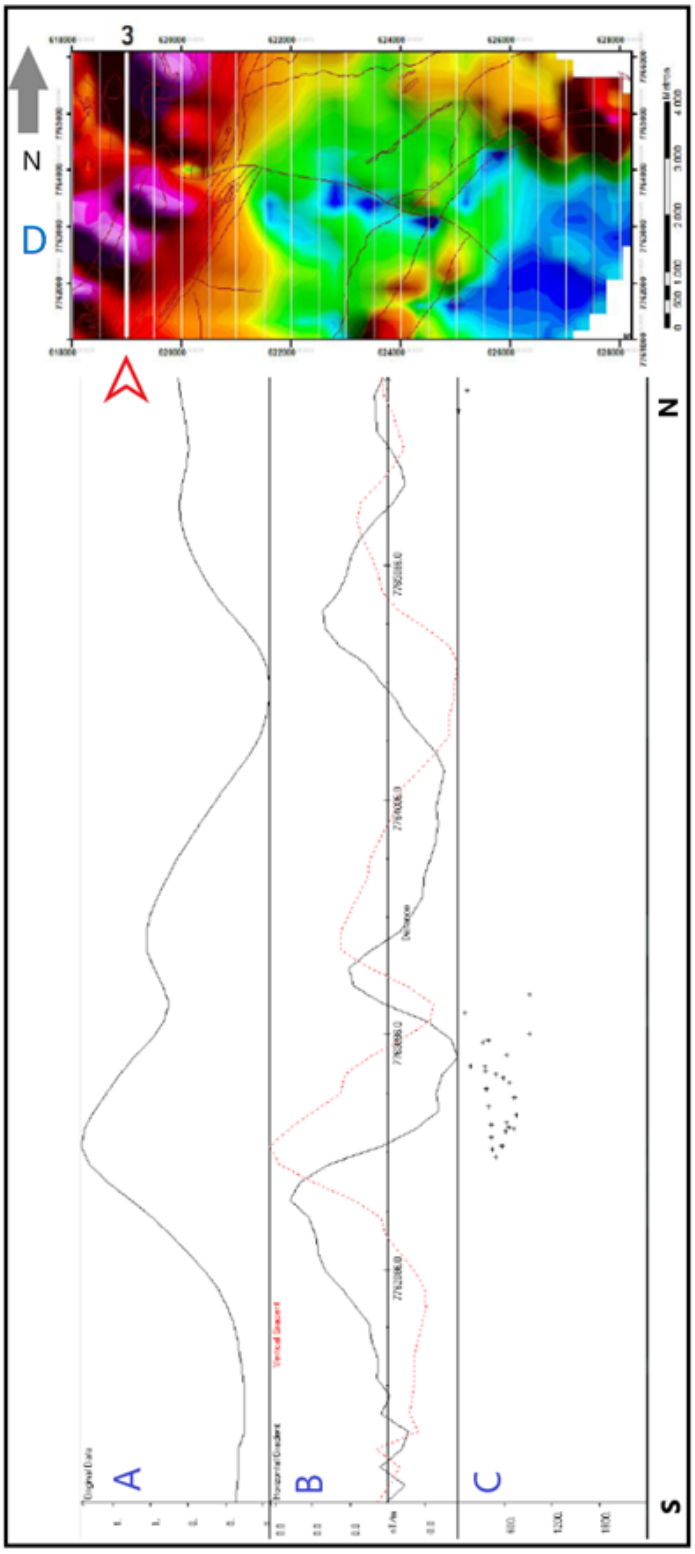


Figura 8.2- Deconvolução de Euler realizada no perfil 03. A) Apresenta o dado gerado no mapa de Amplitude de sinal Analítico B) Mostra os gradientes verticais e horizontais, em vermelho e preto respectivamente. C) A estimativa da profundidade do corpo que gerou a anomalia detectada..D) O mapa de Amplitude de Sinal analítico, com a malha de Perfis de Deconvolução sobreposta, nota-se perfil 03 evidenciado.

Figura 8.3- Deconvolução de Euler realizada no perfil 19. A) Apresenta o dado gerado no mapa de Amplitude de sinal Analítico B) Mostra os gradientes verticais e horizontais, em vermelho e preto respectivamente. C) A estimativa da profundidade do corpo que gerou a anomalia detectada..D) O mapa de Amplitude de Sinal analítico, com a malha de Perfis de Deconvolução sobreposta, nota-se perfil 19 evidenciado.

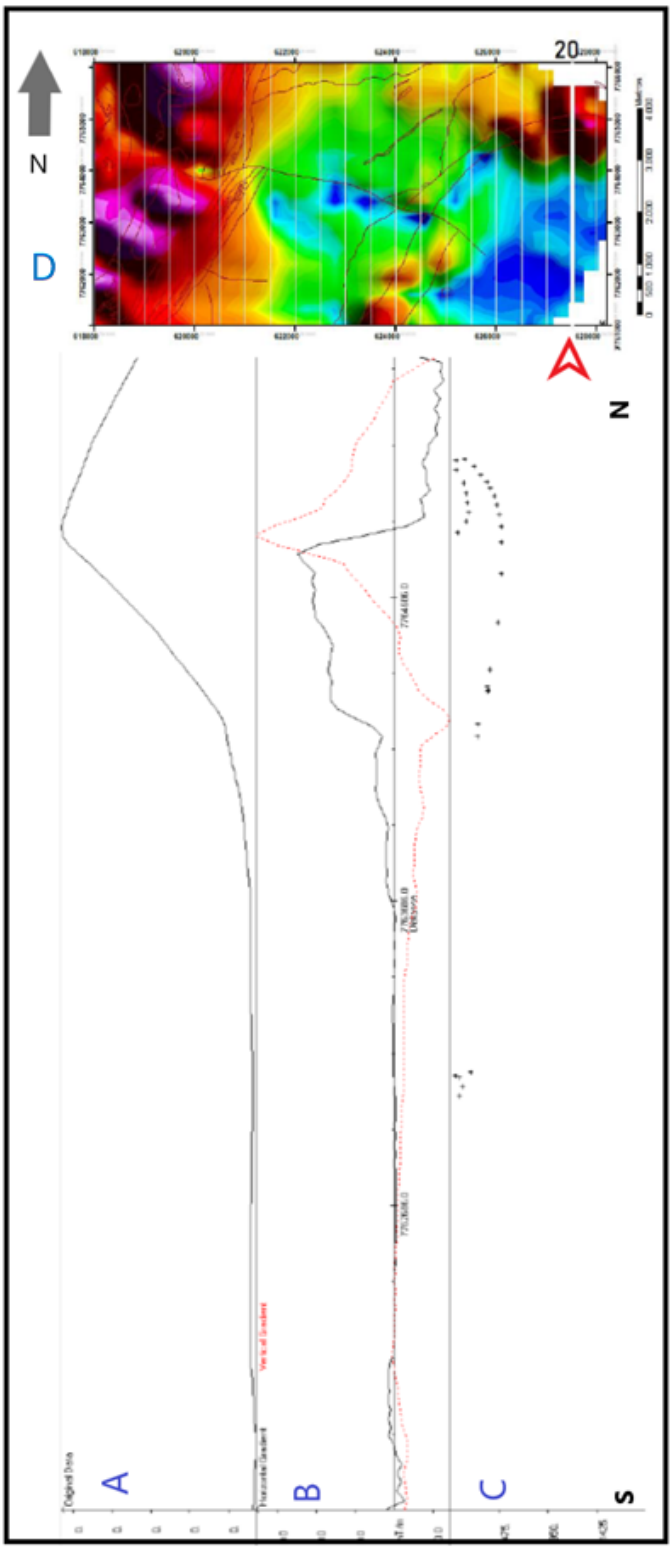


Figura 8.4- Deconvolução de Euler realizada no perfil 20. A) Apresenta o dado gerado no mapa de Amplitude de sinal Analítico B) Mostra os gradientes verticais e horizontais, em vermelho e preto respectivamente. C) A estimativa da profundidade do corpo que gerou a anomalia detectada..D) O mapa de Amplitude de Sinal analítico, com a malha de Perfis de Deconvolução sobreposta, nota-se perfil 20 evidenciado.

Relativo aos perfis que refletem diretamente a feição estrutural foco deste trabalho, os perfis 07, 08, 14 e 15 favorecem o estudo da geometria da falha em profundidade.

O perfil 07 (Figura 8.5) localiza-se a oeste da área, atravessando duas falhas, e diversas unidades litológicas. Uma das estruturas planares observadas no perfil atinge profundidade de aproximadamente 1250 metros, sendo esse valor um dos mais profundos que a estrutura atinge em subsuperficie, enquanto a outra é mais superficial chegando à 600 metros de profundidade. É observado também, mais à norte o desenvolvimento de outra estrutura planar a mais de 1800 metros de profundidade.

Localizado também na porção oeste, tem-se o perfil 08 (Figura 8.6). A profundidade alcançada pela falha nessa região é de aproximadamente 1250 metros. A outra estrutura planar observada a norte no perfil 07 continua a se desenvolver nesse perfil a uma profundidade aproximada de 1800 metros. Ambos os perfis 07 e 08 atravessam áreas onde as anomalias magnéticas não são tão expressivas, e essa tendência se mantém por toda a porção central da área.

Os perfis 14 e 15 localizam-se por sua vez na porção centro-leste da área de estudo. O perfil 14 (Figura 8.7) intercepta a extremo sul, uma falha de empurrão definida, e essa estrutura atinge profundidade aproximada de 600 metros, essa falha também manifesta-se no perfil 15, com profundidade semelhante. A falha de Cata Branca intercepta o perfil 14 em profundidade relativamente rasa comparado com os demais perfis analisados, e no perfil 15 (Figura 8.8) o desenvolvimento dessa falha não aparece. A norte, porém, é marcado uma estrutura planar bem desenvolvida em ambos os perfis de profundidade aproximada de 500 metros. Esses perfis atravessam área de baixas anomalias de susceptibilidade magnética presentes, feição comum na região central do mapa temático magnetométrico da área.

Por questão de representatividade, os perfis descritos anteriormente foram selecionados para apresentar um panorama do que se passa na região. Contudo, ao analisar os vinte e um perfis individualmente, nota-se que a região é marcada por estruturas planares em profundidade, além da Falha de Cata Branca

Figura 8.5- Deconvolução de Euler realizada no perfil 07. A) Apresenta o dado gerado no mapa de Amplitude de sinal Analítico B) Mostra os gradientes verticais e horizontais, em vermelho e preto respectivamente. C) A estimativa da profundidade do corpo que gerou a anomalia detectada..D) O mapa de Amplitude de Sinal analítico, com a malha de Perfis de Deconvolução sobreposta, nota-se perfil 07 evidenciado.

Figura 8.6 - Deconvolução de Euler realizada no perfil 08 A) Apresenta o dado gerado no mapa de Amplitude de sinal Analítico B) Mostra os gradientes verticais e horizontais, em vermelho e preto respectivamente. C) A estimativa da profundidade do corpo que gerou a anomalia detectada..D) O mapa de Amplitude de Sinal analítico, com a malha de Perfis de Deconvolução sobreposta, nota-se perfil 08 evidenciado.

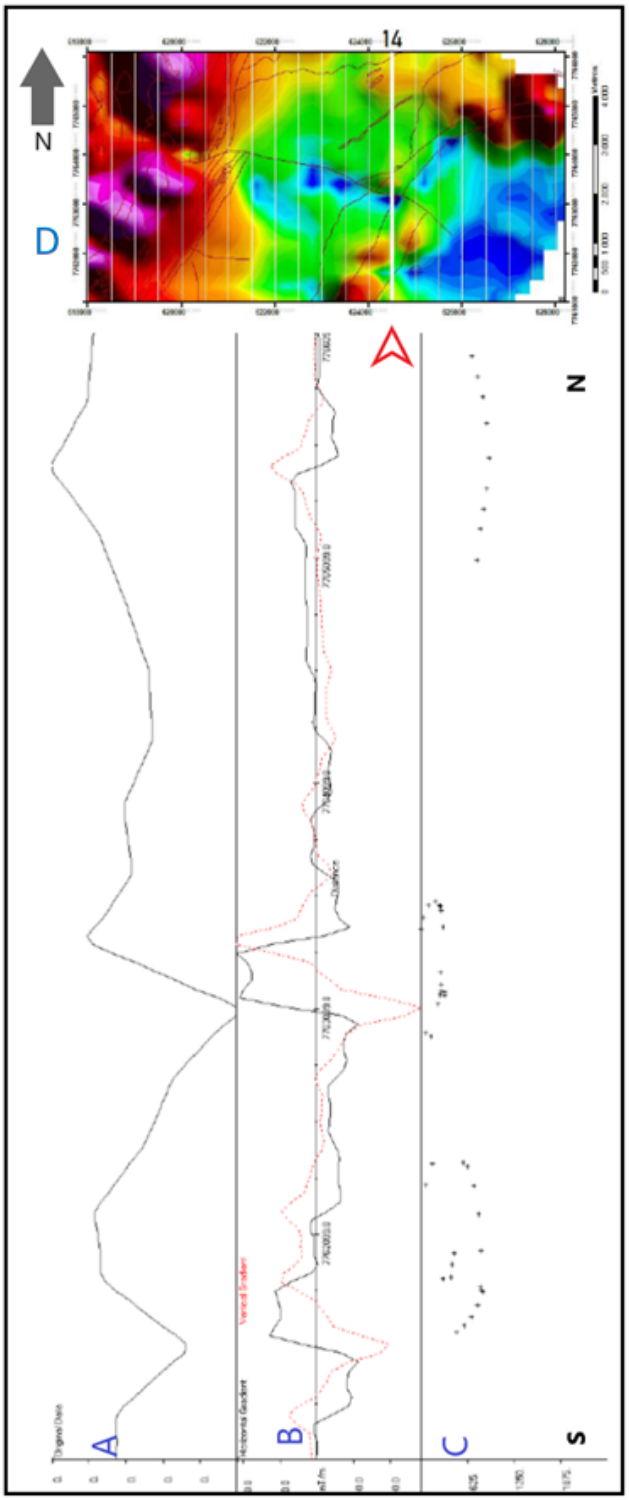


Figura 8.7 - Deconvolução de Euler realizada no perfil 14 A) Apresenta o dado gerado no mapa de Amplitude de sinal Analítico B) Mostra os gradientes verticais e horizontais, em vermelho e preto respectivamente. C) A estimativa da profundidade do corpo que gerou a anomalia detectada. D) O mapa de Amplitude de Sinal analítico, com a malha de Perfis de Deconvolução sobreposta, nota-se perfil 14 evidenciado.

Figura 8.8 - Deconvolução de Euler realizada no perfil 15 A) Apresenta o dado gerado no mapa de Amplitude de sinal Analítico B) Mostra os gradientes verticais e horizontais, em vermelho e preto respectivamente. C) A estimativa da profundidade do corpo que gerou a anomalia detectada. D) O mapa de Amplitude de Sinal analítico, com a malha de Perfis de Deconvolução sobreposta, nota-se perfil 15 evidenciado.

8.1.2 Visualização em 3D

Após a deconvolução dos vinte e um perfis, no *software* ArcScene 9.3 os dados foram interpolados pelo método de krigagem para obter o modelo em três dimensões da área. Com a modelagem 3D é possível visualizar o comportamento em subsuperficie da Falha sinistral transcorrente de Cata Branca, assim como compreender a área adjacente em profundidade. Além de possibilitar a análise estrutural em profundidade, pode-se também reproduzir a origem e a profundidade das rochas que possuem anomalias magnéticas detectáveis pelos métodos geofísicos e apresentados no mapa temático.

Observando o modelo tridimensional (Figura 8.9), percebe-se que as anomalias magnéticas expressivas na área se manifestam em três regiões diferentes. As anomalias com maior susceptibilidade (magnetofácies 3) e por consequência com presença de minerais ferro magnéticos, encontram-se mais concentradas na porção oeste do mapa e estão relacionadas com rochas aflorantes como os depósitos de canga laterítica, ou à corpos com pouca profundidade como acontece com os itabiritos com lentes de hematita compacta. Enquanto na porção centro sul, os picos de alta susceptibilidade estão relacionados com granada-estaurolita xistos em auréolas de metamorfismo de contato do Grupo Nova Lima do Supergrupo Rio das Velhas. Na porção leste por sua vez, os maiores picos de anomalias magnéticas também são relacionados com os xistos descritos anteriormente, assim como subordinadamente por metaconglomerados de Formação ferrífera adjacentes.

Na análise da imagem 3D percebe-se que sempre que ocorre uma alta anomalia magnética, logo adjacente a ela, observa-se um aumento de profundidade significativo. Em profundidade é possível observar a continuidade da Falha de Cata Branca, assim como a presença de outras estruturas planares na região. A Figura 8.10 mostra a relação bloco alto e bloco baixo e como é o comportamento da estrutura em subsuperficie. Conclui-se após a análise dos perfis de deconvolução e do modelo em três dimensões que a falha de Cata Branca tem continuidade em profundidade para além do que foi mapeado.

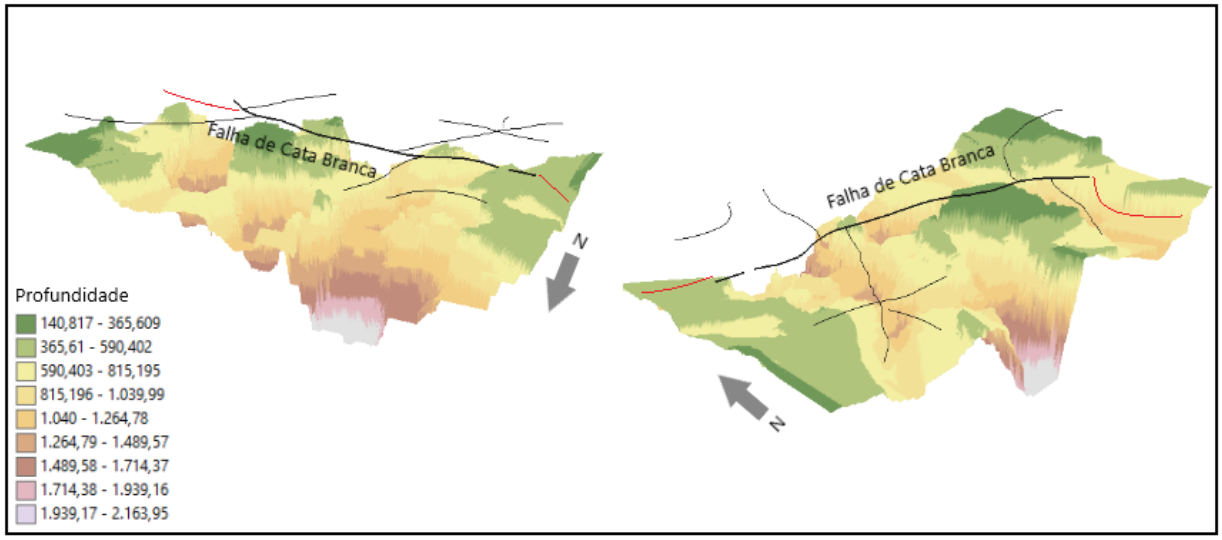


Figura 8.9 – Visão da Falha de Cata Branca em profundidade. Em vermelho a continuidade da falha, não mapeada em superfície, porém visível em profundidade.

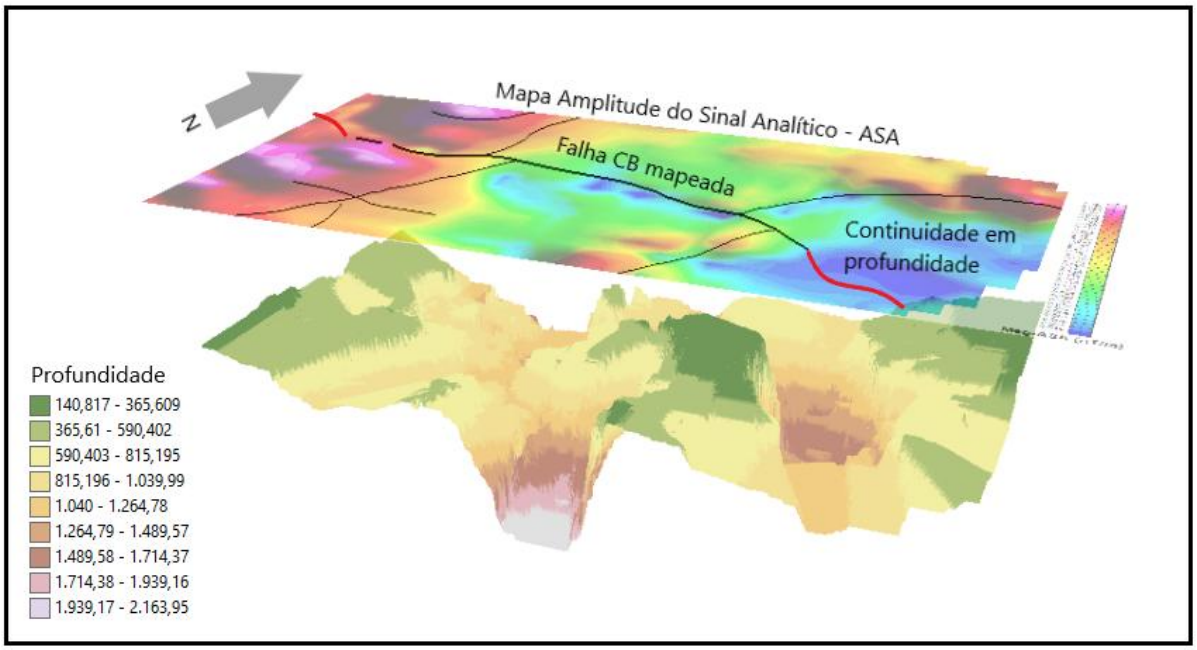


Figura 8.10 Perfil de profundidade da área, com sobreposição do mapa de Amplitude de Sinal Analítico. A falha de Cata Branca aparece como CB e a sua continuidade em profundidade aparece em vermelho

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES

Compreender o comportamento das estruturas geológicas em profundidade é um avanço acadêmico-cientifico, bem como a aplicação direta nas campanhas de exploração mineral, possibilitados pela análise geofísica. Sendo assim, o presente trabalho veio corroborar a ideia supracitada, mostrando como os métodos geofísicos e os dados aerolevantados podem ser utilizados para estudar uma feição geológica, localizada em uma área de interesse acadêmico e econômico, o Quadrilátero Ferrífero.

Sabe-se da importância do Quadrilátero Ferrífero (QFe) no contexto geológico regional brasileiro, e como o estudo da evolução tectônica da região é determinante para o avanço científico e para a movimentação das pesquisas visando a exploração econômica. E o Sinclinal Moeda como feição integrante do QFe é uma região historicamente reconhecida devido à exploração mineral e as feições estruturais presentes.

A caracterização em três dimensões da Falha sinistral transcorrente de Cata Branca, que se estende por cerca de 7 km, localizada na região centro norte da Sinclinal Moeda, é o intuito e objetivo principal deste trabalho para corroborar com o que foi supracitado anteriormente a respeito da importância de entender as feições estruturais do Quadrilátero. Além de que, com o estudo da continuidade da estrutura (cerca de aproximadamente 3 km para oeste e 1 km para leste), e compreendendo sua relação com a zona de cisalhamento presente, a relação com uma possível extensão de área de mineralização de ouro fica em aberto para estudos futuros.

O estudo da estrutura foi possível devido ao tratamento dos dados geofísicos aerolevantados que possibilitaram a análise em subsuperficie da falha. A interpretação dos dados magnetométricos permitiu que zonas de maior concentração de minerais com alta susceptibilidade magnética (alta magnetização) fossem delimitadas, assim como o aumento da precisão da continuidade da estrutura planar em profundidade. Ao passo que os dados radiométricos são cruciais para entender a resposta litológica e o que ela representa em termos de comportamento reológico na presença de uma estrutura deformacional como a Falha de Cata Branca. Por sua vez com o mapa radiométrico do fator f, a visualização da zona de hidrotermalismo foi verificada e com isso a ideia de que a mineralização aurífera apresenta continuidade na extensão da falha de Cata Branca. Contudo, vale ressaltar que o sítio constitui atualmente uma APP (Área de Proteção Permanente) e, portanto nenhuma atividade de caráter exploratório e econômico direto pode ser realizado na região.

A execução da análise quantitativa pelo método de Deconvolução de Euler possibilitou a estimativa em profundidade do alcance da estrutura de estudo (profundidade variando entre 420 e

1250 metros), assim com a análise de outras feições deformacionais presentes, corroborando com o estudo da evolução deformacional do Sinclinal Moeda proposto por Silva (1999), o qual coloca a região como alvo de eventos deformacionais de natureza compressiva e distensiva, responsáveis pelas principais estruturas da região.

Desta forma, o estudo realizado neste trabalho, mostra-se importante para o aumento do conhecimento cientifico-geológico da região, para a complementação às análises geofísicas do Sinclinal Moeda, e, além disso, de como o uso da geofísica como ferramenta aplicada é fundamental para a resolução de problemas geológicos que vão além do que é possível de serem observados em superfície.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alkimim F. F., Marschak, S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. Precambrian Research, 90: 29–58

Alkmim, F.F., Quade, H., Evangelista, M.T., 1988. Sobre a história da deFormação dos metassedimentos do Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Unpublished manuscript, Library of the Depto. De Geologia, Univ. Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, M.G.

Alkmim, F.F., Brito Neves, B.B., Castro Alves, J.A., 1993. Arcabouço Tectônico do Cráton do São Francisco. Uma revisão. In: Dominguez, J.M.L., Misi, A., (Eds.), O Cráton do São Francisco. Soc. Bras. Geol., Núcleo Bahia/Sergipe, Salvador, pp. 45–62.

Alkmim, F.F. 2004. O que faz de um cráton um cráton? O cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: Mantesso-Neto, V. *et al.* (ed.) Geologia do Continente Sul-Americano. São Paulo, Beca, 17-34.

Alkmim, F.F., Noce, C.M. 2006. The Paleoproterozoic Record of the São Francisco Craton. IGCP 509 Fild workshop, Bahia and Minas Gerais, Brazil. Fild Guide & abstract, 114 p.

Almeida, F.F.M., 1967. Evolução tectônica do centro-oeste brasileiro no Proterozoico Superior. Annaes Academia Bras. Ciências 40, 285–295.

Almeida, F.F.M., 1977. O Cráton do São Francisco. Revista Bras. Geociências 7, 349 364.

Almeida F.F.M. 1978. Chronotectonic Boundaries for Precambrian Time Division in South America. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 50: 527-535.

Barbosa O. 1949. Contribuição à geologia do centro de Minas Gerais. Mineração e Metalurgia, 14(79): 3-19.

Barbosa, A.L.M., 1966. Síntese da Evolução Geológica da America do Sul. Bol. Inst. Geol. Esc. Minas Ouro Preto, 1: 91-111.

Barbosa, A.L.M., 1968. Contribuições recentes à geologia do Quadrilátero Ferrífero. In: Editora da Escola de Minas, Ouro Preto, Brazil.

Blackett P.M.S. 1947. The magnetic field of massive rotation bodies. Nature, 159:658-666.

Braga, S.C.M., 2006. Modelagem estrutural e geofísica da porção centro-norte do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, MG.. Contribuições ás ciências da terra. Série M, v. 30, n 242. 551.243(815.1)

Bullard, E. C, 1949. The Magnetic Field within the Earth. Proceedings of the Royal Society of Londo. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 197, No. 1051, PP 433-453.

Burton, R. F. 1869. Viagem do rio de Janeiro a Morro Velho. Tradução de David Jardim Junior. 1976. Itatiaia/EDUSP, Belo Horizonte/São Paulo, 366p.

Calógeras, J. P. 1938. As Minas do Brasil e sua legislação (geologia econômica do Brasil). Nacional, São Paulo, Tomo 3°.

Carneiro, M.A. 1992. O Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional (Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerias): Litoestratigrafia e Evolução Geológica de um Segmento de Crosta Continental do Arqueano. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 233p.

Carneiro, M.A., Noce, C.M., Teixeira, W., 1995. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero sob o ponto de vista da Geocronologia. Revista da Escola de Minas,48: 264–274

Chemalle Jr., F, Rosière C.A., Endo I. 1992. The Main tectonic features of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. In: AGU Fall Meeting, São Francisco, USA. America Geophysical Union. v.73. p.574-574.

Chemale Jr. F., Rosière C.A., Endo I. 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Precambrian Research 65(1994): 25-54.

CODEMIG- Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais - Projeto Quadrilátero Ferrífero (2005), convênio com CODEMIG, Governo do Estado e UFMG

Cordani U. G., Kawashita K., Muller G., Quade H., Reimer V., Roeser H. 1980. Interpretacao Tectonica e Petrológica de Dados Geocronológicos do Embasamento no Bordo Sudeste do Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais. Anais Acad. Bras. Ciênc., 52(4): 785-799

Crider, J. G. (2001). Oblique slip and the geometry of normal-fault linakge: mechanics and a case study from the Bsin and Range in Oregon. Journal of Structural Geology, 23, 1997-2009.

Cruz, S. C. P., Alkmim, F. F., 2006 The tectonic interaction between the Paramirim Aulacogen and the Araçuaí belt, São Francisco Craton Region, Eastern Brazil. Anais Acad. Bras. Ciên., 78: 151-174.

Davison I. 1994. Linked faults systems; distensional strike-slip and contractional. In: Hancock, P.L. ed. 1994. Continental deformation. Oxford Pergamon Press, p.121-142.

Derby, a. O. 1906. The Serra do Espinhaço Brazil. The Journal of Geology, Vol 14, No. 5, PP. 374 – 401. Dorr, J.V.N, 1969. Physiographic stratigraphic e structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. US Geol Survy, Prof paper 641-A, 110p.

Endo I. & Machado R. 1998. The geology architeture of the Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais – Brasil) after multiple transpressional and transtensional tectonic events. In: International Confetence on Basement Tectonics, 14., Ouro Preto, 1998. Anais. p. 126-127.

Endo, I. & Nalini, H. A., 1992. Geometria e cinemática das estruturas extensionais e compressionais na borda oeste do Sinclinal Moeda, QF. In: Simpósio de Geologia de Minas Gerais,, Ouro Preto, SBG, Anais 6: 15-17.

Endo I. & Rocha Filho O. G. 2003. Estratigrafia, arcabouço estrutural e controle da mineralização ferrífera da mina de Gongo Soco, MG. 48p. Relatório Interno.

Endo I. 1997. Regimes tectônicos do arqueano e proterozoico no interior da placa sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais. Tese de Doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo,

Engelder, T., 1987, Joints and some fractures in rocks, in Atkinson, B., ed., Fracture Mechanics of Rock, Academic Press, 27-69.

Eschewege, W. L. v. 1825. Noticias e reflexões estatísticas a respeito da provinvia de Minas gerais. (Lisboa 1825) Extraido de Memórias da Academia de Sciencias de Lisboa, IX. Pt. 1.

Eschwege, W.L. v. 1833. Pluto Brasilienses. G. Reimer, Berlim 622p. Tradução de Doício de Figeuriedo Murta, Itatiaia/Ed. USP, 2 vol., Belo Horizonte/são Paulo, 1976.

Gair J.E. 1962. Geology and ore deposits of Nova Lima and Rio Acima Quadrangles, Minas Gerais, Brazil. Washington, USGS/DNPM. Professional Paper, 341-A, 67 p.

Gomes C. J. S., Braga S. C., Silva R. G., Candido A., Ferreira A., Avelar A., Correa E., Lemo G., Oliveira E., Oliveira H.,Loutfi I., Fucccio J., Cota M., Jeronymo M., Bendito M. G., Toffolo R., 2003. A deFormação do Sinclinal Meda – novos dados estruturais In: SBG. Simp. Geol. Minas Gerais, 12. Anais (meio digital)

Gomes C. J. S.. 1996. A inversão tectônica nas Bacias Serra do Curral e serra da Moeda, no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais – modelos físicos. Rev. Esc. Minas, 49:52-9

Harder, E.C. & Chamberlin, R.T. 1915. The Geology of Central Minas Gerais, Brazil: J.Geol., 23 : 341-378.

Herz, N. 1970. Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington, US Geol. Surv. 58 p. (Prof. Pap. 641-B).

Hippert J., Davis B., 2000. Dome emplacement and formation of kilometer-scale synclines in granite-greenstone terrain (Quadrilátero Ferrífero, southeastern Brazil). Precambrian Research. 102: 99-121.

Hippertt, J. F. M., Borba, R., Nalini, H. A. Jr. 1992. O contato Formação Moeda-Complexo Bonfim: uma zona de cisalhamento normal na borda oeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. Anais do 6º Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Sociedade Brasileira de Geologia e da XXX Semana de estudos da Siceg. REM 45 (1-2): 32-34.

Hirashima, H. 2003. Mina de Cata Branca subsídios da arqueologia histórica e do geoprocessamento para a elaboração de estratégias de preservação. Monografia de especialização. Instituto de geociências da UFMG, 86p.

Jeanloz, R., and A. B. Thompson (1983), Phase transitions and mantle discontinuities, Rev. Geophys., 21(1), 51–74.

Jord Evangelista, H., Muller, G. Petrologia da Zona de Transição entre o Cráton do São Francisco e o Cinturão Móvel Costeiro na Região Sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34. Anais... Goiânia, 1986b. p.1471-1479.

Kearey, P., Brooks M., Hill I. 2009. Geofísica de exploração. Oficina de Textos, São Paulo, 438 p.

Ladeira, E. A. 1981. Primeiras lavas com almofadas ("pillows") encontradas no Supergrupo Rio das Velhas, de idade arqueana, no Quadrilátero Ferrifero e no Distrito de Pitangui, Minas Gerais. Ciências da Terra, 1(1): 12-14.

Ladeira E.A. & Viveiros J.F.M. 1984. Hipótese sobre a estruturação do Quadrilátero Ferrífero com base em dados disponíveis. Belo Horizonte, SBG/Núcleo Minas Gerais, Boletim 4, 18p.

Ladeira E. A., Roeser H. M. P., Tobschall, H.J. Evolução petrogenética do cinturão de rochas verdes, Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: SIMP. GEOL. MINAS GERAIS, 2, Anais... Belo Horizonte: SBG, 1983.v.2, p.149-165

Lasa Engenharia e Prospecções S. A. 2001. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamespectométricos. Rio de Janeiro, SEME, 44p.

Lowes F. J. & Wilkinson I. 1963. Geomagnetic dynamo: a laboratory model. Nature, 198: 1158-1160.

Luiz J.G. & Silva, L.M.C. 1995. Geofísica de Prospecção. CEJUP, Belém, 311pp.

Machado N.; Noce C.M.; Ladeira E.A.; Belo de Oliveira O.A. 1992. U-Pb geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilatero Ferrífero, southern São Francisco Craton, Brazil. Geological Society of America Bullettin, 104:1221-1227.

Mandl G. 1988. Mechanics of tectonic faulting: models and basic concepts. Amsterdam. Elsevier Science Publishing Company Inc. 407p.

Mansfield, Chris & Cartwright, Joe. (2001). Fault growth by linkage: Observations and implications from analogue models. Journal of Structural Geology - J STRUCT GEOL. 23. 745-763. 10.1016/S0191-8141(00)00134-6.

Marshak, S. & Alkmim, F.F., 1989. Proterozoic extension/ contraction tectonics of the southern São Francisco Craton and adjacent regions, Minas Gerais, Brazil: A kinematic model relating Quadrilátero Ferrífero, São Francisco Basin and Cordilhera do Espinhaço. Tectonics 8 (3): 555-571.

Maxwell J. C, Wise, U. D; 1958 - WRENCH-FAULT TECTONICS: A DISCUSSION. GSA Bulletin; 69 (7): 927–928.

Noce, C.M., Zucchetti, M., Baltazar, O.F., Armstrong, R., Dantas, E.L., Renger, F.E., Lobato, L. M. 2005. Age of felsic volcanism and the role of ancient continental crust in the evolution of the Neoarchean Rio das Velhas greenstone belt (Quadrilátero Ferrífero, Brazil): U-Pb zircon dating of volcaniclastic graywackes. Precambrian Res., 141: 67-82.

Oliveira N. V., Barbosa M.S.C., Endo, I. 2004. Modelagem 2D das anomalias magnéticas no homoclinal da Serra do Curral . In: Simpósio Regional da Sociedade Brasileira de Geofísica, I, Atas, cd-rom.

Price, N. J. & Cosgrove, J. W. 1990. Analysis of Geological Structures. XIII 502 pp. Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney: Cambridge University Press. ISBN 0521 26581 9; 0521 31958 7.

Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millet, A. J., Somerton, I. W. 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. Geophysics, 55: 88-91.

Renger F. E., N.C.M., R.A.W., M.N. 1994. Evolução Sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Geonomos, 2(1): 1-11.

Ruchkys, Úrsula de Azevedo. 2007, Patrimônio Geológico e Geoconservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: PotÊncial para a criação de um Geoparque da UNESCO – Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da UFMG, 211 p.

Silva R. G. 1999. Análise Estrutural e modelagem tectônica da região centro-sul do Sinclinal da Moeda, Quadrilátero Ferrífero. DEGEO/EM/UFOP, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 154 p.

Simmons G. C. & Maxwell C. H. 1961. Grupo Tamanduá da Serie Rio das Velhas: Brazil. Dept. Nac. Produção Mineral Div. Geologia e Mineralogia, Bol. 211, 30p.

Teixeira, W. – 1982 – Geochronology of the southern parto f São Francisco Craton, Revista Brasileira de Geociências. 12 (1/3):268-277.

Telford W. M., Geldart L. P., Sheriff R. E., Keys D. A. 1990. Applied Geophysics. Cambridge University. 770p.

Thompson, D. T.,1982, EULDPH: A new technique for making computer-assisted depht estimates from magnetic data. Geophysics 47: 31-37

Willemse, E. J. M. 1997. Segmented normal faults: correspondence between three-dimensional mechanical models and field data. Journal of Geophysical Research, 102, 675-92

Yukutake T. 1962. The westward drift of the magnetic field of the earth. Bulletin of the Earthquake Research Institute,40: 1-65.

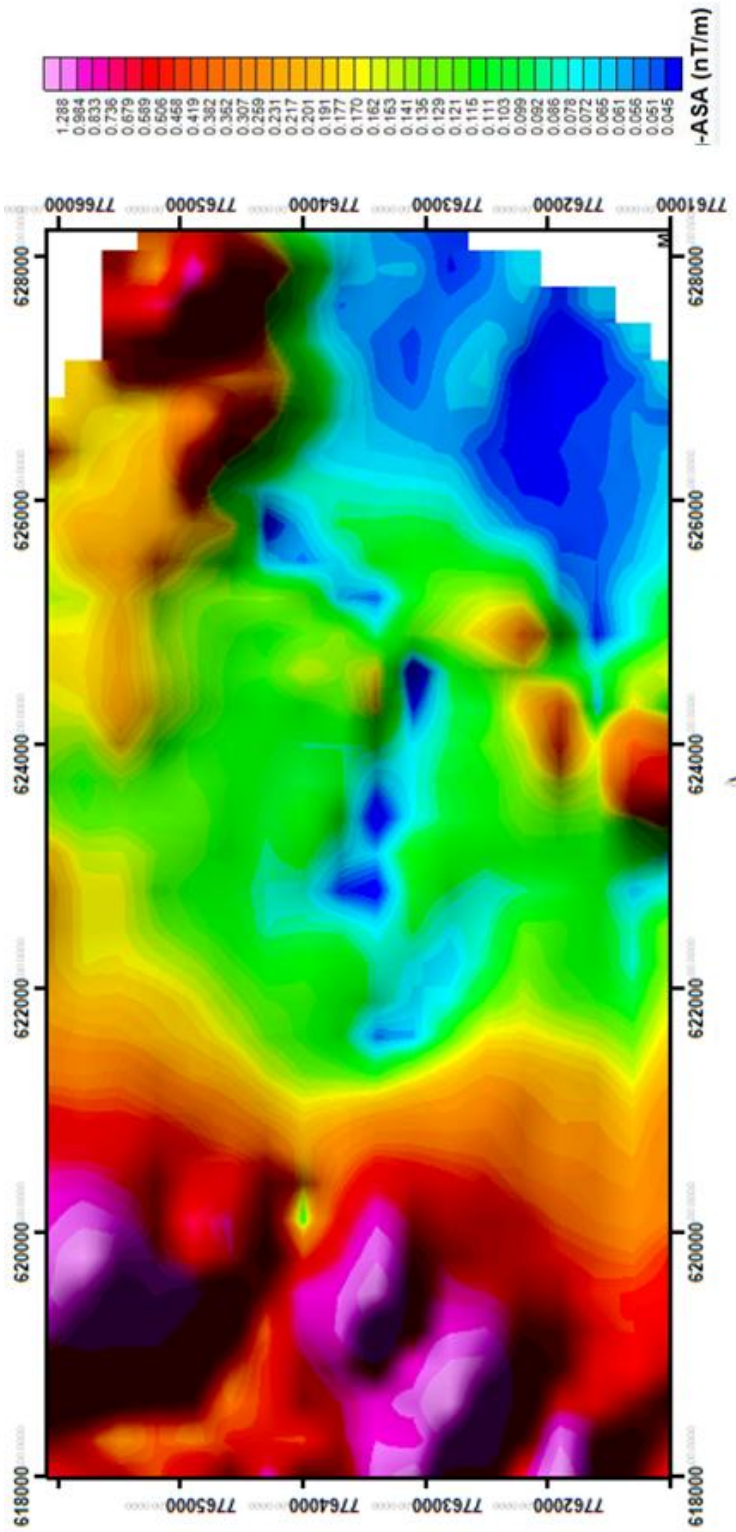
Zerfass H., Chemale jr. F. 2011. Geologia estrutural em ambiente rúptil: fundamentos físicos, mecânica de fraturas e sistemas de falhas naturais. Terræ Didatica, 7(1):75-85.

Zucchetti, M., Baltazar, O.F., Raposo, F.O. 1998. Estratigrafia. In: M. Zucchetti, O.F. Baltazar (editores), Projeto Rio das Velhas.Texto explicativo do mapa geológico integrado,escala1:100.000. 2nd ed. Departamento Nacional de Produção Mineral/CPRM - SGB, Belo Horizonte, p. 13–42.

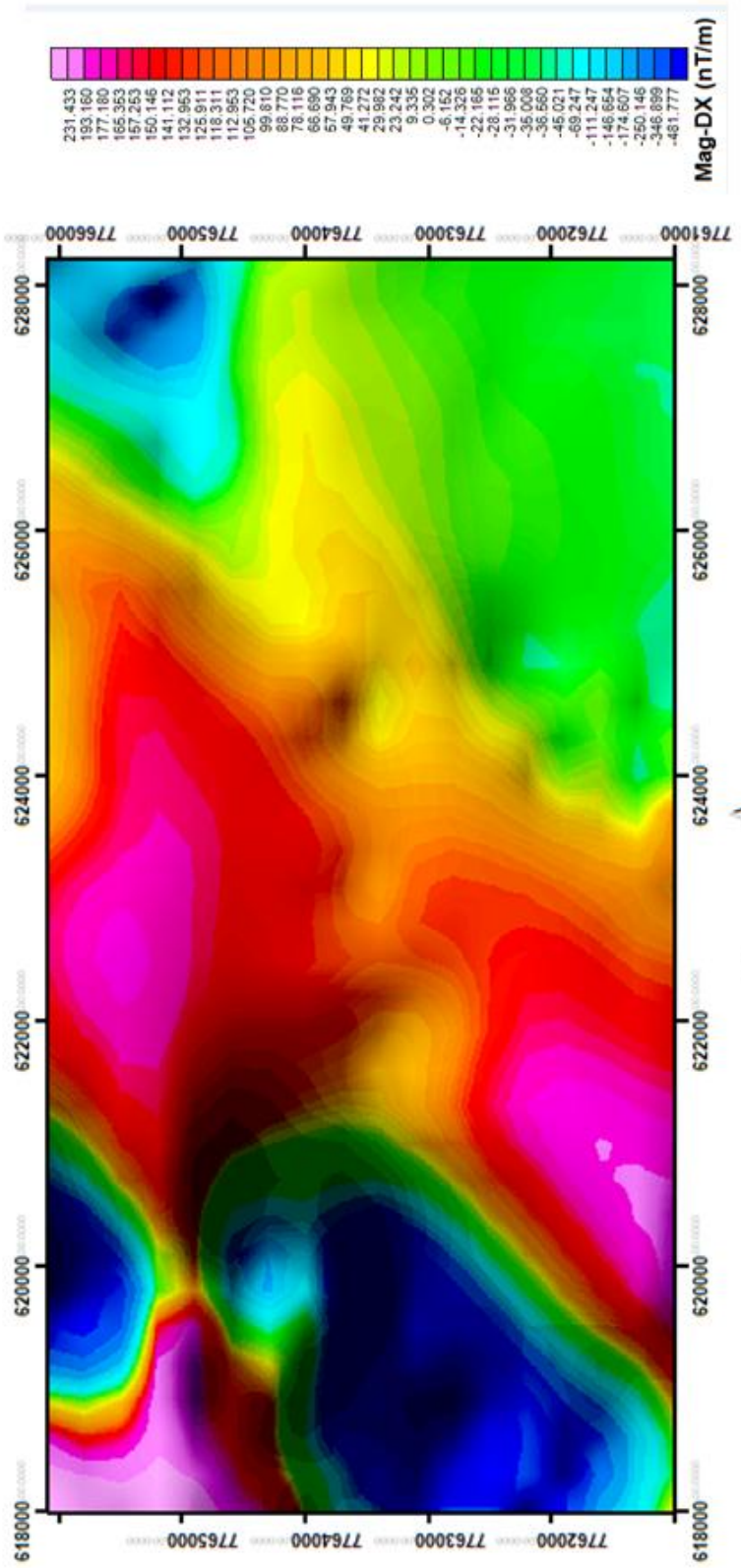
Anexos

O QR code a seguir permite a visualização em vídeo da Falha de Cata Branca em 3D.

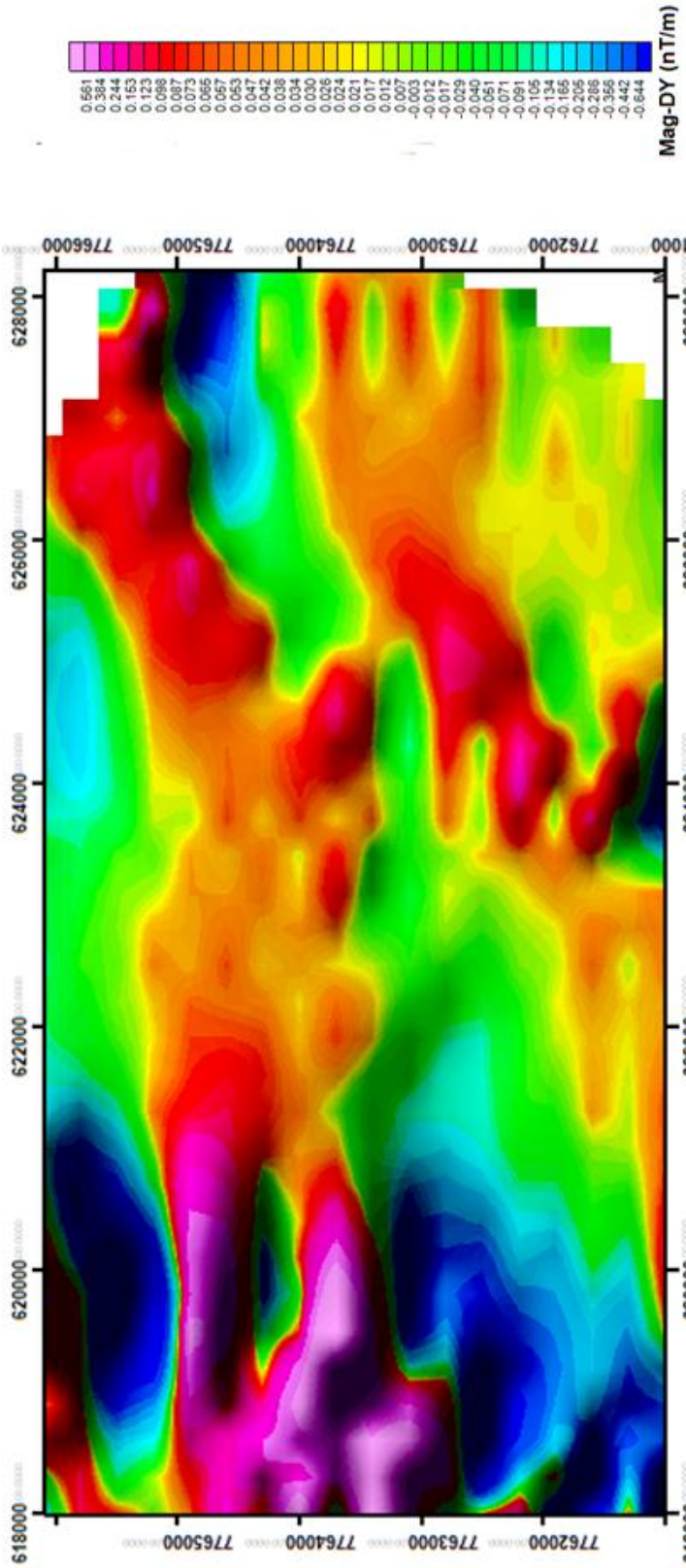
Os mapas apresentados neste trabalho se encontram a seguir ampliados e com melhor resolução



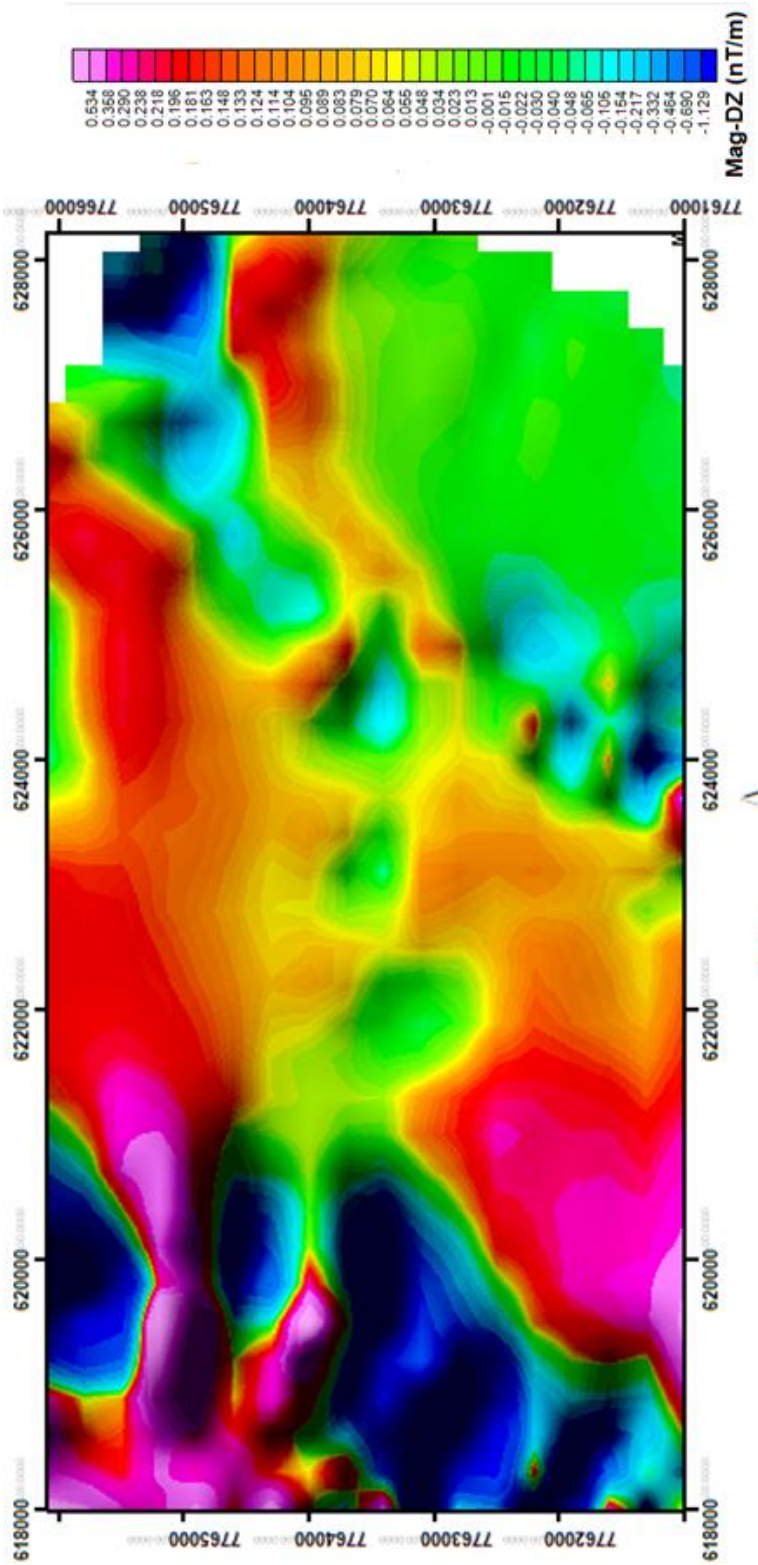
Anexo 1 – Mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA)



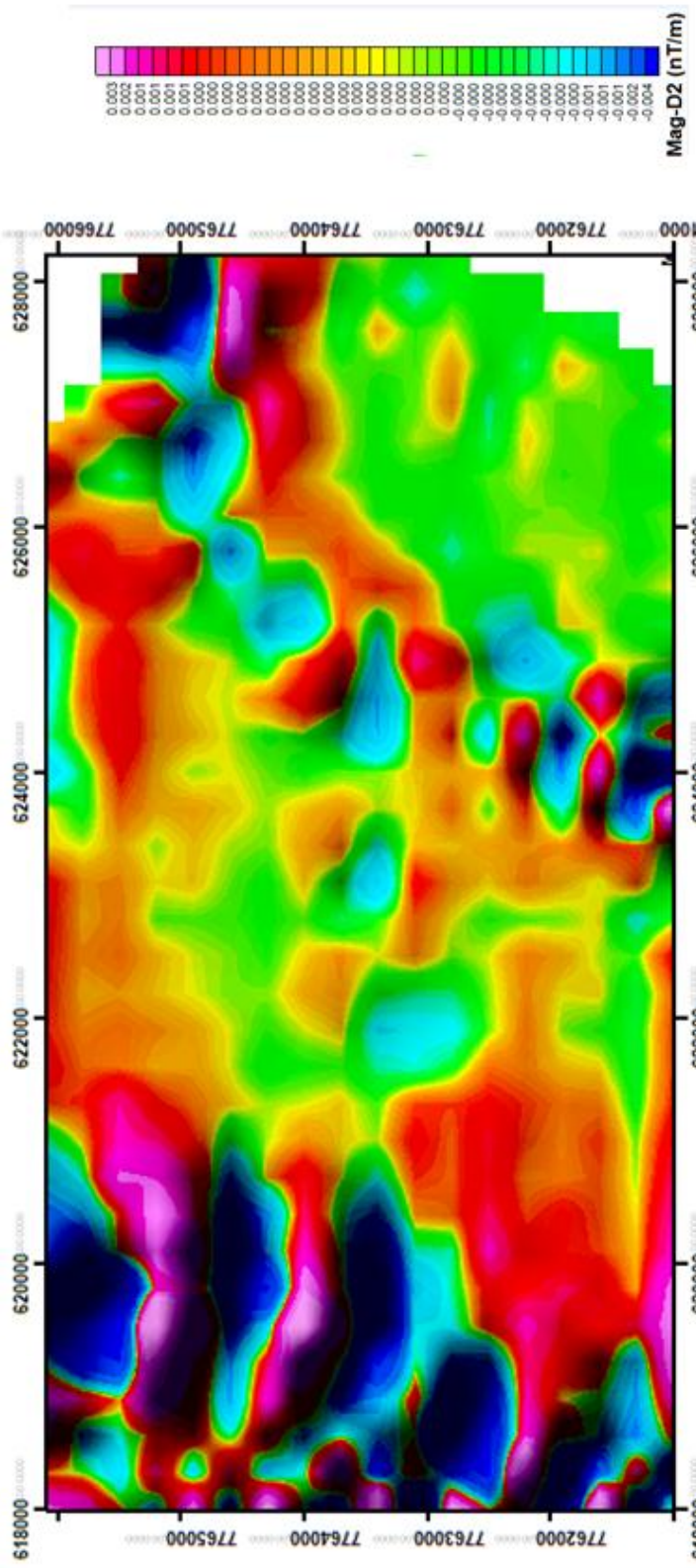
Anexo 2 – Mapa da derivada em X para evidenciar estruturas na direção Norte-Sul (DX)



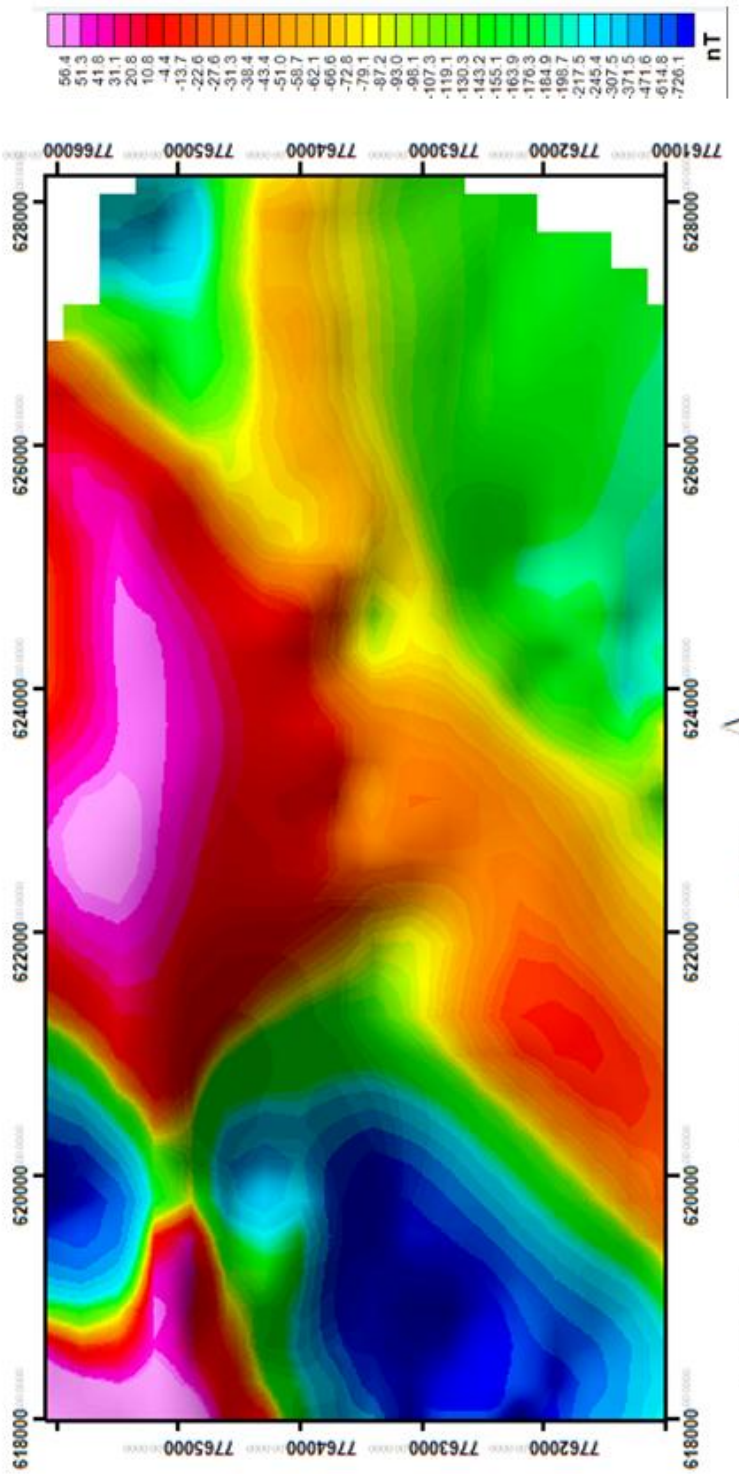
Anexo 3 – Mapa da derivada em Y para evidenciar estruturas na direção Leste-Oeste (DY)



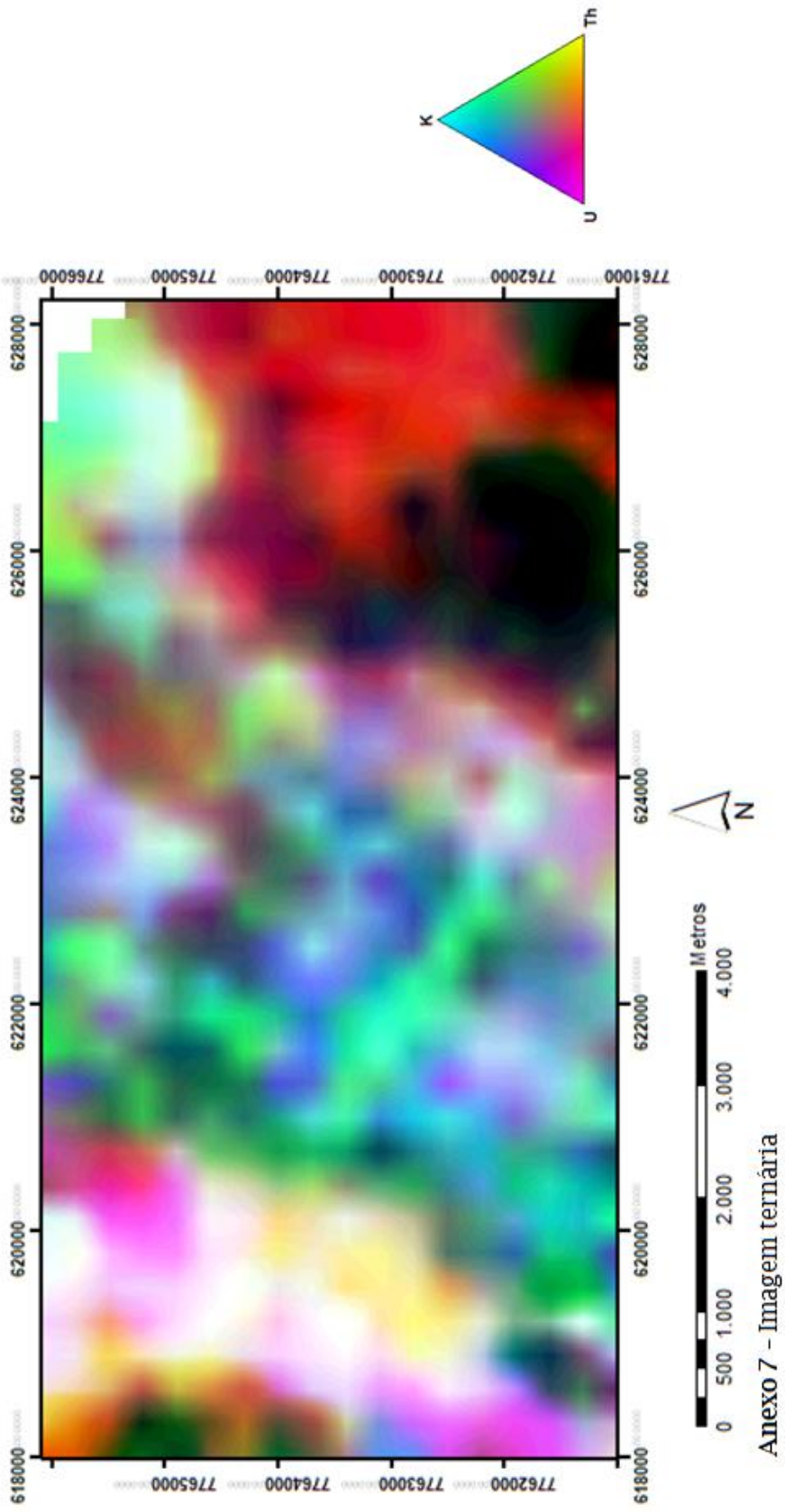
Anexo 4 – Mapa da derivada em Z para evidenciar anomalias superficiais



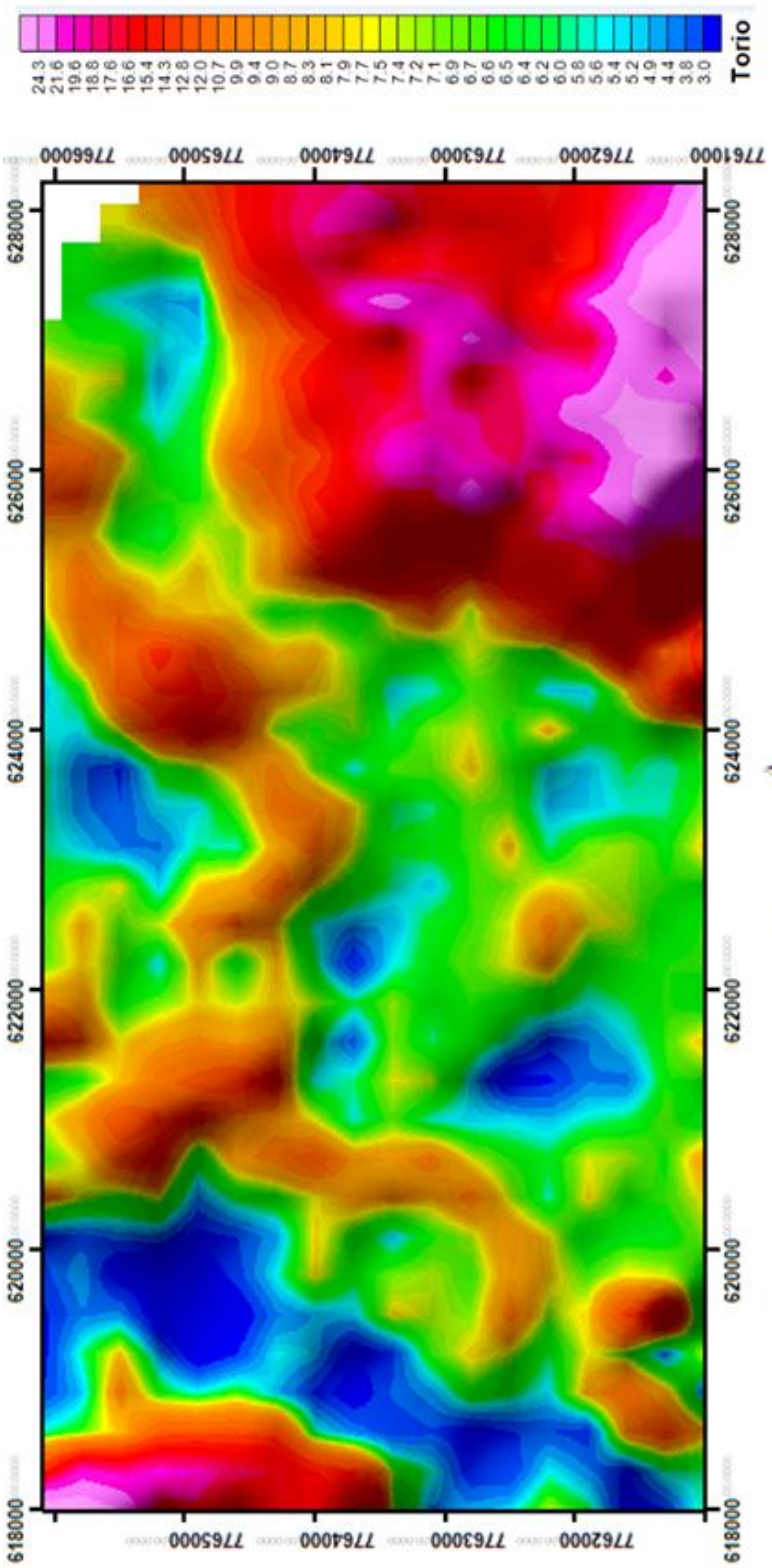
Anexo 5 – Mapa da segunda derivada, também conhecido como mapa residual.



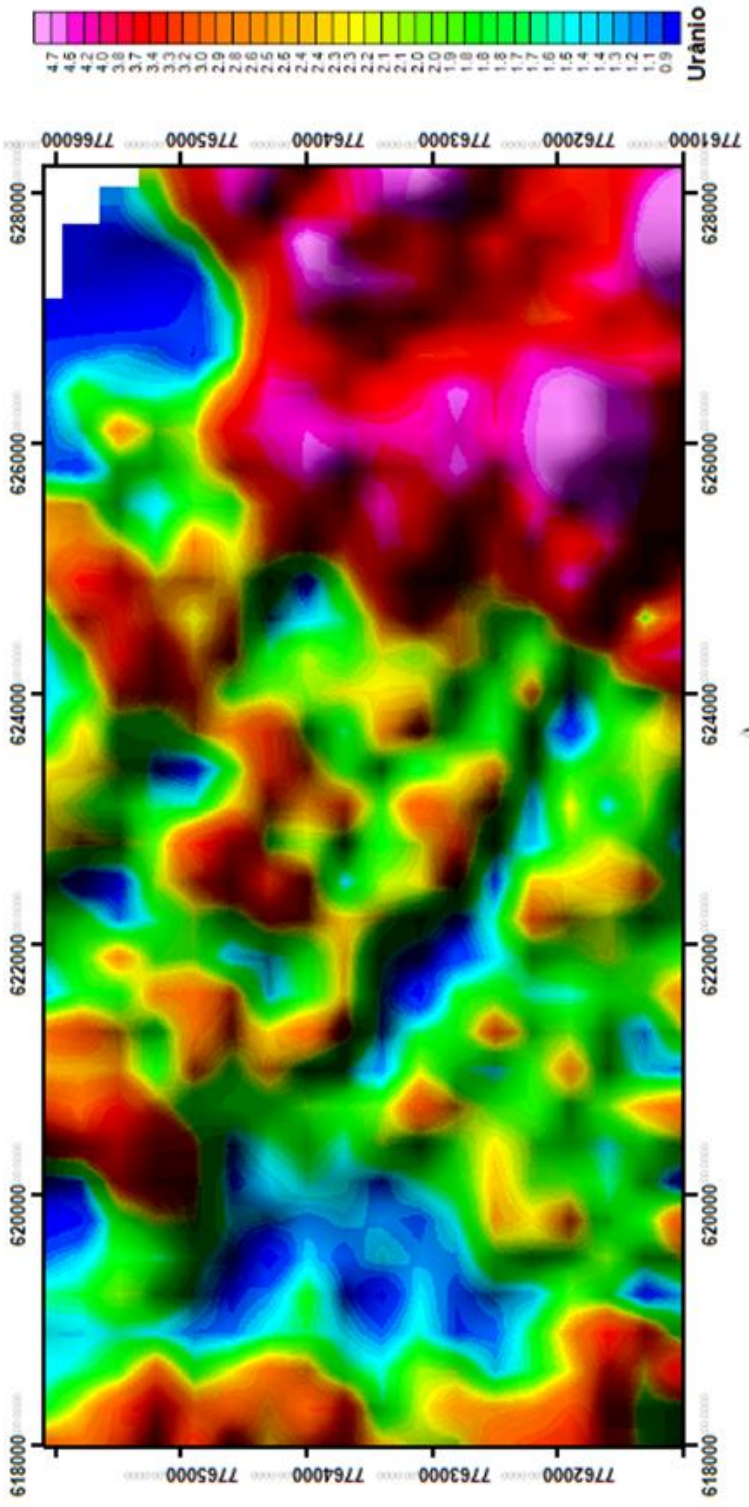
Anexo 6 – Mapa do Campo Anômalo (CA)



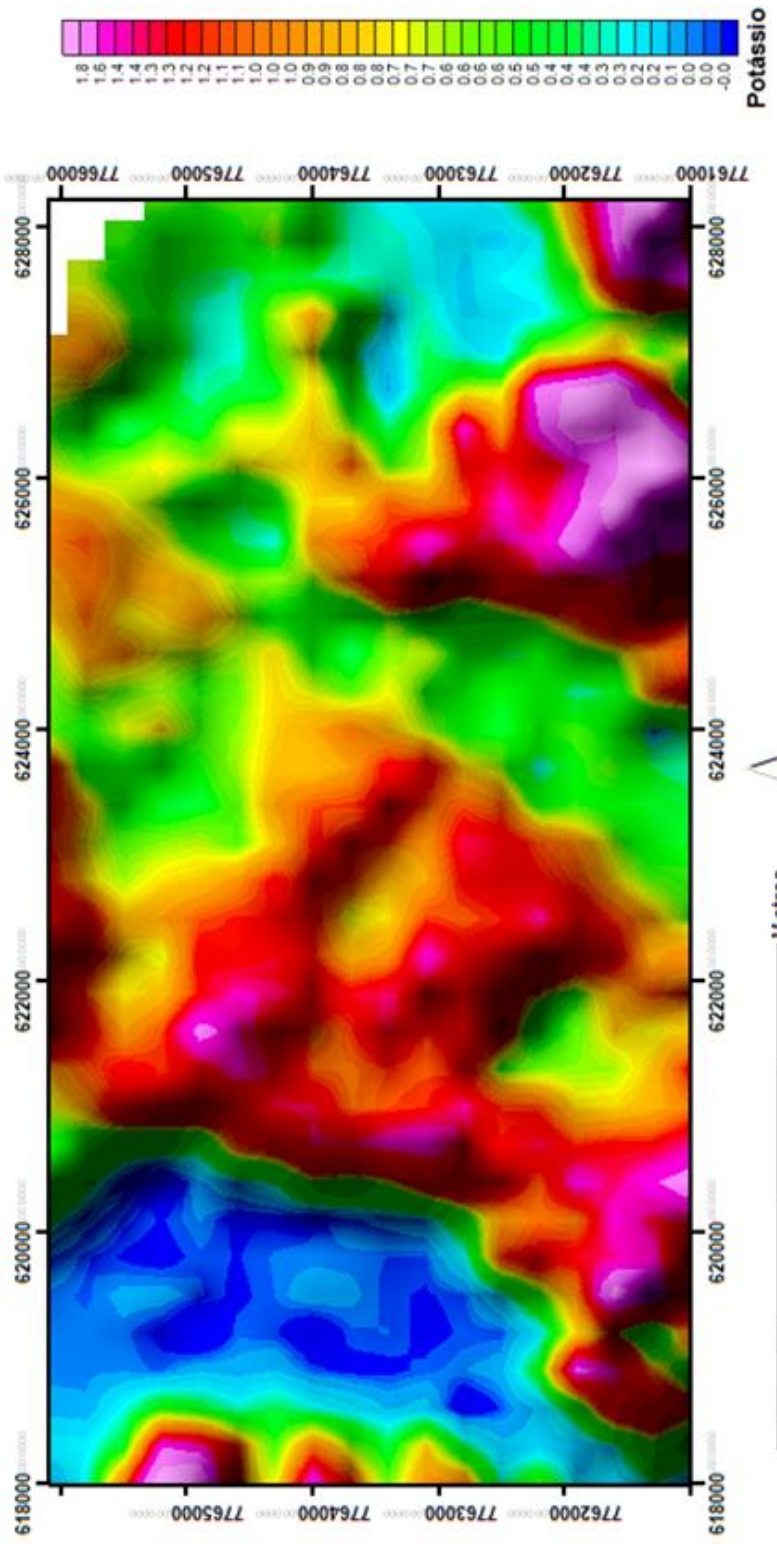
Anexo 7 – Imagem ternária



Anexo 8 – Mapa radiométrico do canal de Tório (Th)

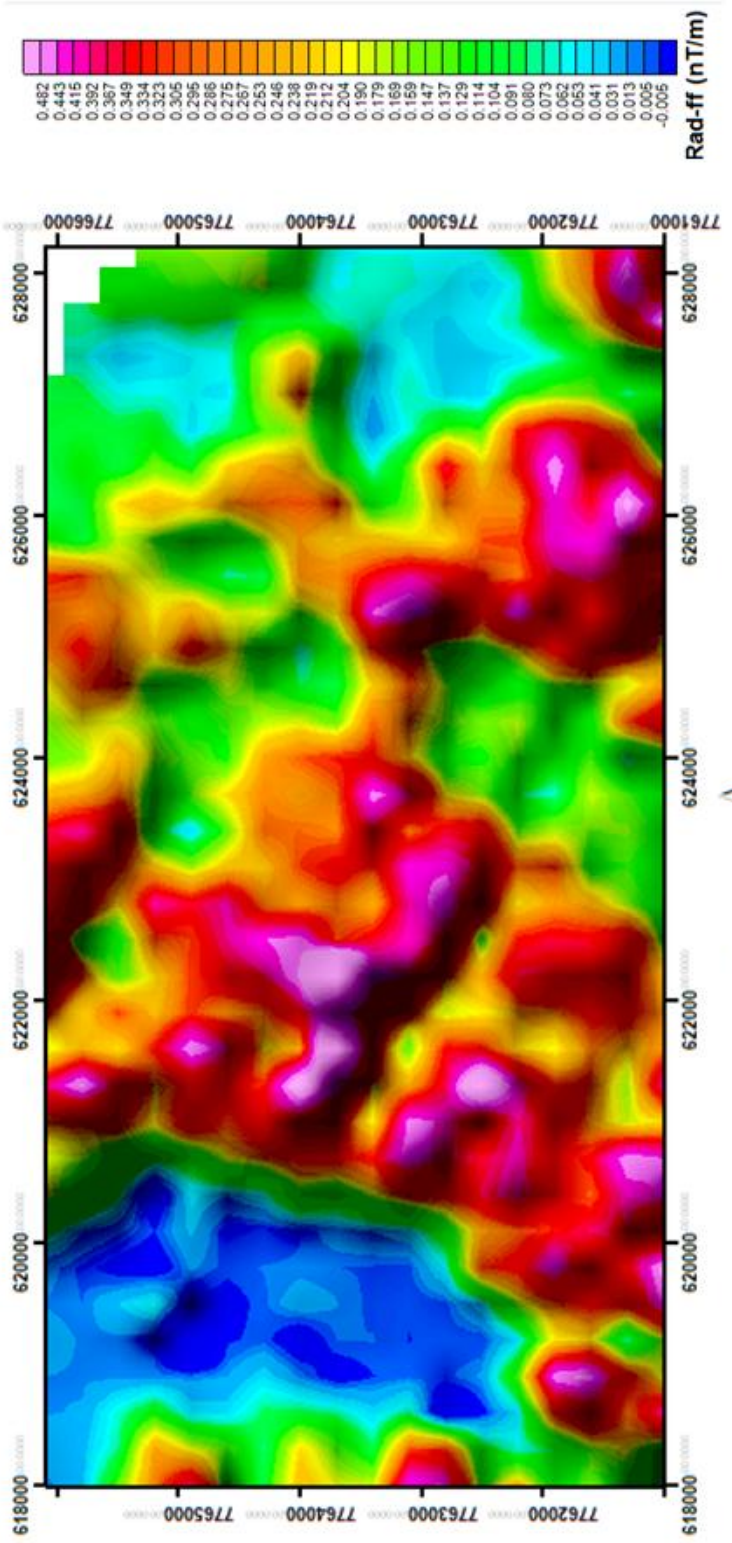


Anexo 9 – Mapa radiométrico do canal de Urânio (U)

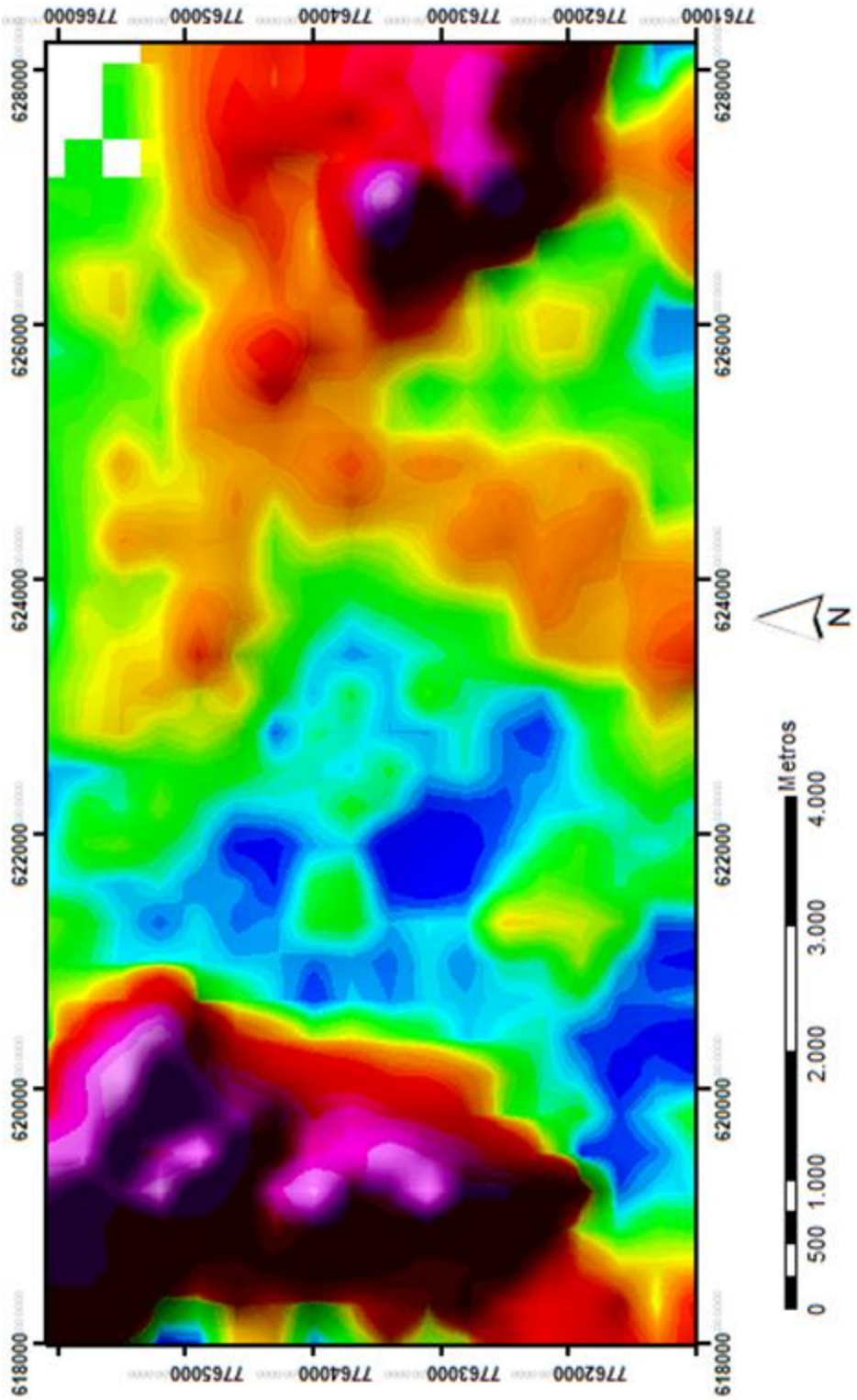


Anexo 10 – Mapa radiométrico do canal de Potássio (K)

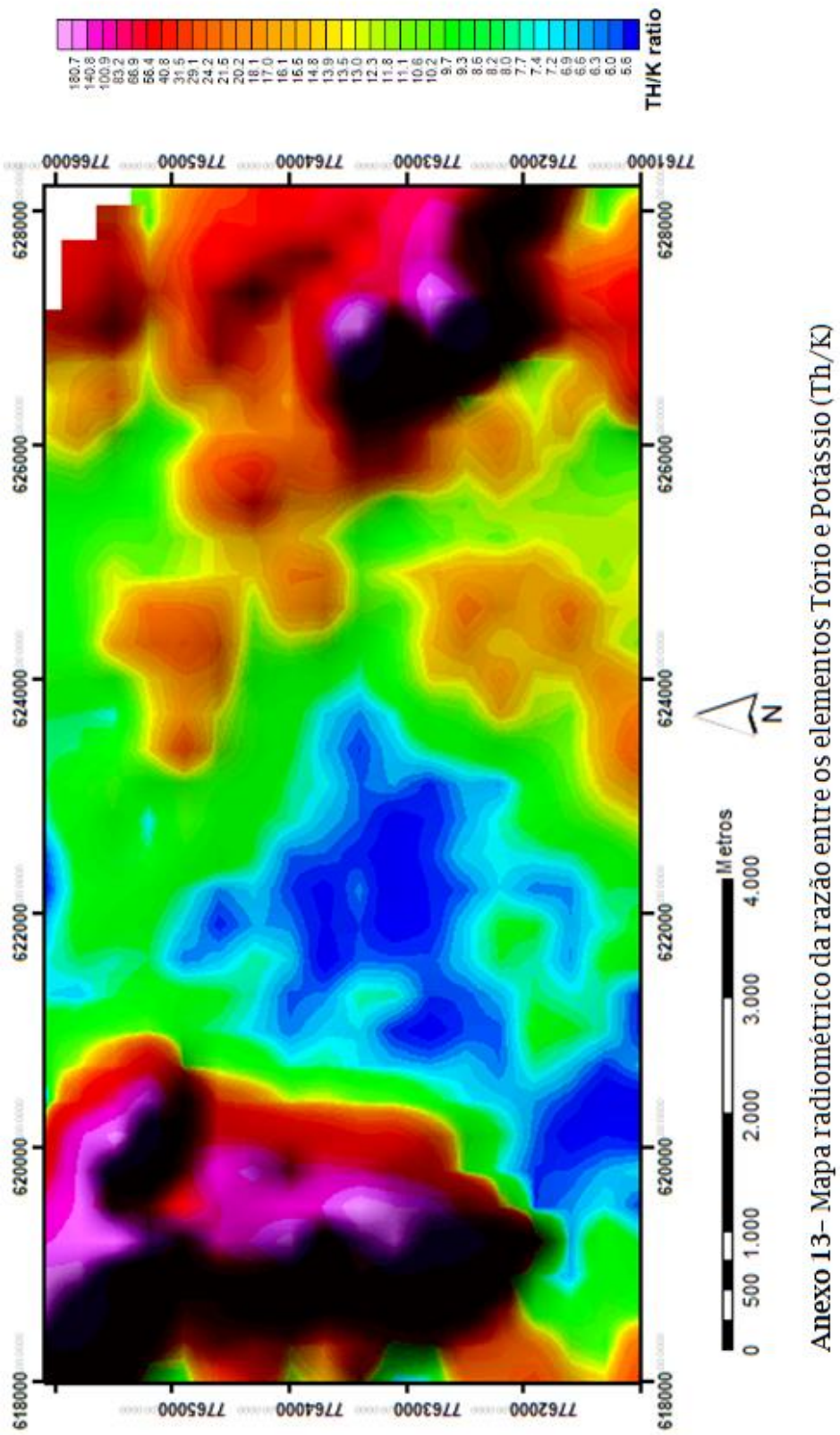
Trabalho de Conclusão de Curso, n. 279, 82p. 2018.



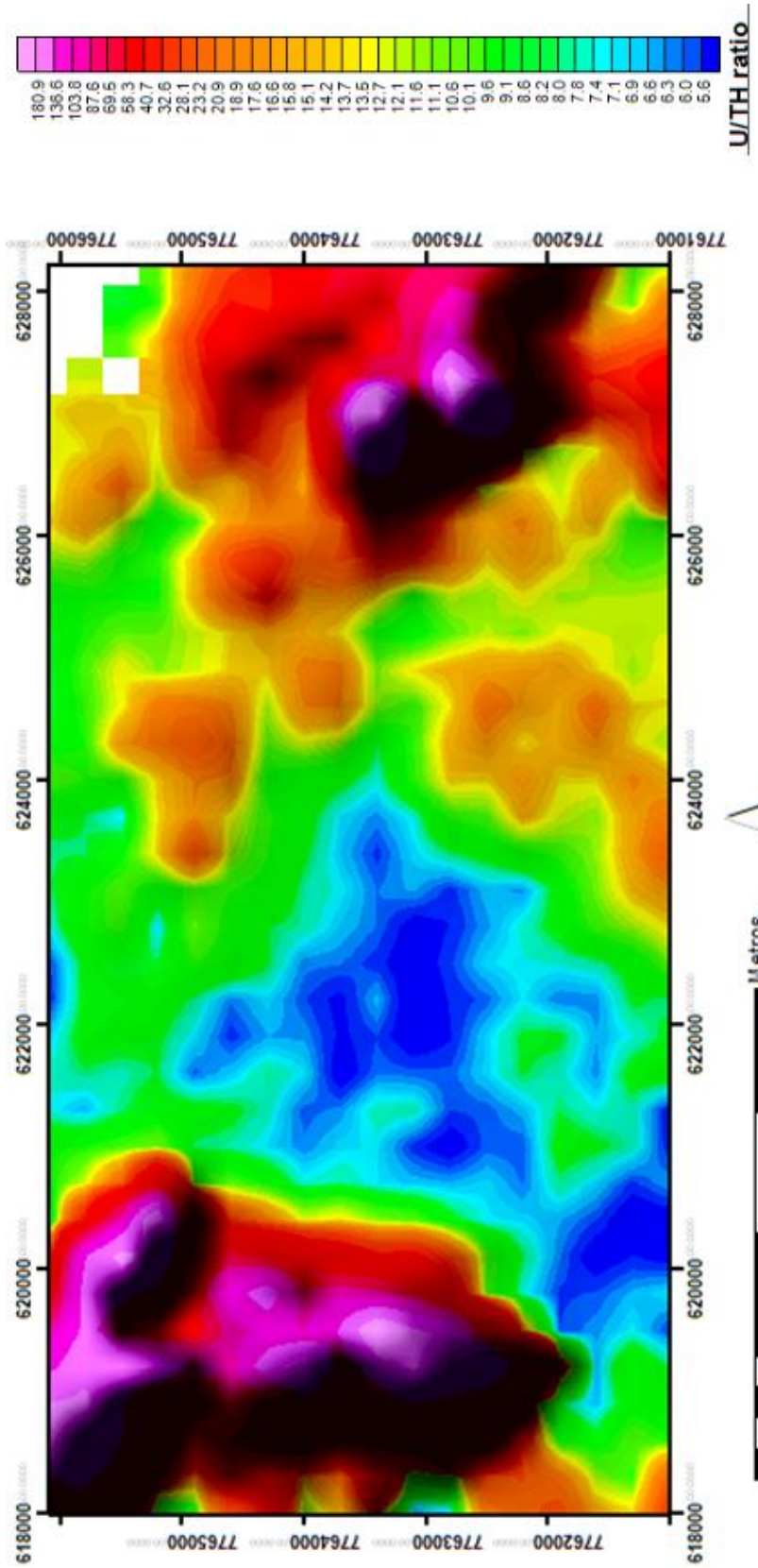
Anexo 11– Mapa radiométrico do fator f (ff)



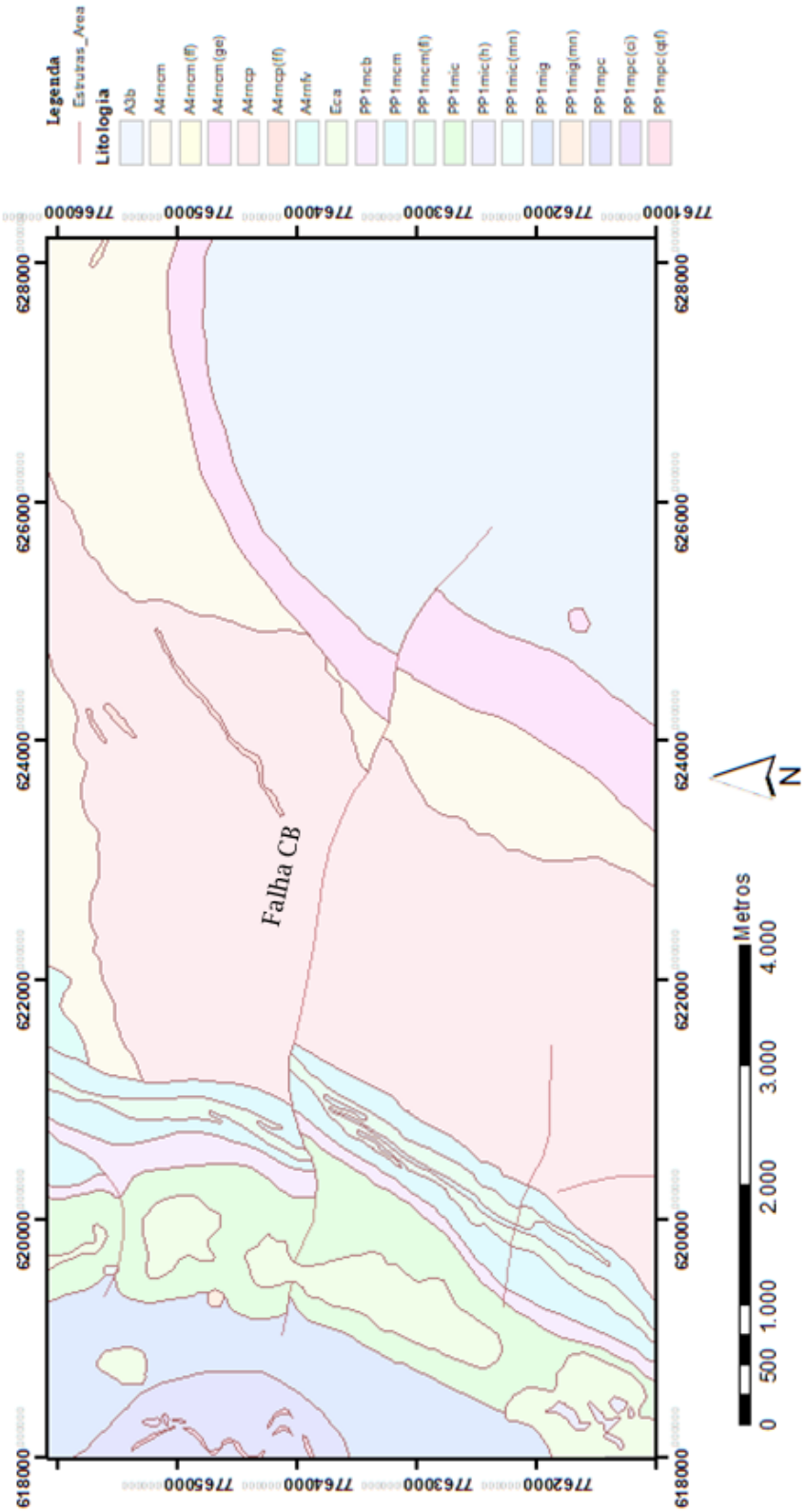
Anexo 12– Mapa radiométrico da razão entre os elementos Urânio e Potássio (U/K)



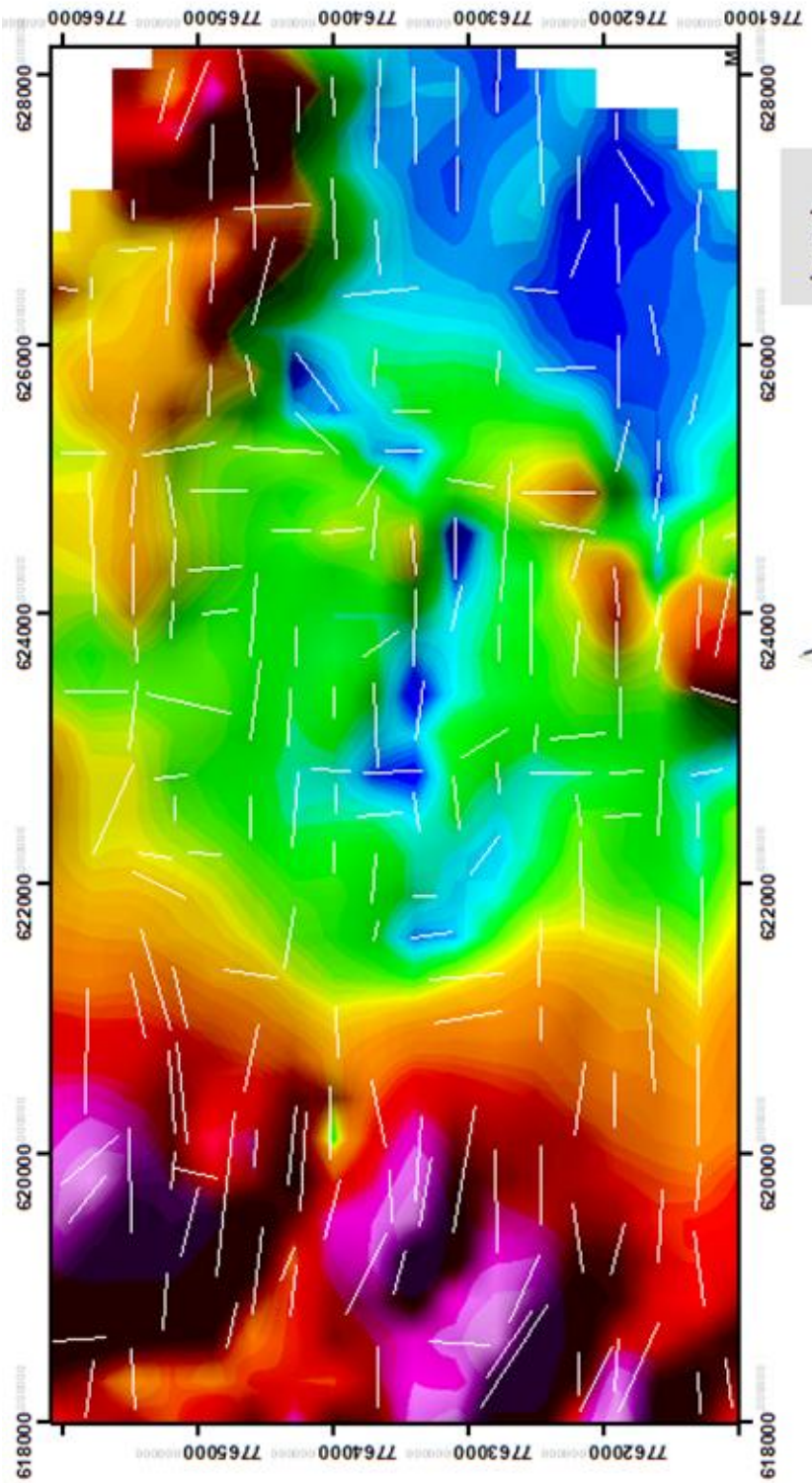
Anexo 13– Mapa radiométrico da razão entre os elementos Tório e Potássio (Th/K)



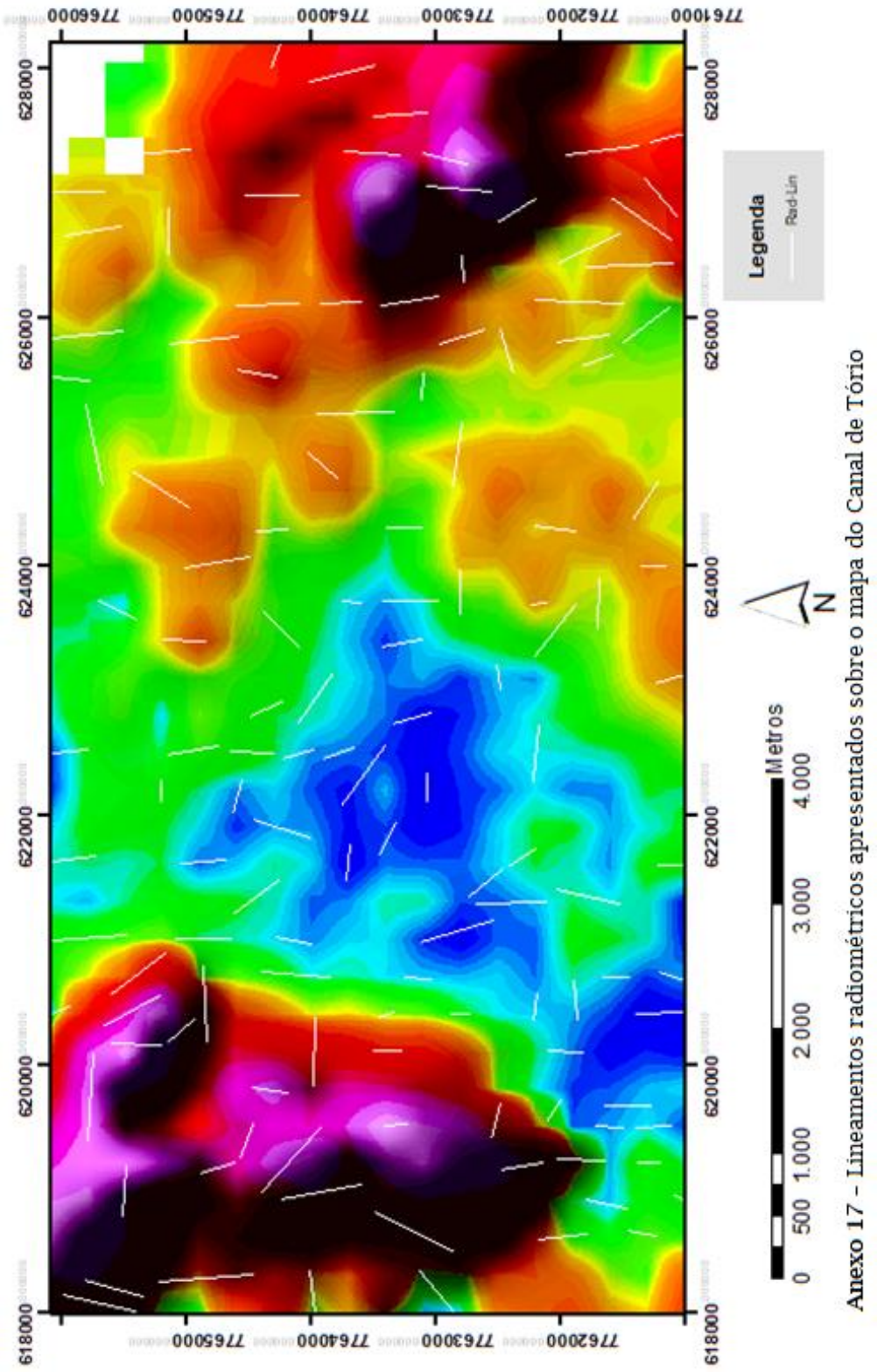
Anexo 14– Mapa radiométrico da razão entre os elementos Tório e Urânio (U/Th)



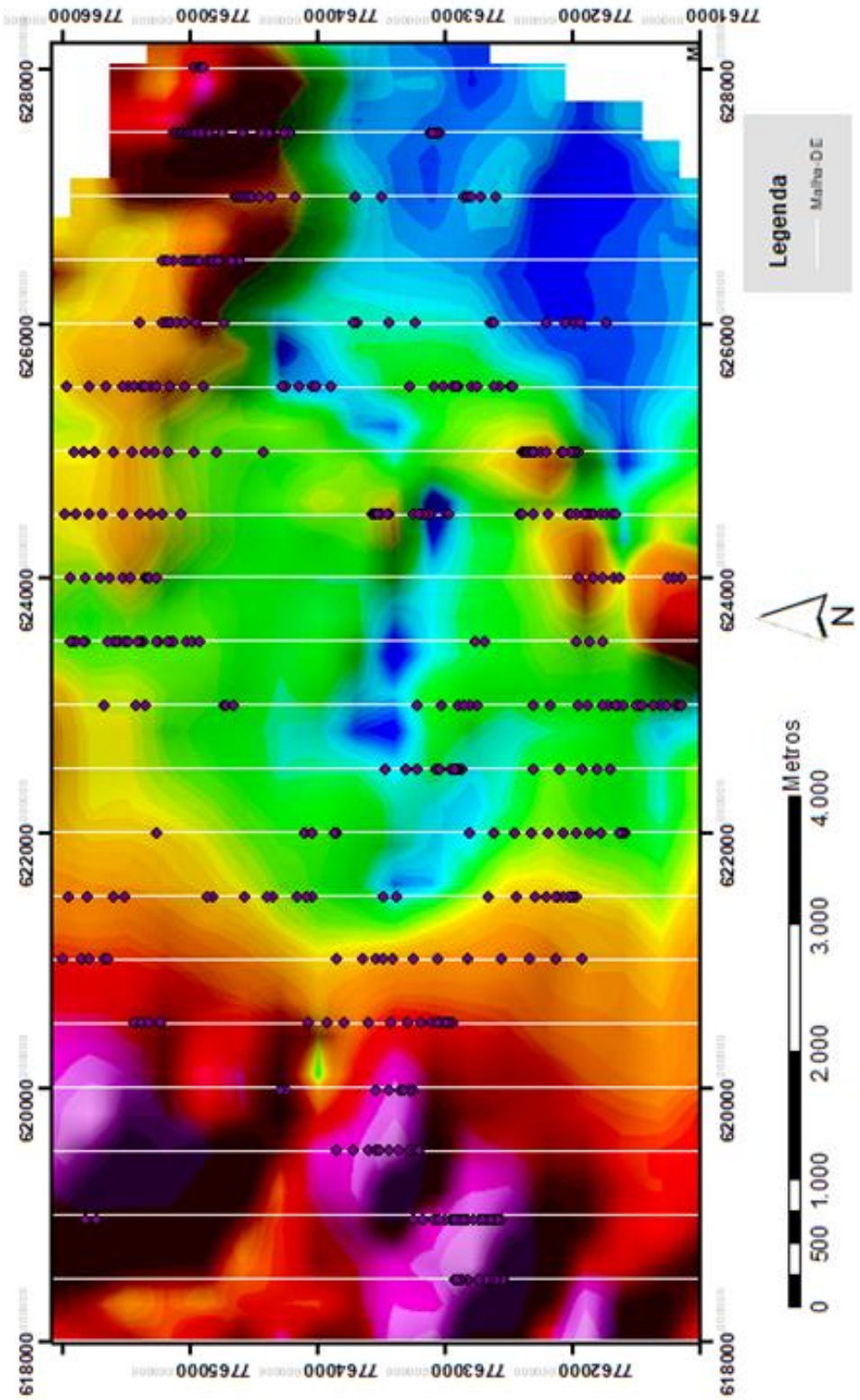
Anexo 15 - Mapa litológico da área com a falha de Cata Branca demarcada como Falha CB



Anexo 16 - Lineamentos magnetométricos apresentados sobre o mapa de Amplitude do Sinal analítico



Anexo 17 - Lineamentos radiométricos apresentados sobre o mapa do Canal de Tório



Anexo 18- Malha dos perfis de deconvolução apresentada sobre o mapa de amplitude do sinal analítico