



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**GEOMETRIA DA FALHA DE ÁGUA QUENTE E SEU PAPEL NA ZONA EXTERNA DA
FAIXA ARAQUAÍ AO LONGO DO PARALELO DE ABRE CAMPO, MINAS GERAIS.**

Gregório Favversani

MONOGRAFIA nº321

Ouro Preto, julho de 2019

**GEOMETRIA DA FALHA DE ÁGUA QUENTE E SEU PAPEL
NA ZONA EXTERNA DA FAIXA ARAÇUAÍ AO LONGO DO
PARALELO DE ABRE CAMPO, MINAS GERAIS.**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière 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 321

GEOMETRIA DA FALHA DE ÁGUA QUENTE E SEU PAPEL NA ZONA EXTERNA DA FAIXA ARAÇUAÍ AO LONGO DO PARALELO DE ABRE CAMPO, MINAS GERAIS.

Gregório Faversani

Orientadora

Prof.^a Dr.^a Maria Sílvia Carvalho Barbosa

Co-Orientador

Prof. Dr. Issamu Endo

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 2019/1.

OURO PRETO

2019

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: Gregório Faversoni

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

F273g Faversoni, Gregório.
Geometria da Falha de Água Quente e seu papel na zona externa da Faixa
Araçuaí ao longo do paralelo de Abre Campo, Minas Gerais [manuscrito] /
Gregório Faversoni. - 2019.

91f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Silvia Carvalho Barbosa.
Coorientador: Prof. Dr. Issamu Endo.

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

1. Quadrilátero Ferrífero (MG). 2. Geofísica. 3. Geologia estrutural. 4.
Prospecção - Métodos potenciais. I. Barbosa, Maria Silvia Carvalho. II. Endo,
Issamu. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 550.81

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Geometria da Falha de Água Quente e seu Papel na Zona Externa da Faixa Araçuaí ao Longo do Paralelo de Abre Campo, Minas Gerais.

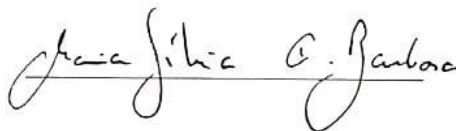
AUTOR: GREGÓRIO FAVERSANI

ORIENTADORA: Prof.^a Dr.^a Maria Sílvia Carvalho Barbosa

Aprovada em: 12 de julho de 2019

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a Dr.^a Maria Sílvia Carvalho Barbosa

 DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Marco Antônio Fonseca

 DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Leonardo Eustáquio da Silva Gonçalves

 DEGEO/UFOP

Ouro Preto, 12/07/2019

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	viii
SUMÁRIO	x
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABELAS	xiv
RESUMO	xix
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 LOCALIZAÇÃO	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.4 JUSTIFICATIVA.....	3
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS	3
1.5.1 Revisão bibliográfica.....	4
1.5.2 Levantamento de banco de dados.....	4
1.5.3 Análise qualitativa.....	4
1.5.4 Análise quantitativa	5
1.5.5 Integração geofísica-geológica.....	5
2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	7
2.1 CRÁTON SÃO FRANCISCO.....	7
2.2 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES DA FAIXA ARAÇUAÍ.....	8
2.3 LITOESTRATIGRAFIA.....	9
2.3.1 Complexos cristalinos	9
2.3.2 Sequências Vulcano-sedimentares	12
2.3.3 Unidades Supracrustais Proterozoicas.....	12
2.3.4 Rochas Granitoides.....	16
2.3.5 Coberturas recentes	16
2.4 ARCABOUÇO ESTRUTURAL	17
2.5 EVOLUÇÃO TECTÔNICA.....	18
2.6 FALHA DE ÁGUA QUENTE	21
3 MÉTODOS GEOFÍSICOS	23
3.1 INTRODUÇÃO	23
3.2 GRAVIMETRIA.....	23
3.2.1 Introdução	23
3.2.2 O campo gravitacional terrestre	24
3.2.3 Anomalia gravimétrica	25
3.2.4 Densidade das rochas	26

3.3 MAGNETOMETRIA	28
3.3.1 Introdução	28
3.3.2 O campo magnético terrestre	29
3.3.3 Magnetismo das rochas.....	31
3.3.4 Correção e filtros	32
3.3.5 Deconvolução de Euler	33
4 PROCESSAMENTO DE DADOS	35
4.1 INTRODUÇÃO	35
4.2 BANCO DE DADOS	35
4.2.1 Gravimetria	35
4.2.2 Magnetometria	35
4.2.3 Geoquímica	40
4.3 TRATAMENTO DOS DADOS GEOFÍSICOS.....	41
4.3.1 Geração de mapas.....	41
4.3.2 Deconvolução de Euler	43
4.3.3 Integração tridimensional.....	47
4.4 TRATAMENTO DOS DADOS GEOQUÍMICOS	53
4.4.1 Tratamento estatístico.....	53
4.4.2 Geração de mapas.....	53
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1 INTRODUÇÃO	59
5.2 RESULTADOS QUALITATIVOS.....	59
5.2.1 Mapa gravimétrico – Anomalia Bouguer.....	59
5.2.2 Mapa magnetométrico – Amplitude do Sinal Analítico (ASA)	62
5.3 RESULTADOS QUANTITATIVOS.....	65
5.3.1 Perfis de deconvolução de Euler	65
5.3.2 Modelos tridimensionais.....	72
6 CONCLUSÕES	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Localização e vias de acesso da área de estudo.....	2
Figura 2.1 -Localização regional.....	7
Figura 2.2 - O Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental e o Cráton São Francisco-Congo adjacente, no contexto do Supercontinente Gondwana.	8
Figura 2.3 - Mapa geológico simplificado mostrando a localização das faixas Araçuaí e Ribeira em relação ao Núcleo Cristalino do Orógeno Araçuaí e ao Cráton São Francisco.....	9
Figura 2.4 - Mapa de localização dos Orógenos Araçuaí e Ribeira.....	15
Figura 2.5 - Compartimentos tectônicos do Orógeno Araçuaí.	17
Figura 2.6 - Abertura da bacia Macaúbas, em forma de golfo e com geração de assoalho oceânico em sua porção sul.....	19
Figura 2.7 - Ilustração da fase de convergência inicial das margens da bacia Macaúbas. Início da operação da tectônica do quebra-nozes, com consumo do assoalho da porção oceânica da bacia	19
Figura 2.8 - Esquemas ilustrativos: a) estágio colisional; e b) colapso gravitacional.	20
Figura 3.1 - Comparação do esferoide de referência e do geóide.....	25
Figura 3.2 - O fluxo magnético ao redor de uma barra magnética	28
Figura 3.3 -Elementos do campo geomagnético e os vetores do campo magnético.....	30
Figura 3.4 -A variação da inclinação do campo magnético total com a latitude baseada em uma aproximação do dipolo simples do campo geomagnético.	30
Figura 3.5 - Representação esquemática de um elemento em que os dipolos elementares se alinham na direção de um campo externo B, produzindo uma magnetização induzida.....	31
Figura 3.6 - Histograma com valores médios e intervalos de susceptibilidade dos tipos de rocha mais comuns. 32	
Figura 4.1 - Mapa de localização dos projetos aerogeofísicos utilizados neste trabalho.	36
Figura 4.2 - Mapa de localização dos projetos aerogeofísicos utilizados neste trabalho. Em detalhe, a área do projeto Rio das Velhas na região estudada.	37
Figura 4.3 - Mapa de localização dos projetos aerogeofísicos utilizados neste trabalho. Em detalhe, a área do projeto Itabira Ferros na região estudada.....	38
Figura 4.4 - Mapa de localização dos projetos aerogeofísicos utilizados neste trabalho. Em detalhe, a abrangência da Área 02 do PLAMG na área de estudo.	39
Figura 4.5 - Mapa de localização dos projetos aerogeofísicos utilizados neste trabalho. Em detalhe, a abrangência da Área 03 do PLAMG na área de estudo.	39
Figura 4.6 - Mapa de localização dos projetos aerogeofísicos utilizados neste trabalho. Em detalhe, a abrangência das áreas 12 e 15 do PLAMG na área de estudo.	40
Figura 4.7 - Abrangência dos dados geoquímicos utilizados em relação ao Quadrilátero Ferrífero.....	41
Figura 4.8 - Fluxograma que mostra os mapas gravimétricos gerados.....	42
Figura 4.9 - Fluxograma que mostra os mapas magnetométricos gerados.....	42
Figura 4.10 - Perfis de deconvolução de Euler sobre dados gravimétricos da Anomalia de Bouguer. Em preto o traço da Falha de Água Quente, e em branco a posição dos perfis detalhados.....	44
Figura 4.11 - Perfis de deconvolução de Euler sobre dados magnetométricos de Amplitude do Sinal Analítico. Em preto o traço da Falha de Água Quente e a posição dos perfis detalhados.....	45
Figura 4.12 - Perfis de deconvolução de Euler sobre dados magnetométricos de Amplitude do Sinal Analítico. Em preto o traço da Falha Dom Silvério e a posição dos perfis detalhados.....	46

Figura 4.13 - Superfície tridimensional dos contrastes gravimétricos obtida com as krigagens dos perfis bidimensionais das inversões..	48
Figura 4.14 - Superfície tridimensional dos contrastes magnetométricos obtida com as krigagens dos perfis bidimensionais das inversões..	50
Figura 4.15 - Superfície tridimensional dos contrastes magnetométricos obtida com as krigagens dos perfis bidimensionais das inversões..	52
Figura 4.16 -Representação da simbologia das faixas de concentração em mapas geoquímicos baseados em gráficos <i>box-plot</i>	54
Figura 4.17 -Distribuição espacial do Au em sedimentos de corrente ao longo da área de estudo.....	55
Figura 4.18 - Distribuição espacial do As em sedimentos de corrente ao longo da área de estudo.	56
Figura 4.19 - Distribuição espacial do Sb em sedimentos de corrente ao longo da área de estudo.....	56
Figura 5.1 – Mapa de anomalia Bouguer regional. Em destaque a anomalia negativa da serra do Caraça.	60
Figura 5.2 – Anomalia gravimétrica da porção central da área. Em destaque a Falha Dom Silvério.	60
Figura 5.3 -Anomalia gravimétrica da porção leste da área, com destaque para a Zona de Cisalhamento de Abre Campo.	61
Figura 5.4 – Integração dos dados geoquímicos ao mapa gravimétrico da anomalia Bouguer.....	61
Figura 5.5 – Lineamentos gravimétricos.....	62
Figura 5.6 – Mapa magnetométrico da Amplitude do Sinal Analítico.....	62
Figura 5.7 -Mapa magnetométrico evidenciando a região leste do Quadrilátero Ferrífero.	63
Figura 5.8 - Mapa magnetométrico evidenciando a região da Falha Dom Silvério.....	63
Figura 5.9 -Região da Zona de Cisalhamento de Abre Campo..	64
Figura 5.10 - Integração dos dados geoquímicos ao mapa magnetométrico ASA.....	64
Figura 5.11 - Lineamentos magnetométricos.	65
Figura 5.12 -Perfil gravimétrico posicionado na porção central da área, passando a norte do QFe.....	66
Figura 5.13 – Perfis gravimétricos evidenciando a anomalia negativa da serra do Caraça..	67
Figura 5.14 – Perfil gravimétrico localizado na porção sul da área, passando pela região central do QFe.	68
Figura 5.15 – Perfis magnetométricos que cruzam a Falha de Água Quente.	69
Figura 5.16 – Perfil magnetométrico na porção norte da FAQ evidenciando o alto estrutural na região da serra do Caraça.	70
Figura 5.17 – Perfis magnetométricos localizados na porção sul da falha.	71
Figura 5.18 – Perfis magnetométricos ao longo da Falha Dom Silvério.....	72
Figura 5.19 – Bloco tridimensional da área gerado a partir de dados de inversão gravimétrico, e a posição dos contrastes gravimétricos que representam as discontinuidades em superfície.	73
Figura 5.20 – Bloco tridimensional gravimétrico visto de baixo para cima.	74
Figura 5.21 -Visualização tridimensional da superfície da Falha de Água Quente.....	75
Figura 5.22 – Mapas magnetométricos ASA com a dispersão dos elementos obtidos dos dados geoquímicos de sedimento de corrente..	76
Figura 5.23 – Integração do mapa geológico de detalhe da Falha da Água Quente e da superfície da falha em profundidade.	77
Figura 5.24 - Visualização tridimensional da superfície da Falha Dom Silvério.....	78
Figura 5.25 – Visualização da continuidade das estruturas lado a lado em diferentes visadas, em relação à seção geológica proposta por Gomes (2018).	79

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Densidade das principais rochas e minerais.....	27
Tabela 3.2 - Filtros de Fourier e suas finalidades geofísicas.....	33
Tabela 3.3 - Relação entre índice estrutural e modelos físico e geológico.....	34
Tabela 4.1 - Parâmetros adotados para os perfis magnetométricos utilizados na deconvolução de Euler do modelo 3D da Falha de Água Quente.....	49
Tabela 4.2 - Parâmetros adotados para os perfis magnetométricos utilizados na deconvolução de Euler do modelo 3D da Falha Dom Silvério.....	51

Resumo

A Falha de Água Quente caracteriza-se como uma falha de cavalgamento de idade paleoproterozoica com transporte de massas dirigido de NNE para SSW justapondo rochas gnáissicas dos complexos Santa Bárbara e Mantiqueira sobre as unidades do Supergrupo Minas e se articula com a falha de descolamento basal da *Nappe* Ouro Preto denominada Zona de Cisalhamento São Vicente. O traço cartográfico aflorante da Falha de Água Quente corresponde à posição de mergulho original da falha, resultante da rotação rígida imposto à falha, devido a atuação do evento Brasileiro de vetor tectônico posicionado ortogonalmente ao vetor tectônico original de nucleação da Falha de Água Quente. O traço atual da falha possui direção N-S em sua maior extensão na borda leste do Quadrilátero Ferrífero (QFe), infletindo para W a partir da zona periclinal da anticlinal de Mariana e se estendendo até a região do Pico do Engenho, em Congonhas. O volume de rochas dos complexos metamórficos situados na capa da falha se encontra redobrado e estruturado em sinclinais e anticlinais de escala regional, com direção axial N-S e vergência para W. Através de modelagens geométricas de dobras levando-se em consideração a relação entre o comprimento de onda e a amplitude pode-se determinar a profundidade da superfície de descolamento basal. A aplicação de métodos geofísicos torna possível determinar a profundidade e a geometria da zona cisalhada e, conseqüentemente, entender como a falha pode estar influenciando e limitando o sistema de dobramento em profundidade. Para tanto, foram analisados qualitativamente os dados geofísicos magnetométricos obtidos em programas de aerolevantamentos e processados pelo geofísico da CPRM, Antonino Borges; e gravimétricos obtidos por satélite, na missão TOPEX/Poseidon, para a investigação da área em subsuperfície, em escala regional, assim como a resposta dos diferentes litotipos presentes e sua disposição na área. Posteriormente, a estruturação das porções próximas à falha foi caracterizada, gerando mapas de detalhe a fim de obter a disposição da falha em superfície. A análise quantitativa feita a partir da deconvolução de Euler dos dados magnetométricos e gravimétricos, seguida pela interpolação e integração geofísica-geológica, resultaram em um modelo 3D gravimétrico regional e dois modelos de detalhe das superfícies das falhas de Água Quente e Dom Silvério em profundidade. Com isso, foi possível determinar a geometria da falha em profundidade, assim como seu papel na deformação regional e sua conexão com a sutura de Abre Campo. A investigação foi realizada ao longo de uma geotransversal, de direção E-W, delimitado a leste pelo meridiano de Manhauçu e a oeste pelo meridiano de Moeda.

Palavras chave: geofísica, geologia estrutural, Falha de Água Quente, Quadrilátero Ferrífero.

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

No contexto da borda leste do Quadrilátero Ferrífero (QFe), Dorr (1969) descreve que a transição entre o terreno polideformado desta província mineral de unidades arqueanas (Supergrupo Rio das Velhas) e paleoproterozoicas (Supergrupo Minas) com os complexos metamórficos Santa Bárbara, de idade arqueana e Mantiqueira e Piedade, de idade paleoproterozoica, é delimitada pela Falha de Água Quente. A falha, com extensão de, aproximadamente, 70 km, justapõe as rochas gnáissicas dos complexos metamórficos sobre unidades do Supergrupo Minas e, por vezes, diretamente sobre o Supergrupo Rio das Velhas, onde os pacotes da capa da falha encontram-se redobrados em sinformes e antiformes apertados, de escala regional, de direção axial N-S e vergentes para W. Diversos estudos descrevem a Falha de Água Quente como delimitadora deste *front* de dobramentos (Endo 1988, 1997, Endo & Chemale Jr. 1992, Endo & Fonseca 1992, Endo & Alkmim 1992, Ferreira Filho 1999). Rossi (2014) atribui um transporte tectônico dirigido para sul à Falha de Água Quente, e a descreve como uma falha de cavalgamento. Os estudos mais recentes de Angeli (2015) e Madeira (2016) mostraram que a Falha de Água Quente compõe um sistema de falhas de empurrão, onde a Zona de Cisalhamento São Vicente é a descontinuidade basal do sistema de *nappes* Ouro Preto (*e.g.* Almeida *et al.* 2001, 2002, Almeida 2004). Sabe-se que o atual traço cartográfico aflorante da falha possui direção N-S, e vergência para W, porém a geometria e extensão desta falha em profundidade continuam desconhecidas.

O presente trabalho, portanto, será focado na caracterização da Falha de Água Quente, descrita por Maxwell (1972), de forma pioneira, onde mapeou, na escala de 1:25.000, as quadrículas de Santa Rita Durão, Capanema e Catas Altas.

Neste trabalho, pretende-se apresentar uma interpretação integrada geológica-geofísica, utilizando o banco de dados magnetométricos aerolevantados e processados pelo geofísico da CPRM, Antonino Borges, e gravimétricos obtidos por satélite, na missão Topex/Poseidon, para caracterizar a geometria e extensão da Falha de Água Quente em profundidade. Somado a isso, dados geoquímicos do Projeto de Mapeamento Geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu Entorno por Sedimentos de Corrente (Larizzatti *et al.* 2018) serão agregados ao modelo, a fim de caracterizar o controle mineral exercido pela estrutura na região. Além disso, espera-se relacionar esta geometria com a atual deformação do volume de rochas supracrustais e gnaisses constituintes dos complexos metamórficos, que se encontram redobrados e estruturados em anticlinais e sinclinais de escala regional, com direção axial N-S e vergência para W, localizados entre os distritos de Bento Rodrigues e Sem Peixe.

Os resultados aqui alcançados permitirão a ampliação do conhecimento sobre a Falha de Água Quente e proporcionarão um melhor entendimento do arcabouço estrutural do setor abrangido por este estudo.

1.2 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo encontra-se na região leste do Quadrilátero Ferrífero, MG. Esta área tem, aproximadamente, 8.000 km² e abrange duas folhas, na escala 1:500.000, mapeadas pela CPRM: SE-23 Belo Horizonte e SF-23 Rio de Janeiro. Limita-se pelos meridianos 43°46'' e 42° de longitude oeste e paralelos 19°53'' e 20°33'' de latitude sul, em UTM (SIRGAS 2000) a área é delimitada pelos pontos $X_{\min}, Y_{\min} = 626600/7734000$ e $X_{\max}, Y_{\max} = 812680/7798700$.

A região a ser estudada se inicia a cerca de 100 km da capital do estado, Belo Horizonte, e abrange uma área que vai desde o município de Ouro Preto até as proximidades de Manhuaçu (Figura 1.1). A principal via de acesso à área, saindo de Ouro Preto, é a partir da rodovia BR-356, em direção à Mariana, e em seguida pela MG-262, sentido à Ponte Nova. Após Ponte Nova, toma-se a MG-239, em direção à Rio Casca. Por fim, segue-se pela BR-262 sentido Manhuaçu. Além disso, várias estradas vicinais que interligam as localidades, distritos, vilas e fazendas da região, completam o sistema viário da área de estudo.

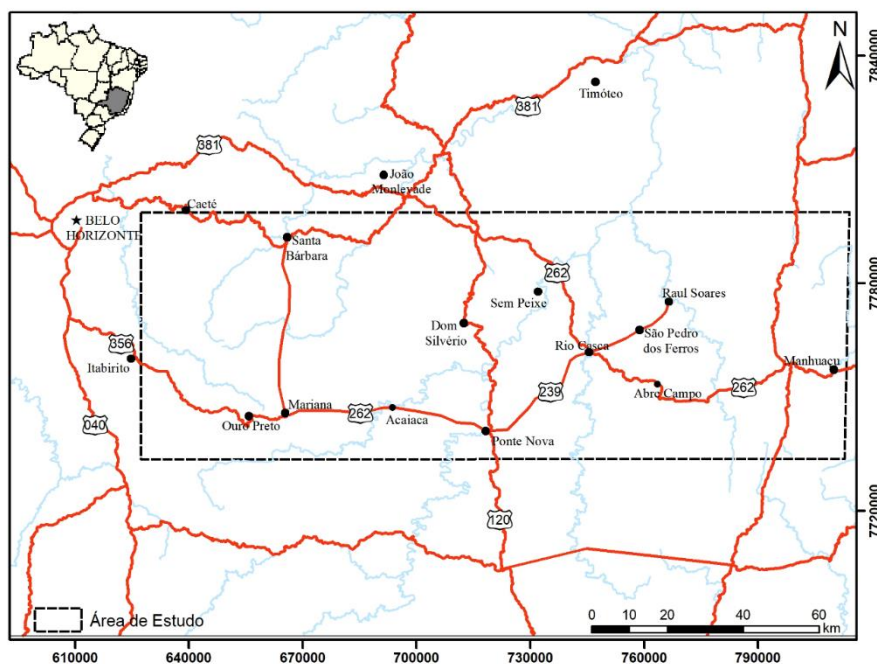


Figura 1.1 - Localização e vias de acesso da área de estudo. Fontes: estradas: DNIT; malha hidrográfica: ANA; localidades: IBGE. Dados integrados em ambiente SIG utilizando o software ArcGis.

1.3 OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivos principais:

- Determinar a geometria e extensão da Falha de Água Quente em profundidade;
- Relacionar a morfologia das estruturas em superfície com sua forma em subsuperfície;
- Investigar a possível conexão da Falha de Água Quente com a Falha Dom Silvério e a zona de sutura de Abre Campo;
- Relacionar a Falha de Água Quente com o controle da mineralização de ouro na região.

Além disso, serão confeccionadas imagens temáticas gravimétricas e magnetométricas para a localidade, com o objetivo de serem a base da análise geofísica qualitativa e quantitativa, a fim de contribuir para o aprimoramento do mapeamento geológico e compreensão do arcabouço estrutural da região.

1.4 JUSTIFICATIVA

Com sua alta complexidade geológica, a região do Quadrilátero Ferrífero ainda deixa dúvidas quanto sua evolução, estruturação e relação com as áreas adjacentes. Neste cenário, pouco se sabe sobre a verdadeira geometria da Falha de Água Quente em profundidade e seu papel no encurtamento Ediacarano da borda leste do QFe. Desta forma, o trabalho poderá contribuir para o entendimento da área neste âmbito, além de contribuir na compreensão da influência do sistema de falhas na estruturação regional.

Além disso, sabe-se que a Falha da Água Quente foi uma área com importantes depósitos de ouro tanto na zona da falha quanto em descontinuidades associadas, que foram exploradas em tempos coloniais. Neste sentido, caracterizando a continuidade da estrutura em profundidade e tendo em mãos dados geoquímicos para verificação das ocorrências atuais, pode-se mapear a continuidade de um possível corpo mineralizado, adicionando um contexto econômico ao trabalho.

Por fim, trata-se de uma proposta de uma nova abordagem, onde será incluída uma metodologia de investigação utilizando o método geofísico magnetométrico a fim de caracterizar estruturas em subsuperfície, interpretando sua profundidade, geometria e continuidade.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado conforme os itens descritos a seguir.

1.5.1 Revisão bibliográfica

Nesta etapa foram feitas pesquisas na bibliografia e compilação de dados. As principais bases de consulta bibliográfica foram: Alkmim *et al.* (1993), Endo (1997), Cunningham *et al.* (1998) e Ferreira Filho & Fonseca (2001) por possuírem os estudos mais abrangentes da geologia da área. Visando ainda o entendimento dos métodos a serem aplicados durante a realização da pesquisa, realizou-se a leitura de textos com temas relacionados à geofísica e geologia estrutural da área, assim como trabalhos aplicando metodologias semelhantes às utilizadas nesta monografia (Madeira, 2006). .

1.5.2 Levantamento de banco de dados

Utilizou-se, neste trabalho, para a parte da geofísica, o banco de dados aeromagnetométrico integrado do estado de Minas Gerais, compilado e processado pelo geofísico da CPRM, Antonino Juarez Borges. Nesta compilação foram usados como base os bancos de dados disponibilizados pela CODEMIG (Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais) áreas 1 a 21, os Projetos Itabira-Ferros e Rio das Velhas, do DNPM e o Projeto da ANP, na Bacia do São Francisco. A área deste trabalho abrange apenas as áreas 2, 3, 12, 15, Rio das Velhas e Itabira-Ferros (Figura 4.1). Para os estudos de gravimetria foi utilizado o banco de dados gravimétrico obtido por satélite, na missão TOPEX/Poseidon.

Os dados geoquímicos são provenientes do projeto do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, intitulado de Mapeamento Geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu Entorno por Sedimentos de Corrente (Larizzatti *et al.* 2018). Foram utilizados dados apenas da região de interesse, ou seja, próxima à Falha de Água Quente, e dos elementos ouro (Au), Arsênio (As) e Antimônio (Sb).

1.5.3 Análise qualitativa

A partir dos bancos de dados geofísicos, geraram-se vários mapas temáticos de cada método geofísico para a caracterização da área de estudo. Estes mapas foram produzidos a partir do *software* Oasis Montaj 8.4 do sistema GEOSOFT. Posteriormente foi utilizado o *software* ArcGis (versão 10.3), onde os mapas georreferenciados foram integrados aos dados geológicos em ambiente SIG, com vista à interpretação qualitativa dos dados.

Nesta etapa os dados geoquímicos também foram plotados em ambiente SIG, utilizando o *software* ArcGis 10.3, em mapas de distribuição de elementos para sedimentos de corrente foram elaborados utilizando o programa STATISTICA, versão 10, com objetivo de integrar a dispersão geoquímica dos mesmos às diversas unidades geológicas descritas na área em estudo, às anomalias geofísicas, e, ainda, às grandes estruturas da região.

1.5.4 Análise quantitativa

Com a utilização da versão livre do *software* Eulerph (versão 1.00), foi feita a deconvolução de Euler (2D) dos perfis magnetométricos, visando a interpretação quantitativa dos dados que, integrados aos dados geológicos, permitem visualizar, em profundidade, a geometria da Falha de Água Quente e estimar profundidades do topo das anomalias magnetométricas em perfis esquemáticos confeccionados no procedimento de integração. A partir da obtenção dos dados da deconvolução de Euler, foi possível, pelo método da krigagem, criar modelos 3D para a visualização das estruturas em profundidade.

Os dados geoquímicos foram tratados estatisticamente para gerarmos mapas com as dispersões das concentrações de cada elemento nas estações amostradas sobre os mapas geológico e geofísico da região em estudo e seus gráficos *box-plots*, que mostram quantitativamente quais são e onde estão as principais anomalias na área.

1.5.5 Integração geofísica-geológica

Posteriormente às análises qualitativas foi realizada a integração dos dados obtidos, a fim de obter a relação entre os métodos e interpretar as anomalias geofísicas e geoquímicas de acordo com as estruturas e litologias mapeadas na região.

Faversani, G. 2019. Geometria da Falha de Água Quente e Seu Papel na Zona Externa da Faixa Araçuaí...

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 CRÁTON SÃO FRANCISCO

Almeida (1977) define o cráton São Francisco (CSF) como uma grande unidade tectônica de embasamento consolidado ao término do Ciclo Brasileiro e limitado por frentes orogênicas neoproterozoicas, onde representa a parte litosférica poupada destes esforços. Almeida & Hasui (1984) definem o cráton São Francisco como um núcleo antigo rodeado por cinturões tectônicos proterozoicos essencialmente relacionados à orogenia Brasileira (~600 Ma), onde representa o antepaís da Placa Sanfranciscana (Figura 2.1).

A placa litosférica denominada de Sanfranciscana foi consolidada após a separação do supercontinente Rodínea, no Neoproterozoico. Em parte deste período, houve uma grande aglutinação de massas crustais em torno da placa, e ao final do Proterozoico e início do Cambriano, o fechamento das bacias em volta da Placa Sanfranciscana e a aproximação convergente destas massas continentais desencadeou um processo multicolisional, marcando o estágio final do Ciclo Brasileiro.

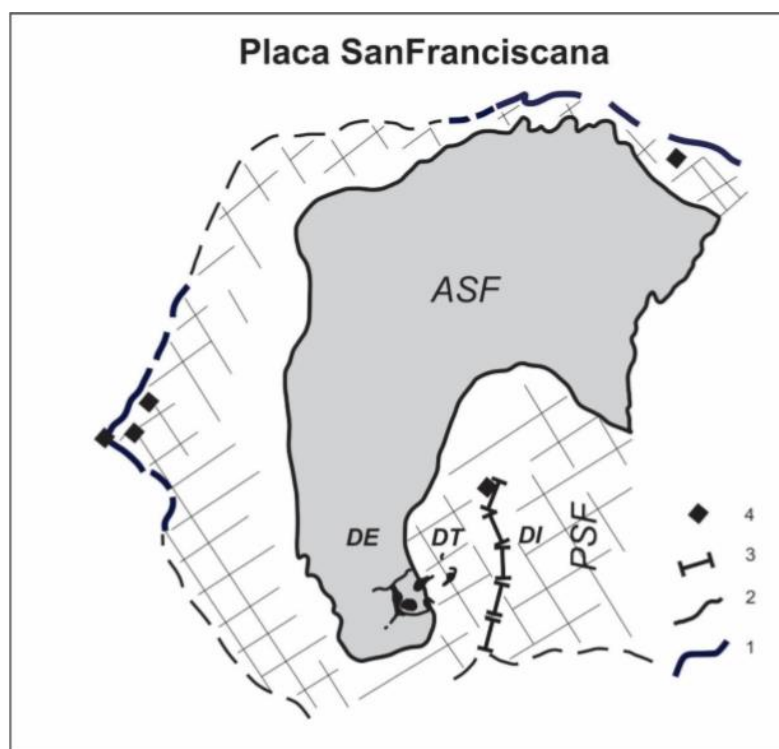


Figura 2.1 -Antepaís São Francisco (ASF), Pós-país São Francisco (PSF), domínio externo (DE), domínio transicional (DT), domínio interno (DI). 1. Zonas de suturas brasileiras; 2. Limite do antepaís São Francisco; 3. Limite do pós-país São Francisco; 4. Ocorrência de materiais juvenis brasileiros (mod. de Alkmim et al. 1993).

2.2 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES DA FAIXA ARAÇUAÍ

No fim do Ciclo Brasileiro, o estágio orogênico resultou na formação de um anel quase contínuo de faixas móveis que dirigiam vergência à área continental que funcionou com relativa estabilidade perante aos esforços, o Cráton São Francisco (Figura 2.2).

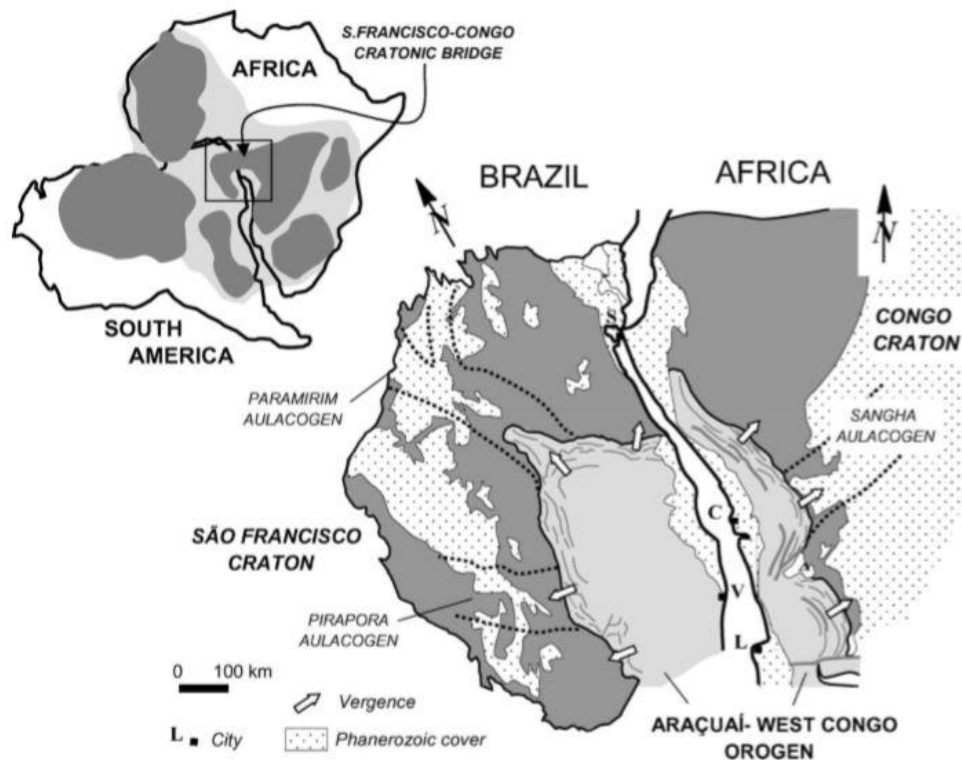


Figura 2.2 - O Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental e o Cráton São Francisco-Congo adjacente, no contexto do Supercontinente Gondwana. C = Cabinda; L = Luanda; S = Salvador; V = Vitória. (retirado de Alkmim *et al.* 2006).

Segundo Almeida (1977) o Cráton São Francisco é delimitado pelas seguintes Faixas: Sergipana, Riacho do Pontal, Rio Preto, Brasília, Araçuaí e Ribeira.

O Orógeno Araçuaí limita o Cráton São Francisco em sua porção sudeste (Uhlein 1991), e se estende até a margem continental brasileira (Figura 2.3). É interceptado pela Faixa Ribeira aproximadamente na Latitude 21°, onde, arbitrariamente, estabelece-se seu limite sul devido a uma inflexão das tendências estruturais, variando de NNE no Orógeno Araçuaí para NE na Faixa Ribeira (Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos 2000). Trabalhos recentes entendem as faixas Araçuaí e Ribeira como um sistema orogênico contínuo (Egydio-Silva *et al.* 2018).

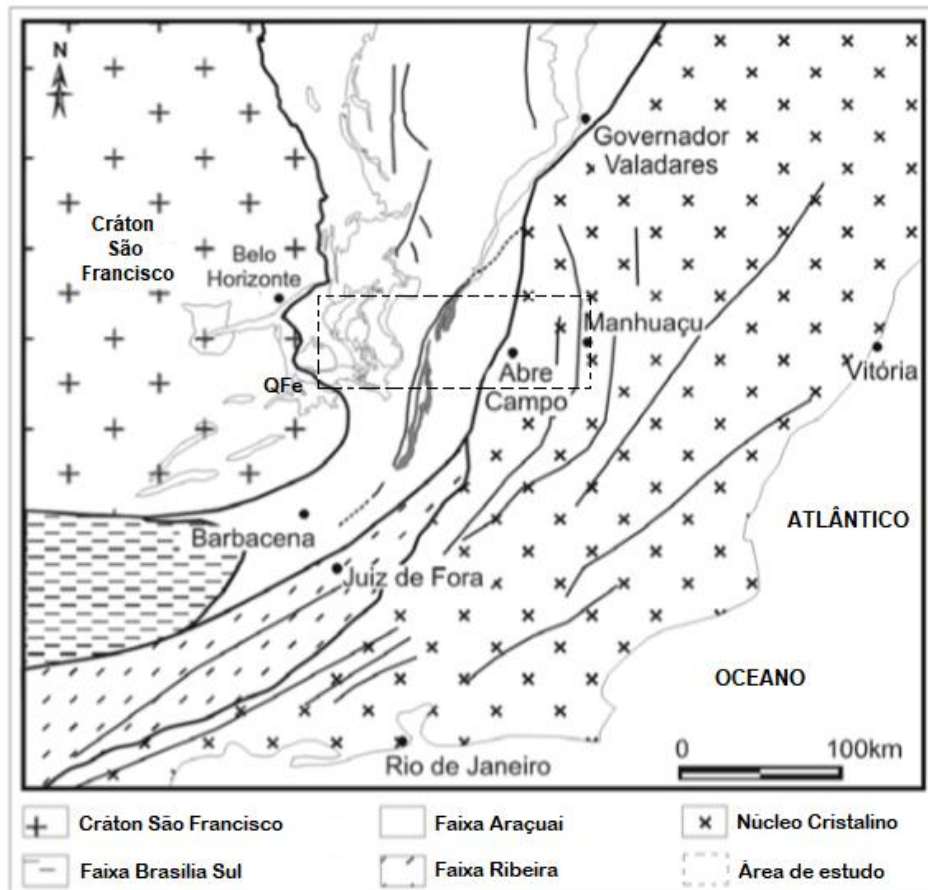


Figura 2.3 - Mapa geológico simplificado mostrando a localização das faixas Araçuaí e Ribeira em relação ao Núcleo Cristalino do Orógeno Araçuaí e ao Cráton São Francisco. Modificado de Peres *et al.* (2004).

2.3 LITOESTRATIGRAFIA

O presente estudo abrange uma grande área, que vai desde a borda leste do Cráton São Francisco, inserida no contexto do Quadrilátero Ferrífero, até a zona de sutura de Abre Campo, limite da Placa Sanfranciscana. Com isso, possui extenso registro geológico, desde o Arqueano até o recente. Além da coluna estratigráfica do QFe, a área contempla uma ampla faixa de Complexos Metamórficos que constituem o embasamento do Orógeno Araçuaí. Entre eles os complexos Santa Bárbara, Mantiqueira e Juiz de Fora.

2.3.1 Complexos cristalinos

A maior parte do embasamento da porção sul do Cráton São Francisco é constituída por diversos complexos metamórficos. Tais complexos são usualmente periféricos às supracrustais, e são constituídos predominantemente por gnaisses polideformados de composição tonalítica a granítica e subordinadamente por migmatitos, pegmatitos, granitos, granodioritos, anfibolitos, intrusões máficas e

ultramáficas (Herz 1970). Fazendo parte, também, do embasamento do Quadrilátero Ferrífero, estas rochas formam pequenos núcleos e maciços, por muitas vezes em forma dômica, envolvidos também por ortognaisses similares aos TTGs ou calcialcalinos mais jovens (mesoarqueanos e/ou neoarqueanos), o que denota eventos acrecionais sucessivos na edificação desses segmentos crustais mais antigos. As estruturas dômicas apresentam proeminente foliação de borda, enquanto os *greenstone belts* e os remanescentes de rochas supracrustais acumulam-se em quilhas (Alkmim & Marshak 1998 e Bizzi *et al.* 2003). Geralmente são denominados de maneira homônima com a localização de ocorrência, como Bação, Belo Horizonte, Caeté, Bonfim, Santa Rita e Santa Bárbara.

O embasamento do Orógeno Araçuaí evoluiu a partir da aglutinação de blocos crustais arqueanos durante o processo orogênico paleoproterozoico que se estendeu, aproximadamente, entre 2,2 e 2,0 Ga e retrabalhadas durante a Orogênese Brasileira (*e.g.* Figueiredo & Teixeira 1996, Alkmim & Marshak 1998, Noce *et al.* 1998, 2000).

Posicionado na porção oeste da área de estudo, próximo à borda do Cráton São Francisco, o Complexo Santa Bárbara é representado por gnaisses e migmatitos de composição tonalítica a trondhjemitica, meta-granitos, anfibolitos e meta-dioritos (Baltazar & Raposo 1993, Medeiros Jr. & Soares 2007). São cortados por diques máficos constituídos de gabros e diabásios. Os contatos destes complexos com as unidades subjacentes são, em geral, tectônicos. Um exemplo deste cenário é a área de estudo deste trabalho, onde o contato é marcado pelo Sistema de Falhas de Água Quente.

Como descrito por Peres *et al.* (2004), o Complexo Mantiqueira é composto por ortognaisses bandados, de idade arqueana e de composição granítica a toleítica, geralmente, apresentando matrizes protomiloníticas a miloníticas. O bandamento centimétrico a decimétrico com alternância de bandas félsicas e máficas é constantemente observado, e pode ser produto tanto dos processos de migmatização, quanto da diferenciação química durante o metamorfismo.

Estudos feitos por diversos autores, como Jordt-Evangelista & Müller (1986a, b) e Figueiredo & Teixeira (1996), concluíram que os gnaisses Mantiqueira foram deformados e recrystalizados em condições de fácies anfibolito.

O Complexo Mantiqueira tem sido englobado em mais de uma unidade litoestratigráfica. Desta forma, em função do autor, a mesma associação litológica pode ser parcial ou totalmente incluída no Gnaiss ou Complexo Piedade (Ebert 1958, Machado Filho *et al.* 1983, Silva *et al.* 2002) ou no Complexo Barbacena (Hasui & Oliveira 1984). A designação Complexo Mantiqueira deve-se à Brandalise (1991). Uma síntese atual sobre a evolução dos conhecimentos sobre esta unidade pode ser encontrada em Heilbron *et al.* (2003). As rochas deste complexo ocupam a porção central da área transicional entre o CSF e a zona de sutura de Abre Campo, abrangendo grande parte da área de estudo.

O Complexo Acaiaca, denominado por (Jord-Evangelista 1984, 1985, Jordt-Evangelista & Müller 1986a, b), abrange os municípios de Mariana, Acaiaca, Barra Longa e Diogo de Vasconcelos, seguindo um *trend* N-S se estendendo por 36 quilômetros e mantendo, aproximadamente, 6quilômetros de largura. As rochas do Complexo Acaiaca são, predominantemente granulitos, geralmente ladeados por rochas de fácies anfibolito do Complexo Mantiqueira. Os granulitos que possuem paragêneses de composição química indicativas de protólito ígneo foram classificados como granulitos félsicos, máficos e ultramáficos. Ainda são encontrados granulitos de protólito sedimentar pelítico, que são denominados granulitos aluminosos. Frequentemente os granulitos apresentam uma foliação milonítica paralela ao bandamento de direção NNE-SSW e mergulhos que variam de 35° para ESE até subverticalizados. As rochas em fácies anfibolito do Complexo Acaiaca foram geradas em um evento retrometamórfico posterior, provavelmente relacionado à exumação. Desta forma, parte dos granulitos foram submetidos a processos retrometamórficos de fácies anfibolito (*e.g.* Medeiros Jr. & Jord-Evangelista 2010).

O Complexo Piedade ocorre a oeste da Zona de Cisalhamento Abre Campo até seu limite oeste com o Grupo Dom Silvério. A nomenclatura Complexo Piedade é relativamente nova e ainda há divergências. As rochas do Complexo Piedade são similares às rochas do Complexo Mantiqueira, seu litotipo mais comum é o gnaiss bandado que apresentam porções quartzo feldspática alternando com porções máficas, ricas em biotita e/ou hornblenda. A alternância de bandas félsicas e máficas, com espessura centimétrica a decimétrica é uma característica marcante. A paragênese das bandas félsicas é representada por quartzo, plagioclásio, biotita, podendo ter ou não feldspato potássico, enquanto as bandas máficas são constituídas por anfibólio, plagioclásio, biotita, quartzo, granada, opacos, titanita, uma rocha típica de fácies anfibolito (*e.g.* Noce *et al.* 2006). Ocorre com frequência no Complexo Piedade corpos de anfibolito concordantes com a foliação/bandamento dos gnaisses, atingindo espessuras consideráveis e devido ao contraste de viscosidade, muitas vezes estão boudinados. O Complexo Piedade tem idade de cristalização de 2079 ± 11 Ma para os ortognaisses constituintes do complexo (Silva *et al.* 2002). Fischel (1998) obteve resultados de idades arqueanas para o complexo a partir de idades modelo (TDM).

O termo Complexo Juiz de Fora se refere originalmente à extensa faixa de rochas granulíticas com direção NE-SW, que aflora na região limítrofe entre os estados de Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro, próximo à zona de sutura de Abre Campo. Composto por ortognaisses de fácies granulito e característico por sua composição enderbítica, possui coloração verde escura e bandamento centimétrico com intercalações máficas. Segundo datações utilizando U-Pb, a idade de cristalização é algo entre 2134 e 2084 Ma (Noce *et al.* 2007a).

2.3.2 Sequências Vulcano-sedimentares

O Supergrupo Rio das Velhas é constituído por rochas metavulcânicas e metassedimentares que caracterizam o *greenstone belt* homônimo de idade arqueana (Schrunk & Souza Filho 1998). É composto, da base para o topo, pelos Grupos Quebra Ossos, Nova Lima e Maquiné (Dorr 1969, Schorscher 1978, 1979a e 1979b).

O Grupo Quebra-Ossos (Baltazar *et al.* 2005) é composto por associação de litofácies plutônicovulcânica, constituída por derrames e soleiras máficas e ultramáficas de fundo oceânico de composição toleítica e komatiítica, com intercalações de xistos, filitos carbonosos, turmalinitos e formações ferríferas bandadas.

O Grupo Nova Lima é dividido em três unidades (Ladeira 1980). A base é constituída de uma unidade metavulcânica, seguida de uma unidade metassedimentar química e, por fim, uma unidade metassedimentar clástica ao topo. Segundo Baltazar *et al.* (2005), o Grupo Nova Lima é composto principalmente por xisto verde metassedimentar e metavulcânico e filito com intercalações de quartzito, grauvaca, dolomito, talco xisto e formação ferrífera do tipo algoma. Sobrepe-se em discordância erosional, com níveis conglomeráticos na base, quartzitos maciços e sericíticos, sericita-quartzito-xistos, metaconglomerados oligo e polimíticos e filitos do Grupo Maquiné (Dorr 1969, Maxwell 1972, Endo 1997).

Definido por Dorr *et al.* (1957), o Grupo Maquiné foi dividido em duas formações: a unidade basal, Formação Palmital (O'Rourke 1957), é composta por quartzitos, por vezes sericíticos, quartzo-sericita xisto e xisto carbonoso subordinado, metagrauvaca e metargilito com estratificações cruzadas de pequeno a médio porte; e Formação Casa Forte (Gair 1962), topo da unidade, corresponde à associação de litofácies não-marinha, composta por rochas metassedimentares interpretadas como depósitos aluvial-fluviais de um sistema de rios entrelaçados (Zucchetti & Baltazar 2000, Baltazar & Zucchetti 2005).

2.3.3 Unidades Supracrustais Proterozoicas

As unidades supracrustais da área de estudo dizem respeito às sequências proterozoicas do Quadrilátero Ferrífero que compõe o Supergrupo Minas e pelo Grupo Rio Doce, que representa uma bacia orogênica relacionada ao Orógeno Araçuai e é correlato ao Grupo Andrelândia (Vieira 2007, Belém *et al.* 2011, Gradim 2012).

Supergrupo Minas

O Supergrupo Minas (Dorr 1969) é constituído, predominantemente, por sedimentos plataformais, representando uma sequência metassedimentar de idade paleoproterozoica (Schrunk

&Souza Filho 1998, Alkmim & Marshak 1998). É composto por filitos, xistos, quartzitos, dolomitos e itabiritos, assentados discordantemente sobre rochas do embasamento ou do Supergrupo Rio das Velhas. Para Endo (1997), as rochas do Supergrupo Minas foram sujeitas ao metamorfismo da fácies xisto-verde, atingindo a fácies anfibolito, nas porções leste, sudeste e nordeste do QFe. Dorr (*op cit.*) dividiu o Supergrupo Minas em quatro grupos (da base para o topo): Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará (Renger *et al.* 1994, Baltazar *et al.* 2005, Alkmim & Marshak *op cit.*).

O Grupo Caraça é composto por psamitos e conglomerados de deposição aluvial a deltaica da fase rifte que gradam para filitos carbonáticos, arenitos e pelitos de água marinha rasa (Rosière & Chemale 2000, Bekker *et al.* 2003). É subdividido em duas unidades: a Formação Moeda, basal, é composta por metaconglomerados, quartzitos e filitos; no topo tem-se a Formação Batatal, constituída por filitos, filitos grafitosos, metacherts e itabiritos (Endo 1997).

O Grupo Itabira foi formado por sedimentos típicos de ambiente marinho raso a profundo (Dorr 1969) e depositado concordantemente sobre o Grupo Caraça, em condições tectonicamente estáveis e de clima uniforme (Barbosa 1979). Também apresenta duas formações: Cauê, inferior, e Gandarela, superior. Segundo Endo (1997), a Formação Cauê compreende rochas como o itabirito, usualmente com laminação de quartzo e hematita, às vezes, de magnetita, quartzo e anfibólio, itabirito dolomítico e anfibolítico e pequenas lentes de xistos, filitos e marga. A Formação Gandarela sobrepõe a Formação Cauê e é composta essencialmente de filitos que, por vezes, se apresentam dolomíticos, dolomito ferruginoso e marga. Segundo Pires (1995), dolomitos e itabiritos intercalam-se verticalmente e lateralmente, com contatos litológicos bruscos, não havendo, portanto, uma nítida separação entre as duas formações supracitadas.

Dorr (1969) definiu o Grupo Piracicaba como sedimentos que foram depositados durante transgressões e regressões marinhas, num ambiente tipicamente deltaico e marinho de água rasa, sobrepondo o Grupo Itabira através de um contato estrutural geralmente concordante e localmente erosional discordante. Quatro formações compõem o Grupo Piracicaba. Segundo Endo (1997), a unidade basal, Formação Cercadinho, é composta de quartzitos, quartzitos ferruginosos, filitos ferruginosos, filitos prateados, filitos dolomíticos e dolomitos. A Formação Fecho do Funil é constituída por filitos dolomíticos, filitos e dolomitos impuros. Na sequência, a Formação Taboões consiste essencialmente de ortoquartzitos finos e equigranulares. Por fim, ao topo, a Formação Barreiro é composta, predominantemente, de filitos e filitos grafitosos.

O Grupo Sabará foi originalmente definido por Dorr (1969) como Formação Sabará, representando o topo do Grupo Piracicaba. Renger *et al.* (1994) foram responsáveis pela redefinição da unidade para Grupo Sabará. Caracteriza-se pela presença de pelitos, grauvas, conglomerados, quartzitos, filitos grafitoso, tufitos, rochas vulcânicas máficas e ácidas (Costa 1961, Barbosa 1968, Dorr 1969, Ferrari 1981) e por lâminas lenticulares de formações-ferríferas bandadas (Klein e

Ladeira2000) e arenitos ferruginosos (Bekker *et al.* 2003). A idade de deposição do Grupo Sabará encontra-se no intervalo de 2145 a 2045 Ma (Machado & Noce 1993). O grupo se separa das demais sequências do Supergrupo Minas através de uma discordância regional.

Segundo Alkmim *et al.* (1994), o Grupo Itacolomi pode ser considerado uma fácies marginal do Supergrupo Minas. É composto por xistos, conglomerados, arcóseos, quartzitos, quartzitos arcoseanos e quartzitos filíticos, caracterizando-se por uma sequência típica de bacia molássica orogenética que recobre a sequência do Supergrupo Minas, principalmente na parte sul do QFe.

O Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi foram deformados e metamorfisados nas fácies xisto verde baixa à anfibolito baixo (Herz 1978).

Grupo Rio Doce

O Grupo Rio Doce inclui parte da seção supracrustal, vulcano-sedimentar, do arco magmático do Orógeno Araçuaí e, também, de bacias proximais das zonas de antearco e retroarco (Vieira 2007, Pedrosa Soares *et al.* 2011). Segundo Vieira (*op cit.*), o metamorfismo do Grupo Rio Doce é da fácies anfibolito médio. Vieira *et al.* (2004, 2006), subdividiram o Grupo Rio Doce nas formações Palmital do Sul e Tumiritinga como inferiores, representadas por micaxisto, gnaiss e rochas vulcanoclásticas; superpostas pela Formação São Tomé, constituída por metagrauvaca, micaxisto e metadacito; e a Formação João Pinto no topo, composta, essencialmente, por quartzitos.

Supergrupo Espinhaço

A Serra do Espinhaço é uma cadeia de montanhas composta, majoritariamente, de rochas quartzíticas do Supergrupo Espinhaço. Estende-se por 1200 km, desde a porção central do estado de Minas Gerais, até o norte da Bahia.

A Serra do Espinhaço é dividida em dois setores: Meridional e Setentrional. Foram segmentadas ainda na fase inicial de rifteamento através de um importante sistema de falhas de transferência de movimento transformante com direção NE (Nelson *et al.* 1992). A parte Meridional representa uma faixa orogênica que limita o sudeste do Cráton do São Francisco e estende-se por cerca de 300 Km na direção N-S, desde o Quadrilátero Ferrífero até a região de Olhos d'Água (Figura 2.4). Tornou-se um importante alvo de estudos geológicos após a descoberta dos depósitos diamantíferos no início do século XVIII próximos a cidade de Diamantina, em Minas Gerais.

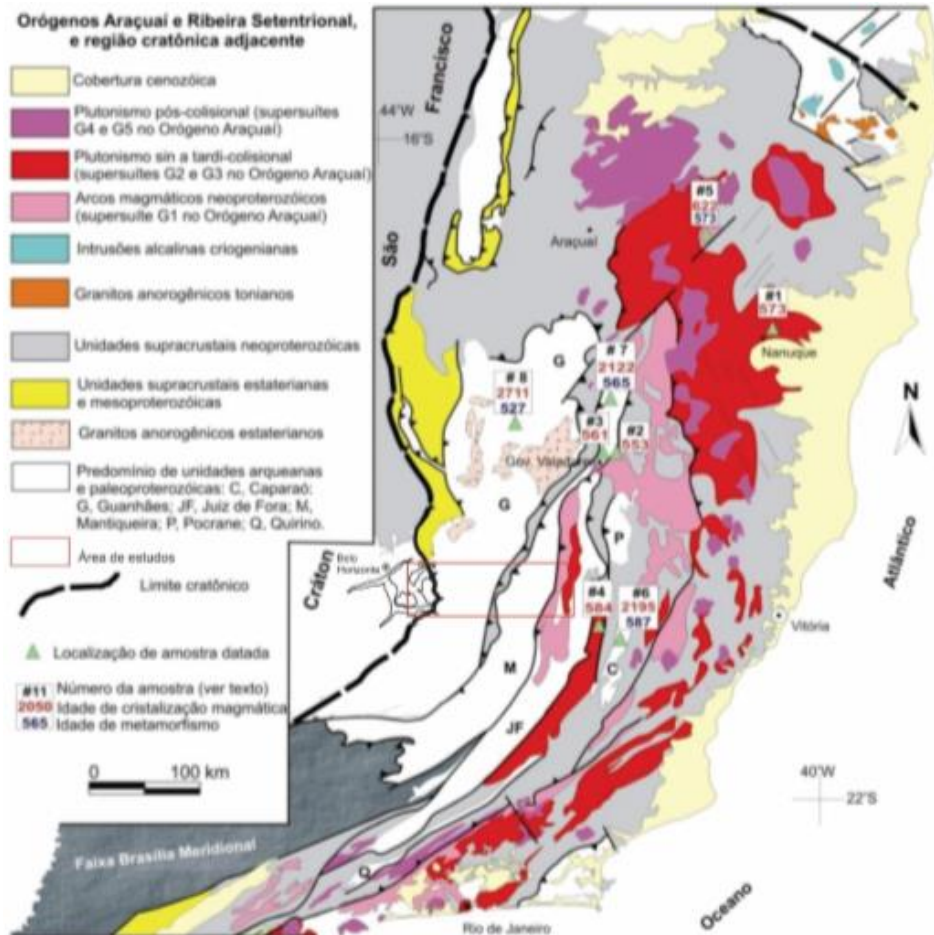


Figura 2.4 - Mapa de localização dos Orógenos Araçuaí e Ribeira (mod. de Silva *et al.* 2007).

As características estratigráficas do Setor Meridional da Serra do Espinhaço foram descritas, em sua maior parte, por Pflug (1968) e Schöll & Fogaça (1979), com modificações propostas por Fogaça *et al.* (1984), Dossin *et al.* (1984) e Almeida Abreu (1993). Assim, podem ser reconhecidas sequências rochosas com idades entre o Arqueano e o Neoproterozoico, mas com especial predominância daquelas de idades Paleo- a Mesoproterozoicas relacionadas ao chamado Supergrupo Espinhaço. Segundo Brito-Neves *et al.* (1995), o Supergrupo Espinhaço se desenvolveu em um ambiente de rifteamento no Estateriano.

A estratigrafia básica da Serra do Espinhaço foi elaborada por Pflug (1968), onde foram definidas oito formações para a sequência do Espinhaço na região de Diamantina. Torquato & Fogaça (1981) propuseram a exclusão da Formação Rio Pardo Grande do topo da sequência de Pflug (*op cit.*) e inclusão no Grupo Macaúbas. Segundo Almeida Abreu & Pflug (1994), o Supergrupo Espinhaço divide-se em dois grupos: Guinda na base e Conselheiro Mata no topo. A unidade basal é representada por quatro formações de caráter sin-rifte, constituídas geralmente por arenitos, filitos e metaconglomerados, apresentando intercalações de rochas metavulcânicas. O Grupo Conselheiro Mata

é composto por cinco unidades que representam metassedimentos marinhos e fluviais, como conglomerados, arenitos, pelitos e carbonatos.

Grupo Dom Silvério

O Grupo Dom Silvério ocorre em um cinturão de direção NNE-SSW e consiste em um espesso pacote de rochas metapelíticas com intercalações de quartzitos, anfibolitos, rochas meta-ultramáficas, formações ferríferas bandadas e mármore (Peres *et al.* 2004), sendo que a rocha mais comum é biotita xisto (*e.g.* Jordt-Evangelista *et al.* 2000). Tem aproximadamente 10 km de largura e 150 km de comprimento, estendendo-se entre os paralelos dos municípios de Ipatinga ao norte e Viçosa a sul. As rochas do Grupo Dom Silvério ocorrem sobrepostas ao Complexo Mantiqueira, marcadas por contato abrupto.

2.3.4 Rochas Granitoides

De acordo com Baltazar & Raposo (1993), os granitoides geralmente são corpos alongados segundo a direção norte-sul que frequentemente estão associados aos gnaisses bandados do Complexo Mantiqueira. Ainda no trabalho de Baltazar & Raposo (*op cit.*), os autores relatam que os litotipos encontram-se frequentemente deformados em distintas intensidades por processo de milonitização. De acordo com os autores, o Granitoide Córrego Taioba tem composição que varia de granítica a tonalítica, representado por um corpo alongado heterogêneo posicionado no interior dos gnaisses do Complexo Mantiqueira, e possui em seu núcleo rochas granulíticas do Complexo Acaiaca. O Granitoide Diogo de Vasconcelos representa um corpo alongado de direção NE-SW composto, majoritariamente, por ortognaisses com biotita. O Granito Barra Longa é predominantemente quartzo-feldspático, e apresenta uma foliação milonítica bem desenvolvida. São observadas intrusões de corpos tabulares concordantes e diques de composição intermediária.

2.3.5 Coberturas recentes

As coberturas recentes são formadas por aluviões, colúvios, e por mantos intempéricos, como cangas e laterita. Destaca-se na bacia em estudo a presença de cangas bastante porosas, resistentes à erosão, que ocorrem em meio a sedimentos inconsolidados, em itabiritos, mas também em outras rochas, de forma menos comum (Alkmim *et al.* 1994).

2.4 ARCABOUÇO ESTRUTURAL

O Orógeno Araçuai pode ser subdividido em nove domínios estruturais no território brasileiro (Figura 2.4) de acordo com Alkmim *et al.* (2006, 2007), que foram separados segundo sua orientação espacial, significado cinemático e história da nucleação das estruturas dominantes. São eles: 1) o Cinturão de Cavalgamentos da Serra do Espinhaço Meridional; 2) a Zona de Cisalhamento da Chapada Acauã; 3) a Zona de Dobramentos de Salinas; 4) o Corredor Transpressivo de Minas Novas; 5) a Saliência do Rio Pardo e sua zona de interação com o Aulacógeno do Paramirim; 6) o Bloco de Guanhões; 7) a Falha Dom Silvério e estruturas associadas; 8) a Zona de Cisalhamento de Itapebi e estruturas associadas; e 9) o Núcleo Cristalino (zona interna de alto grau metamórfico que representa o núcleo do orógeno).

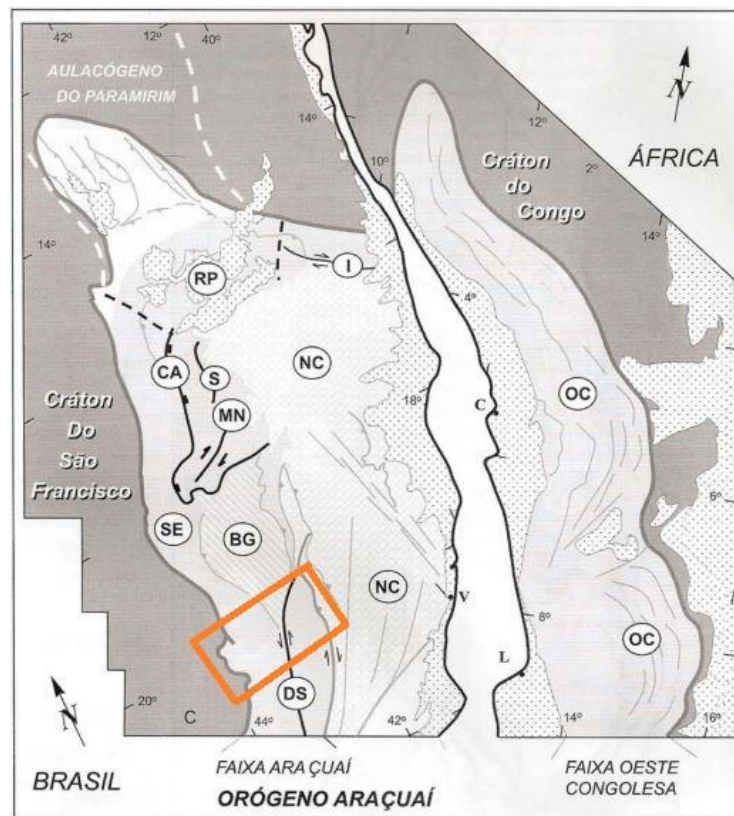


Figura 2.5 - Compartimentos tectônicos do Orógeno Araçuai: SE = Cinturão de Cavalgamentos da Serra do Espinhaço Meridional; CA = Zona de Cisalhamento da Chapada Acauã; S = Zona de Dobramentos de Salinas; MN = Corredor Transpressivo de Minas Novas; RP = Saliência do Rio Pardo e sua zona de interação com o Aulacógeno do Paramirim; BG = Bloco de Guanhões; DS = Falha Dom Silvério e estruturas associadas; I = Zona de Cisalhamento de Itapebi e estruturas associadas; e NC = Núcleo Cristalino (Alkmim *et al.* 2006, 2007). Em destaque a área de estudo.

Neste trabalho serão abordados o Cinturão de Cavalgamentos da Serra do Espinhaço Meridional, a Falha Dom Silvério e, por fim, o núcleo cristalino.

Na borda leste do Cráton do São Francisco se situa o Cinturão de Cavalgamentos da Serra do Espinhaço Meridional. Com cerca de 700 km de extensão e direção geral N-S, sua vergência é

sistematicamente dirigida para o cráton e está controlado por falhas de empurrão e dobramentos orientados preferencialmente na direção N-S, refletindo em um encurtamento geral E-W.

Localizada na porção central da área de estudo, a Falha Dom Silvério (Endo 1997) é uma transcorrência sinistral gerada no paleoproterozoico, durante o evento Transamazônico, e posteriormente reativada durante a orogênese brasileira. Possui traço N-S nos seus setores sul e central, infletindo para NNE-SSW a norte, onde é truncada pela Zona de Cisalhamento de Abre Campo, que marca o limite oeste do núcleo cristalino (Peres *et al.* 2004). O movimento registrado dentro da Falha Dom Silvério é uma transcorrência sinistral, bordejada por domínios caracterizados por uma foliação de baixo ângulo em associação com uma lineação mineral posicionada na direção N-S, que refletem, em conjunto um transporte geral para norte, relativa à fase de deformação mais antiga até agora identificada no orógeno (Teixeira-Silva 2010).

No extremo leste da área de estudo aflora o Núcleo Cristalino, que corresponde à porção de maior grau metamórfico, atingindo as condições das fácies anfibolito alto e granulito. Dentre as unidades envolvidas neste setor tem-se o Complexo Juiz de Fora, que faz parte do embasamento paleoproterozoico do orógeno, em contato com as rochas metavulcânicas e metassedimentares mais jovens que 630 Ma do Grupo Rio Doce e complexos paragnáissicos, bem como as suítes graníticas pré, sin e pós-colisionais (supersuítes G1 a G5; Noce *et al.* 2004, Pedrosa-Soares *et al.* 2007, 2008, Vieira 2007, Alkmim *et al.* 2007). O Núcleo Cristalino contém as quatro grandes zonas de cisalhamento dextrais: Abre Campo, Manhauçu, Guaçuí e Batatal (Campos-Neto & Figueiredo 1995, Fischel *et al.* 1998, Cunningham *et al.* 1996, 1998, Peres *et al.* 2004).

2.5 EVOLUÇÃO TECTÔNICA

O Orógeno Araçuai-Congo Ocidental é um cinturão de dobramentos e cavalgamentos neoproterozoico cuja evolução geológica e tectônica segue um modelo com cinco estágios principais: 1) abertura da bacia precursora Macaúbas; 2) convergência inicial resultando no fechamento da bacia Macaúbas; 3) estágio colisional; 4) escapes laterais na porção sul; e 5) colapso gravitacional (Alkmim *et al.* 2006).

A bacia Macaúbas resultou de um evento extensional que ocorreu por volta de 750 Ma e durou por, aproximadamente, 100 Ma. A extensão progressiva foi capaz de gerar um mar restrito em sua porção sul (Figura 2.5), criando um grande golfo parcialmente assoalhado por crosta Oceânica (Pedrosa-Soares *et al.* 2001, 2007) que, segundo Queiroga *et al.* (2007), é representada pelo ofiolito de Ribeirão da Folha, datado em 660 Ma. Durante a evolução deste estágio desenvolveu-se duas margens passivas conectadas pelo que viria ser a ponte cratônica Bahia-Gabão (Porada 1989). Segundo Alkmim *et al.* (2007), as margens passivas hospedariam todas as unidades hoje encontradas nas faixas

Araçuaí e Oeste-Congolesa. Este mesmo evento foi responsável por reativar o sistema rifte do Espinhaço.

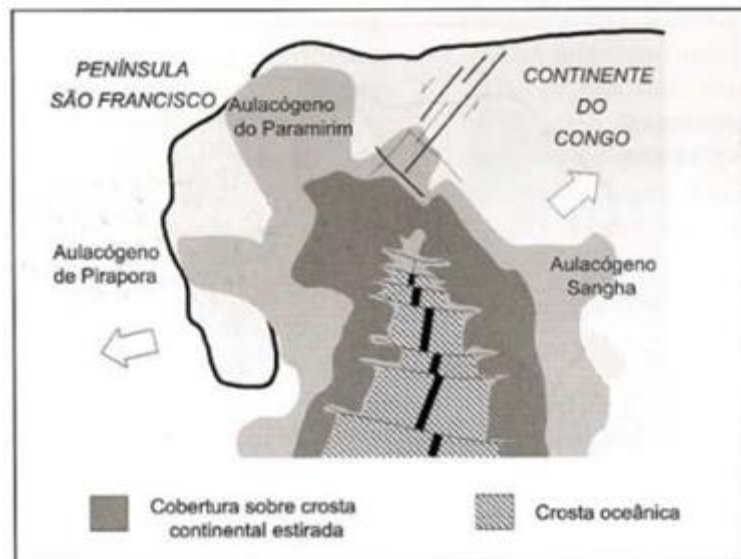


Figura 2.6 - Abertura da bacia Macaúbas, em forma de golfo e com geração de assoalho oceânico em sua porção sul (Alkmim *et al.* 2007).

Com o fim dos eventos tafrogênicos, iniciou-se, por volta de 630 Ma (Seer *et al.* 2001, Valeriano *et al.* 2004), o fechamento da bacia Macaúbas, que marcou o início da orogênese Brasileira. Alkmim *et al.* (2006) atribuem a convergência das margens passivas opostas do rifte Macaúbas às colisões envolvendo a península São Francisco e a placa Paraná/Rio de La Plata. De acordo com os autores, os crátons do São Francisco e do Congo se aproximaram por rotações no sentido anti-horário, seguindo o modelo do quebra nozes (Figura 2.6), comprimindo a bacia e levando ao consumo da sua litosfera oceânica. Segundo Pedrosa-Soares *et al.* (2001) e Silva *et al.* (2005), por volta de 630 Ma já se tinha produção de tonalitos do arco magmático cálcio-alcálico, relacionado a subducção (Pedrosa-Soares *et al.* 2011).

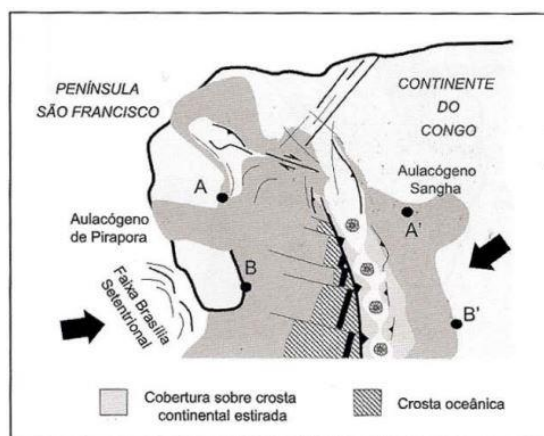


Figura 2.7 - Ilustração da fase de convergência inicial das margens da bacia Macaúbas. Início da operação da tectônica do quebra-nozes, com consumo do assoalho da porção oceânica da bacia (Alkmim *et al.* 2006, 2007).

A fase colisional principal da orogênese Brasileira se deu no intervalo compreendido entre 590 e 545Ma, promovendo a propagação de frentes de empurrão em direção aos crátons assim como o desenvolvimento da cadeia montanhosa (Figura 2.7) (Pedrosa-Soares *et al.* 2001, 2007). Esta fase iniciou-se pelo norte e avançou progressivamente para sul.

Em um estágio avançado da fase colisional (545–530 Ma), conforme o sistema avançava, o espaço para a acomodação das massas diminuía. Alkmim *et al.* (2006) sugerem que para acomodar este acúmulo de massas, a porção sul do orógeno sucumbiu à escapes laterais, documentados pelas grandes zonas transcorrentes dextrais de direção NE-SW existentes na região. Essa movimentação dextral ao longo destas zonas implica em escape de material em direção a sul devido à aproximação máxima entre a parte sul da península São Francisco e a margem do continente do Gongo, obedecendo ao caminho de fechamento do quebra-nozes (Alkmim *et al.* 2007).

O colapso gravitacional dá-se em orógenos com altas espessuras litosféricas, traduzidas por grandes elevações e alto potencial gravitacional, devido ao regime distensional causado pelo seu próprio peso (Dewey 1988, Malavielle 1993). No caso do Orógeno Araçuai, o grande espessamento na porção norte ocasiona a sobrecarga na crosta aquecida e de baixa resistência, o que pode ter causado o fluxo lateral da sua porção basal e abatimento das porções superiores, condicionado por zonas de cisalhamento normais. Segundo Alkmim *et al.* (2006), estes sistemas de falha normais contribuíram para a exumação da porção central do embasamento. Além disso, os autores sugerem que o colapso culminou em uma extensa atividade ígnea, devido a descompressão e fusão parcial dos níveis crustais rasos, produzindo suítes graníticas entre 530 e 480 Ma.

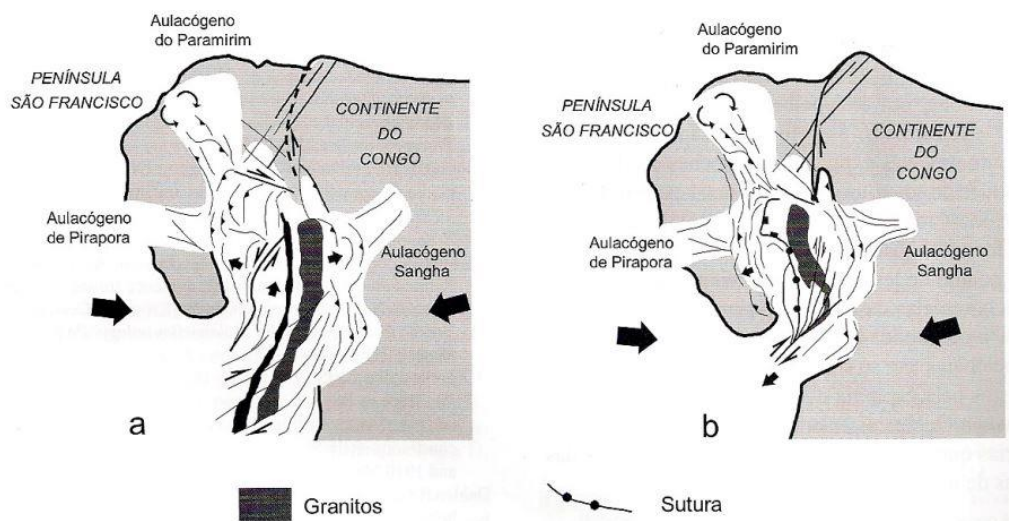


Figura 2.8 - Esquemas ilustrativos: a) estágio colisional; e b) colapso gravitacional (Alkmim *et al.* 2006).

2.6 FALHA DE ÁGUA QUENTE

A Falha de Água Quente possui traço que pode ser cartografado desde o município de Mariana até Santa Bárbara, passando por Camargos, Bento Rodrigues, Santa Rita Durão, Morro da Água Quente e Catas Altas, com direção geral norte-sul.

Situa-se na borda leste do QFe, no limite entre o cráton São Francisco e o Orógeno Araçuaí, compartimento cuja organização estrutural e estilo deformacional enquadram-se em um cinturão de dobramentos e cavalgamentos (*e.g.* Marshak & Alkmim 1989, Chemale Jr. *et al.* 1991, Endo & Fonseca 1992, Alkmim & Marshak 1998).

Dorr (1969) caracterizou a Falha da Água Quente como a extensão norte do Sistema de Falhas Dom Bosco, que coloca por sobre rochas do Grupo Itacolomi, sequências atribuídas ao Supergrupo Rio das Velhas. Em sua porção norte sobrepõe o embasamento Complexo Santa Bárbara, a leste, às rochas supracrustais a oeste (*e.g.* Dorr 1969, Maxwell 1972, Alves 1991). De acordo com o autor, a falha se estende por mais de 50 km na direção norte-sul e possui muitas ramificações que se subdividem e se conectam novamente à falha mestra.

O sistema é formado por dobras e falhas, tendo estas traços N-S sinuosos, que possuem continuidade pela serra do Caraça (Ribeiro-Rodrigues 1992). A vergência do sistema é para oeste e o ângulo de mergulho das falhas aumenta de sul para norte.

A falha mais a leste do sistema, Falha da Água Quente (Maxwell 1972), tem por característica estrutural sobrepor o Complexo Santa Bárbara, a leste, às rochas do Supergrupo Minas no QFe, a oeste.

Segundo Endo & Fonseca (1992), o Sistema de Cisalhamento Fundão-Cambotas (SCFC) representa o “front” de empurrões e dobramentos de um cinturão colisional que envolve a borda leste do QFe, compreendendo, além da descontinuidade mestra basal, definida pelas Falhas Fundão Cambotas, as diversas escamas imbricadas, entres elas, a Falha Água Quente (*e.g.* Endo 1988).

Ferreira Filho (1999) caracterizou o Sistema de Falhas Água Quente como sendo composto por inúmeras falhas de empurrão, relacionadas a uma tectônica contracional de forte expressão, que ocorrem na borda leste do Quadrilátero Ferrífero. Esta arquitetura foi desenvolvida pela superposição de fases deformacionais correlacionados às orogêneses Transamazônica e Brasileira. A cinemática desta falha varia longitudinalmente, caracterizando o fenômeno de partição da deformação. A norte e a sul, apresenta estilo geométrico e cinemático característicos de uma estrutura de rampa oblíqua sinistral ao passo que na porção central apresenta características de rampa frontal. Esse mesmo autor compartimentou o Sistema de Falhas Água Quente em 4 domínios, diferenciados pelas relações geométricas e estruturais. O Domínio Norte tem traços do falhamento de direção NNW. Os itabiritos presentes nesse domínio mostram dobras isoclinais verticais, com eixos no rumo SE, paralelos a

lineação mineral. Essas dobras mostram padrão “sanfonado”, retratando uma compressão junto a um anteparo. Essa geometriacaracteriza o norte da área como um regime de falhamento reverso sinistral. O Domínio Central tem estruturas com direção NS, com a xistosidade subvertical e hospedando a lineação mineral na posição de maior declividade, caracteriza-se como um regime de falhamento frontal de alto ângulo. O Domínio Centro-Sul possui estruturas com direções NW-SE, N-S e NE-SW, lineação mineral e *mullions* de dobras caindo para E-NE, condizendo com movimentos reversos dextrais. O Domínio Sul apresenta falhas de menor ângulo, (falhas de empurrão), com direção geral N-NW, com lineação mineral oblíqua, revelando movimentos frontais e com rampas laterais sinistrais.

Ferreira Filho & Fonseca (2001) definem o Sistema de Falhas Água Quente como um conjunto de falhas reversas e de empurrão, que está postado na borda leste do Quadrilátero Ferrífero. Os autores reforçam a ideia de que a Falha da Água Quente, posicionada mais a leste do sistema homônimo, exhibe aspectos de particionamento de deformação em regime dominante de constrição, em decorrência da colisão com obstáculos no antepaís, principalmente o maciço do Caraça.

Rossi (2014), descreve a FAQ com uma falha de cavalgamento com transporte tectônico do tipo *thick-skinned* dirigido para sul, sobrepondo as rochas cristalinas do Complexo Metamórfico Santa Bárbara por sobre unidades metavulcânicas e metassedimentares arqueanas e paleoproterozoicas do QFe.

A importância geotectônica do Sistema de Falhas Água Quente como condicionante estrutural da região limítrofe do Cráton São Francisco (Ferreira Filho & Fonseca 2001) confirma a inserção do Quadrilátero Ferrífero nesta entidade tectônica, assim como proposto por Almeida (1977), e entendendo a região do QFe como embasamento da borda cratônica, que foi retrabalhado no Brasiliano (*e.g* Ferreira Filho 1999).

O Sistema de Falhas Água Quente apresenta, ao longo do traço da falha homônima, importantes mineralizações de ouro, tanto em veios de quartzo como em formações ferríferas do tipo jacutinga. Estas ocorrências foram muito exploradas em tempos coloniais, sendo as principais a Mina Del Rey, situada a sul do sistema próxima a cidade de Mariana e a antiga Mina da Cata Preta, localizada no segmento central do sistema, no distrito de Santa Rita Durão, Mariana-MG (*e.g*. Ferreira Filho & Fonseca 2001).

CAPÍTULO 3

MÉTODOS GEOFÍSICOS

3.1 INTRODUÇÃO

O estudo das rochas que ocorrem na superfície, bem como de suas relações no espaço e no tempo é de fundamental importância para a compreensão das rochas de subsuperfície. Sabe-se que, por menores que sejam, as rochas diferem uma das outras em uma ou mais de suas propriedades, provocando variações nos campos físicos e na propagação de ondas que atuam sobre elas. Consequentemente, essas variações podem fornecer informações acerca dos materiais que a provocaram (Luiz & Silva 1995). Desta forma, é possível aplicarmétodos geofísicos em trabalhos geológicos como ferramenta para as investigações ao objeto de interesse e seus arredores de forma rápida e barata.

Os levantamentos geofísicos, embora algumas vezes passíveis de ambiguidades ou incertezas na interpretação, proporcionam um meio relativamente rápido e barato de se obter informações distribuídas em área da geologia de subsuperfície (Kearey *et al.* 2009).

Os métodos geofísicos utilizados neste trabalho fazem uso dos campos naturais da Terra, sendo eles o gravimétrico e o magnetométrico. Localizando as variações nos campos naturais esperados, poderemos inferir as causas por feições geológicas em profundidade.

3.2 GRAVIMETRIA

3.2.1 Introdução

No método gravimétrico, a geologia em subsuperfície é investigada com base nas variações no campo gravitacional da Terra, causadas pelas diferenças de densidade entre as rochas. Estas variações, mesmo que pequenas, podem ser medidas, permitindo deduções e interpretações de suas causas, atribuídas às estruturas geológicas ou depósitos de minérios.

Materiais mais densos contribuem mais fortemente para o campo gravitacional do que os menos densos, quando se considera o mesmo volume e a mesma profundidade para ambos os tipos de materiais; se os materiais apresentam a mesma densidade, a contribuição maior é daqueles mais próximos da superfície, se eles ocupam igual volume, ou, se os materiais ocorrem à mesma profundidade, daqueles que perfazem o maior volume (Luiz & Silva 1995).

3.2.2 O campo gravitacional terrestre

Sabe-se que a Terra não tem a forma de uma esfera perfeitamente homogênea, assim como a aceleração gravitacional não é constante por toda a superfície terrestre. Esta premissa baseia o estudo da verdadeira forma do planeta.

De acordo com Telford *et al.* (1990), a magnitude da gravidade da Terra depende de cinco fatores: latitude, elevação, topografia do terreno, marés e variações de densidade em subsuperfície. O método geofísico em questão faz uso das anomalias causadas devido ao último fator.

A forma da Terra, medida por métodos geodésicos e com o auxílio de rastreamento por satélite, é esferoidal, arredondada no equador e achatada nos polos.

Para quantificar as anomalias, um esferoide de referência foi determinado. Uma figura geométrica, com formato elipsoide oblato, se aproxima com o nível médio do mar (geoide), onde removeu-se os excessos de massa das montanhas e preencheu-se as profundidades oceânicas, fazendo com que a atração gravitacional em qualquer parte da figura seja perpendicular à sua superfície.

Em 1930 a União Internacional de Geodésia e Geofísica adotou uma fórmula para valores teóricos da gravidade (g_0), mas esta foi substituída pelo Sistema Geodésico de Referência de 1967 (GRS67) que posteriormente foi substituído pelo *International Gravity Standardization Net* (IGSN-71):

$$g_{\theta} = g_0 (1 + \alpha \cdot \text{sen}^2\theta - \beta \cdot \text{sen}^2 2\theta) \quad \text{Equação 3.1}$$

onde g_0 (valor da aceleração da gravidade no equador, $\theta = 0^\circ$) é igual 978.031,85 mgal, α é igual 0,0053024, β é 0,0000059 e θ é a latitude.

A figura simplificada da Terra permite o aumento da densidade com a profundidade, mas não para variações laterais, que é o objetivo do estudo gravimétrico. Por causa das variações laterais, o geoide e o esferoide de referência não coincidem. Anomalias de massas locais deformam o geoide como na Figura 3.1a. Pode-se esperar uma deformação ascendente do geoide sobre os continentes por causa da atração do material acima, e uma deformação descendente sobre bacias oceânicas por causa da baixa densidade da água (Figura 3.1b). No entanto, desvios no esferoide não são correlacionados com os continentes nem com as placas litosféricas, sugerindo que diferentes densidades existam abaixo da litosfera. Os desvios entre as duas superfícies são no máximo de 100 m (Kahn 1983 *apud* Telford *et al.* 1990).

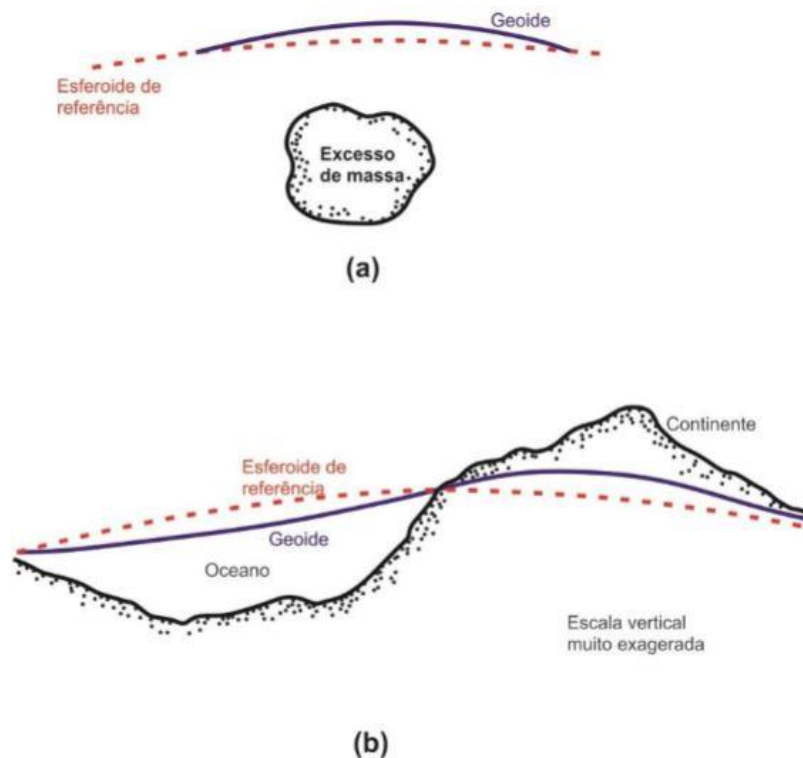


Figura 3.1 - Comparação do esferoide de referência e do geoide. (a) Deformação do geoide por uma massa local. (b) Deformação em larga escala (modificado de Telford *et al.* 1990).

3.2.3 Anomalia gravimétrica

A anomalia gravimétrica em um ponto qualquer localizado na superfície terrestre é dada pela diferença entre o valor da gravidade previsto (Equação 3.1) e o valor de gravidade medido no ponto, considerando as devidas correções (Telford *et al.* 1990).

$$\Delta g = (g_{obs} + \sum_{correções}) - g_{\theta} \quad \text{Equação 3.2}$$

onde Δg é a anomalia gravimétrica, g_{obs} é o valor medido da gravidade e o g_{θ} é o valor teórico (calculado) para a gravidade.

Anomalia Free-Air

Como a variação da gravidade é inversamente proporcional ao quadrado da distância, se faz necessária a correção de mudanças da elevação entre a estação de medida e o *datum* estabelecido. A correção *Free-Air* não leva em conta o material entre a estação e o *datum*, ou seja, esta correção despreza a densidade das cadeias de montanhas, por exemplo.

A anomalia *Free-Air* é a diferença entre a variação de aceleração da gravidade observada e a calculada, sua notação matemática é (Telford *et al.* 1990):

$$\Delta g_{FA} = (g_{obs} + \Sigma_{correções}) - g_{\theta} \quad \text{Equação 3.3}$$

em que, Δg_{FA} é a anomalia gravimétrica de *Free-Air*, g_{obs} é o valor medido da gravidade, $\Sigma_{correções}$ é a soma dos valores das correções realizadas (latitude; elevação – apenas a correção de *free-air*, sem considerar a correção Bouguer; maré; topografia e *drift*), e g_{θ} é o valor previsto da gravidade.

Anomalia Bouguer

A correção *Bouguer* é aplicada de forma complementar à *Free-Air*, pois conta com a atração dos materiais entre a estação e o *datum*.

Com os dados de anomalia *Free-Air* e superfície/massa topográfica (ambos da missão TOPEX/POSSEIDON), é possível obter a anomalia *Bouguer* através da equação (Barbosa 2003, Barbosa 2006):

$$\Delta g_B = \Delta g_{FA} + C_B \quad \text{Equação 3.4}$$

onde Δg_B é a anomalia *Bouguer*, Δg_{FA} é a anomalia de *Free-Air* e C_B é a correção de *Bouguer*. Neste cálculo considera-se a superfície como uma placa plana infinita de altura coincidente com a altitude e a densidade igual à densidade média das rochas.

Correção *Bouguer* (C_B) é dada por:

$$C_B = 0,04185 \cdot \Delta \rho \cdot H \quad \text{Equação 3.5}$$

onde $\Delta \rho$ é o contraste de densidade ($\Delta \rho = \rho_{preenchido} - \rho_{deslocado}$) e H é a altitude em metros.

3.2.4 Densidade das rochas

As anomalias gravimétricas são resultados da diferença das densidades entre o corpo rochoso e o terreno em seu redor, também chamada de contraste de densidade ($\Delta \rho = \rho_{preenchido} - \rho_{deslocado}$). O sinal do contraste de densidade determina o sinal da anomalia (Kearey *et al.* 2009).

Os litotipos mais comuns tem densidades que variam entre 1.600 e 3.200 kg m⁻³. A densidade de uma rocha depende tanto da sua composição mineralógica quanto de sua porosidade (Kearey *et al.* 2009).

Tabela 3.1 - Densidade das principais rochas e minerais (modificado de Telford *et al.* 1990).

Tipo de rocha	Intervalo (g/cm ³)	Média (g/cm ³)	Mineral	Intervalo (g/cm ³)	Média (g/cm ³)
Sedimentos (úmidos) compactos		1,92	Minerais metálicos		
Solo	1,2-2,4	1,92	Óxidos, carbonatos		
Argila	1,63-2,6	2,21	Bauxita	2,3-2,55	2,45
Cascalho	1,7-2,4	2	Limonita	3,5-4,0	3,78
Areia	1,7-2,3	2	Siderita	3,7-3,9	3,83
Arenito	1,61-2,76	2,35	Rutilo	4,18-4,3	4,25
Folhelho	1,77-3,2	2,4	Cromita	4,3-4,6	4,36
Calcário	1,93-2,90	2,55	Ilmenita	4,3-5,0	4,67
Dolomito	2,28-2,90	2,7	Pirolusita	4,7-5,0	4,82
Rocha sedimentar		2,5	Magnetita	4,9-5,2	5,12
Rochas ígneas			Hematita	4,9-5,3	5,18
Riolito	2,35-2,70	2,52	Cassiterita	6,8-7,1	6,92
Andesito	2,40-2,80	2,61	Wolframita	7,1-7,5	7,32
			Sulfetos, arsenietos		
Granito	2,50-2,81	2,64	Esfalerita	3,5-4,0	3,75
Granodiorito	2,67-2,79	2,73	Malaquita	3,9-4,03	4
Pórfiro	2,60-2,89	2,74	Calcopirita	4,1-4,3	4,2
Quartzo diorito	2,62-2,96	2,79	Pirrotita	4,5-4,8	4,65
Diorito	2,72-2,99	2,85	Marcassita	4,7-4,9	4,85
Lavas	2,80-3,00	2,9	Pirita	4,9-5,2	5
Diabásio	2,50-3,20	2,91	Bornita	4,9-5,4	5,1
Basalto	2,70-3,30	2,99	Calcocita	5,5-5,8	5,65
Gabro	2,70-3,50	3,03	Cobalto	5,8-6,3	6,1
Peridotito	2,78-3,37	3,15	Arsenopirita	5,9-6,2	6,1
Ígnea ácida	2,30-3,11	2,61	Galena	7,4-7,6	7,5
Ígnea básica	2,09-3,17	2,79			
Rochas Metamórficas			Minerais não metálicos		
Quartzito	2,50-2,70	2,6	Petróleo	0,6-0,9	-
Xistos	2,39-2,90	2,64	Gelo	0,88-0,92	-
Arcóso	2,60-2,70	2,65	Água do mar	1,01-1,05	-
Marga	2,60-2,90	2,75	Linhita	1,1-1,25	1,19
Serpentinó	2,40-3,10	2,78	Carvão	1,2-1,5	1,32
Ardósia	2,70-2,90	2,79	Grafita	1,9-2,3	2,15
Gnaiss	2,59-3,00	2,8	Sal rocha	2,1-2,6	2,22
Amfibolito	2,90-3,04	2,96	Gipsita	2,2-2,6	2,35
Eclogito	3,20-3,54	3,37	Caolinita	2,2-2,63	2,53
Metamórfica	2,4-3,1	2,74	Ortoclássio	2,5-2,6	-
			Quatzo	2,5-2,7	2,65
			Calcita	2,6-2,7	-
			Anidrita	2,29-3,0	2,93
			Biotita	2,7-3,2	2,92
			Magnesita	2,9-3,12	3,03
			Fluorita	3,01-3,25	3,14
			Barita	4,3-4,7	4,47

Em rochas sedimentares, as anomalias de densidade são, majoritariamente, geradas por variações de porosidade. Além disso, em sequências de rochas sedimentares, a densidade tende a aumentar com a profundidade, devido à compactação, e com a idade, devido à cimentação, onde ambos os processos diminuem as taxas de porosidade nas rochas.

A maioria das rochas ígneas e metamórficas possuem porosidades desprezíveis, e a composição mineralógica se torna a principal causa das variações gravimétricas (Kearey *et al.* 2009).

No início dos trabalhos com gravidade, uma densidade de 2.600 kg m⁻³ foi adotada como padrão para as supracrustais, e continua sendo largamente utilizado em modelagem e nos cálculos de correções de elevação, para padronizar os mapas gravimétricos. As faixas de densidade para as rochas e minerais mais comuns são apresentadas na Tabela 3.1.

3.3 MAGNETOMETRIA

3.3.1 Introdução

Assim como o método gravimétrico, a magnetometria fundamenta-se com base em um campo natural do planeta. O uso de medidas magnéticas na geofísica baseia-se nas concentrações de minerais magnéticos nas rochas, que produzem distorções locais nos elementos do campo magnético da Terra (Luiz & Silva 1995).

Nas vizinhanças de uma barra magnética desenvolve-se um fluxo magnético que flui de uma extremidade do magneto para a outra (Figura 3.2). Os pontos do magneto para onde o fluxo converge são conhecidos como polos magnéticos. De modo similar, uma barra magnética livremente suspensa alinha-se ao fluxo do campo magnético da Terra. O polo do magneto que tende a apontar na direção do polo norte da Terra é chamado de norte magnético ou polo positivo, e é balanceado por um sul magnético, ou polo negativo, de força idêntica, na extremidade oposta do magneto (Kearey *et al.* 2009).

A força F em módulo entre dois polos magnéticos de intensidades m_1 e m_2 , separados por uma distância r , é dada pela lei de Coulomb:

$$|F| = \frac{\mu_0 \cdot m_1 \cdot m_2}{4\pi \cdot \mu_R \cdot r^2} \quad \text{Equação 3.6}$$

onde r é a distância entre os polos de intensidade m_1 e m_2 . As constantes μ_0 e μ_R correspondem à permeabilidade magnética do vácuo e à permeabilidade magnética relativa do meio que separa os polos. Ao aproximarmos dois magnetos, a força é atrativa se os polos forem de sinais diferentes e repulsiva se forem de mesmo sinal (Kearey *et al.* 2009).

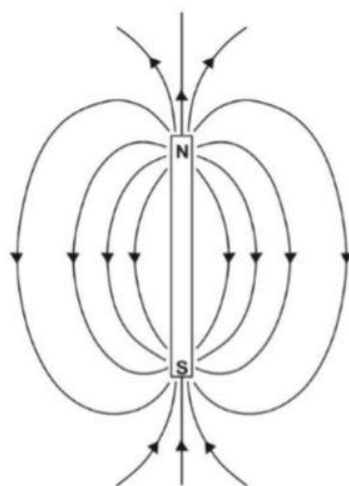


Figura 3.2 - O fluxo magnético ao redor de uma barra magnética (modificado de Kearey *et al.* 2009).

O campo magnético B em razão de um polo de intensidade m a uma distância r do polo é definido como a força exercida sobre uma unidade de polo positiva naquele ponto:

$$|B| = \frac{\mu_0 \cdot m}{4\pi \cdot \mu_r \cdot r^2} \quad \text{Equação 3.7}$$

Para um único polo de intensidade m , o potencial magnético V a uma distância r do polo é dado por:

$$|V| = \frac{\mu_0 \cdot m}{4\pi \cdot \mu_r \cdot r} \quad \text{Equação 3.8}$$

A componente do campo magnético em qualquer direção é, então, dada pela derivada parcial do potencial naquela direção.

A unidade CGS de intensidade do campo magnético é o gauss (G), numericamente equivalente a 10^{-4} T (tesla). O tesla é uma unidade muito grande para expressar as pequenas anomalias magnéticas causadas por rochas, e uma subunidade, o nanotesla (nT), é empregada ($1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$). O sistema CGS emprega a unidade numericamente equivalente gama (γ), igual a 10^{-5} G (Kearey *et al.* 2009).

3.3.2 O campo magnético terrestre

As anomalias magnéticas causadas por rochas são efeitos localizados que se superpõem ao campo magnético normal da Terra (campo geomagnético). Consequentemente, o conhecimento do comportamento do campo geomagnético é necessário, tanto para a redução de dados magnéticos para um datum apropriado, quanto para a interpretação das anomalias resultantes (Kearey *et al.* 2009).

O Método Magnético, à semelhança do Método Gravimétrico, tem seus fundamentos embasados na Teoria do Potencial. Os dois são muito semelhantes do ponto de vista da teoria; a principal diferença (que torna o Método Magnético mais complexo) é o caráter dipolar do campo magnético, em contraste com o caráter monopolar do campo gravitacional (Luiz & Silva 1995).

A representação do campo magnético terrestre pode ser constituída por um vetor no espaço, onde T é o campo magnético total, que é decomposto na componente vetorial horizontal H e na vertical V . O ângulo entre o campo total T e a componente horizontal H é a inclinação magnética (I) e o ângulo que a componente horizontal H faz com o norte geográfico é a declinação magnética (D), como mostra a Figura 3.3.

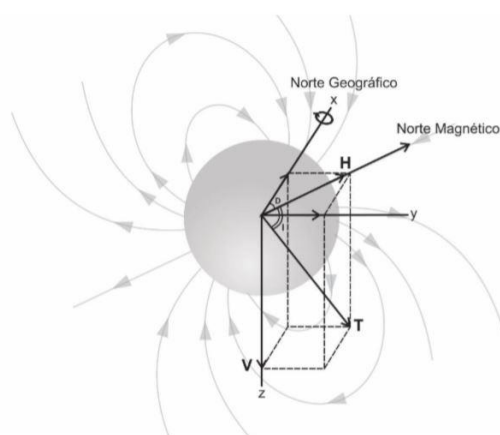


Figura 3.3 -Elementos do campo geomagnético e os vetores do campo magnético (modificado de Telford *et al.* 1990).

No hemisfério norte, o campo magnético geralmente mergulha para baixo, em direção ao centro da Terra, e se torna vertical no polo norte magnético (Figura 3.4). No hemisfério sul, o mergulho é, geralmente, para cima, em direção ao norte. A linha de inclinação zero é obtida quando se aproxima do equador, e é conhecida como equador magnético (Kearey *et al.* 2009).

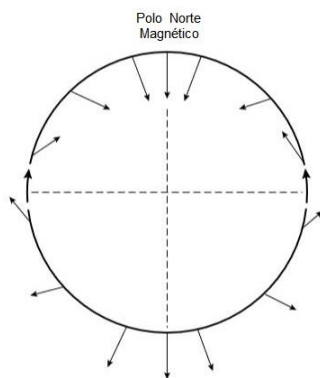


Figura 3.4 -A variação da inclinação do campo magnético total com a latitude baseada em uma aproximação do dipolo simples do campo geomagnético (modificado de Kearey *et al.* 2009).

A representação teórica, para um dado intervalo de tempo, do campo magnético principal é o IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*). Esta representação é utilizada como referência para a definição das perturbações causadas no campo normal pelas estruturas geológicas e depósitos de minérios, isto é, para a definição de anomalias magnéticas (Luiz & Silva 1995).

3.3.3 Magnetismo das rochas

Quando um 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. Tal fenômeno é resultante do alinhamento dos dipolos elementares dentro do material na direção do campo. Como consequência desse alinhamento, o material adquire polos magnéticos distribuídos por toda a sua superfície que correspondem às extremidades dos dipolos, como mostra a Figura 3.5 (Kearey *et al.* 2009).

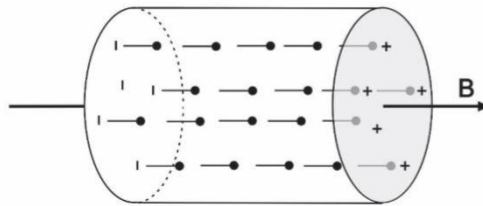


Figura 3.5 - Representação esquemática de um elemento em que os dipolos elementares se alinham na direção de um campo externo B, produzindo uma magnetização induzida (modificado de Kearey *et al.* 2009).

As substâncias ou materiais terrestres não apresentam o mesmo comportamento magnético quando submetidas a um campo magnético. Algumas substâncias podem ser atraídas e outras repelidas. As que são repelidas são denominadas de diamagnéticas, enquanto as que são atraídas recebem a denominação de paramagnéticas. Estas últimas, sob certas condições, podem apresentar magnetização espontânea e estão associadas aos maiores valores de atração. Neste caso, elas passam a ser denominadas de substâncias ferromagnéticas (Luiz & Silva 1995).

De maneira geral, as rochas podem ter dois tipos de magnetização: a induzida, que é provocada pelo campo magnético atual da Terra, tendo em vista que o mesmo sofre inversões de tempos em tempos. Este tipo de magnetização é presente em minerais paramagnéticos; e a magnetização remanescente, onde as rochas sedimentares e ígneas adquirem em sua formação, e as metamórficas adquirem em sua transformação. Geralmente presente em minerais ferrimagnéticos.

A intensidade de magnetização induzida no material é proporcional à sua susceptibilidade magnética (que neste método tem o mesmo papel que a densidade na gravimetria) e a estimulação magnética externa do material. A susceptibilidade magnética refere-se ao modo como a magnetização responde à um campo externo aplicado e representa o principal parâmetro magnético usado na interpretação geofísica. Tal propriedade varia imensamente para um mesmo tipo de rocha e é intrínseca ao material, ou seja, depende principalmente do seu processo de formação e da mineralogia magnética que é, de modo geral, proporcional ao conteúdo mineralógico em sua composição,

principalmente de magnetita e pirrotita (Telford *et al.* 1990). A Figura 3.6 ilustra tais diferenças de susceptibilidade de acordo com os litotipos mais comuns.

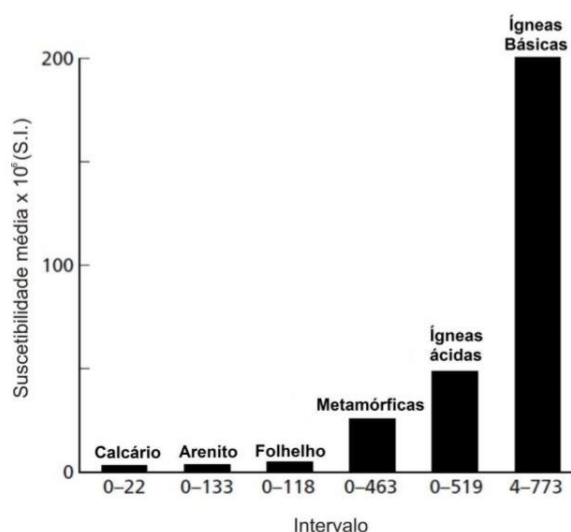


Figura 3.6 - Histograma com valores médios e intervalos de susceptibilidade dos tipos de rocha mais comuns (modificado de Kearey *et al.* 2009).

3.3.4 Correção e filtros

Não só corpos rochosos causam variações no campo magnético da Terra, mas só estes interessam em um levantamento geofísico. Portanto, ao se obter os dados, estes passam por uma etapa de tratamento, onde são feitas correções para eliminar variações devidas a causas não geológicas, como a variação diurna e topográfica. Esta etapa tem o objetivo de tornar os dados mais apropriados para uma interpretação.

A correção diurna, supracitada, é feita em função da interação dos ventos solares com a ionosfera durante o dia. A correção topográfica se faz necessária, pois a altura de voo nos levantamentos aeromagnéticos é constante em relação ao nível do mar, logo, ao sobrevoar um alvo de maior altitude, ou seja, mais próximo ao avião, por exemplo, uma serra, o medidor recebe um sinal mais intenso. Por fim, a remoção do IGRF permite selecionar anomalias locais, causadas por corpos magnetizados, já que esta correção isolará o corpo.

Além das correções, uma série de filtros pode ser aplicada nos dados obtidos, a fim de realçar anomalias de acordo com objetivo do estudo, assim como diminuir aspectos que atrapalham a interpretação. Os filtros são processados a partir de métodos matemáticos, de acordo com as Transformadas de Fourier, com o objetivo de tornar a integração geológica-geofísica mais consistente.

A Tabela 3.2 apresenta os principais Filtros de Fourier e suas aplicabilidades na geofísica.

Tabela 3.2 - Filtros de Fourier e suas finalidades geofísicas (modificado de Silva 2015).

Tipo	Filtro	Finalidade
Frequência	Passa Baixa	Retira altas frequências obtendo informações de fontes profundas
	Passa Alta	Retira baixas frequências obtendo informações de fontes rasas
	Passa Banda	Evidencia as anomalias do intervalo de frequência desejado
Continuação	Para Baixo	Elabora respostas de anomalias rasas (filtro altamente instável, geralmente não utilizado)
	Para Cima	Filtra as altas frequências, retirando as anomalias mais superficiais
Derivada	Gradiente Vertical	Evidencia as fontes rasas
	Gradiente Horiz. em X	Evidencia as estruturas N-S
	Gradiente Horiz. em Y	Evidencia as estruturas E-W
	Residual	Remove as anomalias regionais

3.3.5 Deconvolução de Euler

Para se determinar a profundidade de fontes magnéticas, mede-se a taxa da variação de um campo com a distância do mesmo. Esta técnica, conhecida como deconvolução de Euler, teve início com os estudos de Hood (1965), desenvolvidos posteriormente por Thompson (1982), que se estendem até os dias atuais, correlacionando a distribuição de densidade e/ou heterogeneidade de susceptibilidade magnética das fontes geradoras com sua geometria em profundidade (Barbosa & Silva 2005).

Estes estudos baseiam-se na equação homogênea de Euler (Equação 3.9), satisfeita por qualquer anomalia magnetométrica (ou gravimétrica) produzida por uma fonte pontual tridimensional sem interferência de outras fontes ou ruídos.

$$(x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = N (B - T) \quad \text{Equação 3.9}$$

onde (x_0, y_0, z_0) é a localização da fonte magnética, (x, y, z) é o ponto de levantamento, T é a anomalia de campo total, B é o campo regional e N é uma medida de taxa de variação que depende da fonte magnética (Kearey *et al.* 2009).

A deconvolução de Euler é um processo de inversão pelos mínimos quadrados onde, a partir dos valores das anomalias no campo magnético e de um índice estrutural (Tabela 3.3) escolhido, busca resolver as equações de Euler, gerando soluções da profundidade e da posição geográfica das fontes magnéticas existentes na área do levantamento (Reid *et al.* 1990).

Tabela 3.3 - Relação entre índice estrutural e modelos físico e geológico (modificado de 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

CAPÍTULO 4

PROCESSAMENTO DE DADOS

4.1 INTRODUÇÃO

A finalidade deste capítulo é a apresentação dos bancos de dados utilizados no trabalho e a metodologia aplicada na confecção e interpretação dos mapas geofísicos temáticos gravimétricos e magnetométricos e dos produtos geoquímicos.

Os produtos apresentados neste capítulo compõem a análise geofísica qualitativa da área de estudo, e foram elaborados por meio do *software* Geosoft Oasis Montaj (versão 8.4) e subsequentemente interpretado geológico e geofisicamente no *software* ArcGIS 10.3.

As amostras geoquímicas de sedimento de corrente foram obtidas pela CPRM e tratadas totalmente pelo laboratório analítico SGS- GEOSOL®, ou seja, além da análise química, o tratamento físico das amostras, tal como o peneiramento, foi realizado também pelo mesmo laboratório. Os dados utilizados neste trabalho já foram obtidos totalmente processados, o que restou foi apenas tratá-los para a região e elementos de interesse.

4.2 BANCO DE DADOS

4.2.1 Gravimetria

Os dados gravimétricos (*free-air*) e topográficos de satélite foram adquiridos durante a missão espacial Topex/Poseidon, produto de uma parceria científica entre a *National Aeronautics and Space Administration* – NASA e o *Centre National d'Études Spatiales* – CNES. Os dados de anomalia *free-air* e topográfico foram obtidos gratuitamente através do site <http://topex.ucsd.edu>, bastando informar as coordenadas limites da área desejada em grau decimal no sistema WGS-84. Os arquivos são disponibilizados em formato *.ASCII XYZ.

4.2.2 Magnetometria

Os dados magnetométricos utilizados neste trabalho fazem parte de sete aerolevantamentos de três projetos distintos (Figura 4.1), a saber (i) Projeto Rio das Velhas; (ii) Projeto Gemas de Minas Gerais – Faixa Itabira Ferros; e (iii) Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais – Programas 2000/2001, 2009 e 2010/2011. Abaixo serão apresentadas as informações relevantes de cada projeto, posteriormente sintetizadas no Anexo I. As informações foram retiradas dos relatórios técnicos dos respectivos projetos, que se encontram listados nas referências bibliográficas.

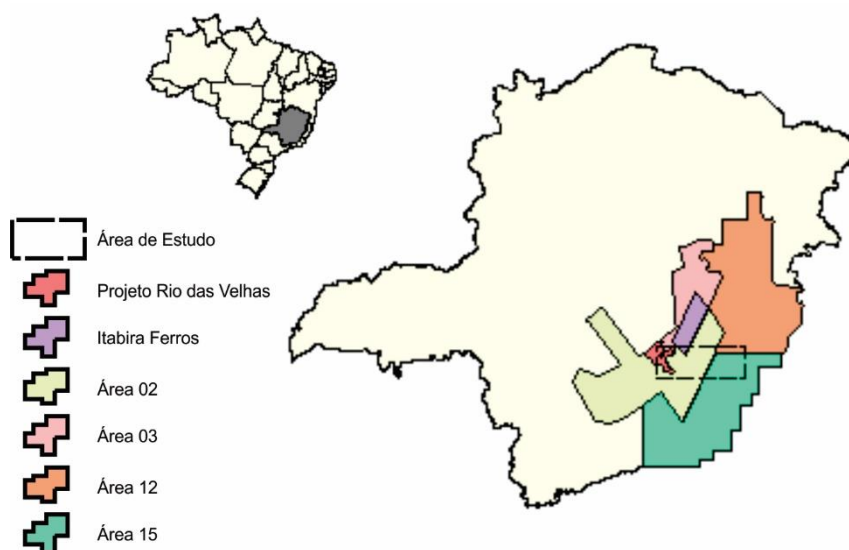


Figura 4.1 - Mapa de localização dos projetos aerogeofísicos utilizados neste trabalho.

Projeto Rio das Velhas

O Projeto Rio das Velhas (Figura 4.2) teve suas campanhas de levantamento de dados entre os dias 17 de julho e 14 de outubro de 1992, cobrindo uma área 1700 km² do *greenstone belt* Rio das Velhas. Os aerolevantamentos foram realizados pela empresa PROSPEC S.A. – Geologia, Prospecção e Aerolevantamentos, contratada pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

Neste projeto, os levantamentos aerogeofísicos constaram do recobrimento de 6726 km de perfis aeromagnetométricos, gamaespectométricos e aereoletromagnetométricos (EM) a nível de detalhamento, com linhas de voo espaçadas de 250 metros e linhas de controle com espaçamento de 5000 metros. O levantamento foi dividido em quatro blocos, sendo que nos blocos I e III as linhas de voo foram orientadas na direção N40W, enquanto nos blocos II e IV, tiveram orientação N50E. Esta divisão se deu com o intuito de realizar os levantamentos de forma perpendicular às estruturas geológicas e tão próximas quanto possível da direção do campo magnético terrestre.

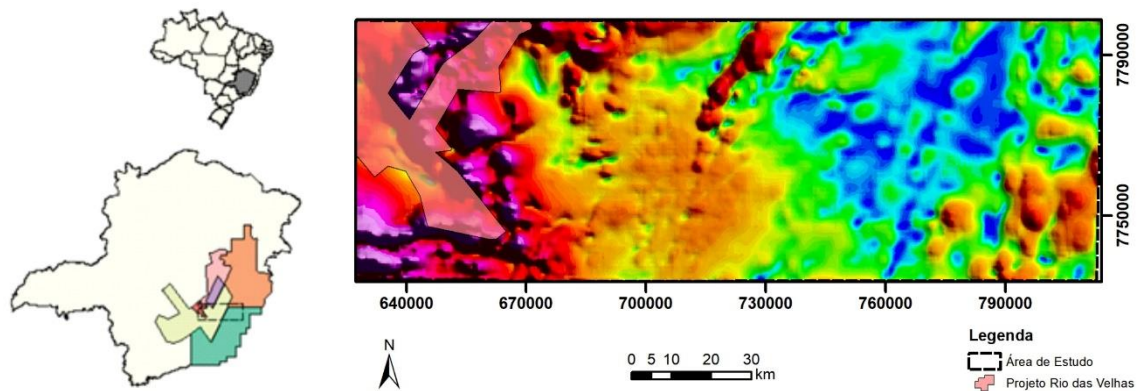


Figura 4.2 - Mapa de localização dos projetos aerogeofísicos utilizados neste trabalho. Em detalhe, a área do projeto Rio das Velhas na região estudada.

A aeronave atingiu velocidades entre 70 e 110 km/h. Sua altura de voo foi fixada em 80 metros, acompanhando o relevo do terreno, e manteve o sensor eletromagnético a uma altura de 30 metros sobre o relevo, o sensor magnético a 45 metros e o gamaespectométrico a 60 metros.

O projeto resultou em 4 volumes de relatórios, sendo um técnico e três de anexos, com um total de 36 mapas geofísicos.

Projeto Gemas de Minas Gerais – Faixa Itabira Ferros

Para este projeto, o contrato entre o Serviço Geológico do Brasil – CPRM e a GEOMAG S.A. – Prospecções Aerogeofísicas foi firmado em 28/12/1995 com o objetivo de executar o levantamento e processamento dos dados aerogeofísicos de magnetometria e gamaespectometria do Projeto Gemas de Minas Gerais, faixa Itabira Ferros (Figura 4.3).

Em três meses – fevereiro a abril de 1996 – foram voados 9344 km em perfis, a uma altura média de 150 metros e a 180 km/h. A campanha abrangeu uma área de, aproximadamente, 4600 km².

Neste projeto, as linhas de produção foram definidas na direção N40W, com espaçamento entre as linhas de 500 metros, enquanto as linhas de controle seguiram direção de N24E, espaçadas de 12 km umas das outras.

O relatório final foi apresentado à CPRM na forma de seis volumes, sendo o primeiro deles o texto técnico e os cinco restantes de anexos, contendo 14 mapas geofísicos.

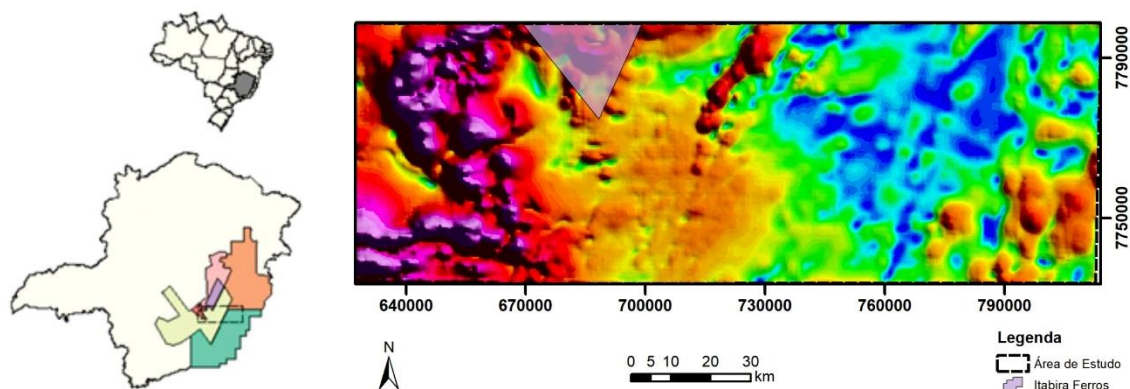


Figura 4.3 - Mapa de localização dos projetos aerogeofísicos utilizados neste trabalho. Em detalhe, a área do projeto Itabira Ferros na região estudada.

Programa de Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais

O Programa de Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais (PLAMG) abrange a maior parte do estado mineiro, e é dividido em 21 áreas. Para este trabalho, foram utilizados os dados das áreas 2, 3, 12, e 15.

A Área 2 – Pitangui-São João Del Rei-Ipatinga (Figura 4.4) foi produto de um contrato entre a SEME – Secretaria de Estado de Minas e Energia do Governo de Minas Gerais e a Lasa Engenharia e Prospecções S.A. com objetivo de fornecer uma base de dados geofísicos-geológicos a fim de reduzir os riscos da pesquisa mineral na região.

O levantamento aerogeofísico foi executado entre os meses de agosto de 2000 e março de 2001, utilizando-se como base de operações as cidades de Ponte Nova e Santo Antônio do Amparo.

Para o recobrimento aerogeofísico da Área 2, foram divididos dois blocos: Oeste e Leste. O Bloco Oeste compreendeu uma superfície de 21.564 km² com direção de linhas de produção N30E e linhas de controle N60W e o Bloco Leste, uma superfície de 13.611 km² com direção de linhas de produção N30W e linha de controle N60E. Ambos os blocos tiveram como espaçamento entre linha de produção 250 metros e entre linhas de controle 2.500 metros.

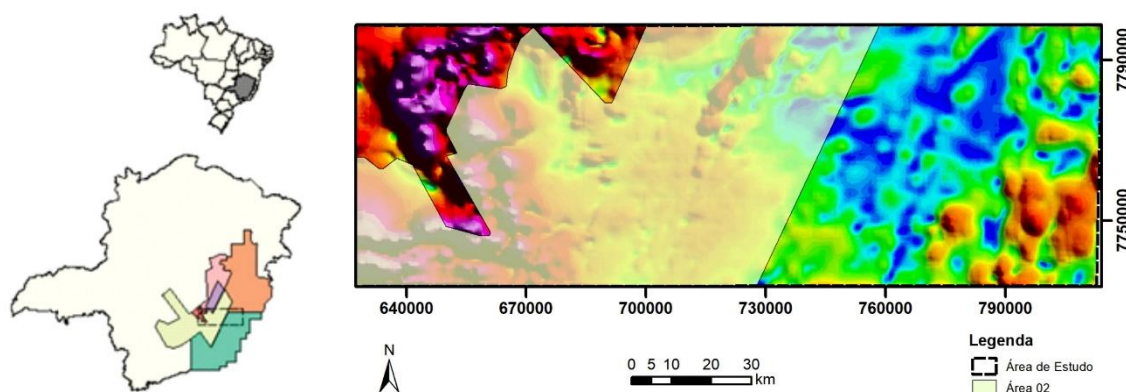


Figura 4.4 - Mapa de localização dos projetos aerogeofísicos utilizados neste trabalho. Em detalhe, a abrangência da Área 02 do PLAMG na área de estudo.

A Área 3 – Morro do Pilar-Cerro-Guanhães (Figura 4.5), assim como a Área 2, foi produto de um contrato entre a SEME e a Lasa Engenharia e Prospecções S.A. Para o levantamento da Área 3, a SEME autorizou a Lasa a subcontratar a MEGAFÍSICA Survey Aerolevantamentos S.A. para executar os serviços de aquisição e processamento de dados aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos compreendendo cerca de 49.501 km de perfis e cerca de 10.141 km² de superfície.

Para o recobrimento aerogeofísico da Área 3 foram sobrevoadas linhas de produção na direção N30W e linhas de controle na direção N60E. O espaçamento entre linhas de produção foi de 250 metros e entre linhas de controle foi de 2.500 metros. A altura média de voo foi de 100 metros em relação ao terreno.

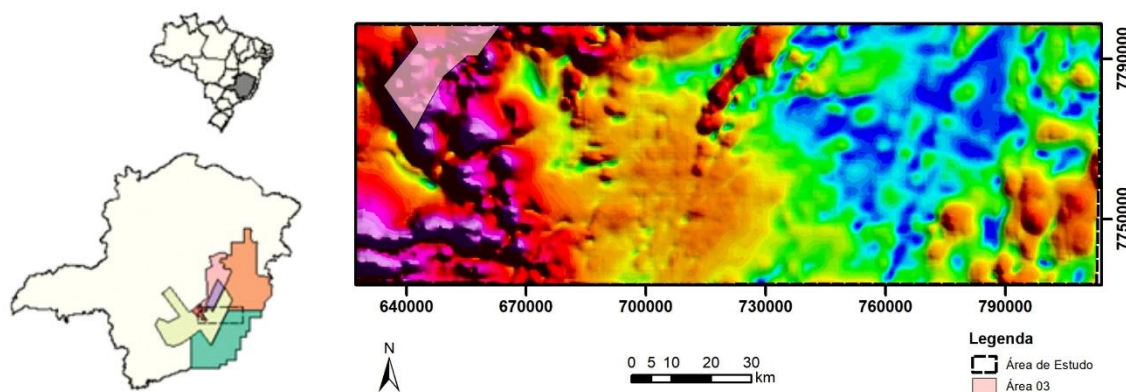


Figura 4.5 - Mapa de localização dos projetos aerogeofísicos utilizados neste trabalho. Em detalhe, a abrangência da Área 03 do PLAMG na área de estudo.

Os aerolevantamentos das áreas 12 e 15 (Figura 4.6) são resultantes de contratos entre o Governo de Minas Gerais, por meio da CODEMIG – Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais e da CPRM – Serviço Geológico do Brasil, e empresas contratadas para a aquisição e processamento dos dados.

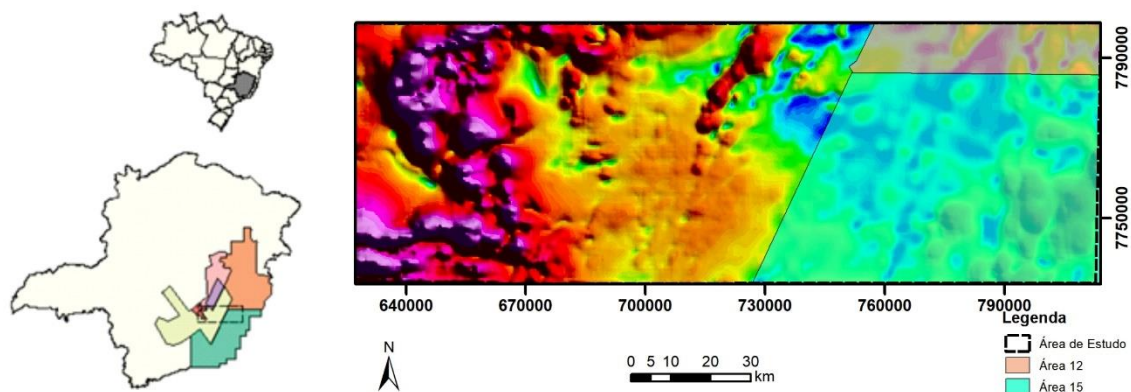


Figura 4.6 - Mapa de localização dos projetos aerogeofísicos utilizados neste trabalho. Em detalhe, a abrangência das áreas 12 e 15 do PLAMG na área de estudo.

Para as áreas 12 e 15, a responsável pelo processamento dos dados foi a empresa Lasa Engenharia e Prospecções S.A. A Área 12 – Teófilo Otoni-Governador Valadares-Caratinga contou com o recobrimento de 87.793 km de perfis aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos, com linhas de voo orientadas na direção N30W e espaçadas de 0,5 km, e linhas de controle com orientação N60E e com espaçamento de 10 km.

A Área 15 – Juiz de Fora-Cataguases-Manhuaçu teve cerca de 76.500 km de perfis, com linhas de voo e controle também espaçadas de 0,5 km e 10 km, respectivamente, e orientadas nas direções N-S e E-W. A altura de voo foi fixada em 100 metros sobre o terreno.

4.2.3 Geoquímica

O projeto Mapeamento Geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu entorno, proposto pela CPRM em 2014, concentra informações geoquímicas que permitem indicar ambientes favoráveis a mineralizações de ferro, manganês, ouro e pedras coradas na região. O projeto incluiu levantamento geoquímico de solo, de sedimento ativo de corrente e de concentrado de bateia. O tratamento dos dados permitiu a identificação de áreas anômalas, em especial nas proximidades dos limites do Quadrilátero Ferrífero e das cidades de Igarapé, Pitangui e Coronel Fabriciano. O projeto totaliza uma área de 45.000 km², onde foram coletadas 875 amostras de solo, 3662 amostras de sedimento ativo de corrente e 1026 amostras de concentrado de bateia, perfazendo um total de 5563 amostras coletadas. Foram produzidos 43 mapas geoquímicos unielementares para solo e sedimento de corrente. Também foram produzidos 13 mapas multielementares para solo e 12 mapas multielementares para sedimento de corrente através da Análise de Principais Componentes.

Para esta monografia foram utilizados os dados de amostras de sedimentos de corrente próximos à Falha de Água Quente, abrangidos em um polígono limitado pelos meridianos 43°9'W e

43°34'W e os paralelos 19°53'S e 20°24'S (Figura 4.7). Foram selecionados os elementos ouro, por ser o elemento de interesse, e seus dois principais elementos farejadores: arsênio e antimônio.

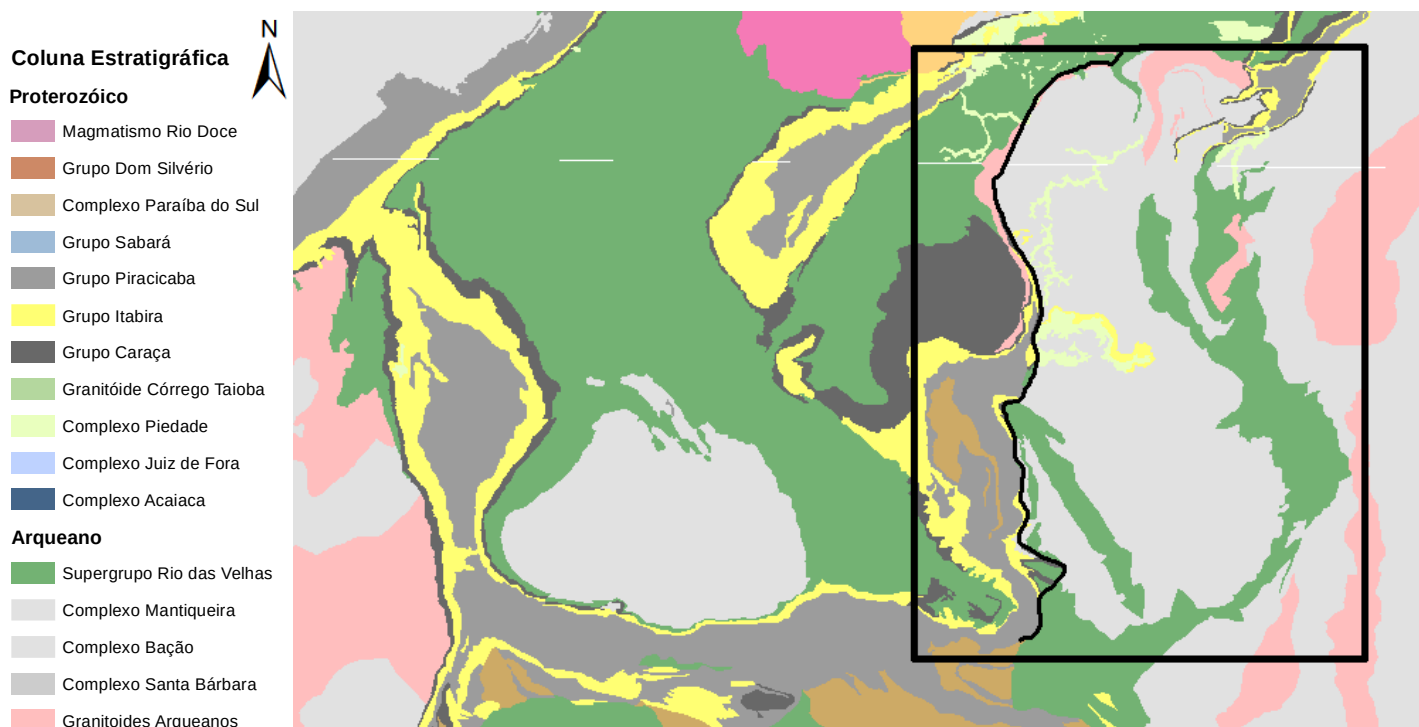


Figura 4.7 -Abrangência dos dados geoquímicos utilizados (quadrado preto) em relação ao Quadrilátero Ferrífero. Fonte: compilado a partir de dados da CPRM em ambiente SIG. O traço preto representa a Falha de Água Quente.

4.3 TRATAMENTO DOS DADOS GEOFÍSICOS

4.3.1 Geração de mapas

Mapas gravimétricos

Para a geração dos mapas gravimétricos, os dados obtidos do satélite Topex/Poseidon foram importados para o *software* Oasis Montaj em formato *.ASCII XYZ e convertidos para *.gdb. Com isso, a rotina WINXY foi aplicada, e os dados foram interpolados a partir do método de krigagem. Após análise de coerência e controle de qualidade dos dados, os primeiros mapas foram gerados, sendo eles o de topografia e o de anomalia *free-air*.

Utilizando a Equação 3.5 obteve-se a correção Bouguer (CB). Com este parâmetro, aplicou-se a Eq. 3.4 nos grids de anomalia *free-air* e CB, com a finalidade de obter o mapa de anomalia Bouguer.

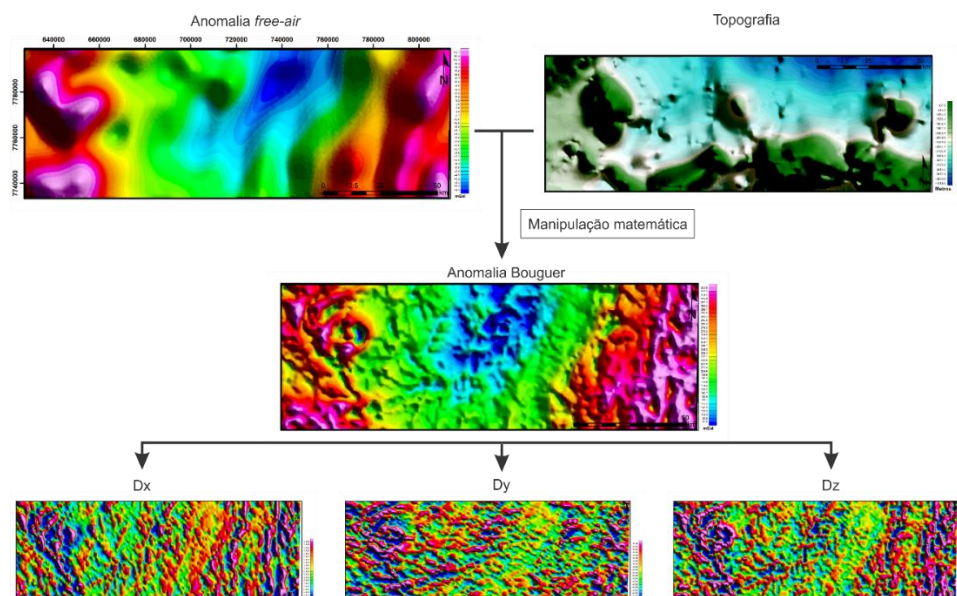


Figura 4.8 - Fluxograma que mostra os mapas gravimétricos gerados. Dx – primeira derivada horizontal (E-W); Dy – primeira derivada horizontal (N-S); Dz – primeira derivada vertical.

Mapas magnetométricos

Os dados magnetométricos são produtos dos aerolevantamentos supracitados e foram processados pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Os dados tiveram o IGRF subtraído, foram nivelados e micronivelados para uma base comum e o *trend* regional removido. O arquivo grid com dados de Campo Magnético Anômalo foram importados para o Oasis Montaj 8.4 e, a partir do mesmo, gerou-se arquivos *.gdb. Para área de estudo, aplicou-se a rotina WINXY, onde os dados foram processados segundo a Transformada Rápida de Fourier. Aplicando filtros pela rotina MAGMAP (Tabela 3.2), foi possível destacar e identificar anomalias na área de estudo.

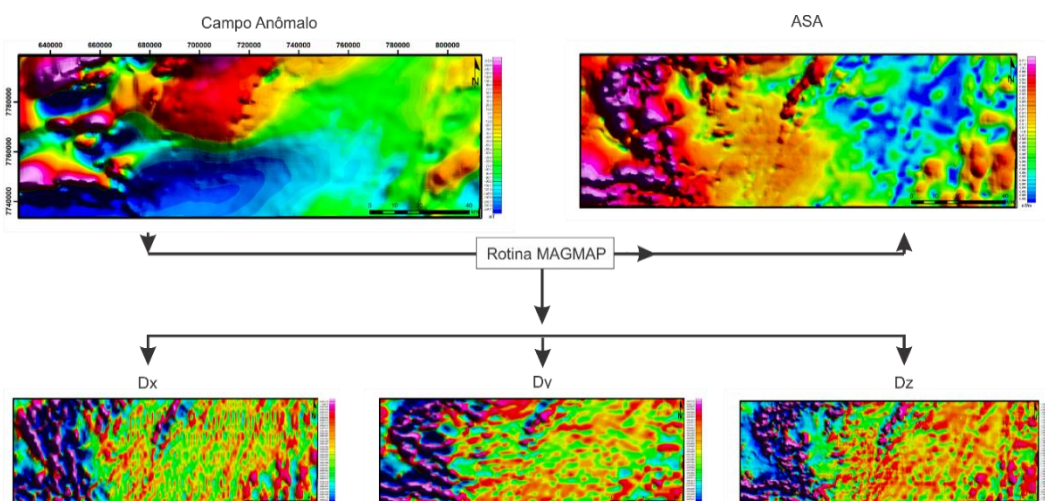


Figura 4.9 - Fluxograma que mostra os mapas magnetométricos gerados. Dx – primeira derivada horizontal (E-W); Dy – primeira derivada horizontal (N-S); Dz – primeira derivada vertical.

Para gerar os mapas, os dados foram interpolados pelo método de mínima curvatura em uma malha regular de 800 metros. Foram gerados mapas temáticos de campo anômalo total, amplitude do sinal analítico, gradiente vertical de primeira e segunda ordem e gradiente horizontal em X e Y (Figura 4.9).

4.3.2 Deconvolução de Euler

Os produtos da deconvolução de Euler (2D) foram obtidos a partir da utilização da versão livre do *software* Euldep 1.0 da *School of Geosciences – School of the Witwatersrand* (Durrheim & Cooper 1998), com o intuito de estimar as profundidades das fontes das anomalias gravimétricas e magnetométricas da área de estudo. No total, 63 perfis foram traçados ao longo da área de estudo, com o intuito de compreender a estruturação regional em profundidade, a partir dos contrastes físicos de densidade e susceptibilidade magnética mais significativos. Com isso, pode-se determinar os melhores parâmetros aplicados para a geração do modelo 3D. Os dados gravimétricos foram utilizados para obter uma visualização regional da área, levando em consideração a amostragem da aquisição dos dados por satélite (aproximadamente de 100 em 100 km). Já os dados magnetométricos, obtidos em escala de detalhe através dos aerolevantamentos, foram utilizados para modelar a geometria das falhas em profundidade com maior detalhe.

Primeiramente, os perfis foram traçados em ambiente SIG, no *software* ArcGis 10.2, aproximadamente perpendiculares ao traço da falha e com comprimento padronizado. A malha de perfis foi importada para o Geosoft Oasis Montaj 8.0.4, onde foi feita a integração com os mapas de anomalia Bouguer e de amplitude do sinal analítico para a obtenção dos perfis gravimétricos e magnetométricos com os dados a serem utilizados no processo de deconvolução de Euler.

Os dados geofísicos dos perfis foram processados matematicamente e importados para o *software* Euldep 1.0 (Durrheim & Cooper 1998). O programa processa os dados analisando relações entre comprimento de onda e amplitude dos sinais importados. Para isso, o usuário insere parâmetros para tornar os resultados condizentes à situação geológica do estudo, como: altura do levantamento que obteve os dados utilizados, profundidade máxima estimada para a anomalia, índice estrutural e tamanho da janela. Com isso, determina-se a posição e profundidade média estimada da fonte causadora da anomalia observada.

Dezenas de perfis de inversão foram gerados a fim de estimar a profundidade da Falha de Água Quente, da Falha Dom Silvério e possíveis estruturas adjacentes. Nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12, serão apresentadas as posições dos perfis gerados em relação à cada estrutura estudada, além de dois perfis representativos de cada método geofísico (gravimetria e magnetometria) para visualização do dado de inversão ainda sem interpretação. Os demais perfis de inversão seguem em anexos (Anexo II

para perfis gravimétricos, Anexo III para perfis magnetométricos da Falha de Água Quente, e Anexo IV para perfis magnetométricos da Falha Dom Silvério).

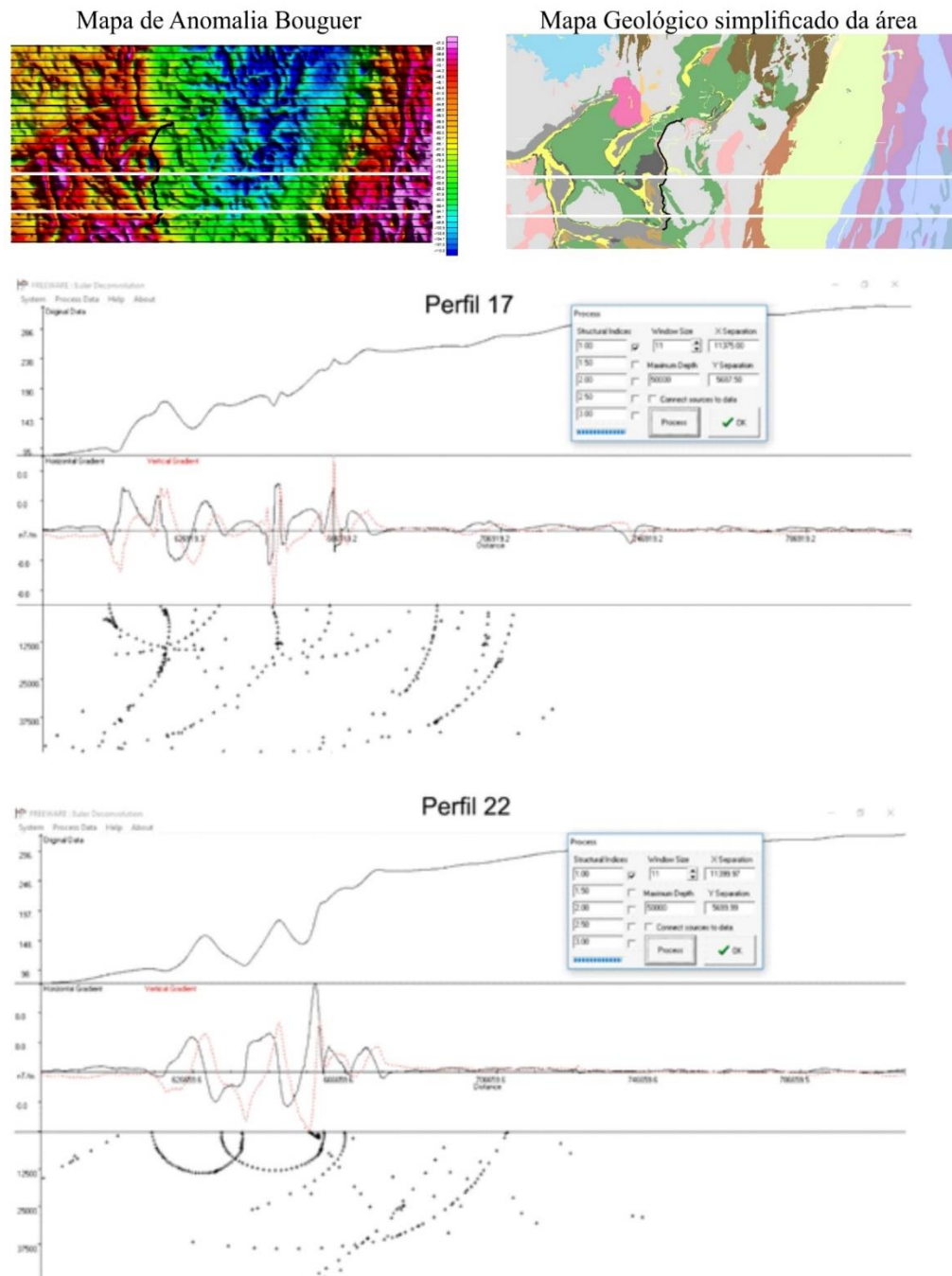


Figura 4.10 - Perfis de deconvolução de Euler sobre dados gravimétricos da Anomalia de Bouguer. Em preto o traço da Falha de Água Quente, e em branco a posição dos perfis detalhados.

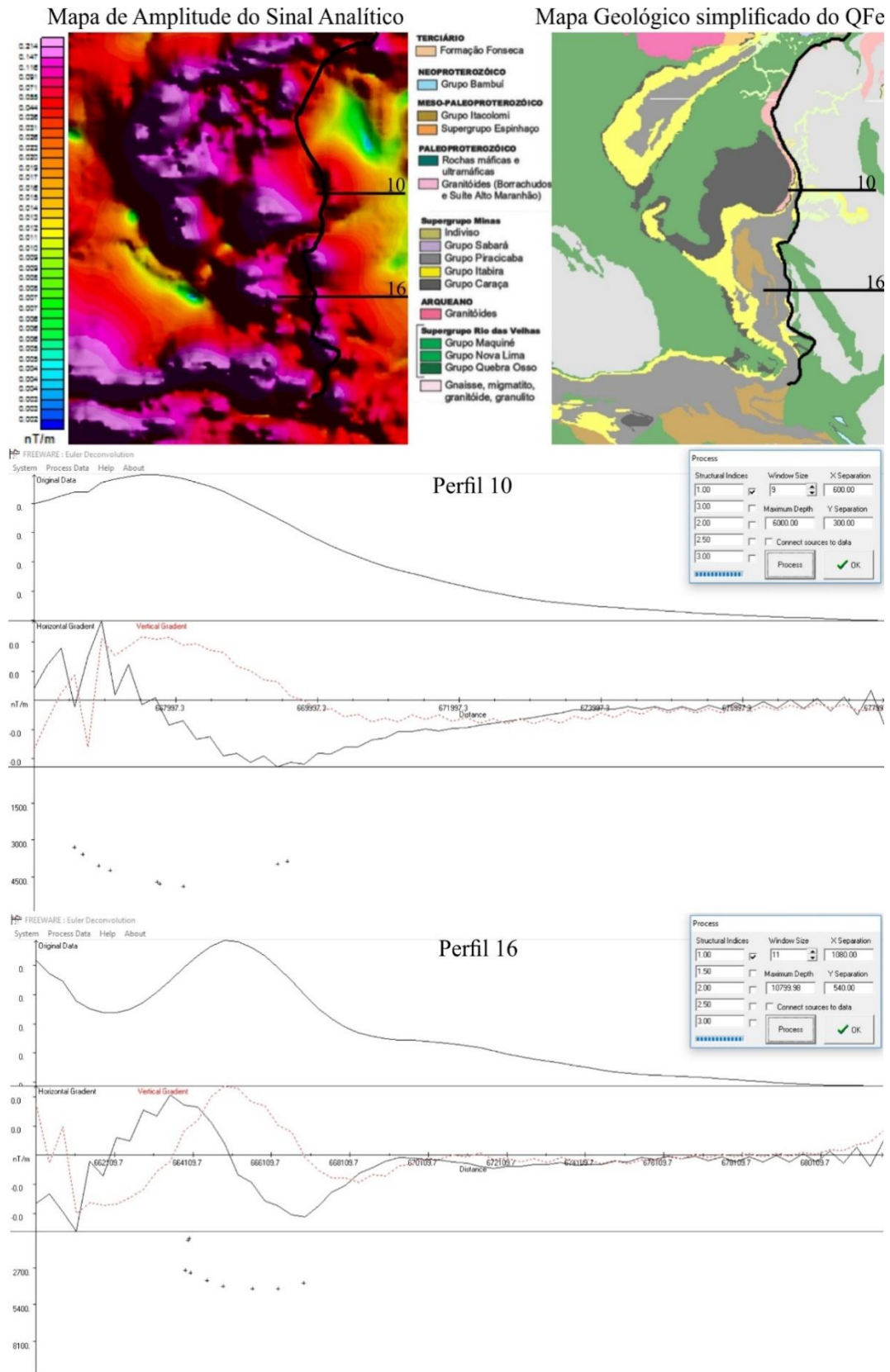


Figura 4.11 - Perfis de deconvolução de Euler sobre dados magnetométricos de Amplitude do Sinal Analítico. Em preto o traço da Falha de Água Quente e a posição dos perfis detalhados.

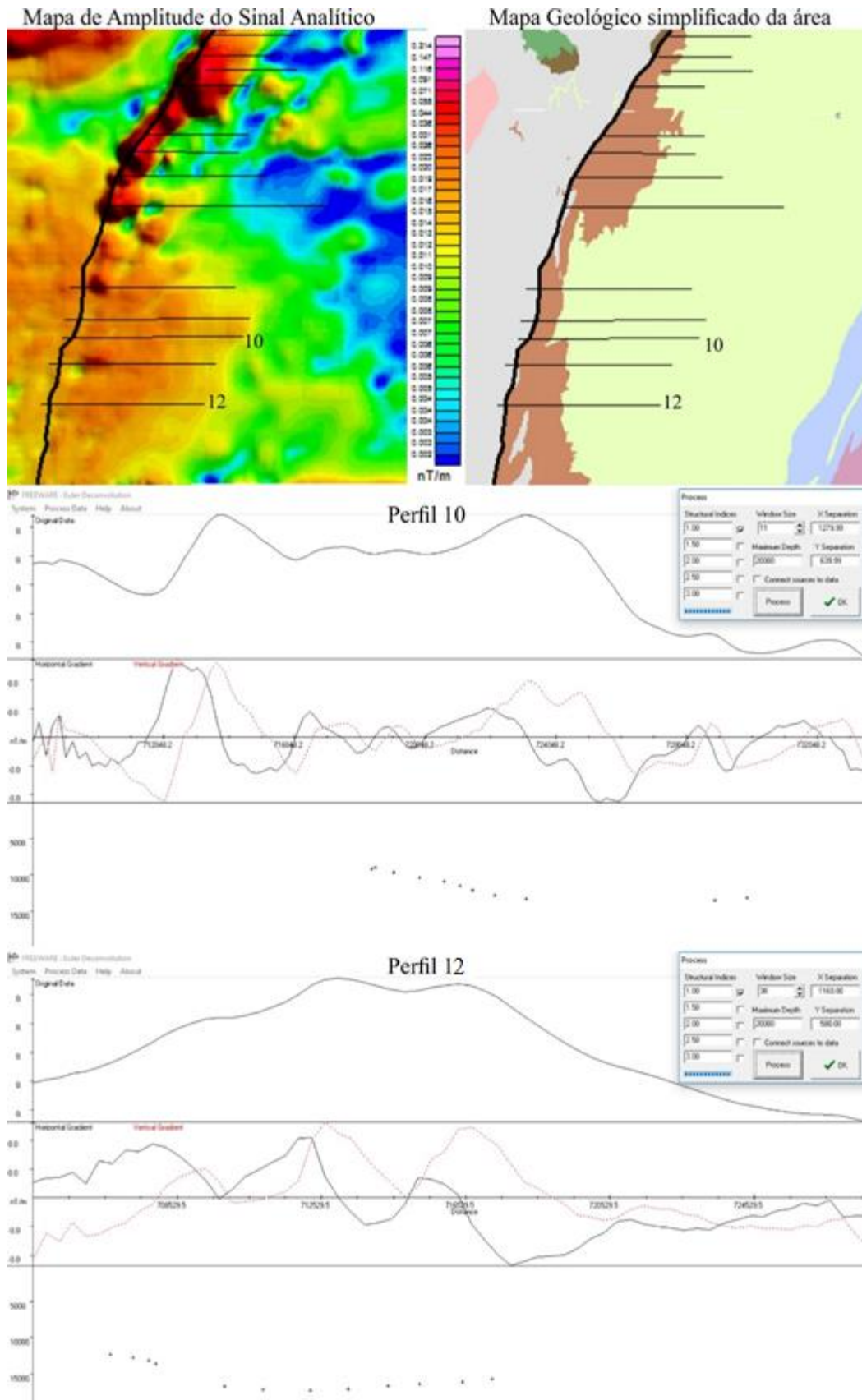


Figura 4.12 - Perfis de deconvolução de Euler sobre dados magnetométricos de Amplitude do Sinal Analítico. Em preto o traço da Falha Dom Silvério e a posição dos perfis detalhados.

4.3.3 Integração tridimensional

Os perfis de inversão dos dados gravimétricos foram totalmente padronizados. Adotou-se perfis de deconvolução equidistantes de 4 km, e de comprimento igual a 230 km para todos. A janela de processamento teve valor 11, e a profundidade máxima permitida foi de 50000 metros. Todos os perfis podem ser consultados em detalhe no Anexo I.

Os dados gravimétricos foram utilizados em escala regional, em razão do espaçamento de aquisição dos dados ser de 1 em 1°, ou seja, de 111 em 111 km. Desta forma, o modelo gravimétrico foi utilizado para visualizar o contraste da densidade regional, interpretar e inferir grandes estruturas, para então gerar o modelo magnetométrico de detalhe. Por isso não há modelo de superfície gravimétrica, mas sim um bloco 3D de uma área maior que a área de estudo.

A disposição espacial em profundidade os perfis ao longo da área de estudo em escala regional e o bloco 3D são apresentados na Figura 4.13.

Os modelos tridimensionais das superfícies de contraste magnetométrico foram obtidos pela integração dos diversos perfis bidimensionais a partir do método de krigagem esférica no *software* ArcScene 10.3. Para gerar os modelos 3D foram selecionados e integrados os perfis de deconvolução de Euler que melhor representavam as estruturas.

Os parâmetros adotados para cada perfil seguem nas tabelas 4.1 para a Falha da Água Quente e 4.2 para a Falha Dom Silvério, e o resultado da krigagem (a interpretação da superfície das estruturas) seguem nas Figuras 4.14 e 4.15.

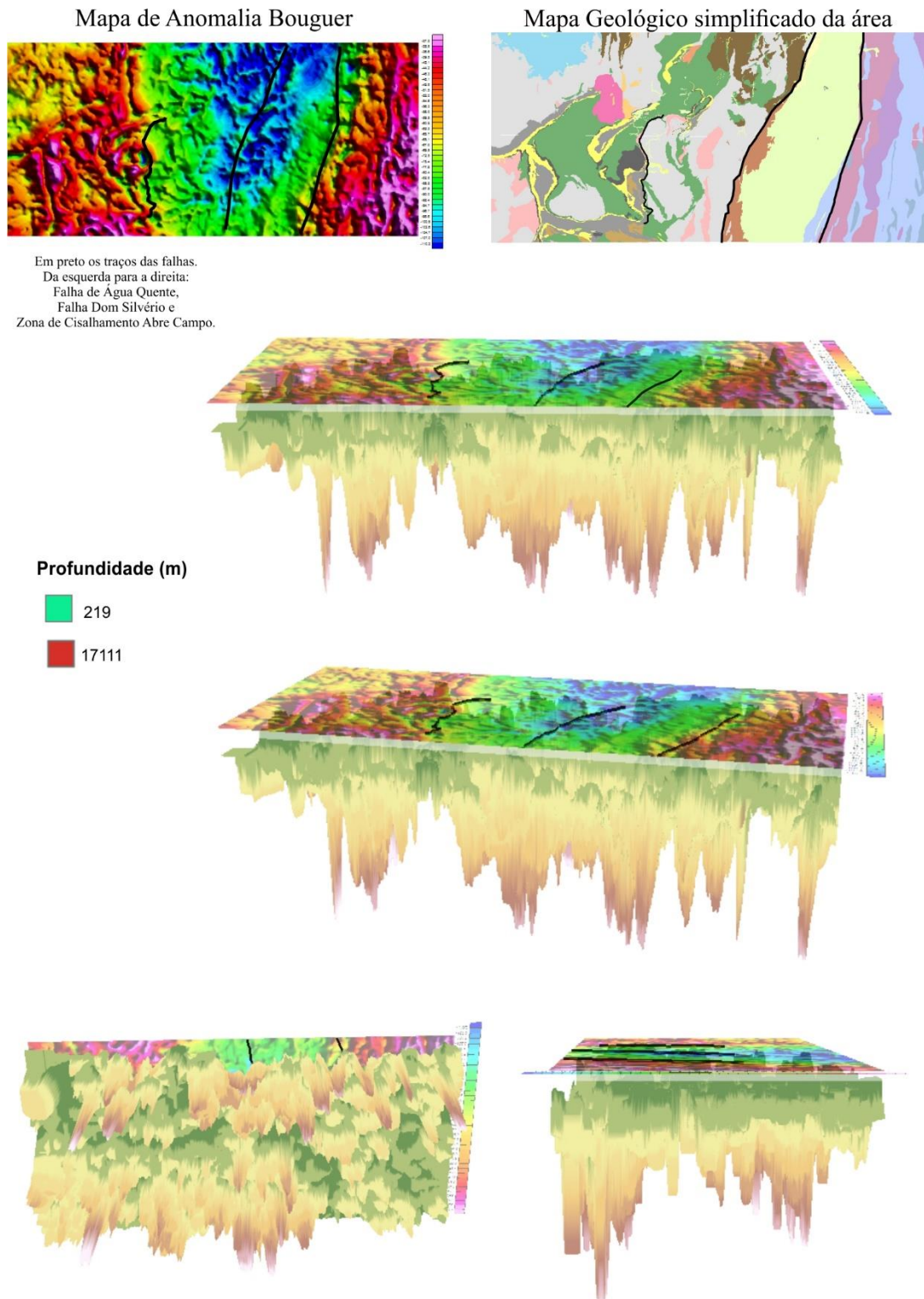


Figura 4.13 - Superfície tridimensional dos contrastes gravimétricos obtida com as krigagens dos perfis bidimensionais das inversões. As dimensões do bloco são $x=185$ km, $y=65$ km e $z=-20000$ m.

Tabela 4.1 - Parâmetros adotados para os perfis magnetométricos utilizados na deconvolução de Euler do modelo 3D da Falha de Água Quente.

Perfil	X₀	Y₀	Direção	Comprimento (km)	Janela	Prof. máx
Perfil 1	673209	7797830	WE	15	7	6000 m
Perfil 2	669290	7796827	WE	20	8	6000 m
Perfil 3	660177	7790631	WE	20	5	7500 m
Perfil 4	659858	7787942	WE	15	12	6000 m
Perfil 5	658719	7783523	WE	15	9	5000 m
Perfil 6	659630	7782293	WE	15	10	5000 m
Perfil 7	657079	7779513	WE	20	15	7500 m
Perfil 8	665463	7777691	WE	15	22	10000 m
Perfil 9	665690	7776050	WE	15	9	6000 m
Perfil 10	666009	7773772	WE	15	9	6000 m
Perfil 11	662273	7770719	WE	20	8	8800 m
Perfil 12	664734	7766937	WE	15	20	7200 m
Perfil 13	662547	7765115	WE	15	12	8000 m
Perfil 14	663139	7762700	WE	15	10	7200 m
Perfil 15	664597	7759009	WE	15	10	10000 m
Perfil 16	660223	7758052	WE	20	11	10800 m
Perfil 17	664050	7754908	WE	20	7	10400 m
Perfil 18	664141	7752539	WE	20	10	10400 m
Perfil 19	666875	7750443	WE	15	8	6800 m
Perfil 20	666921	7749258	WE	15	27	8400 m
Perfil 21	664324	7746570	WE	20	12	10400 m
Perfil 22	663367	7744975	WE	20	8	11200 m

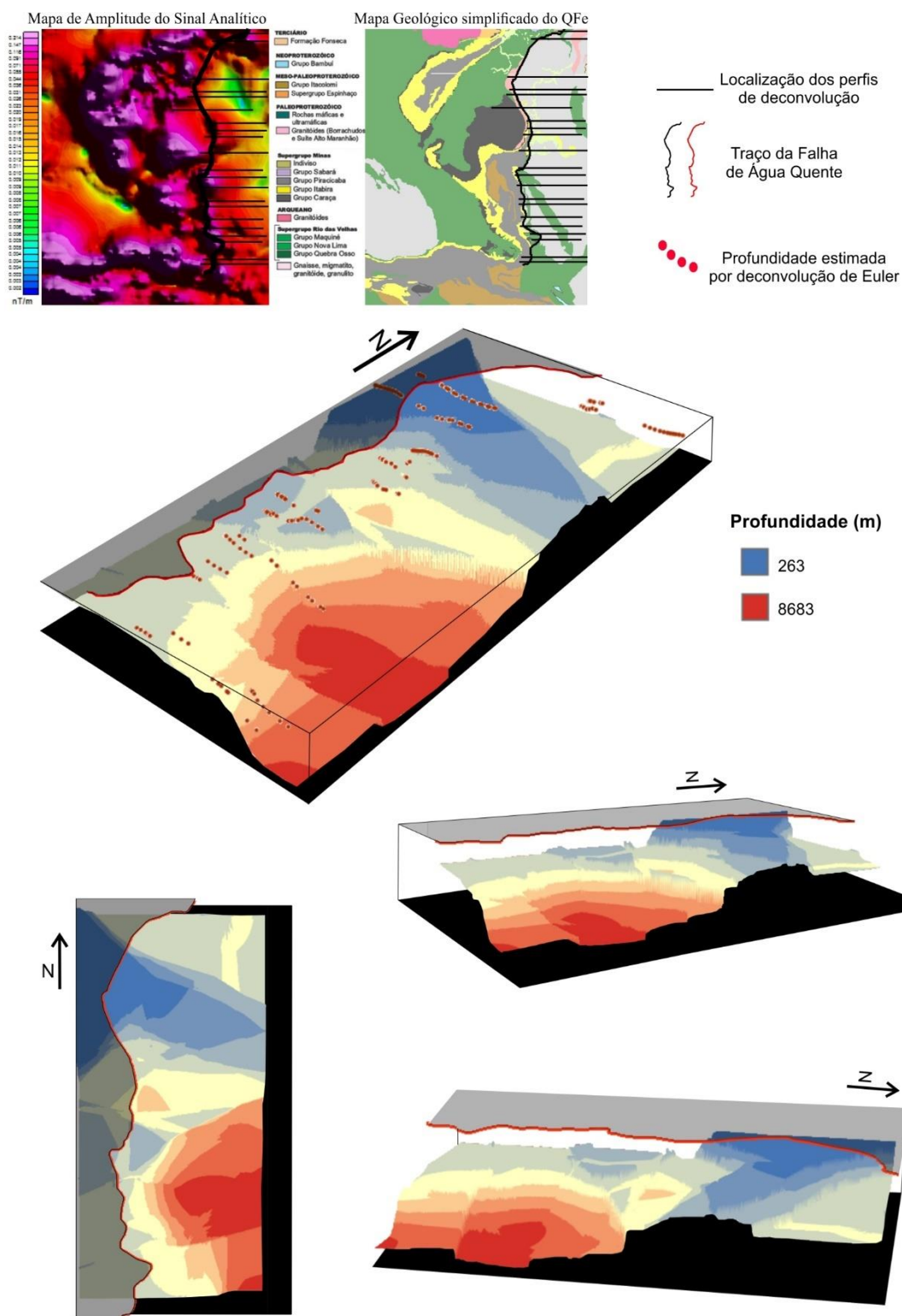


Figura 4.14 - Superfície tridimensional dos contrastes magnetométricos obtida com as krigagens dos perfis bidimensionais das inversões. As dimensões do bloco são $x=35450$ m, $y=56280$ m e $z=-9000$ m.

Tabela 4.2 - Parâmetros adotados para os perfis magnetométricos utilizados na deconvolução de Euler do modelo 3D da Falha Dom Silvério.

Perfil	X₀	Y₀	Direção	Comprimento (km)	Janela	Prof. máx
Perfil 1	728696	7797829	WE	10	30	10000 m
Perfil 2	727495	7795843	WE	10	13	5200 m
Perfil 3	727544	7794887	WE	10	14	7600 m
Perfil 4	728084	7793833	WE	10	19	6000 m
Perfil 5	728010	7792902	WE	15	12	4000 m
Perfil 6	723693	7790664	WE	15	23	4800 m
Perfil 7	723055	7789307	WE	20	25	4800 m
Perfil 8	721963	7786991	WE	30	17	2800 m
Perfil 9	708741	7761845	WE	25	10	11600 m
Perfil 10	708048	7757260	WE	25	11	20000 m
Perfil 11	707515	7754808	WE	25	28	12800 m
Perfil 12	705862	7751129	WE	25	14	15000 m
Perfil 13	704529	7745211	WE	25	38	20000 m

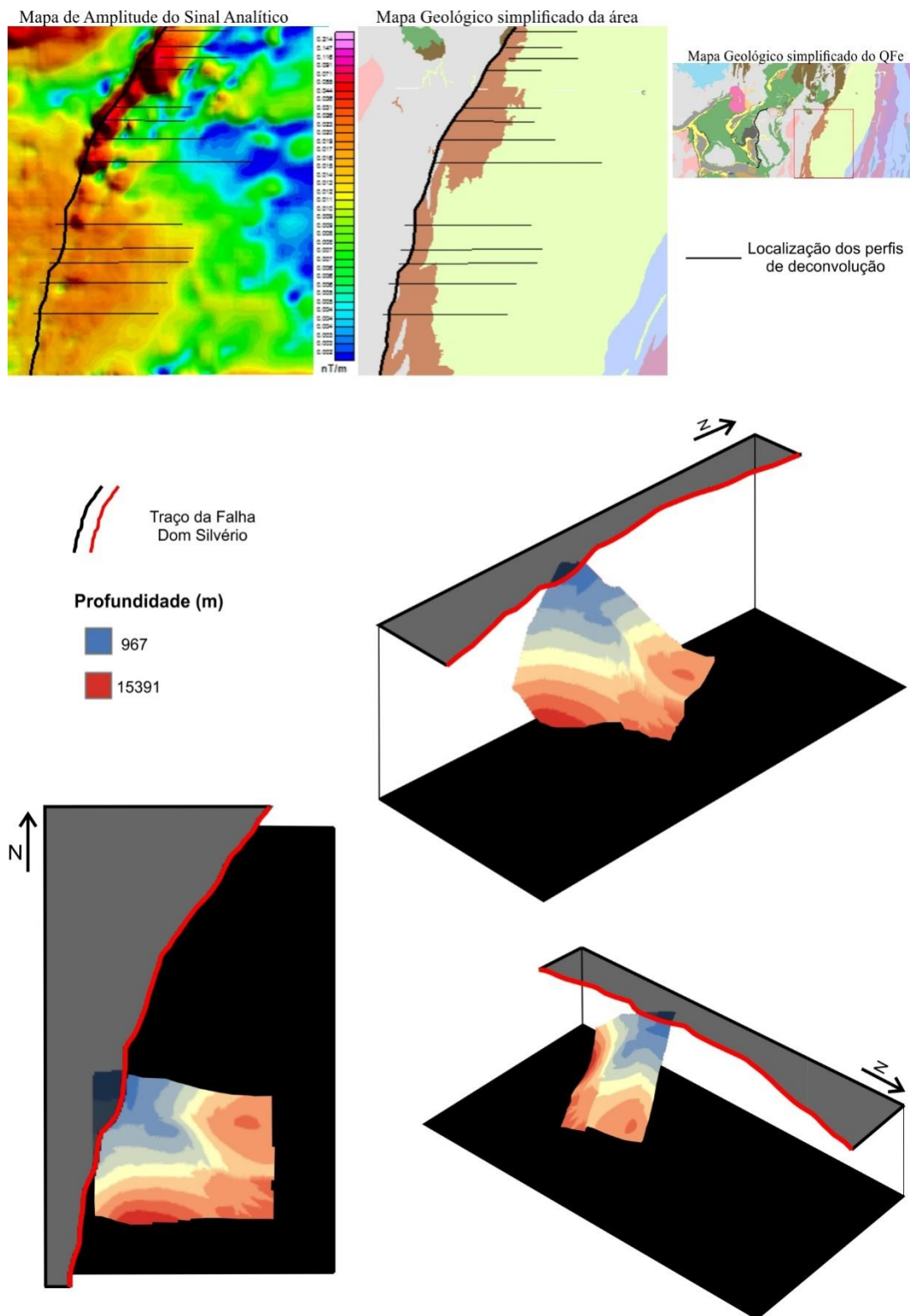


Figura 4.15 - Superfície tridimensional dos contrastes magnetométricos obtida com as krigagens dos perfis bidimensionais das inversões. As dimensões do bloco são $x=57650$ m, $y=56280$ m e $z=-16000$ m.

4.4 TRATAMENTO DOS DADOS GEOQUÍMICOS

Os dados geoquímicos provenientes da CPRM já haviam sido processados e tratados (Larizzatti *et al.* 2018). Foram selecionados e analisados os dados da área de interesse, e a partir disso os mapas e gráficos com as informações desejadas foram gerados. Trata-se de dados de sedimento de corrente, portanto podem refletir mineralizações tanto autóctones quanto alóctones.

4.4.1 Tratamento estatístico

O tratamento estatístico e a representação dos dados em mapa foram executados, com algumas adaptações, segundo as diretrizes sugeridas por Reimann *et al.* (2005a, b) e Grunsky (2010, 2017). Estes autores enfatizam a importância de se mostrar, em mapa, os padrões geoquímicos relacionados a processos geológicos.

A análise estatística dos dados foi executada em duas etapas: (1) estatística univariada; e (2) estatística multivariada.

Na primeira etapa as variáveis foram examinadas individualmente e todas log-transformadas para compensar sua distribuição de frequência assimétrica e evitar superestimar os *outliers* positivos e subestimar os *outliers* negativos (Reimann *et al.* 2008, Grunsky 2010). As associações entre os elementos foram avaliadas utilizando-se os coeficientes de correlação de Pearson.

Na segunda etapa os dados log-transformados foram avaliados via Análise de Principais Componentes - Análise de Fatores (modo-R), utilizando-se a extração de componente principal e rotação VARIMAX. Os cálculos foram executados com programa STATISTICA versão 10 (StatSoft, Inc. 2011). Esse programa realiza automaticamente a padronização das concentrações dos elementos, eliminando possíveis problemas devido a diferenças na ordem de grandeza dos resultados (Davis 1973).

4.4.2 Geração de mapas

Os dados tratados são utilizados para gerar os mapas unielementares e os gráficos *box-plot*.

A simbologia que se observa nos mapas geoquímicos é a representação dos quartis apresentados nos gráficos *box-plot* para cada elemento (exemplificado na figura 4.16) e foi baseada na metodologia utilizada por Reimann *et al.* (2008). Descrevendo a simbologia, o círculo menor representa os *outliers* inferiores; o círculo médio representa as amostras com concentrações do limite do *whisker* inferior até 25% (Q1) do total de amostras; o círculo maior se refere aos valores entre 25% (Q1) e 75% (Q3), faixa que representa as amostras de tendência central de concentrações dentro de

toda a população (esses valores representam a amplitude interquartil – AIQ – e também a faixa estimativa que representa o background da população); a cruz representa valores entre 75% e o limite do *whisker* superior (valor representado pelo algoritmo $Q3 + 1,5 \cdot AIQ$, representando o limiar), se referindo às amostras que possuem certa elevação de concentração em relação à faixa de background, ou seja, representam amostras intermediárias entre a faixa de tendência central e *outliers* superiores, estas últimas consideradas anomalias geoquímicas. A faixa de *outliers* superiores ou anomalias, dependendo de sua amplitude, pode ser dividida em anomalias de terceira ordem (amostras que possuem concentrações até o valor representado pelo algoritmo $Q3 + 3 \cdot AIQ$), segunda (amostras que possuem concentrações até o valor representado pelo algoritmo $Q3 + 4,5 \cdot AIQ$) e primeira ordem (amostras que possuem concentrações maiores que o valor representado pelo algoritmo $Q3 + 4,5 \cdot AIQ$). Nos mapas, as faixas de concentrações explicadas acima são representadas por diferentes cores (figura 4.16).

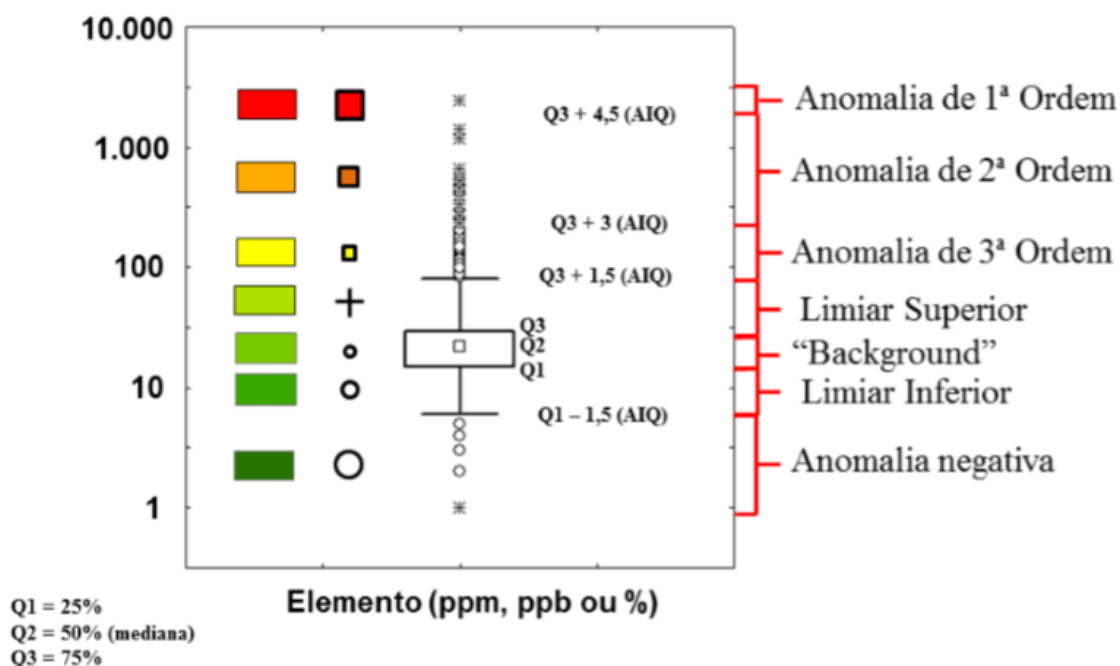


Figura 4.16 -Representação da simbologia das faixas de concentração em mapas geoquímicos baseados em gráficos *box-plot*.

Ouro (Au)

Ao analisar os dados unielementares do ouro na região nota-se a forte associação do elemento com as rochas do Supergrupo Rio das Velhas (em verde no mapa da figura 4.17).

O *greenstone belt* Rio das Velhas, de idade arqueana, hospeda importantes depósitos de ouro orogênicos na região do Quadrilátero Ferrífero. São três os principais estilos de depósitos: (1)

controlados estruturalmente, com zonas de substituição de sulfetos em Formações Ferríferas Bandadas (BIF); (2) com sulfetos disseminados e ouro em rochas alteradas hidrotermalmente junto a zonas de cisalhamento; e (3) com veios e vênulas de quartzo-carbonato-sulfetos em rochas vulcânicas máficas, ultramáficas e félsicas, e também em rochas sedimentares clásticas (Lobato *et al.* 2001).

Observa-se a tendência das ocorrências acima do background ao longo do traço da falha, evidenciando um enriquecimento que segue *trend* N-S, o que pode estar relacionado com o controle estrutural da mineralização nesta área. Observa-se que a maior anomalia, de terceira ordem, se situa próxima ao alto estrutural da serra do Caraça.

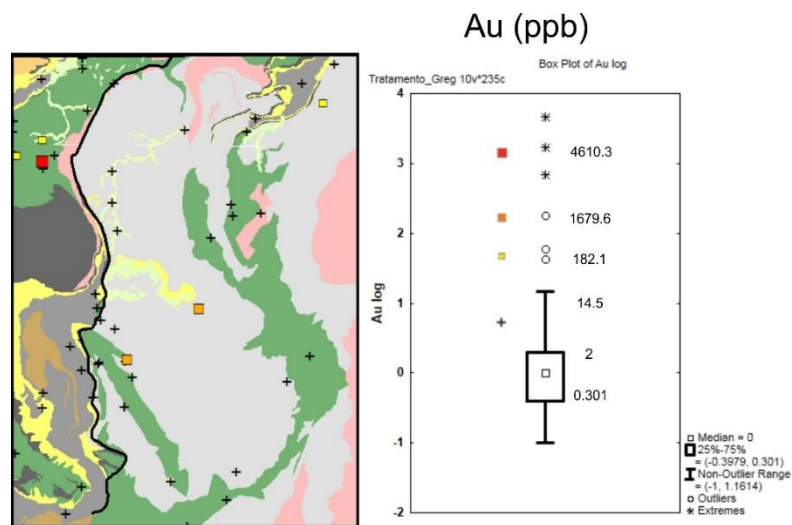


Figura 4.17 -Distribuição espacial do Au em sedimentos de corrente ao longo da área de estudo.

Arsênio (As)

O arsênio exibe um enriquecimento em quase todos os depósitos auríferos e há uma coerência marcante entre ouro e arsênio durante os processos hipógenos e supérgenos (Boyle 1979). Isso faz do As um excelente elemento indicador de depósitos auríferos.

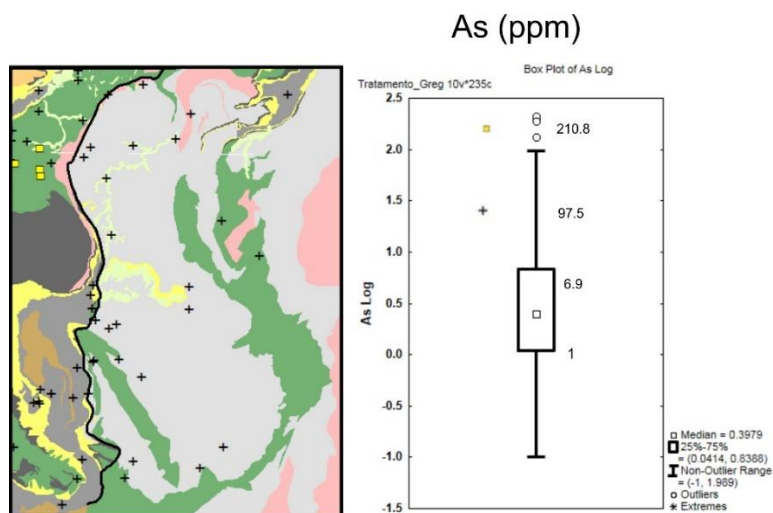


Figura 4.18 - Distribuição espacial do As em sedimentos de corrente ao longo da área de estudo.

A figura 4.18 apresenta o mapa de distribuição de As nos sedimentos de corrente, onde é nítido notar o enriquecimento do elemento seguindo as mesmas tendências do ouro.

Antimônio (Sb)

Segundo Boyle (1979), o antimônio apresenta enriquecimento na maior parte dos depósitos auríferos hipógenos e nos depósitos tipo veio e *lode* aparece nas maiores concentrações. Há uma coerência no comportamento de ambos elementos tanto em processos hipógenos quanto supérgenos e isto, a exemplo do As, também faz do Sb um interessante elemento indicador de depósitos auríferos.

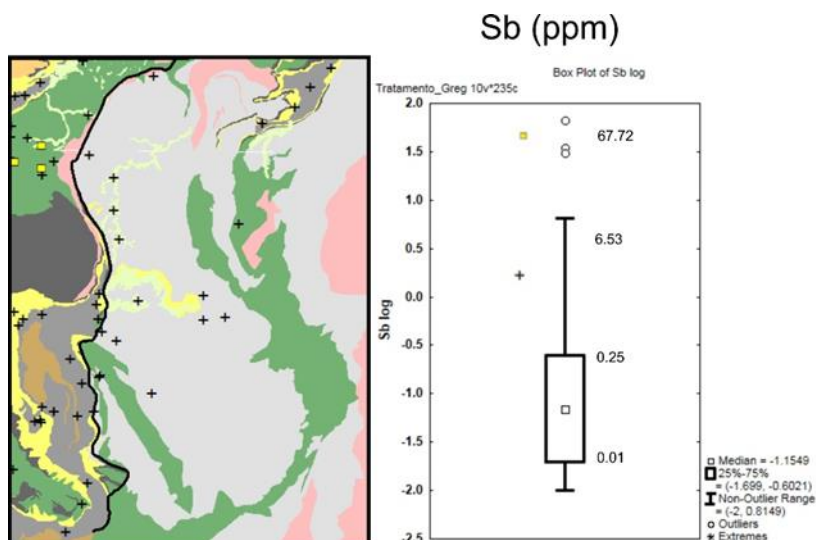


Figura 4.19 - Distribuição espacial do Sb em sedimentos de corrente ao longo da área de estudo.

Como esperado, assim como os valores do As, o elemento Sb possui assinatura nas amostras de sedimento de corrente muito próximas as do ouro, seguindo o mesmo *trend* principal ao longo do traço da Falha de Água Quente.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados da integração dos dados bibliográficos, geofísicos, geoquímicos e geológicos deste trabalho. A análise geofísica para esta integração foi dividida em análise qualitativa, onde será feita a interpretação dos mapas gravimétricos e magnetométricos; e quantitativa, onde os perfis de inversão bidimensionais, após serem interpolados, deram origem ao modelo 3D do objeto de estudo. Em ambos os tópicos foram feitas as integrações com os dados geoquímicos da região da Falha de Água Quente, a fim de correlacionar as interpretações.

5.2 RESULTADOS QUALITATIVOS

A interpretação dos mapas geofísicos busca evidenciar principais estruturas da área de estudo, assim como a direção preferencial dos lineamentos gravimétricos e magnetométricos.

5.2.1 Mapa gravimétrico – Anomalia Bouguer

O mapa de anomalia gravimétrica Bouguer geralmente apresenta anomalias sobrepostas de diferentes fontes, sendo a resposta média das anomalias das fontes em profundidade. O traço da Falha de Água Quente, linha preta na figura 5.1, ajusta-se em um contraste gravimétrico bem marcado na porção leste do Quadrilátero Ferrífero, com valores variando entre -77,8 e -32,8 mGal.

O QFe em si é representado por altos gravimétricos, com valores de anomalia maiores de -49,8 mGal, tendo as serras bem marcadas pelos valores mais altos devida a alta densidade dos minerais que as constituem. Há uma exceção, porém, no alto estrutural mais elevado da região, a serra do Caraça (em destaque cinza na figura 5.1). Em superfície, o terreno corresponde a rochas da Fm. Moeda (*Baltazar et al.* 2005), e chega a altitudes superiores a 2.000 metros. Mesmo sendo topograficamente alto, os valores de anomalia Bouguer são menores que -110,2 mGal. Essa anomalia mostra as mais altas profundidades para o embasamento geológico da região. Este resultado sugere a interpretação de que houve um fenômeno de compensação isostática local quando o espesso pacote de rochas sedimentares clásticas do Supergrupo Minas se acomodou sobre as rochas do *greenstone belt* Rio das Velhas. A massa negativa da raiz da montanha cancela a massa positiva nos limites do longo comprimento de onda (Turcotte & Schubert 2002).

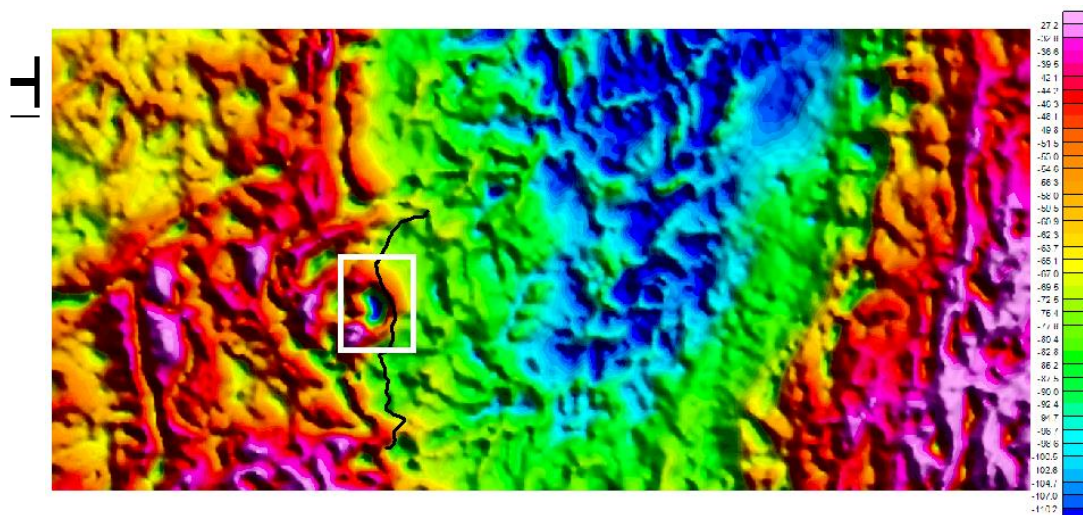


Figura 5.1 – Mapa de anomalia Bouguer regional. Em destaque a anomalia negativa da serra do Caraça.

A região central da área de estudos (Figura 5.2A) corresponde ao domínio dos complexos metamórficos da região. São caracterizados pelos baixos valores de anomalia Bouguer devido ao contraste negativo de densidade com as demais rochas da região, como por exemplo as serras quartzíticas e formações ferríferas bandadas do QFe. Os valores variam entre -75,4 e -107 mGal. Podemos, ainda, observar um lineamento em meio a região de mais baixos valores de anomalia (Figura 5.2B), tendo uma medida um pouco elevada em relação a seu meio. Trata-se da Zona de Cisalhamento Dom Silvério, marcada por um pequeno contraste no mapa gravimétrico.

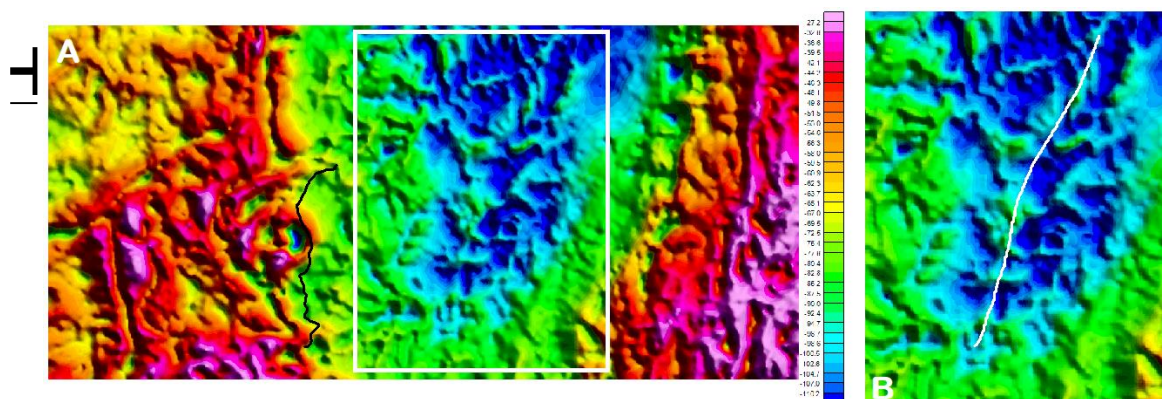


Figura 5.2 – Anomalia gravimétrica da porção central da área. Em destaque a Falha Dom Silvério.

A leste da área de estudo é possível observar outra região de altos valores de anomalia Bouguer (Figura 5.3A). Trata-se dos arredores da zona de sutura de Abre Campo (Figura 5.3B), onde, devido a reativação e deformação do terreno, além de ser zona de forte impacto de massas, observa-se um padrão de altos gravimétricos, com valores entre -44,2 e -27,2 mGal, gerando um forte contraste gravimétrico com as regiões próximas.

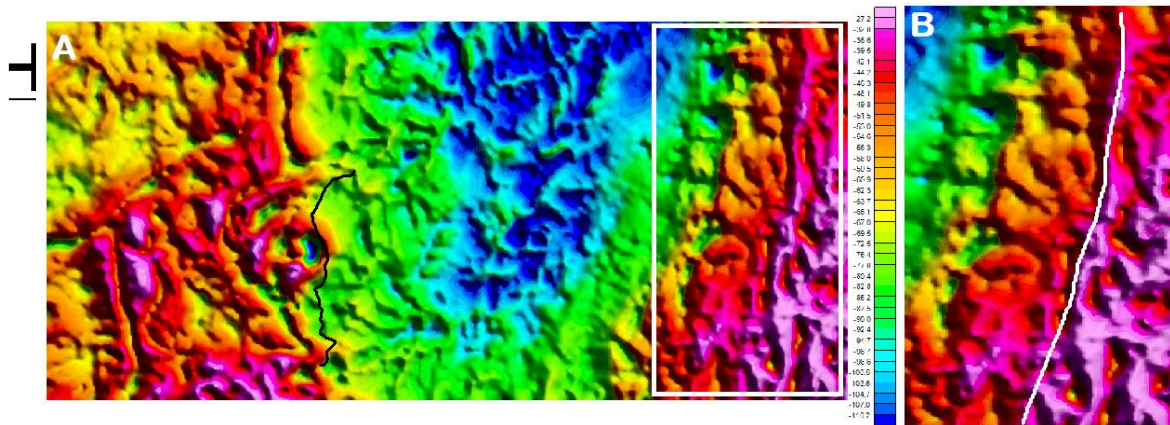


Figura 5.3 -Anomalia gravimétrica da porção leste da área, com destaque para a Zona de Cisalhamento de Abre Campo.

Ao observarmos os dados geoquímicos de sedimento de corrente da área que dizem respeito a concentração de ouro (Figura 5.4), verifica-se uma forte associação entre essas ocorrências e regiões de altos contrastes gravimétricos. Esse contraste se deve à alta densidade de um corpo, ou uma estrutura geológica sulfetada, hospedado em rochas de menores densidades relativas. Em áreas cratônicas erodidas, como no Canadá ou Escandinávia, anomalias Bouguer com comprimento de onda muito pequeno (contraste em mapa) são produtos, comumente, de corpos mineralizados próximos a superfície (Lowrie 2007).

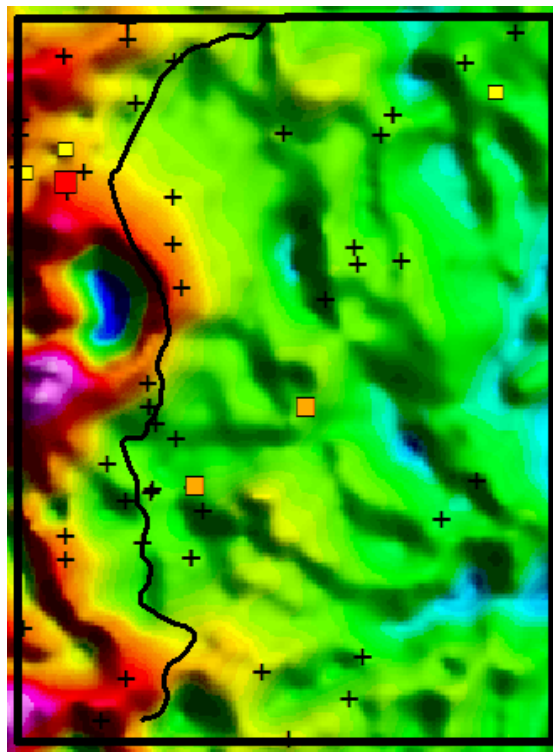


Figura 5.4 – Integração dos dados geoquímicos ao mapa gravimétrico da anomalia Bouguer. A simbologia adota os padrões mostrados na figura 4.16.

Os lineamentos gravimétricos mais marcantes foram traçados com o auxílio dos mapas *free-air*, Anomalia Bouguer, e suas derivadas dx, dy e dz. (Figura 5.5A). Os dados obtidos foram tratados no programa OpenStereo, de modo que conseguíssemos determinar a orientação preferencial dos lineamentos, como observado na roseta da figura 5.5B.

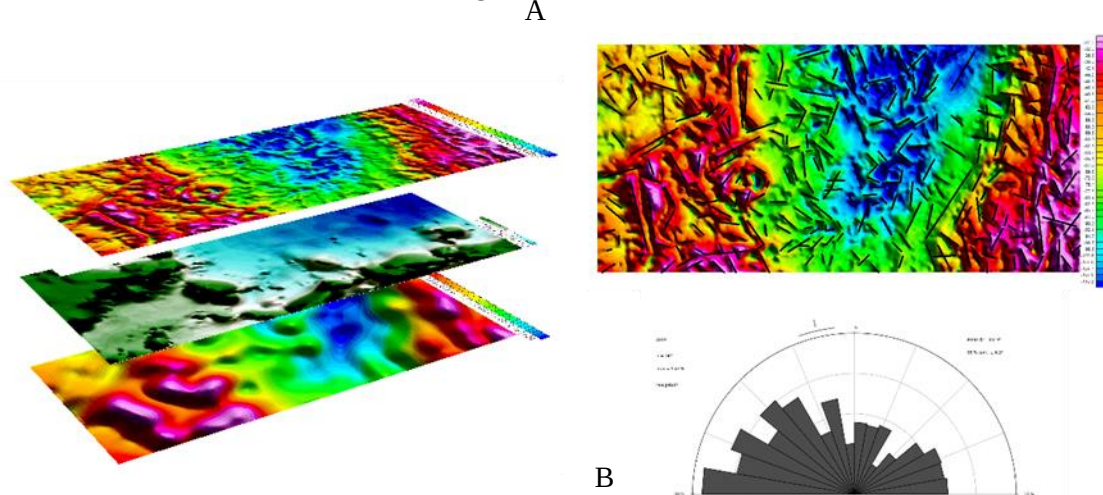


Figura 5.5 – Lineamentos gravimétricos. A) mapas gravimétricos utilizados para traçar os lineamentos; B) roseta das direções preferencias dos lineamentos gravimétricos.

5.2.2 Mapa magnetométrico – Amplitude do Sinal Analítico (ASA)

O mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) (Figura 5.6) possui anomalias demarcadas pelas heterogeneidades da susceptibilidade magnética da região. A interpretação magnetométrica qualitativa da área fundamentou-se principalmente sobre o ASA, devido a sua característica monopolar, porém suas derivadas foram utilizadas como forma de auxílio. A área possui mais detalhe em relação ao mapa gravimétrico de Bouguer, em razão de ser produto de aerolevantamentos e poder ser utilizado em escalas que evidenciam melhor a estrutura desejada (em preto na figura 5.6).

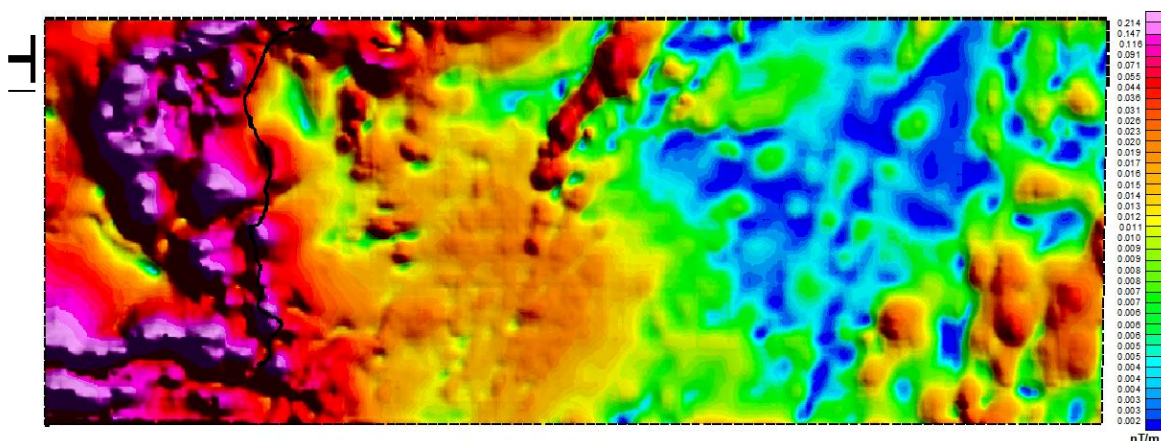


Figura 5.6 – Mapa magnetométrico da Amplitude do Sinal Analítico. Em preto o traço da Falha de Água Quente.

A Falha de Água Quente se situa em um alto magnetométrico, indicando alta susceptibilidade magnética. Assim como a estrutura, as serras do Quadrilátero Ferrífero são responsáveis pelos maiores valores de susceptibilidade da área de estudo (Figura 5.7), devido, principalmente, a composição das mesmas, que contam com formações ferríferas repletas de óxidos metálicos. Os valores variam de 0,01228 nT/m nas regiões do embasamento até 0,22114 nT/m nas serras.

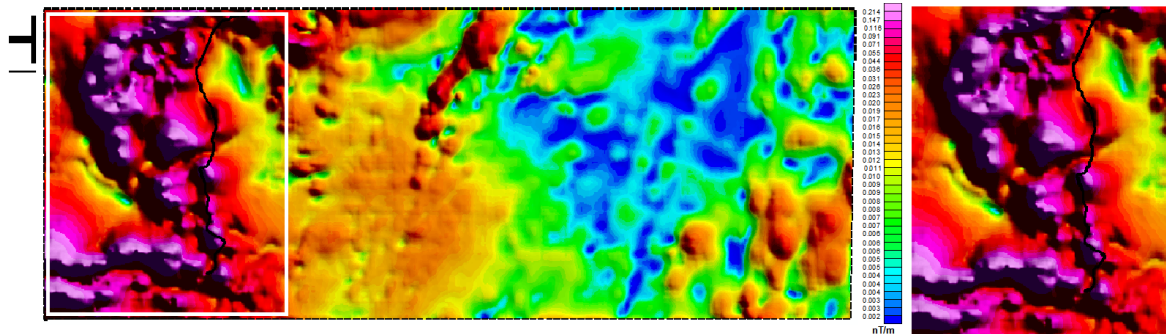


Figura 5.7 -Mapa magnetométrico evidenciando a região leste do Quadrilátero Ferrífero.

A leste do QFe é possível observar outra região com altos valores de susceptibilidade magnética, seguindo um *trend* linear norte-sul, marcando um forte lineamento magnético com valores que chegam a 0,04596 nT/m (Figura 5.8). Trata-se da Zona de Cisalhamento Dom Silvério, responsável por um forte contraste magnetométrico devido a reativação de estruturas e por ser uma zona percolada por materiais magnéticos.

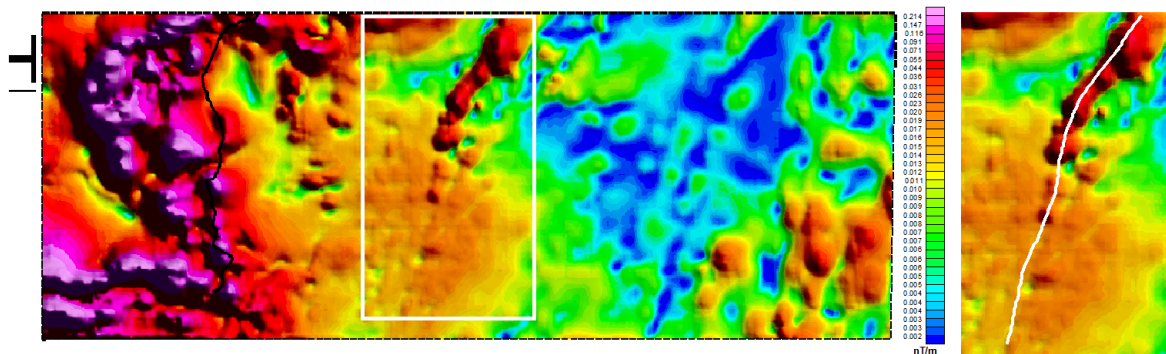


Figura 5.8 - Mapa magnetométrico evidenciando a região da Falha Dom Silvério

A porção mais a leste da área de estudo é dominada por baixos valores de susceptibilidade (Figura 5.9), com valores que variam de 0,00226 a 0,01760 nT/m. Trata-se dos complexos metamórficos que possuem baixa magnetização em sua composição, quando comparados aos demais elementos do mapa. Nesta região destaca-se um lineamento magnético de baixo contraste em meio aos baixos valores, a Zona de Cisalhamento de Abre Campo (em preto na figura 5.9).

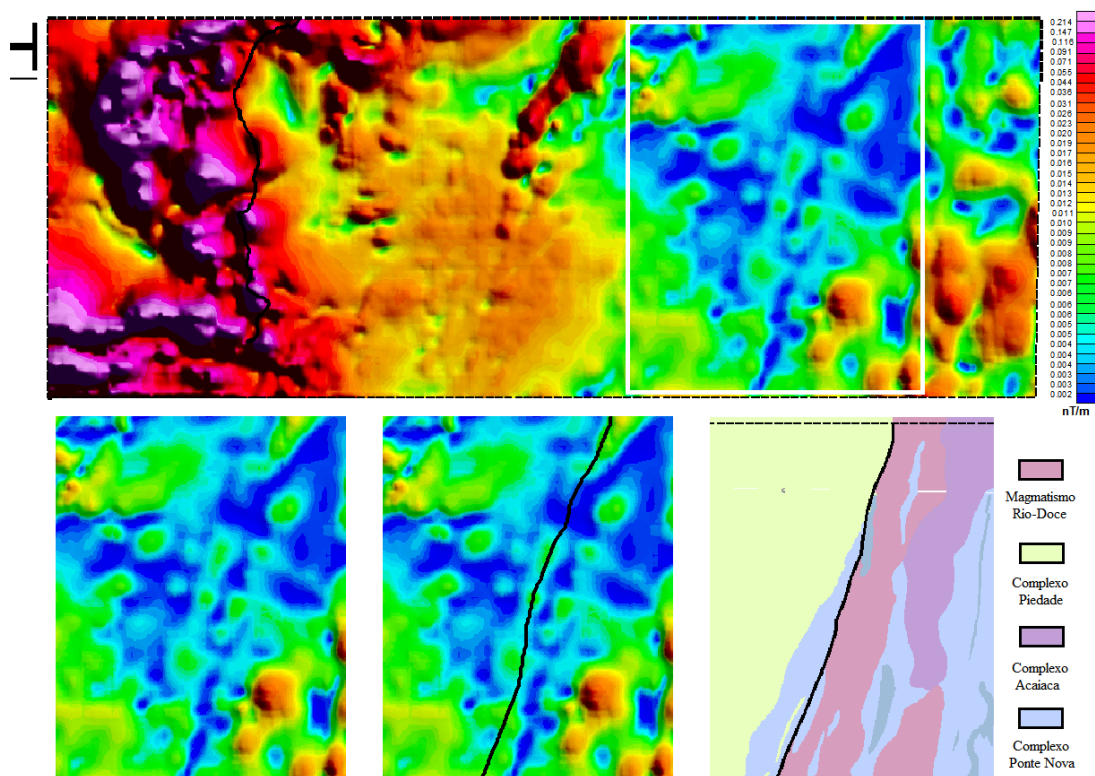


Figura 5.9 -Região da Zona de Cisalhamento de Abre Campo. Relação entre as respostas magnetométricas e a geologia da área.

Como era de se esperar, as ocorrências minerais de ouro na região próxima a falha estão sobre altos valores magnéticos (Figura 5.10). Além do ouro ser extremamente susceptível à magnetização, as ocorrências geralmente estão relacionadas às serras com minério de ferro, resultando em fortes valores magnetométricos.

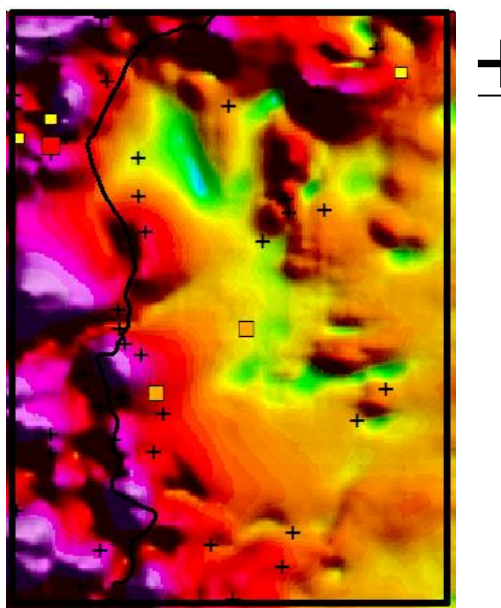


Figura 5.10 -Integração dos dados geoquímicos ao mapa magnetométricoASA. A simbologia adota os padrões mostrados na figura 4.16.

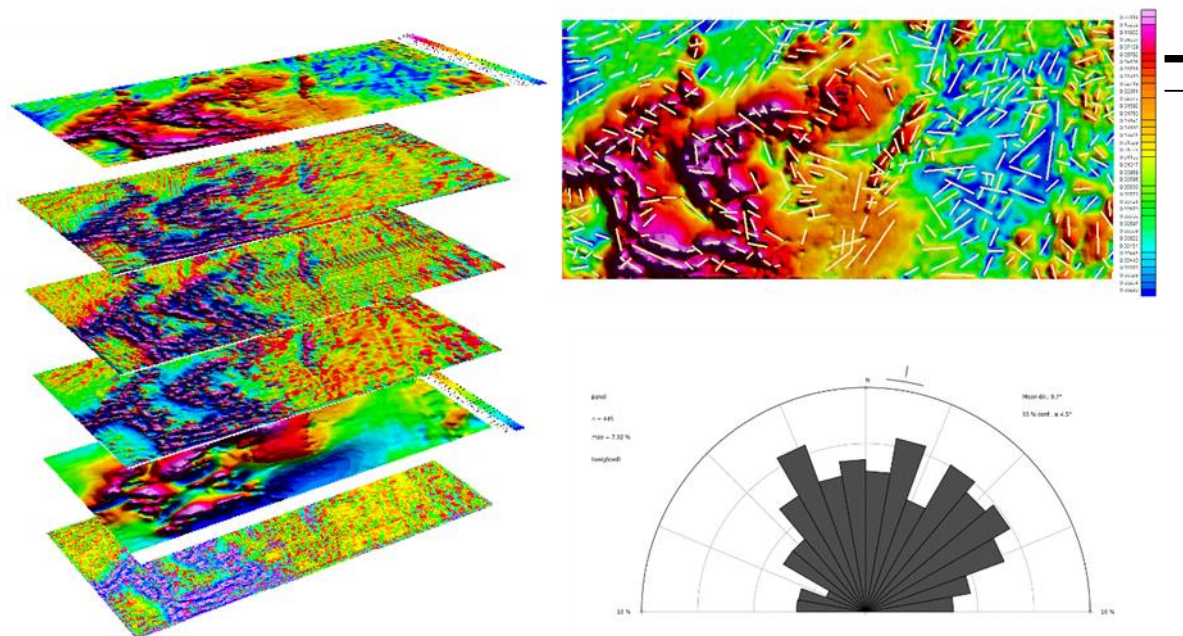


Figura 5.11 - Lineamentos magnetométricos. A) mapas magnetométricos (ASA, Campo Total, dx, dy, dz e dz^2) utilizados para traçar os lineamentos; B) roseta das direções preferencias dos lineamentos magnetométricos.

Os perfis de inversão bidimensionais e sua interpolação serão discutidos neste tópico de forma integrada. Para facilitar a discussão e consequente entendimento, os perfis de deconvolução serão abrangidos de norte para sul e de acordo com sua similaridade geométrica, onde serão tomados como exemplo os mais representativos. Todos os perfis serão apresentados nos anexos, e os dados dos mesmos estão contidos no capítulo 4.

5.3.1 Perfis de deconvolução de Euler

Perfis gravimétricos

Os perfis de deconvolução dos dados gravimétricos possuem respostas similares por toda a extensão da falha. Como já mencionado, os perfis foram traçados de forma regional devido ao espaçamento de aquisição dos dados. Por isso, serão destacadas no perfil as regiões de resposta da estrutura investigada.

O perfil 16, localizado na porção central da estrutura (Figura 5.12), mostra respostas de toda a área de estudo. No início do perfil podemos observar uma estrutura em guirlanda, resposta característica de rochas densas e deformadas do Quadrilátero Ferrífero. As anomalias associadas com a Falha de Água Quente foram interpretadas em sua localização esperada, de forma arbitrária neste quesito, devido, principalmente, ao forte contraste de densidade onde apresenta alto ângulo de mergulho com leve inflexão para oeste. No final do perfil outra anomalia com forte mergulho é observada, e foi interpretada como a resposta da Zona de Cisalhamento de Abre Campo. As fontes das anomalias chegam a profundidades de mais de 15000 metros na região da falha e 12500 na estrutura que representa o QFe.

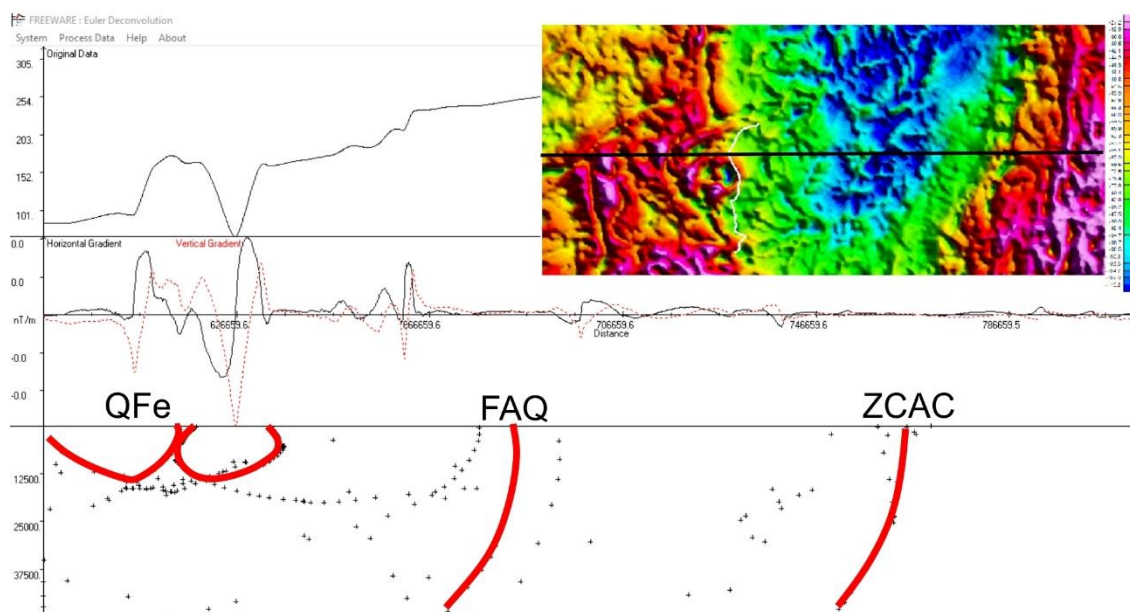


Figura 5.12 -Perfil gravimétrico posicionado na porção central da área, passando a norte do QFe. Os asteriscos são as profundidades estimadas das anomalias, e em vermelho a interpretação das anomalias vistas. Em vermelho a interpretação das superfícies de contraste gravimétrico.

Nos perfis 18 e 19 (Figura 5.13) a anomalia negativa da serra do Caraça é evidenciada. O perfil 18 é traçado por cima dos valores baixos, e o que vemos é a falta de estimativas de profundidades rasas. A profundidade estimada é de 37000 metros. Quando passamos ao perfil 19 as profundidades voltam para cerca de 12000 metros. Em ambos os perfis é possível observar a característica anomalia na zona da falha, adquirindo forte mergulho, levemente flexionada e chegando a profundidades próximas de 15000 metros.

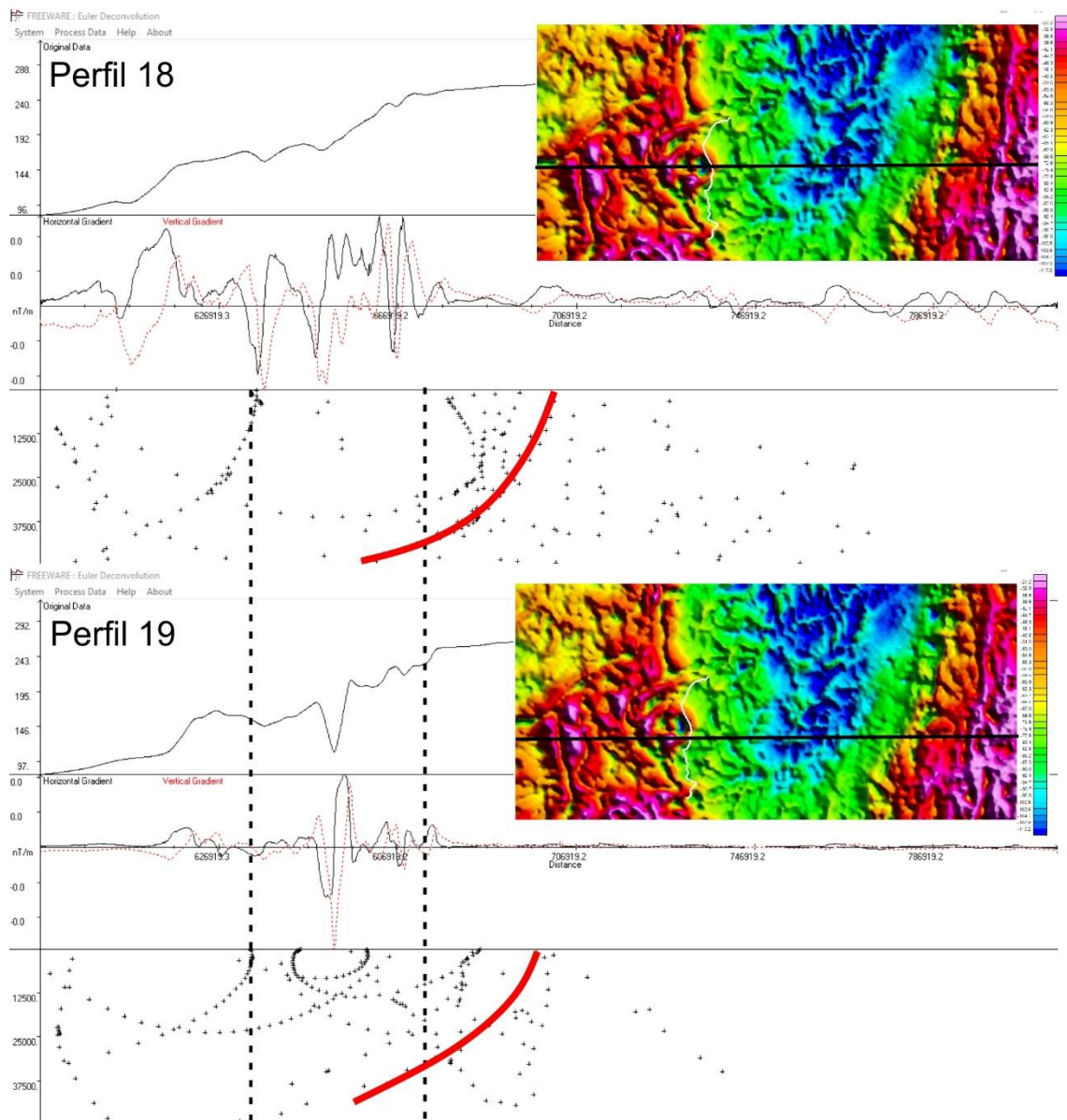


Figura 5.13 – Perfis gravimétricos evidenciando a anomalia negativa da serra do Caraça. Os asteriscos são as profundidades estimadas das anomalias, e em vermelho a interpretação das anomalias vistas. Em vermelho a interpretação das superfícies de contraste gravimétrico.

Por fim, o perfil 22 (Figura 5.14) mostra claramente a relação entre o Quadrilátero Ferrífero (QFe), a Falha de Água Quente (FAQ), a Falha Dom Silvério (FDS) e a Zona de Cisalhamento de Abre Campo (ZCAC). Observa-se, de oeste para leste: a região dobrada e mais rasa do QFe, seguida pela FAQ exibindo caráter lístrico, seguida pela FDS que mostra forte mergulho retilíneo se juntando ao fim à zona de sutura de Abre Campo. Interessante observar a aparência de um sistema de descolamento basal neste perfil, tendo a Falha de Água Quente e a Falha Dom Silvério como possíveis ramificações da ZCAC, ligadas em profundidade, como proposto por Gomes (2018).

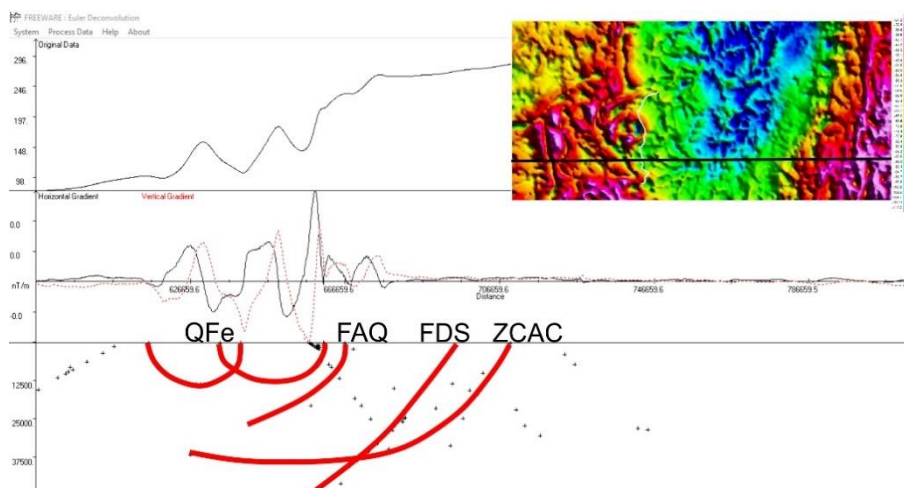


Figura 5.14 – Perfil gravimétrico localizado na porção sul da área, passando pela região central do QFe. Os asteriscos são as profundidades estimadas das anomalias, e em vermelho a interpretação das anomalias vistas. Em vermelho a interpretação das superfícies de contraste gravimétrico.

Nota-se que nos perfis bidimensionais dos dados gravimétricos as inflexões das respostas interpretadas para as estruturas são para oeste, quando o esperado seria para leste, assim como visto em campo e nos perfis magnetométricos. Isto pode ser explicado por uma limitação do método da deconvolução de Euler, que consiste em uma estimativa das profundidades dos contrastes das propriedades físicas por meios matemáticos, de forma que quando aplicamos grandes janelas de observação muitos dados são considerados, podendo haver interferências entre as diversas fontes de anomalias da região. O resultado é a tentativa de interpolação para achar um ponto médio entre as fontes, causando a distorção da nuvem de respostas (representada pelos asteriscos). Isso se deve, principalmente, à taxa de amostragem ser muito espaçada, como no caso dos dados obtidos por satélite.

É importante ressaltar que nem sempre a nuvem de respostas reflete a forma geométrica real dos corpos em profundidade.

Perfis magnetométricos – Falha da Água Quente

Os perfis 2 e 10 (Figura 5. 15), distribuídos de norte a sul ao longo do traço da Falha Água Quente nas porções inicial e central da estrutura, têm geometria que configura falha lítrica. O perfil 10 apresenta profundidade máxima de aproximadamente 5000 metros, e o perfil 2 chega a 4000 metros. É possível ver que no perfil 2 a estrutura começa com um mergulho acentuado e, conforme avança para leste, vai se horizontalizando mantendo a profundidade.

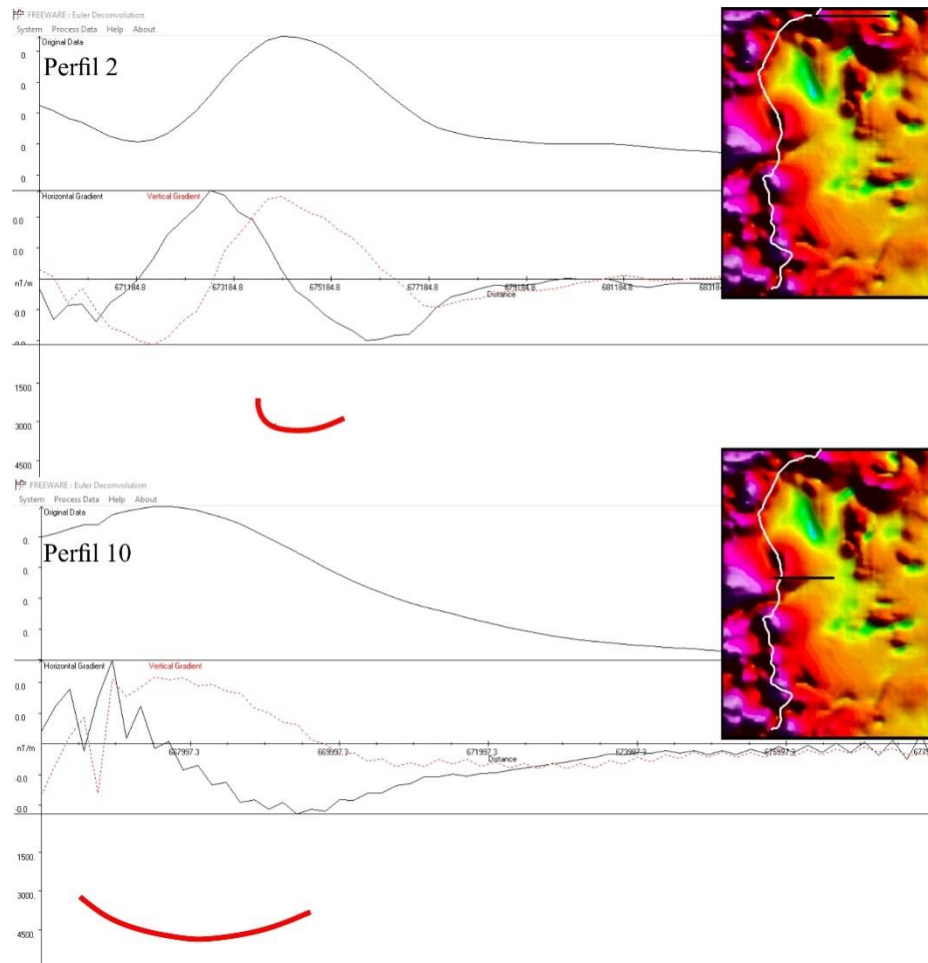


Figura 5.15 – Perfis magnetométricos que cruzam a Falha de Água Quente. Em vermelho a interpretação das superfícies de contraste magnetométrico.

A figura 5.16 mostra o perfil 4, que tem uma assinatura rasa e horizontalizada. Esta região é marcada por um forte alto estrutural magnetométrico, como mostrado no modelo 3D. Isso representa uma fonte magnética mais rasa, e pode ser interpretado como algum obstáculo ou alto estrutural que não permitiu a propagação da falha. Ferreira Filho & Fonseca (2001) propõe o particionamento da deformação da Falha de Água Quente devido à obstáculos no antepaís, como a serra do Caraça. Pelo mapa nota-se certa proximidade entre o alto magnetométrico e a serra (destacada pelo quadrado).

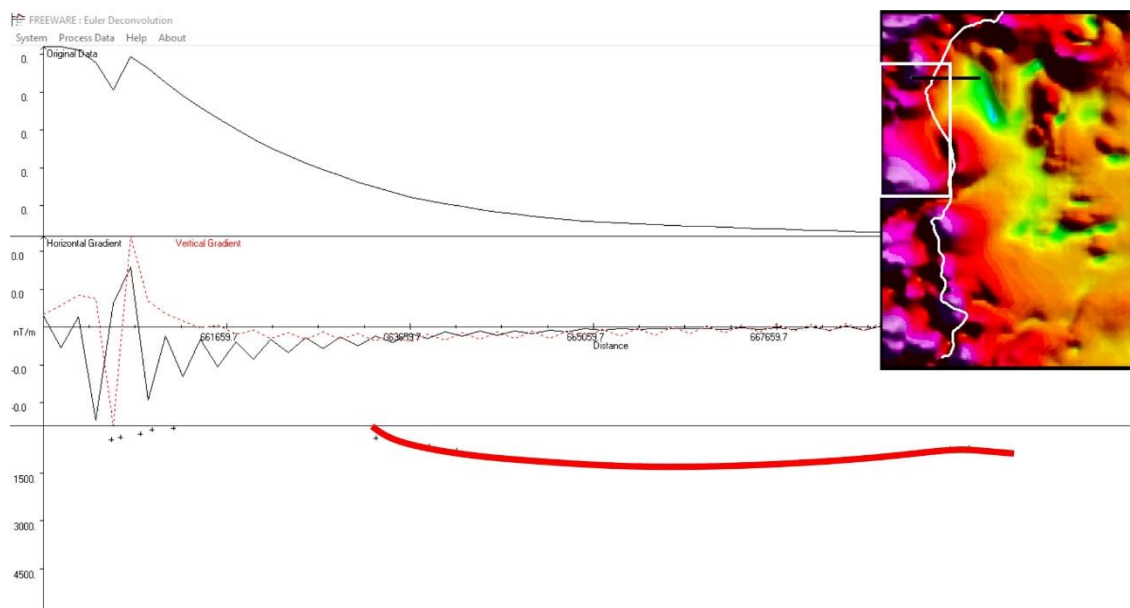


Figura 5.16 – Perfil magnetométrico na porção norte da FAQ evidenciando o alto estrutural na região da serra do Caraça (localizado no quadrado branco do mapa). Em vermelho a interpretação da superfície de contraste magnetométrico.

Os perfis 15 e 22 (Figura 5.17) mostram regiões onde a falha apresenta mergulho contínuo, agindo como uma espécie de rampa, e atinge as maiores profundidades estimadas pelos perfis confeccionados, chegando a até 8500 metros. O perfil 15 mostra uma grande extensão da estrutura, com um mergulho de cerca de 30°. Ferreira Filho & Fonseca (2001) descrevem a estrutura em sua porção sul como falhas de empurrão de mais baixo ângulo de mergulho (inferior a 30°), com direção geral N-NW. Os autores ainda descrevem escamas de falha orientadas norte-sul nesta porção da falha, e no perfil 22 é possível observar uma resposta que se assemelha a uma lasca, porém sem continuidade lateral nos demais perfis.

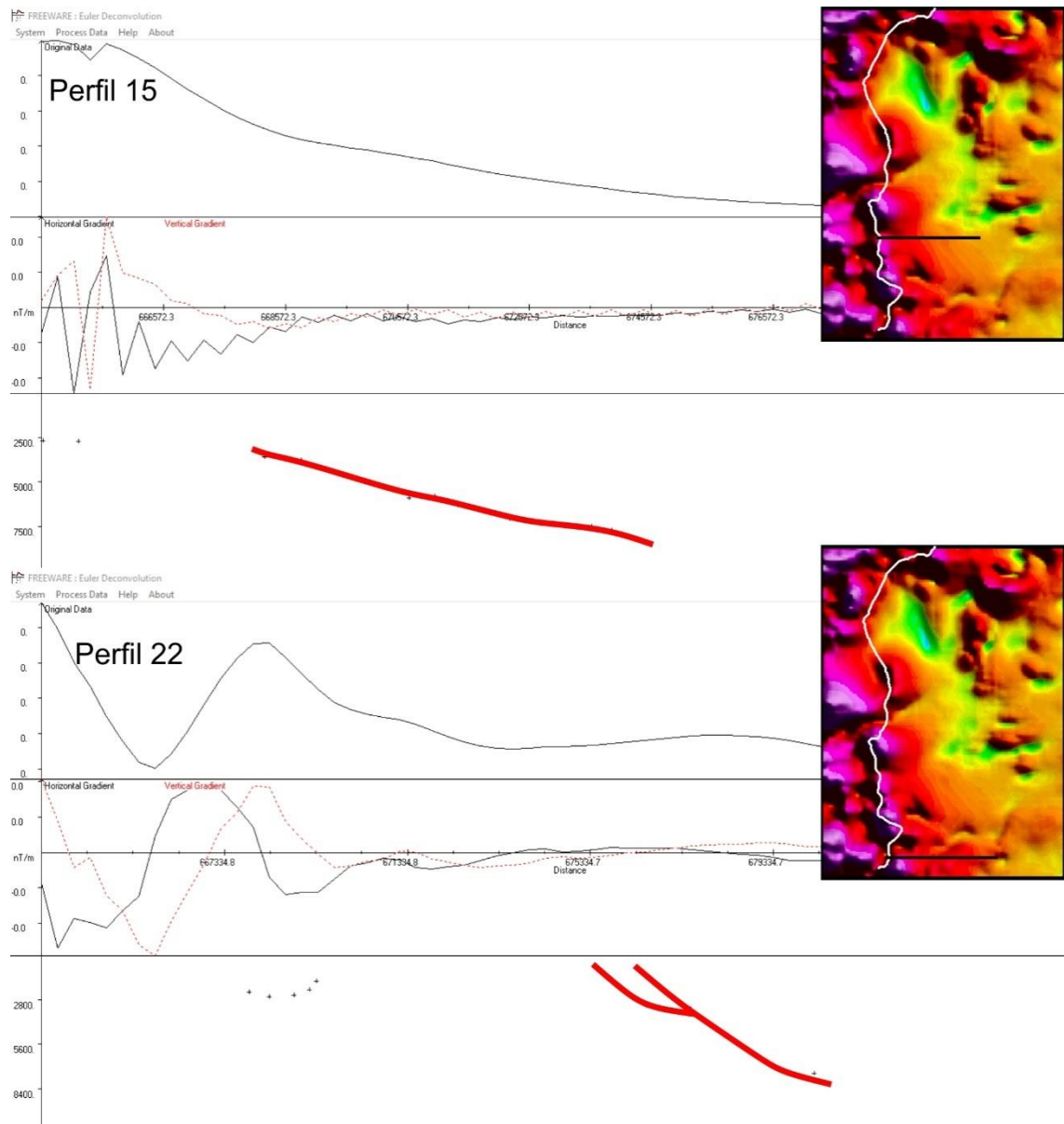


Figura 5.17 – Perfis magnetométricos localizados na porção sul da falha. Em vermelho a interpretação das superfícies de contraste magnetométrico.

Perfis magnetométricos – Falha Dom Silvério

Na região da Falha Dom Silvério foram feitos menos perfis, e em lugares estratégicos, a fim de investigar a continuidade da estrutura em profundidade. Tendo como referência a seção geológica feita por Gomes (2018) (Figura 5.25), e sabendo que a falha possui caráter transcorrente (Endo 1997), era de se esperar algo com forte mergulho e de profundidade maior que 10 km, além de ter continuidade lateral. Os perfis 10 e 13 (Figura 5.18) evidenciam uma profundidade estimada de aproximadamente 15000 metros. Os perfis ainda mostram que a estrutura possui ampla continuidade em profundidade.

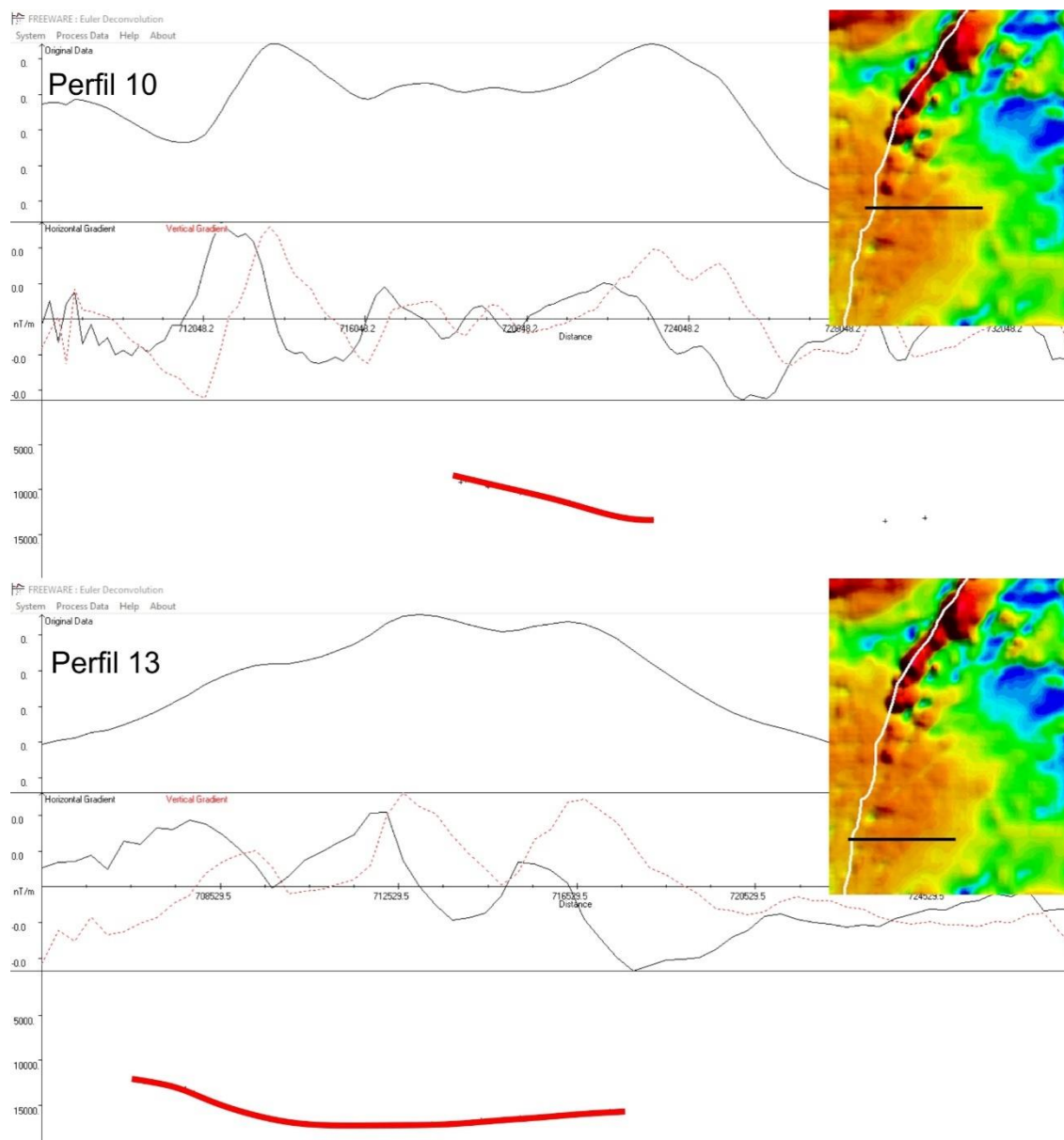


Figura 5.18 – Perfis magnetométricos ao longo da Falha Dom Silvério. Em vermelho a interpretação das superfícies de contraste magnetométrico.

5.3.2 Modelos tridimensionais

O modelo gravimétrico regional teve grande importância para o trabalho. Não só pela visualização dos contrastes da área, mas pela capacidade de mostrar a continuidade dos mesmos. Na Figura 5.19 é possível observar a resposta de 3 estruturas majoritárias que geram forte contraste das fontes gravimétricas. Importante notar que a posição dos traços das falhas em superfície mostra que as estruturas condizem com o modelo.

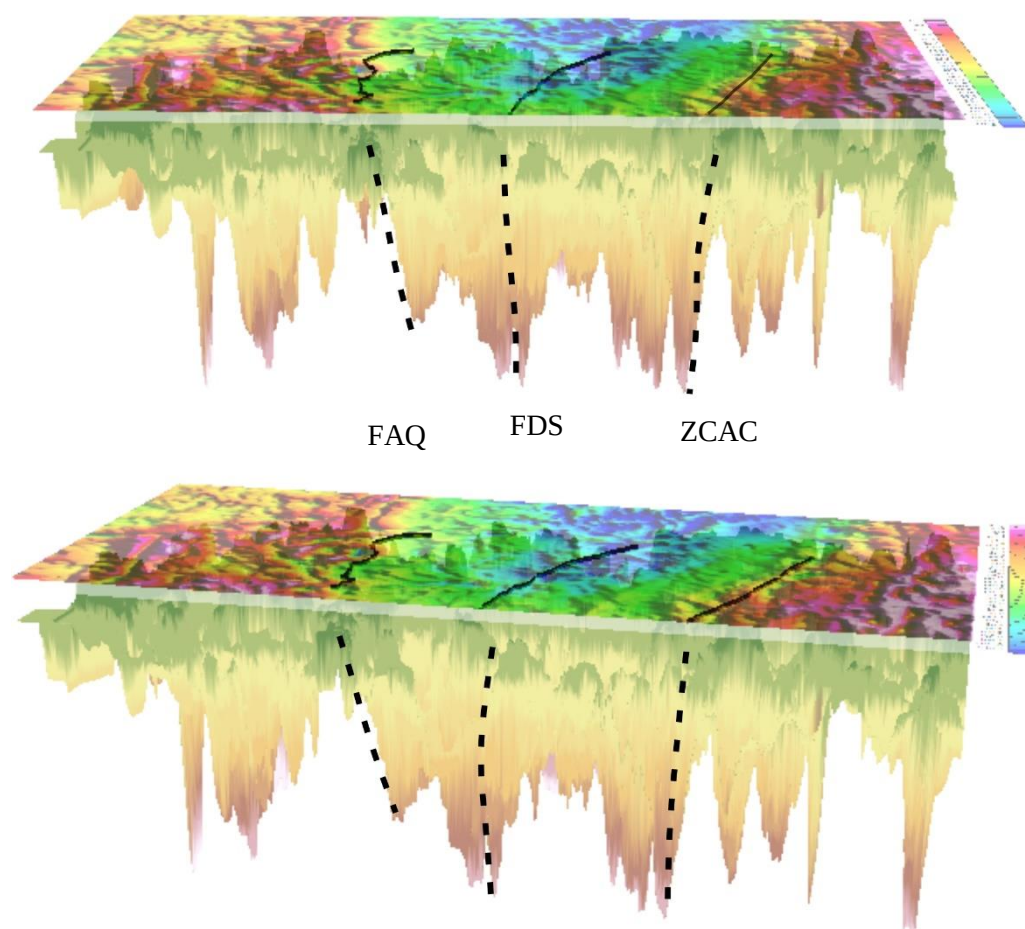


Figura 5.19 – Bloco tridimensional da área gerado a partir de dados de inversão gravimétrica, e a posição dos contrastes gravimétricos que representam as discontinuidades em superfície. FAQ – Falha de Água Quente; FDS – Falha Dom Silvério; ZCAC – Zona de Cisalhamento de Abre Campo. A coluna de cor do mapa gravimétrico age como a seta do norte nesta imagem, onde a cor rosa representa os altos valores e aponta para o norte.

A Figura 5.20 mostra as tendências da continuidade das estruturas em profundidade. Observa-se que a Falha de Água Quente tem grande extensão leste-oeste, chegando a profundidades de até 10000 metros e mantendo continuidade até a região de Abre Campo. A Falha Dom Silvério, por sua vez, possui *trend* norte-sul, e chega a profundidades de até 15000 metros. Isso reflete fortemente o caráter transcorrente da Falha Dom Silvério (Endo 1997).

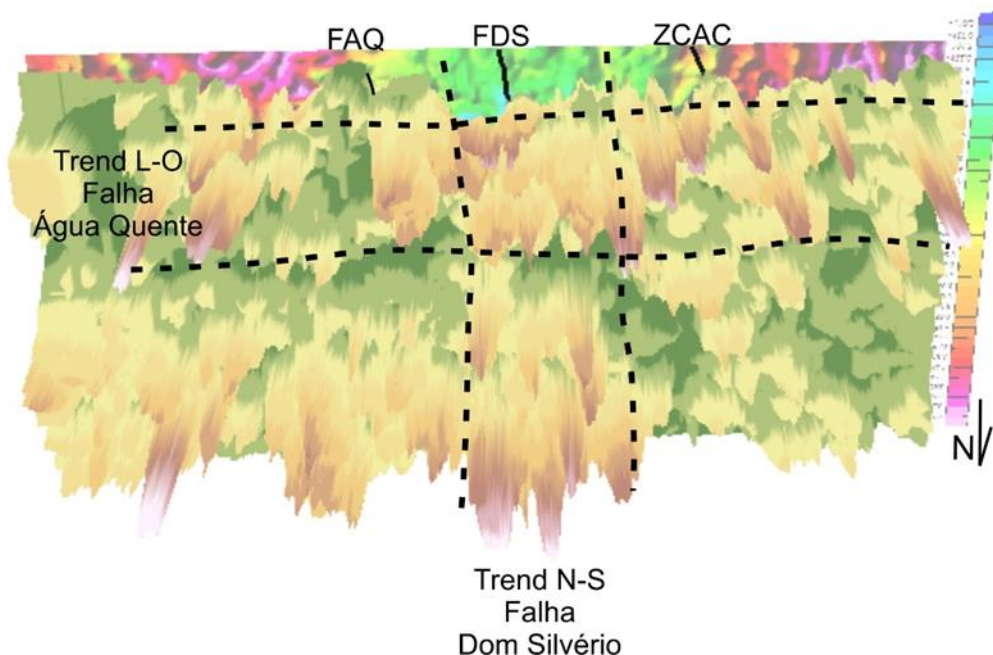


Figura 5.20 – Bloco tridimensional gravimétrico visto de baixo para cima evidenciando a continuidade das anomalias em profundidade em escala regional. FAQ – Falha de Água Quente; FDS – Falha Dom Silvério; ZCAC – Zona de Cisalhamento de Abre Campo.

Esta visualização, em conjunto com o trabalho de Gomes (2018) e as observações de campo, nos permite interpretar a conjuntura das estruturas em profundidade e sua associação. Nota-se que na altura do traço da FAQ, há uma grande extensão da anomalia em profundidade, que se junta à Falha Dom Silvério e, posteriormente, chega à Zona de Cisalhamento de Abre Campo. É um indício geofísico de uma superfície de descolamento basal. Esta superfície é conectada à transcorrência Dom Silvério, que possui mergulho mais forte e atinge maiores profundidades, além de possuir forte continuidade norte-sul.

Os modelos magnetométricos permitiram a visualização das superfícies das estruturas em maior detalhe, onde foi possível interpretar não só a geometria e a continuidade em profundidade, mas também suas heterogeneidades magnetométricas.

A superfície da Falha de Água Quente (Figura 5.21) mostra um alto estrutural em sua porção norte. Ferreira Filho (1999) e Ferreira Filho & Fonseca (2001) propõem o particionamento da falha devido à obstáculos no antepaís, e atribuem à serra do Caraça o papel principal de tal. Pelo mapa nota-se a proximidade (evidenciada pelo quadrado) da serra com a localização do alto magnetométrico, podendo o Caraça ter servido de obstáculo e impedindo a propagação da estrutura em profundidade. Assim como os autores sugerem, nesta porção da estrutura o modelo mostra o aumento do mergulho da falha nesta região. Os mesmos autores ainda descrevem a porção sul e centro-sul da falha como tendo caráter de uma rampa frontal de empurrão, com mergulhos de até 30°. Observam-se estas características no modelo geofísico, consolidando ainda mais a metodologia e interpretação.

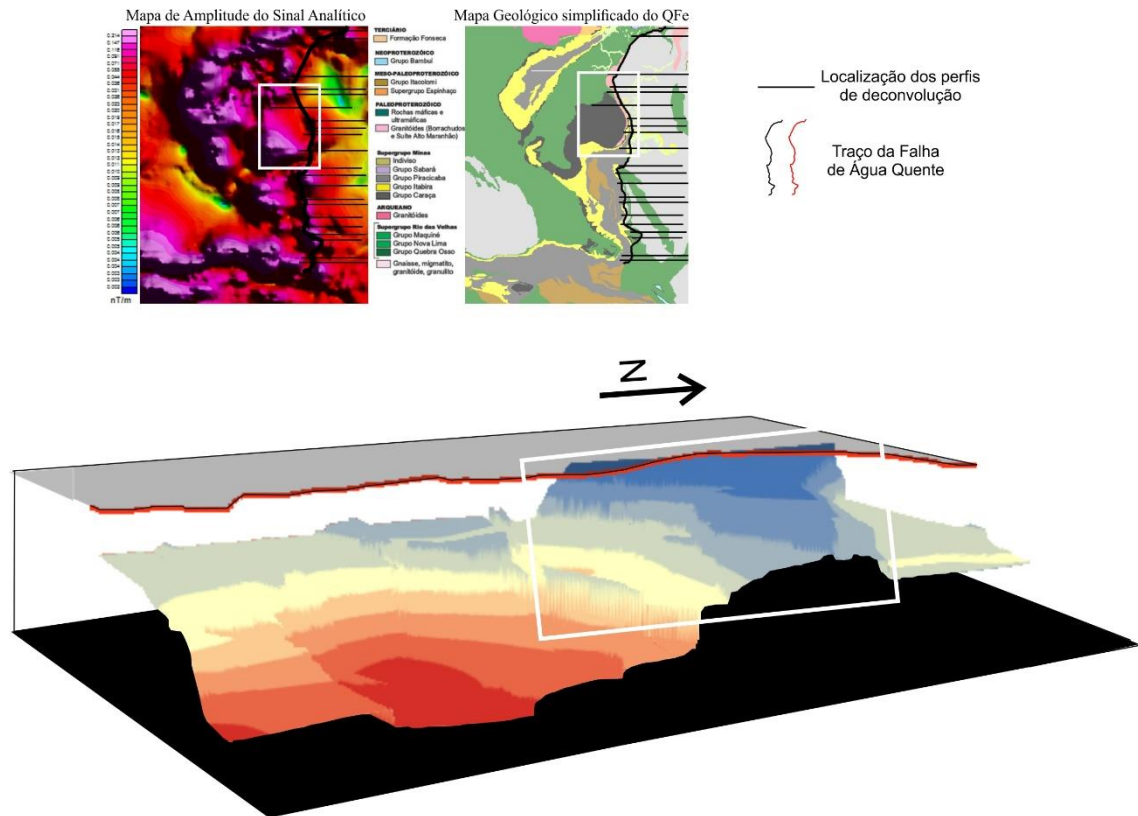


Figura 5.21 -Visualização tridimensional da superfície da Falha de Água Quente, gerada a partir de dados de inversão magnetométrica. Em evidência o alto estrutural magnetométrico observado na região da serra do Caraça. Nota-se os mergulhos menores na porção sul da estrutura.

Sabe-se que em regimes constriccionais onde há fluídos mineralizados o acúmulo destes e sua posterior mineralização ocorre nos altos estruturais, por ser uma zona de mais baixa pressão e permitir a migração dos fluídos (Etheridge 2018, Cox *et al.* 2001). Ao plotar os dados geoquímicos (Figura 5.22), os valores das anomalias de primeira ordem, tanto de ouro (Au) quanto dos elementos farejadores (Arsênio (As) e Antimônio (Sb)), ocorrem justamente no alto magnetométrico da superfície. Além disso, é possível notar a tendência das ocorrências ao longo do traço da falha, evidenciando a mineralização da estrutura, como já se era sabido desde o século XVIII.

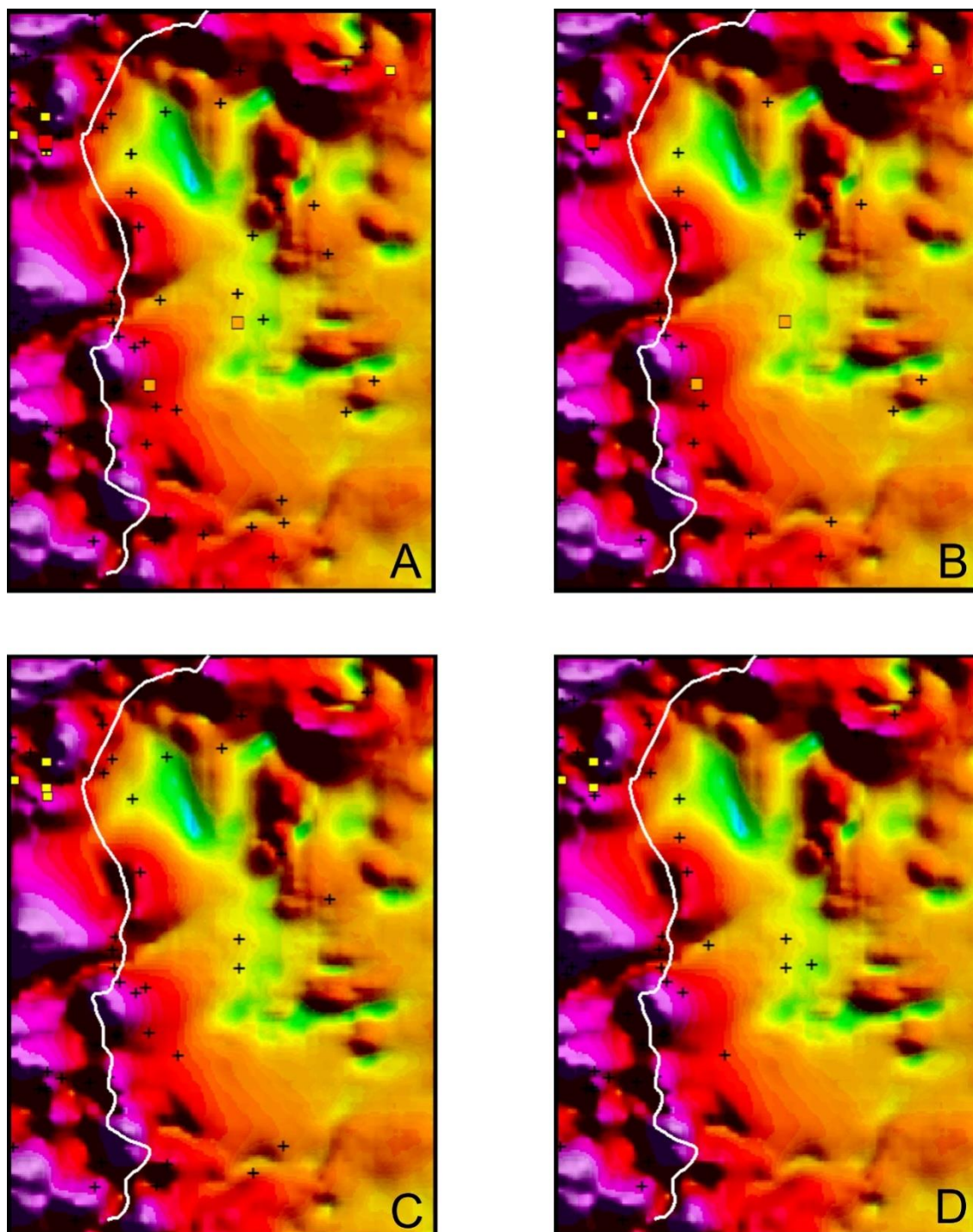


Figura 5.22 – Mapas magnetométricos ASA com a dispersão dos elementos obtidos dos dados geoquímicos de sedimento de corrente. A) os três elementos plotados juntos.; B) ouro; C) arsênio; D) antimônio.

Uma observação relevante quanto ao modelo é a representação de grandes estruturas mapeadas por Dorr (1969) e que cortam a falha na direção leste-oeste (Figura 5.23). Trata-se de fraturas geradas durante o Ediacarano em resposta a esforços direcionados de leste para oeste, que foram formadas segundo o sistema andersoniano. Posteriormente, estas grandes estruturas foram retrabalhadas por uma fase tardia do mesmo evento, mas de direção N-S. Logo, as fraturas

reposicionadas aparecem em mapa com direção leste-oeste, em resposta ao encurtamento de norte para sul posterior. Assim como em planta, o modelo mostra que a continuidade em profundidade destas estruturas trunca a Falha de Água Quente.

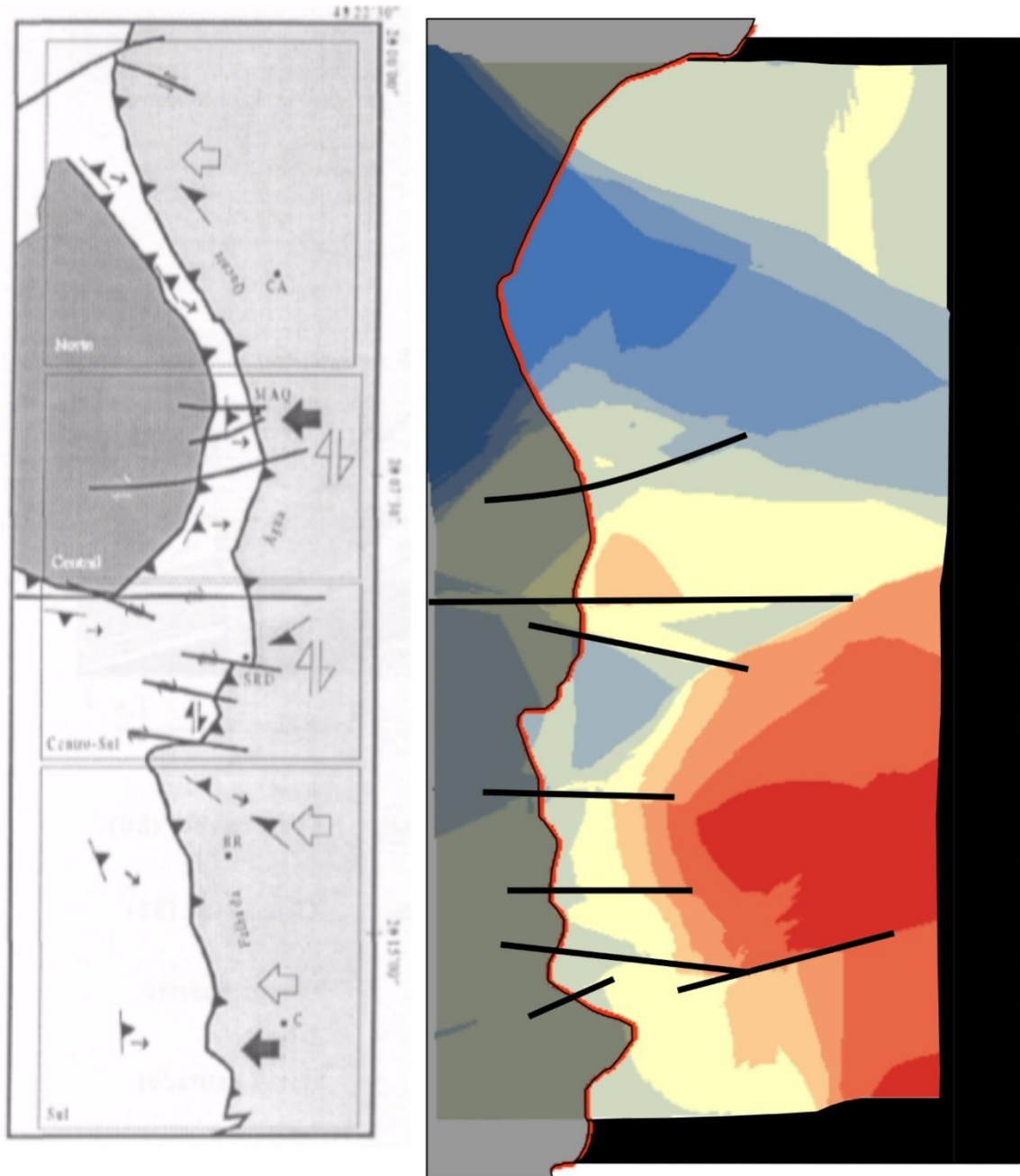


Figura 5.23 – Integração do mapa geológico de detalhe da Falha da Água Quente (retirado de Ferreira Filho & Fonseca 2001) e da superfície da falha em profundidade, evidenciando a continuidade das estruturas mapeadas em superfície desde Dorr (1969), também em subsuperfície.

A Falha Dom Silvério, uma transcorrência com movimento direcional sinistral (Endo 1997, Cunningham *et al.* 1998) tem características geofísicas incontestáveis ao mapeado em superfície. O modelo geofísico da superfície da falha (Figura 5.24) mostra que, além da continuidade da estrutura na

direção norte-sul, ela apresenta fortes mergulhos, chegando a ser subverticalizado em certos pontos, e atinge profundidades superiores a 15 mil metros.

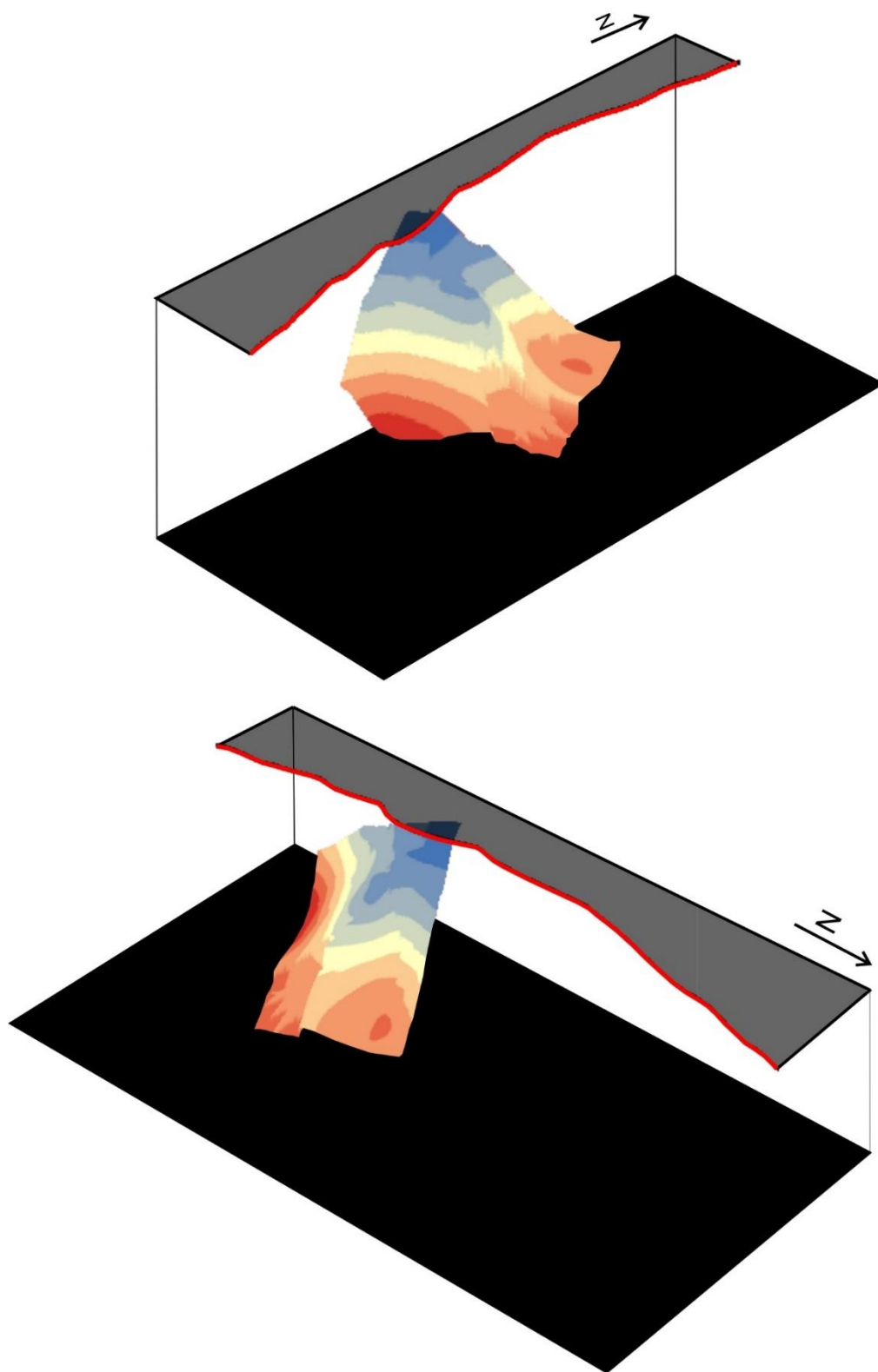


Figura 5.24 -Visualização tridimensional da superfície da Falha Dom Silvério, gerada a partir de dados de inversão magnetométrica, mostrando o forte mergulho da estrutura.

Quando se plota os modelos das falhas de Água Quente e Dom Silvério juntas (Figura 5.25), é possível observar e interpretar a continuidade e a junção das estruturas em profundidade. O modelo gravimétrico regional corrobora esta interpretação, e ainda nos permite propor a junção destas com a Zona de Cisalhamento de Abre Campo, assim como defendido por Gomes (2018).

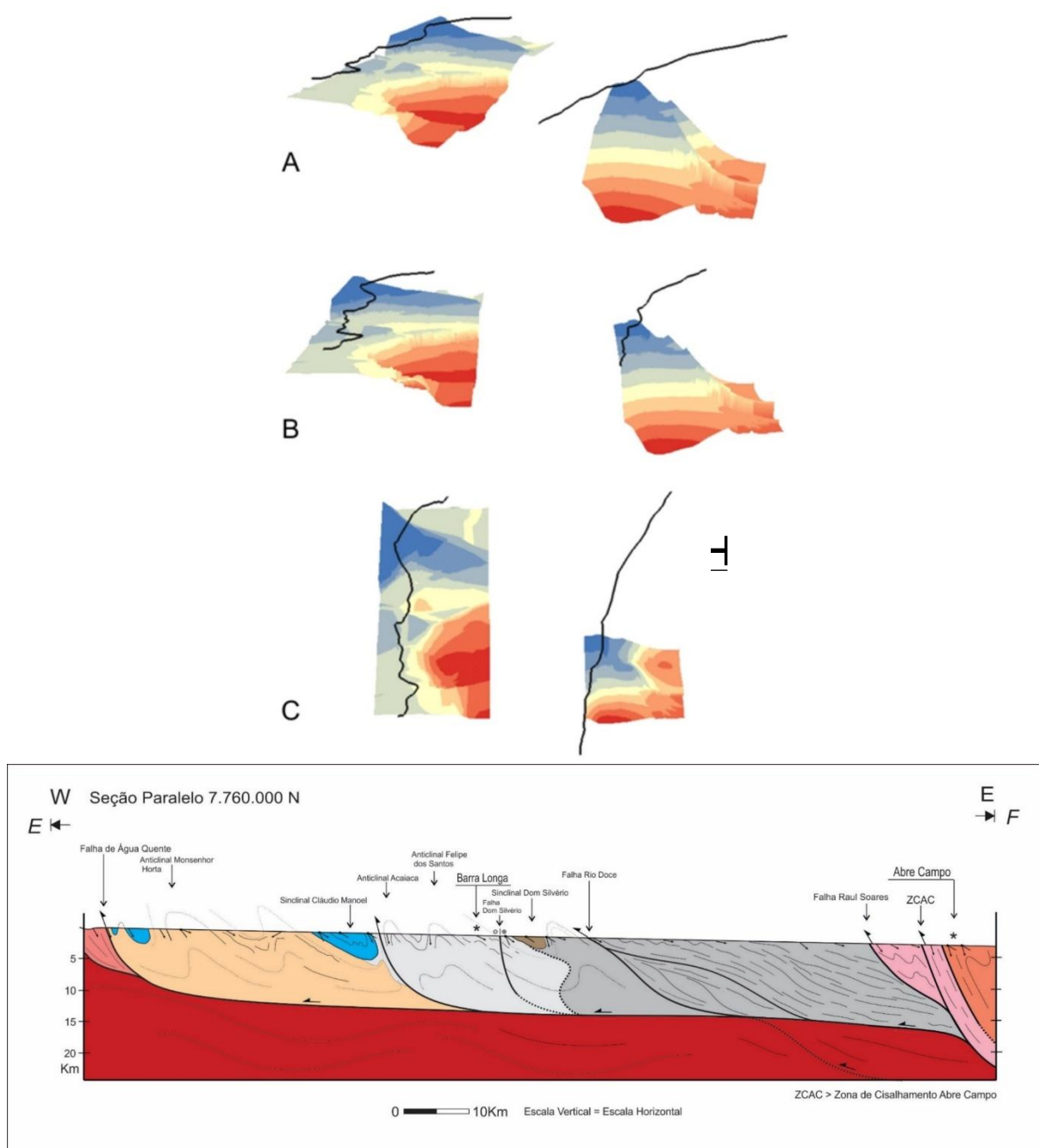


Figura 5.25 – Visualização da continuidade das estruturas lado a lado em diferentes visadas, em relação à seção geológica proposta por Gomes (2018). Nota-se o aumento do mergulho da FAQ para a FDS, caracterizando uma possível superfície de descolamento basal. A – visada NE-SW; B – visada E-W; C – visada em planta N-S. No perfil: em vermelho o embasamento e em cores as unidades dos complexos cristalinos.

Por fim, pode-se fazer a correlação entre a morfologia do traço da falha em superfície com a geometria da estrutura em profundidade, de tal modo que quando observamos em planta um traço anastomosado como o da Falha de Água Quente, a geometria da estrutura tende a ter variações e apresentar mergulhos menores, enquanto traços retilíneos como o da Falha Dom Silvério refletem estruturas com maiores mergulhos, chegando a serem verticalizados, e são mais homogêneas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Ao longo dos últimos anos a geofísica tem se mostrado indispensável para estudos geológicos avançados, sendo estes de cunho acadêmico ou no mundo da pesquisa mineral. Esta monografia mostra a relevância de trabalhos que investigam a inovação da aplicabilidade da geofísica nos diversos ramos da geologia, com resultados que permitem novas e mais precisas interpretações quanto a estruturação geológica atual de uma área, além de mostrar o controle da mineralização do ouro na região.

Com o trabalho foi possível concluir que:

- A interpretação inicial da área com os mapas de magnetometria e gravimetria foram de grande valia para entender como as estruturas se apresentam de acordo com suas propriedades físicas. São úteis para traçar os lineamentos e dividir a área em domínios. Com isso podemos traçar estratégias de ação e investigação com maiores detalhes em profundidade, utilizando a aplicação de filtros;

- Os lineamentos gravimétricos refletem, geralmente, em estruturas mais profundas e antigas, enquanto os lineamentos magnetométricos dizem respeito à recente magnetização dos minerais. Nesta área observam-se os lineamentos mais antigos com direção preferencial L-O, e os magnetométricos N-S. Estes resultados são condizentes com as fases de deformação e suas vergências conhecidas para a área de estudo;

- Os perfis de deconvolução possibilitam a primeira visualização das estruturas em subsuperfície, utilizando as inversões. Os dados mostraram com afinidade o que era de se esperar com as informações de campo e de trabalhos anteriores, como o de Gomes (2018). Com esta ferramenta foi possível interpretar a geometria das estruturas e estimar suas profundidades. Os dados magnetométricos tem destaque nesta fase, já que permitiram a realização dos modelos 3D de detalhe das estruturas desejadas, e tornando possível a conclusão da proposta inicial deste trabalho;

- Com a interpolação dos dados dos perfis bidimensionais de deconvolução de Euler foi possível a obtenção da configuração geométrica e das estimativas de profundidade das superfícies das falhas de Água Quente e Dom Silvério, além de obter a visualização regional da estruturação em profundidade da região;

- O bloco 3D gravimétrico permitiu a visualização regional de grandes estruturas profundas: Falha de Água Quente (FAQ), Falha Dom Silvério (FDS) e Zona de Cisalhamento de Abre Campo (ZCAC). Foram observadas as direções preferenciais das estruturas em questão: a FDS possui grande

continuidade norte-sul, enquanto a FAQ registra ampla continuidade leste-oeste, se juntando com a FDS e ZCAC;

- A Falha de Água Quente se mostrou uma estrutura heterogênea, com aumento de seu mergulho progredindo de sul para norte, onde há um alto estrutural que serviu de obstáculo na propagação da estrutura em profundidade, e faz com que a falha atinja seus maiores ângulos de mergulho. Esta variação é reflexo de sua estruturação anastomosada em planta, como mostra o traço da falha;

- Estruturas mapeadas por Dorr (1969) que truncam a FAQ em superfície foram observadas também em subsuperfície;

- A FAQ possui caráter de rampa frontal em sua porção sul e central, onde é descrita como uma falha de empurrão. Este trabalho mostra que em profundidade a estrutura se liga às falhas Dom Silvério e Abre Campo, por meio de uma superfície de descolamento basal, como proposto por Gomes (2018);

- A Falha Dom Silvério possui altos ângulos de mergulho e tem as maiores profundidades estimadas da área, chegando a mais de 15 mil metros. Estes dados combinados com seu *trend* em profundidade de direção norte-sul mostra o caráter transcorrente da estrutura. Seu traço retilíneo em planta reflete nos altos mergulhos em profundidade;

- Os dados geoquímicos mostram o controle da mineralização realizado pela Falha de Água Quente, e os valores de anomalias de primeira ordem estão no alto estrutural do modelo, como se espera em regiões de regime constriccional. Estes dados, além de proporcionarem grande caráter econômico para a FAQ, ajudam a comprovar a confiabilidade do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim, F.F., Brito-Neves, B.B., Castro-Alves, J.A. 1993. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco. In: Dominguez, J.M.L., Misi, A. (Eds), O Cráton do São Francisco. Sociedade Brasileira de Geologia, Salvador, 45-62.
- Alkmim, F.F., Marshak, S., Evangelista, H.J., Brueckner, H. 1994. Manifestações do evento transamazônico no Quadrilátero Ferrífero. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 38, Camboriú, SC. SBG. Anais, v. 1 p. 75-76.
- Alkmim, F.F., Marshak, S. 1998. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precam. Res.* **90**:29-58.
- Alkmim F.F., Marshak S., Pedrosa-Soares A.C., Peres G.G., Cruz S., Whittington A. 2006. Kinematic evolution of the Araçuaí-West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. *Precam. Res.* 149:43-64.
- Alkmim F.F., Pedrosa-Soares A.C., Noce C.M., Cruz S.C.P. 2007. Sobre a evolução tectônica do Orógeno AraçuaíCongo Ocidental. *Geonomos* 15(1): 25-43.
- Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7(4): 349-364.
- Almeida, F. F. M.de & Hasui, Y. 1984. O Pré-Cambriano do Brasil. 1ªed. São Paulo, Ed. Edgard Blücher Ltda. 378p.
- Almeida L. G., Oliveira D. J., Endo I. 2001. O arcabouço estratigráfico-estrutural da região de Dom Bosco/Bela Vista, Quadrilátero Ferrífero, como manifestação da orogênese minas com polaridade tectônica para sudoeste. 11 Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Belo Horizonte, SBG/ Núcleo Minas Gerais, Belo Horizonte. Anais, arquivo eletrônico.
- Almeida L. G., Endo I., Fonseca M. A. 2002. Sistema de nappes na porção meridional do Quadrilátero Ferrífero, MG. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 41, João Pessoa, Anais, p.615.
- Almeida L. G. 2004. Evolução Tectônica da porção central do sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Dep. de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto. 110p.
- Almeida Abreu, P.A. 1993. A Evolução Geodinâmica da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais, Brasil. Universidade de Freiburg, Freiburg, Alemanha, Tese de Doutorado 150 p.
- Almeida Abreu, P. A., Pflug, R. 1994. The geodynamic evolution of the southern Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brazil. *Zbl. Geol.*, H 1/2: 21- 44.
- Almeida Abreu P.A. 1995. O Supergrupo Espinhaço da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais: o rifte, a bacia e o orógeno. *Geonomos*, 3(1):1-18.
- Alves J. A. C. 1991. Reconstrução estocástica de um modelo geológico: mina de São Luis - Quadrilátero Ferrífero, MG. Departamento de Geologia, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado 215 p.
- Angeli G. 2015. Arcabouço Estrutural e Contribuição à Estratigrafia do Grupo Maquiné, Quadrilátero Ferrífero Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Baltazar, O. F., Raposo, F. O. 1993. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil-Folha Mariana 1:100.000. Rio de Janeiro, CPRM-Serviço Geológico do Brasil.

Faversani, G. 2019. Geometria da Falha de Água Quente e Seu Papel na Zona Externa da Faixa Araçuaí...

Baltazar O.F., Baars F. J., Lobato L. M., Reis L.B., Achtschin A.B., Berni G. V., Silveira V. D. 2005. Mapa Geológico-folha Gandarela (SF-23-X-A-III-2), escala 1:25.000. In: Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero – Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. Belo Horizonte, CODEMIG.

Baltazar O.F. & Zucchetti M. 2005. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. Elsevier, 32(2007): 471:499.

Barbosa A.L.M. 1968. Contribuições recentes à geologia do Quadrilátero Ferrífero. In: SBG-MG, reimpressão (1985): UFMG, 44p.

Barbosa A.L.M. 1979. Variação de fácies na Série Minas. In: SBG, Belo Horizonte, Boletim, p. 89-100.

Barbosa M.S.C. 2003. Notas de aula de geofísica. DEGEO-UFOP.

Barbosa M.S.C. 2006. Notas de aula de tectonofísica. DEGEO-UFOP.

Barbosa V. C. F & Silva J. B. C. 2005. Deconvolução de Euler: passado, presente e futuro – um tutorial. Ver. Bras. Geof. 23(3): 243-250.

Bekker A., Karhu J.A., Eriksson K.A., Kaufman A.J. 2003. Chemostratigraphy of Paleoproterozoic carbonate successions of the Wyoming Craton: tectonic forcing of biogeochemical change?. Precambrian Research 120:279-325.

Belém J., Pedrosa-Soares A.C., Noce C.M., Silva L.C., Armstrong R., Fleck A., Gradim C., Queiroga G. 2011. Bacia precursora versus bacias orogênicas: exemplos do Grupo Andrelândia com base em datações U-Pb (LA-ICP-MS) em zircão e análises litoquímicas. Geonomos 19(2):224-243

Bizzi L.A., Schobbenhaus C., Vidotti R.M., Gonçalves J.H. 2003. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. CPRM-Serviço Geológico do Brasil. Texto, Mapas e SIG.

Boyle, R.W. 1979. The geochemistry of gold and its deposits. (Geological Survey Bulletin 280). Ottawa: Geological Survey of Canada. 564pp.

Brandalise L.A. 1991. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Folha Ponte Nova, SF.23-X-BII. Escala 1: 100.000. Brasília: DNPM/CPRM 194p.

Brito-Neves B. B., Sá J. M., Nilson A. A. & Botelho N. F. 1995. A Tafrogênese estateriana nos blocos paleoproterozoicos da América do Sul e processos subsequentes. Genomos, 3(2): 1-21.

Campos Neto, M.C. & Figueiredo, M.C.H. 1995. The Rio Doce Orogeny, southeastern Brazil. Jour. South Am. Earth Sci. 8: 143-162.

Chemale Jr., F.; Rosiere, C. A., Endo, I. 1991. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Um modelo. Pesquisas. Ponto Alegre, v. 18, n. 2, p.104-127.

Costa M.T. 1961. Sedimentação e orogênese da Série de Minas. Boletim SICEG 1: 55-61.

Cox, S. F., Knackstedt, M. A., Braun, J. 2001. Principles of Structural Control on Permeability and Fluid Flow in Hydrothermal Systems. Society of Economic Geologists Reviews v. 14 2001, p. 1–24.

Cunningham D., Marshak S., Alkmim F.F. 1996. Structural style of basin inversion at mid-crustal levels: two transects in the internal zone of the Brasiliano Araçuaí Belt, Minas Gerais, Brazil. Precam. Res., 77: 1-15.

Cunningham D., Alkmim F.F., Marshak S. 1998. A structural transect across the coastal mobile belt in the Brazilian Highlands (latitude 20°S). Precamb. Res., 92:251-275.

Davis J. C. 1973. Statistics and Data Analysis in Geology. New York: John Wiley & Sons, 550 p.

Dewey J. F. 1988. Extensional collapse of orogens. *Tectonics*, 7:1123-1139.

Dorr II J.V.N, Gair J.E., Pomererene J.B., Rynearson G.A. 1957. Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero, Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral, Divisão de Fomento da Produção Mineral, avulso, v. 81, 31 p.

Dorr J. V. N. II. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. USGS/DNPM. Professional Paper 641-A. 110p.

Dossin, I.A.; Uhlein, A., Dossin, T.M. 1984. Geologia da faixa móvel Espinhaço em sua porção meridional, M.G. In: SBG, Cong. Bras.Geol, 33, Rio de Janeiro, Anais, 7: 3118-3132.

Durrheim R. J. & Cooper G. R. J. 1998. EULDEP: a program for the Euler deconvolution of magnetic and gravity data. *Elsevier Computer & Geosciences*. 24(6): 545-550.

Ebert H. 1958. Discordâncias Pré-Cambrianas em Carandaí, Minas Gerais: Rio de Janeiro, DNPM/DGM, Boletim 183, 48 p.

Egydio-Silva M., Vauchez A., Fossen H., Cavalcante G. C. G., Xavier B. C. 2018. Connecting the Araçuaí and Ribeira belts (SE – Brazil): Progressive transition from contractional to transpressive strain regime during the Brasiliano orogeny. *Journal of South American Earth Sciences* 86 (2018) 127–139.

Endo I. 1988. Análise estrutural qualitativa no minério de ferro e encaixantes na Mina de Timbopeba-Borda leste do Quadrilátero Ferrífero, Mariana, MG. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. 112p.

Endo, I. & Chemale, F. Jr. 1992. Modelo de evolução cinemática do Sinclinal Alegria e adjacências, Quadrilátero Ferrífero - MG. *Rev. Esc. Minas*, 45(1/2): 24-27.

Endo, I. & Fonseca, M. A. 1992. Sistema de Cisalhamento Fundão-Cambotas no Quadrilátero Ferrífero, MG: geometria e cinemática. *Rev. Esc. Minas*, 45(1/2): 28-31.

Endo, I. & Alkmim, F. F. 1992. Análise geométrica e cinemática de um segmento do Sistema Fundão na região da Mina de Timbopeba, Mariana, MG. *Rev. Esc. Minas*, 45(1/2): 21-23.

Endo I. 1997. Regimes Tectônicos do Arqueano e Proterozoico no Interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e Área Adjacentes, Minas Gerais. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo 243 pp

Etheridge, M. A. 2018. Regional to local structural controls on hydrothermal mineralisation – Practical tools for finding, delineating and mining ore deposits. SRK Consulting.

Ferrari P.G. 1981. Sequência vulcânica-turbidítica de margem continental – bordo ocidental da plataforma São Francisco. In: SBG, Simpósio de Geologia do Centro-oeste 1, Ata, p. 702-715.

Ferreira Fº F. A. 1999. Análise Estrutural Qualitativa do Sistema de Falhas de Água Quente, Borda Leste do Quadrilátero Ferrífero, MG. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. 162p.

Ferreira Fº F. A. & Fonseca M. A. 2001. Partição da Deformação em Regimes Contracionais de Antepaís: Exemplo do Sistema de Falhas Água Quente. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(3):267-278.

Figueiredo M.C.H., Teixeira W. 1996. The Mantiqueira Metamorphic Complex, eastern Minas Gerais State: preliminar geochronological and geochemical results. *Acad Bras Cienc* 68: 223-246.

Fischel, D.P. 1998. Geologia e dados isotópicos Sm-Nd do Complexo Mantiqueira e do Cinturão Ribeira na região de Abre Campo, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.

Faversani, G. 2019. Geometria da Falha de Água Quente e Seu Papel na Zona Externa da Faixa Araçuaí...

Fischel D.P., Pimentel M.M., Fuck R.A., Costa A. G., Rosière C.A. 1998. Geology and Sm-Nd Isotopic Data for the Mantiqueira and Juiz de Fora Complex (Ribeira Belt) in the Abre Campo-Manhuaçu Region, Minas Gerais, Brazil. In: Internat. Conf. Pre-Cambr. and Craton Tect./Internat. Conf. Basem. Tect. 14, Ext. Abstracts: 21-23.

Fogaça, A.C.C; Almeida Abreu, P.A & Schorscher, H.D. 1984. Estratigrafia da sequência supracrustal arqueana na porção mediana centra do Serra do Espinhaço-Mg. In: Congr. Bras. Geol., 33, Rio de Janeiro 1984. Anais...Rio de Janeiro, SBG, v.2, p. 1652-2667

Gair J.E. 1962. Geology and ore deposits of the Nova Lima and Rio Acima Quadrangles Minas Gerais, Brazil. United States Geological Survey Professional Paper, 341-A, 67 pp.

Gomes, G. A. S. 2018. O arcabouço estrutural e o papel da Falha Água Quente na estruturação da borda leste do Quadrilátero Ferrífero: Domínio Transicional da Faixa Araçuaí. Monografia n. 309. DEGEO-UFOP 138p.

Gradim D.T., Noce, C.M., Novo T., Queiroga G.N., Pedrosa-Soares A.C., Suleimam M.A., Martins M. 2012. Mapa geológico da Folha Viçosa (SF.23-X-B-V), escala 1: 100.000. Belo Horizonte, CPRM/UFMG.

Grunsky, E.C. 2017.The interpretation of regional geochemical survey data. In: DECENNIAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MINERAL EXPLORATION, 5, Sep. 7-12 2007, Toronto. Proceedings of Exploration 17. Toronto: Decennial Mineral Exploration Conferences, p. 139-182.

Grunsky E.C. 2010.The interpretation of geochemical survey data.Geochemistry, Exploration, Environment and Analysis.10: 2774.

Hasui Y. & Oliveira M.A.F. 1984.A Província Mantiqueira:Setor Central. In: F.F.M. de Almeida & H. Hasui (eds.). OPrecambriano do Brasil, São Paulo, Edgard Blucher, 344 p.

Heilbron M., Duarte B., Valladares C., Nogueira J.R., TupinambáM., Eirado L.G. 2003. Síntese geológica do bloco oriental (Zonada Mata). In: A.C. Pedrosa-Soares, C.M. Noce, R. Trouw, M.Heilbron (coords.). Projeto Sul de Minas – Etapa I: Geologia eRecursos Minerais do Sudeste Mineiro. COMIG/UFMG/UFRJ/UERJ, Belo Horizonte, v.1, p.8-50.

Herz N. 1970. Gneissic and Igneous Rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.U.S. Geological Survey Professional Paper, 341-A. USGS-DNPM, Washington.55p.

Herz, N. 1978. Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geol. Surv.Prof. Paper 641-C. U.S. Geological Survey, U.S.A., pp. C1-C81.

Hood, P. 1965. Gradient measurements in aeromagnetic surveying.Geophysics, 30 (5) :891-902.

Jordt-Evangelista, H. 1984. Petrologische Untersuchungen im Gebiete zwischen Mariana und Ponte Nova, Minas Gerais, Brasilien. Tese de doutorado. Universidade Técnica de Clausthal, Alemanha 183p.

Jordt-Evangelista, H. 1985. Petrologia de fases, geotermometria e geobarometria do Complexo Granulítico de Acaiaca, Sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. In: Simp. Geol., 3, Belo Horizonte, MG. SBG, Anais, p. 165-178.

Jordt-Evangelista, H. & Muller, G. 1986a.Petrology of transition zone between the Archean Craton and the Coast Belt, SE of the Iron Quadrangle, Brazil.Chemie der Erder, 45: 129-145.

Jordt-Evangelista, H. & Muller, G. 1986b Petrologia da Zona de Transição entre o Cráton São Francisco e o Cinturão Móvel Costeiro da Região Sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 34, Goiânia, GO. SBG, Anais 1471-1479.

Jordt-Evangelista H., Peres G. G., Macambira M. J. B. 2000. Pb/Pb single-zircon dating of paleoproterozoic calcalkaline/alkaline magmatism in southeastern São Francisco Craton region, Brazil. Rev. Bras. Geociências, 30:174-176.

- Kahn, M. A. 1983. Satellite contributions to geophysical exploration at sea. In CRC Handbook of Geophysical Exploration at Sea, R. A. Geyer, ed., pp. 3-68. Boca Raton: CRC Press.
- Kearey P., Brooks M., Hill I. 2009. Geofísica de exploração. Oficina de Textos, São Paulo, 438p.
- Klein, C. & Ladeira, E.A. 2000. Geochemistry and Petrology of some proterozoic banded iron-formations of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, 95:405-428.
- Ladeira E.A. 1980. Metallogenesis of Gold at the Morro Velho Mine, and in Nova Lima District, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Ph.D. Thesis, University of Western Ontario, London 272 p.
- Larizzatti, J. H., Marques, E. D., Silveira, F. V. 2018. Geochemical Mapping of Iron Quadrangle region by active stream sediments, State of Minas Gerais, Brazil. *Geochimica Brasiliensis* 32(2): 268 – 292.
- Lobato, L.M., Rodrigues, L. R., Vieira, F. 2001. Brazil's premier gold province: part II: geology and Genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita*, 36:249-277.
- Lowrie, W. 2007. Fundamentals of Geophysics. Cambridge University Press (2nd edn), Vol. 1, pp. 381.
- Luiz J. G. & Silva, L. M. C. 1995. Geofísica de Prospecção. CEJUP, Belém, 311p.
- Machado Filho L., Ribeiro M., Gonzalez S.R., Schenini C.A., Santos Neto A. dos; Palmeira R. C., Pires J.L., Teixeira W., Castro H.E.F. 1983. Geologia das Folhas Rio de Janeiro (SF 23/24) escala 1:1.000.000, mapa e texto explicativo. Rio de Janeiro, MME. 780p. (Projeto RADAM Brasil).
- Machado N. & Noce C.M. 1993. A evolução do Setor Sul do Cráton São Francisco entre 3,1-0,5 Ga baseada em geocronologia U-Pb. In: Simpósio Cráton São Francisco, Salvador, BA. SBG/SGM, Anais, v. 2, p. 100-102.
- Madeira T. J. A. 2016. Análise Geofísica e Estrutural da Zona de Cisalhamento de São Vicente, Quadrilátero Ferrífero, MG. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto 186 p.
- Malavielle J. 1993. Late orogenic extension in mountain belts: insights from the Basin and Range and the late Paleozoic Variscan Belt. *Tectonics* 12: 1115-1130.
- Marshak S. & Alkmim F.F. 1989. Proterozoic contraction/extension tectonics of the southern São Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics*, 8(3):555-571.
- Maxwell, C. H. 1972. Geology and ore deposits of the Alegria District, Minas Gerais, Brazil: United States Geological Survey Professional Paper 341-J, 72p.
- Medeiros Jr. E. B. & Soares A. M. B. 2007. Geologia da quadrícula 43-07-12 (Monsenhor Horta) 1:25.000, Folha Mariana (SF-23-X--B-I-3), Projeto Furquim. Monografia de graduação, Departamento de Geologia, EM/UFOP, Ouro Preto, 39 p.
- Medeiros Jr., E.B & Jord-Evangelista. 2010. Petrografia e geoquímica dos granulitos do Complexo Acaiaca, região Centro-Sudeste de Minas Gerais. *REM: R. Esc. Minas*, 63(2): 219-228.
- Nelson, R. A.; Patton, T. L. & Morley, C. K. - 1992 - Rift-segment interaction and its relation to hydrocarbon exploration in continental rift systems. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, 76: 1153-1169.
- Noce, C.M., Machado, N., Teixeira, W. 1998. U-Pb geochronology of gneisses and granitoids in the Quadrilátero Ferrífero (southern São Francisco Cráton): age constraints for Archean and Paleoproterozoic magmatism and metamorphism. *Rev. Bras. Geociê.* 28: 95-102.
- Noce C.M., Macambira M.B., Pedrosa-Soares A.C. 2000. Chronology of Neoproterozoic-Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí Belt, Eastern Brazil, based on single zircon evaporation dating. *Rev. Bras. Geociên.*, 30: 25-29.

Faversani, G. 2019. Geometria da Falha de Água Quente e Seu Papel na Zona Externa da Faixa Araçuaí...

Noce C.M., Pedrosa-Soares A.C., Piuzana D., Armstrong R., Laux J.H, Campos C., Medeiros S.R 2004. Ages of sedimentation of the Kinzigit complex and late orogenic thermal episode in the Araçuaí orogeny, Northern Espírito Santo state, Brazil: Zircon and monazite U-Pb SHRIMP and ID-TIMS data. *Rev. Bras. Geociên.*, 34:587-592.

Noce, C. M., Costa, A. G., Piuzana, D., Vieira, V.S. & Carvalho, C. 2006. Geologia da Folha Manhauçu 1:100.000. Rio de Janeiro, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, UFMG-Programa Geologia do Brasil.

Noce C.M., Pedrosa-Soares A.C., Silva A.C., Alkmim F.F. 2007a. O embasamento arqueano e paleoproterozoico do Orógeno Araçuaí. *Genomos* 15(1): 17-23.

O'Rourke J.E. 1957. The stratigraphy of metamorphic rocks of the Rio de Pedras and Gandarela quadrangles, Minas Gerais, Brazil. Tese de Doutorado, University of Winsconsin 106 pp.

Pedrosa-Soares, A. C. & Wiedemann-Leonardos, C.M. 2000. Evolution of the Araçuaí Belt and its connection to the Ribeira Belt, Eastern Brazil. In: U. Cordani, E. Milani, A. Thomaz-Filho & D.A. Campos (eds), *Tectonic Evolution of South America*. São Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 265-285.

Pedrosa-Soares A.C., Noce C.M., Wiedemann C.M., Pinto C.P. 2001. Araçuaí-West-Congo Orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanaland, Brazil. *Precamb. Res.* 110: 307-323.

Pedrosa-Soares A.C., Noce C.M., Alkmim F.F., Silva L.C., Babinski M., Cordani U., Castañeda C. 2007. Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1997. *Genomos* 15(1): 1-16.

Pedrosa-Soares, A.C., Alkmim, F.F., Tack, L., Noce, C.M., Babinski M., Silva L.C., Martins-Neto, M. 2008. Similarities and differences between the Brazilian and African counterparts of the Neoproterozoic Araçuaí-West Congo Orogen. In: Pankhurst, J.R.; Trouw, R.A.J., Brito Neves, B.B., De Wit, M.J.(eds) *West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations across the South Atlantic Region*. Geological Society of London, Spec. Publ. 294: 153-172.

Pedrosa-Soares A. C., De Campos C., Noce C. M., Silva L. C., Novo T., Roncato J., Medeiros S., Castañeda C., Queiroga G., Dantas E., Dussin I., Alkmim F. F. 2011. Late Neoproterozoic-Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí orogen (Brazil), the Eastern Brazilian Pegmatite Province and related mineral resources. *Geological Society, London, Special Publications*, 350:25-51.

Peres G.G., Alkmim F.F., Jord-Evangelista H. 2004. The Southern Araçuaí belt and the Dom Silvério Group: Geologic architecture and tectonic significance. *An. Acad. Bras. Ciên.*, 76: 771-790.

Pflug R. 1968. Observações sobre a estratigrafia da Série Minas na região de Diamantina, Minas Gerais. *Not. Prelim. Estudos*, nº 142, Div. Geol. Min., DNPM., Rio de Janeiro.

Pires F.R.M. 1995. Textural and mineralogical variations during metamorphism of the Proterozoic Itabira Iron Formation in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 37: 77-105.

Porada H. 1989. Pan-African rifting and orogenesis in southern to equatorial Africa and Eastern Brazil. *Precamb Res.*, 44: 103-136.

Queiroga, G.N., Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Alkmim, F.F., Pimentel, M.M., Dantas, E., Martins, M., Castañeda, C., Suita, M.T.F. & Prichard, H. 2007. Age of the Ribeirão da Folha ophiolite, Araçuaí Orogen: The U-Pb Zircon (la-icpms) dating of a plagiogranite. *Genomos* 15.

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: 80-91.

Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R. G. 2005a. Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *SciTotal Environ* 346:1-16.

- Reimann, C., Garret, R. G. 2005b. Geochemical background—concept and reality. *Sci Total Environ* 350:12–27
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R.G., Dutter, R. 2008. *Statistical Data Analysis Explained*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England. 362pp.
- Renger F.E., Noce C.M., Romano A.W., Machado N. 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma. De registro geológico no Quadrilátero Ferrífero Minas Gerais, Brasil. *Genomos* 2(1): 1-11.
- Ribeiro-Rodrigues L. C. 1992. O Contexto Geológico-Estrutural do Parque Natural do Caraça e Adjacências, Quadrilátero Ferrífero, MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. 109p.
- Rosière C.A. & Chemale F. 2000. Brazilian iron formation and their geological setting. *Revista Brasileira de Geociências*, 30: 274-278.
- Rossi Q. D. 2014. Estratigrafia e Arcabouço Estrutural da região de Fábrica Nova, Quadrilátero Ferrífero, MG. Dissertação de Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais - Universidade Federal de Ouro Preto. 139p.
- Schöll W.U., Fogaça A.C.C. 1979. Estratigrafia da Serra do Espinhaço na região de Diamantina. In: *Anais do Simpósio de Geologia de Minas Gerais* 1:55-73.
- Schorscher H.D. 1978. Komatiitos na estrutura greenstone belt Série Rio das Velhas. Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 30, Recife, PE. SBG, *Anais*, v. 1, p. 292-293.
- Schorscher H.D. 1979a. Evolução geotectônica e petrogênica do embasamento arqueano do Quadrilátero Ferrífero. *Acad. Bras. Cienc. Anais*. 51(4) 764-769.
- Schorscher H.D. 1979b. Evolução arqueana e proterozoica do Quadrilátero Ferrífero e partes meridionais da serra do Espinhaço. In: *Simpósio sobre a geologia do Cráton São Francisco* 1. Resumos. Salvador.
- Schrank A., Souza Filho C.R. 1998. The Tectonic Evolution of the Quadrilátero Ferrífero Region From the Archean to the Neoproterozoic: Revision, Problems and Prospects. In: *International Conference on Basement Tectonics* 14, Ouro Preto, p. 122-125.
- Seer, H. J., Brod, J. A., Fuck, R. A., Pimentel, M. M., Boaventura, G. R., Dardenne, M. A. 2001. Grupo Araxá em sua área tipo: Um fragmento de crosta oceânica neoproterozoica na Faixa de Dobramento Brasília. *Revista Brasileira de Geociências* 31, 396-924.
- Silva G. M. 2015. Análise Geofísica do Distrito Diamantífero Abaeté (MG) e de Suas Possíveis Fontes Primárias. *Contribuições às Ciências da Terra. Série M* vol. 74, nº325 120p.
- Silva L.C., Armstrong, R, Noce, C.M., Carneiro, M., Pimentel, M., Pedrosa-Soares, A.C., Leite, C., Vieira, V.S., Silva, M., Paes, V. & Cardoso-Filho, J. 2002: Reavaliação da evolução geológica em terrenos pré-cambrianos brasileiros com base em novos dados U-Pb SHRIMP, parte II: Orógeno Araçuai, Cinturão Móvel Mineiro e Cráton São Francisco Meridional. *Revista Brasileira de Geociências*, 32:513-528.
- Silva L.C., McNaughton N.J., Armstrong R., Hartmann L., Fletcher I. 2005. The Neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections. *Precamb. Res.* 136:203-240.
- Silva, L.C., Pedrosa-Soares, A.C. & Teixeira, L.R. 2007. Tonian-related, A-type continental plutonism in the Araçuai orogen, Eastern Brazil: new evidences for breakup stage of the São Francisco-Congo Palecontinent. *Gond. Res.* 13(4):527-537.
- Teixeira-Silva, C.M. 2010. O Sistema Transcorrente da Porção Sudeste do Orógeno Araçuai e Norte da Faixa Ribeira: Geometria e Significado Tectônico. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto 221 p.
- Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. 2nd ed. 770pp.

Faversani, G. 2019. Geometria da Falha de Água Quente e Seu Papel na Zona Externa da Faixa Araçuaí...

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

Torquato J. R. F. & Fogaça A. C. C. 1981. Correlação entre o Sg. Espinhaço no Brasil, o Grupo Chela em Angola e as Formações Nosib e Khoabendus da Namíbia. In: SBG-BA, Simp. sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais, Anais, p. 87-98.

Turcotte, D. L. & Schubert, G. 2002. *Geodynamics*. Cambridge University press (2nd eds). Vol 1. 456pp.

Ulhein, A. 1991. Transição Cráton-Faixa Dobrada: Exemplo do Cráton São Francisco e da Faixa Araçuaí (Ciclo Brasileiro) no Estado de Minas Gerais. São Paulo. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo 295p.

Valeriano, C. M., Machado, N., Simonetti, A., Valladares, C. S., Seer, H. J., Simões, L. S. A. 2004. U-Pb geochronology of the Southern Brasília belt (SE-Brazil): sedimentary provenance. Neoproterozoic orogeny and assembly of West-Gondwana. *Precambrian Res.* 130 (1/4) 27-55.

Vieira V.S., Pedrosa-Soares A.C., Silva L.C., Castañeda C. 2004. Relações entre o Grupo Rio Doce, Complexo Kinzigítico e Granitogêneses Associadas no Leste de Minas Gerais e Norte do Espírito Santo. In: Congr. Bras. Geol., 42, Araxá, Anais, p. 42.

Vieira V.S., Noce C.M., Silva L.C., Pedrosa-Soares A.C. 2006. Idades U-Pb SHRIMP de Áreas-Fontes da Sedimentação do Grupo Rio Doce, Orógeno Araçuaí. In: Congr. Bras. Geol., 43, Aracaju, Anais, p. 313.

Vieira, V.S. 2007. Significado do Grupo Rio Doce no Contexto do Orógeno Araçuaí. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 117 p.

Zucchetti M., Lobato L.M., Baltazar O.F. 2000. Volcanic and volcanoclastic features in Archean rocks and their tectonic environments, Rio das Velhas Greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, MG, Brazil. *Rev. Bras. de Geoc.*, 30: 388-392.

Relatórios dos projetos de levantamentos aerogeofísicos utilizados no trabalho:

SEME - Secretaria de Estado de Minas e Energia do Governo de Minas Gerais. Pitangui - São João Del Rei - Ipatinga - Área 2: Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos. In: Levantamento Aerogeofísico De Minas Gerais, Texto Técnico. [s.l.]. SEME/Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2001. V.1. 44p. Inclui 22 mapas geofísicos em anexo. (Relatório interno)

SEME - Secretaria de Estado de Minas e Energia do Governo de Minas Gerais. Pitangui - São João Del Rei - Ipatinga - Área 2: Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos. In: Levantamento Aerogeofísico De Minas Gerais, Texto Técnico. [s.l.]. SEME/Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2001. V.1. 44p. Inclui 22 mapas geofísicos em anexo. (Relatório interno)

SEME - Secretaria de Estado de Minas e Energia do Governo de Minas Gerais. Morro do Pilar - Cerro - Guanhanes - Área 3: Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos. In: Levantamento Aerogeofísico De Minas Gerais, Texto Técnico. [s.l.]. SEME/Megafísica Survey Aerolevantamentos S.A. 2001. V.1. 41p. Inclui 14 mapas geofísicos em anexo. (Relatório interno)

CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. Teófilo Otoni - Governador Valadares - Caratinga - Área 12: Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos. In: Levantamento Aerogeofísico De Minas Gerais - Programa 2008/2009, Texto Técnico. [s.l.]. CODEMIG/CPRM/Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2009. V.1. 159p. Inclui 42 mapas geofísicos em anexo. (Relatório interno)

CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. Juiz de Fora - Cataguases - Manhuaçu - Área 15: Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos. In: Levantamento Aerogeofísico De Minas Gerais - Programa 2010/2011, Texto Técnico. [s.l.]. CODEMIG/CPRM/Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2011. V.1. 251p. Inclui 32 mapas geofísicos em anexo. (Relatório interno)

DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral. Nova Lima - Caeté: Aquisição, Processamento e Interpretação de Dados. Relatório Final. In: Levantamento Aéreo Magnetométrico, Gamaespectrométrico e Eletromagnético - Projeto Rio das Velhas, Texto Técnico. Belo Horizonte. DNPM/Prospec S/A 1992. V.1. n.p. Inclui 18 mapas geofísicos em anexo. (Relatório interno)

DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral. Santa Bárbara - Barão de Cocais: Aquisição, Processamento e Interpretação de Dados. Relatório Final. In: Levantamento Aéreo Magnetométrico, Gamaespectrométrico e Eletromagnético - Projeto Rio das Velhas, Texto Técnico. Belo Horizonte. DNPM/Prospec S/A 1992. V.1. n.p. Inclui 18 mapas geofísicos em anexo. (Relatório interno)

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil. Faixa Itabira - Ferros: Relatório Final de Levantamento e Processamento de Dados. In: Projeto Gemas de Minas Gerais. Levantamento Aéreo Magnetométrico e Gamaespectrométrico da Faixa Itabira Ferros, Texto Técnico. [s.l.]. CPRM/GEOMAG 1996. V.1. 36p. Inclui 14 mapas geofísicos em anexo. (Relatório interno).

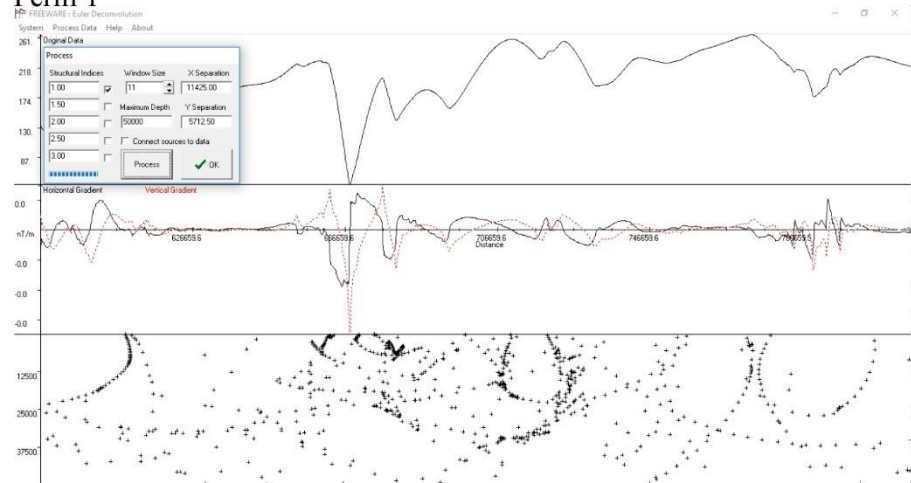
Apêndice(s)

Apêndice I – Síntese dos dados dos aerolevantamentos utilizados no trabalho.

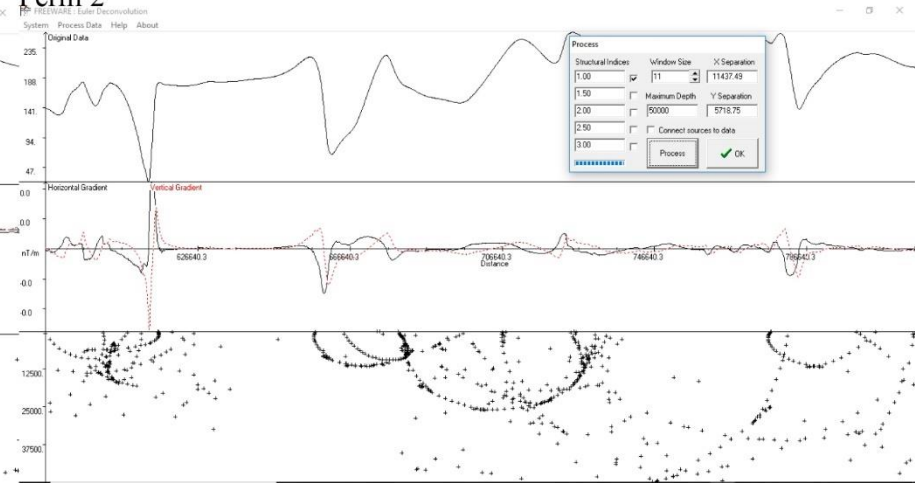
PROJETOS AEROGEOFÍSICOS	LOCALIZAÇÃO	PERÍODO DO LEVANTAMENTO	ÁREA TOTAL	ALTURA MÉDIA DE VÔO	EXTENSÃO TOTAL DAS LINHAS DE VOO		VELOCIDADE APROXIMADA DE VÔO	DATUM	DIREÇÃO DE LINHAS DE PRODUÇÃO (LP)	ESPAÇAMENTO ENTRE AS LINHAS DE PRODUÇÃO (LP)	DIREÇÃO DE LINHAS DE CONTROLE (LC)	ESPAÇAMENTO ENTRE AS LINHAS DE CONTROLE (LC)
					EXTENSÃO DAS LINHAS DE PRODUÇÃO (LP)	EXTENSÃO DAS LINHAS DE CONTROLE (LC)						
ÁREA 2 - BLOCO OESTE	Pitangui - São João Del Rei - Ipatinga	2000/2001	21564 km²	100 m	86519.48 km	8663.05 km	200 km/h	Córrego Alegre	N30E	250 m	N60W	2500m
ÁREA 2 - BLOCO LESTE	Pitangui - São João Del Rei - Ipatinga	2000/2001	13611 km²	100 m	54610.69 km	5468.07 km	200 km/h	Córrego Alegre	N30W	250 m	N60E	2500 m
ÁREA 3	Morro do Pilar - Cerro - Guanhães	2000/2001	10141 km²	100 m	49501 km		200 km/h	SAD-69	N30W	250 m	N60E	2500 m
ÁREA 10	Belo Horizonte - Curvelo - Três Marias	2009	40790 km²	100 m	83070.20 km	4222.70 km	270 km/h	Córrego Alegre	NS	500 m	EW	10000 m
ÁREA 12	Teófilo Otoni - Governador Valadares - Caratinga	2008/2009		100 m	87793.67 km		275 km/h	WGS-84	N30W	500 m	N60E	10000 m
ÁREA 15	Juiz de Fora - Cataguases - Manhuaçu	2010/2011		100 m	76954.60 km		242 km/h	Córrego Alegre	NS	500 m	EW	10000 m
RDV - BLOCOS I e III	Nova Lima - Caeté	1992	1700 km²	80 m	6726 km		70 a 110 km/h	SAD-69	N40W	250 m	N50E	5000 m
RDV - BLOCOS II e IV	Santa Bárbara - Barão de Cocais	1992	1700 km²	80 m	6726 km		70 a 110 km/h	SAD-69	N50E	250 m	N40W	5000 m
ITABIRA-FERROS	Faixa Itabira - Ferros	1996	4600 km²	150 m	9170 km		180 km/h	SAD-69	N40W	500 m	N24E	12000 m

Apêndice II – Perfis bidimensionais de deconvolução de Euler – Gravimetria

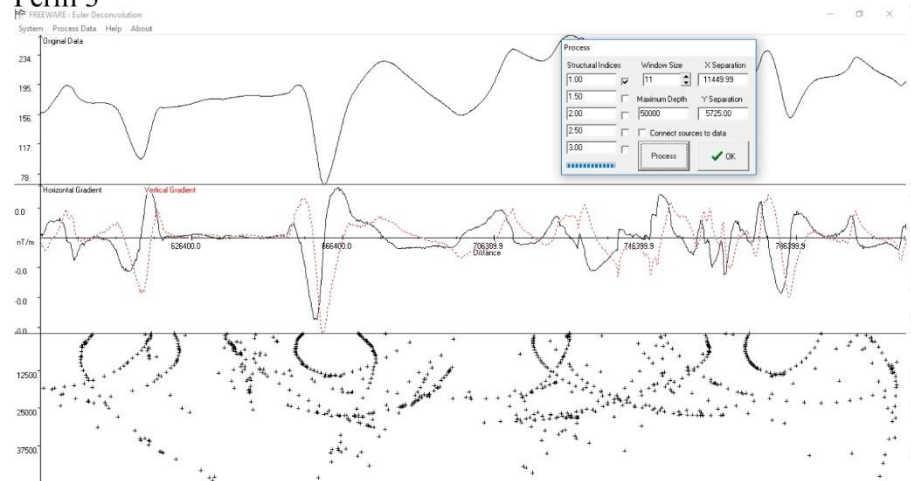
Perfil 1



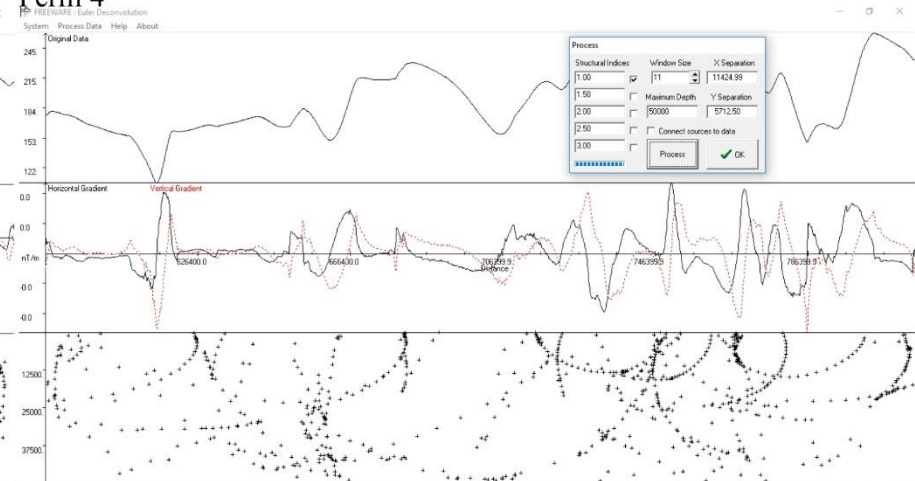
Perfil 2



Perfil 3

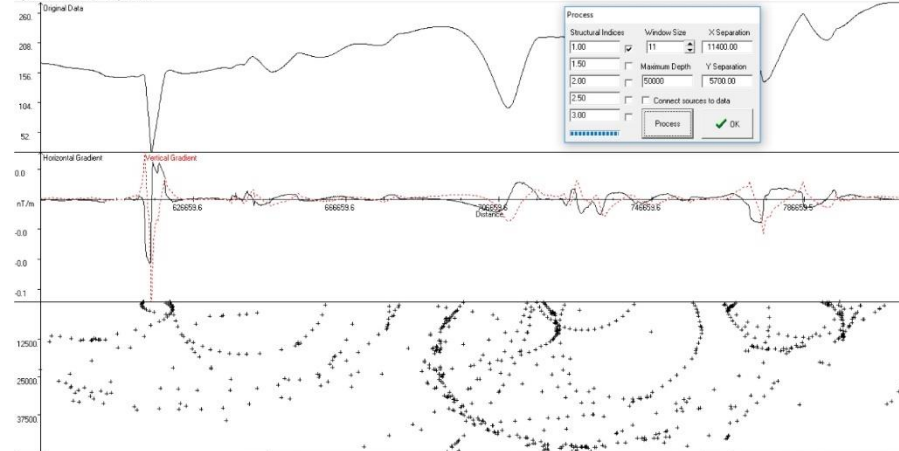


Perfil 4



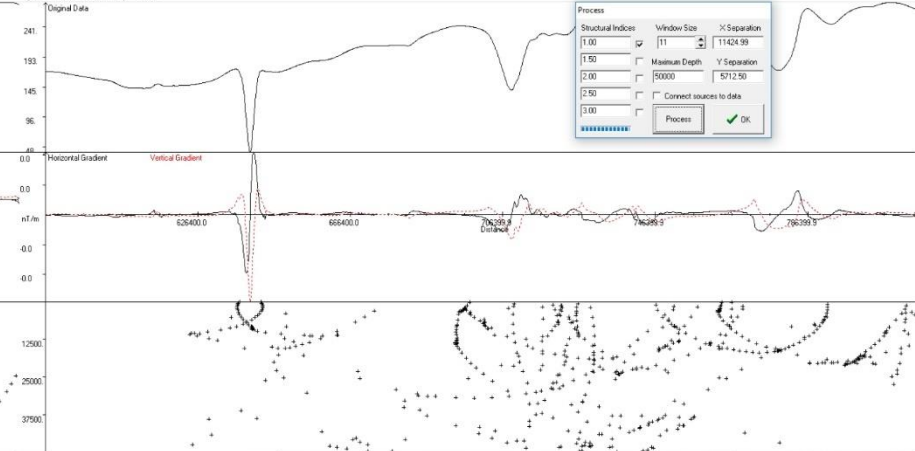
Perfil 5

FREEWARE : Euler Deconvolution
System Process Data Help About



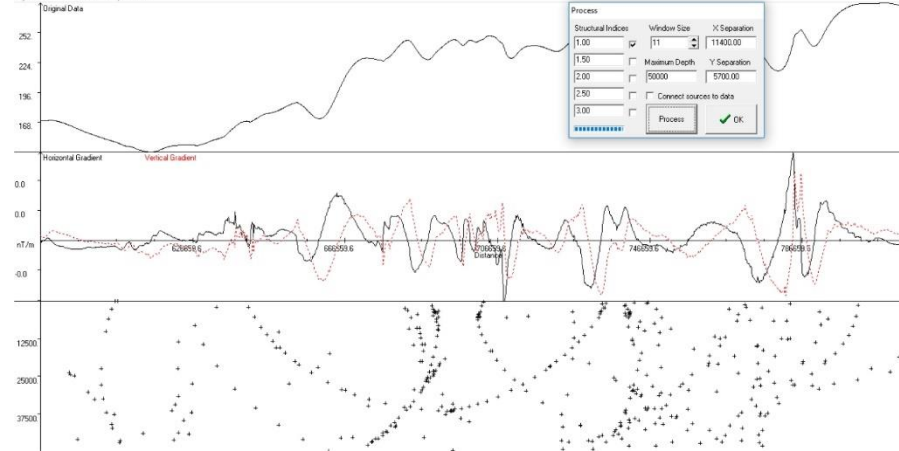
Perfil 6

FREEWARE : Euler Deconvolution
System Process Data Help About



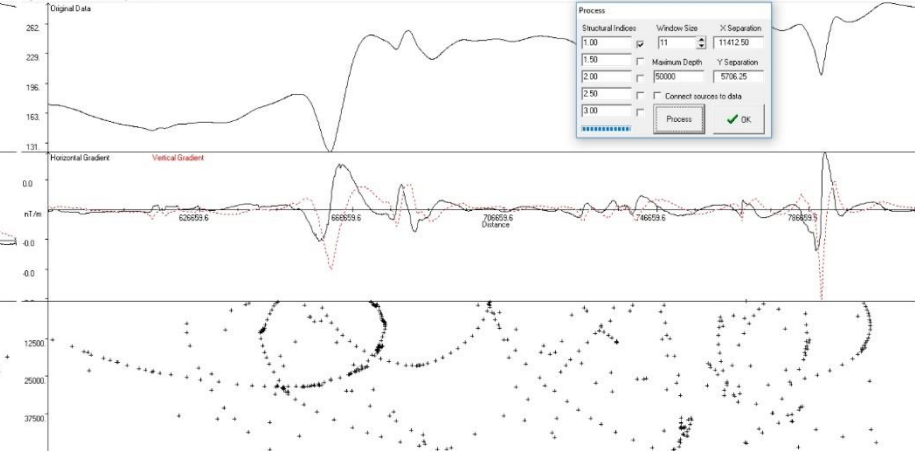
Perfil 7

FREEWARE : Euler Deconvolution
System Process Data Help About



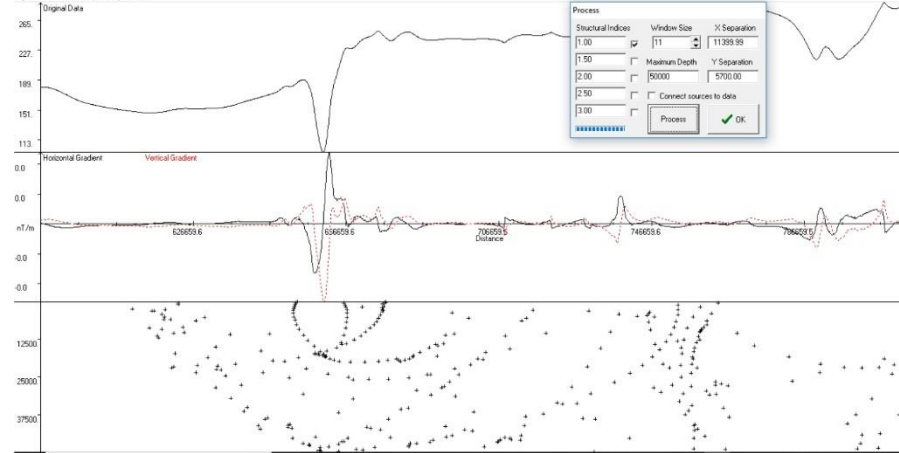
Perfil 8

FREEWARE : Euler Deconvolution
System Process Data Help About



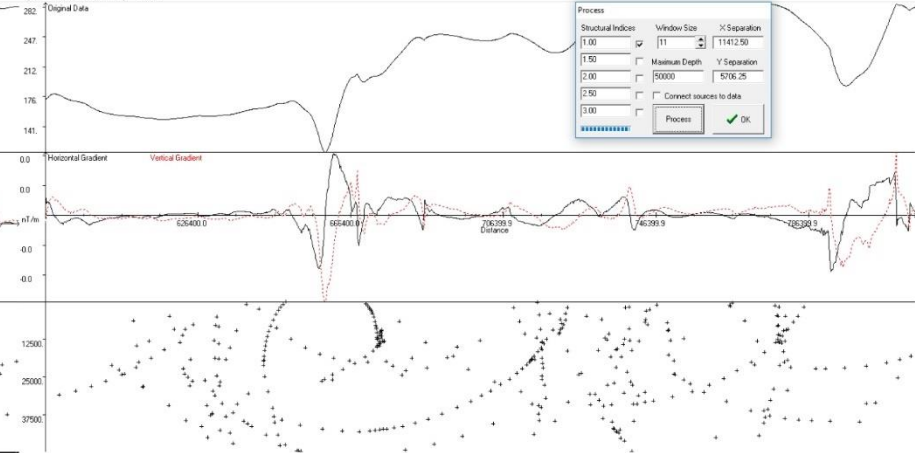
Perfil 9

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



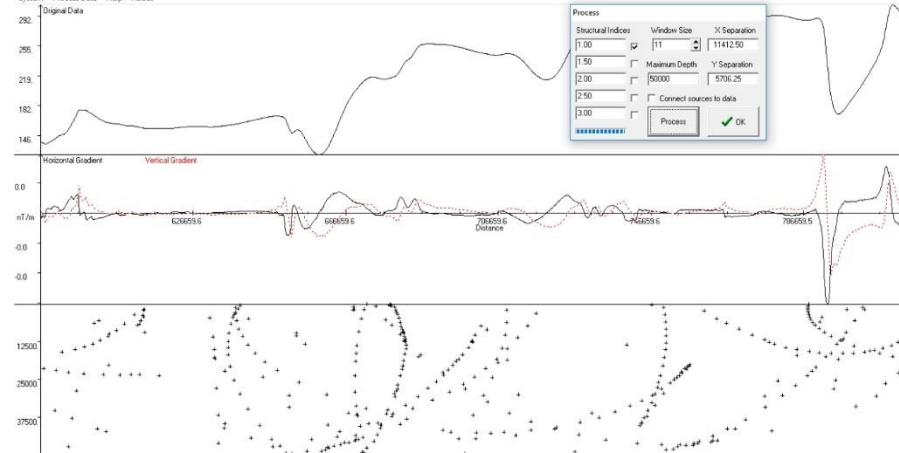
Perfil 10

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



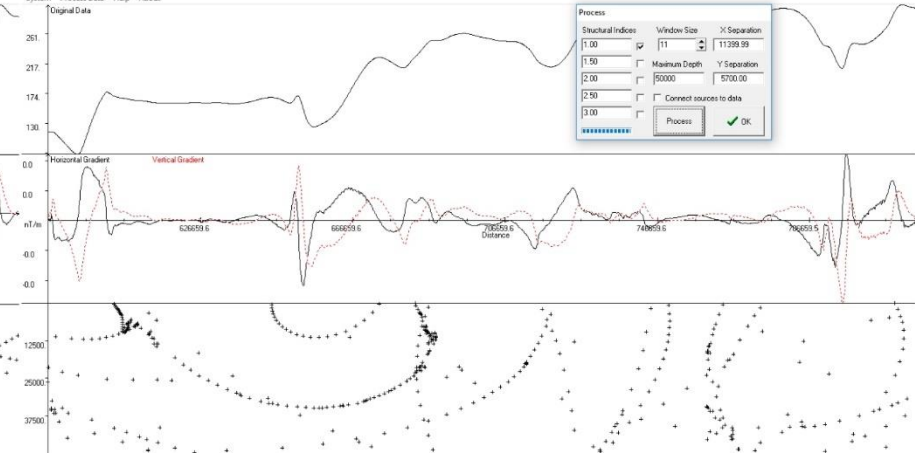
Perfil 11

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



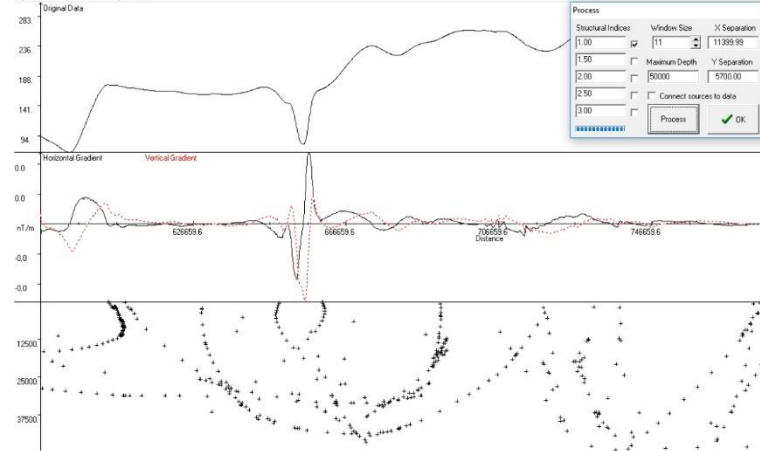
Perfil 12

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



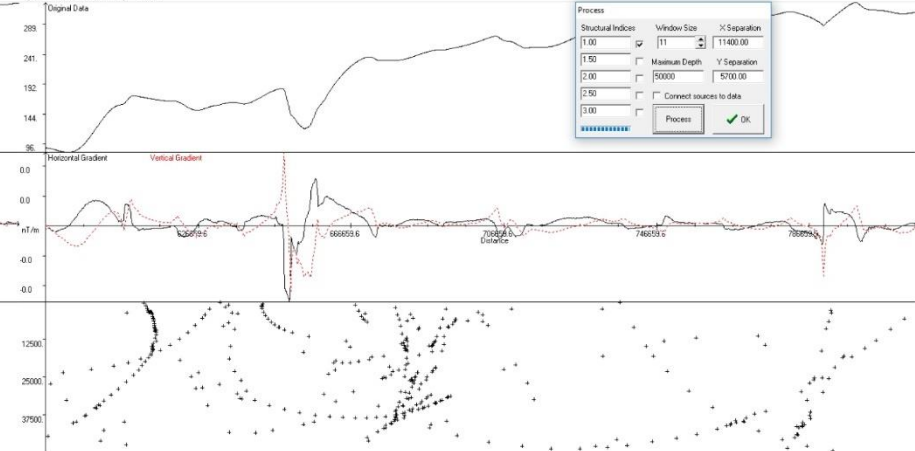
Perfil 13

FP FREEMAN : Euler Deconvolution
System Process Data Help About



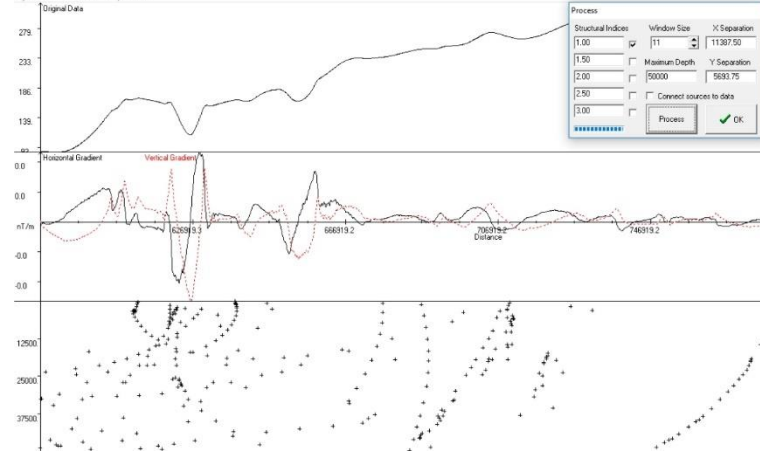
Perfil 14

FP FREEMAN : Euler Deconvolution
System Process Data Help About



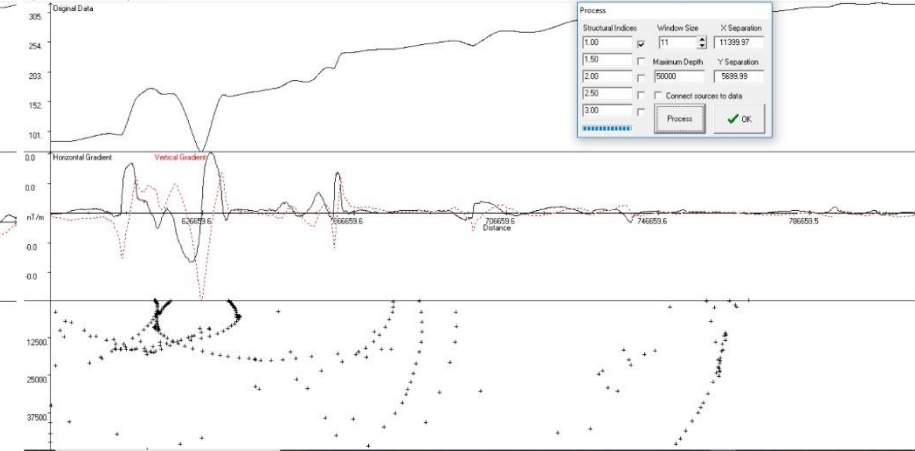
Perfil 15

FP FREEMAN : Euler Deconvolution
System Process Data Help About



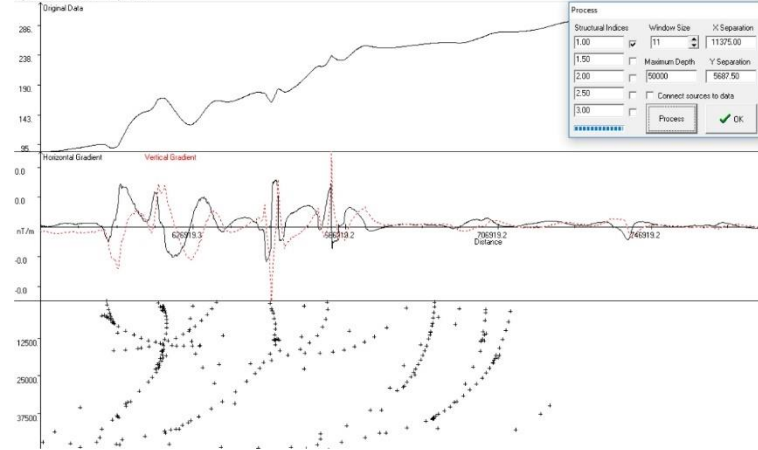
Perfil 16

FP FREEMAN : Euler Deconvolution
System Process Data Help About



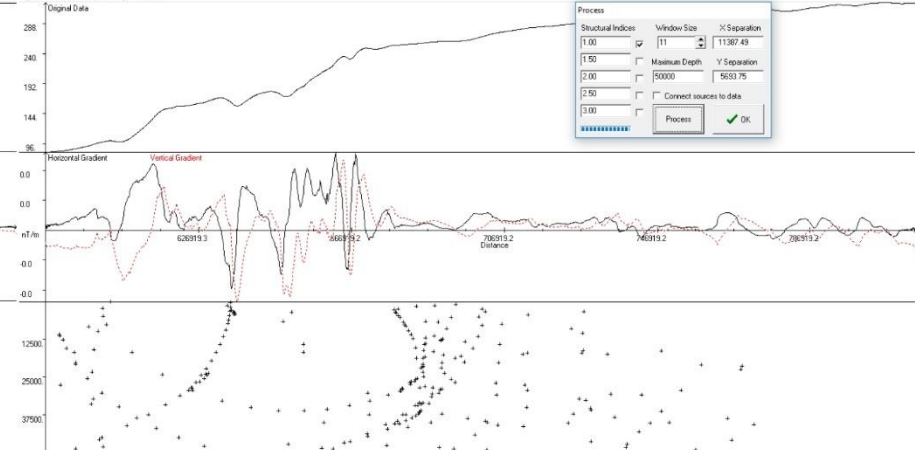
Perfil 17

FP FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



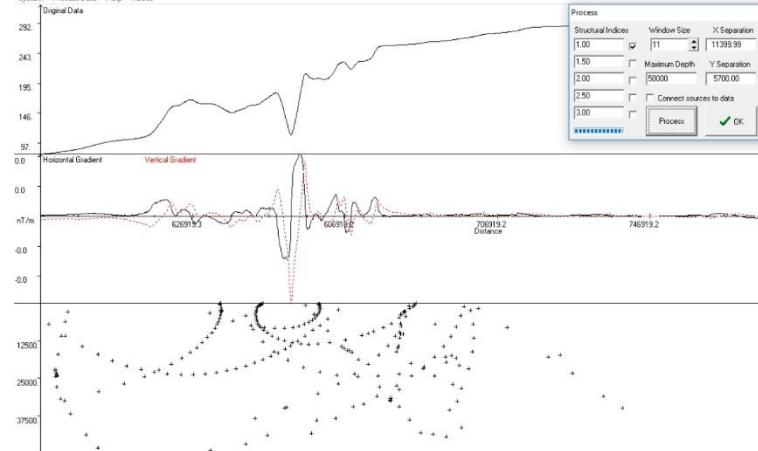
Perfil 18

FP FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



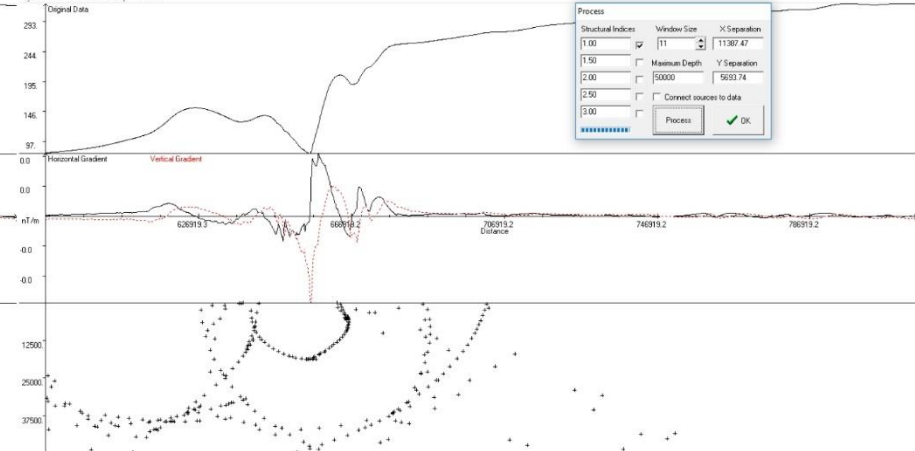
Perfil 19

FP FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



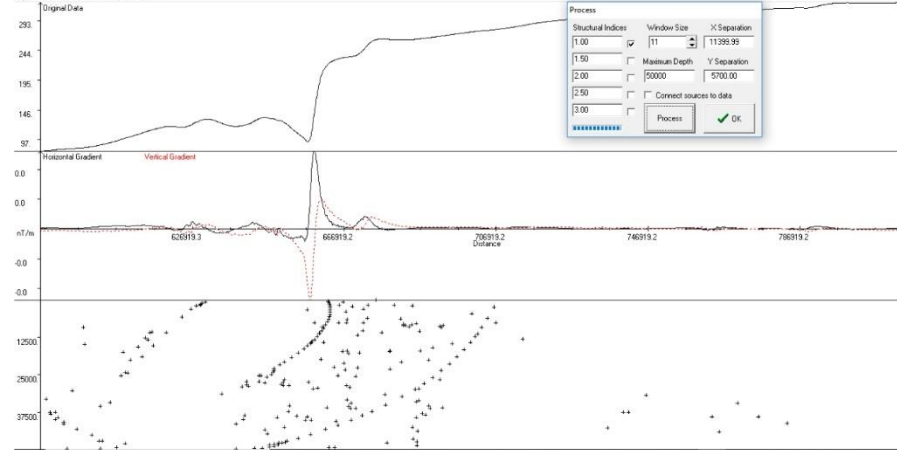
Perfil 20

FP FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



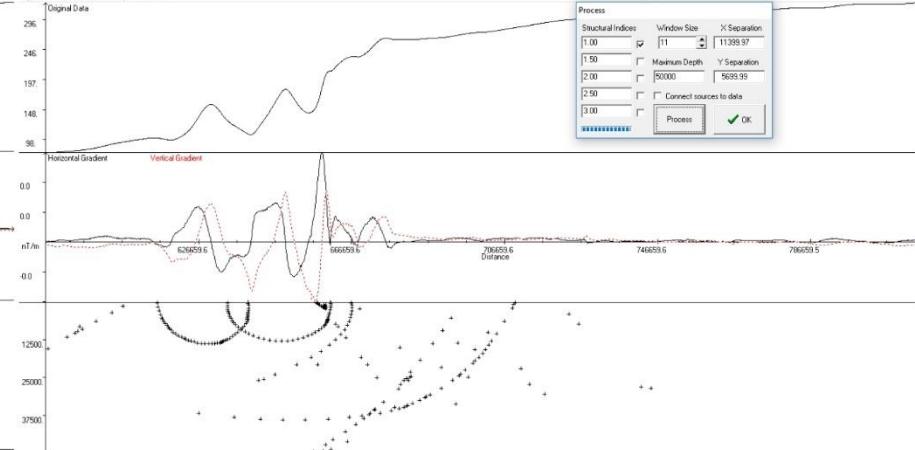
Perfil 21

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



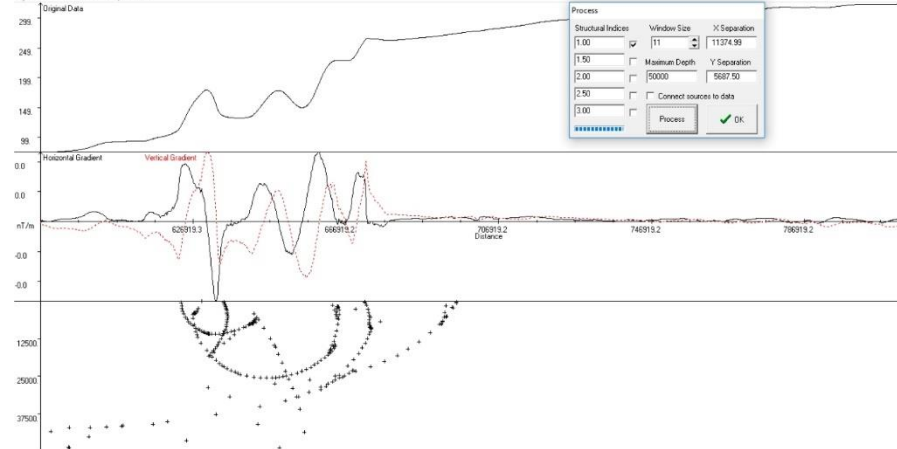
Perfil 22

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



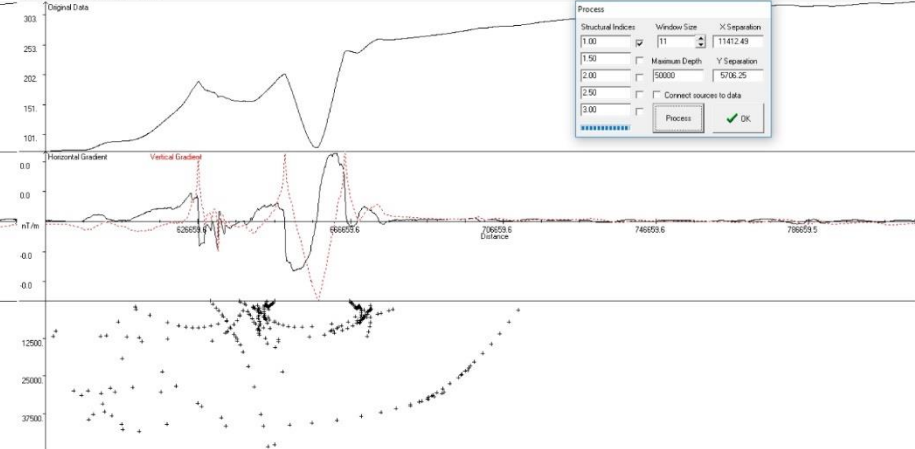
Perfil 23

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



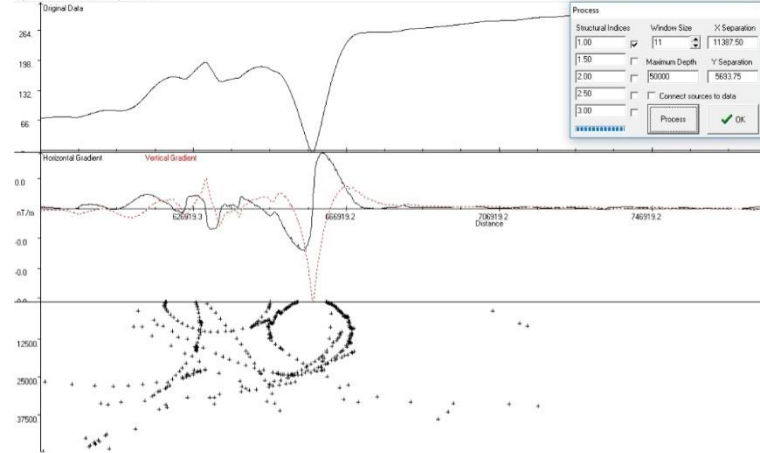
Perfil 24

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



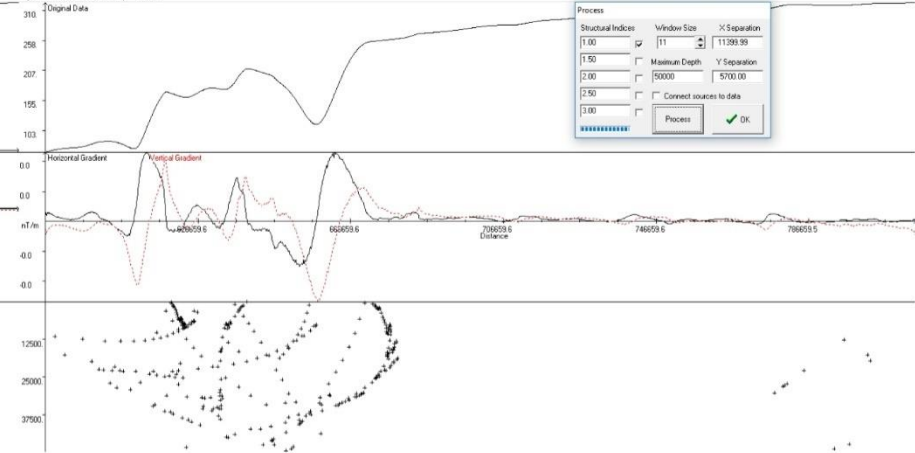
Perfil 25

FP FREEMAN : Euler Deconvolution
System Process Data Help About



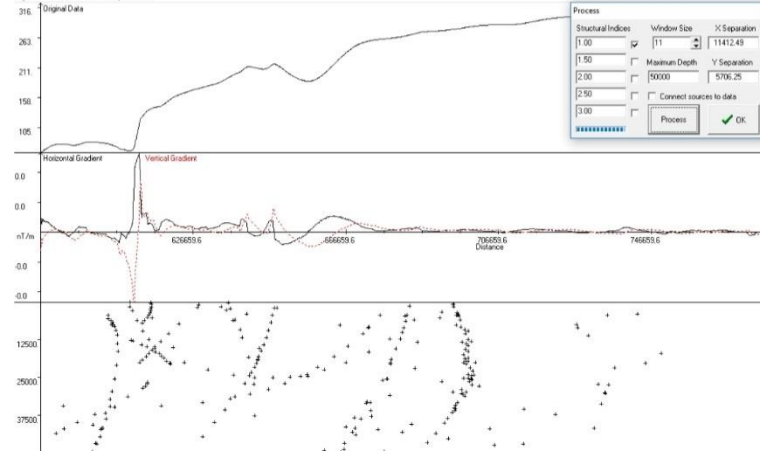
Perfil 26

FP FREEMAN : Euler Deconvolution
System Process Data Help About



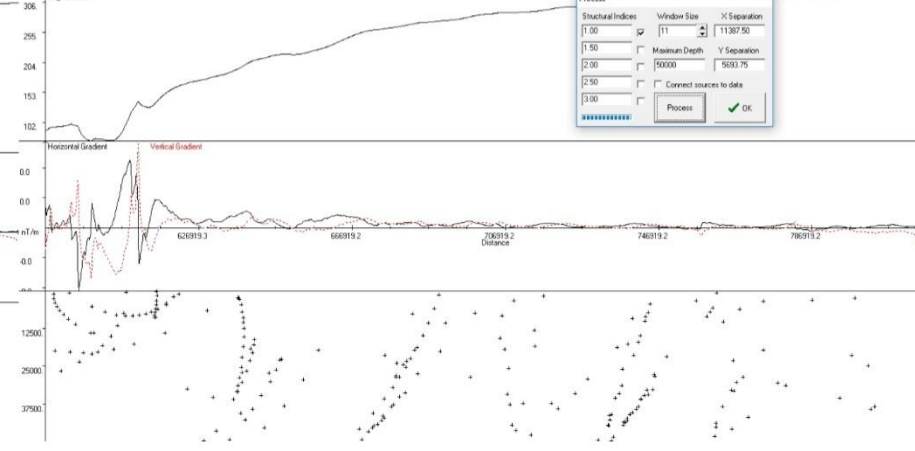
Perfil 27

FP FREEMAN : Euler Deconvolution
System Process Data Help About



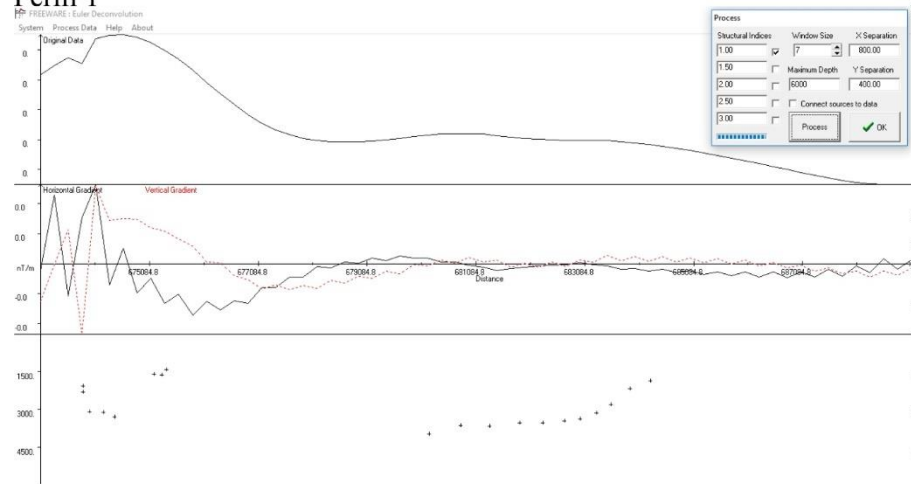
Perfil 28

FP FREEMAN : Euler Deconvolution
System Process Data Help About

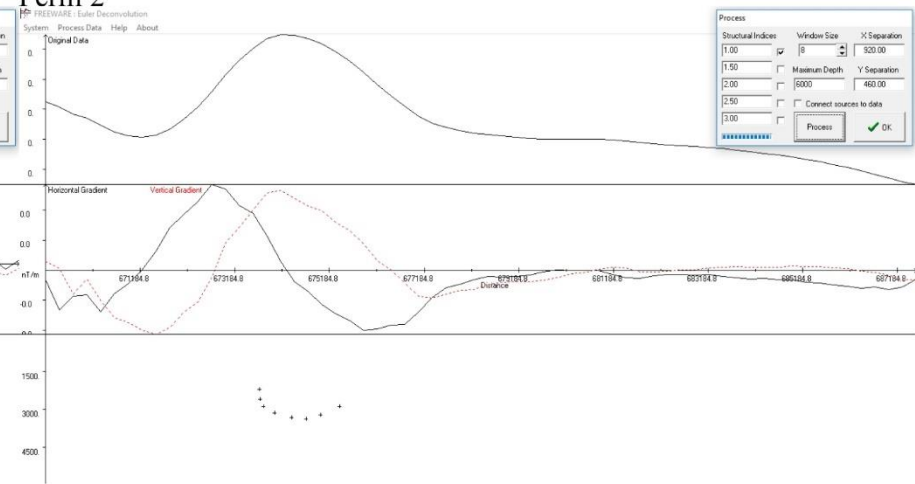


Apêndice III – Perfis bidimensionais de deconvolução de Euler – Magnetometria – Falha de Água Quente

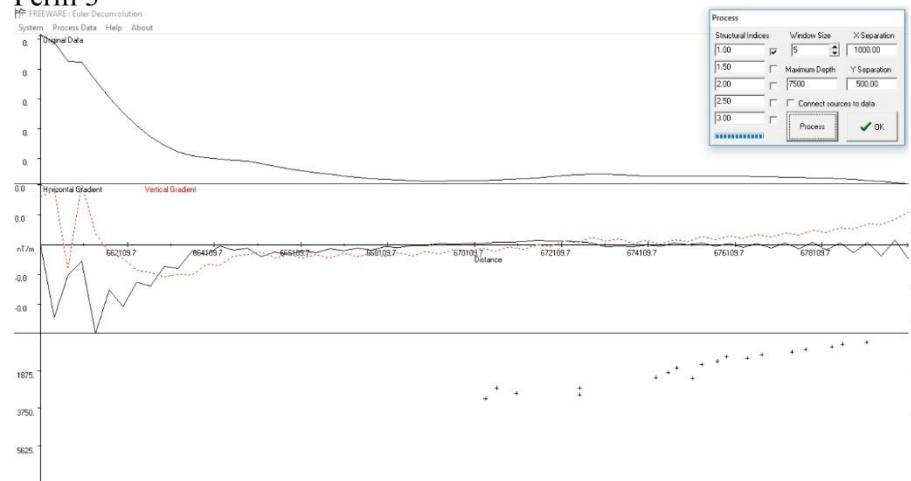
Perfil 1



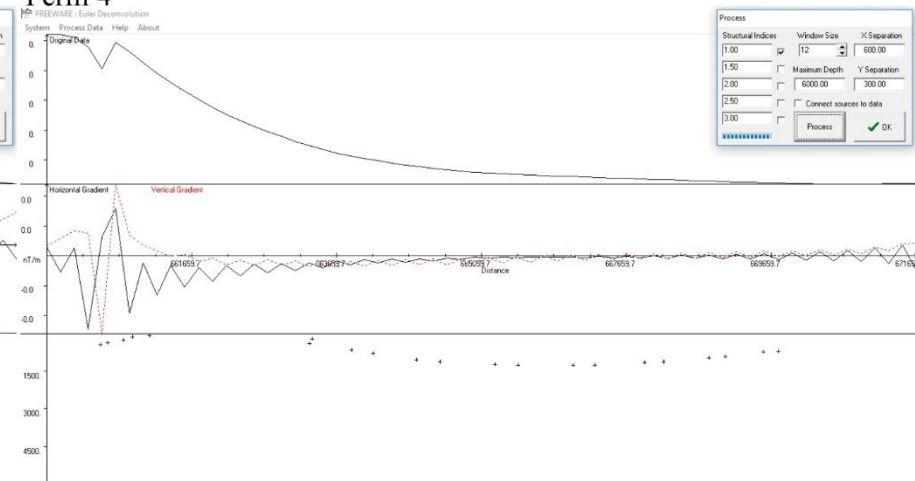
Perfil 2



Perfil 3

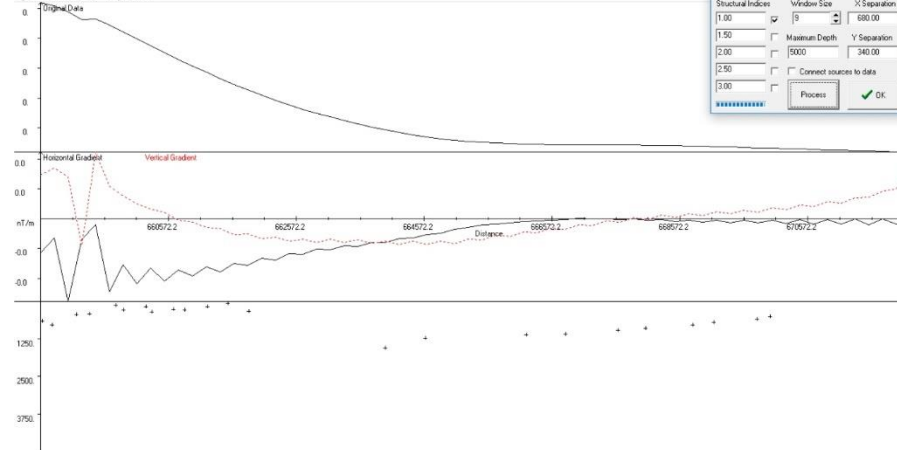


Perfil 4



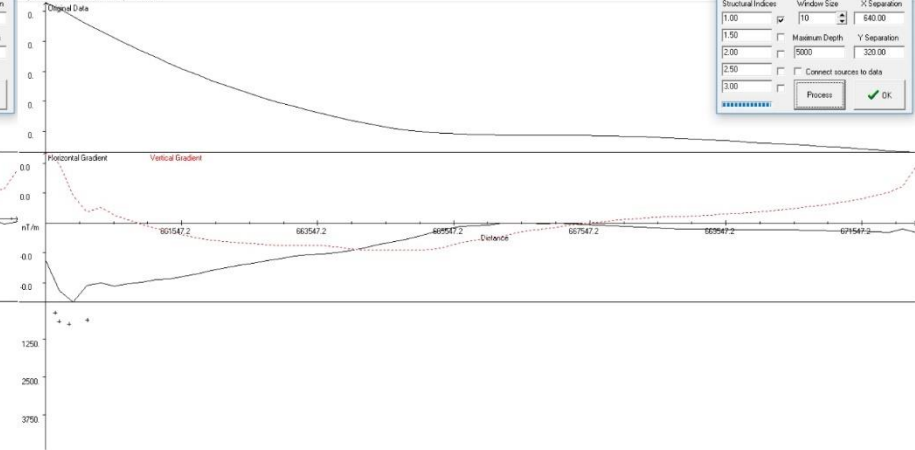
Perfil 5

MP FREEWARE : Euler Deconvolution
System Process Data Help About



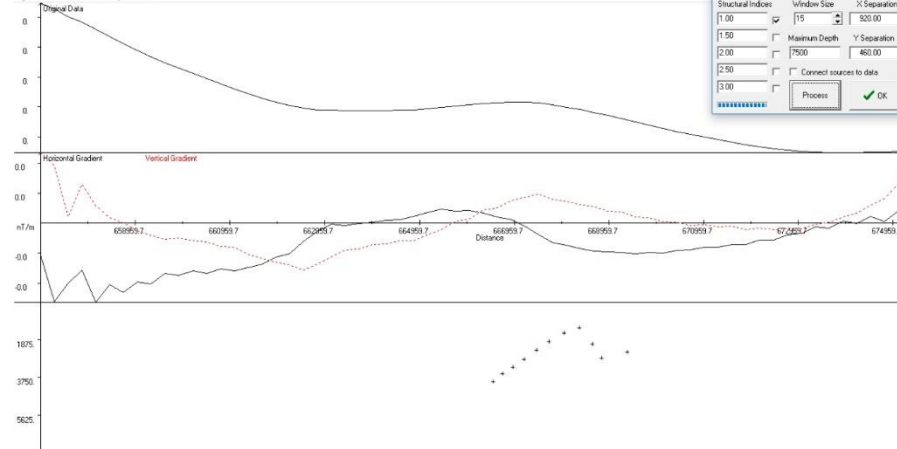
Perfil 6

MP FREEWARE : Euler Deconvolution
System Process Data Help About



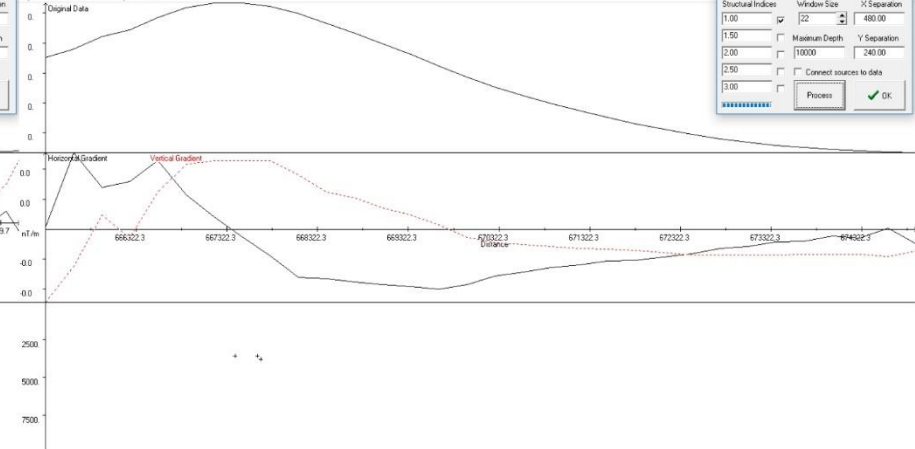
Perfil 7

MP FREEWARE : Euler Deconvolution
System Process Data Help About



Perfil 8

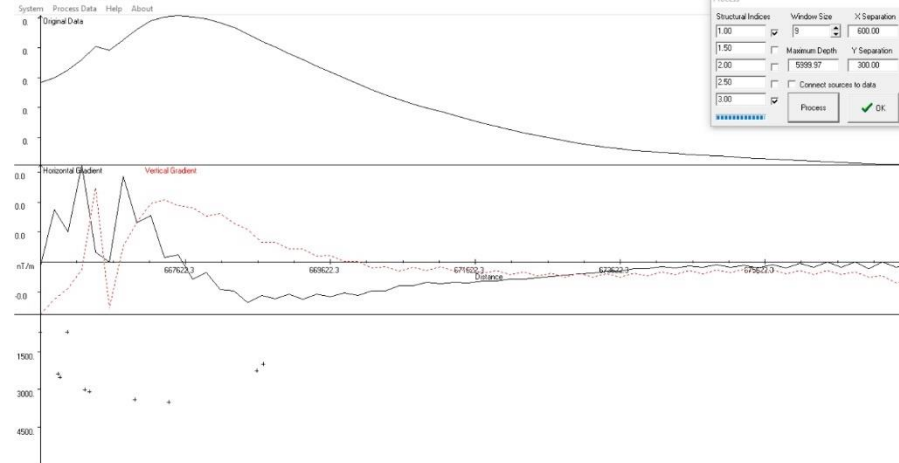
MP FREEWARE : Euler Deconvolution
System Process Data Help About



Perfil 9

FREEWARE - Euler Deconvolution

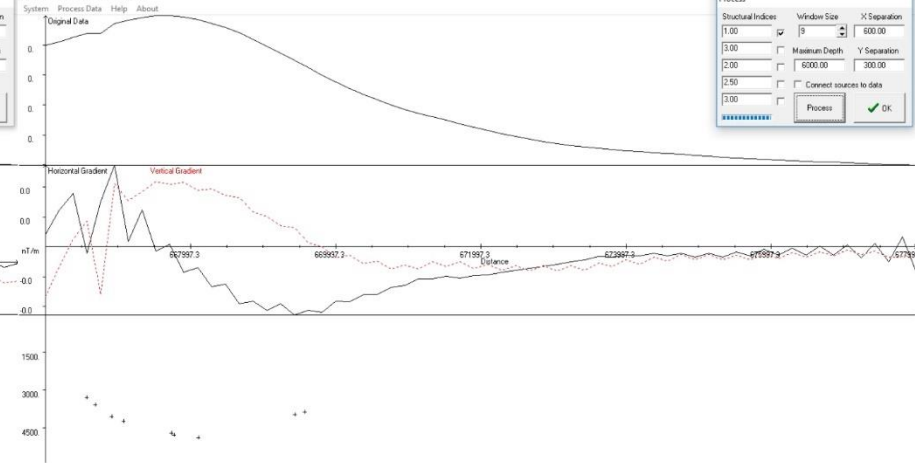
System Process Data Help About



Perfil 10

FREEWARE - Euler Deconvolution

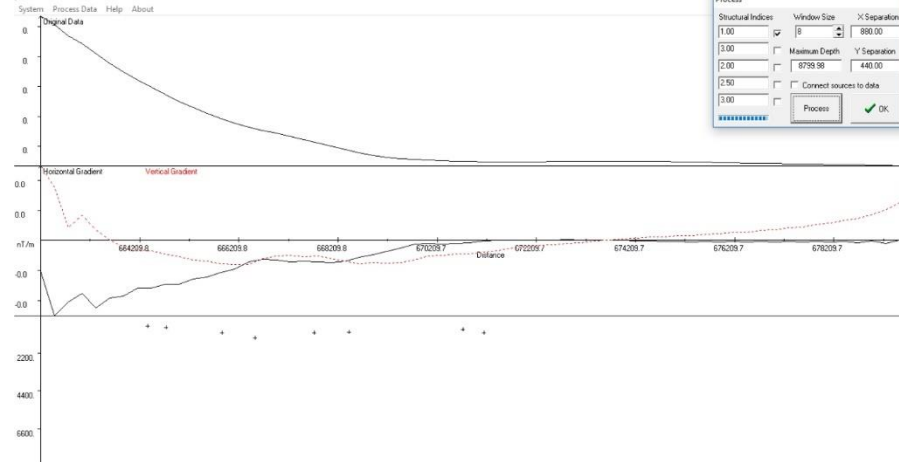
System Process Data Help About



Perfil 11

FREEWARE - Euler Deconvolution

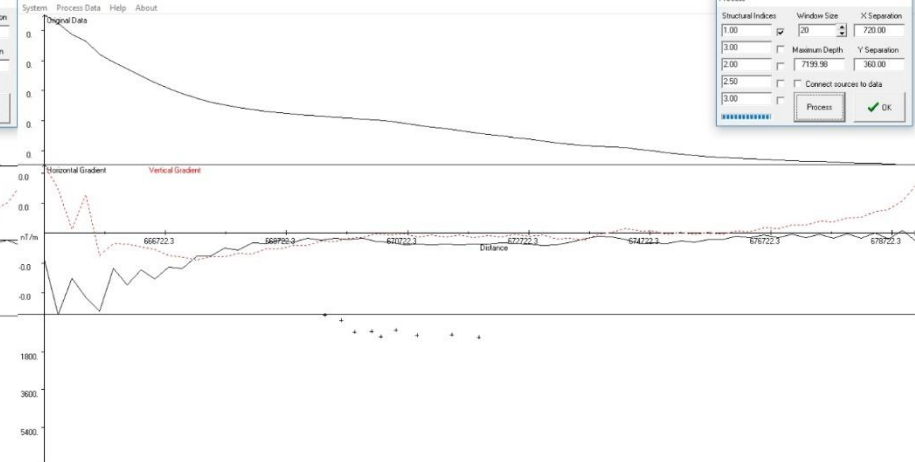
System Process Data Help About



Perfil 12

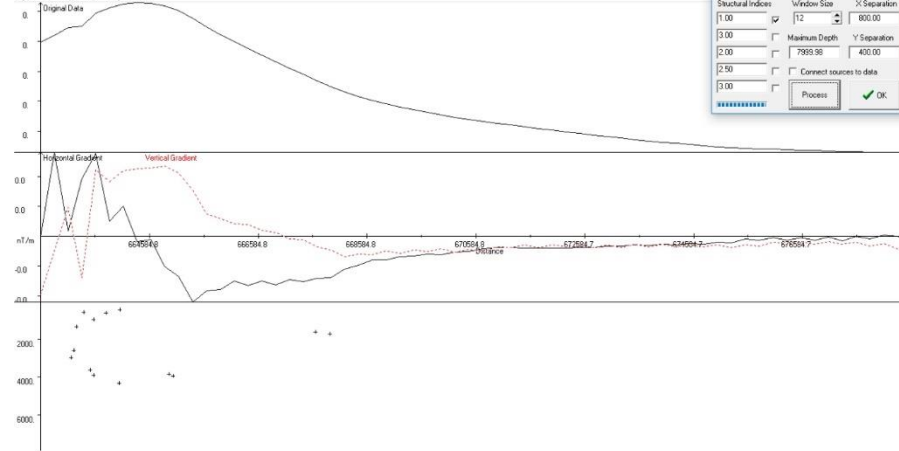
FREEWARE - Euler Deconvolution

System Process Data Help About



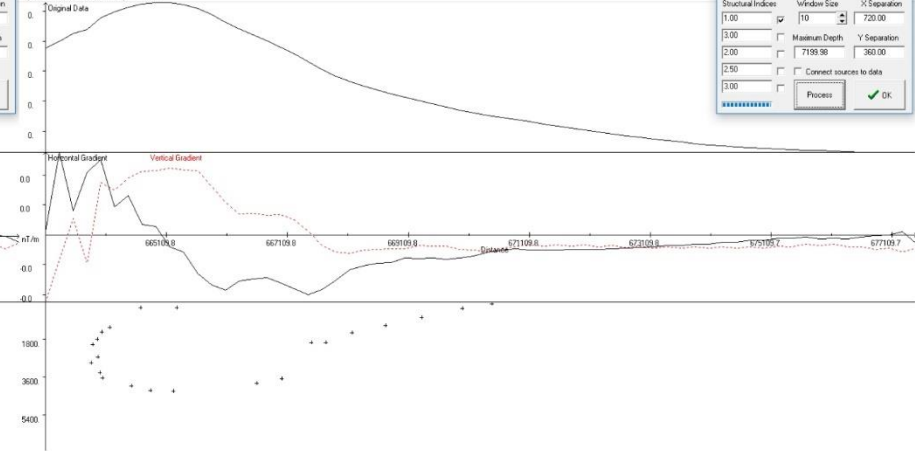
Perfil 13

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



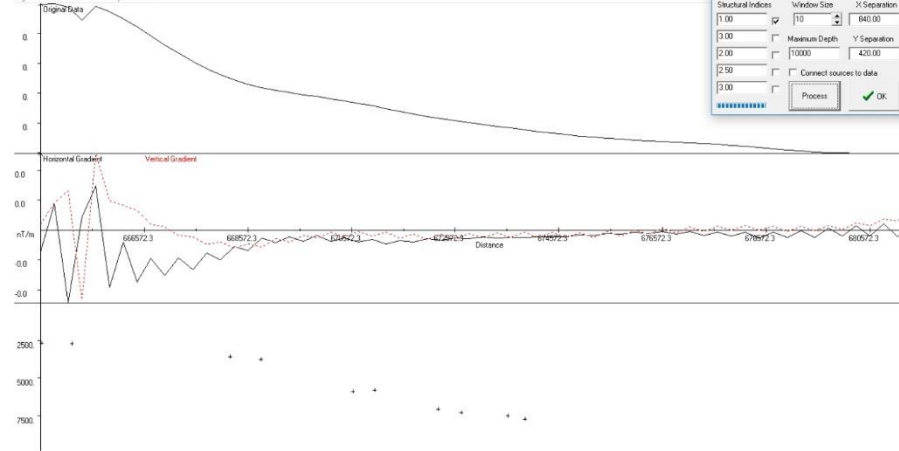
Perfil 14

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



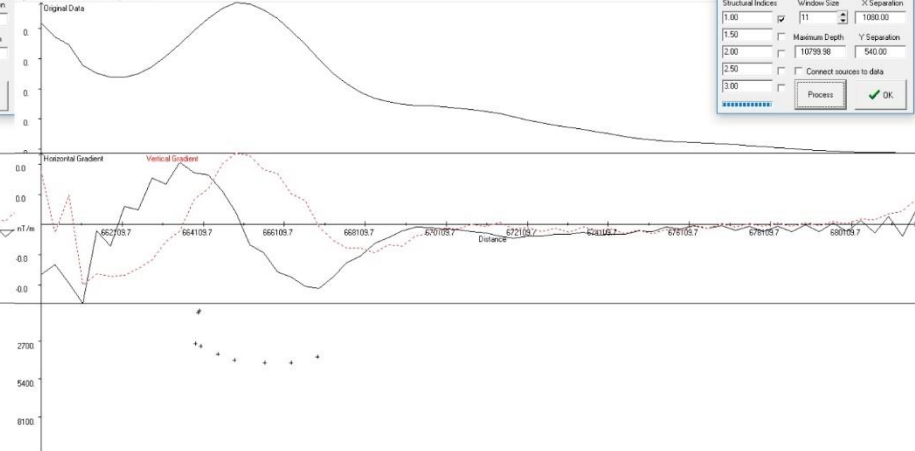
Perfil 15

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



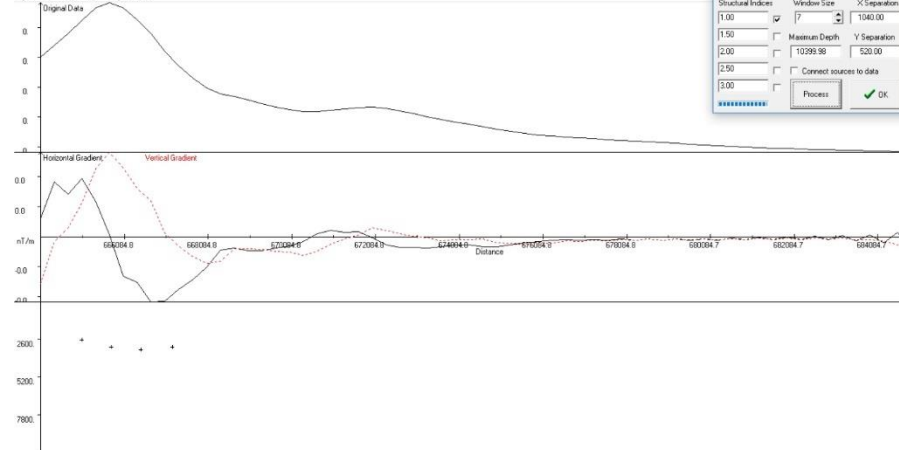
Perfil 16

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



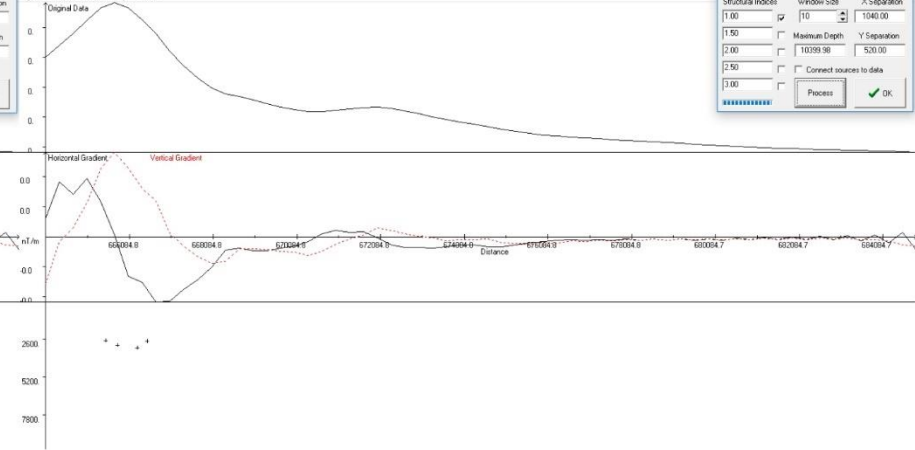
Perfil 17

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



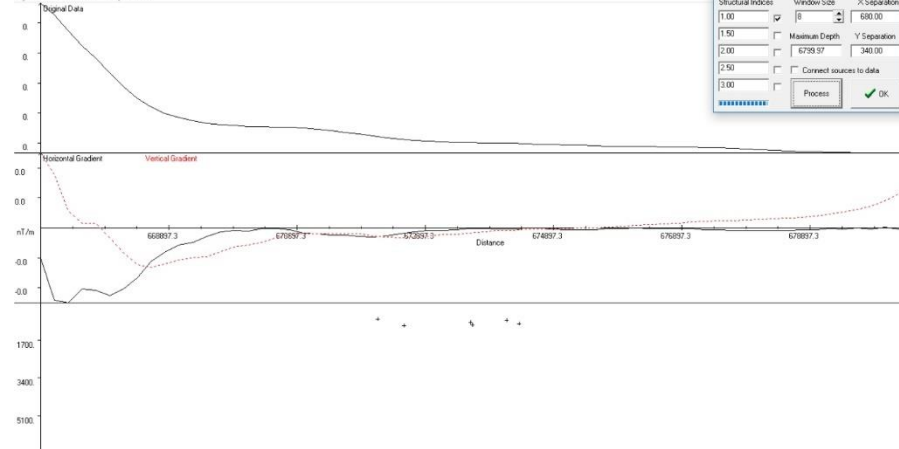
Perfil 18

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



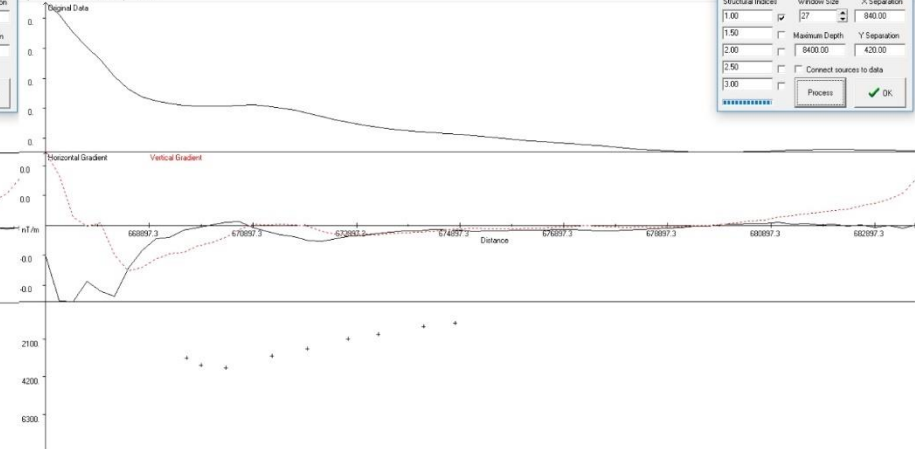
Perfil 19

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



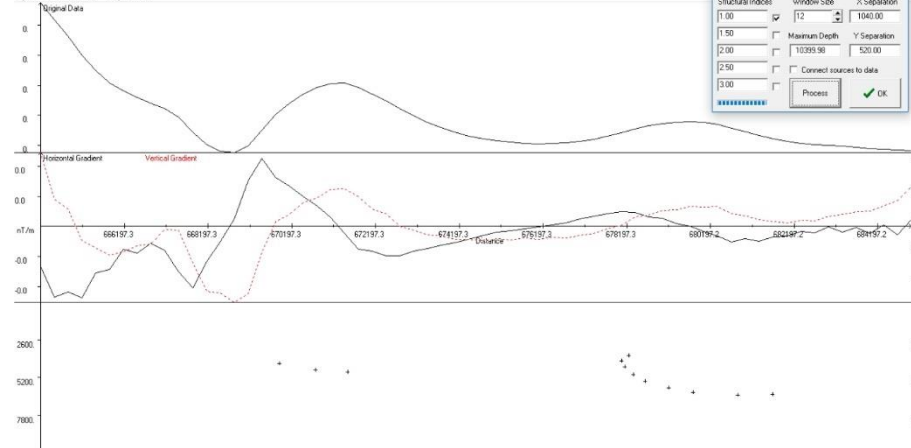
Perfil 20

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



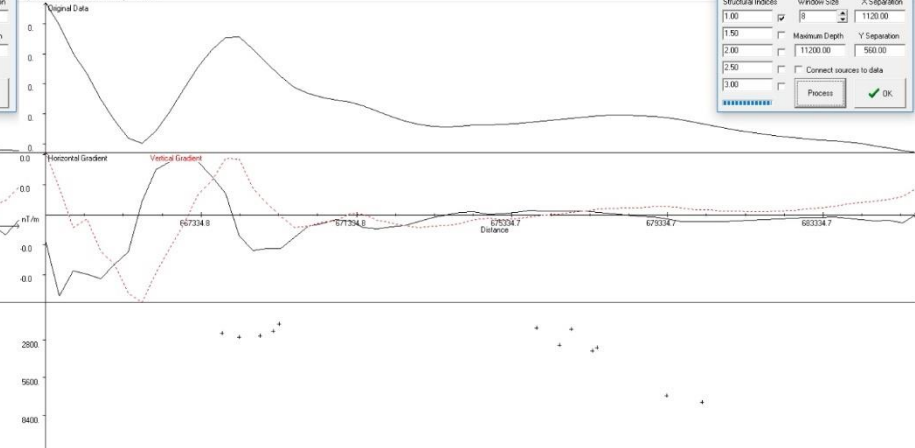
Perfil 21

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



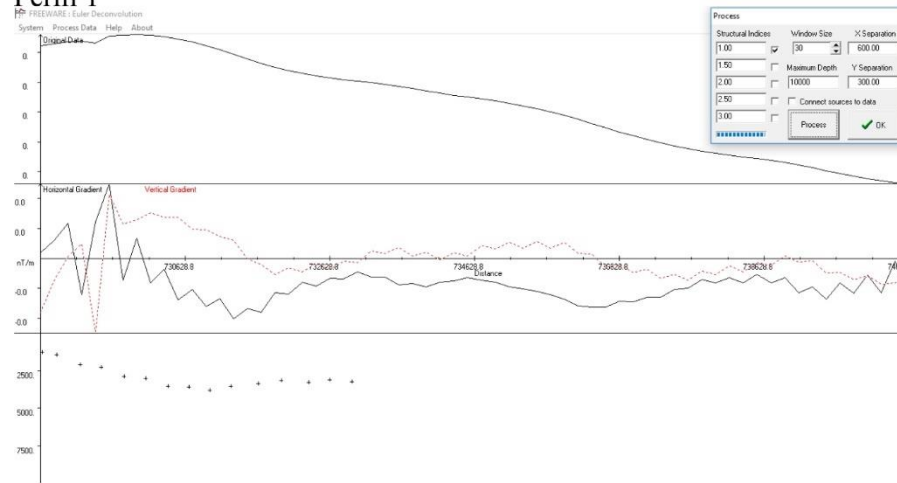
Perfil 22

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About

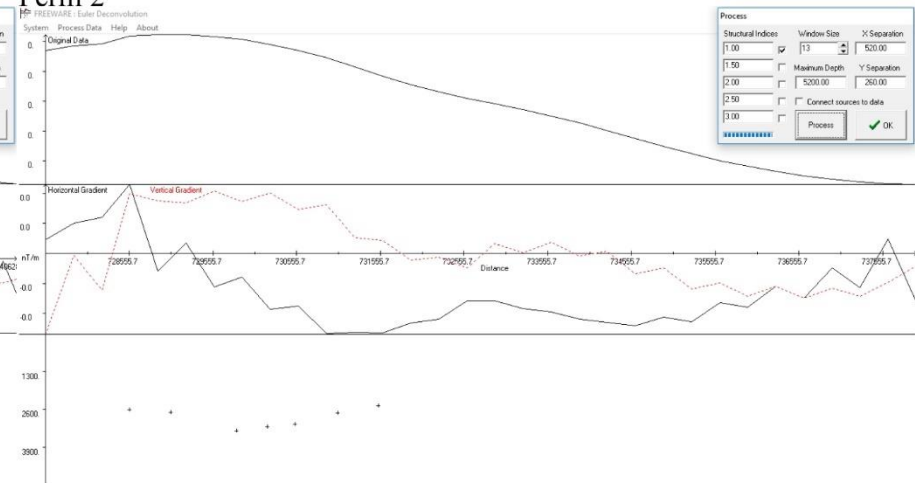


Apêndice IV -Perfis bidimensionais de deconvolução de Euler – Magnetometria – Falha Dom Silvério

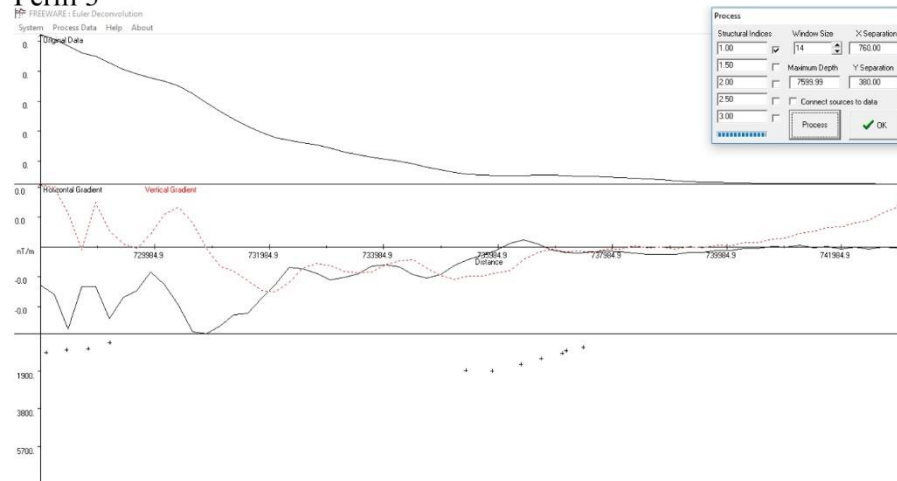
Perfil 1



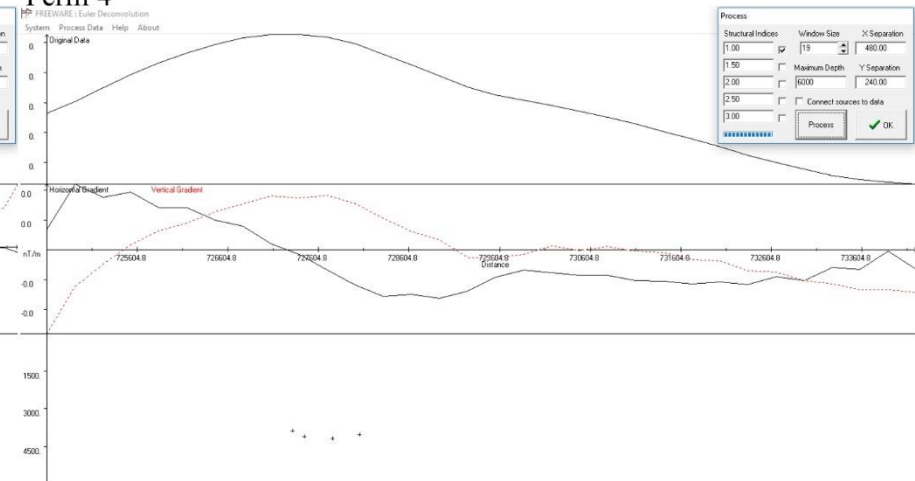
Perfil 2



Perfil 3

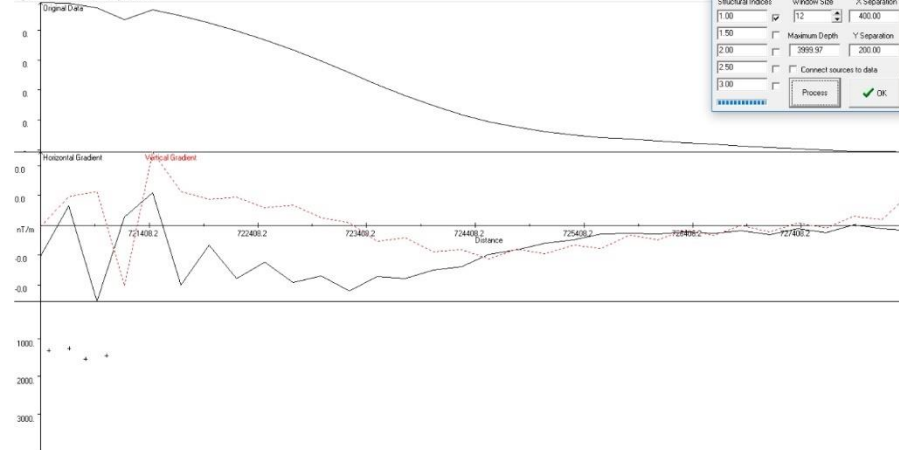


Perfil 4



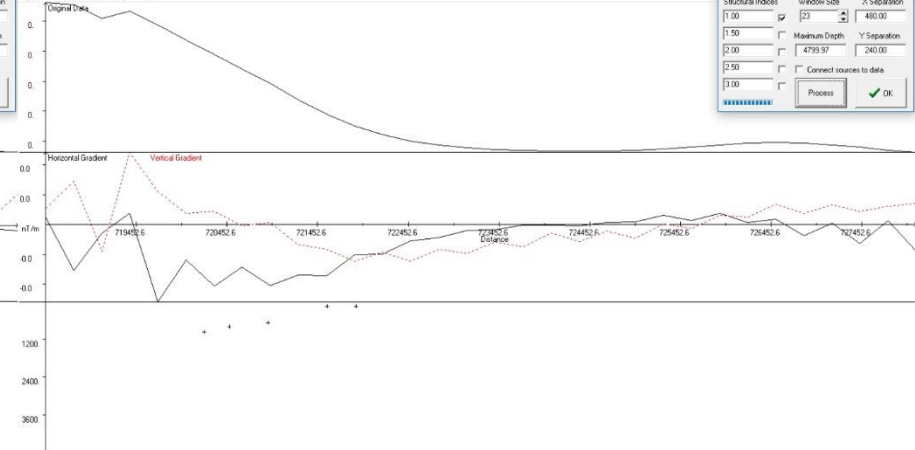
Perfil 5

FP FREEMARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



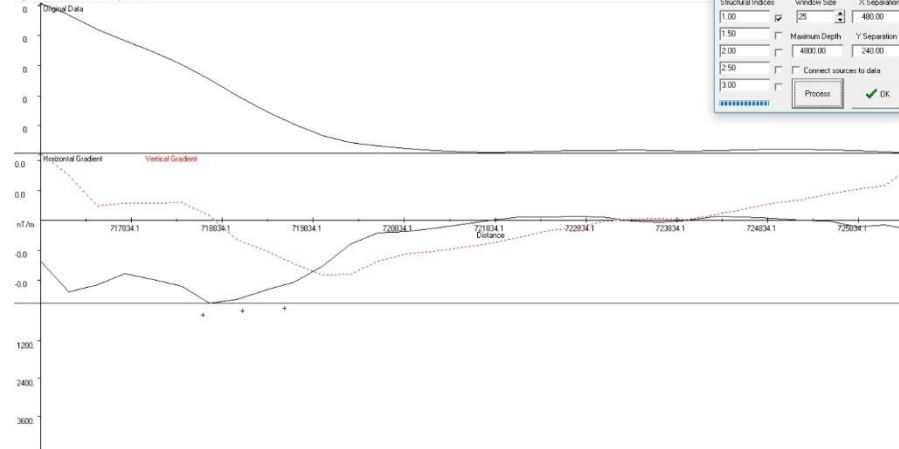
Perfil 6

FP FREEMARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



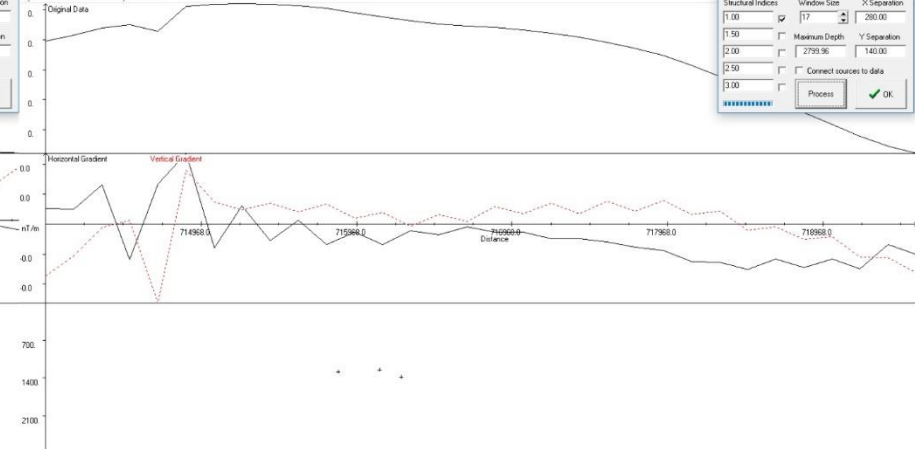
Perfil 7

FP FREEMARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



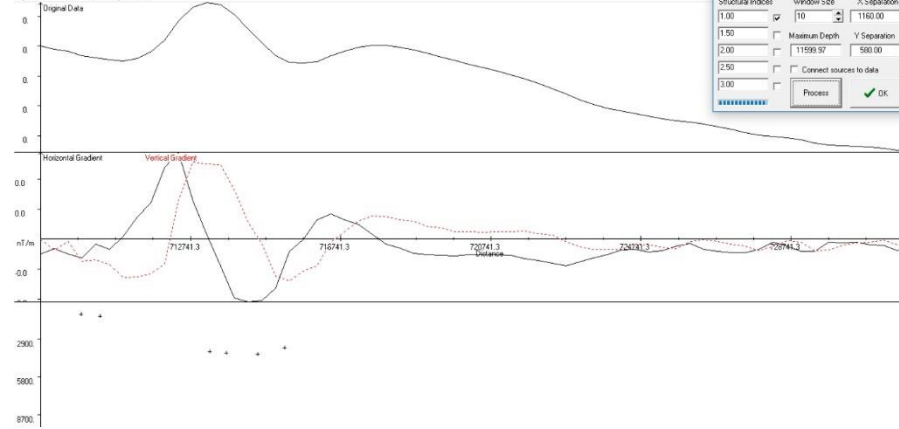
Perfil 8

FP FREEMARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



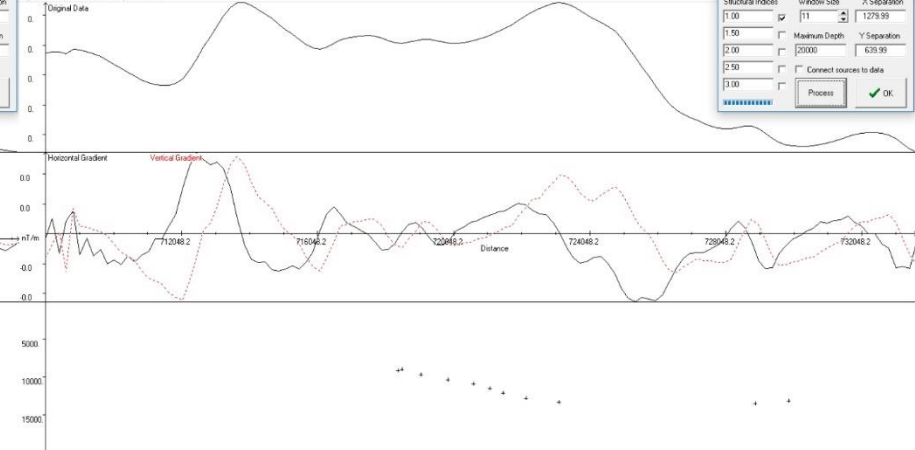
Perfil 9

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



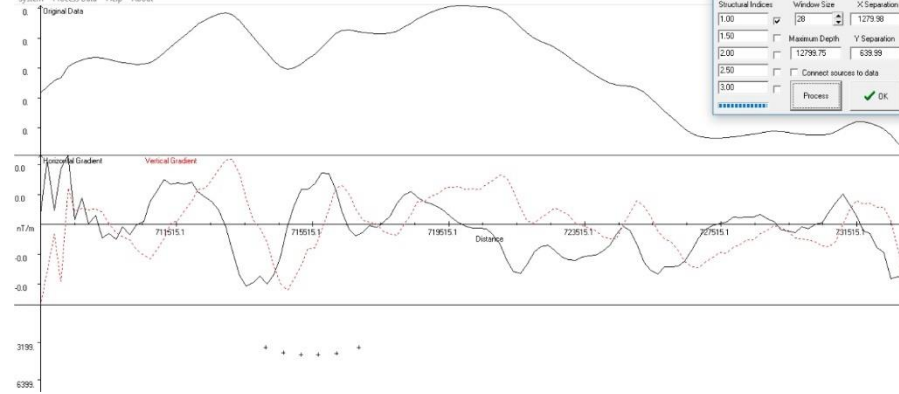
Perfil 10

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



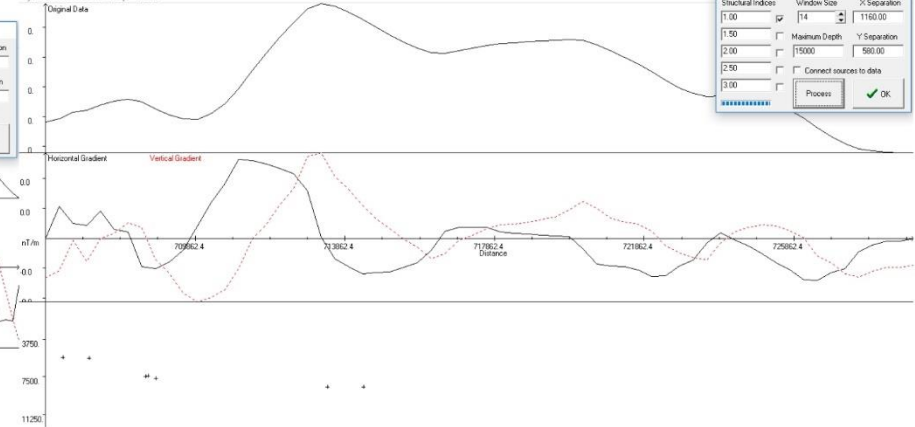
Perfil 11

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



Perfil 12

FREEWARE - Euler Deconvolution
System Process Data Help About



Perfil 13

FREEWARE | Euler Deconvolution
System Process Data Help About

