



Observatório
Nacional

PROGRAMA DE PÓS
GRADUAÇÃO EM
GEOFÍSICA

Ministério da
Ciência, Tecnologia



TESE DE DOUTORADO

APLICAÇÃO DE PROCESSAMENTO E INVERSÃO GEOFÍSICA
3D DE DADOS DE AEROGRADIOMETRIA DA GRAVIDADE
NA ESTIMAÇÃO DA ESTRUTURA DO MINÉRIO DE FERRO
NO SINCLINAL GANDARELA – QUADRILÁTERO FERRÍFERO
– MINAS GERAIS

Dionísio Uendro Carlos

Orientadora

Valéria Cristina Ferreira Barbosa

Rio de Janeiro

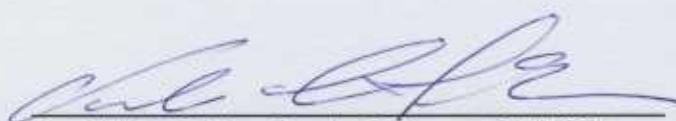
2013

"APLICAÇÃO DE PROCESSAMENTO E INVERSÃO GEOFÍSICA 3D DE DADOS
DE AEROGRADIOMETRIA DA GRAVIDADE NA ESTIMAÇÃO DA ESTRUTURA
DO MINÉRIO DE FERRO NO SINCLINAL GANDARELA – QUADRILÁTERO
FERRÍFERO – MINAS GERAIS"

DIONÍSIO UENDRO CARLOS

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOFÍSICA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM GEOFÍSICA.

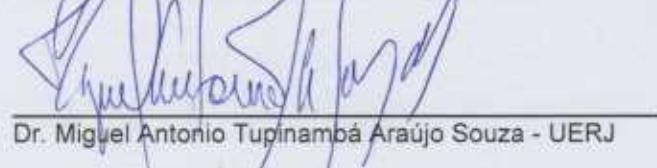
Aprovada por:



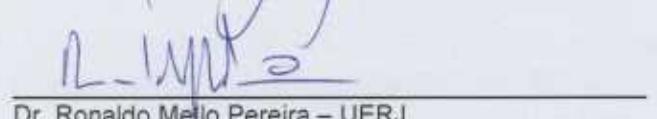
Dra. Valéria Cristina Ferreira Barbosa – ON/MCTI
(orientadora)



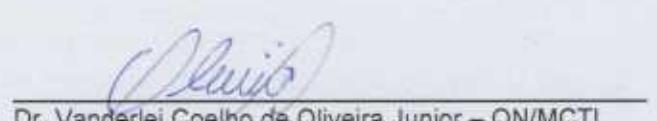
Dr. Júlio César Soares de Oliveira Lyrio – PETROBRÁS



Dr. Miguel Antonio Tupinambá Araújo Souza - UERJ



Dr. Ronaldo Mello Pereira – UERJ



Dr. Vanderlei Coelho de Oliveira Junior – ON/MCTI

RIO DE JANEIRO – BRASIL

18 DE DEZEMBRO DE 2013

**APLICAÇÃO DE PROCESSAMENTO E INVERSÃO GEOFÍSICA 3D DE DADOS
DE AEROGRADIOMETRIA DA GRAVIDADE NA ESTIMAÇÃO DA ESTRUTURA
DO MINÉRIO DE FERRO NO SINCLINAL GANDARELA – QUADRILÁTERO
FERRÍFERO – MINAS GERAIS**

Dionísio Uendro Carlos

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOFÍSICA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM GEOFÍSICA.

Aprovada por:

Dra. Valéria Cristina Ferreira Barbosa (ON/MCTI/Orientadora)

Dr. Júlio César Soares de Oliveira Lyrio (PETROBRAS)

Dr. Miguel Antonio Tupinambá Araujo Souza (UERJ)

Dr. Ronaldo Mello Pereira (UERJ)

Dr. Vanderlei Coelho de Oliveira Junior (ON/MCTI)

Dr. Luis Carlos de Carvalho Benyosef (ON/MCTI) (Suplente)

Dr. Iris Pereira Escobar (UERJ) (Suplente)

RIO DE JANEIRO – BRASIL

2013

Dedico este trabalho a meu pai, Dionisio Carlos, ex-bóia-fria, meu herói.

A minha mãe, Olga de Oliveira Carlos, por sempre estar presente.

A meu padrinho, Vitório de Oliveira (in memorian), por seu caráter.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, criador de tudo.

Escrever uma tese de doutorado é um trabalho árduo. Dedicar-se a pesquisa e ao trabalho simultaneamente de maneira a compor um trabalho que contribuirá com a literatura na área de gradiometria gravimétrica foi uma tarefa deveras trabalhosa, mas muito recompensante.

Espero não cometer nenhuma injustiça com os nomes aqui não citados, caso ocorram, perdoem o esquecimento do autor, pois não foi proposital. Agradeço a Dra. Valeria Barbosa, amiga e orientadora, nessa ordem por acreditar que o trabalho seria conduzido de uma forma lógica e coerente.

Aos membros da banca examinadora pelas observações e discussões sobre o trabalho desenvolvido agradeço ao Dr. Julio Lyrio e aos professores: Dr. Ronaldo Mello Pereira, Dr. Miguel Antonio Tupinambá Araujo Souza, Dr. Vanderlei Coelho de Oliveira Junior, Dr. Luis Carlos de Carvalho Benyosef e Dr. Iris Pereira Escobar.

Agradeço ao meu orientador do mestrado em geofísica nuclear, Prof. Dr. Fernando Brenha Ribeiro do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, que no ano 2000 me aceitou como aluno bolsista e sempre me conduziu a pesquisa. As professoras Dra Leila Marques e Dra Naomi Ussami por sempre serem exemplos de pesquisadoras e incentivadoras. Ao Dr. Wladimir Shukowsky pelo incentivo em pesquisar dados de gradiometria gravimétrica.

Aos amigos Leonardo Uieda e Vanderlei, pessoas que eu admiro, pela inteligência e facilidade por vagarem nos vales das sombras da morte do formalismo matemático e físico que regem o maravilhoso mundo da Inversão Geofísica.

Ao amigo, Rodrigo Bijani, que sem omissão de socorro, esteve ao meu lado nos momentos de estudo e quando códigos computacionais precisavam ser escritos ele sempre esteve presente.

Agradeço aos profissionais da empresa a qual pertenço ao quadro de funcionários, Vale S.A, Diretoria de Planejamento de Ferrosos (DIPF). Sou grato ao gerente de área Dr. Marco Antonio Braga que desde o primeiro momento acreditou e incentivou a minha proposta de Doutorado no Observatório Nacional/Colorado School of Mines. Ao gerente geral Henry Galbiatti, ao Diretor Lucio Cavalli e aos Diretores José Carlos Martins e Marconi Vianna, muito obrigado por proporcionarem aos funcionários da Vale a possibilidade do conhecimento científico e aperfeiçoamento profissional. Agradeço especialmente ao amigo Helves Miott pela ajuda valiosa na logística e material para impressão de minha tese. Agradeço ao pessoal do RH da empresa que trabalhou muito para minha permanência nos Estados Unidos por um ano.

Aos professores do Observatório Nacional, que me receberam tão bem desde o primeiro momento, em especial, os professores Dr. Cosme, Dr. Fernando, Dr. Papa, Dr. Kohl,

Dr. Benyosef. Aos funcionários da secretaria da pós-graduação do Observatório Nacional: Wallace e Iara. A dona Emilia por sempre me chamar quando o café estava pronto. Ao colega Dr. Carlos Bonilla pela amizade e pelas discussões sobre física teórica.

Aos colegas da Colorado School of Mines, meu co-orientador nos Estados Unidos, Dr. Yaoguo Li, pelas discussões e estrutura oferecidas para o desenvolvimento da parte internacional dessa tese de doutorado. A Cericia Martinez, sempre solicita a me ajudar durante minha estadia nos EUA. Aos amigos: Jiajia Sun, Dr. Andy Kaas, Brent Putman, Leon Foks, Richard A. Krahenbuhl, Camriel Coleman, Mohamed Abdulla, Dr. Magnus Skold e Dr. Marios Karaoulis. Ao ícone do mundo da geofísica Dr. Misac Nabighian por seu conhecimento, amabilidade e simplicidade.

Aos amigos da sala de trabalho na Colorado School of Mines, o brasileiro Marcelo Leão, pelo companheirismo e amizade e a Dra. Shuling Li, pesquisadora chinesa que me apresentou as primeiras noções de mandarim.

Aos profissionais da Bell Geospace, em Houston, pelas discussões sobre o sistema 3D-FTG: Scott Hammond, John Mims, James Mataragio, David Humphrey, Dean Selman e James Brewster.

Volto minha atenção aos amigos do Brasil. Ao pessoal do dia-a-dia do Centro de Tecnologia de Ferrosos do Miguelão: Vicente Santos, Marcos Freire, Luciano Fonseca, Luciano Assis, Giovani Paranhos, Marcone Maurílio, Henrique Romão, Adriana Zapparoli, Marcio Lucas, Deiwys Viana, Lilian Santos, Osvaldinho, Marcos Vinício, Isaias, Guilherme Gravina Peres, Ana Paula, Maria Cecília, Fabiana Rosa e Rogério Castro. Ao pessoal do PMO da Vale: Lilian Massetti, Vânia Andrade e Diniz Ribeiro.

Sou grato a equipe de Geofísica de Exploração Mineral de Ferrosos composta por Wanderson e Rodrigo Rocha Sousa (Potiguar). Ao pessoal da cidade de Limeira: Pe. João Delmiglio (atualmente em Leme), Pedro Valdecir, Agostinho, Zezé, Dona Dina, Seu Alcides, Regina, Marcelino, Thaise, Clara e Diegues Figueiredo (*in memoriam*).

A minha família - Deus me deu força de vontade, uma empresa que acreditou no projeto e pessoas queridas como meu pai, Dionisio Carlos - aposentado, ex-bóia fria que com caráter e dignidade e com a ajuda de uma esposa exemplar, Olga, cuidaram muito bem de seus quatro filhos e jamais faltaram em momento algum conosco. Aos meus irmãos: Enéas, Adriana e Luzia que apesar de estarem distantes os amo e respeito. As minhas pequenas, mas inteligentes sobrinhas Lívia e Natália que são motivo de alegria para minha vida.

Finalmente, a minha esposa, Milena Martins Lopes que proporcionou uma base sólida de forma que eu tivesse todo o apoio necessário no período em Golden nos Estados Unidos.

Gostaria de agradecer ao povo da República Federativa do Brasil (administração Dilma Rousseff) e dos Estados Unidos da América (administração Barack Obama) toda a confiança depositada em mim e meu respeito a ambos os países.

“... it always seems impossible until it’s done”. Nelson Mandela

Sumário

AGRADECIMENTOS.....	iv
Resumo	1
Abstract.....	3
1. Introdução	5
2. Revisão sobre gradiometria gravimétrica	11
2.1 Sistemas atuais de aquisição de dados de aerogradiometria gravimétrica.....	16
2.1.1 3D-FTG.....	18
2.1.1.1 Etapas do pré-processamento dos dados do sistema 3D-FTG.....	21
2.1.2 Sistema Falcon.....	23
2.1.2.1 Etapas do pré-processamento dos dados do sistema Falcon	26
3. Controle de Qualidade aplicado na Aquisição dos Dados de Aerogradiometria Gravimétrica (3D-FTG e Falcon)	28
3.1 Planejamento do Aerolevantamento.....	28
3.2 Critérios da Navegação da Aeronave	29
3.3 Cálculo da razão sinal ruído.....	30
4. Métodos de Interpretação de Dados de Gradiometria de Gravidade	32
5. Métodos de inversão de Dados de Gradiometria de Gravidade.....	37
A. Parametrização e Problema Direto	37
B. Problema Inverso	39
B.1 Metodologia de LI (2001).....	40
B.2 Metodologia de UIEDA e BARBOSA (2012)	45
B.2.1 Detalhes do Algoritmo de UIEDA e BARBOSA (2012)	46
6. Teste com Dados Sintéticos	49
6.1 Interpretação de Dados de Aerogradiometria Gravimétrica	52
6.2 Inversão.....	57
6.2.1 Método de LI (2001).....	57
6.2.2 Método de UIEDA e BARBOSA (2012).....	62
7. Geologia da área de estudo	71
7. 1 Geologia Regional.....	71
7.2 Geologia Local	75
8. Dados Geofísicos e suas Relações com a Geologia da área de estudo	80
9. Interpretação dos Dados Reais da área de estudo	87

9.1 Localização horizontal das sementes (UIEDA e BARBOSA, 2012) usando as interpretações dos dados reais da área de estudo.....	93
10. Inversões dos dados reais da área de estudo	95
10.1 Estratégias de inversão	95
10.2 Variáveis de Inversão de cada área.....	99
10.3 Resultados Gerais.....	107
10.4 Resultados detalhados	114
10.4.1 Resultados detalhados da Área 1.....	116
10.4.2 Resultados detalhados da Área 2.....	122
10.4.3 Resultados detalhados da Área 3.....	128
11. Discussão dos Resultados.....	136
11.1 Características do minério de ferro reveladas pelas estimativas dos métodos de LI (2001) e UIEDA e BARBOSA (2012) em virtude das diferentes informações a priori	136
11.2 Características semelhantes e contrastantes do minério de ferro recuperado que foram reveladas pelas estimativas dos métodos de LI (2001) e UIEDA e BARBOSA (2012).....	138
11.3 Limitações das estimativas dos métodos de LI (2001) e UIEDA e BARBOSA (2012)	139
11.4 Considerações finais.....	141
12. Conclusões.....	142
13. Referências Bibliográficas	150
Apêndice - Relação entre o sistema de coordenadas dos IGG's e coordenadas geográficas...	160

Figura 2-1. Os principais componentes e mecanismos do GGSS. (A) Instrumento do Gradiente de Gravidade (IGG). (B) Plataforma tipo carrossel. (C) O utilitário que recebeu a plataforma e suporte GGSS. (D) O sistema montado no utilitário sendo transportada via linha férrea. (E) O utilitário sendo carregado a bordo do avião Hércules C-130 da força aérea americana.

Adaptado de JEKELI (1993)..... 15

Figura 2-2. Arranjo em formato de guarda-chuva dos Instrumentos do Gradiente de Gravidade (IGG's) do sistema 3D-FTG mostrando os três IGG's (No. 1, 2 e 3). Retirado de BRETT e BREWSTER (2010)..... 19

Figura 2-3. (A) Vista geral do disco com a montagem dos quatro acelerômetros (a₁, a₂, a₃ e a₄). (B) Vista em planta mostrando a localização de cada um dos acelerômetros. No caso particular do sistema 3D-FTG o raio R é igual a 10 cm. Adaptado de BRETT e BREWSTER (2010).
..... 20

Figura 2-4. Conjunto cápsula aeronáutica (esquerda) e rack eletrônico (direita) do sistema Falcon. 24

Figura 2-5. Comparação entre os IGG's do sistema Falcon (A) e do sistema 3D-FTG (B). Note que o IGG do sistema Falcon é aproximadamente duas unidades de comprimento L maior que o IGG do sistema 3D-FTG. 24

Figura 2-6. Disposição dos acelerômetros no disco do Instrumento de Gradiente de Gravidade do sistema <i>Falcon</i> . Adaptado de JEKELI (2006).....	25
Figura 5-1.Esquema representativo da aquisição das medidas do tensor do gradiente de gravidade. Adaptado de Brzezowski e Heller (1988)	38
Figura 5-2. Modelo interpretativo – O modelo de discretização da terra consiste de uma malha tridimensional composta por M prismas elementares. Adaptado de PHILLIPS (2001). As variáveis $m_1, m_2 \dots m_M$ representam os valores do contraste de densidade de cada um dos prismas do modelo discretizado da terra.	38
Figura 5-3. Representação pictórica da Curva-L ou curva de Tikhonov. Adaptado de Terra (2007).....	43
Figura 5-4. (A) Curva L e (B) Curvatura (Equação 5-10). O ponto de máxima curvatura em B está associado ao parâmetro de regularização da melhor solução do problema de inversão. Adaptado de Li e Oldenburg (1999).	44
Figura 6-1. Vista em perspectiva do modelo sintético utilizado para geração dos dados sintéticos. As fontes com contraste de densidade de 0.75 g/cm^3 estão representadas pelos polígonos na cor rosa e representam a formação ferrífera ou itabirito. O polígono na cor cinza em transparência representa a rocha encaixante com contraste de densidade de 0 g/cm^3 . A espessura da formação ferrífera simulada foi de 250 metros. O topo da formação ferrífera está localizado a 50 metros de profundidade a partir da superfície que representa a topografia do terreno nesta simulação.	50
Figura 6-2. Componentes sintéticas do tensor do gradiente de gravidade contaminadas com ruído e produzidas pelos corpos sintéticos simulando a formação ferrífera mostrado na Figura 6-1. A linha preta pontilhada representa a projeção horizontal em superfície da geometria da formação ferrífera simulada.	51
Figura 6-3. (A) Invariante 0 (Equação 4.1). (B) Invariante 1 (Equação 4.2). (C) Invariante 2 (Equação 4.3). As linhas pretas pontilhadas representam a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera.....	53
Figura 6-4.(A) Autovalor 1 (Equação 4.5a). (B) Autovalor 2 (Equação 4.5b) e (C) Autovalor 3 (Equação 4.5c). As linhas pretas pontilhadas representam a projeção horizontal em superfície da geometria em superfície da formação ferrífera.....	54
Figura 6-5. (A) Curvatura - Gdelta ($G\Delta$ na Equação 4.8a). (B) Magnitude do gradiente horizontal-Gamp (Equação 4.8b) e Magnitude da curvatura – R (Equação 4.9). As linhas pretas pontilhadas representam a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera.	55
Figura 6-6. (A) Amplitude do sinal analítico direcional em x (A_x , Equação 4.10a). (B) Amplitude do sinal analítico direcional em y (A_y , Equação 4.10b) e Amplitude do sinal analítico direcional em z (A_z , Equação 4.10c). As linhas pretas pontilhadas representam a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera.	56
Figura 6-7. Curva-L ou curva de Tikhonov obtida a partir das inversões da componente G_{zz} (Figura 6-2) que foi produzida pela formação ferrífera sintética (Figura 6-1) utilizando diferentes parâmetros de regularização (μ).	58
Figura 6-8. Gráfico da curvatura (equação 5.10) apresentando um máximo bem definido no parâmetro de regularização $\mu = 1$	59
Figura 6-9. Estimativa 3D da distribuição dos contrastes de densidade obtidos pelo método de LI (2001).....	60

Figura 6-10. (A) Componente G_{zz} utilizada para inversão via o método de LI (2001). As linhas pretas sobrepostas à componente G_{zz} são as projeções horizontais em superfície das seções verticais utilizadas para validação da inversão. (B) Seções verticais P1-P1', P2-P2' e P3-P3' extraídas da solução estimada (Figura 6-11) via inversão de LI (2001).	61
Figura 6-11. (A) Componente G _{zz} observada. (B) Componente G _{zz} predita que foi produzida pela estimativa dos contrastes de densidade mostrada na Figura 6-9. (C) Malha de resíduos da componente G _{zz} e histograma de distribuição dos resíduos, apresentando uma distribuição gaussiana com média aproximadamente zero e desvio padrão próximo à incerteza da componente G _{zz} utilizada na inversão.	62
Figura 6-12. Componente G _{zz} observada. Os pontos pretos representam a projeção horizontal em superfície das sementes utilizadas para a inversão dos dados utilizando o método de Uieda e Barbosa (2012).	63
Figura 6-13. (A) Modelo sintético tridimensional simulando a formação ferrífera. (B) Estimativa da distribuição do contraste de densidade obtida via método de inversão de Uieda e Barbosa (2012). As células na cor rosa representam um contraste de densidade de 0,75 g/cm ³	64
Figura 6-14. (A) Componente G _{zz} observada para inversão via UIEDA e BARBOSA (2012). As linhas pretas sobrepostas à componente G _{zz} são as projeções horizontais em superfície das seções verticais utilizadas para validação do resultado da inversão. (B) Seções verticais P1-P1', P2-P2' e P3-P3' extraídas da solução estimada (Figura 6-13B) via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012).	66
Figura 6-15. (A) Componente G_{xx} observada ou medida. (B) Componente G_{xx} calculada ou predita via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). (C) Resíduos da componente G_{xx} obtidas a partir da diferença entre as componentes medida e calculada. Em (C) mostra-se o histograma de distribuição dos resíduos da componente G_{xx}	68
Figura 6-16. (A) Componente G_{xy} observada ou medida. (B) Componente G_{xy} calculada ou predita via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). (C) Resíduos da componente G_{xy} obtidas a partir da diferença entre as componentes medida e calculada. Em (C) mostra-se o histograma de distribuição dos resíduos da componente G_{xy}	68
Figura 6-17. (A) Componente G_{xz} observada ou medida. (B) Componente G_{xz} calculada ou predita via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). (C) Resíduos da componente G_{xz} obtidas a partir da diferença entre as componentes medida e calculada. Em (C) mostra-se o histograma de distribuição dos resíduos da componente G_{xz}	69
Figura 6-18. (A) Componente G_{yy} , observada ou medida. (B) Componente G_{yy} calculada ou predita via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). (C) Resíduos da componente G_{yy} obtidas a partir da diferença entre as componentes medida e calculada. Em (C) mostra-se o histograma de distribuição dos resíduos da componente G_{yy}	69
Figura 6-19. (A) Componente G_{yz} observada ou medida. (B) Componente G_{yz} calculada ou predita via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). (C) Resíduos da componente G_{yz} obtidas a partir da diferença entre as componentes medida e calculada. Em (C) mostra-se o histograma de distribuição dos resíduos da componente G_{yz}	70
Figura 6-20. (A) Componente G_{zz} observada ou medida. (B) Componente G_{zz} calculada ou predita via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). (C) Resíduos da componente G_{zz} obtidas a partir da diferença entre as componentes medida e calculada. Em (C) mostra-se o histograma de distribuição dos resíduos da componente G_{zz}	70

Figura 7-1. Mapa geológico regional do Quadrilátero Ferrífero localizado em Minas Gerais. Modificado de LOBATO et al. (2005). A área de estudo chamada de Boa 6 está representada pelo polígono na cor vermelha. Em detalhe, o mapa do Brasil, destacando o estado de Minas Gerais e o polígono vermelho que representa o Quadrilátero Ferrífero.....	72
Figura 7-2. Coluna estratigráfica generalizada do Quadrilátero Ferrífero. Modificado de ALKMIM e MARSHAK (1998).....	73
Figura 7-3. Mapa geológico detalhado e estrutural da área do sinclinal Gandarela. As áreas em azul representam a Formação Cauê (formação ferrífera bandada). Modificado de LOBATO et al. (2005). A área de estudo, Boa 6, está representada pelo retângulo em vermelho.....	76
Figura 8-1. (A-F) Mapas das componentes do tensor do gradiente de gravidade observadas de Boa 6 no Quadrilátero Ferrífero. Acima do mapa de cada componente são apresentados os histogramas de distribuição dos valores de cada uma das componentes do tensor do gradiente de gravidade. O polígono em linha preta contínua representa a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera da região de estudo conforme Dorr (1969). (G) Modelo digital de terreno.	81
Figura 8-2. (A-F). Componentes do tensor do gradiente de gravidade corrigidas da influência da topografia. Acima do mapa de cada componente corrigida são apresentados os histogramas de distribuição dos valores de cada uma das componentes do tensor do gradiente de gravidade. O polígono em linha preta contínua representa a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera da região conforme Dorr (1969). (G) Modelo digital de terreno.....	83
Figura 8-3. (A) Mapa geológico da área de estudo. (B) Componente G_{zz} do tensor do gradiente de gravidade. As linhas pretas pontilhadas delimitam os limites da formação ferrífera de acordo com DORR (1969). As linhas pretas contínuas representam as falhas. A área do Quadrilátero Ferrífero é mostrado no detalhe em (B).....	85
Figura 9-1. (A)-(F) Razão sinal ruído (RSR) das componentes do tensor do gradiente de gravidade do aerolevantamento de Boa 6, no Quadrilátero Ferrífero. Os círculos em vermelho representam o valor da RSR de cada uma das cinqüenta linhas do aerolevantamento de gradiometria gravimétrica. As linhas contínuas vermelhas indicam a média e as barras de erro representam os desvios padrões das componentes do tensor do gradiente de gravidade destas cinqüenta linhas de vôo.	88
Figura 9-2. (A) Invariante 0 (Equação 4.1). (B) Invariante 1 (Equação 4.2) e (C) Invariante 2 (Equação 4.3). O polígono em linha preta contínua representa a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera da região conforme Dorr (1969).....	89
Figura 9-3. (A) Autovalor 1 (Equação 4.5a). (B) Autovalor 2 (Equação 4.5b) e (C) Autovalor 3 (Equação 4.5c). O polígono em linha preta contínua representa a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera da região conforme DORR (1969).....	90
Figura 9-4. (A) Curvatura – G_{δ} - (Equação 4.7a). (B) Magnitude do gradiente horizontal – G_{α} - (Equação 4.7b) e (C) Magnitude da Curvatura – R - (Equação 4.8). O polígono em linha preta contínua representa a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera da região conforme Dorr (1969).	91
Figura 9-5. (A) Amplitude do sinal analítico direcional em x (A_x , Equação 4.9a). (B) Amplitude do sinal analítico direcional em y (A_y , Equação 4.9b) e (C) Amplitude do sinal analítico direcional em z (A_z , Equação 4.9c). O polígono em linha preta contínua representa a projeção horizontal em planta da formação ferrífera da região conforme DORR (1969).	92

Figura 9-6. Componente G_{zz} observada. (B). Magnitude do gradiente horizontal. O polígono em linha preta contínua representa a projeção horizontal em planta da formação ferrífera da região conforme DORR (1969). Os triângulos brancos representam a projeção horizontal das sementes de contraste de densidade utilizadas para o método de UIEDA e BARBOSA (2012). O polígono amarelo indica a área em que não foram posicionadas sementes de contraste de densidade para a inversão.....	94
Figura 10-1. Componente G_{zz} observada do aerolevantamento de gradiometria gravimétrica de Boa 6 no Quadrilátero Ferrífero. Os polígonos representados pelas linhas pretas contínuas representam as divisões das áreas utilizadas nas inversões de LI (2001) e UIEDA e BARBOSA (2012). O polígono em linha preta contínua e hachurado representa a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera, segundo DORR (1969).....	97
Figura 10-2. (A-F) Componentes observadas do tensor do gradiente de gravidade G_{xx} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel superior). (G-L) Componentes calculadas do tensor do gradiente de gravidade G_{xx} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel central) usando UIEDA e BARBOSA (2012). As componentes calculadas foram produzidas pela estimativa do contraste de densidade mostrada na Figura 10-8(A). (M-R) Resíduos obtidos pela diferença entre as componentes observadas (A-F) e calculadas (G-L). Os triângulos em branco nos painéis superior (A-F) e central (G-L) representam as coordenadas horizontais das sementes usadas no método de UIEDA e BARBOSA (2012). As linhas pretas contínuas nos painéis superior (A-F) e central (G-L) delimitam os limites mapeados da formação ferrífera de acordo com DORR (1969). A localização da Área 1 é mostrada na Figura 10.1.....	101
Figura 10-3. (A-F) Componentes observadas do tensor do gradiente de gravidade G_{xx} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel superior). (G-L) Componentes calculadas do tensor do gradiente de gravidade G_{xx} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel central) usando UIEDA e BARBOSA (2012). As componentes calculadas foram produzidas pela estimativa do contraste de densidade mostrada na Figura 10-8(A). (M-R) Resíduos obtidos pela diferença entre as componentes observadas (A-F) e calculadas (G-L). Os triângulos em branco nos painéis superior (A-F) e central (G-L) representam as coordenadas horizontais das sementes usadas no método de UIEDA e BARBOSA (2012). As linhas pretas contínuas nos painéis superior (A-F) e central (G-L) delimitam os limites mapeados da formação ferrífera de acordo com DORR (1969). A localização da Área 2 é mostrada na Figura 10.1.....	102
Figura 10-4. (A-F) Componentes observadas do tensor do gradiente de gravidade G_{xx} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel superior). (G-L) Componentes calculadas do tensor do gradiente de gravidade G_{xx} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel central) usando UIEDA e BARBOSA (2012). As componentes calculadas foram produzidas pela estimativa do contraste de densidade mostrada na Figura 10-8(A). (M-R) Resíduos obtidos pela diferença entre as componentes observadas (A-F) e calculadas (G-L). Os triângulos em branco nos painéis superior (A-F) e central (G-L) representam as coordenadas horizontais das sementes usadas no método de UIEDA e BARBOSA (2012). As linhas pretas contínuas nos painéis superior (A-F) e central (G-L) delimitam os limites mapeados da formação ferrífera de acordo com DORR (1969). A localização da Área 3 é mostrada na Figura 10.1.....	103
Figura 10-5. (A-C) Componentes observadas do tensor do gradiente de gravidade G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel superior). (D-F) Componentes calculadas do tensor do gradiente de gravidade G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel central) usando o método de LI (2001) obtidas pela estimativa do contraste de densidade mostrada na Figura 10-9(A). (G-I) Resíduos obtidos pela diferença entre as	

componentes observadas (A-C) e calculadas (D-F). As linhas pretas contínuas em (A-F) delimitam os limites mapeados da formação ferrífera de acordo com DORR (1969). A localização da Área 1 é mostrada na Figura 10.1.....	104
Figura 10-6. (A-C). Componentes observadas do tensor do gradiente de gravidade G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel superior). (D-F) Componentes calculadas do tensor do gradiente de gravidade G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel central) usando o método de LI (2001) obtidas pela estimativa do contraste de densidade mostrada na Figura 10-9(A). (G-I) Resíduos obtidos pela diferença entre as componentes observadas (A-C) e calculadas (D-F). As linhas pretas contínuas em (A-F) delimitam os limites mapeados da formação ferrífera de acordo com DORR (1969). A localização da Área 2 é mostrada na Figura 10.1.....	105
Figura 10-7. (A-C). Componentes observadas do tensor do gradiente de gravidade G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel superior). (D-F) Componentes calculadas do tensor do gradiente de gravidade G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel central) usando o método de LI (2001) obtidas pela estimativa do contraste de densidade mostrada na Figura 10-9(A). (G-I) Resíduos obtidos pela diferença entre as componentes observadas (A-C) e calculadas (D-F). As linhas pretas contínuas em (A-F) delimitam os limites mapeados da formação ferrífera de acordo com DORR (1969). A localização da Área 3 é mostrada na Figura 10.1.....	106
Figura 10-8. (A) Vista tridimensional da distribuição dos contrastes de densidade estimada (em rosa) com o único contraste de densidade $0,75 \text{ g/cm}^3$ que corresponde ao contraste presumido para o corpo de minério de ferro da Formação Cauê. Esta estimativa é obtida invertendo todas as componentes do tensor do gradiente de gravidade das Áreas 1-3 mostradas nas Figuras 10-2 a 10-4 (mapas do painel superior). (B) Mapa geológico da área de estudo mostrando as Áreas 1-3. As linhas em cor marrom nomeadas de A-A'- I-I' indicam os locais das seções transversais verticais descritas nas Figuras 10-11, 10-13 e 10-15.....	108
Figura 10-9. (A) Vista tridimensional da distribuição dos contrastes de densidade estimada com o método de LI (2001). Esta estimativa é obtida invertendo três componentes do tensor do gradiente de gravidade das Áreas 1-3 mostradas nas Figuras 10-5 a 10-7 (mapas do painel superior). (B) Mapa geológico da área de estudo mostrando as Áreas 1-3. As linhas em cor marrom nomeadas de A-A'- I-I' indicam os locais das seções transversais verticais descritas nas Figuras 10-12, 10-14 e 10-16.....	110
Figura 10-10. Seções verticais ao longo do <i>strike</i> do corpo de minério de ferro estimado mostrando a espessura recuperada através da inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). A inserção a esquerda mostra a vista em perspectiva 3D do corpo de minério de ferro estimado via UIEDA e BARBOSA (2012).	112
Figura 10-11. (A) Componente G_{zz} calculada do tensor do gradiente de gravidade utilizando o método de UIEDA e BARBOSA (2012) para a Área 1. As linhas brancas A-A', B-B' e C-C' mostram a localização das seções verticais apresentadas em (B), (C) e (D), respectivamente. Os círculos em cor amarela e os triângulos brancos mostram, respectivamente, a posição dos furos de sondagem geológica e as sementes utilizadas na inversão geofísica utilizando o método de UIEDA e BARBOSA (2012). As seções verticais ao longo dos perfis (B) A-A', (C) B-B' e (D) C-C' apresentam as distribuições estimadas dos contrastes de densidade (em rosa) com um único contraste de densidade de $0,75 \text{ g/cm}^3$. As faixas coloridas em (B)-(D) representam os intervalos geológicos cortados pelos furos (a1-a3, b1-b3, c1-c3). O polígono vermelho no mapa, canto superior direito da figura, mostra a localização da área de estudo no Quadrilátero Ferrífero.	117

Figura 10-12. (A) Componente G_{zz} calculada do tensor do gradiente de gravidade utilizando o método de LI (2001) para a Área 1. As linhas brancas A-A', B-B' e C-C' mostram a localização das seções verticais apresentadas em (B), (C) e (D), respectivamente. Os círculos em cor amarela mostram a posição dos furos de sondagem geológica. As seções verticais ao longo dos perfis (B) A-A', (C) B-B' e (D) C-C' apresentam as distribuições estimadas dos contrastes de densidade pelo método de LI (2001). As faixas coloridas em (B)-(D) representam os intervalos geológicos cortados pelos furos (a1-a3, b1-b3, c1-c3). O polígono vermelho no mapa, canto superior direito da figura, mostra a localização da área de estudo no Quadrilátero Ferrífero.

..... 118

Figura 10-13. (A) Componente G_{zz} calculada do tensor do gradiente de gravidade utilizando o método de UIEDA e BARBOSA (2012) para a Área 2. As linhas brancas D-D', E-E' e F-F' mostram a localização das seções verticais apresentadas em (B), (C) e (D), respectivamente. Os círculos em cor amarela e os triângulos brancos mostram, respectivamente, a posição dos furos de sondagem geológica e as sementes utilizadas na inversão geofísica utilizando o método de UIEDA e BARBOSA (2012). As seções verticais ao longo dos perfis (B) D-D', (C) E-E' e (D) F-F' apresentam as distribuições estimadas do contraste de densidade (em rosa) com um único valor de contraste de densidade de $0,75 \text{ g/cm}^3$. As faixas coloridas em (B)-(D) representam os intervalos geológicos cortados pelos furos (d1, e1-e2, f1-f2). O polígono vermelho no mapa mostrado no canto superior direito da figura apresenta a localização da área de estudo no Quadrilátero Ferrífero.

..... 126

Figura 10-14. (A) Componente G_{zz} calculada do tensor do gradiente de gravidade utilizando o método de LI (2001) para a Área 2. As linhas brancas D-D', E-E' e F-F' mostram a localização das seções verticais apresentadas em (B), (C) e (D), respectivamente. Os círculos em cor amarela mostram a posição dos furos de sondagem geológica. As seções verticais ao longo dos perfis (B) D-D', (C) E-E' e (D) F-F' apresentam as distribuições estimadas dos contrastes de densidade pelo método de LI (2001). As faixas coloridas em (B)-(D) representam os intervalos geológicos cortados pelos furos (d1, e1-e2, f1-f2). O polígono vermelho no mapa mostrado no canto superior direito da figura apresenta a localização da área de estudo no Quadrilátero Ferrífero.

..... 127

Figura 10-15. (A) Componente G_{zz} calculada do tensor do gradiente de gravidade utilizando o método de UIEDA e BARBOSA (2012) para a Área 3. As linhas brancas G-G', H-H' e I-I' mostram a localização das seções verticais apresentadas em (B), (C) e (D), respectivamente. Os círculos em cor amarela e os triângulos brancos mostram, respectivamente, a posição dos furos de sondagem geológica e as sementes utilizadas na inversão geofísica utilizando o método de UIEDA e BARBOSA (2012). As seções verticais ao longo dos perfis (B) G-G', (C) H-H' e (D) I-I' apresentam as distribuições estimadas do contraste de densidade (em rosa) com um único contraste de densidade de $0,75 \text{ g/cm}^3$. As faixas coloridas em (B)-(D) representam os intervalos geológicos cortados pelos furos (g1-g2, h1-h3, i1). O polígono vermelho no mapa, canto superior direito da figura, mostra a localização da área de estudo no Quadrilátero Ferrífero.

..... 129

Figura 10-16. (A) Componente G_{zz} calculada do tensor do gradiente de gravidade utilizando o método de LI (2001) para a Área 3. As linhas brancas G-G', H-H' e I-I' mostram a localização das seções verticais apresentadas em (B), (C) e (D), respectivamente. Os círculos em cor amarela e os triângulos brancos mostram, respectivamente, a posição dos furos de sondagem geológica e as sementes utilizadas na inversão geofísica utilizando o método de LI (2001). As seções

verticais ao longo dos perfis (B) G-G', (C) H-H' e (D) I-I' apresentam as distribuições estimadas dos contrastes de densidade pelo método de LI (2001). As faixas coloridas em (B)-(D) representam os intervalos geológicos cortados pelos furos (g1-g2, h1-h3, i1). O polígono vermelho no mapa, canto superior direito da figura, mostra a localização da área de estudo no Quadrilátero Ferrífero..... 130

Tabela 7-1. Coluna estratigráfica do sinclinal Gandarela. Modificado de LOBATO et al. (2005)	78
Tabela 8-1. Principais tipos litológicos encontrados na área do aerolevantamento adaptado de BRAGA (2009).....	86
Tabela 9-1. Valores da <i>RSR</i> de todas as componentes do tensor do gradiente de gravidade do aerolevantamento de Boa 6 no Quadrilátero Ferrífero.....	88

Resumo

O Quadrilátero Ferrífero, localizado no sudeste do Brasil, abriga uma das maiores concentrações de minério de ferro laterítico do mundo. A área de estudo dessa tese de doutorado está localizada sobre o flanco sul do sinclinal Gandarela, que é um dos sinclinais da região do Quadrilátero Ferrífero. O sinclinal Gandarela é considerado uma megaestrutura com as maiores perspectivas para a exploração de minério de ferro. A maioria dos depósitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero é considerada não-aflorante sendo representada por formações ferríferas bandadas deformadas, oxidadas, metamorfizadas e heterogêneas. Portanto, a avaliação da geometria 3D do corpo de ferro em subsuperfície é de extrema importância para a estimativa de reservas e planejamento da produção de minério de ferro. Invertemos dados de aerogradiometria gravimétrica da área de estudo usando dois métodos de inversão que estimam a distribuição 3D dos contrastes de densidade para recuperar a forma da mineralização do minério de ferro. Os altos contrastes de densidade estimados concordam com as informações litológicas fornecidas pelos furos de sondagem e recuperaram uma formação ferrífera alongada na direção nordeste-sudoeste em concordância com o mapeamento geológico da região. O volume do minério de ferro estimado varia ao longo do eixo longitudinal mostrando um aumento na zona de charneira do sinclinal Gandarela, onde há uma maior compressão das massas. O mergulho do minério de ferro estimado também varia. Nas porções sul e norte da área de estudo, o minério mergulha, respectivamente, em direção ao eixo (direção noroeste) e em direção contrária ao eixo (direção sudeste) do sinclinal Gandarela. Na porção central da área de estudo o minério está verticalizado. Como um dos métodos de inversão estima um corpo 3D compacto de minério de ferro com contraste de densidade de $0,75 \text{ g/cm}^3$, então foi possível a estimativa do volume deste minério em $965 \text{ milhões de m}^3$. Considerando que esta

estimativa é apenas devida a presença do itabirito compacto cuja densidade é 3,11 g/cm³, então a massa total estimada do minério de ferro foi de aproximadamente 3 bilhões de toneladas.

Abstract

The Quadrilátero Ferrífero in southeastern Brazil hosts one of the largest concentrations of lateritic iron ore deposits in the world. Our study area is over the southern flank of the Gandarela syncline which is one of the regional synclines of the Quadrilátero Ferrífero. The Gandarela syncline is considered the Brazilian megastructure with the highest perspectives for iron ore exploration. Most of the iron ore deposits from the Quadrilátero Ferrífero are non-outcropping bodies hosted in the oxidized, metamorphosed and heterogeneously deformed banded iron formations. Therefore, the assessment of the 3D geometry of the iron body is of the utmost importance for estimating reserves and production development planning. We inverted the airborne gravity-gradient data from the study area by using two inversion methods to estimate the 3D density-contrast distribution which retrieves the shape of the iron ore mineralization. The highest values of the estimated density contrast agree reasonably well with the information provided from the lithologic logging data of drill holes and retrieve a northeast-elongated iron formation in agreement with the previous geologic mapping of the study area. The volume of the estimated iron body varies along its strike showing a southwestward increase. The presence of a large volume of iron ore in the southwest portion of the study area may be due to the hinge zone of the Gandarela syncline, which is the zone of maximum compression. The estimated iron ore mass discloses variable dip directions. In the southernmost, central and northernmost portions of the study area, the estimated iron body dips, respectively, inwards, vertically and outwards with respect to the syncline axis. Because one of the inversion methods estimates a 3D compact iron ore body with density contrast of 0.75 g/cm^3 , then it allows estimating the volume of this body in 965 million m^3 . By considering that this estimated

body is only due to the presence of hard itabirite, whose density is 3.11 g/cm^3 ; then the estimated total mass of the iron ore is approximately 3 billion tons.

1. Introdução

A exploração do minério de ferro é uma prática datada desde o século 17. Um dos primeiros instrumentos utilizados para pesquisa de minério de ferro foi a bússola sueca no século 19. Desde então, foram desenvolvimentos novos instrumentos e novas técnicas direcionados à pesquisa do minério de ferro. Estes desenvolvimentos tecnológicos impulsionaram a prospecção do minério de ferro resultando na descoberta de novos locais promissores para a exploração dessa *commoditie* amplamente utilizada em diversas áreas industriais.

Os maiores avanços para pesquisa de minério de ferro ocorreram graças ao desenvolvimento de sistemas aerotransportados para a coleta de dados geofísicos. As principais vantagens dos sistemas aerotransportados de aquisição de dados quando comparados a outras técnicas de aquisição de dados são: i) a rapidez na coleta de dados; ii) a possibilidade de cobertura de grandes áreas em um período relativamente curto de tempo; iii) a possibilidade de coletar dados em regiões de difícil acesso; and iv) o menor custo por área levantada. Estas características dos sistemas aerotransportados de coleta de dados viabilizaram levantamentos geofísicos de extensas áreas para à pesquisa mineral.

Apesar da eficiência da aquisição de dados geofísicos usando sistemas aerotransportados de coleta de dados ser incontestável, ressaltamos que o mais importante para a prospecção de minério de ferro é o tipo do dado geofísico medido. A aeromagnetometria tem sido amplamente utilizada na pesquisa de minério de ferro; no entanto, a interpretação de dados magnéticos não é trivial em virtude de uma série de limitações que incluem: i) a fraca intensidade do campo magnético em baixas latitudes; e ii) a presença de magnetização remanescente desconhecida. A aerogravimetria é uma

técnica também utilizada na prospecção de minério de ferro; no entanto, a interpretação de dados gravimétricos requerer a difícil tarefa da remoção de campos gravimétricos regionais produzidos por rochas encaixantes com densidades semelhantes a do minério de ferro. Um dos métodos geofísicos relativamente recentes para prospecção mineral é a aerogradiometria gravimétrica. Os dados de gradiente de gravidade coletados por sistemas aerotransportados possuem maior resolução que os dados gravimétricos e magnéticos.

Neste trabalho de doutorado dados de aerogradiometria gravimétrica serão utilizados para a prospecção de minério de ferro em uma das regiões mais importantes do mundo para a exploração deste minério de ferro: o Quadrilátero Ferrífero (QF). O Quadrilátero Ferrífero se estende por uma área de aproximadamente 7.000 km² e hospeda uma das maiores concentrações de minério de ferro do mundo. O Quadrilátero Ferrífero está localizado na porção central do estado de Minas Gerais, na região sudeste do Brasil (DORR, 1965). Muito do minério de ferro do QF encontra-se na formação ferrífera bandada (BIF) deformada, oxidada, metamorfizada e heterogênea da Formação Cauê, chamada de itabiritos. Os BIF's são depósitos sedimentares alterados com rochas laminadas pela alternância de camadas de sílica e hematita-magnetita assim como carbonatos e silicatos de ferro.

Especificamente, interpretamos nesta tese um conjunto de dados de aerogradiometria gravimétrica adquiridos sobre a aba sul do sinclinal Gandarela, que é uma estrutura geológica conhecida do QF. O sinclinal Gandarela está localizado na porção norte-nordeste do QF e se estende por 32 km. Baseado no mapeamento geológico, o sinclinal Gandarela é uma dobra reclinada com *trend* regional nordeste-sudoeste com a zona de charneira mergulhando para sudeste. Atualmente o sinclinal

Gandarela é considerado a região brasileira com as maiores perspectivas para exploração de minério de ferro (ENDO e ROCHA FILHO, 2003).

BRAGA (2009) e MARTINEZ et al. (2013) utilizaram dados de aerogradiometria gravimétrica aplicados a exploração de minério de ferro na área do sinclinal Gandarela. BRAGA (2009) mostrou que a interpretação dos dados de aerogradiometria gravimétrica pode ajudar na racionalização das campanhas de furos de sondagem geológica delimitando o traçado da formação ferrífera em superfície. MARTINEZ et al. (2013) interpretaram uma pequena área no sinclinal Gandarela e mostraram que a combinação de diferentes componentes do tensor do gradiente de gravidade aumenta a resolução da distribuição dos contrastes de densidade recuperada por inversão e melhora o traçado da formação ferrífera em superfície/subsuperfície. Mesmo com os trabalhos de aerogradiometria gravimétrica realizados na região do sinclinal Gandarela, até o momento, a geometria 3D detalhada do depósito de minério de ferro e a massa do minério de ferro são desconhecidas.

O primeiro objetivo dessa tese de doutorado é a recuperação da geometria 3D da formação ferrífera, em subsuperfície, da aba sul do sinclinal Gandarela. Para alcançar este objetivo, primeiro aplicamos algumas técnicas de interpretação em superfície (plano x-y) e em seguida usamos dois métodos de inversão dos dados do gradiente de gravidade: LI (2001) e UIEDA e BARBOSA (2012). As técnicas usadas de interpretação em superfície (plano x-y) dos dados de aerogradiometria gravimétrica (e.g., PEDERSEN e RASMUSSEM, 1990; TÓTH, 2002 e BEIKI e PEDERSEN, 2010) objetivaram realçar o traçado da formação ferrífera em superfície e indicar estruturas geológicas como, por exemplo, falhamentos. Os dois métodos de inversão (LI, 2001 e UIEDA e BARBOSA, 2012) estimam uma distribuição tridimensional dos contrastes de densidade definida em uma malha de prismas tridimensionais que contém a superfície

topográfica e incluem a formação ferrífera em subsuperfície. Estas estimativas produzem imagens *voxels* da distribuição tridimensional dos contrastes de densidade. Como as rochas encaixantes são menos densas que o minério de ferro, há uma expectativa que os maiores valores estimados dos contrastes de densidade correspondam ao minério de ferro.

As técnicas de interpretação em superfície e os métodos de inversão foram inicialmente aplicados a dados sintéticos produzidos por um corpo de minério de ferro simulando as principais características da geologia do sinclinal Gandarela, de acordo com o mapeamento geológico de DORR (1969). Alguns dos resultados das interpretações no plano x-y dos dados sintéticos mapearam perfeitamente a projeção na superfície das bordas do corpo de minério de ferro simulado. Com relação à aplicação dos métodos de inversão aos dados sintéticos destacamos os seguintes resultados. A estimativa da distribuição dos contrastes de densidade, em subsuperfície, via o método de inversão de LI (2001) recupera uma imagem suavizada do corpo de minério de ferro simulado onde os maiores contrastes de densidade estimados recuperaram a espessura e a largura do corpo simulado. Por outro lado, a estimativa da distribuição dos contrastes de densidade, em subsuperfície, via o método de inversão de UIEDA e BARBOSA (2012) recupera uma imagem da geometria 3D do minério de ferro muito próxima da geometria do corpo simulado.

As técnicas de interpretação em superfície e os métodos de inversão foram aplicados a dados reais do aerolevantamento de gradiometria gravimétrica sobre a aba sul do sinclinal Gandarela. Algumas das técnicas de interpretações em superfície realçaram apenas a projeção na superfície da borda sul da formação ferrífera. Além disso, algumas interpretações aparentemente indicaram áreas em que a formação ferrífera não apresenta continuidade ou apresenta um possível afinamento na sua espessura. Invertendo-se três

componentes do tensor do gradiente de gravidade através do método de LI (2001) estimamos uma distribuição suave do contraste de densidade. Invertendo-se as seis componentes do tensor do gradiente de gravidade através do método de UIEDA e BARBOSA (2012) estimamos uma distribuição compacta do contraste de densidade que permitiu a visualização da geometria 3D da formação ferrífera sobre o flanco sul do sinclinal Gandarela.

Para a validação das estimativas obtidas através das inversões dos dados reais do aerolevantamento de gradiometria gravimétrica sobre a aba sul do sinclinal Gandarela, usamos informações litológicas advindas de registros de furos de sondagem geológica e de mapeamentos geológicos prévios. Observamos que as estimativas obtidas tanto via o método de LI (2001) como via o método de UIEDA e BARBOSA (2012) concordam com as informações litológicas fornecidas pelos furos de sondagem e recuperaram um corpo de minério ferro com direção nordeste-sudeste em concordância com o mapeamento geológico da região. A estimativa obtida via UIEDA e BARBOSA (2012) revelou o controle do depósito de minério de ferro pelo sinclinal Gandarela. Na zona de charneira do sinclinal Gandarela, onde há uma maior compressão das massas, a estimativa obtida via UIEDA e BARBOSA (2012) revelou que o minério de ferro estimado tem maior volume e mergulha para o interior do eixo do sinclinal (mergulho para noroeste). Por outro lado, nas porções central e norte da área de estudo, o minério de ferro estimado aparenta mergulho, respectivamente, vertical e para a direção oposta do eixo do sinclinal Gandarela (mergulho para sudeste).

O segundo objetivo dessa tese de doutorado é a estimativa da massa do minério de ferro da aba sul do sinclinal Gandarela. Como os furos de sondagem não foram utilizados como vínculos no processo de inversão, a massa de minério de ferro obtida por inversão geofísica é classificada como recurso mineral inferido. Segundo GROSSI

et al. (2003) recurso mineral inferido é a parte do recurso em que a tonelagem (ou volume), o teor (e/ou qualidade) e o conteúdo mineral são estimados com base em amostragem limitada e, portanto, com baixo nível de confiabilidade. Usando a solução estimada através da inversão de UIEDA e BARBOSA (2012) para o minério de ferro obtivemos um volume de 965 milhões de m^3 deste minério na área de estudo. Como a solução de UIEDA e BARBOSA (2012) apresenta um único valor diferente de zero para todos os contrastes de densidade estimados podemos inferir a massa total do depósito de ferro da área de estudo. Como o único contraste de densidade considerado no método de UIEDA e BARBOSA (2012) foi de $0,75 \text{ g/cm}^3$, presumimos que a estimativa representa o itabirito compacto cuja densidade é $3,11 \text{ g/cm}^3$; então, a massa total estimada do minério de ferro foi de aproximadamente 3 bilhões de toneladas.

2. Revisão sobre gradiometria gravimétrica

O principal método geofísico utilizado neste trabalho de doutorado foi a aerogradiometria gravimétrica. Segundo a maioria dos textos não classificados¹, a gradiometria gravimétrica iniciou-se com a invenção da balança de torção por Eötvös (SPEAKE et al., 2001; DRANSFIELD, 2007; ROGERS, 2009; BRAGA, 2009; LYRIO, 2009 e DeGREGORIA, 2010).

Eötvös inventou a balança de torção no final da década de 1890, mas a aplicação prática na prospecção geofísica ocorreu quase quarenta anos após sua descoberta. Especificamente esta aplicação prática ocorreu em 1929 quando cento e setenta balanças de torção foram utilizadas na América do Norte (HEILAND, 1929 *apud* DRANSFIELD, 2007) para pesquisa em exploração de petróleo.

A importância do uso da balança de torção na aquisição de dados do gradiente de gravidade pode ser quantificada pelos mais de um bilhão de barris de petróleo que foram descobertos entre as duas grandes guerras mundiais (SPEAKE, et al. 2001). Algumas descobertas de petróleo através da gradiometria gravimétrica podem ser encontradas na literatura (e.g., ECKHARDT, 1940; MCLEMORE et al., 1942; HEILAND, 1943; KLAUS 1938,1943; MCGUKIN, 1945; WOOLLEY, 1946; WENDLER,1946 e BADER,1947).

No entanto, o sucesso da balança de torção não durou muito tempo. A operação do instrumento em campo mostrou-se muito complicada (ROGERS, 2009). Para obter uma única medida os geólogos tinham que encontrar certas condições que são

¹ Referência a trabalhos que não podem ser publicados na literatura aberta. Um texto classificado é aquele que devido à tecnologia militar envolvida não pode ser divulgado à sociedade civil. A literatura científica sobre a gradiometria gravimétrica que conhecemos atualmente foi considerada não classificada no começo da década de noventa.

praticamente impossíveis em trabalhos de campo, como por exemplo, um lugar limpo ao longo de cem metros em oito direções diferentes (padrão estrela) do ponto de posicionamento da balança de torção de forma a evitar que as massas das árvores e das rochas afetassem as medidas. Foi nesse período que a aquisição de dados de gradiente de gravidade foi praticamente abandonada e substituída pela aquisição da componente vertical do campo da gravidade utilizando os gravímetros convencionais. Os gravímetros convencionais eram menos sensíveis a efeitos externos e com capacidade de coletar dados dez vezes mais rápida que a balança de torção. Outra vantagem da utilização dos gravímetros convencionais era a fácil interpretação de uma única componente medida, ao passo que na gradiometria de gravidade precisava-se interpretar simultaneamente as múltiplas componentes do tensor do gradiente da gravidade.

A maioria dos grandes avanços práticos na exploração geofísica aconteceu por meio da exploração de petróleo devido à capacidade da indústria petrolífera de investir em inovação tecnológica. Nesse contexto, foi desenvolvido um sistema de plataforma móvel e estável com múltiplos gravímetros possibilitando a coleta de uma quantidade enorme de dados de gradiente de gravidade num tempo relativamente curto.

O desenvolvimento tecnológico de plataformas móveis viabilizou a aquisição com precisão das componentes do gradiente de gravidade. No começo da década de 1970, a *National Aeronautics and Space Administration* (Agência Espacial Norte-Americana) - *NASA*, iniciou o desenvolvimento de programas científicos para demonstrar a viabilidade das medidas de distribuição de massa da Terra, da Lua e de outros corpos celestes utilizando um gradiômetro de gravidade rotativo (*Rotating Gravity Gradiometer* - *RGG*), BELL, 1971). Foi nessa mesma década, durante o período da guerra fria, que as marinhas americana e russa perceberam que a acurácia do lançamento de mísseis balísticos dos submarinos (*Submarine Launched Ballistic*

Missiles - SLBM's) dependiam fortemente do preciso conhecimento da gravidade durante toda a trajetória em tempo do lançamento do míssil (Rogers, 2009). Este contexto histórico impulsionou a instrumentação gradiométrica.

Na metade da década de 1970, existiam três diferentes tipos de protótipos de instrumentação gradiométrica (HOPKINS, 1975). O primeiro era o gradiômetro da *Bell Aerospace Company*² (METZGER, 1974 *apud* HOPKINS, 1975) composto de quatro acelerômetros montados em um suporte rotativo. O segundo era o gradiômetro da *The Hughes Research Laboratories* (AMES, et al., 1973 *apud* HOPKINS, 1975) que empregava corpos de massa montados em pares de braços articuláveis. Estes gradiômetros de gravidade forneciam o torque aos braços articuláveis em relação a cada um dos braços e o torque era medido por um sensor no ponto de flexão. O terceiro gradiômetro dessa época foi desenvolvido pelo laboratório *Charles Stark Draper Laboratory* (TRAGESER e JOHNSON, 1974 *apud* HOPKINS, 1975) que utilizou um suporte esférico flutuante de um par de massas de prova. Nessa configuração, o gradiente de gravidade induz uma leve rotação na massa flutuante que é medida por um capacitor.

Embora o grande avanço no desenvolvimento da instrumentação gradiométrica ocorrido na década de 1970, uma tecnologia fundamental ainda não estava finalizada: o sistema de compensação inercial. Segundo DRANSFIELD (2007), dentre os protótipos disponíveis de gradiômetros de gravidade, a Marinha dos Estados Unidos selecionou o Sistema de Sensores Gravimétricos (*Gravity Sensors System – GSS*) da *Bell Aerospace Company* para incorporação de um sistema de compensação inercial. No início da década de 1980, um sistema de compensação inercial foi desenvolvido pela *Bell*

² Confusões são freqüentes com o nome da *Bell Geospace* atual proprietária do sistema *3D-FTG*.

*Aerospace Textron*³ para a Marinha dos Estados Unidos. Este sistema de compensação inercial juntamente com o sistema de sensores gravimétricos foram desenvolvidos por Ernest Metzger sendo selecionado pela Marinha para o posicionamento preciso no lançamento de mísseis balísticos do submarino *Trident* (ROGERS, 2009).

Em 1983, o Laboratório de Geofísica da Força Aérea dos Estados Unidos (*Air Force Geophysics Laboratory – AFGL*), selecionou o mesmo gradiômetro de gravidade da marinha norte-americana para a *Defence Mapping Agency (DMA)* e propôs um programa de mapeamento gravimétrico regional (JEKELI, 1988 *apud* DRANSFIELD, 2007). Somente após a abertura da tecnologia do sistema de gradiente de gravidade da marinha é que a força aérea pôde utilizar esse sistema que foi rebatizado de *Gravity Gradiometer Survey System (GGSS)* para levantamentos aerotransportados (Figura 2-1).

O primeiro teste aéreo do sistema *GGSS* foi colocado em prática em 1988. Neste teste, o sistema *GGSS* foi montado num veículo utilitário (Figura 2-1C) que foi colocado dentro de um avião Hércules C-130 (Figura 2-1 E).

³ Essa empresa foi comprada pela *Lockheed Martin*.

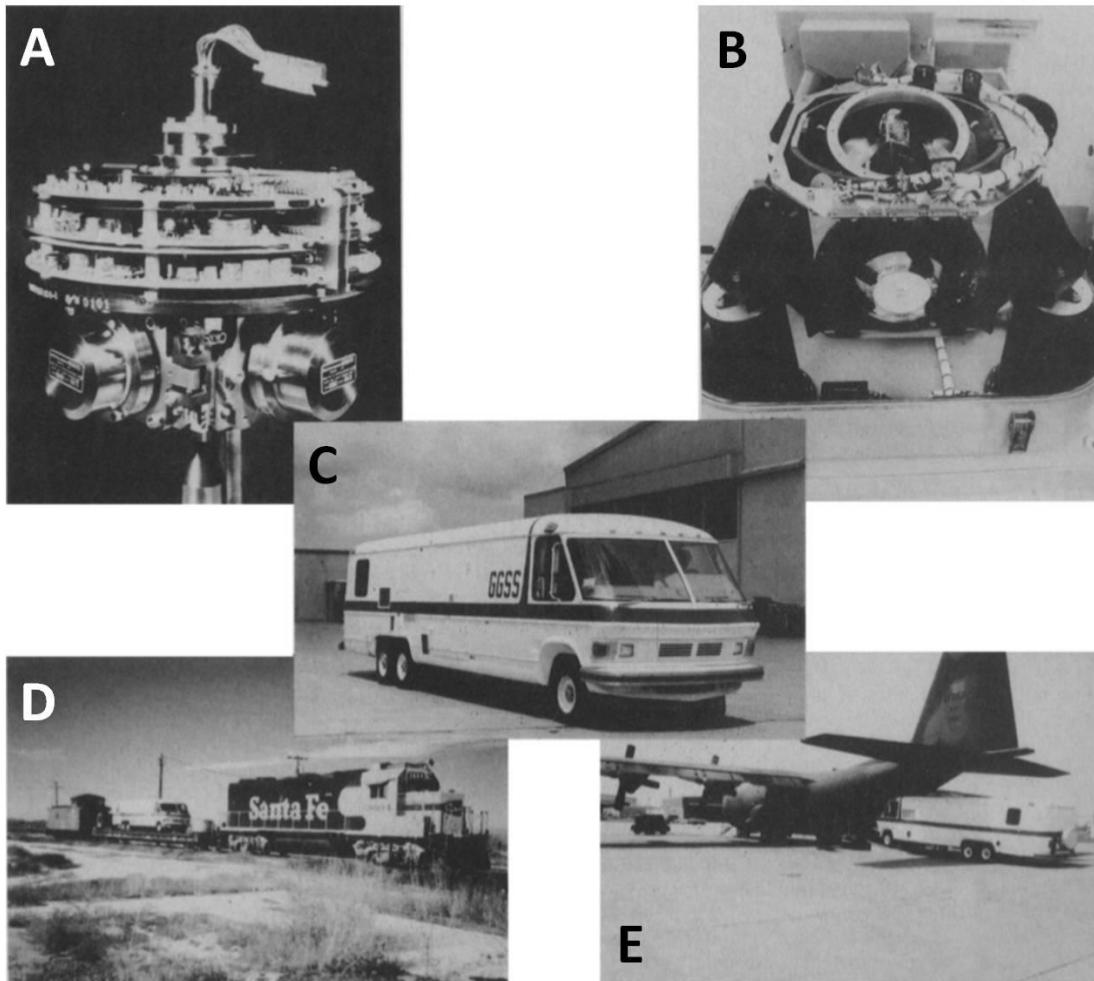


Figura 2-1. Os principais componentes e mecanismos do GGSS. (A) Instrumento do Gradiente de Gravidade (IGG). (B) Plataforma tipo carrossel. (C) O utilitário que recebeu a plataforma e suporte GGSS. (D) O sistema montado no utilitário sendo transportada via linha férrea. (E) O utilitário sendo carregado a bordo do avião Hércules C-130 da força aérea americana. Adaptado de JEKELI (1993).

Neste primeiro teste aéreo do sistema **GGSS**, uma área foi sobrevoada em *Oklahoma Texas Panhandle*. O desempenho do **GGSS** foi limitado devido aos problemas no **Global Positioning System - GPS**, no giroscópio e no controle de temperatura. Adicionalmente, foram relatados sérios problemas com os Instrumentos do Gradiente de Gravidade (**IGG's**)⁴ que estão mostrados na Figura 2-1(A), devidos às mudanças de aceleração na aeronave (PFOHL et al., 1988 *apud* DRANSFIELD, 2007). O teste final do **GGSS** foi para demonstrar a eficiência e precisão do mapa do vetor de

⁴ Utilizaremos por conveniência: Instrumentos de Gradiente de Gravidade (**IGG's**) ao invés de **GGI** – do inglês **Gravity Gradient Instrument**.

gravidade ao longo de linhas férreas para aplicação no monitoramento da trajetória de um sistema móvel de mísseis. Os testes foram conduzidos no início de 1989 nos estados do Colorado, Kansas e do Novo México. Infelizmente, os resultados deste teste não foram divulgados em detalhe na literatura, em virtude da restrição militar. Porém, um enfoque qualitativo destes resultados pode ser encontrado em BRZEZOWSKI et al. (1990).

2.1 Sistemas atuais de aquisição de dados de aerogradiometria gravimétrica

Os atuais sistemas de medidas de dados de aerogradiometria gravimétrica que são utilizados para levantamentos geológicos e na exploração mineral são o **3D-FTG** e o **Falcon**. Os sistemas de aquisição de dados de aerogradiometria gravimétrica são baseados nas medidas das taxas espaciais da mudança da aceleração gravitacional. O vetor da aceleração gravitacional \vec{g} é representado por:

$$\vec{g} = \begin{pmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{pmatrix}, \quad (2.1)$$

em que g_x , g_y e g_z são as componentes nos eixos x , y e z , respectivamente. A aceleração gravitacional é definida como o gradiente do potencial gravitacional Γ i.e.:

$$\vec{g} = \vec{\nabla} \Gamma = \begin{pmatrix} \frac{\partial \Gamma}{\partial x} \\ \frac{\partial \Gamma}{\partial y} \\ \frac{\partial \Gamma}{\partial z} \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

Por definição, o tensor do gradiente gravitacional \mathbf{G} é definido como o gradiente do vetor da aceleração gravitacional $\vec{\mathbf{g}}$. Tomando-se o gradiente da aceleração gravitacional, chega-se ao gradiente gravitacional, \mathbf{G} que é um tensor de segunda ordem (matriz) do potencial gravitacional isto é:

$$\mathbf{G} = \vec{\nabla} \vec{\mathbf{g}}^T = \vec{\nabla} \vec{\nabla}^T \Gamma = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial z^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{xx} & G_{xy} & G_{xz} \\ G_{yx} & G_{yy} & G_{yz} \\ G_{zx} & G_{zy} & G_{zz} \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

De acordo com JEKELI (2006) as componentes da diagonal e as componentes fora da diagonal da matriz \mathbf{G} são chamadas de gradientes em linha (*in-line*) e cruzados (*cross*), respectivamente. No espaço livre das fontes em que a densidade é igual à zero o Laplaciano do potencial gravitacional Γ obedece a equação de Laplace. Portanto, a soma das componentes da diagonal principal da matriz \mathbf{G} é igual à zero, isto equivale a escrever que $G_{xx} + G_{yy} + G_{zz} = 0$ ⁵. Devido à natureza do campo potencial algumas componentes são simétricas: $G_{xy} = G_{yx}$, $G_{xz} = G_{zx}$ e $G_{yz} = G_{zy}$. Devido à simetria das componentes e à equação de Laplace, há apenas cinco componentes independentes em qualquer ponto de observação dos dados de gradiometria gravitacional.

Cada componente do gradiente de gravidade contém informações sobre a distribuição de densidade em subsuperfície e após a interpolação e geração de mapas bidimensionais tendem a realçar diferentes informações geológicas. As componentes relacionadas às derivadas horizontais (G_{xx} , G_{yy} e G_{xy}) tendem a realçar as estruturas geológicas ou variações de densidade nas direções x e y . A componente G_{zz} fornece a

⁵ O potencial da gravidade compreende duas parcelas: (i) o potencial gravitacional e (ii) o potencial de rotação (ou centrífugo). O Laplaciano do potencial de rotação não é nulo, é igual a $2\omega^2$ ($\sim 11 \times 10^{-9}/s^2$).

informação mais visível da correlação entre a anomalia observada e o mapa geológico de superfície.

A unidade de medida do campo gravitacional no sistema CGS é o **mGal**⁶ e nos sistema internacional de unidades (SI) é o m/s², ou seja, 1 mGal = 10 m/s². O gradiente gravitacional é a derivada espacial do campo gravitacional, implicando em **mGal** por unidade de distância, geralmente metro ou quilômetro. A unidade de medida mundialmente utilizada em geofísica para medidas do gradiente de gravidade é o Eötvös (LANE, 2004). Numericamente, o valor de 1 Eötvös (**E**) é igual a $\frac{10^{-9}}{s^2}$ que equivale a unidade de aceleração dividida pela distância. Segundo o Comitê Consultivo de Unidades do SI não há uma representação padrão para a unidade Eötvös. Então, esse comitê recomenda que no texto seja explicitado que o valor de 1 Eötvös é igual a $\frac{10^{-9}}{s^2}$.

2.1.1 3D-FTG

O sistema **3D-FTG** quando observado é composto de duas partes: uma cápsula aeronáutica e uma parte eletrônica (**rack** eletrônico). A cápsula aeronáutica apresenta a geometria semelhante a de um cubo com aproximadamente 1 m de lado e possui massa de aproximadamente 227 kg com os **IGG's** instalados. A principal função da cápsula aeronáutica é fornecer um ambiente controlado em relação à temperatura, pressão e umidade. O **rack** eletrônico apresenta as mesmas dimensões da cápsula aeronáutica e massa de aproximadamente 160 kg (BRAGA et al., 2009). No sistema **3D-FTG** os três instrumentos de gradiente de gravidade são montados numa geometria semelhante a um guarda-chuva conforme mostra a Figura 2-2.

⁶ 1mGal = 1 cm/s²

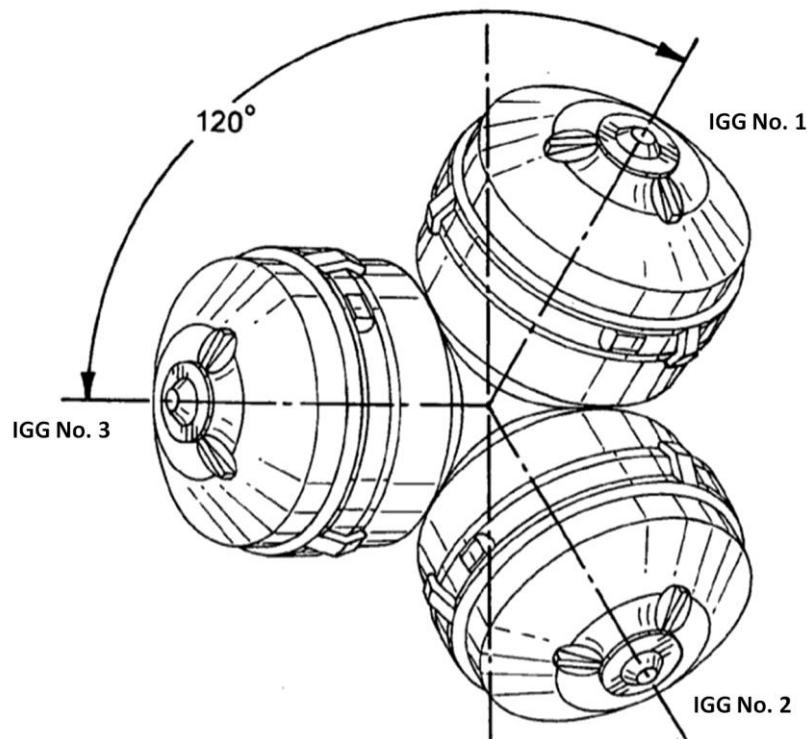


Figura 2-2. Arranjo em formato de guarda-chuva dos Instrumentos do Gradiente de Gravidade (*IGG's*) do sistema **3D-FTG** mostrando os três *IGG's* (No. 1, 2 e 3). Retirado de BRETT e BREWSTER (2010).

Dentro de cada **IGG** há um disco que gira a uma determinada velocidade angular (Ω). Sobre cada um dos discos estão fixados quatro acelerômetros (a₁, a₂, a₃, e a₄) como ilustra a Figura 2-3. Portanto o sistema **3D-FTG** totaliza doze acelerômetros em sua composição de medida. O sistema **3D-FTG** adota um sistema de coordenadas do tipo **END**, ou seja, o este coincide com o Eixo **X**, o norte coincide com o Eixo **Y** e o Eixo **Z** aponta para **baixo**. A relação entre o sistema de coordenadas do sistema 3D-FTG e as coordenadas geográficas é apresentada no apêndice intitulado relação entre o sistema de coordenadas dos IGG's e coordenadas geográficas.

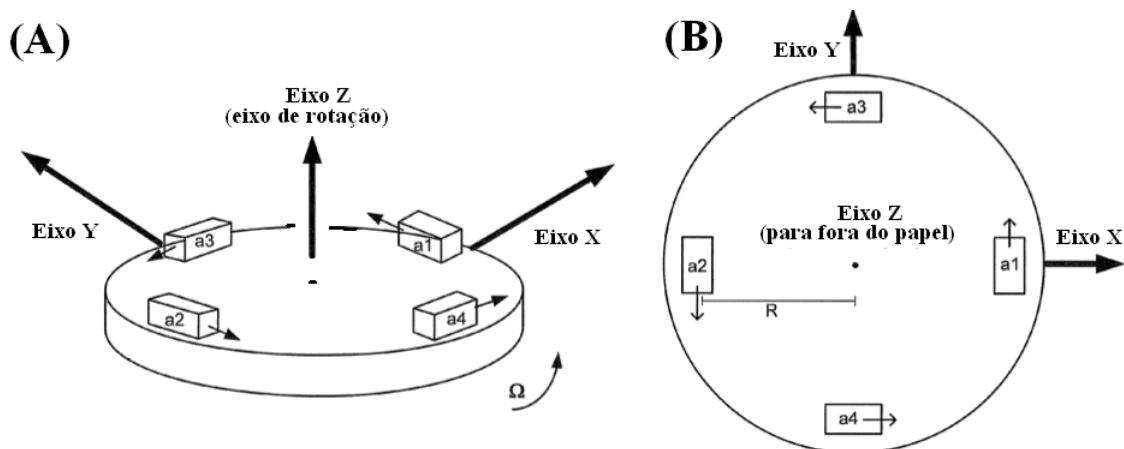


Figura 2-3. (A) Vista geral do disco com a montagem dos quatro acelerômetros (a1, a2, a3 e a4). (B) Vista em planta mostrando a localização de cada um dos acelerômetros. No caso particular do sistema 3D-FTG o raio R é igual a 10 cm. Adaptado de BRETT e BREWSTER (2010).

As Figuras 2-3(A) e 2-3(B) mostram dois pares de acelerômetros localizados em lados opostos dos discos para medir os gradientes no plano de rotação que é normal ao eixo de rotação do disco. Cada acelerômetro é composto de uma massa que é articulada (como num pêndulo) e um sensor que mede a posição de deslocamento do pêndulo ao longo do seu percurso. Cada acelerômetro possui um circuito elétrico que restaura o pêndulo para a posição base através de eletromagnets e restringe o pêndulo a mínimos movimentos ao longo dos eixos de entrada do acelerômetro (HOFMEYER e AFFLECK, 1994). Este sinal elétrico aplicado representa a saída do acelerômetro e serve como medida da aceleração do pêndulo produzida por qualquer força aplicada ao acelerômetro. As medidas de cada par de acelerômetros podem ser resolvidas em dois gradientes no plano de rotação do disco pelo cálculo da distância entre cada acelerômetro, a taxa em que os discos giram e as acelerações medidas entre cada par. Com a finalidade de obter as cinco componentes independentes do tensor do gradiente de gravidade, três discos em rotação devem ser utilizados desde que cada disco pode medir somente duas componentes do tensor. As componentes do tensor medidas são determinadas pelo uso de combinação linear dos seis valores dos *IGG's*. (ROGERS, 2009).

2.1.1.1 Etapas do pré-processamento dos dados do sistema 3D-FTG

Se todos os acelerômetros estiverem perfeitamente alinhados, nenhum termo de aceleração angular ou de rotação precisará ser corrigido. Em essência, a perfeita rotação do acelerômetro do gradiômetro, se montado em uma plataforma estável, não estará sujeita as acelerações de primeira ordem do veículo (DOSCHI e SIERACKI, 2004). Entretanto, o mau alinhamento dos sensores, os diferentes fatores de escala de cada acelerômetro e outros erros não mensuráveis criam coeficientes não lineares que são considerados ruídos nas medidas dos gradientes.

Conforme apresentado na Figura 2-2 o sistema **3D-FTG** da **Bell Geospace** possui três discos. Cada disco é montado em seus respectivos eixos de rotação e são mutuamente perpendiculares. Os instrumentos de gradiente de gravidade são montados em uma plataforma do tipo carrossel estabilizadora. Para minimizar a influência da orientação ou movimento do instrumento, os discos são girados a uma velocidade angular constante de 300°/h em relação ao eixo vertical.

Atualmente a **Bell Geospace** utiliza três tipos de aeronaves para os aerolevantamentos geofísicos. A aeronave **BT-67** devido as suas dimensões fornece uma excelente estabilidade durante o vôo. O **Zeppelin** que melhora muito a estabilidade e reduz o ruído nos dados devido ao vôo calmo e sem trepidações. A terceira aeronave utilizada na maioria das aplicações é a **Cessna Grand Caravan**, que fornece uma plataforma de vôo bastante aceitável devido à sua velocidade de vôo, ruído do motor, vibrações e outras variáveis que podem ser monitoradas e compensadas durante o vôo ou o pós-vôo.

Durante o vôo mesmo tomando todos os cuidados inerentes a operação do equipamento e movimentos sofridos pela aeronave ocorrem alguns comportamentos não lineares devidos às acelerações da aeronave e ao ruído do disco giratório. Para solucionar esse problema a **Bell Geospace** desenvolveu um procedimento proprietário não divulgado em detalhes na literatura. Neste procedimento, as acelerações e ruídos da aeronave podem ser determinados e eliminados. Este procedimento foi descrito por ROGERS (2009) e é conhecido como **High Rate Post Mission Compensation (HPMRC)** sendo adequado para aeronaves como **Cessna Grand Caravan, BT-67 e Zeppelin.**

Outros dois fatores que podem introduzir ruído nas medidas são o mau alinhamento da combinação de acelerômetros em cada **IGG** em relação ao plano de rotação e qualquer diferença no fator de escala entre dois acelerômetros opostos. No entanto, esses dois fatores são identificados facilmente antes dos vôos através de técnicas de calibração com a aeronave parada em solo.

Adicionalmente, as medidas dos gradientes são extremamente sensíveis às alterações do campo gravitacional provocadas por massas não geológicas. A própria massa da aeronave precisa ser eliminada nos dados adquiridos. Este processo de eliminação do efeito da massa da aeronave das medidas dos gradientes de gravidade é feito em vôos controlados em uma área conhecida como levantamento padrão. Os levantamentos de gradiometria da gravidade são conduzidos em um padrão ortogonal que resultam em muitos pontos de cruzamento. Os dados destes pontos de cruzamento são utilizados para remover os efeitos gravitacionais da aeronave que é conhecido como **Low Rate Post Mission Compensation (LRPM)**, (BRETT, 2008 *apud* ROGERS, 2009).

Para obtenção de uma boa resolução espacial os aerolevantamentos são voados tipicamente utilizando vôos do tipo *drape* em alturas de 50 a 100 metros acima do terreno (*clearance*), pois o sinal do sistema **3D-FTG** e **Falcon** decaem com o inverso do cubo da distância entre o ponto de medida e o alvo.

Um estudo muito importante sobre à resolução das medidas do gradiente de gravidade é apresentado por ROGERS (2009). A atual resolução do sistema **3D-FTG** depois dos procedimentos de **HRPMC** e a calibração de pré-vôo é de aproximadamente **5 E** numa taxa de aquisição de **1 Hz** com uma resolução espacial de algumas centenas de metros. Sem os procedimentos de calibração anteriormente apresentados, os níveis de ruído atingiriam, aproximadamente, **12 a 15 E** (MURPH, 2004 e BRETT, 2008) que são valores quase três vezes maiores que a resolução do método.

2.1.2 Sistema Falcon

Em paralelo com o desenvolvimento do sistema **3D-FTG**, a empresa anglo australiana **BHP Billiton** assinou um contrato com a **Lockheed Martin** para o desenvolvimento de um gradiômetro de gravidade desenvolvido especialmente para utilização em vôo (**Falcon**) ou *Airborne Gravity Gradient* (**AGG**), DRANSFIELD (2007).

Testado em 1997 e utilizado para aerolevantamento em 1999, o sistema **Falcon** foi considerado o primeiro gradiômetro de gravidade aéreo. Tal como o sistema **3D-FTG**, o sistema **Falcon** é constituído por uma cápsula aeronáutica e de um **rack** eletrônico mostrados na Figura 2-4.

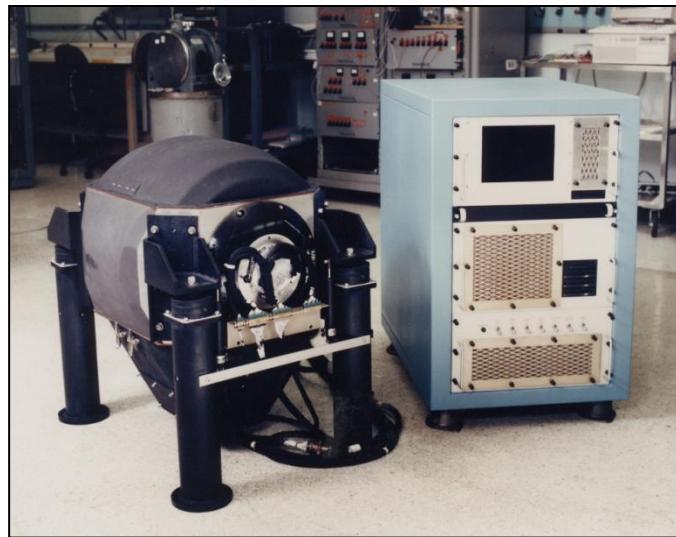


Figura 2-4. Conjunto cápsula aeronáutica (esquerda) e rack eletrônico (direita) do sistema *Falcon*.

Diferentemente do sistema *3D-FTG* que é composto por três instrumentos de gradiente de gravidade, o sistema *Falcon* é composto de apenas um único *IGG* com dimensões de aproximadamente duas unidades de comprimento maior que um dos *IGG's* do sistema *3D-FTG*. A comparação entre os *IGG's* dos dois sistemas é mostrada na Figura 2-5.



Figura 2-5. Comparação entre os *IGG's* do sistema *Falcon* (A) e do sistema *3D-FTG* (B). Note que o *IGG* do sistema *Falcon* é aproximadamente duas unidades de comprimento *L* maior que o *IGG* do sistema *3D-FTG*.

Dentro do **IGG** há um disco que gira a uma determinada velocidade angular (Ω).

Sobre o disco estão montados oito acelerômetros (A1, A2, A3, A4 e B1, B2, B3, B4), divididos em quatro pares opostos de acelerômetros como ilustra a Figura 2-6. Portanto, o sistema **Falcon** totaliza oito acelerômetros em sua composição de medida. O sistema **Falcon** adota um sistema de coordenadas do tipo **NED**, ou seja, o norte coincide com o eixo **x**, o leste coincide com o eixo **y** e o eixo **z** aponta para baixo.

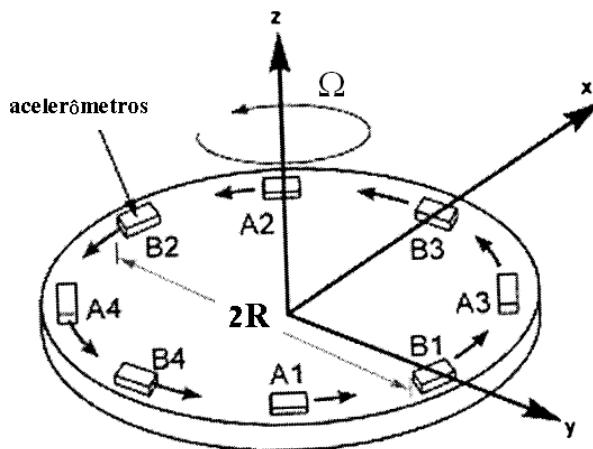


Figura 2-6. Disposição dos acelerômetros no disco do Instrumento de Gradiente de Gravidade do sistema **Falcon. Adaptado de JEKELI (2006).**

A teoria quanto às medidas dos acelerômetros do sistema **Falcon** é semelhante ao apresentado no sistema **3D-FTG**, e as diferenças entre eles está na quantidade de acelerômetros e na geometria de distribuição dos acelerômetros.

Diferentemente do sistema **3D-FTG** que mede cinco componentes independentes do tensor do gradiente de gravidade, o sistema **Falcon** mede apenas dois valores. A componente G_{xy} e a curvatura (G_{UV}) do campo potencial que é definida como

$$G_{UV} = \frac{G_{yy} - G_{xx}}{2}. \quad (2.4)$$

2.1.2.1 Etapas do pré-processamento dos dados do sistema *Falcon*

Segundo DRANSFIELD e GAMA (2010) os principais passos aplicados ao processamento do sistema *Falcon* são:

1. Correções dinâmicas dos movimentos residuais da aeronave (Compensação Pós-Missão ou **PMC**).

Os dados são demodulados, filtrados e nivelados. Ao final dessa etapa de correção dinâmica, são obtidos o gradiente de curvatura da gravidade (G_{UV}) e a componente G_{xy} .

2. Correções dos pseudo-gradientes (DRANSFIELD, 2007).

Os movimentos de rotação da aeronave produzem pseudo-gradientes que devem ser eliminados pelo sistema de navegação. Esta eliminação requer um controle rotacional tri-axial da ordem de dez micro-radianos e um excelente controle de temperatura e pressão (DRANSFIELD, 2007).

3. Correções de autogradiente.

Estas correções são utilizadas para reduzir os gradientes variáveis gerados pelos movimentos da plataforma e da aeronave. O autogradiente é um gradiente variável ao longo do tempo devido às massas que se movimentam com as mudanças de direção e altitude da aeronave durante o vôo. Os autogradientes são calculados por regressão entre os parâmetros medidos e os parâmetros modelados. As variáveis de entrada do modelo são as rotações das plataformas. Depois de calculado, o valor encontrado é subtraído do valor observado.

4. Geração de um modelo digital do terreno (**MDT**).

A partir de medidas realizadas por um *laser scanner* gera-se um modelo digital do terreno. Em geral, os dados do *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* são utilizados para complementar o MDT medido pelo *laser scanner*.

5. Correções do terreno.

Após a geração do modelo digital do terreno (MDT) os valores medidos das componentes G_{xy} e G_{UV} são corrigidos dos efeitos da topografia.

6. Nivelamento das componentes G_{xy} e G_{UV} e obtenção do tensor completo.

Os valores das componentes G_{xy} e G_{UV} são nivelados e através da aplicação da Transformada de Fourier são transformados no tensor completo do gradiente de gravidade e na componente g_z .

7. Ajuste da componente g_z .

Após a obtenção da componente g_z ela é ajustada à gravidade regional.

3. Controle de Qualidade aplicado na Aquisição dos Dados de Aerogradiometria Gravimétrica (3D-FTG e Falcon)

Neste capítulo apresentaremos todas as fases do controle de qualidade aplicados aos dados de aerogradiometria gravimétrica, detalhando as etapas relativas à aquisição dos dados durante os aerolevantamentos.

Os aerolevantamentos convencionais, tais como os gravimétricos e magnetométricos, utilizam basicamente duas etapas de controle de qualidade: o planejamento do aerolevantamento e os critérios de controle de qualidade da navegação da aeronave. Para o controle de qualidade dos dados de aerogradiometria gravimétrica, além destas duas etapas é imprescindível o acréscimo de mais um critério, que é o cálculo da razão sinal ruído (RSR). O cálculo da RSR é uma condição que reprova qualquer linha de vôo, até mesmo aquelas linhas de vôo que passaram no controle de qualidade dos critérios de navegação. A seguir, detalharemos cada uma das etapas do controle de qualidade aplicadas aos dados de aerogradiometria gravimétrica e apresentaremos o cálculo da razão sinal ruído.

3.1 *Planejamento do Aerolevantamento*

Nos planejamentos dos aerolevantamentos, sejam estes convencionais ou de gradiometria gravimétrica, o primeiro procedimento é identificar na área de estudo os padrões das anomalias geofísicas que são esperados. Este procedimento, em geral, é feito através de modelagem direta. Para tanto, o geofísico deve considerar a geologia da região e a dimensão dos alvos de prospecção que estão sendo buscados. Vale ressaltar

que o tamanho esperado para os alvos geológicos de prospecção determinará a separação das linhas de vôo e estes alvos podem variar desde dezenas a centenas de metros.

3.2 Critérios da Navegação da Aeronave

No planejamento dos aerolevantamentos geofísicos sejam estes convencionais ou de gradiometria gravimétrica é estabelecido um plano de navegação da aeronave. Neste planejamento são considerados os seguintes parâmetros de navegação:

- (a) traçado das linhas a serem voadas

Geralmente, durante a realização dos aerolevantamentos, eventos meteorológicos tais como ventos, nuvens e chuvas podem alterar o curso planejado da aeronave. Dessa forma, todos os parâmetros de navegação serão afetados por estes eventos meteorológicos e tolerâncias de desvios da altura, do traçado, da separação das linhas e da separação das medidas consecutivas ao longo da linha de vôo devem ser consideradas.

- (b) altura de vôo

No desvio da altura de vôo são consideradas tolerâncias acima ou abaixo em relação a um valor pré-estabelecido no planejamento da altura de vôo, ou altura nominal de vôo. Analisa-se ponto a ponto o valor da altura de vôo e verifica se a medida está dentro das tolerâncias aceitáveis.

- (c) separação das linhas de vôo

Em relação ao traçado da linha de vôo, verifica se durante o aerolevantamento a aeronave manteve-se no traçado das linhas planejadas aceitando-se tolerâncias para os desvios laterais (desvios à direita e esquerda do traçado nominal) e tolerâncias de

desvios da altura de vôo num determinado comprimento de trajetória também devem ser consideradas. No critério da separação das linhas de vôos verifica se as linhas encontram-se dentro de um valor pré-estabelecido no planejamento da separação das linhas de vôo.

(d) separação entre medidas consecutivas ao longo de uma linha vôo

A separação das medidas é um parâmetro que está diretamente relacionada com a cobertura de pontos da área do aerolevantamento e em última análise é um parâmetro relacionado à resolução do aerolevantamento. Se a velocidade da aeronave for superior a velocidade nominal de um vôo de cruzeiro, a separação entre medidas consecutivas será comprometida.

3.3 Cálculo da razão sinal ruído

A razão sinal ruído (*RSR*) está relacionada a todos os campos da ciência que envolvam medidas de um sinal em um meio ruidoso. Na literatura não foi apresentado até o momento, uma metodologia padrão para o cálculo da *RSR* das componentes do tensor de gradiometria gravimétrica. Alguns trabalhos propõem diferentes métodos para o cálculo da *RSR* (BRZEZOWSKI et al., 1990; DEGREGORIA, 2010; JEKELI e ABT, 2010; ABT, 2011). Neste trabalho a *RSR* foi calculada como:

$$RSR = 10 \log_{10}(P) \quad (3.1)$$

Sendo (Elizabeth Baranyi, comunicação pessoal)

$$P = \frac{1}{N \sigma_{\alpha\beta}^2} \cdot \sum_{k=1}^N (G_{\alpha\beta}^k - \mu_{\alpha\beta})^2, \quad (3.2)$$

em que os índices $\alpha\beta = xx, xy, xz, yy, yz$ e zz . $G_{\alpha\beta}^k$ refere-se ao k -ésimo valor dos dados observados da componente $\alpha\beta$ do tensor de gradiometria gravimétrica, N é o número de

dados observados numa linha de vôo, $\sigma_{\alpha\beta}$ é o desvio padrão dos dados da componente $\alpha\beta$ do tensor do gradiente de gravidade para uma linha de vôo e $\mu_{\alpha\beta}$ é a média dos dados observados da componente $\alpha\beta$ do tensor do gradiente de gravidade numa linha do aerolevantamento de gradiometria gravimétrica. O valor de $\sigma_{\alpha\beta}$ é a estimativa do ruído dos dados do aerolevantamento de aerogradiometria gravimétrica para cada linha de vôo aplicando-se o filtro de Savitzky-Golay ou filtro *S-G* (SAVITZKY e GOLAY, 1964).

Ressaltamos que o valor da *RSR* pode isoladamente reprovar uma linha de vôo, independentemente, se os parâmetros de navegação forem todos aceitáveis dentro das tolerâncias previamente adotadas. Esse critério é justificado pelo fato de que o sinal sempre deve ser superior em relação ao ruído para não afetar a qualidade do dado adquirido.

Ao contrário do critério de separação das linhas de vôo que deve ser estabelecido antes do ínicio do aerolevantamento, o valor da *RSR* é um parâmetro que não pode ser estabelecido previamente. Na gradiometria de gravidade o valor da *RSR* pode ser calculado através de um aerolevantamento realizado em uma área teste que, em geral, é uma região do próprio aerolevantamento a ser executado. Uma segunda alternativa é calcular o *RSR* usando as primeiras linhas do aerolevantamento de gradiometria gravimétrica.

4. Métodos de Interpretação de Dados de Gradiometria de Gravidade

Neste capítulo apresentaremos os métodos de interpretação comumente aplicados aos dados de aerogradiometria de gravidade. PEDERSEN e RASMUSSEN (1990) desenvolveram formulações para o cálculo de invariantes que podem ser aplicados aos dados do gradiente de gravidade. Estes autores deduziram invariantes para cada ponto de observação do tensor do gradiente de gravidade (Equação 2.3). Dentre os invariantes citam-se: (1) traço do tensor ou invariante zero (I_0); (2) primeiro invariante (I_1) e (3) determinante (I_2) ou segundo invariante.

Em cada ponto de observação do tensor do gradiente de gravidade os invariantes zero, um e dois são, respectivamente, expressos por:

$$I_0 = \text{traço}(G_{\alpha\beta}) = \sum_{\alpha=1}^3 G_{\alpha\alpha} = 0, \quad (4.1)$$

$$I_1 = G_{xx}G_{yy} + G_{yy}G_{zz} + G_{xx}G_{zz} - G_{xy}^2 - G_{yz}^2 - G_{xz}^2, \quad (4.2)$$

e

$$\begin{aligned} I_2 &= \det(G) \\ &= G_{xx}(G_{yy}G_{zz} - G_{yz}^2) - G_{xy}(G_{yz}G_{xz} - G_{xy}G_{zz}) + G_{xz}(G_{xy}G_{yz} - G_{xz}G_{yy}). \end{aligned} \quad (4.3)$$

em que $G_{\alpha\beta}$ é a componente $\alpha\beta$ do gradiente de gravidade sendo $\alpha\beta = xx, xy, xz, yy, yz$ e zz . Nas Equações 4.1 a 4.3 os índices x , y e z representam direções que, no sistema de coordenada dos dados de **3D-FTG**, são definidas com o eixo x apontando para o este, o eixo y apontando para o norte e o eixo z apontando para baixo.

O traço do tensor não é utilizado para interpretação geológica, porém, pode ser aplicado para verificação da qualidade dos dados adquiridos durante um aerolevantamento de gradiente de gravidade. O traço do tensor (I_0) é a representação da equação de Laplace, portanto I_0 deve resultar em uma malha de resíduos. Na prática, o invariante 1 (I_1) realça limites de contatos geológicos, possibilitando interpretações estratigráficas e estruturais. O invariante 2 (I_2) destaca a geometria das fontes geológicas suprimindo os longos comprimentos de onda e realçando os curtos comprimentos de onda.

Outro processamento apresentado por PEDERSEN e RASMUSSEM (1990) foi a dedução dos autovalores (λ_1 , λ_2 e λ_3) do tensor do gradiente de gravidade (Equação 2.3). Os invariantes I_1 e I_2 trazem uma relação direta com os autovalores (λ_1 , λ_2 e λ_3) do tensor do gradiente de gravidade. Matematicamente, os autovalores são obtidos pela equação característica que segundo PEDERSEN e RASMUSSEM (1990) e BEIKI (2010) é dada por:

$$\lambda^3 - I_0\lambda^2 + I_1\lambda - I_2 = \lambda^3 + I_1\lambda - I_2 = 0. \quad (4.4)$$

A Equação (4.4) tem as seguintes raízes:

$$\lambda_1 = C + D, \quad (4.5a)$$

$$\lambda_2 = -\frac{C+D}{2} + \frac{C-D}{2}\sqrt{-3}, \quad (4.5b)$$

e

$$\lambda_3 = -\frac{C+D}{2} - \frac{C-D}{2}\sqrt{-3}, \quad (4.5c)$$

em que

$$C = \sqrt[3]{\frac{I_2}{2} + \sqrt{\left(\frac{I_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{I_1}{3}\right)^3}}, \quad (4.6)$$

e

$$D = \sqrt[3]{\frac{I_2}{2} - \sqrt{\left(\frac{I_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{I_1}{3}\right)^3}}. \quad (4.7)$$

Na prática, os três autovalores (λ_1 , λ_2 e λ_3) podem ser utilizados para interpretação dos contatos geológicos entre rochas de diferentes densidades, possibilitando interpretações estruturais.

Outros métodos empregados para interpretação dos dados do tensor do gradiente de gravidade foram apresentados em TÓTH (2002), MURPHY e BREWSTER (2007), MATARAGIO e KIELEY (2009) e BEIKI (2010).

De acordo com TÓTH (2002), as principais relações utilizadas para interpretação são a curvatura do campo potencial

$$G_\Delta = G_{yy} - G_{xx}, \quad (4.8a)$$

e a magnitude do gradiente horizontal

$$G_{amp} = \sqrt{G_{xz}^2 + G_{yz}^2}. \quad (4.8b)$$

A aplicação da curvatura (G_Δ) a dados produzidos por fontes isoladas podem realçar feições como falhas e contatos geológicos. Porém, em áreas com geologia complexa, G_Δ pode apresentar resultados de difícil interpretação. A magnitude do

gradiente de gravidade (G_{amp}) é eficazmente utilizada para mapeamento de limites de contatos geológicos.

MURPHY e BREWSTER (2007) e MATARAGIO e KIELEY (2009) utilizam para interpretação dos dados do tensor do gradiente de gravidade a magnitude da curvatura que é definida como:

$$R = \sqrt{G_{\Delta}^2 + (2G_{xy})^2}. \quad (4.9)$$

A magnitude da curvatura em combinação com a componente G_{zz} pode ser utilizada para o mapeamento de estruturas geológicas (MURPHY e BREWSTER, 2007).

BEIKI (2010) propôs a técnica do sinal analítico aplicado aos dados do tensor do gradiente de gravidade para a estimativa da localização das fontes. A partir do sinal analítico de um campo potencial de uma fonte 2D (NABIGHIAN, 1984) e valendo-se do resultado de ROEST et al. (1992) para o caso de fonte 3D, BEIKI (2010) deduziu que a amplitude do sinal analítico direcional para os dados do tensor de gradiometria da gravidade (G , equação 2.3) é definida como,

$$|A_x| = \sqrt{G_{xx}^2 + G_{xy}^2 + G_{xz}^2}, \quad (4.10a)$$

$$|A_y| = \sqrt{G_{xy}^2 + G_{yy}^2 + G_{yz}^2}, \quad (4.10b)$$

e

$$|A_z| = \sqrt{G_{xz}^2 + G_{yz}^2 + G_{zz}^2}, \quad (4.10c)$$

em que $G_{\alpha\beta}$ é a componente $\alpha\beta$ do gradiente de gravidade sendo $\alpha\beta = xx, xy, xz, yy, yz$ e zz . Segundo BEIKI (2010), A_α (Equações 4.10a - 4.10c) é a amplitude do sinal analítico na direção α em que $\alpha = x, y$ e z .

O sinal analítico direcional pode ser utilizado para delinear os limites de contatos geológicos. Especificamente, o sinal analítico direcional na direção z (A_z equação 4.10c), permite o realce da geometria das fontes geológicas. Todos os processamentos apresentados nesse capítulo serão aplicados a dados sintéticos e reais e serão apresentados, respectivamente, nos Capítulos 6 e 9.

5. Métodos de inversão de Dados de Gradiometria de Gravidade

A estimativa da geometria de corpos geológicos tridimensionais localizados em subsuperfície pode ser obtida através da inversão de um conjunto discreto de medições do tensor do gradiente de gravidade (dados observados) adquiridos na superfície e produzidos por estes corpos tridimensionais.

O procedimento para estimação da geometria dos corpos em subsuperfície (TARANTOLA, 2005 e OLIVEIRA JR, 2010) é baseado nos seguintes passos. (1) Parametrização - aproxima-se a geometria do corpo geológico por um modelo interpretativo que possa ser descrito por um conjunto de parâmetros. (2) Problema direto – prescrevem-se as relações matemáticas entre os parâmetros do modelo interpretativo e um conjunto de medidas geofísicas. Estas relações matemáticas são capazes de produzir os dados preditos ou calculados. (3) Problema Inverso – estimam-se os valores dos parâmetros que descrevem o modelo interpretativo tal que a diferença entre os dados observados e os dados preditos seja mínima de acordo com uma norma.

A. Parametrização e Problema Direto

Seja $\bar{\mathbf{d}}^{\text{obs}}$ o vetor N -dimensional de dados observados adquiridos por uma aeronave conforme a Figura 5-1. Este vetor contém as observações de gradiometria gravimétrica produzidas por corpos geológicos em subsuperfície. Neste trabalho estimamos a distribuição 3D do contraste de densidade presumindo-se que esta distribuição possa ser representada por uma função constante por partes definida em uma malha de prismas verticais tridimensionais. O contraste de densidade dentro de cada prisma é uniforme, mas variações entre diferentes prismas são permitidas.

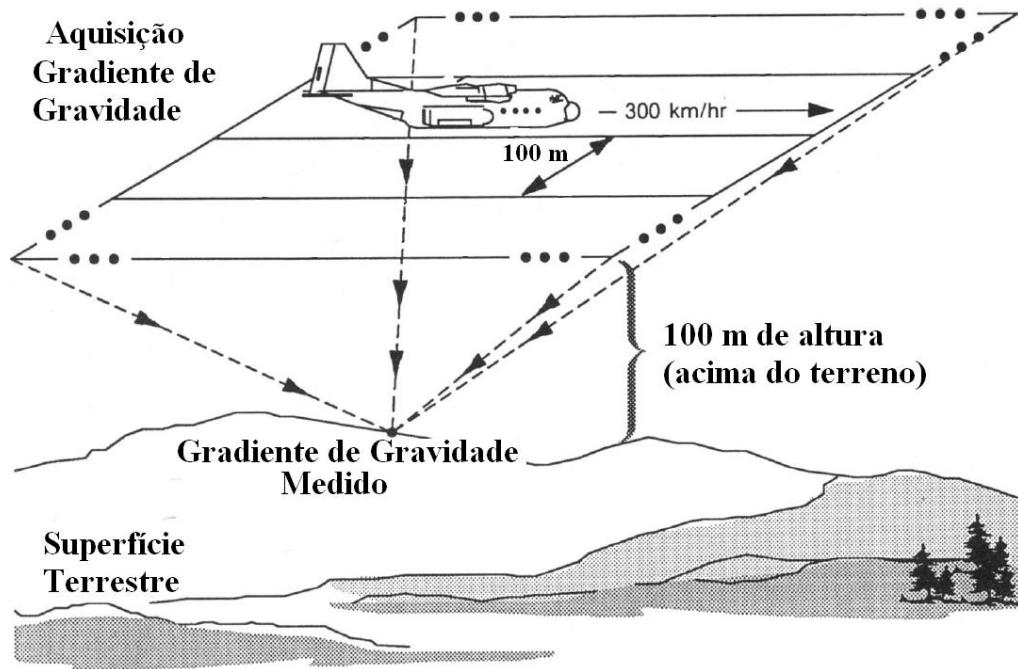


Figura 5-1. Esquema representativo da aquisição das medidas do tensor do gradiente de gravidade. Adaptado de Brzezowski e Heller (1988) .

Especificamente, a região da subsuperfície contendo as fontes geológicas é discretizada em uma malha $m_x \times m_y \times m_z$ de M prismas elementares 3D justapostos cujos contrastes de densidade são constantes. A Figura 5-2 mostra a malha tridimensional do modelo interpretativo adotado.

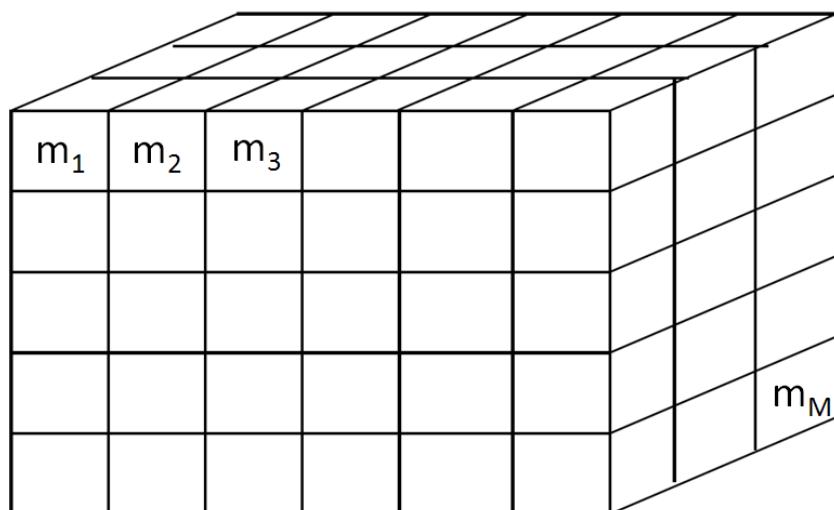


Figura 5-2. Modelo interpretativo – O modelo de discretização da terra consiste de uma malha tridimensional composta por M prismas elementares. Adaptado de PHILLIPS (2001). As variáveis $m_1, m_2 \dots m_M$ representam os valores do contraste de densidade de cada um dos prismas do modelo discretizado da terra.

O tensor do gradiente de gravidade causado por anomalias de densidade em subsuperfície pode ser aproximado pela soma da contribuição de cada um dos prismas tridimensionais, que são calculadas utilizando-se os trabalhos de NAGY et al. (2000, 2002).

A relação matemática entre os parâmetros (contraste de densidade dos M prismas) e as componentes do tensor do gradiente de gravidade pode ser escrita em notação matricial:

$$\bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{m}} = \bar{\mathbf{d}} \quad (5.1)$$

em que $\bar{\mathbf{d}}$ é o vetor N -dimensional que contém as componentes do tensor do gradiente de gravidade produzidas pela distribuição do contraste de densidade do conjunto de M prismas, $\bar{\mathbf{m}}$ é o vetor M -dimensional de parâmetros que contém os contrastes de densidade de cada prisma do modelo interpretativo (Figura 5-2) e $\bar{\mathbf{A}}$ é a matriz Jacobiana ($N \times M$), cuja j -ésima coluna contém a contribuição do j -ésimo prisma com contraste de densidade unitário a cada valor das componentes do tensor do gradiente de gravidade.

B. Problema Inverso

O problema inverso de estimar $\bar{\mathbf{m}}$ a partir de um conjunto de observações medidas das componentes do tensor do gradiente de gravidade $\bar{\mathbf{d}}^{\text{obs}}$ é um problema mal-posto e requer vínculos adicionais para ser resolvido. Nesta tese de doutorado revisamos dois métodos de inversão desenvolvidos para interpretar dados de gradiometria de gravidade. Estes dois métodos são: LI (2001) e UIEDA e BARBOSA (2012).

B.1 Metodologia de LI (2001)

LI (2001) estimou a distribuição do contraste de densidade a partir dos dados medidos de gradiente de gravidade solucionando o problema de

minimizar

$$\phi(\bar{\mathbf{m}}) = \phi_d(\bar{\mathbf{m}}) + \mu\phi_m(\bar{\mathbf{m}}), \quad (5.2a)$$

sujeito a

$$m_i^{\min} \leq m_i \leq m_i^{\max}, \quad (5.2b)$$

em que μ é o parâmetro de regularização, m_i é o i -ésimo elemento do vetor de parâmetros $\bar{\mathbf{m}}$ e m_i^{\min} e m_i^{\max} são definidos pelo intérprete como sendo, respectivamente, os limites inferior e superior para o i -ésimo elemento do vetor de parâmetros $\bar{\mathbf{m}}$.

Na Equação 5.2a, a função do ajuste dos dados é dada por :

$$\phi_d = \|\bar{\mathbf{W}}_d(\bar{\mathbf{d}} - \bar{\mathbf{d}}^{obs})\|^2 \quad (5.3)$$

em que $\|\cdot\|$ é a norma Euclideana, $\bar{\mathbf{d}}^{obs}$ é o vetor $N \times 1$ de dados observados, $\bar{\mathbf{d}}$ é o vetor $N \times 1$ de dados preditos (Equação 5.1) e $\bar{\mathbf{W}}_d$ é a matriz diagonal $N \times N$, cujo i -ésimo elemento é o desvio padrão do i -ésimo dado.

Na Equação 5.2a, a minimização da função de regularização ϕ_m representa a mínima norma Euclideana da diferença ponderada entre o vetor de parâmetros $\bar{\mathbf{m}}$ e o vetor de parâmetros *a priori* (ou parâmetros de referência) $\bar{\mathbf{m}}_0$, i.e.:

$$\phi_m = \|\bar{\mathbf{W}}_m(\bar{\mathbf{m}} - \bar{\mathbf{m}}_0)\|^2, \quad (5.4)$$

em que $\bar{\mathbf{W}}_m$ é uma matriz diagonal $M \times M$ de pesos, que permite a adição de alguns tipos de vínculos como o gradiente espacial da variação do contraste de densidade em

um meio. Matematicamente, a função de regularização pode ser escrita na forma contínua como:

$$\begin{aligned}\phi_m(m) = & \alpha_s \int_V w_s w^2(z) (m - m_0)^2 dv + \alpha_x \int_V w_x w^2(z) \left\{ \frac{\partial(m - m_0)}{\partial x} \right\}^2 dv + \\ & + \alpha_y \int_V w_y w^2(z) \left\{ \frac{\partial(m - m_0)}{\partial y} \right\}^2 dv + \alpha_z \int_V w_z w^2(z) \left\{ \frac{\partial(m - m_0)}{\partial z} \right\}^2 dv, \quad (5.5)\end{aligned}$$

em que w_s é o peso indicando o grau de proximidade entre a função do contraste de densidade m e a função do contraste de densidade *a priori* m_0 em um pequeno volume. Os pesos w_x , w_y e w_z indicam, em um pequeno volume, o grau de importância das derivadas de primeira ordem dos contrastes de densidade ao longo das direções x , y e z , respectivamente. Então, os pesos w_x , w_y e w_z indicam o grau de suavidade do contraste de densidade em um pequeno volume ao longo das direções x , y e z , respectivamente. O peso global α_s indica o grau de proximidade entre a distribuição contraste de densidade e a distribuição do contraste de densidade *a priori* no volume interpretativo V . Os pesos globais α_x , α_y e α_z indicam o grau de suavidade da distribuição do contrastes de densidade no volume interpretativo V ao longo das direções x , y e z , respectivamente.

Na Equação 5.5, $w(z)$ é a função ponderação pela profundidade z , sendo definida por:

$$w(z) = \frac{1}{(\sqrt{z - z_0})^3}, \quad z > z_0 \quad (5.6)$$

em que z é profundidade de cada camada horizontal de prismas do modelo interpretativo e z_0 depende da altura de observação e do tamanho da célula discretizada. Essa função $w(z)$ controla a profundidade em que o interprete deseja que os contrastes de densidade estejam concentrados.

A representação discreta da Equação 5.5 é dada por (PAOLETTI et al., 2013):

$$\begin{aligned}\phi_m(\bar{\mathbf{m}}) &= (\bar{\mathbf{m}} - \bar{\mathbf{m}}_0)^T (\bar{\mathbf{W}}_s^T \bar{\mathbf{W}}_s + \bar{\mathbf{W}}_x^T \bar{\mathbf{W}}_x + \bar{\mathbf{W}}_y^T \bar{\mathbf{W}}_y + \bar{\mathbf{W}}_z^T \bar{\mathbf{W}}_z) (\bar{\mathbf{m}} - \bar{\mathbf{m}}_0) \\ &= (\bar{\mathbf{m}} - \bar{\mathbf{m}}_0)^T (\bar{\mathbf{W}}_m^T \bar{\mathbf{W}}_m) (\bar{\mathbf{m}} - \bar{\mathbf{m}}_0) \\ &= \|\bar{\mathbf{W}}_m(\bar{\mathbf{m}} - \bar{\mathbf{m}}_0)\|^2 \quad (5.7)\end{aligned}$$

Segundo LI e OLDENBURG (1996), cada componente da matriz $\bar{\mathbf{W}}_i$ pode ser escrita como o produto de três matrizes individuais e um coeficiente.

$$\bar{\mathbf{W}}_i = \alpha_i \bar{\mathbf{S}}_i \bar{\mathbf{D}}_i \bar{\mathbf{Z}} \quad (5.8)$$

em que o índice $i = s, x, y, z$.

Na Equação 5.8 $\bar{\mathbf{S}}_i$ são matrizes diagonais cujos elementos são dados por $\sqrt{w_i}$, $i = s, x, y, z$, que representam os pesos que ponderam os vínculos (Equação 5.5). Os valores w_i são definidos em cada prisma para a matriz $\bar{\mathbf{S}}_s$ e sobre cada interface entre prismas adjacentes nas direções x, y e z para as matrizes $\bar{\mathbf{S}}_x, \bar{\mathbf{S}}_y$ e $\bar{\mathbf{S}}_z$, respectivamente.

$\bar{\mathbf{D}}_s$ é a matriz identidade e $\bar{\mathbf{D}}_x, \bar{\mathbf{D}}_y$ e $\bar{\mathbf{D}}_z$ são os operadores de diferenças finitas ao longo das direções x, y e z , respectivamente. $\bar{\mathbf{Z}}$ é uma matriz diagonal que representa a forma discretizada da função $w(z)$ (Equação 5.6).

O método da barreira logarítmica utilizando a técnica do gradiente conjugado foi usado para vincular os limites de densidade especificados na Equação 5.2b. A função objetivo não vinculada a ser minimizada é:

$$\phi = \phi_d + \mu \phi_m - 2\lambda \sum_{i=1}^M \{\ln(m_i - m_i^{min}) + \ln(m_i^{max} - m_i)\}, \quad (5.9)$$

em que λ é parâmetro de barreira.

A inversão de LI (2001) requer a escolha do parâmetro de regularização (variável μ , Equação 5.9). O critério da Curva-L ou curva de Tikhonov foi adotado para a escolha do melhor parâmetro de regularização. De acordo com HANSEN (1992), o critério da Curva-L é o balanço entre a função ajuste dos dados (ϕ_d) e a função de regularização (ϕ_m). Essa curva é representada em um gráfico *log-log* e sua principal característica é o formato em “L”, em que o valor de μ que fornece a solução que está próxima ao canto da curva L é selecionado como o melhor parâmetro de regularização que produz a melhor solução de inversão dos dados geofísicos. A Figura 5-3 apresenta uma ilustração pictórica de uma Curva L.

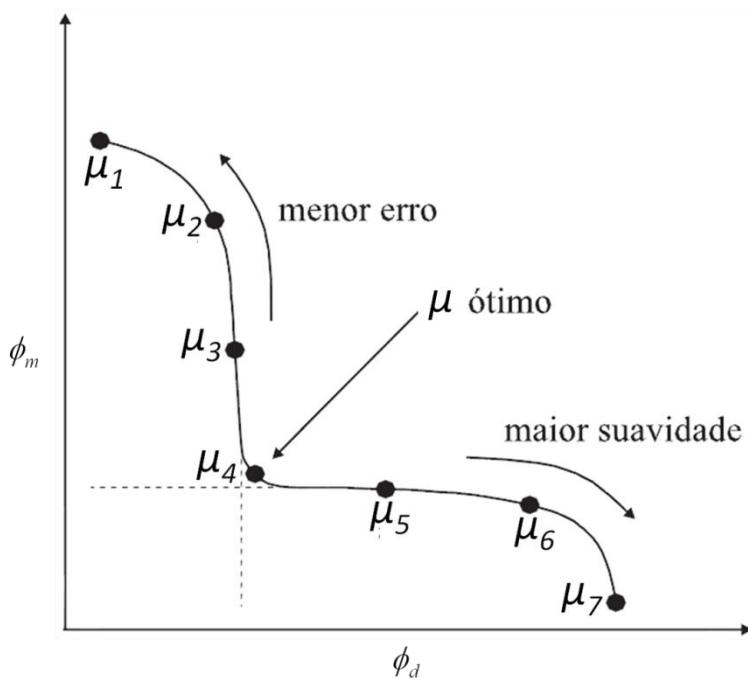


Figura 5-3. Representação pictórica da Curva-L ou curva de Tikhonov. Adaptado de Terra (2007).

Geralmente em dados reais a curva L apresenta um padrão degenerado sendo difícil a escolha visual do melhor parâmetro de regularização (Figura 5-4A). Uma solução para essa escolha é o cálculo da curvatura que pode facilitar a escolha do parâmetro de regularização. Numericamente, o canto na curva L está localizado por um

ponto de máxima curvatura. LI e OLDENBURG (1999) propuseram o cálculo da curvatura que é definida como:

$$\kappa(\mu) = \frac{\widehat{\phi}_d' \widehat{\phi}_m'' - \widehat{\phi}_m' \widehat{\phi}_d''}{\sqrt{((\widehat{\phi}_d')^2 + (\widehat{\phi}_m')^2)^3}}, \quad (5.10)$$

em que $\widehat{\phi}_d' = \ln(\phi_d)$, $\widehat{\phi}_m' = \ln(\phi_m)$, os sobrescritos ' e '' indicam, respectivamente, derivadas primeiras e segundas das funções ϕ_m e ϕ_d com relação ao parâmetro de regularização (μ). A Figura 5-4 representa pictoricamente a relação entre uma Curva-L e a curvatura (Equação 5.10).

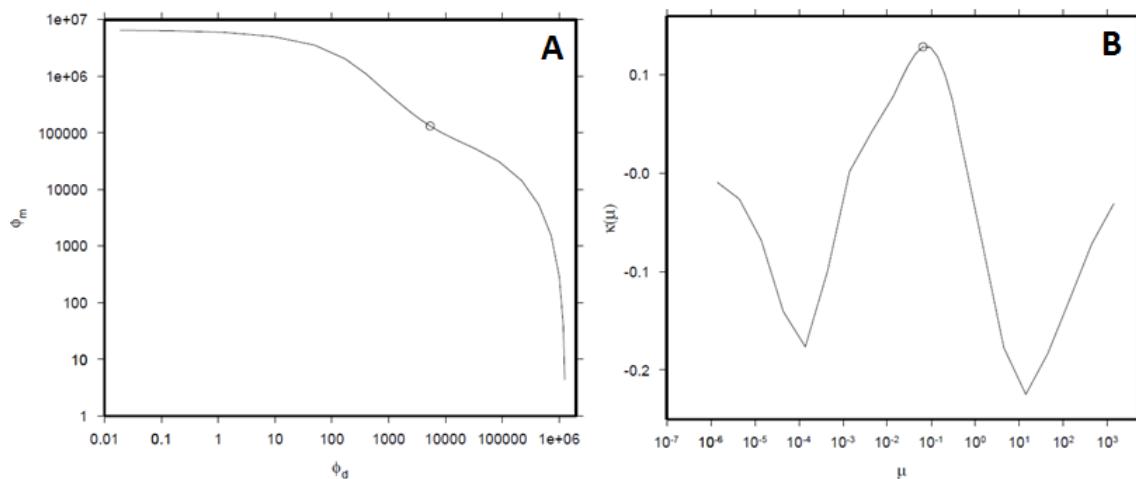


Figura 5-4. (A) Curva L e (B) Curvatura (Equação 5-10). O ponto de máxima curvatura em B está associado ao parâmetro de regularização da melhor solução do problema de inversão. Adaptado de Li e Oldenburg (1999).

B.2 Metodologia de UIEDA e BARBOSA (2012)

UIEDA e BARBOSA (2012) estimam a distribuição 3D de contrastes de densidade ($\bar{\mathbf{m}}$ na Equação 5.1) a partir dos dados do tensor do gradiente de gravidade ($\bar{\mathbf{d}}^{\text{obs}}$) através de um método iterativo de busca sistemática. Ao contrário de LI (2001), o método de UIEDA e BARBOSA (2012) não requer a tradicional solução de sistemas lineares.

O algoritmo de UIEDA e BARBOSA (2012) inicia com a escolha de alguns prismas do modelo interpretativo (Figura 5.2) que são chamados de sementes. A cada semente será atribuído um contraste de densidade. O algoritmo então começa a crescer a solução através da agregação sucessiva de novos prismas na região entorno das sementes. Quando um novo prisma é adicionado, ele recebe o valor do contraste de densidade da semente que ele está sendo agregado. A escolha de um novo prisma a ser agregado não é realizada de forma aleatória. Apenas os prismas na vizinhança da solução corrente são candidatos que são avaliados para a agregação e, assim, a busca por novos prismas é realizada sistematicamente. Em cada iteração, o prisma escolhido para ser incorporado à solução é aquele cuja adição reduz a função ajuste dos dados:

$$\phi_d(\bar{\mathbf{m}}) = \left\| \bar{\mathbf{d}}^{\text{obs}} - \bar{\mathbf{d}} \right\|_1 = \sum_{i=1}^N |d_i^{\text{obs}} - d_i|, \quad (5.11)$$

e que produza o menor valor da função objetivo:

$$\phi(\bar{\mathbf{m}}) = \phi_d(\bar{\mathbf{m}}) + \mu \phi_m(\bar{\mathbf{m}}) \quad (5.12)$$

em que μ é o parâmetro de regularização, em que $\bar{\mathbf{d}}$ é dado pela Equação 5.1 e $\phi_m(\bar{\mathbf{m}})$ é uma função de regularização que impõe a concentração de massas no entorno das sementes forçando a compacidade da solução. Esta função de regularização $\phi_m(\bar{\mathbf{m}})$ é uma adaptação da função usada em SILVA DIAS et al. (2009), sendo definida como:

$$\phi_m(\bar{\mathbf{m}}) = \frac{1}{f} \sum_{i=1}^M \frac{m_i}{m_i + \varepsilon} l_i \quad (5.13)$$

em que m_i é o i -ésimo elemento do vetor de parâmetros $\bar{\mathbf{m}}$, ε é uma constante pequena e positiva utilizada para evitar singularidades quando m_i é igual a zero, l_i é a distância entre o i -ésimo prisma e a semente do qual será acrescido e f é um fator de escala dado por:

$$f = \frac{\Delta x + \Delta y + \Delta z}{3}. \quad (5.14)$$

em que Δx , Δy , e Δz são extensões máximas do modelo interpretativo (Figura 5.2) ao longo das direções x , y , e z , respectivamente.

B.2.1 Detalhes do Algoritmo de UIEDA e BARBOSA (2012)

O procedimento inicial é a definição das sementes (alguns prismas do modelo interpretativo, Figura 5.2), pois o algoritmo requer N_s sementes previamente especificadas. É recomendado que as sementes sejam escolhidas de acordo com informações *a priori* sobre as anomalias de densidade. Cada semente é composta de um prisma do modelo interpretativo (Figura 5.2) e então a s -ésima semente é descrita por um valor de contraste de densidade m_s e um índice de posição i_s no vetor de parâmetros. O algoritmo começa com uma estimativa inicial dos parâmetros $\bar{\mathbf{m}}^0$ com todos os elementos iguais a zero. Em seguida, as sementes são inseridas na estimativa inicial fazendo $m_{i_s}^0 = m_s$. Uma iteração do algoritmo consiste da tentativa de crescer cada uma das N_s sementes pela agregação de um dos prismas vizinhos. Especificamente, a adição de um novo prisma no entorno da s -ésima semente é realizada de acordo com

os seguintes passos. Cada prisma vizinho da s -ésima semente é temporariamente adicionado na estimativa, um de cada vez, com contraste de densidade m_s da s -ésima semente. A função do ajuste (Equação 5.11) e a função objetivo (Equação 5.12) são avaliadas incorporando à solução corrente o prisma vizinho da s -ésima semente que está sendo avaliado. Apenas um dos vizinhos testados poderá ser incorporado à solução. Este prisma escolhido deverá reduzir a função ajuste dos dados (Equação 5.11) e fornecer o menor valor da função objetivo (Equação 5.12). Uma vez escolhido o prisma vizinho que satisfaz estas condições, este é adicionado permanentemente a estimativa e finaliza-se o processo de adição nesta semente. Se nenhum dos prismas vizinhos de s -ésima semente satisfaz à estes critérios mencionados, então a s -ésima semente não cresce nesta iteração. No caso em que o prisma vizinho é agregado a s -ésima semente, seus prismas vizinhos são inclusos na lista dos vizinhos da s -ésima semente e o prisma agregado é removida desta lista. Adicionalmente, os valores das funções objetivo e ajuste dos dados são atualizados.

Estes passos de adição de um prisma vizinho são repetidos para cada semente. Depois que todas as sementes tiverem tentado crescer, uma nova iteração é iniciada. Este processo termina quando nenhuma das sementes é capaz de crescer, significando que o decréscimo da função do ajuste dos dados é nulo ou desprezível.

A principal vantagem do algoritmo de UIEDA e BARBOSA (2012) é não requerer a solução de um sistema de equações. Adicionalmente, a busca sistemática deste método não requer o cálculo de toda a matriz Jacobiana $\bar{\mathbf{A}}$ (Equação 5.1), uma vez que a busca é limitada aos prismas vizinhos da solução corrente. Isto significa que cada coluna de $\bar{\mathbf{A}}$ somente necessita ser calculada quando o prisma do modelo interpretativo torna-se candidato a ser agregado à solução corrente. Outra vantagem é que não há a necessidade de calcular a derivada da função objetivo com relação aos

parâmetros. Portanto, qualquer norma dos resíduos ($\textcolor{brown}{l}_2$ ou $\textcolor{blue}{l}_1$), ponderada ou não, pode ser utilizada sem qualquer modificação no algoritmo.

6. Teste com Dados Sintéticos

Neste capítulo apresentaremos a construção de corpos sintéticos simulando as principais características da geologia da área do Quadrilátero Ferrífero, que é o local em que foram adquiridos os dados reais de aerogradiometria de gravidade desta tese. As principais características físicas simuladas para geração das componentes do tensor do gradiente de gravidade foram: (i) a geometria da formação ferrífera, (ii) a profundidade da formação ferrífera e (iii) o contraste de densidade entre a formação ferrífera e a rocha encaixante considerada para da região do Quadrilátero Ferrífero.

Para a construção dos corpos sintéticos, considerou-se uma área de aproximadamente 19 km x 15 km, semelhante à área de estudo desta tese no Quadrilátero Ferrífero. Os corpos de minério de ferro simulados neste capítulo foram baseados no mapeamento geológico de DORR (1969) realizada na área de estudo. De acordo com o mapeamento geológico apresentado por DORR (1969), o minério de ferro dentro do sinclinal Gandarela é contínuo, aflorante ou subaflorante e com direção N32°E.

A Figura 6-1 mostra a formação ferrífera simulada neste capítulo. Note que a formação ferrífera foi simulada como um corpo geológico descontínuo composto de dois prismas 3D retos, com topos localizados a 50 metros de profundidade e com espessuras de 250 metros. Estes dois prismas tem seções horizontais descritas por polígonos e simulam itabiritos com densidade de $3,11 \text{ g/cm}^3$, encaixados em uma rocha menos densa com $2,36 \text{ g/cm}^3$. Portanto, a formação ferrífera simulada tem contraste de densidade de $0,75 \text{ g/cm}^3$ em relação a rocha encaixante. Ressaltamos que a descontinuidade da formação ferrífera simula uma zona de falhamento geológico.

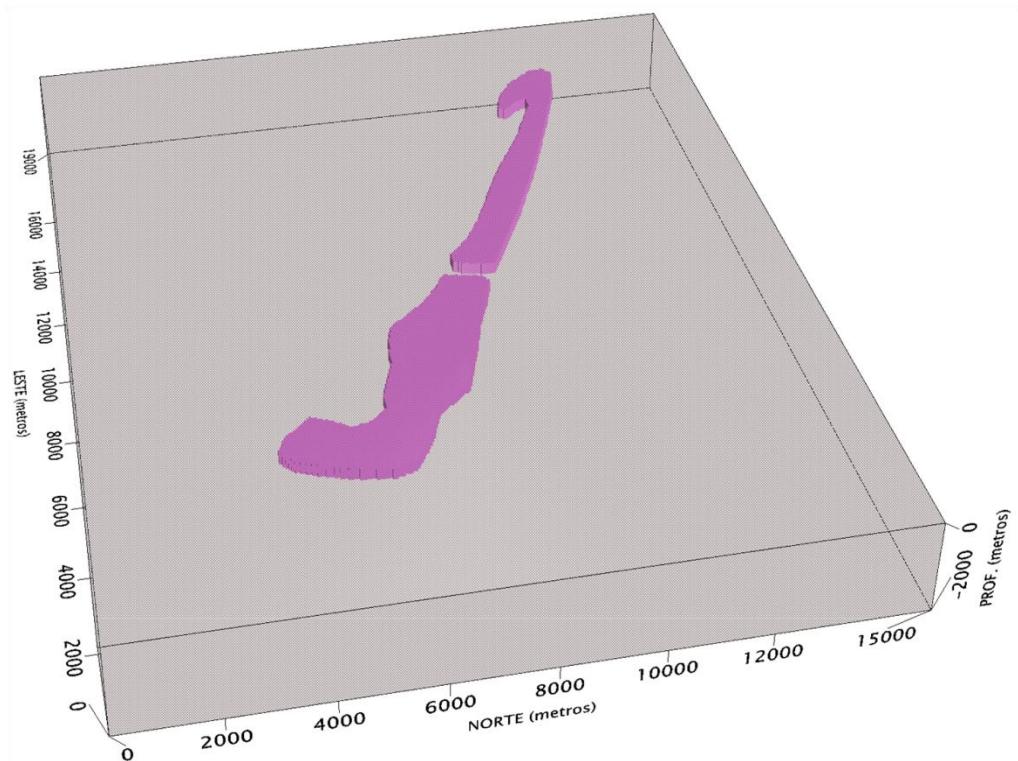


Figura 6-1. Vista em perspectiva do modelo sintético utilizado para geração dos dados sintéticos. As fontes com contraste de densidade de 0.75 g/cm^3 estão representadas pelos polígonos na cor rosa e representam a formação ferrífera ou itabirito. O polígono na cor cinza em transparência representa a rocha encaixante com contraste de densidade de 0 g/cm^3 . A espessura da formação ferrífera simulada foi de 250 metros. O topo da formação ferrífera está localizado a 50 metros de profundidade a partir da superfície que representa a topografia do terreno nesta simulação.

As componentes do tensor do gradiente de gravidade produzidas pelas fontes sintéticas (Figura 6-1) foram calculadas usando a metodologia de PLOUFF (1976) adaptada por OLIVEIRA JR e BARBOSA (2013) e implementada em www.fatiando.org.

Cada componente foi calculada a uma altura de 100 metros em uma malha regular de 100×100 pontos de observação nas direções x e y , totalizando 10.000 observações, com espaçamento de aproximadamente 150 metros ao longo da direção x e 190 metros ao longo da direção y .

A Figura 6-2 mostra cada uma das componentes do tensor do gradiente de gravidade corrompidas com ruído aditivo, pseudo-aleatório, com distribuição gaussiana, com média zero e desvio padrão de 5 Eötvös.

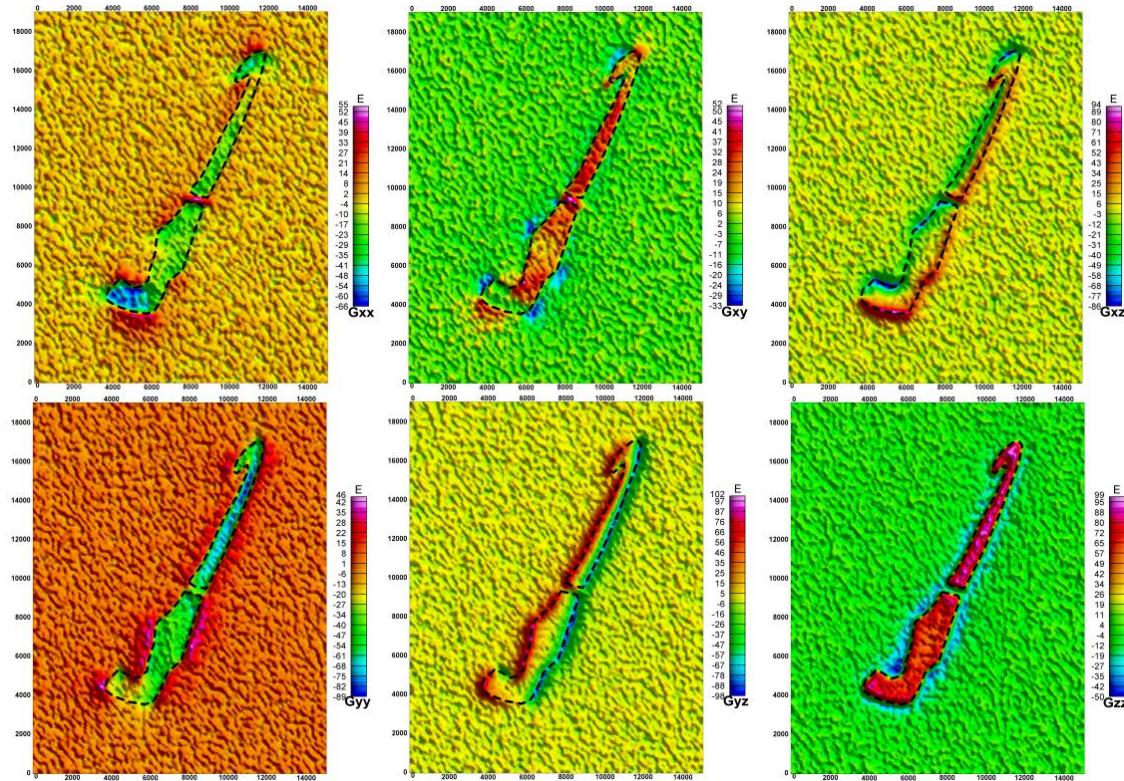


Figura 6-2. Componentes sintéticas do tensor do gradiente de gravidade contaminadas com ruído e produzidas pelos corpos sintéticos simulando a formação ferrífera mostrado na Figura 6-1. A linha preta pontilhada representa a projeção horizontal em superfície da geometria da formação ferrífera simulada.

Ressaltamos que neste capítulo não estudamos os efeitos produzidos pela topografia do terreno e pela presença de sinais interferentes produzidos por corpos geológicos que não são alvos para a prospecção de ferro. Estes efeitos foram analisados por UIEDA e BARBOSA (2012).

6.1 Interpretação de Dados de Aerogradiometria Gravimétrica

Geralmente os trabalhos de interpretação das componentes do tensor do gradiente de gravidade são ilustrados simulando modelos simples como o de um cubo (e.g., BELL et al., 1997; HUSTON e SESTAK, 1999 e BEIKI e PEDERSEN, 2010). Em geometrias mais complexas simulando hipóteses geológicas de um ambiente real estas interpretações nem sempre são tratadas. O objetivo deste tópico é aplicar cada um dos processamentos apresentados no Capítulo 4 aos dados sintéticos simulados (Figura 6-2) produzidos por corpos geológicos mais complexos (Figura 6.1) que simulam a formação ferrífera da região do sinclinal Gandarela.

De acordo com a literatura de gradiometria gravimétrica, a componente G_{zz} do tensor do gradiente de gravidade está diretamente associada à projeção horizontal da geometria do corpo geológico. A Figura 6.2 mostra que os maiores valores da componente G_{zz} delimitam perfeitamente os corpos sintéticos que estão simulando a formação ferrífera. Na Figura 6.2 observa-se que os padrões das componentes G_{xz} e G_{yz} realçam as bordas da formação ferrífera simulada (linha preta pontilhada). Note que o limite oeste da formação ferrífera é negativo em G_{xz} e positivo em G_{yz} . Em relação à borda leste o sinal é positivo em G_{xz} e negativo em G_{yz} . Note que, em todas as componentes sintéticas do tensor do gradiente de gravidade (Figura 6.2) a descontinuidade da formação ferrífera simulada na porção central da área está evidenciada.

A Figura 6-3 mostra o invariante zero (Equação 4.1), o invariante 1 (Equação 4.2) e o invariante 2 (Equação 4.3). Observamos que a soma da diagonal principal, ou traço do tensor (I_0 , Figura 6-3A) é semelhante a uma malha de resíduos com valores próximos à

zero Eötvös. O resultado da interpretação do invariante zero não tem significado geológico, mas neste teste simulado mostra que o potencial gravitacional obedece à equação de Laplace . Ao contrário, o invariante I tem interpretação geológica, note na Figura 6-3(B) que os valores negativos do invariante I mapeiam a formação ferrífera (linha tracejada preta). Em geral, o invariante 2 (I_2 , Figura 6-3C) apresenta um padrão oposto ao I_1 , dessa forma, valores positivos do invariante I_2 deveriam mapear as bordas da formação ferrífera simulada. No entanto, a Figura 6-3(C) não mostra uma continuidade dos valores positivos do invariante I_2 nas bordas da formação ferrífera simulada.

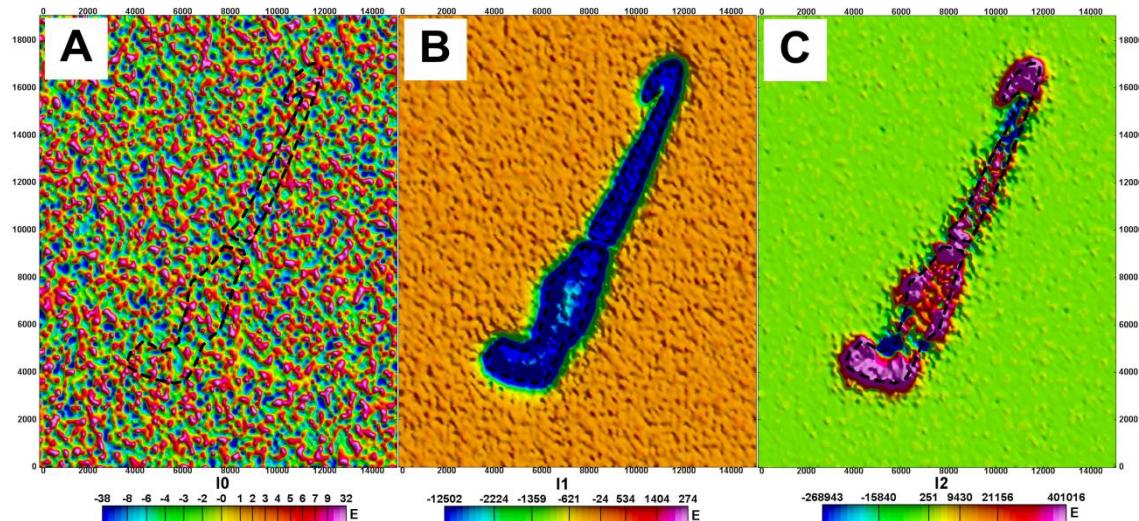


Figura 6-3. (A) Invariante 0 (Equação 4.1). (B) Invariante 1 (Equação 4.2). (C) Invariante 2 (Equação 4.3). As linhas pretas pontilhadas representam a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera.

A Figura 6-4 mostra os autovalores 1 , 2 e 3 (λ_1 , λ_2 e λ_3) que foram calculados utilizando-se as Equações 4.5a, b e c, respectivamente Nota-se que os autovalores 1 (Figura 6-4A) e 3 (Figura 6-4C) produzem padrões com algum significado geológico. Observe que o autovalor 1 (λ_1 , Figura 6-4A) define o contato da rocha encaixante com a formação ferrífera simulada (polígonos em linhas pretas tracejadas). O padrão do autovalor 1 é oposto ao autovalor 3 (λ_3 , Figura 6-4C), sendo que este último apresenta

valores negativos que delimitam os limites entre a rocha encaixante e a formação ferrífera. O autovalor 2 (λ_2 , Figura 6-4B), aparentemente, não apresenta correlação com a geometria da formação ferrífera simulada.

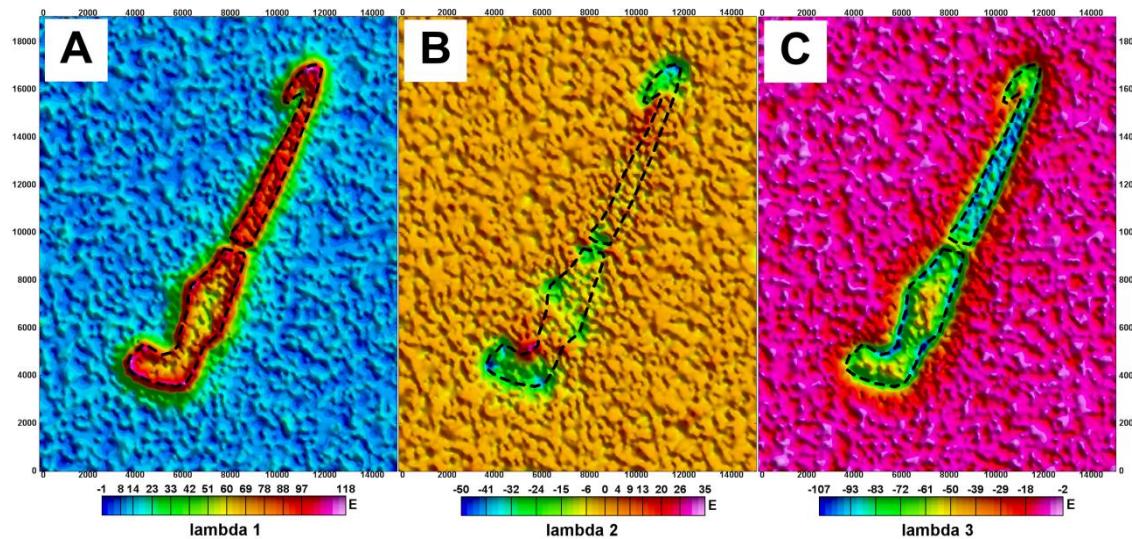


Figura 6-4.(A) Autovalor 1 (Equação 4.5a). **(B)** Autovalor 2 (Equação 4.5b) e **(C)** Autovalor 3 (Equação 4.5c). As linhas pretas pontilhadas representam a projeção horizontal em superfície da geometria em superfície da formação ferrífera.

A Figura 6-5 mostra os resultados das componentes do gradiente de gravidade baseadas no trabalho de TÓTH (2002). As nomenclaturas utilizadas na Figura 6-5 são: G_{δ} , representando o G_A (curvatura, Equação 4-8a), G_{amp} (magnitude do gradiente horizontal, Equação 4-8b) e R (magnitude da curvatura, Equação 4-9). Observa-se que as Figuras 6-5(A), (B) e (C), destacam a descontinuidade da formação ferrífera localizada na porção central da área. A magnitude do gradiente horizontal (G_{amp} , Figura 6-5B) realça claramente os limites (as bordas) em planta da formação ferrífera simulada. Por outro lado, os mapas de curvatura (G_{δ} , Figura 6-5A) e magnitude de curvatura (R , Figura 6-5C) não fornecem uma clara interpretação geológica, mas realçam a localização da formação ferrífera em planta. Observa-se que a descontinuidade da formação ferrífera é representada por uma anomalia negativa no mapa de curvatura

(G_{δ} , Figura 6-5A) e por uma anomalia forte ou expressiva no mapa da magnitude da curvatura (R , Figura 6-5C).

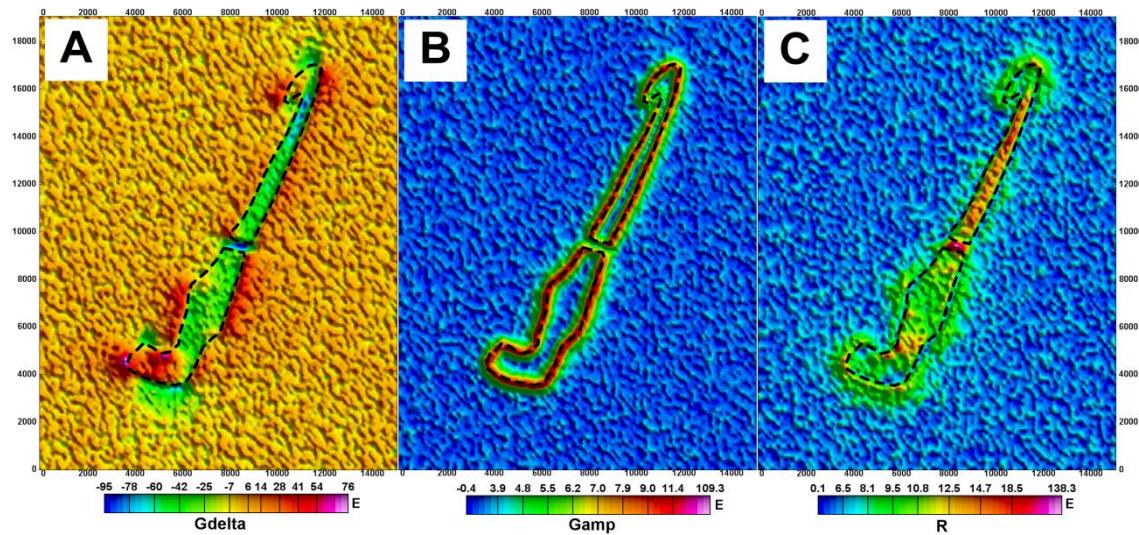


Figura 6-5. (A) Curvatura - G_{δ} (G Δ na Equação 4.8a). (B) Magnitude do gradiente horizontal - G_{amp} (Equação 4.8b) e Magnitude da curvatura – R (Equação 4.9). As linhas pretas pontilhadas representam a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera.

A Figura 6-6 apresenta o resultado das metodologias desenvolvidas por BEIKI e PEDERSEN (2010). Observa-se que a amplitude do sinal analítico direcional na direção z (A_z , Figura 6-6C), mapeia os limites entre a rocha encaixante e a formação ferrífera simulada. Note que A_z mapeia totalmente a geometria da formação ferrífera simulada, inclusive a descontinuidade na parte central da área que simula uma zona de falhamento geológico.

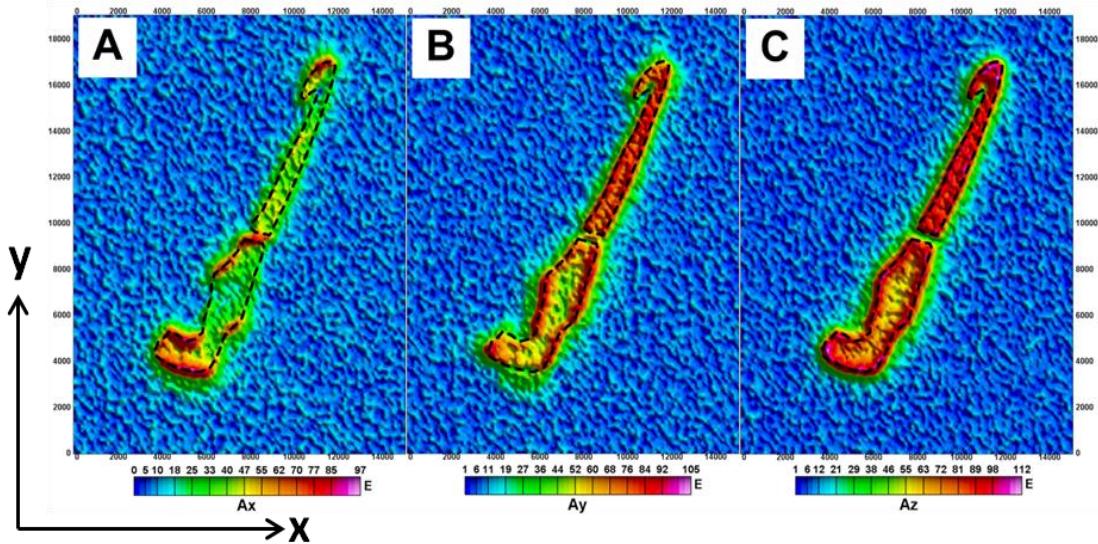


Figura 6-6. (A) Amplitude do sinal analítico direcional em x (Ax, Equação 4.10a). (B) Amplitude do sinal analítico direcional em y (Ay, Equação 4.10b) e Amplitude do sinal analítico direcional em z (Az, Equação 4.10c). As linhas pretas pontilhadas representam a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera.

O sinal analítico direcional em x (A_x , Figura 6-6A) realça feições perpendiculares ao eixo y, mostrando regiões aproximadamente horizontais e/ou quebras abruptas na geometria da formação ferrífera. O sinal analítico direcional em y (A_y , Figura 6-6B), realça feições perpendiculares ao eixo x.

6.2 Inversão

6.2.1 Método de LI (2001)

Para a inversão dos dados sintéticos do tensor do gradiente de gravidade (Figura 6-2) usando o método de LI (2001), selecionamos um volume interpretativo com dimensões de 19 km x 15 km x 2 km ao longo das direções x , y e z , respectivamente. Para minimizar efeitos de borda, os limites horizontais do volume interpretativo é maior que a área dos dados sintéticos (Figura 6-2). Desta forma, os limites horizontais deste volume interpretativo foram escolhidos de modo que a área dos dados sintéticos (Figura 6-2) ficasse centralizada. Para a utilização do método de inversão de LI (2001), o modelo interpretativo foi discretizado em células cuboidais de dimensões unitárias de 75 m x 75 m x 75 m, totalizando aproximadamente 1,3 milhões de células.

A utilização do método de LI (2001) requer a definição de algumas variáveis de controle da inversão. Estas variáveis são o parâmetro de regularização (μ), o valor de densidade inicial para o modelo de inversão (\bar{m}_0) e as densidades mínima (m_i^{\min}) e máxima (m_i^{\max}). Na inversão utilizando o método de LI (2001) utilizou-se apenas a componente G_{zz} . O critério da Curva-L ou curva de Tikhonov foi adotado para a escolha do melhor parâmetro de regularização (μ , Equação 5.2a). De acordo com HANSEN (1992), o critério da Curva-L é o balanço entre a função ajuste dos dados (ϕ_d) e a função de regularização (ϕ_m). Essa curva é representada em um gráfico *log-log* e sua principal característica é o formato em “L”, em que o valor de μ que fornece a solução que está próxima ao canto da curva L é selecionado como o melhor parâmetro de regularização que produz a melhor solução de inversão dos dados geofísicos.

Para a escolha da melhor solução de inversão foram feitas quinze inversões com os parâmetros de regularização (μ) variando de 10^{-5} a 10^{+6} . A Figura 6-7 mostra a “Curva-L” obtida na inversão da componente G_{zz} (Figura 6-2) que foi produzida pela formação ferrífera simulada neste capítulo (Figura 6.1).

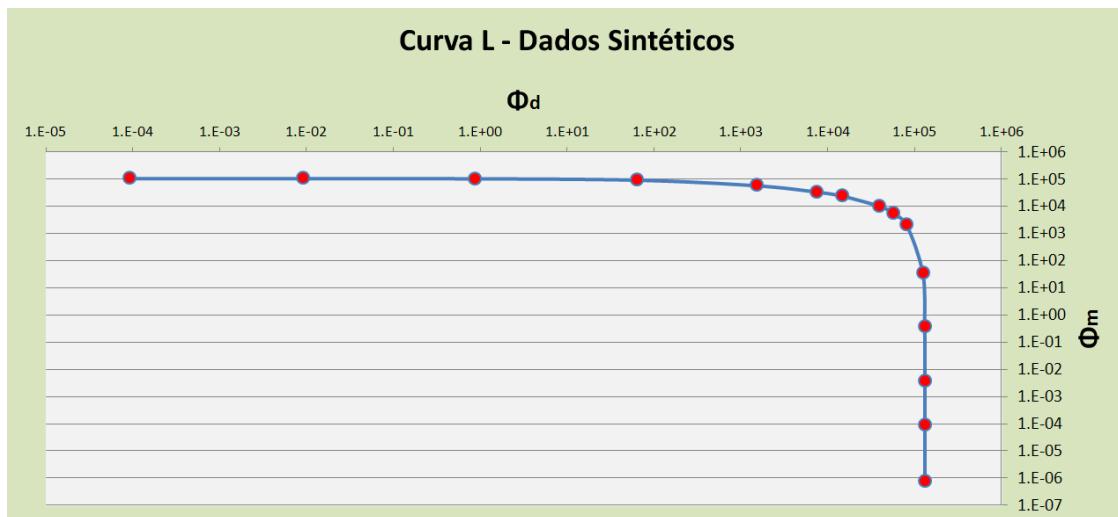


Figura 6-7. Curva-L ou curva de Tikhonov obtida a partir das inversões da componente G_{zz} (Figura 6-2) que foi produzida pela formação ferrífera sintética (Figura 6-1) utilizando diferentes parâmetros de regularização (μ).

Nota-se que a curva L não apresentou o formato esperado em L. Neste caso, uma alternativa para a escolha do parâmetro de regularização (μ) é o cálculo da curvatura (equação 5.10). O valor do parâmetro de regularização que estabeleceu o equilíbrio entre a função ajuste dos dados e a função objetivo foi o valor de $\mu=1$. A Figura 6-8 apresenta o gráfico da curvatura.

Curvatura - Dados Sintéticos

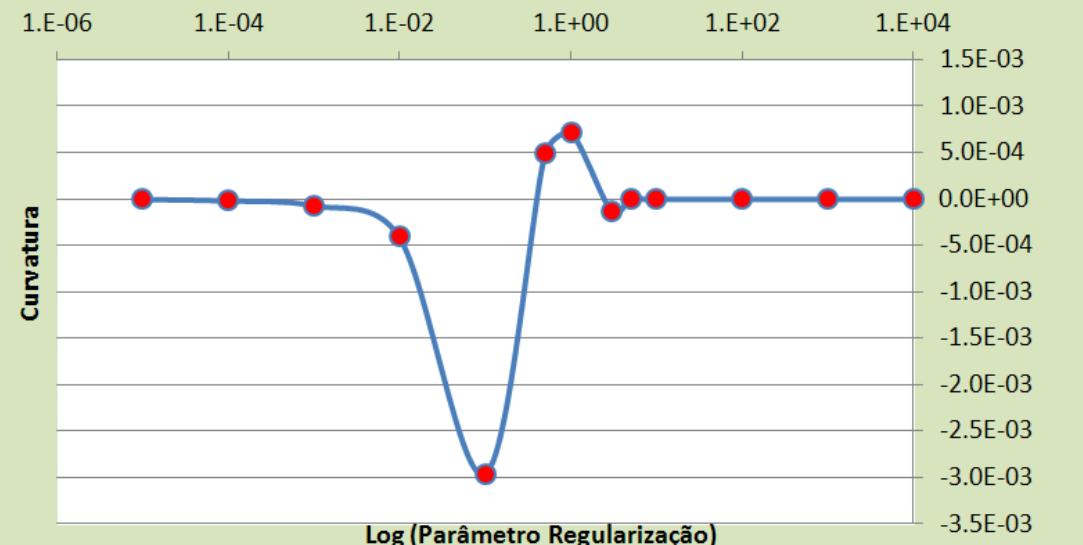


Figura 6-8. Gráfico da curvatura (equação 5.10) apresentando um máximo bem definido no parâmetro de regularização $\mu = 1$.

Com a utilização da curvatura (Figura 6-8) foi possível a escolha do melhor parâmetro de regularização que estabelece o balanço entre a função de regularização e a função ajuste dos dados. A Figura 6-9 mostra o resultado da inversão de LI (2001) usando o parâmetro de regularização $\mu=1$.

O parâmetro de entrada do vetor de parâmetros *a priori* (ou parâmetros de referência) vetor \bar{m}_0 na Equação 5.4 foi o contraste de densidade inicial de $0,50 \text{ g/cm}^3$ para todos os elementos deste vetor. Os limites inferior e superior para todos os contrastes de densidade (Equação 5.2b) a serem estimados foram $-0,1$ e $0,75 \text{ g/cm}^3$. Esses valores são os mesmos usados para os valores de contraste de densidade do modelo geológico simulado neste capítulo (Figura 6-1).

A Figura 6-9 mostra a estimativa 3D da distribuição do contraste de densidade obtida pela inversão da componente G_{zz} utilizando o método de LI (2001). Nota-se que a inversão recuperou a geometria da formação ferrífera simulada (veja Figura 6-1).

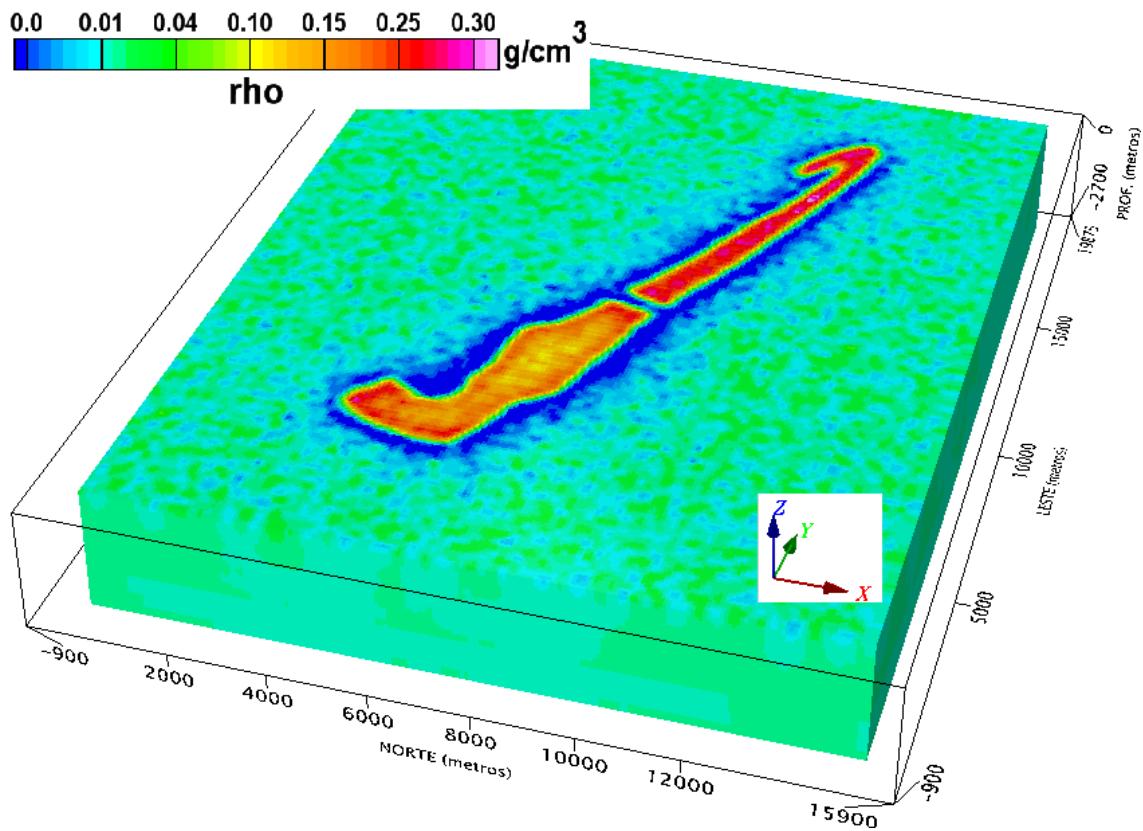


Figura 6-9. Estimativa 3D da distribuição dos contrastes de densidade obtidos pelo método de LI (2001).

A Figura 6-10 mostra três seções verticais das estimativas da distribuição dos contrastes de densidade (Figura 6-9) obtidas via LI (2001). As linhas pretas na Figura 6-10(A) representam a projeção horizontal em superfície das seções verticais (P_1-P_1' – P_3-P_3'). Nota-se que os maiores contrastes de densidade estão restritos a profundidade de aproximadamente 300 metros e a largura da resposta da formação ferrífera sintética foi recuperada pela inversão.

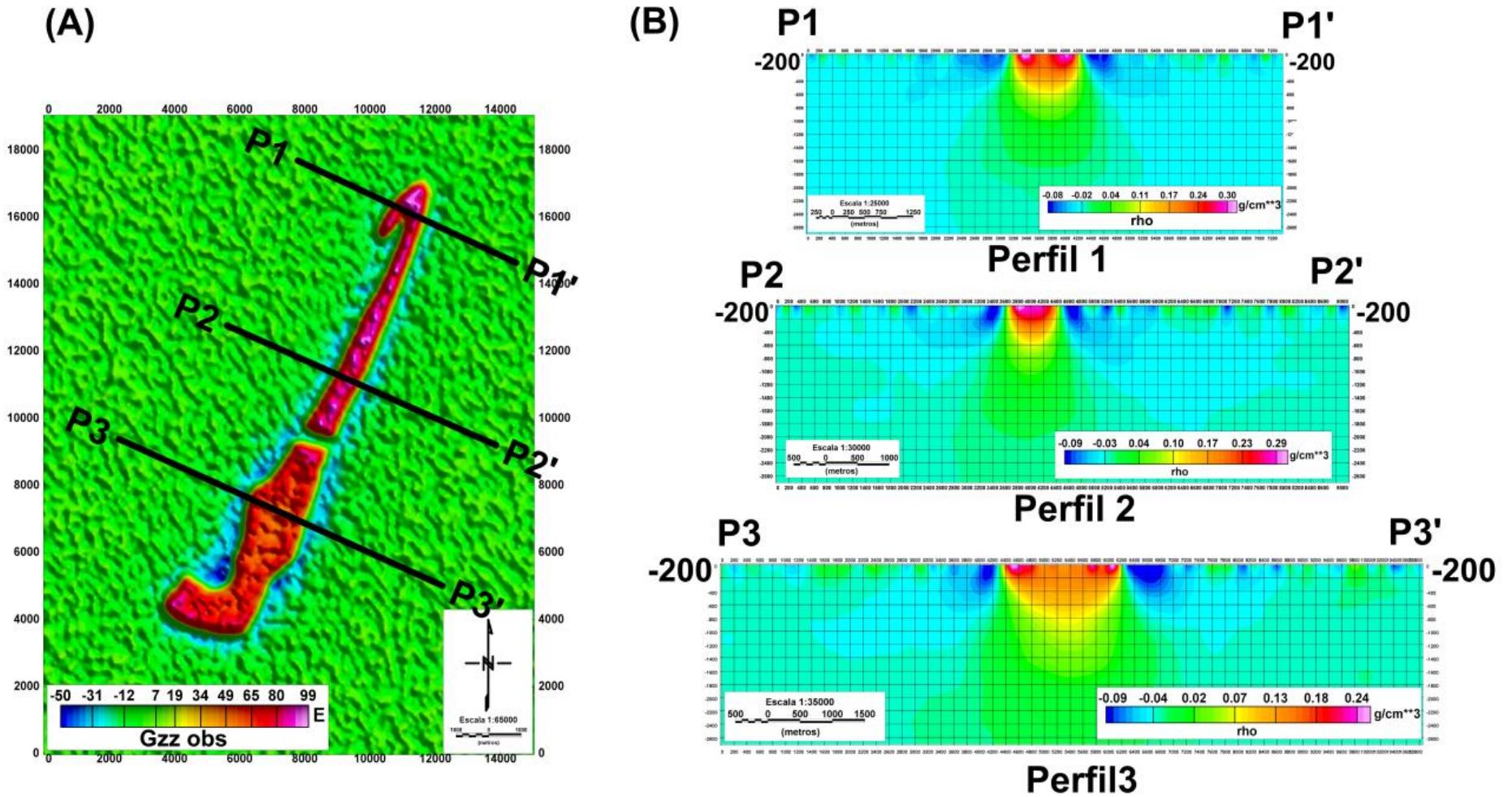


Figura 6-10. (A) Componente G_{zz} utilizada para inversão via o método de LI (2001). As linhas pretas sobrepostas à componente G_{zz} são as projeções horizontais em superfície das seções verticais utilizadas para validação da inversão. (B) Seções verticais P1-P1', P2-P2' e P3-P3' extraídas da solução estimada (Figura 6-11) via inversão de LI (2001).

As Figuras 6-11(A) e 6-11(B) mostram, respectivamente, os dados observados e preditos ou calculados da componente G_{zz} via inversão de LI (2001). Nota-se que a solução estimada via inversão de LI (2001) (Figura 6-9) produziu um ajuste aceitável, dentro da precisão imposta pelo erro experimental como mostra o mapa de resíduos (Figura 6-11C) que é a diferença entre os dados observados e ajustados.

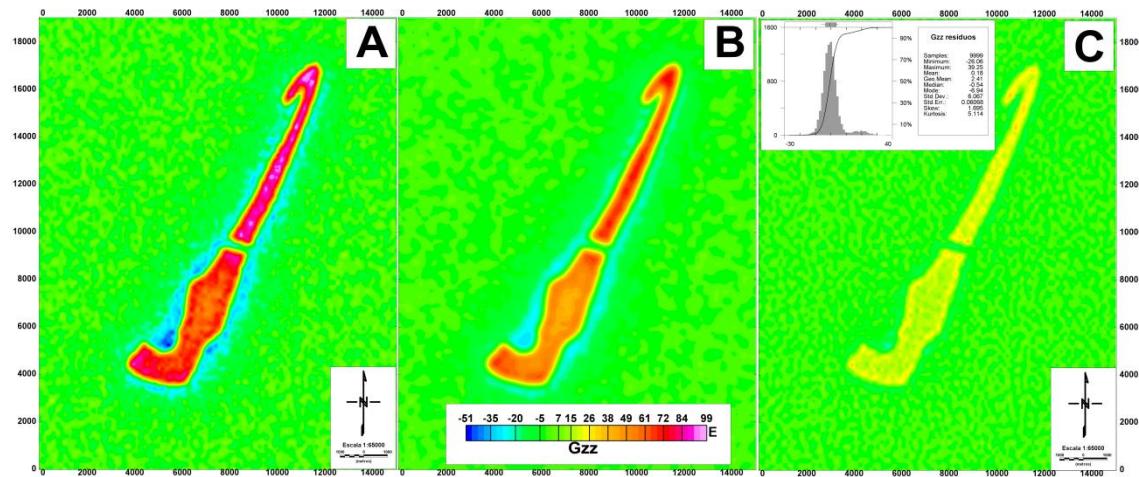


Figura 6-11. (A) Componente G_{zz} observada. (B) Componente G_{zz} predita que foi produzida pela estimativa dos contrastes de densidade mostrada na Figura 6-9. (C) Malha de resíduos da componente G_{zz} e histograma de distribuição dos resíduos, apresentando uma distribuição gaussiana com média aproximadamente zero e desvio padrão próximo à incerteza da componente G_{zz} utilizada na inversão.

Note que os resíduos (Figura 6-11C) apresentam uma distribuição gaussiana com média aproximadamente zero e desvio padrão aceitável da mesma ordem de grandeza da incerteza estabelecida para a componente G_{zz} simulada (~ 5 E).

6.2.2 Método de UIEDA e BARBOSA (2012)

A parametrização do modelo interpretativo para aplicação do método de inversão de UIEDA de BARBOSA (2012) foi a mesma usada para aplicação do método de LI (2001). Para utilização do método de UIEDA e BARBOSA (2012) são necessárias as escolhas das sementes que são os prismas do modelo interpretativo com contrastes de densidades definidos *a priori*. Foram utilizadas 34 sementes e atribuiu-se

o contraste de densidade de $0,75 \text{ g/cm}^3$ a todas as sementes. Este contraste de densidade é o mesmo usado para o modelo geológico simulado neste capítulo (Figura 6-1). A Figura 6-12 mostra a projeção horizontal da posição das sementes escolhidas. Todas as sementes estão na mesma profundidade de 175 metros.

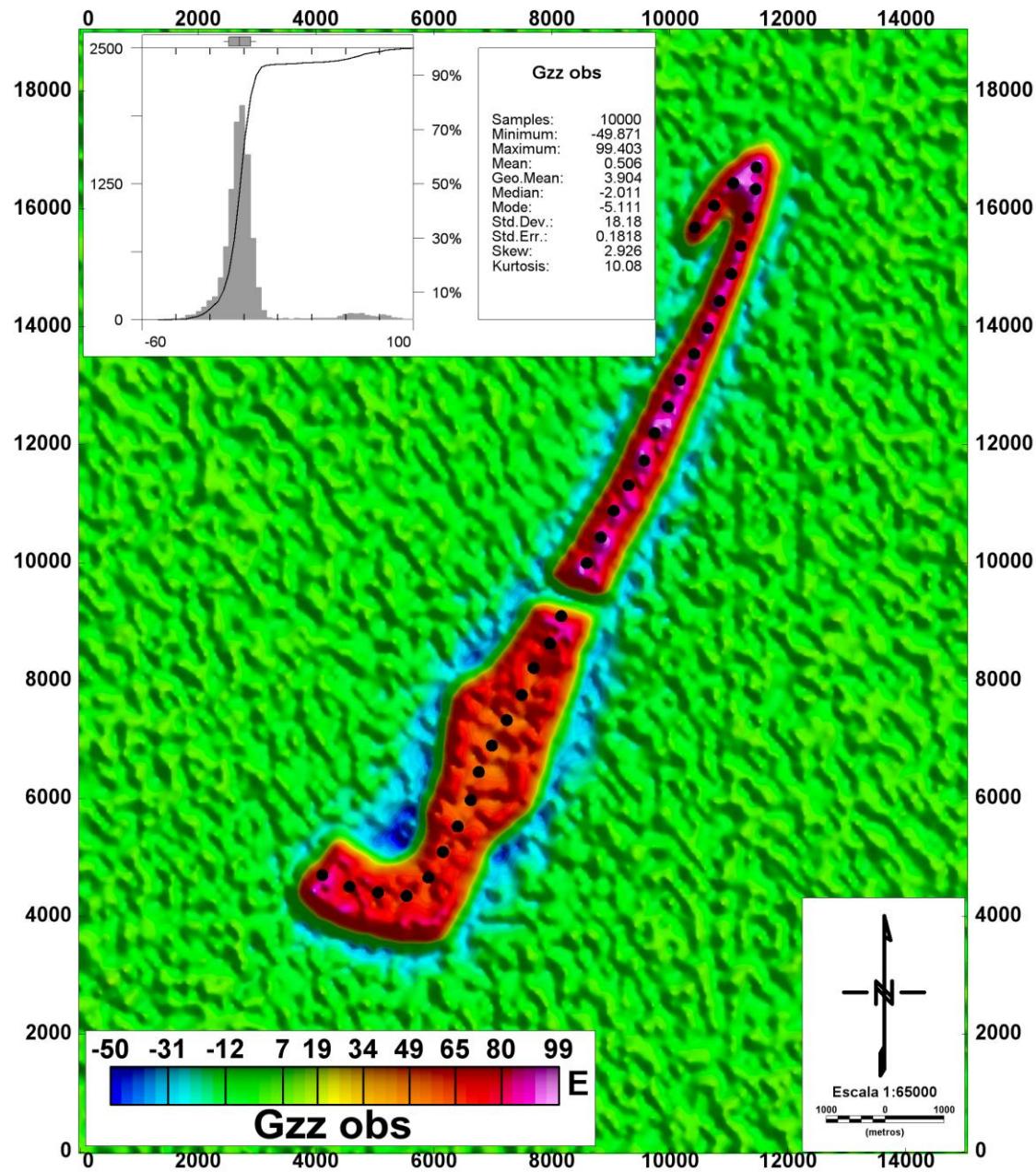


Figura 6-12. Componente Gzz observada. Os pontos pretos representam a projeção horizontal em superfície das sementes utilizadas para a inversão dos dados utilizando o método de Uieda e Barbosa (2012).

Diferentemente da aplicação da inversão de LI (2001) em que se utilizou apenas a componente G_{zz} , no método de UIEDA e BARBOSA (2012) foram utilizadas todas as componentes do tensor do gradiente de gravidade (G_{xx} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yy} , G_{yz} e G_{zz}). A Figura 6-13 apresenta a comparação entre a formação ferrífera simulada (Figura 6-13A) e a estimativa da distribuição do contraste de densidade (Figura 6-13B) obtida invertendo-se as seis componentes do tensor do gradiente de gravidade via o método de UIEDA e BARBOSA (2012).

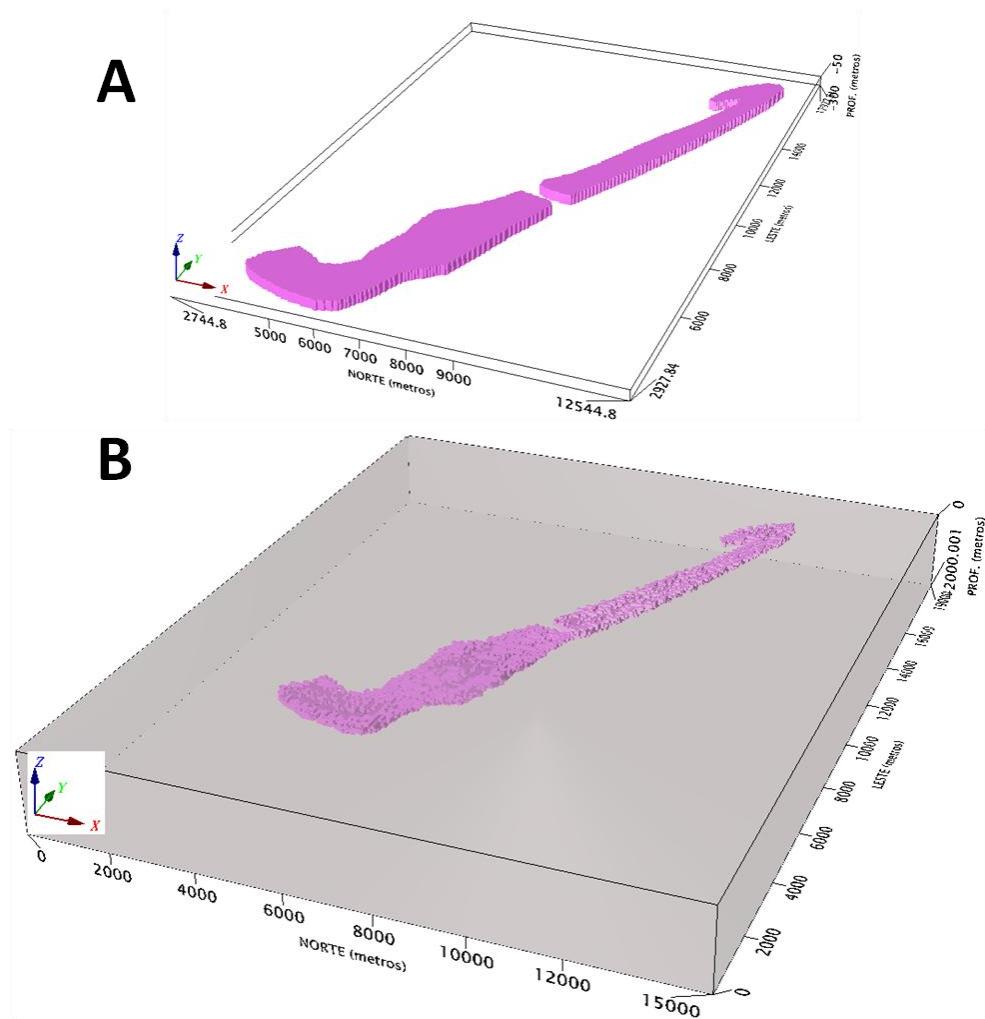


Figura 6-13. (A) Modelo sintético tridimensional simulando a formação ferrífera. (B) Estimativa da distribuição do contraste de densidade obtida via método de inversão de Uieda e Barbosa (2012). As células na cor rosa representam um contraste de densidade de $0,75 \text{ g/cm}^3$.

Observa-se que a estimativa do contraste de densidade obtida por inversão recuperou a geometria da formação ferrífera sintética (Figura 6-13B). Note que a descontinuidade entre os dois corpos geológicos sintéticos simulando uma falha localizada aproximadamente na parte central da área foi detectada. Para validação da formação ferrífera estimada via UIEDA e BARBOSA (2012) extraímos três perfis transversais representativos da área com a finalidade de analisar a espessura da formação ferrífera sintética.

A Figura 6-14(B) mostra três seções verticais (P1-P1', P2-P2' E P3-P3') extraídas do resultado da inversão de UIEDA e BARBOSA (2012) – Figura 6-13(B) - e atingiram, respectivamente, 300 m, 400 m e 500 metros de profundidade. A espessura nominal atribuída aos corpos sintéticos foi de 250 metros

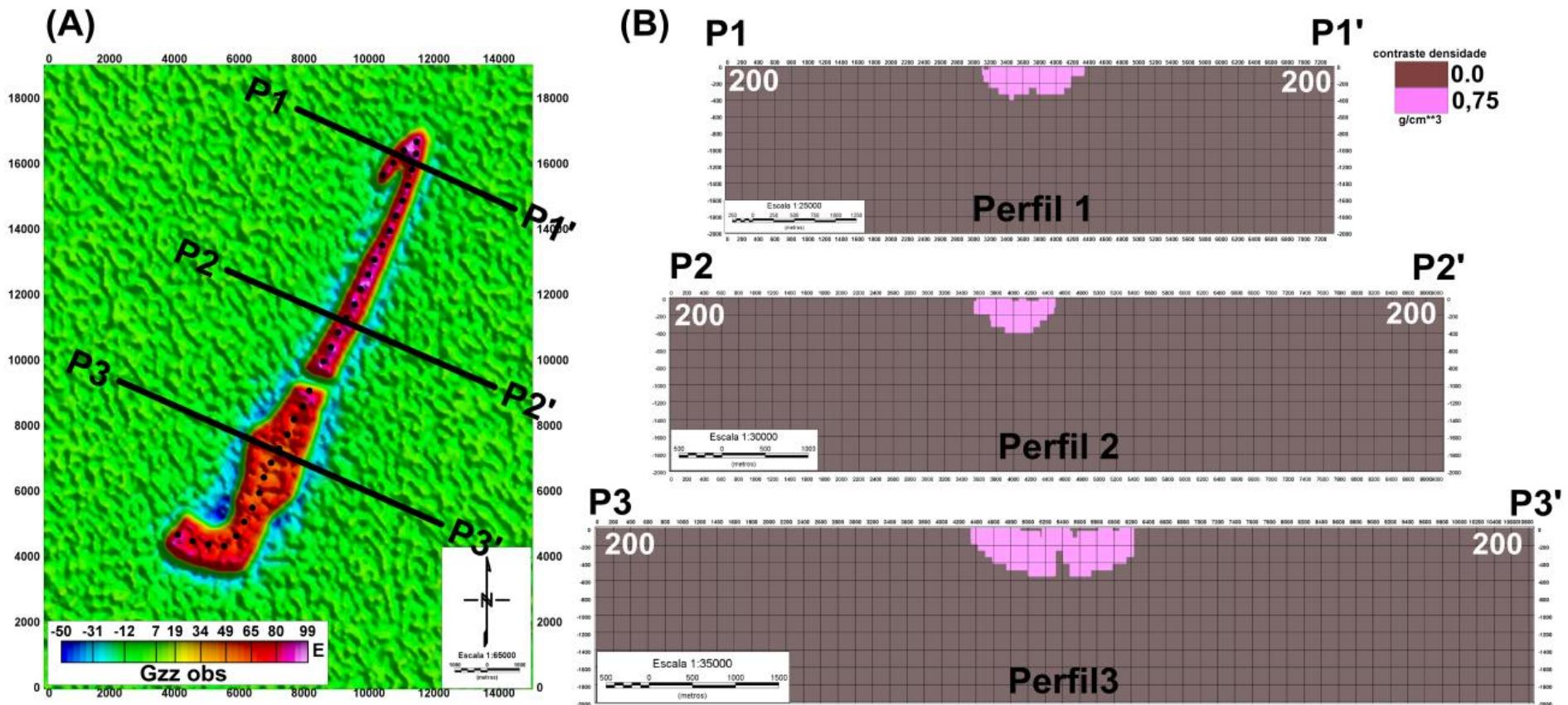


Figura 6-14. (A) Componente Gzz observada para inversão via UIEDA e BARBOSA (2012). As linhas pretas sobrepostas à componente Gzz são as projeções horizontais em superfície das seções verticais utilizadas para validação do resultado da inversão. (B) Seções verticais P1-P1', P2-P2' e P3-P3' extraídas da solução estimada (Figura 6-13B) via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012).

As Figuras 6-15(A) a 6-20(A) mostram os mapas das componentes G_{xx} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} sintéticas corrompidas com ruído produzidas pela formação ferrífera sintética (Figura 6-13A). As Figuras 6-15(B) a 6-20(B) mostram os mapas das componentes G_{xx} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} preditas pela estimativa (6-13B) obtida via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). A diferença entre as componentes observadas (6-15A-6-20A) e as componentes preditas ou calculadas (6-15B-6-20B) são mostradas como mapas residuais (Figura 6-15C – 6-20C). Os histogramas dos resíduos que estão inseridos nas Figuras 6-15(C) a 6-20(C) quantificam os ajustes dos dados das componentes G_{xx} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} produzidos pela inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). Todos os histogramas dos resíduos assemelham-se a uma distribuição em forma de sino confirmando que os erros simulados apresentam distribuição normal com média zero e desvios padrão da ordem de 5 Eötvös.

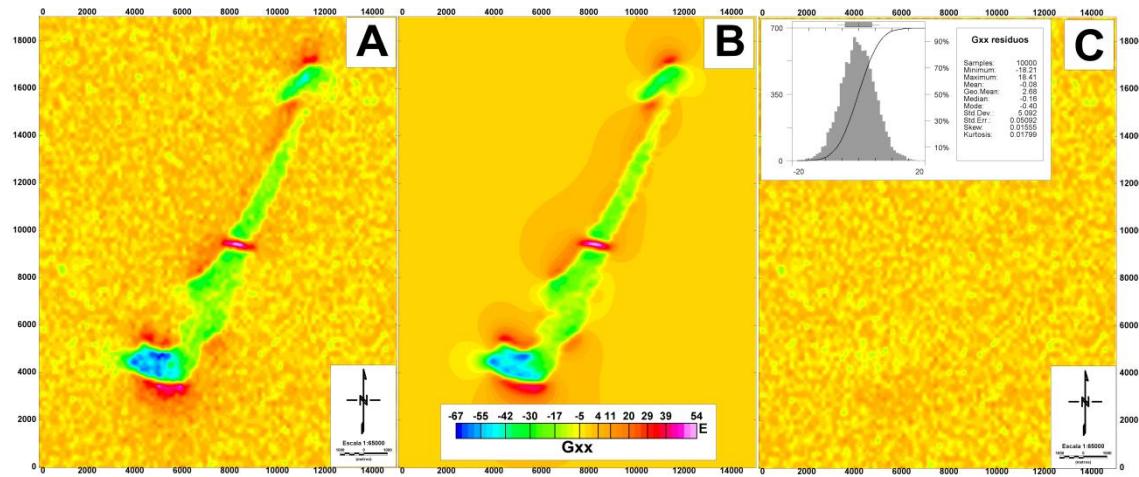


Figura 6-15. (A) Componente G_{xx} observada ou medida. (B) Componente G_{xx} calculada ou predita via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). (C) Resíduos da componente G_{xx} obtidas a partir da diferença entre as componentes medida e calculada. Em (C) mostra-se o histograma de distribuição dos resíduos da componente G_{xx} .

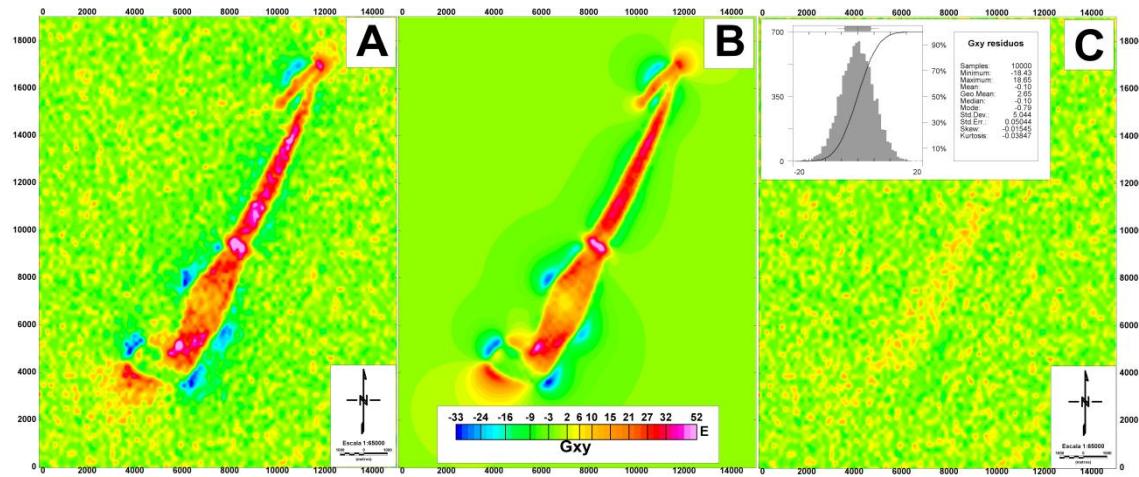


Figura 6-16. (A) Componente G_{xy} observada ou medida. (B) Componente G_{xy} calculada ou predita via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). (C) Resíduos da componente G_{xy} obtidas a partir da diferença entre as componentes medida e calculada. Em (C) mostra-se o histograma de distribuição dos resíduos da componente G_{xy} .

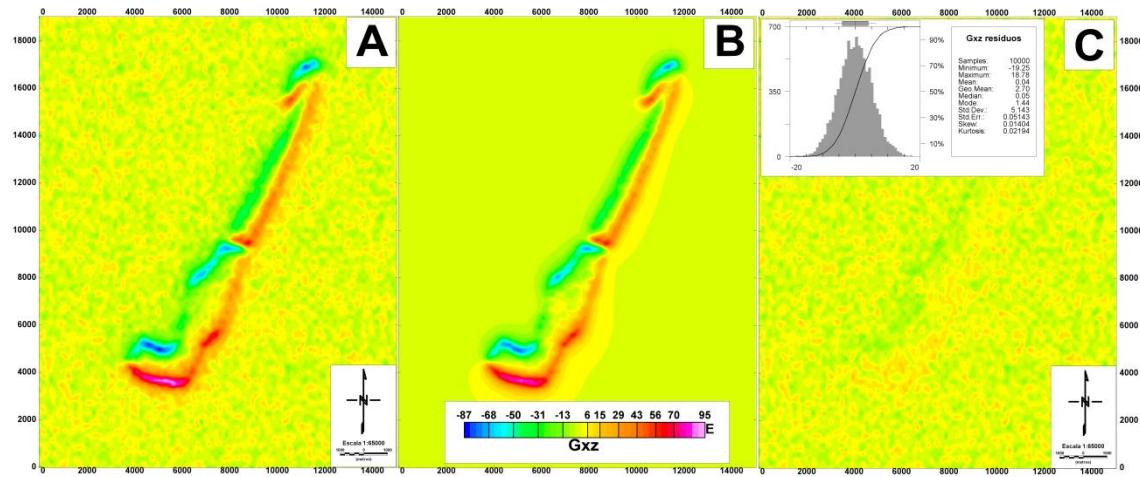


Figura 6-17. (A) Componente G_{xz} observada ou medida. (B) Componente G_{xz} calculada ou previda via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). (C) Resíduos da componente G_{xz} obtidas a partir da diferença entre as componentes medida e calculada. Em (C) mostra-se o histograma de distribuição dos resíduos da componente G_{xz} .

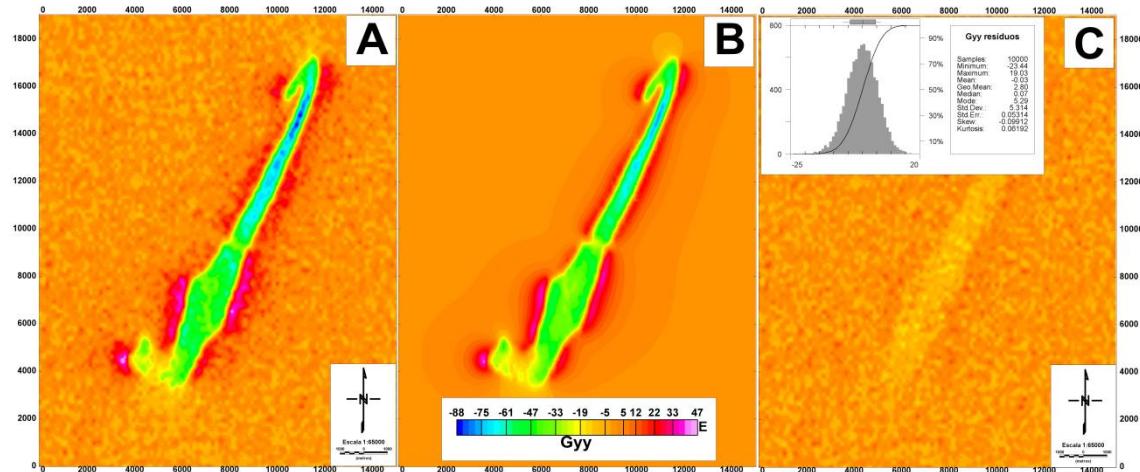


Figura 6-18. (A) Componente G_{yy} observada ou medida. (B) Componente G_{yy} calculada ou previda via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). (C) Resíduos da componente G_{yy} obtidas a partir da diferença entre as componentes medida e calculada. Em (C) mostra-se o histograma de distribuição dos resíduos da componente G_{yy} .

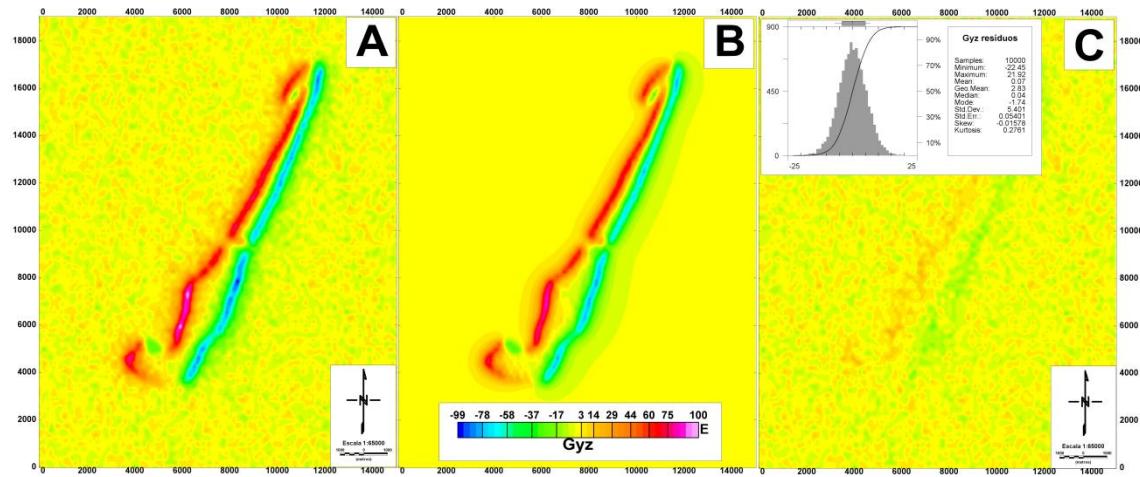


Figura 6-19. (A) Componente G_{yz} observada ou medida. (B) Componente G_{yz} calculada ou predita via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). (C) Resíduos da componente G_{yz} obtidas a partir da diferença entre as componentes medida e calculada. Em (C) mostra-se o histograma de distribuição dos resíduos da componente G_{yz} .

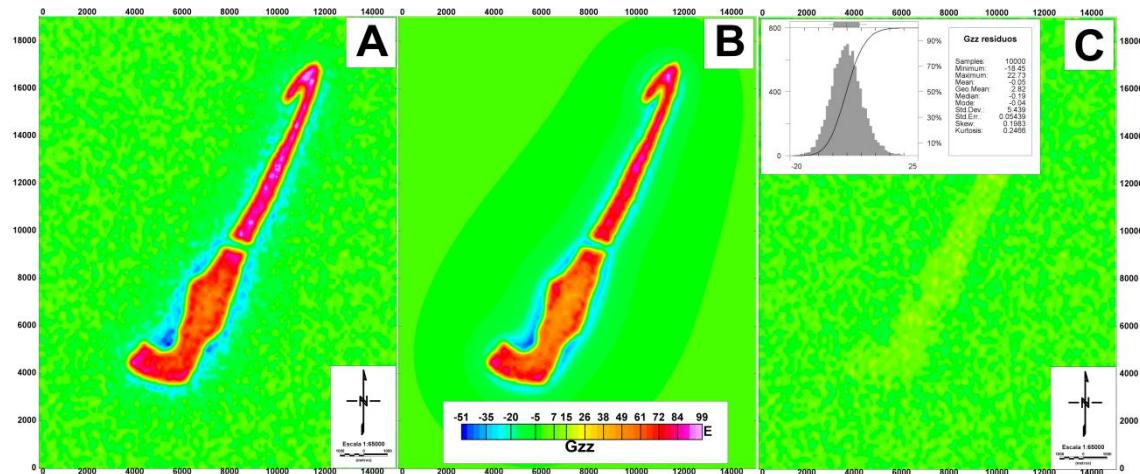


Figura 6-20. (A) Componente G_{zz} observada ou medida. (B) Componente G_{zz} calculada ou predita via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). (C) Resíduos da componente G_{zz} obtidas a partir da diferença entre as componentes medida e calculada. Em (C) mostra-se o histograma de distribuição dos resíduos da componente G_{zz} .

7. Geologia da área de estudo

7. 1 Geologia Regional

O Quadrilátero Ferrífero constitui uma importante província geológica e metalogenética localizada na borda sul do Cráton São Francisco, região sudeste do Brasil (Figura 7-1). Suas rochas datam do Arqueano ao Paleoproterozóico e foram agrupadas nas seguintes unidades litoestratigráficas: (1) embasamento cristalino Arqueano, (2) o Supergrupo Rio das Velhas, (3) o Supergrupo Minas, (4) intrusivas Pós-Minas e (5) o Grupo Itacolomi (ALKMIM e MARSHAK, 1998).

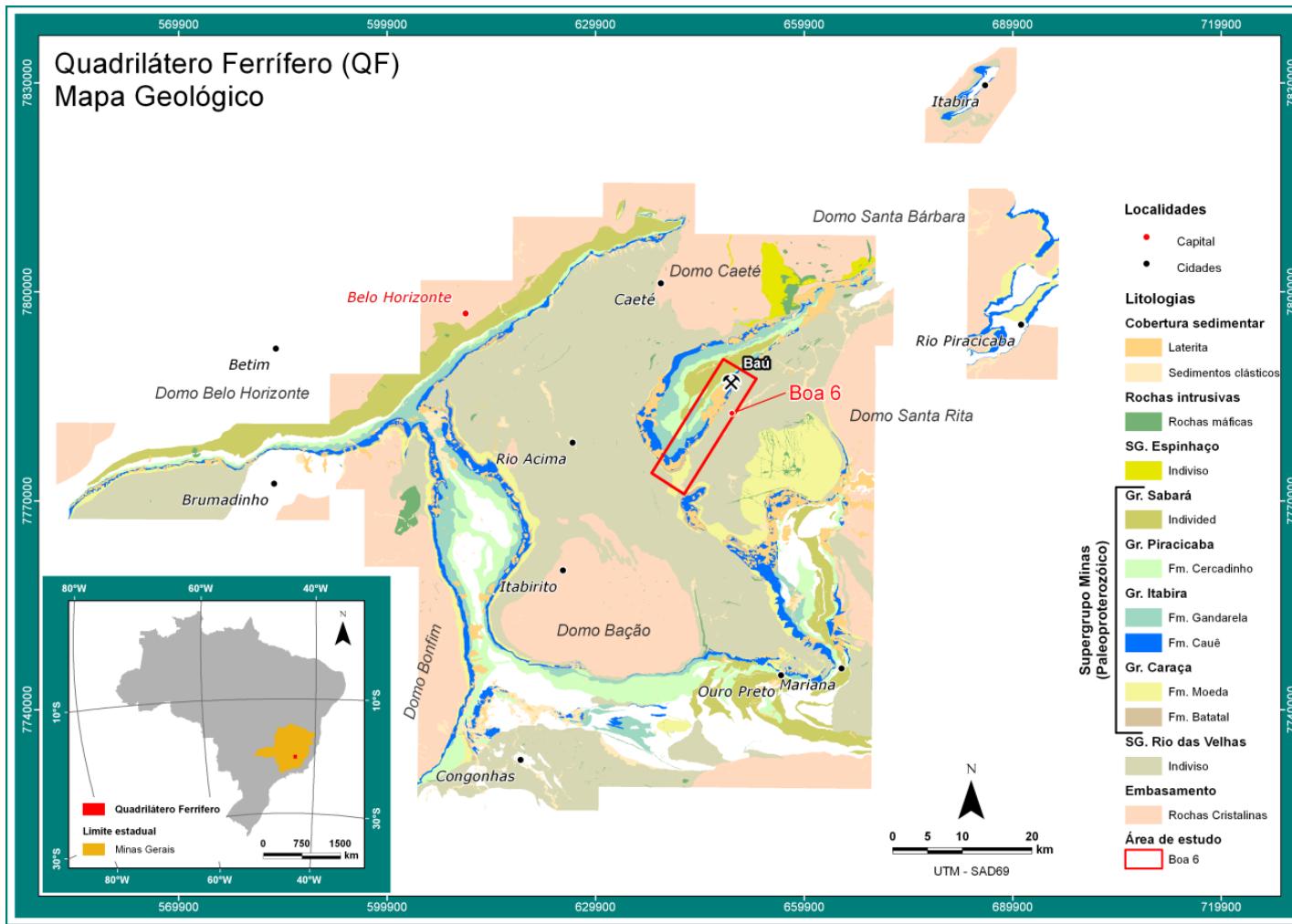


Figura 7-1. Mapa geológico regional do Quadrilátero Ferrífero localizado em Minas Gerais. Modificado de LOBATO et al. (2005). A área de estudo chamada de Boa 6 está representada pelo polígono na cor vermelha. Em detalhe, o mapa do Brasil, destacando o estado de Minas Gerais e o polígono vermelho que representa o Quadrilátero Ferrífero.

A coluna estratigráfica generalizada para o Quadrilátero Ferrífero (Figura 7-2) inicia com o Embasamento Cristalino, onde estão incluídos os Complexos Gnáissicos/Migmatíticos e duas gerações de plút ons do final do Arqueano: calc- alcalinos e granitos anorogênicos (ALKMIN e MARSHAK, 1998).

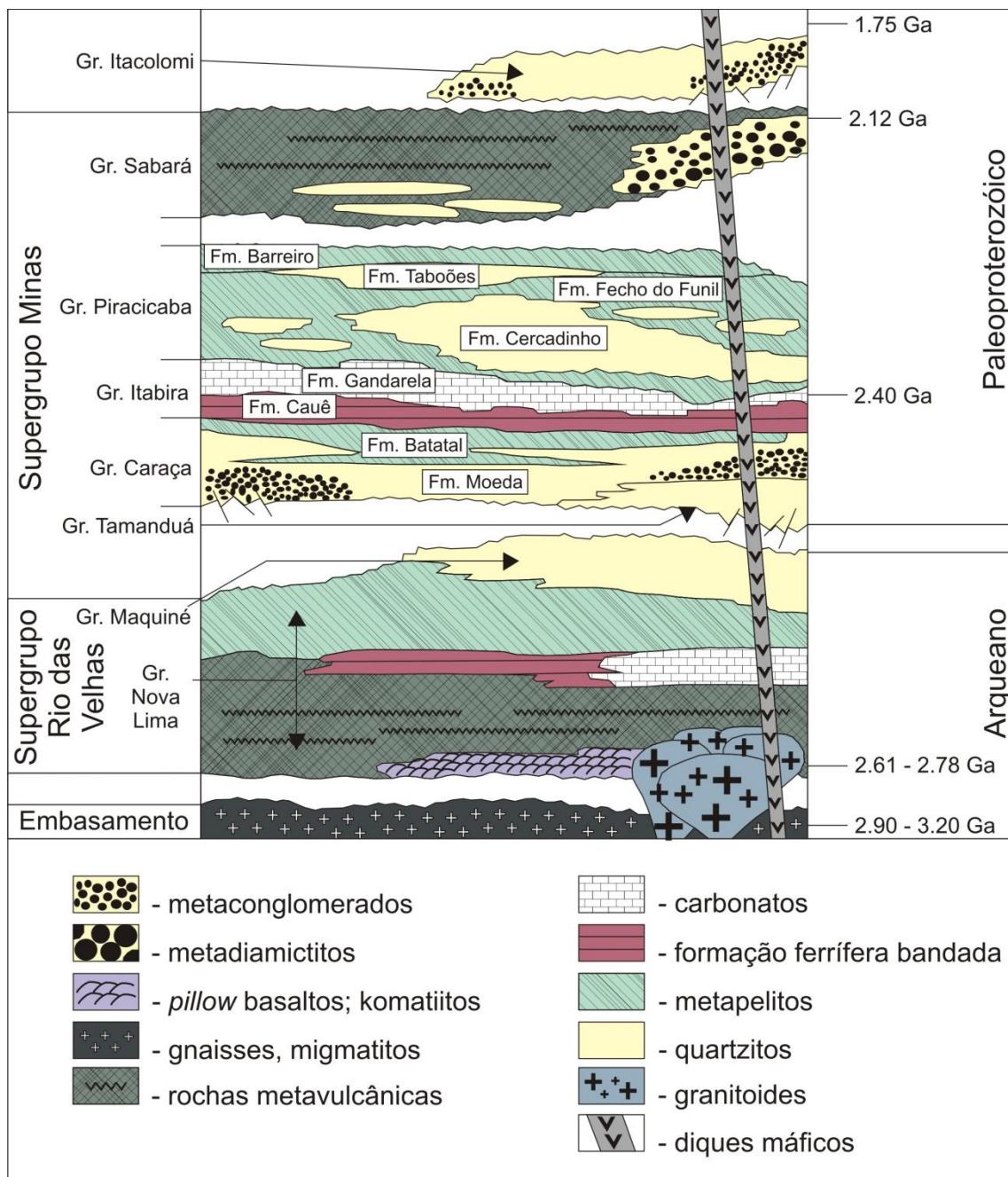


Figura 7-2. Coluna estratigráfica generalizada do Quadrilátero Ferrífero. Modificado de ALKMIM e MARSHAK (1998).

Sobre esse embasamento encontram-se os litotipos do Supergrupo Rio das Velhas, compreendendo uma sucessão do tipo *greenstone*, com basalto, komatiito e lava riolítica, que ocorrem intercalados a metassedimentos, incluindo formação ferrífera bandada (BIF) do tipo Algoma, além de carbonatos e siliciclastos (ALKMIM e MARSHAK, 1998).

Os metassedimentos do Supergrupo Minas têm sua base constituída por uma seqüência granodecrescente, originalmente formada por conglomerado aluvionar e arenito, que gradam para pelitos marinhos de águas rasas (grupos Tamanduá e Caraça). As formações Cauê e Gandarela (Grupo Itabira) registram a fase plataforma da Bacia Minas e são constituídas, respectivamente, por BIF do tipo Lago Superior e uma seqüência carbonática metamorfizada. O Grupo Piracicaba é constituído principalmente por metarenitos e filitos e marca uma nova mudança na bacia, dando lugar à sedimentação terrígena em águas rasas. O Grupo Sabará compreende uma seqüência espessa de turbiditos, tufos, rochas vulcanoclásticas, conglomerados e diamictitos de idade significativamente mais jovem que as das demais unidades do Supergrupo Minas.

As intrusivas Pós-Minas são representadas por diques máficos de direção nordeste e finos veios pegmatíticos que cortam as rochas do Supergrupo Minas (ALKMIM e MARSHAK, 1998).

O Grupo Itacolomi, que encerra o empilhamento estratigráfico no Quadrilátero Ferrífero, é constituído por uma sequência de metassedimentos originalmente constituídos por arenitos aluvias, conglomerados e pelitos menores (DORR, 1969) depositados em grábens intramontanos (ALKMIM e MARTINS-NETO, 2012).

7.2 Geologia Local

A área de estudo, denominada de Boa 6 (Figura 7-3), está localizada na aba sul do sinclinal Gandarela (DORR, 1969). Essa megaestrutura tem direção nordeste-sudoeste e teria sua origem relacionada a uma sucessão de eventos regionais, iniciados com um evento extencional (CHEMALE JR. et al., 1994) e seguido por dois eventos compressionais. O primeiro, atribuído à orogenia Transamazônica, teria sido responsável pela nucleação da megaestrutura e o segundo, relacionado à orogenia Brasiliana, seria o responsável pelo particionamento dessa estrutura, redobramento da sua porção nordeste e inversão do flanco sul (ALKMIM e MARSHAK, 1998).

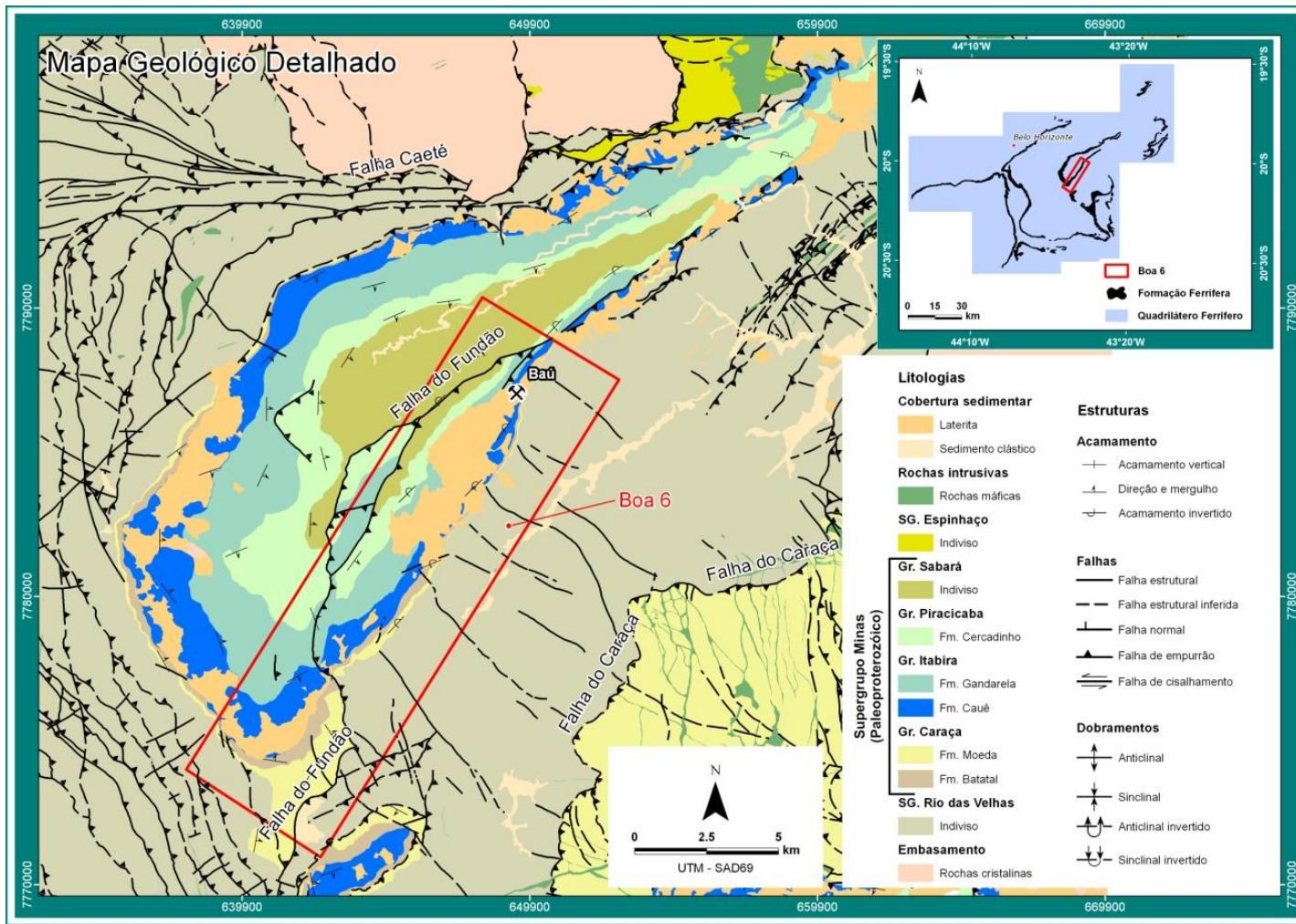


Figura 7-3. Mapa geológico detalhado e estrutural da área do sinclinal Gandarela. As áreas em azul representam a Formação Cauê (formação ferrífera bandada). Modificado de LOBATO et al. (2005). A área de estudo, Boa 6, está representada pelo retângulo em vermelho.

Segundo CHEMALE JR. et al. (1994), o sinclinal Gandarela está compartimentado em três domínios estruturais distintos: (1) área nordeste, (2) área central e (3) área sul.

Na área nordeste o sinclinal tem eixo orientado segundo a direção N60°E e é delimitado pelo sistema de falhas Fundão e Cambotas. A área central compreende a porção menos deformada do sinclinal e tem seu eixo orientado segundo a direção N40°E. A área sul tem eixo com direção aproximadamente norte-sul, sendo interpretado como um apêndice deste sinclinal, denominado homoclinal Palmital (CHEMALE JR. et al., 1994).

O sinclinal Gandarela é preenchido pelas unidades litológicas do Supergrupo Minas e suas bordas são definidas pelo contato entre as rochas da base desse supergrupo com as do Supergrupo Rio das Velhas, principalmente representadas por grauvacas, filitos e estreitos corpos de BIF do Grupo Nova Lima, na porção sul, e pelos litotipos do Complexo Metamórfico Caeté, em sua porção norte.

O empilhamento estratigráfico das unidades litológicas do Supergrupo Minas no sinclinal Gandarela é análogo ao observado regionalmente no Quadrilátero Ferrífero.

Os litotipos do Grupo Caraça delimitam a base desse sinclinal e são divididos nas formações Moeda e Batatal. A Formação Moeda (Tabela 7-1) é essencialmente composta por conglomerados e quartzitos e pode atingir até 350m de espessura na parte sul do sinclinal Gandarela (VILLAÇA e MOURA, 1981). A Formação Batatal, por sua vez, é principalmente constituída por filito.

Supergrupo	Grupo	Formação
Minas	Sabará	
	Piracicaba	Cercadinho
	Itabira	Gandarela
		Cauê
	Caraça	Batatal
		Moeda

Tabela 7-1. Coluna estratigráfica do sinclinal Gandarela. Modificado de LOBATO et al. (2005).

O Grupo Itabira representa uma fase de deposição preferencialmente química da Bacia Minas e é dividido nas formações Cauê e Gandarela. A Formação Cauê é o principal alvo para exploração de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero e compreende seqüência de 250 a 300 m de BIF (com itabiritos e lentes de hematititos) que pode ocorrer com intercalações de filitos hematíticos, filitos dolomíticos e mármores. Sobreposto concordantemente à Formação Cauê encontra-se a Formação Gandarela, composta por rochas carbonáticas (mármores calcíticos e dolomíticos) com filitos e BIF subordinados (ROSIÈRE e RIOS, 2004).

O Grupo Piracicaba no sinclinal Gandarela é principalmente representado pela Formação Cercadinho, constituída por uma seqüência rítmica de filito, quartzito e quartzito ferruginoso.

O Grupo Sabará, por sua vez, é composto por uma seqüência metavulcanossedimentar, composta de mica-xisto e clorita-xisto, com intercalações de metagrauvaca, quartzito, formação ferrífera e metaconglomerados (LOBATO et al., 2005).

O Quadrilátero Ferrífero é caracterizado pela complexidade de sua geologia e tectônica. Nesse contexto, os estudos geofísicos tornam-se ferramentas importantes para o entendimento de estruturas profundas e complexas. A área em estudo teve o primeiro estudo geofísico realizado na década de 70. Esse estudo determinou as temperaturas de Curie das áreas continentais e concluiu que a estimativa da profundidade da base da camada crustal magnetizada pode corresponder a mudanças compostionais da crosta (GASPARINI et al., 1979). PADILHA (1982) desenvolveu inversões bidimensionais da anomalia magnética da região do sinclinal Gandarela para estimar a dimensão das fontes magnéticas. Dados de geofísica para estudo das potencialidades auríferas foram utilizados por TAVARES (1998) para identificar o potencial mineiro dos terrenos Arqueanos do ***greenstone belt*** na região de Caeté. SILVA (1999) e ROLIM (2001) estudaram as respostas geofísicas dos depósitos de ouro no ***greenstone belt*** Rio das Velhas.

Mais recentemente, estudos geofísicos foram conduzidos para delinear os depósitos de ferro do Quadrilátero Ferrífero (CARLOS et al. 2011). UIEDA e BARBOSA (2012) desenvolveram uma nova metodologia para inversão de dados de gradiometria gravimétrica para estimativa da distribuição do contraste de densidade tridimensional e aplicaram essa metodologia a um aerolevantamento de gradiometria gravimétrica do Quadrilátero Ferrífero para estimar a geometria tridimensional e a profundidade da mineralização de ferro. MARTINEZ et al. (2013) apresentaram um estudo de caso da aplicação dos dados de gradiometria gravimétrica ao Quadrilátero Ferrífero para estimar uma imagem tridimensional da formação de minério de ferro e para examinar a utilidade de varias combinações das componentes do gradiente de gravidade no delineamento dessa formação.

8. Dados Geofísicos e suas Relações com a Geologia da área de estudo

Em 2005 um aerolevantamento de dados de gradiometria gravimétrica foi adquirido sobre a aba sul do sinclinal Gandarela, na região do Quadrilátero Ferrífero no estado de Minas Gerais. A área de estudo tem 95 km² com dimensões de aproximadamente 19 km por 5 km. Um total de cinquenta linhas de vôo foram adquiridas com orientação nordeste-sudoeste e separação entre as linhas de vôo de aproximadamente 100 metros. O aerolevantamento de gradiometria gravimétrica foi voado em alturas variando de 57 a 582 metros sobre a superfície do terreno.

Os dados brutos de aerogradiometria gravimétrica foram pré-processados. O pré-processamento consiste, simplificadamente, dos seguintes passos: (1) compensações devido ao aerolevantamento, (2) correção de terreno, e (3) nivelamento das linhas de vôo. As compensações devidas ao aerolevantamento incluem correções dos gradientes da aeronave e dos próprios instrumentos.

Os dados foram corrigidos do gradiente de gravidade produzido pela superfície topográfica irregular sobre a área de estudo. Para o modelo dessa topografia o espaço entre a superfície do terreno e o elipsóide foi aproximado por um conjunto de prismas tridimensionais, verticais, retangulares e justapostos cujos topos coincidem com a superfície topográfica e a base coincide com o elipsóide que representa a superfície teórica da Terra. A densidade para cada prisma é presumida constante e igual a 2,36 g/cm³. O gradiente de gravidade produzido pelo conjunto dos prismas tridimensionais com densidade 2,36 g/cm³ representa o gradiente de gravidade do terreno. Conseqüentemente, na correção de terreno é subtraída de cada componente do gradiente de gravidade a correspondente componente calculada do gradiente de gravidade do

terreno. Nesta correção de terreno foi utilizado o valor de densidade de $2,36 \text{ g/cm}^3$ que foi obtido a partir da metodologia de PARASNIS (1966) modificada para a componente G_{zz} do tensor do gradiente de gravidade. O valor de densidade de $2,36 \text{ g/cm}^3$ minimizou a covariância entre os dados observados de gradiometria gravimétrica da componente G_{zz} e a topografia da área.

A Figura 8-1 (A-F) apresenta as componentes do tensor do gradiente de gravidade observadas. Nota-se que a componente G_{zz} observada ($G_{zz} \text{ obs}$, na Figura 8-1F), apresenta correspondência direta com a fisiografia do modelo digital de terreno (Figura 8-1G).

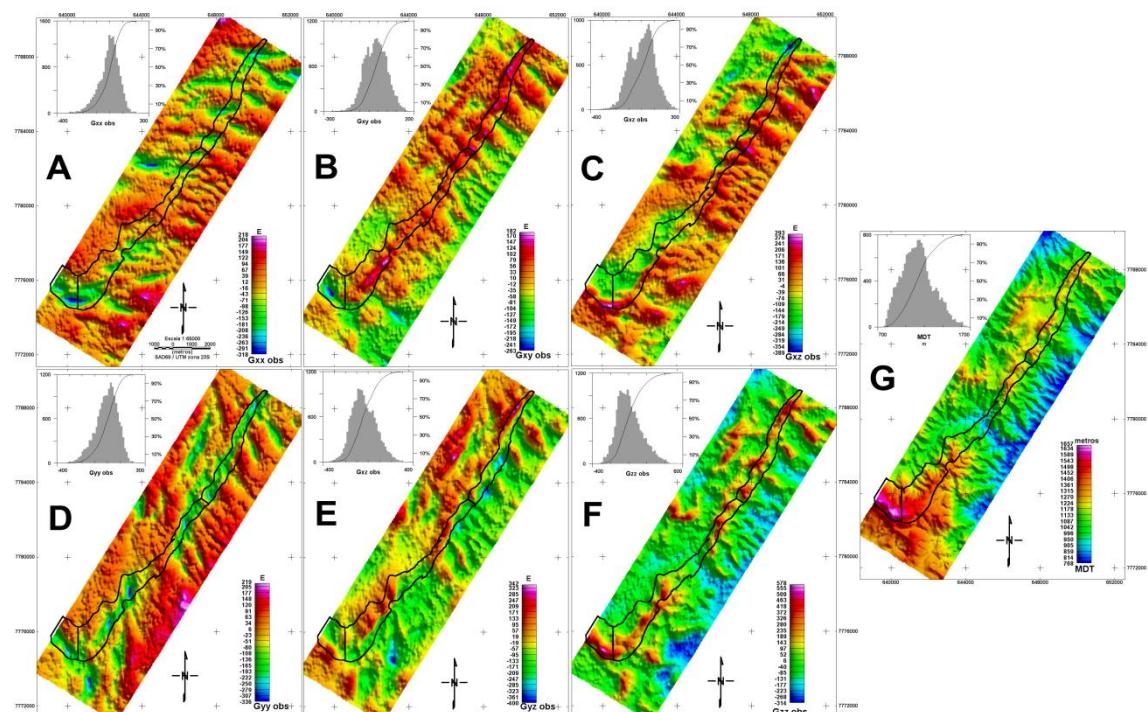


Figura 8-1. (A-F) Mapas das componentes do tensor do gradiente de gravidade observadas de Boa 6 no Quadrilátero Ferrífero. Acima do mapa de cada componente são apresentados os histogramas de distribuição dos valores de cada uma das componentes do tensor do gradiente de gravidade. O polígono em linha preta contínua representa a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera da região de estudo conforme Dorr (1969). (G) Modelo digital de terreno.

O passo final do pré-processamento dos dados de gradiometria gravimétrica é o nivelamento das linhas de vôo que consiste em minimizar os erros de interseção entre as linhas de vôo e as linhas de controle, conforme procedimento descrito por HUANG (2008).

A Figura 8-2F apresenta a componente G_{zz} com a correção da influência da topografia. Observa-se que não há uma correspondência entre as feições da componente G_{zz} e o modelo digital de terreno (Figura 8-2G). Em geral, a resposta da componente G_{zz} corrigida da topografia evidencia a geologia de superfície/subsuperfície projetada na horizontal. Nesta área em estudo, a componente G_{zz} corrigida da topografia (Figura 8-2F) é devida principalmente ao alto contraste de densidade da formação ferrífera que resultou em uma feição anômala com direção nordeste-sudoeste.

Comparando-se a projeção na horizontal da geometria da formação ferrífera (polígono em linha preta na Figura 8-2F) com os altos valores da componente G_{zz} causados pelo alto contraste de densidade entre a rocha encaixante e o minério de ferro, observa-se uma correspondência entre a feição da anomalia e a geometria da formação ferrífera.

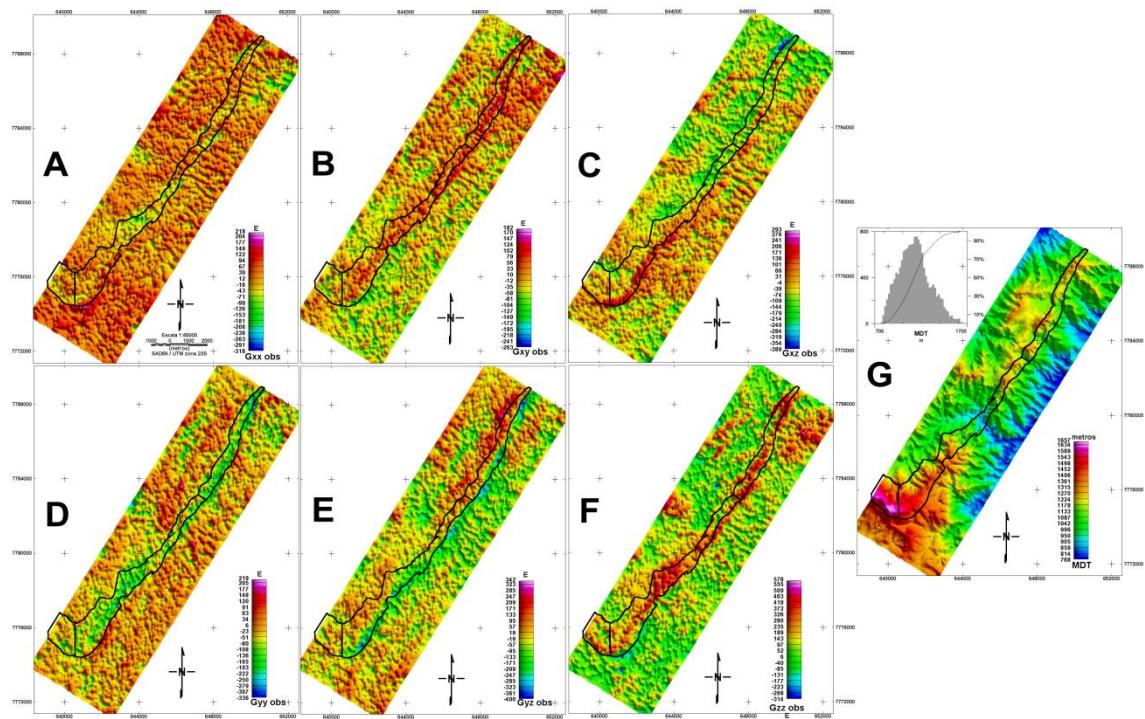


Figura 8-2. (A-F). Componentes do tensor do gradiente de gravidade corrigidas da influência da topografia. Acima do mapa de cada componente corrigida são apresentados os histogramas de distribuição dos valores de cada uma das componentes do tensor do gradiente de gravidade. O polígono em linha preta contínua representa a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera da região conforme Dorr (1969). **(G)** Modelo digital de terreno.

Cada componente dos dados de gradiente de gravidade possuem 15.275 medidas, totalizando 91.650 pontos de observação do gradiente de gravidade na área de estudo. Comparando o mapa geológico da região da área de estudo (Figura 8-3A) com o mapa da componente G_{zz} corrigida da topografia (Figura 8-3B), notamos uma alta correlação entre os altos valores da componente G_{zz} e a Formação Cauê que é o principal alvo para exploração de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Esta inspeção visual da componente G_{zz} permite inferir os limites laterais do corpo de minério de ferro em superfície. Note que estes limites são aproximadamente coincidentes com o mapeamento geológico elaborado por DORR (1969) e mostrado nas Figuras 8-3(A) e 8-3(B) por uma linha preta pontilhada. Esta inspeção visual leva as seguintes questões:

1. O corpo de minério de ferro é continuo ou segmentado?
2. As falhas na área de estudo controlam a forma do corpo de minério de ferro?
3. A espessura do minério de ferro é constante ou variável?
4. O corpo de minério de ferro apresenta um mergulho constante?
5. O sinclinal Gandarela controla a forma do corpo de minério de ferro?

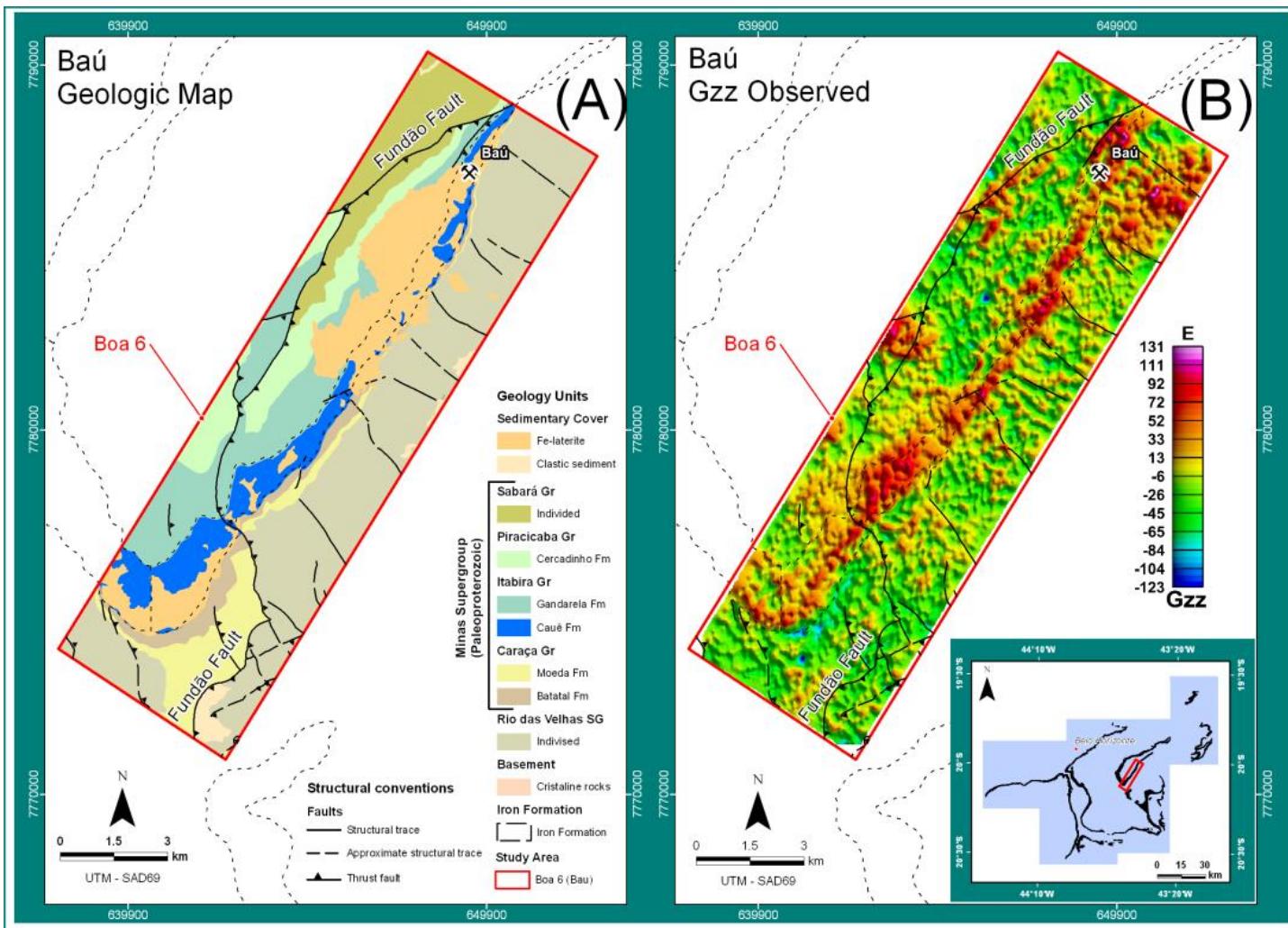


Figura 8-3. (A) Mapa geológico da área de estudo. (B) Componente G_{zz} do tensor do gradiente de gravidade. As linhas pretas pontilhadas delimitam os limites da formação ferrífera de acordo com DORR (1969). As linhas pretas contínuas representam as falhas. A área do Quadrilátero Ferrífero é mostrado no detalhe em (B).

O banco de dados de sondagem geológica na área de estudo contém 151 furos com diferentes profundidades. Na área de estudo, o programa de sondagem geológica foi conduzido durante os primeiros estágios do projeto da exploração mineral e antes dos aerolevantamentos geofísicos. Com uma média de profundidade de 200 metros, muitos dos furos atingiram a formação ferrífera bandada da Formação Cauê, que é considerada o alvo principal no Quadrilátero Ferrífero para exploração de minério de ferro. Em geral, os dados de sondagem geológica dos furos indicaram um depósito de minério de ferro raso. A Tabela 8-1 resume as densidades médias das mais importantes litologias perfuradas nessa área de estudo.

Litologia	Densidade (g/cm ³)	Descrição
Canga (CG)	3,20	Litologia superficial que se sobrepõem a formação ferrífera. A espessura varia de alguns centímetros até a ordem de alguns metros (~30 metros). A canga é composta de alta concentração de óxidos e hidróxidos de ferro com elevados teores de ferro (~58%), fósforo e alumina
Hematítito Friável (HF)	3,10	Com forma aproximadamente lenticular, a espessura do hematítito friável varia de alguns metros a dezenas de metros e teor de 65% de ferro, onde o principal tipo é a hematita especular.
Hematítito Compacto (HC)	4,70	Rocha compacta, podendo apresentar estrutura foliada, as variações de espessura podem ser de alguns metros a 50 metros com teor de 67% de ferro.
Hematítito Goethítico (HG)	3,10	Rocha friável que é composta de hematítito hidratado com alta concentração de goethita, geralmente associada com itabiritos goethíticos. O hematítito goethítico é composto de aproximadamente 64% de ferro e elevados teores de fósforo.
Itabirito Goethítico (IG)	2,60	Rocha friável caracterizada por itabirito hidratado com alta concentração de goethita. Sua espessura varia de metros a mais de uma centena de metros. O itabirito goethítico consiste de aproximadamente 52% de ferro com elevados teores de fósforo e alumina.
Itabirito Friável (IF)	2,70	Composto por hematita especular (especularita) e quartzo, o itabirito friável com baixos teores de ferro em torno de 47%.
Itabirito Compacto (IC)	3,11	Composto por um baixo teor de ferro em torno de 40%, o itabirito compacto é geralmente encontrado em contato com o itabirito friável.

Tabela 8-1. Principais tipos litológicos encontrados na área do aerolevantamento adaptado de BRAGA (2009).

9. Interpretação dos Dados Reais da área de estudo

Neste capítulo apresentaremos os resultados das interpretações dos mapas geofísicos elaborados a partir das medidas da aerogradiometria gravimétrica utilizando os trabalhos de PEDERSEN e RASMUSSEM (1990), TÓTH (2002) e BEIKI e PEDERSEN (2010) que foram discutidos no Capítulo 4. Cada uma dessas interpretações realçou estruturas geológicas relacionadas à geometria da formação ferrífera na superfície. Adicionalmente, algumas dessas interpretações podem indicar áreas em que a formação ferrífera não apresenta continuidade ou apresenta um possível afinamento de sua espessura. Ressaltamos que algumas dessas interpretações em conjunto com o mapa da componente G_{zz} do tensor do gradiente de gravidade foram utilizadas para a determinação da posição das sementes de contraste de densidade usadas na aplicação do método de UIEDA e BARBOSA (2012).

A interpretação de qualquer dado real de aerogradiometria gravimétrica requer uma análise da qualidade do dado. No Capítulo 3, seção 3.3, discutiu-se que a Razão Sinal Ruído (*RSR*) é o critério fundamental para a aprovação de uma linha de vôo. A Tabela 9.1 mostra as médias e desvios padrões da *RSR* das componentes do tensor do gradiente de gravidade das 50 linhas de vôo do aerolevantamento de Boa 6. Nota-se que os valores da *RSR* de todas as componentes do gradiente de gravidade estão numa mesma ordem de grandeza com média de aproximadamente 26 dB (Tabela 9.1). Este valor médio da *RSR* é equivalente a dizer que todas as componentes apresentam um valor aceitável de aproximadamente 400 vezes mais sinal que ruído.

<i>Componente</i>	<i>RSR (dB)</i>
G_{xx}	$24,9 \pm 2,0$
G_{xy}	$24,6 \pm 2,1$
G_{xz}	$26,7 \pm 1,9$
G_{yy}	$25,5 \pm 1,8$
G_{yz}	$27,3 \pm 2,4$
G_{zz}	$26,9 \pm 2,0$

Tabela 9-1. Valores da *RSR* de todas as componentes do tensor do gradiente de gravidade do aerolevantamento de Boa 6 no Quadrilátero Ferrífero.

As Figuras 9-1(A-F) apresentam a *RSR* das componentes do tensor do gradiente de gravidade do aerolevantamento de Boa 6. A média de cada componente do gradiente de gravidade está indicada nas Figuras 9-1(A-F) pela linha vermelha contínua.

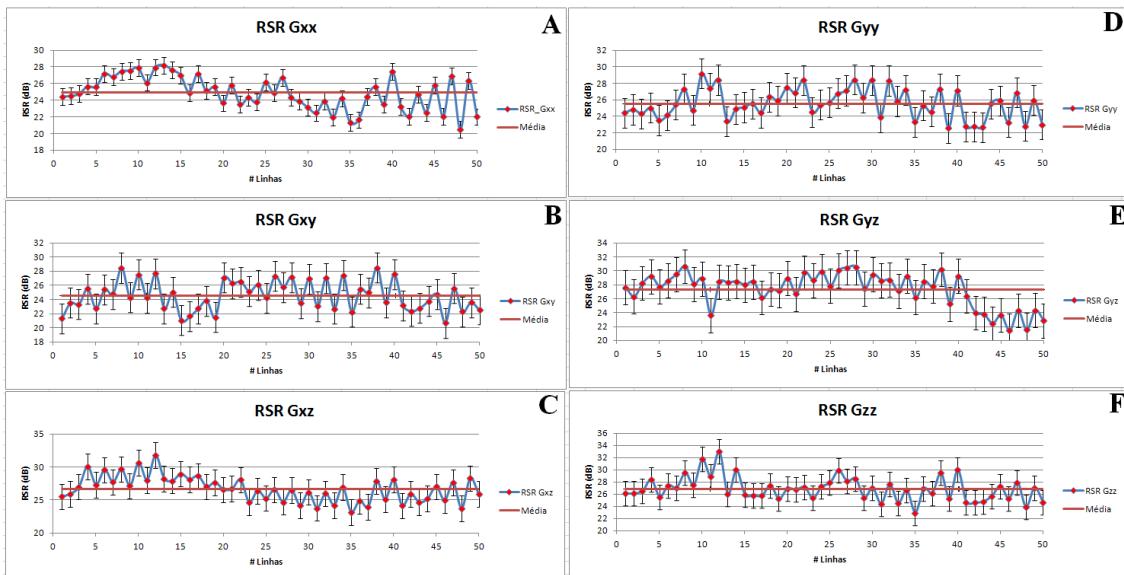


Figura 9-1. (A)-(F) Razão sinal ruído (*RSR*) das componentes do tensor do gradiente de gravidade do aerolevantamento de Boa 6, no Quadrilátero Ferrífero. Os círculos em vermelho representam o valor da *RSR* de cada uma das cinqüenta linhas do aerolevantamento de gradiometria gravimétrica. As linhas contínuas vermelhas indicam a média e as barras de erro representam os desvios padrões das componentes do tensor do gradiente de gravidade destas cinqüenta linhas de vôo.

As Figuras 9-2(A-C) apresentam as interpretações de acordo com o trabalho de PEDERSEN e RASMUSSEM (1990). No mapa do invariante zero (Figura 9-2A) observa-se uma malha de resíduos com valores praticamente nulos. Este mapa confirma que os dados adquiridos e corrigidos do aerolevantamento de gradiente de gravidade da área de estudo estão consistentes com a teoria do potencial. Como discutimos no

Capítulo 4, o invariante zero é o traço do tensor do gradiente de gravidade sendo, portanto, a plotagem do resultado obtido da Equação de Laplace.

A Figura 9-2(B) apresenta a malha do invariante I_1 , nota-se que o limite leste da formação ferrífera foi realçada com valores negativos e que essas mesmas feições são realçadas como valores positivos na Figura 9-2(C) que é o mapa do invariante 2. Então os invariantes I_1 e I_2 nesta área de estudo podem ser usados para interpretar os limites das bordas da formação ferrífera. Diferentemente do resultado apresentado no caso sintético (I_1 , Figura 6-3B e I_2 , Figura 6-3C), note que, nesta aplicação a dados reais da área de estudo, os invariantes I_1 (Figura 9-2B) e I_2 (Figura 9-2C) não mapeiam de modo homogêneo toda a projeção horizontal da formação ferrífera.

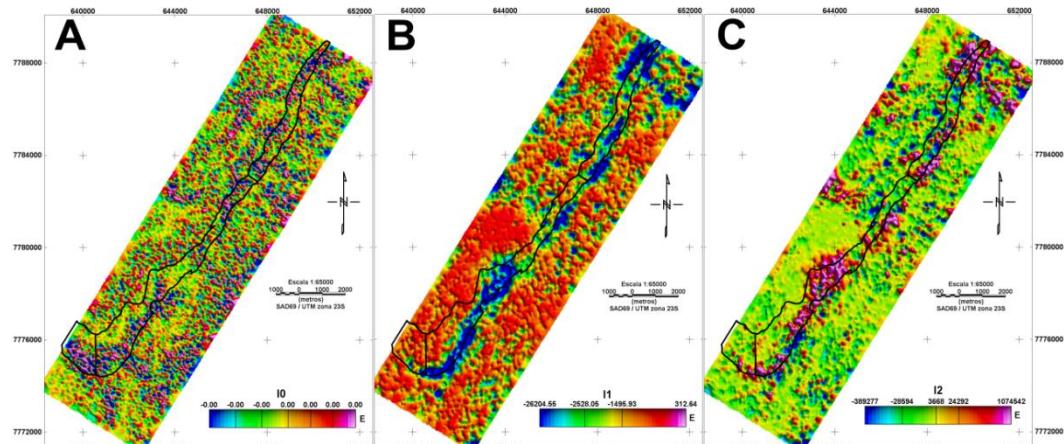


Figura 9-2. (A) Invariante 0 (Equação 4.1). (B) Invariante 1 (Equação 4.2) e (C) Invariante 2 (Equação 4.3). O polígono em linha preta contínua representa a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera da região conforme Dorr (1969).

Os autovalores 1 , 2 e 3 (Figura 9-3A-C) representam os resultados apresentados no trabalho de PEDERSEN e RASMUSSEM (1990) e mais recentemente no trabalho de BEIKI e PERDERSEN (2010). Similarmente aos resultados dos autovalores obtidos na aplicação a dados sintéticos (Figuras 6-4A-C), nota-se que nesta aplicação a dados reais da área de estudo os autovalores 1 (λ_1 , Figura 9-3A) e 3 (λ_3 , Figura 9-3C) produzem padrões com algum significado geológico. Especificamente, nota-se que os

valores positivos do autovalor 1 (Figura 9-3A) e negativos do autovalor 3 (Figura 9-3C) delimitaram o limite leste da formação ferrífera. Na parte setentrional da área, observou-se que o autovalor 3 mapeou parcialmente o limite oeste da formação ferrífera. Conforme apresentado nos dados sintéticos, o padrão de interpretação do autovalor 2 (λ_2 , Figura 9-3B) é mais complexo para ser utilizado em interpretação geológica.

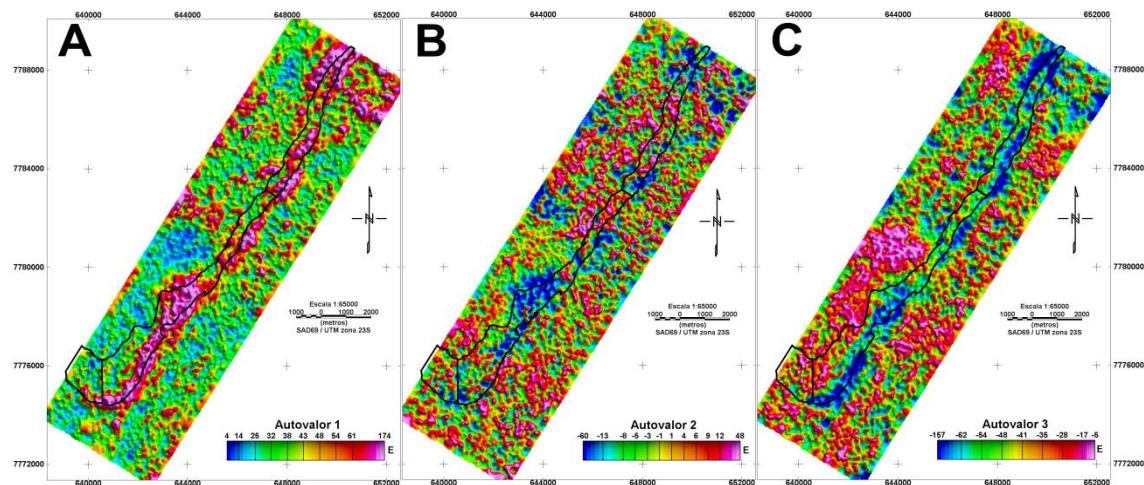


Figura 9-3. (A) Autovalor 1 (Equação 4.5a). (B) Autovalor 2 (Equação 4.5b) e (C) Autovalor 3 (Equação 4.5c). O polígono em linha preta contínua representa a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera da região conforme DORR (1969).

A Figura 9-4 mostra interpretações das componentes do gradiente de gravidade da área de estudo baseadas no trabalho de TÓTH (2002). As nomenclaturas utilizadas na Figura 9-4 são: G_{δ} , representando o G_Δ (curvatura, Equação 4-7a), G_{amp} (magnitude do gradiente horizontal, Equação 4-7b) e R (magnitude da curvatura, Equação 4-8).

Na aplicação a dados sintéticos, a magnitude do gradiente horizontal (G_{amp} , Figura 6-5B) realçou perfeitamente os limites em planta do corpo geológico simulado. Nesta aplicação a dados reais da área de estudo, a magnitude do gradiente horizontal (G_{amp} , Figura 9-4B) delineou a borda leste da formação ferrífera; no entanto a borda oeste da formação ferrífera foi apenas parcialmente delineada.

Na aplicação a dados sintéticos, os mapas de curvatura (G_{delta} , Figura 6-5A) e da magnitude de curvatura (R , Figura 6-5C) não fornecem uma clara interpretação geológica, mas realçam a localização da formação ferrífera em planta. Similarmente, nesta aplicação a dados reais da área de estudo os mapas de curvatura (G_{delta} , Figura 9-4A) e da magnitude de curvatura (R , Figura 9-4C) não mapearam os limites da formação ferrífera e não serão usados neste trabalho.

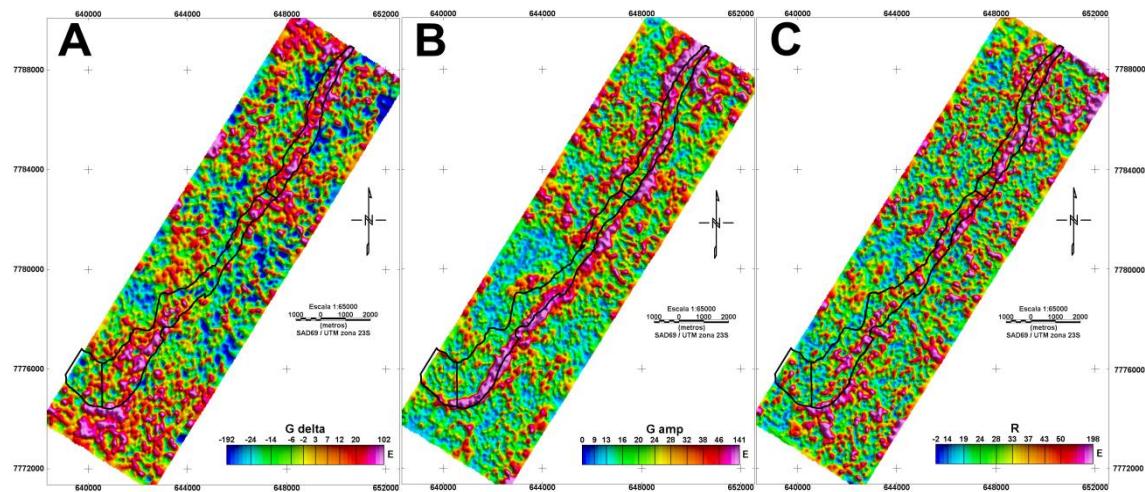


Figura 9-4. (A) Curvatura – G_{delta} - (Equação 4.7a). (B) Magnitude do gradiente horizontal – G_{amp} - (Equação 4.7b) e (C) Magnitude da Curvatura – R - (Equação 4.8). O polígono em linha preta contínua representa a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera da região conforme Dorr (1969).

As Figuras 9-5(A-C) apresentam a interpretação das componentes do tensor do gradiente de gravidade segundo o trabalho de BEIKI e PEDERSEN (2010). Ressalta-se que a amplitude do sinal analítico na direção x (A_x , Figura 9-5A) não apresenta um padrão simples de interpretação tal como constatado na aplicação a dados sintéticos (A_x , Figura 6-6A). Por outro lado, na aplicação a dados sintéticos, a amplitude do sinal analítico na direção z (A_z , Figura 6-6C) mapeou perfeitamente os limites do corpo geológico simulado. Diferentemente, nesta aplicação a dados reais da área de estudo, a amplitude do sinal analítico na direção z (A_z , Figura 9-5A) mapeou, parcialmente, a projeção horizontal da formação ferrífera. Nota-se que, no caso dos dados reais, a

amplitude do sinal analítico na direção y (A_y , Figura 9-5B) realça aproximadamente o limite leste da formação ferrífera. Diferentemente do modelo sintético em que A_y (Figura 6-6B) e A_z (Figura 6-6C) mapearam a geometria, em superfície, do corpo geológico simulado, note que na aplicação a dados reais A_y (Figura 9-5B) e A_z (Figura 9-5C) não evidenciam a geometria do minério de ferro em superfície. No entanto, tanto A_y (Figura 9-5B) como A_z (Figura 9-5C) nos dados reais mostram que a formação ferrífera não deve ser homogênea dentro dos limites da formação ferrífera mapeada por DORR (1969). Adicionalmente, A_y (Figura 9-5B) e A_z (Figura 9-5C) revelam que não existe uma continuidade do sinal geofísico. Esta ausência de continuidade pode significar a existência de falhamentos do depósito do minério de ferro. Outras possíveis explicações da descontinuidade do sinal de A_y e A_z são: i) um possível afinamento da camada do minério de ferro; ou ii) a presença de minério de ferro em grandes profundidades.

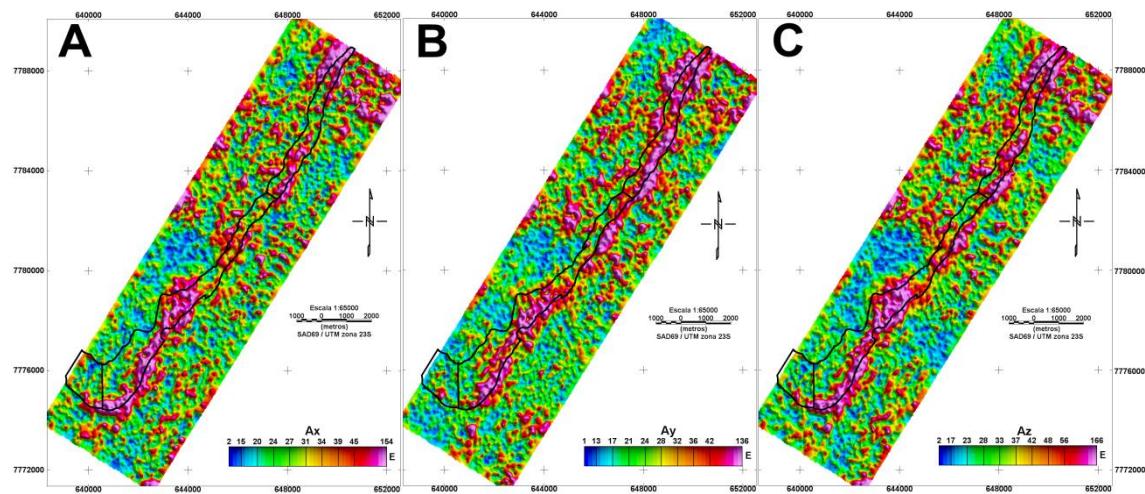


Figura 9-5. (A) Amplitude do sinal analítico direcional em x (A_x , Equação 4.9a). (B) Amplitude do sinal analítico direcional em y (A_y , Equação 4.9b) e (C) Amplitude do sinal analítico direcional em z (A_z , Equação 4.9c). O polígono em linha preta contínua representa a projeção horizontal em planta da formação ferrífera da região conforme DORR (1969).

9.1 Localização horizontal das sementes (UIEDA e BARBOSA, 2012) usando as interpretações dos dados reais da área de estudo

Nesta tese, as posições horizontais das sementes de contraste de densidade utilizadas na inversão de UIEDA e BARBOSA (2012) foram baseadas no sinal da componente G_{zz} , e nas interpretações de I_1 , I_2 , λ_1 , λ_3 , G_{amp} , A_y e A_z . A Figura 9-6(A-B) apresenta a localização das sementes utilizadas para aplicação do método de inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). As Figuras 9-6(A) e 9-6(B) mostram a componente G_{zz} e a magnitude do gradiente horizontal, respectivamente. Nota-se que as sementes (triângulos amarelos na Figura 9-6) estão em sua maioria, coincidentes com os valores máximos do sinal da componente G_{zz} (Figura 9-6A) e apenas na área indicada pelo polígono amarelo é que essa componente não foi eficaz para posicionar as sementes. Para solução dessa limitação foram utilizados as interpretações I_1 , I_2 , λ_1 , λ_3 , G_{amp} , A_y e A_z que indicaram uma não continuidade destas grandezas na região do polígono amarelo e que é confirmada pela fisiografia dessa área.

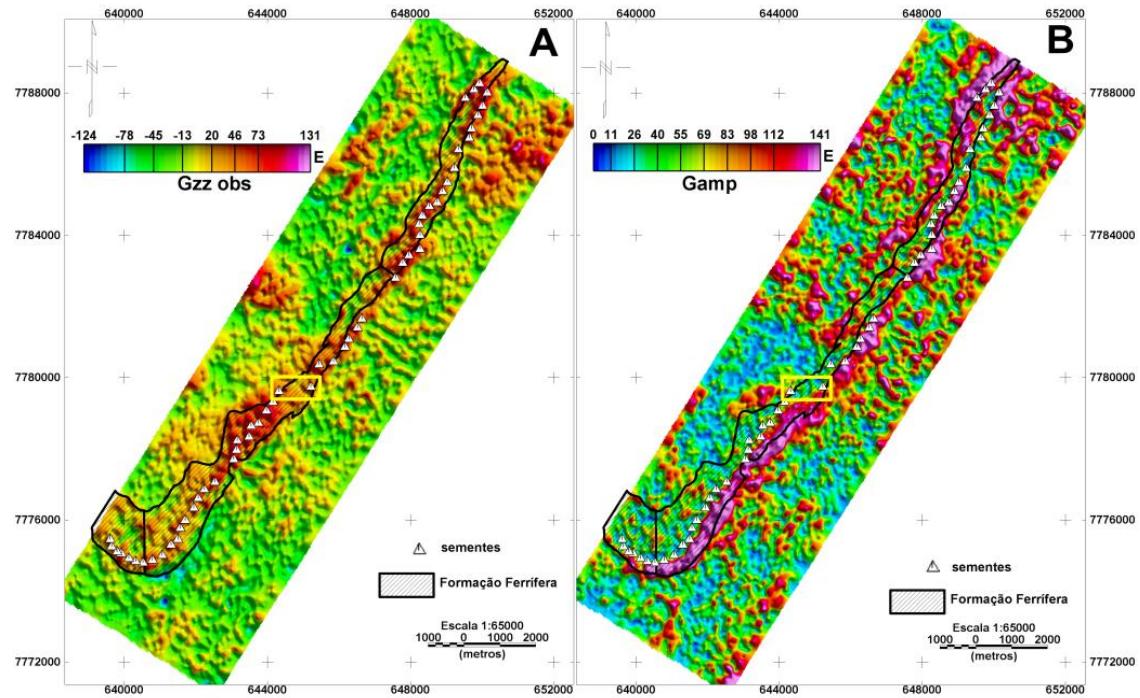


Figura 9-6. Componente G_{zz} observada. (B). Magnitude do gradiente horizontal. O polígono em linha preta contínua representa a projeção horizontal em planta da formação ferrífera da região conforme DORR (1969). Os triângulos brancos representam a projeção horizontal das sementes de contraste de densidade utilizadas para o método de UIEDA e BARBOSA (2012). O polígono amarelo indica a área em que não foram posicionadas sementes de contraste de densidade para a inversão.

10. Inversões dos dados reais da área de estudo

Neste capítulo apresentaremos uma visão detalhada da geometria tridimensional estimada do minério de ferro na região do aerolevantamento de Boa 6 no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, utilizando dois métodos de inversão: LI (2001) e UIEDA e BARBOSA (2012). Os resultados das inversões foram integrados com dados de furo de sondagem objetivando validar a geometria tridimensional do minério de ferro localizado no flanco sul do sinclinal do Gandarela.

10.1 Estratégias de inversão

A área de estudo compreende um total de 91.650 observações do gradiente de gravidade. O objetivo principal deste capítulo é produzir uma visão detalhada da geometria 3D do corpo de minério de ferro invertendo os dados pré-processados das componentes do tensor do gradiente de gravidade (Figura 8-2).

Utilizando-se o método de UIEDA E BARBOSA (2012) foram invertidas as seis componentes do tensor do gradiente de gravidade. No entanto, usando o método de LI (2001) inverteu-se apenas as três componentes (G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} nas Figuras 8-2D, E e F) que apresentam maior similaridade com a geometria em superfície da formação ferrífera. Adotou-se a estratégia de reduzir o número de componentes a ser invertidas via LI (2001) porque este método demanda uma carga computacional elevada, inviabilizando a sua aplicação ao conjunto completo das seis componentes do tensor do gradiente de gravidade (Figura 8-2).

Como apresentado no Capítulo 5, em ambos os métodos de inversão, o modelo interpretativo de discretização da subsuperfície da terra comprehende uma malha de prismas retangulares retos posicionada abaixo da topografia da área de estudo e que

engloba os corpos de minério de ferro. Este tipo de modelo interpretativo produz uma imagem *voxel* da distribuição dos contrastes de densidade em subsuperfície. Quanto menor os prismas, mais fina a discretização em subsuperfície. Conseqüentemente, uma malha fina de prismas é necessária para a representação de uma distribuição de contraste de densidade complexa. Desejando estimar a geometria detalhada dos corpos de minério de ferro, discretizou-se uma região em subsuperfície ao longo das direções x , y , e z em uma malha fina de cubos com arestas de 30 metros para o caso do método de UIEDA e BARBOSA (2012) e cubos com arestas de 50 metros para o caso de LI (2001). Assim, o número total de prismas abaixo da superfície da topografia é de cerca de 8,5 milhões para o método de UIEDA e BARBOSA (2012) e de aproximadamente 2,7 milhões para o método de LI (2001). Para tornar esta inversão viável do ponto de vista computacional, dividiu-se a área de estudo em três domínios, denominados de Área 1, Área 2 e Área3, cujas localizações são mostradas na Figura 10-1.

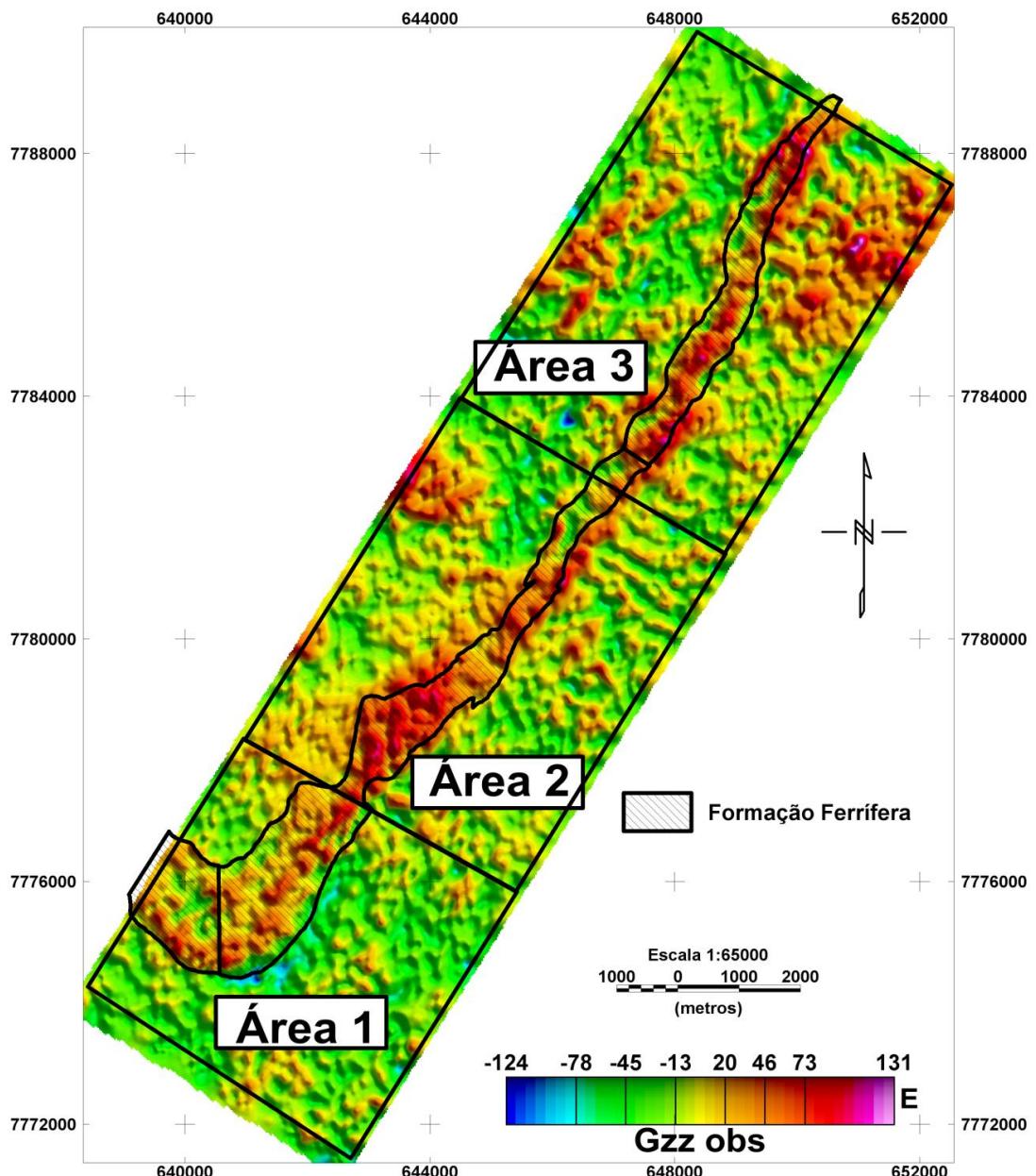


Figura 10-1. Componente G_{zz} observada do aerolevantamento de gradiometria gravimétrica de Boa 6 no Quadrilátero Ferrífero. Os polígonos representados pelas linhas pretas contínuas representam as divisões das áreas utilizadas nas inversões de LI (2001) e UIEDA e BARBOSA (2012). O polígono em linha preta contínua e hachurado representa a projeção horizontal em superfície da formação ferrífera, segundo DORR (1969).

A Área 1 está localizada na parte sul da área de estudo e suas dimensões são 4 km na direção nordeste por 5 km na direção sudoeste. As Áreas 2 e 3 estão localizadas nas porções centrais e ao norte da área de estudo, respectivamente. Estas áreas têm dimensões de cerca de 7 km na direção nordeste por 5 km na direção sudoeste. As

dimensões destas três áreas foram escolhidas com base no conhecimento geológico sobre os limites das formações de ferro aflorantes (Figura 10-1). Para todas as três áreas, as rochas-alvo, como o itabirito compacto e hematítito friável, foram consideradas com uma densidade de $3,11 \text{ g/cm}^3$ de acordo com a Tabela 8.1 apresentada no Capítulo 8. Todas as rochas não-alvo, como quartzito ou dolomito, foram consideradas com densidade de $2,36 \text{ g/cm}^3$. Isto implica que o contraste de densidade do corpo de minério de ferro com as principais rochas hospedeiras é de $0,75 \text{ g/cm}^3$. Este valor de contraste de densidade foi atribuído a todas as sementes utilizadas na inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). Para o método de LI (2001) os parâmetros de entrada conforme apresentados no Capítulo 5 (Equações 5.7 e 5.8) são: 1) o modelo inicial \bar{m}_0 em que foram assinalados a todos os elementos o valor de $2,0 \text{ g/cm}^3$ e 2) os limites mínimos e máximos de densidade com valores, respectivamente, de $m_i^{min} = -0,1 \text{ g/cm}^3$ e de $m_i^{max} = 3,31 \text{ g/cm}^3$, $i = 1, \dots, M$. Estes parâmetros de entrada foram escolhidos de modo a honrar, aproximadamente, o intervalo de densidades das rochas-alvo e hospedeira encontradas no Quadrilátero Ferrífero.

Para cada área (Áreas 1-3, Figura 10-1), foram invertidas todas as seis componentes do tensor do gradiente de gravidade via UIEDA e BARBOSA (2012) e as três componentes (G_{yy} , G_{yz} e G_{zz}) via LI (2001) para estimar a geometria e a extensão das jazidas de minério de ferro da Formação Cauê sob a área correspondente ao aerolevantamento de Boa 6. Em todas as inversões, selecionamos uma região em subsuperfície cujo topo é coincidente com a topografia de cada área (Área 1-3). Para a definição da superfície topográfica destas três áreas, foi utilizado o modelo digital de terreno do tipo **LIDAR (Light Detection and Ranging)** com resolução de 1 metro – Figura 8-1G.

10.2 Variáveis de Inversão de cada área

As Figuras 10-2 a 10-4 (painéis superiores) mostram as seis componentes observadas do tensor do gradiente de gravidade sobre, respectivamente, as Áreas 1 a 3, que foram invertidas via o método de UIEDA e BARBOSA (2012). As Figuras 10-5 a 10-7 (painéis superiores) mostram as três componentes observadas do tensor do gradiente de gravidade sobre, respectivamente, as Área 1 a 3, que foram invertidas via o método de LI (2001).

Para cada uma das seis componentes, a Área 1 contém 3.975 observações (totalizando 23.850 medições para o método de UIEDA e BARBOSA (2012) e 11.925 medições para o método de LI (2001)), a Área 2 contém 5.288 observações (totalizando 31.728 medições para o método de UIEDA e BARBOSA (2012) e 15.864 medições para o método de LI (2001)) e a Área 3 contém 5.710 observações (totalizando 34.260 medições para o método de UIEDA e BARBOSA (2012) e 17.130 medições para o método de LI (2001)). A região em subsuperfície da Área 1 foi discretizada ao longo das direções x , y , e z em uma malha de 227 x 225 x 52 de cubos, resultando em um total de 2.655.900 prismas para o método de UIEDA e BARBOSA (2012) e em uma malha de 140 x 139 x 37 de cubos, resultando em um total de aproximadamente 720 mil prismas para o método de LI (2001). As discretizações das subsuperfícies sob as Áreas 2 e 3 consistem, respectivamente, em uma malha de 257 x 264 x 43 de cubos (totalizando 2.917.464 prismas) e 258 x 281 x 41 malha de cubos (totalizando 2.972.418 prismas). Para o método de LI (2001) as discretizações em subsuperfície para as Áreas 2 e 3 foram, respectivamente, uma malha de 157 x 163 x 37 de cubos (totalizando ~ 950 mil prismas) e de 160 x 172 x 37 de cubos (totalizando ~ 1 milhão de prismas). Para aplicar o método de UIEDA e BARBOSA (2012), foi utilizado um conjunto de

sementes cujas coordenadas horizontais foram escolhidas usando-se os resultados das interpretações mostrados no Capítulo 9 (Figura 9-6). O número de sementes utilizadas na inversão das Áreas 1 a 3 foram de 17, 16 e 21, respectivamente. As projeções horizontais das localizações das sementes em cada uma das áreas estão representadas pelos triângulos brancos nas Figuras 10-2 a 10-4, respectivamente. Por simplicidade, todas as sementes foram posicionadas na profundidade de 50 m.

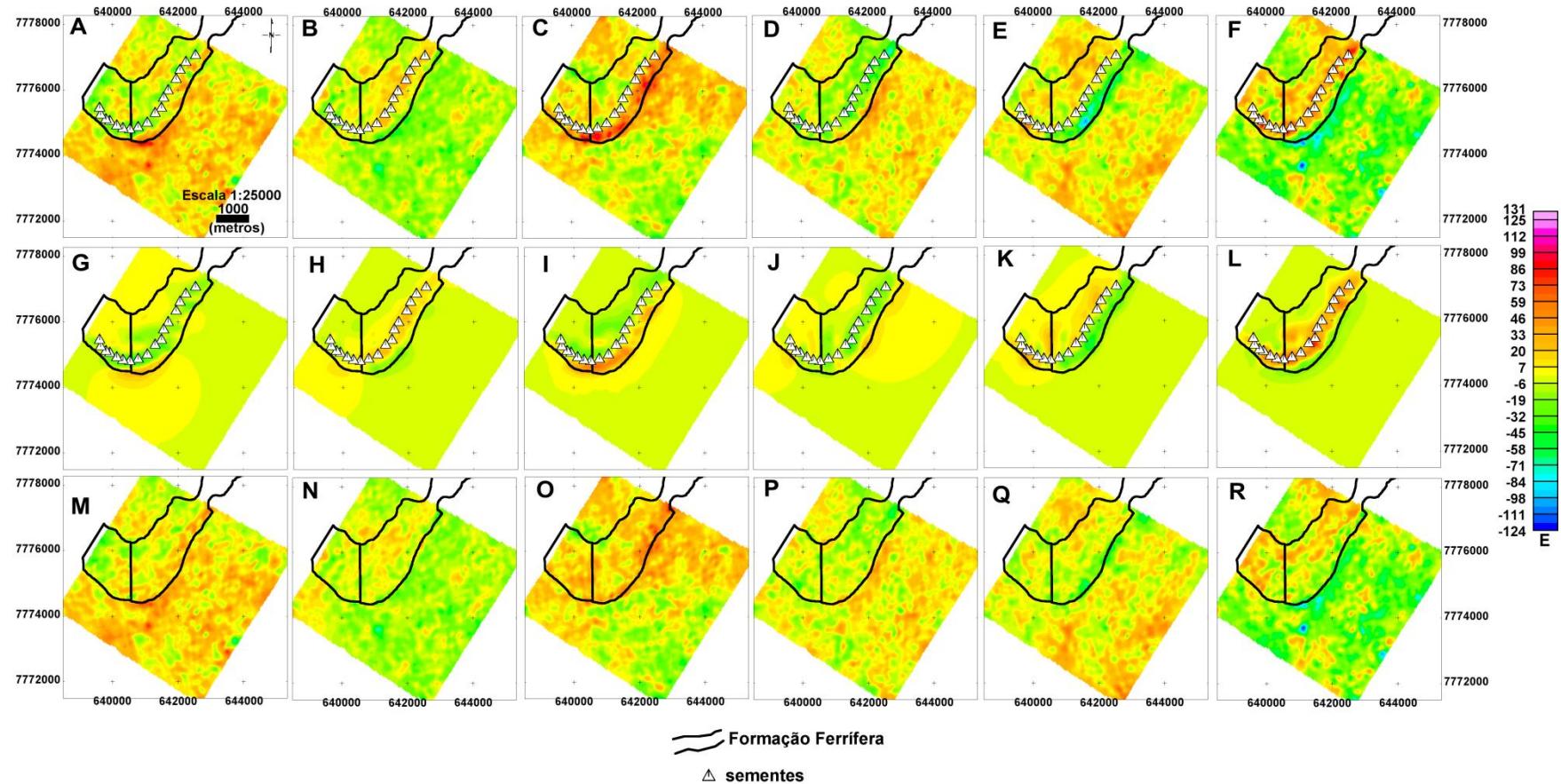


Figura 10-2. (A-F) Componentes observadas do tensor do gradiente de gravidade G_{xx} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel superior). (G-L) Componentes calculadas do tensor do gradiente de gravidade G_{xx} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel central) usando UIEDA e BARBOSA (2012). As componentes calculadas foram produzidas pela estimativa do contraste de densidade mostrada na Figura 10-8(A). (M-R) Resíduos obtidos pela diferença entre as componentes observadas (A-F) e calculadas (G-L). Os triângulos em branco nos painéis superior (A-F) e central (G-L) representam as coordenadas horizontais das sementes usadas no método de UIEDA e BARBOSA (2012). As linhas pretas contínuas nos painéis superior (A-F) e central (G-L) delimitam os limites mapeados da formação ferrífera de acordo com DORR (1969). A localização da Área 1 é mostrada na Figura 10.1.

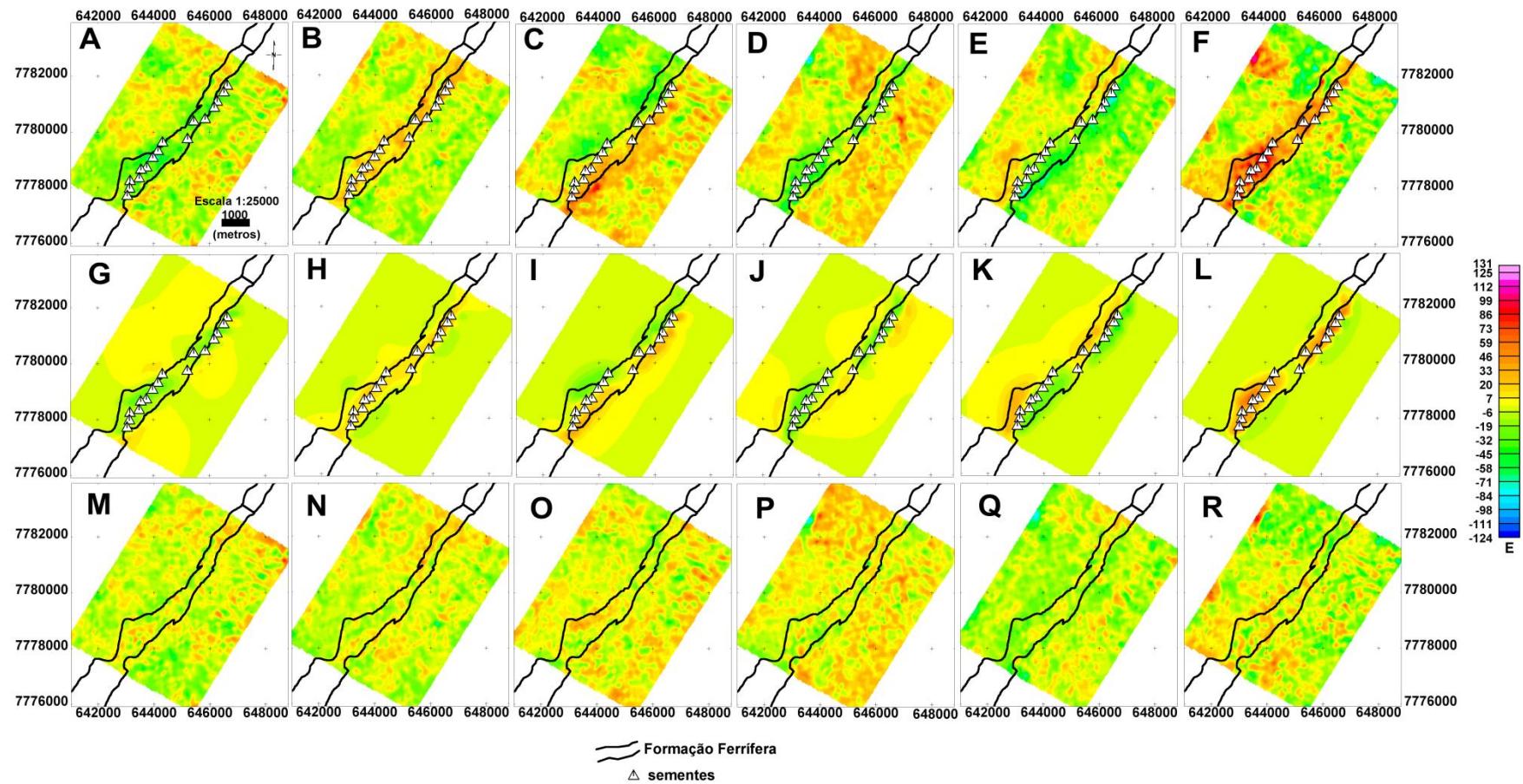


Figura 10-3. (A-F) Componentes observadas do tensor do gradiente de gravidade G_{xx} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel superior). (G-L) Componentes calculadas do tensor do gradiente de gravidade G_{xx} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel central) usando UIEDA e BARBOSA (2012). As componentes calculadas foram produzidas pela estimativa do contraste de densidade mostrada na Figura 10-8(A). (M-R) Resíduos obtidos pela diferença entre as componentes observadas (A-F) e calculadas (G-L). Os triângulos em branco nos painéis superior (A-F) e central (G-L) representam as coordenadas horizontais das sementes usadas no método de UIEDA e BARBOSA (2012). As linhas pretas contínuas nos painéis superior (A-F) e central (G-L) delimitam os limites mapeados da formação ferrífera de acordo com DORR (1969). A localização da Área 2 é mostrada na Figura 10.1.

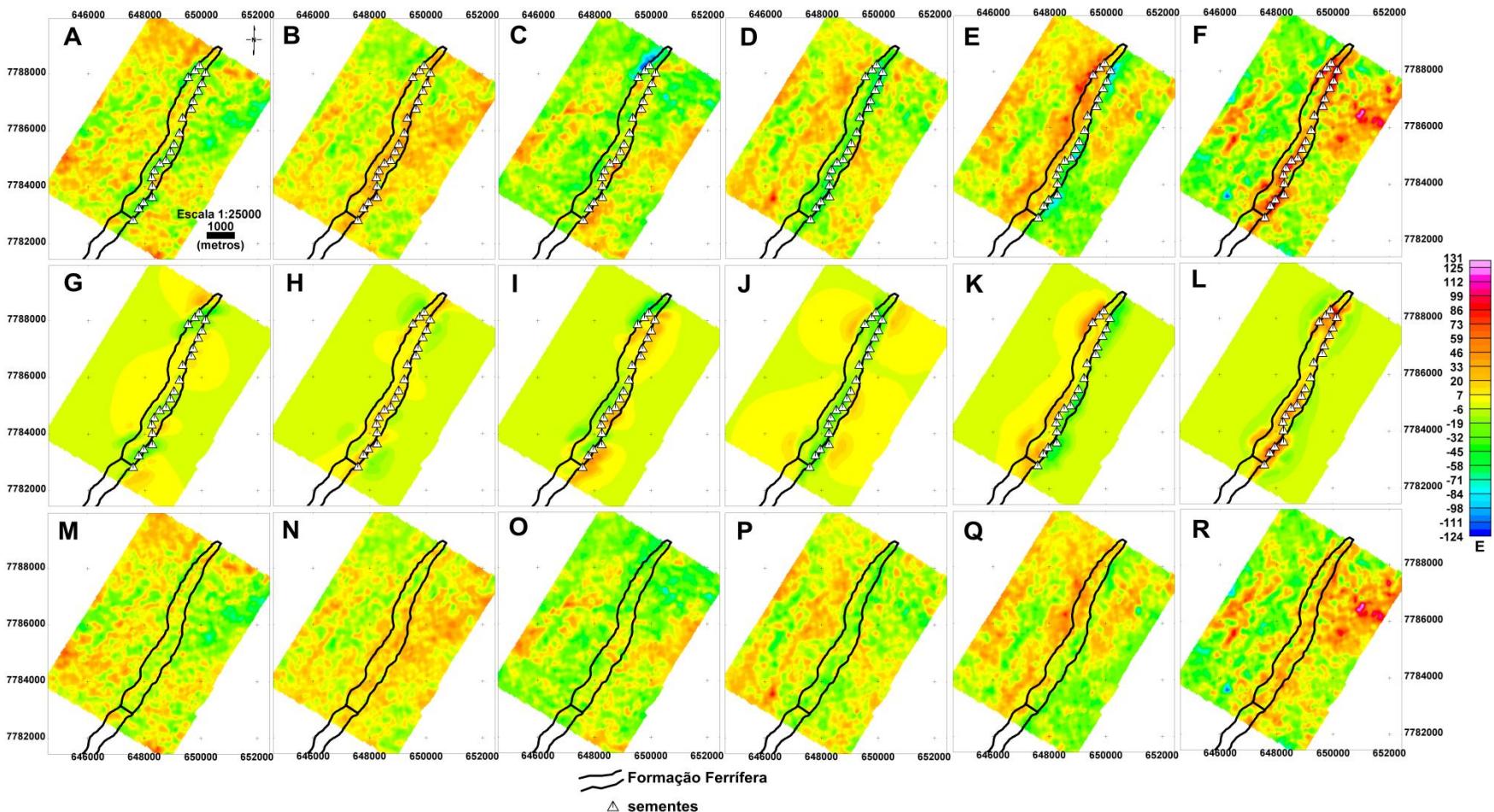


Figura 10-4. (A-F) Componentes observadas do tensor do gradiente de gravidade G_{xx} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel superior). (G-L) Componentes calculadas do tensor do gradiente de gravidade G_{xx} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel central) usando UIEDA e BARBOSA (2012). As componentes calculadas foram produzidas pela estimativa do contraste de densidade mostrada na Figura 10-8(A). (M-R) Resíduos obtidos pela diferença entre as componentes observadas (A-F) e calculadas (G-L). Os triângulos em branco nos painéis superior (A-F) e central (G-L) representam as coordenadas horizontais das sementes usadas no método de UIEDA e BARBOSA (2012). As linhas pretas contínuas nos painéis superior (A-F) e central (G-L) delimitam os limites mapeados da formação ferrífera de acordo com DORR (1969). A localização da Área 3 é mostrada na Figura 10.1.

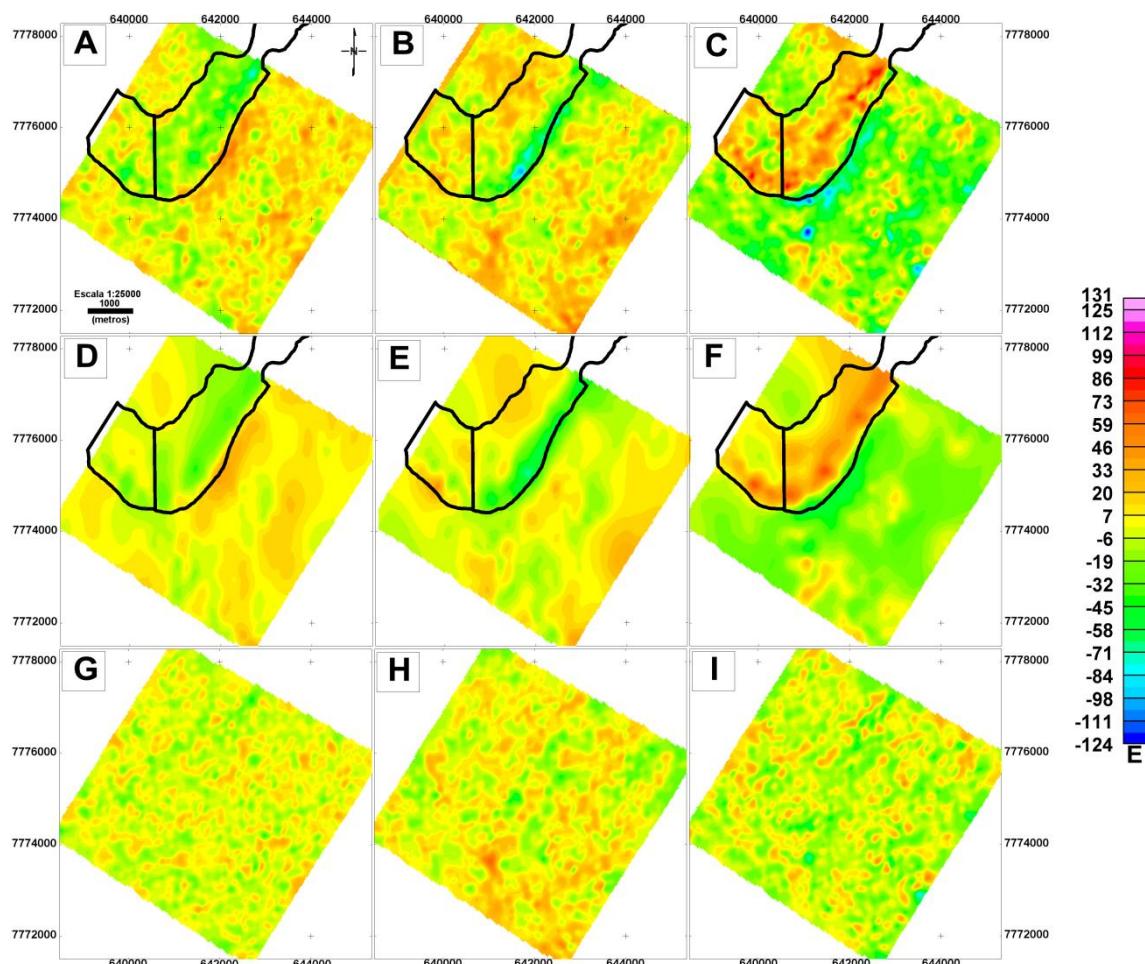


Figura 10-5. (A-C) Componentes observadas do tensor do gradiente de gravidade G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel superior). (D-F) Componentes calculadas do tensor do gradiente de gravidade G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel central) usando o método de LI (2001) obtidas pela estimativa do contraste de densidade mostrada na Figura 10-9(A). (G-I) Resíduos obtidos pela diferença entre as componentes observadas (A-C) e calculadas (D-F). As linhas pretas contínuas em (A-F) delimitam os limites mapeados da formação ferrífera de acordo com DORR (1969). A localização da Área 1 é mostrada na Figura 10.1.

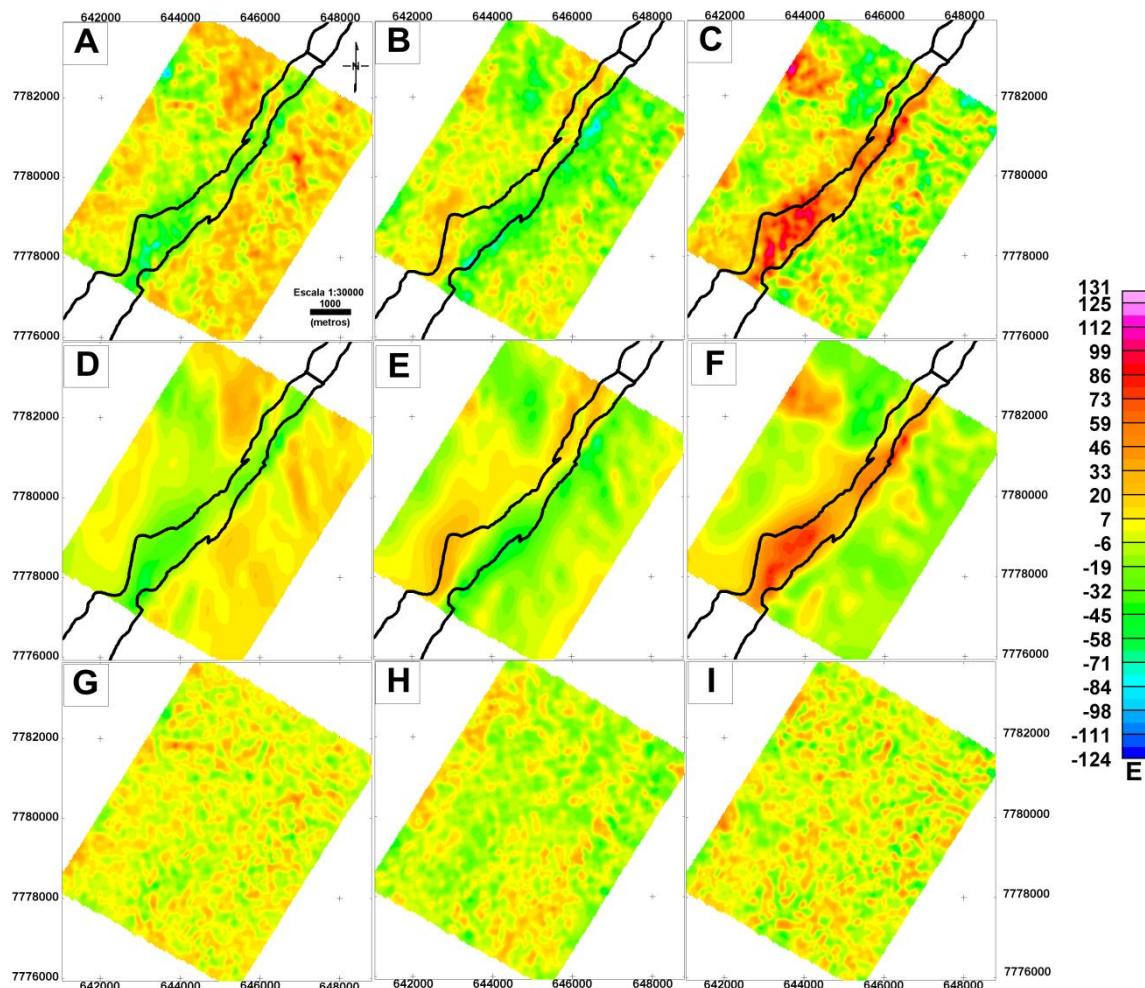


Figura 10-6. (A-C). Componentes observadas do tensor do gradiente de gravidade G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel superior). (D-F) Componentes calculadas do tensor do gradiente de gravidade G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel central) usando o método de LI (2001) obtidas pela estimativa do contraste de densidade mostrada na Figura 10-9(A). (G-I) Resíduos obtidos pela diferença entre as componentes observadas (A-C) e calculadas (D-F). As linhas pretas contínuas em (A-F) delimitam os limites mapeados da formação ferrífera de acordo com DORR (1969). A localização da Área 2 é mostrada na Figura 10.1.

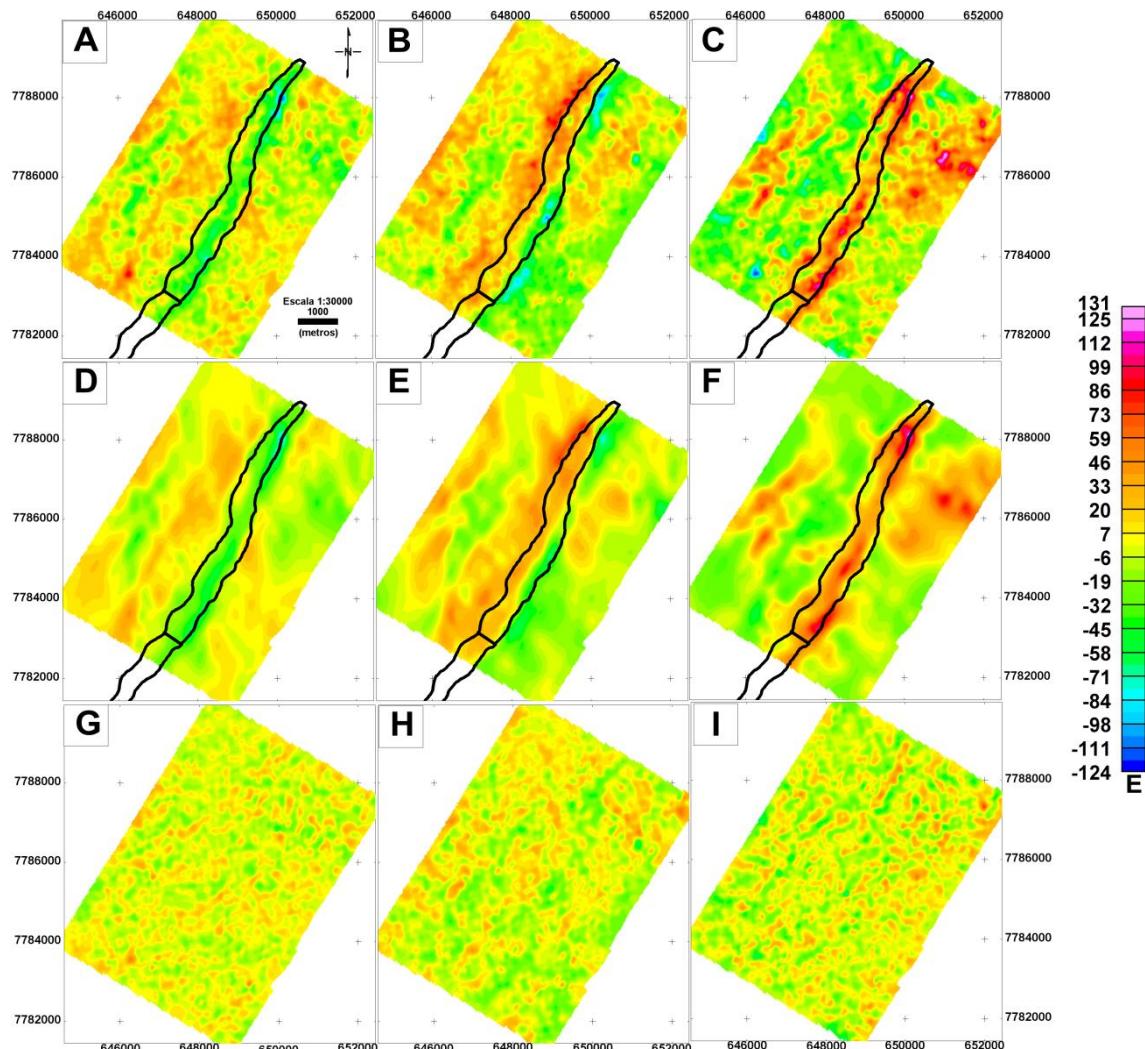


Figura 10-7. (A-C). Componentes observadas do tensor do gradiente de gravidade G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel superior). (D-F) Componentes calculadas do tensor do gradiente de gravidade G_{yy} , G_{yz} e G_{zz} (painel central) usando o método de LI (2001) obtidas pela estimativa do contraste de densidade mostrada na Figura 10-9(A). (G-I) Resíduos obtidos pela diferença entre as componentes observadas (A-C) e calculadas (D-F). As linhas pretas contínuas em (A-F) delimitam os limites mapeados da formação ferrífera de acordo com DORR (1969). A localização da Área 3 é mostrada na Figura 10.1.

10.3 Resultados Gerais

Para cada uma das três áreas (Áreas 1-3), as inversões de UIEDA e BARBOSA (2012) e de LI (2001) foram realizadas usando as componentes apresentadas nos painéis superiores das Figuras 10-2 a 10-4 e 10-5 a 10-7, respectivamente.

A Figura 10-8(A) mostra uma vista em perspectiva da estimativa da distribuição dos contrastes de densidade 3D (em rosa) obtida utilizando o método de UIEDA e BARBOSA (2012) para cada uma das Áreas 1-3. Esse resultado sugere que a mineralização de minério de ferro é rasa e tem uma forma alongada de direção nordeste-sudoeste. Ressaltamos que essa mineralização de minério de ferro estimada (Figura 10-8A) é segmentada. Esta segmentação não era esperada uma vez que, de acordo com o mapeamento geológico apresentado por DORR (1969), o corpo de minério de ferro na região do sinclinal Gandarela seria contínuo. No entanto, o resultado da inversão revela uma segmentação do corpo de ferro em subsuperfície. Esta segmentação do corpo de minério de ferro não pode ser verificada por meio de furos de sondagem porque o lugar onde ela ocorre é de difícil acesso.

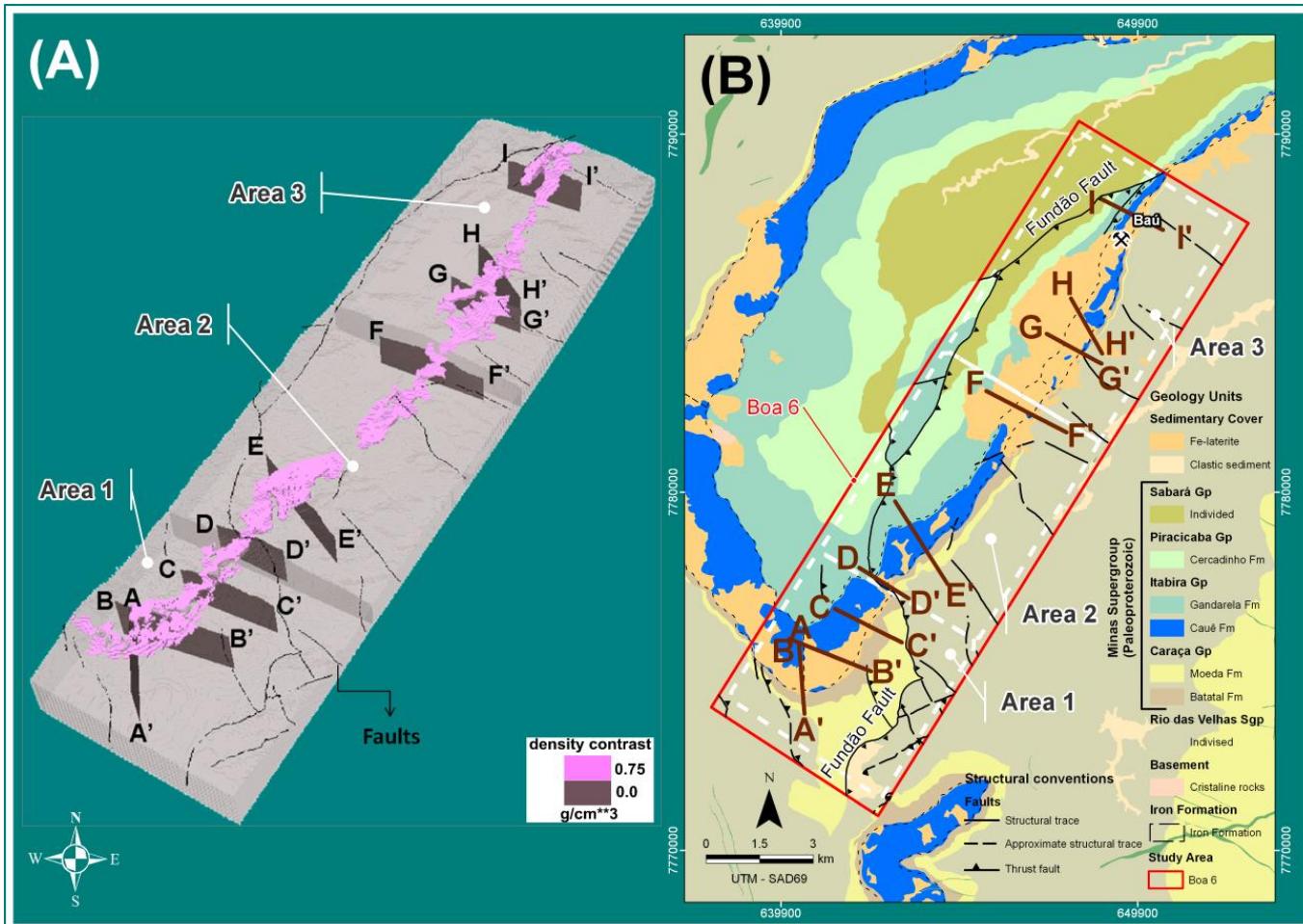


Figura 10-8. (A) Vista tridimensional da distribuição dos contrastes de densidade estimada (em rosa) com o único contraste de densidade $0,75 \text{ g/cm}^3$ que corresponde ao contraste presumido para o corpo de minério de ferro da Formação Cauê. Esta estimativa é obtida invertendo todas as componentes do tensor do gradiente de gravidade das Áreas 1-3 mostradas nas Figuras 10-2 a 10-4 (mapas do painel superior). (B) Mapa geológico da área de estudo mostrando as Áreas 1-3. As linhas em cor marrom nomeadas de A-A'- I-I' indicam os locais das seções transversais verticais descritas nas Figuras 10-11, 10-13 e 10-15.

A Figura 10-9(A) mostra uma vista 3D da estimativa dos contrastes de densidade utilizando o método de inversão de LI (2001) para cada uma das Áreas 1-3. Observamos ainda que através da estimativa do método de LI (2001) não é possível delimitar a geometria 3D do corpo de minério de ferro, uma vez que o método de inversão de LI (2001) produz uma estimativa suavizada da distribuição dos contrastes de densidade do meio. Note, no entanto, que os maiores valores estimados do contraste de densidade (Figura 10-9A) via inversão de LI (2001) coincidem com o corpo estimado do minério de ferro via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012) mostrado na Figura 10-8(A). Estas duas estimativas sugerem que a mineralização de minério de ferro é rasa e tem uma forma alongada de direção nordeste-sudoeste. Diferentemente do resultado do método de UIEDA e BARBOSA (2012) mostrado na Figura 10-8(A), a solução via inversão de LI (2001) não apresenta segmentação da estimativa de contraste de densidade entre as seções E-E' e F-F' (Figura 10-9A).

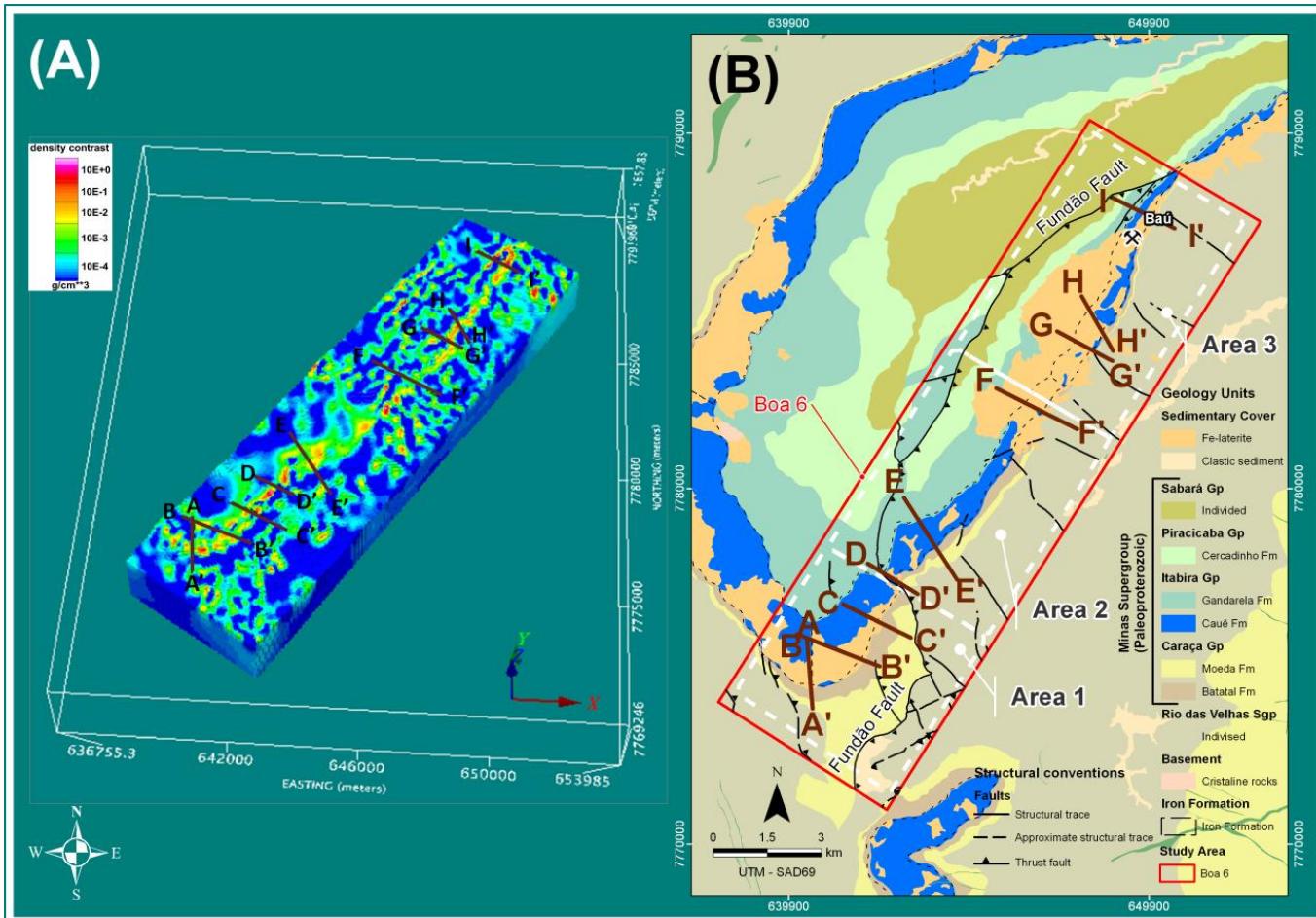


Figura 10-9. (A) Vista tridimensional da distribuição dos contrastes de densidade estimada com o método de LI (2001). Esta estimativa é obtida invertendo três componentes do tensor do gradiente de gravidade das Áreas 1-3 mostradas nas Figuras 10-5 a 10-7 (mapas do painel superior). (B) Mapa geológico da área de estudo mostrando as Áreas 1-3. As linhas em cor marrom nomeadas de A-A'- I-I' indicam os locais das seções transversais verticais descritas nas Figuras 10-12, 10-14 e 10-16.

Ao comparar o mapa geológico (Figuras 10-8B e 10-9B) com a geometria 3D estimada do corpo de minério de ferro (Figura 10-8A) via UIEDA e BARBOSA (2012) e com os maiores valores estimados do contraste de densidade (Figura 10-9A) via inversão de LI (2001), verifica-se a forte correlação entre as estimativas e o afloramento do minério de ferro da Formação Cauê sobre o sinclinal Gandarela. Embora o mapa geológico não mostre o minério de ferro aflorante da Formação Cauê na transição entre as Áreas 2 e 3 (Figuras 10-8B e 10-9B), as estimativas mostradas nas Figuras 10-8(A) e 10-9(A) revelam depósitos de minério de ferro sub-aflorante. De acordo com o mapa geológico, neste lugar, os depósitos de minério de ferro são mascarados pela cobertura de canga compostos por altas concentrações de óxidos e hidróxidos de ferro.

De acordo com o mapa geológico regional (Figura 7-3), a falha do Fundão controla parte do depósito de minério de ferro no sinclinal Gandarela. Contudo, este controle não ocorre na área de estudo como se observa no mapa geológico detalhado (Figuras 10-8B e 10-9B). Esta hipótese foi corroborada neste capítulo, uma vez que as estimativas obtidas usando os dois métodos de inversão (Figuras 10-8A e 10-9A) sugerem que a falha do Fundão não controla o corpo de minério de ferro nessa área de estudo. Adicionalmente, nota-se um aumento no volume estimado do minério de ferro na porção mais a sudoeste, o que é confirmado pelo mapa geológico detalhado (Figuras 10-8B e 10-9B). Provavelmente, este aumento é controlado pelo sinclinal Gandarela. Nota-se que esse aumento do volume do minério de ferro é claramente verificado na estimativa obtida via o método de UIEDA e BARBOSA (2012) (Figura 10-8A), uma vez que este método estima apenas um único valor diferente de zero para o contraste de densidade. Ao contrário, o método de LI (2001) estima uma distribuição suave dos contrastes de densidade (Figura 10-9A) que mascara um possível aumento de volume estimado do minério de ferro.

A Figura 10-10 mostra diferentes vistas de seções verticais ao longo da distribuição dos contrastes de densidade estimada pelo método de UIEDA e BARBOSA (2012) (Figura 10-8A). Esta imagem, em profundidade, revela que a estimativa do corpo de minério de ferro é predominantemente compacta com uma profundidade variável. A profundidade máxima estimada do corpo de minério de ferro é de cerca de 250 metros.

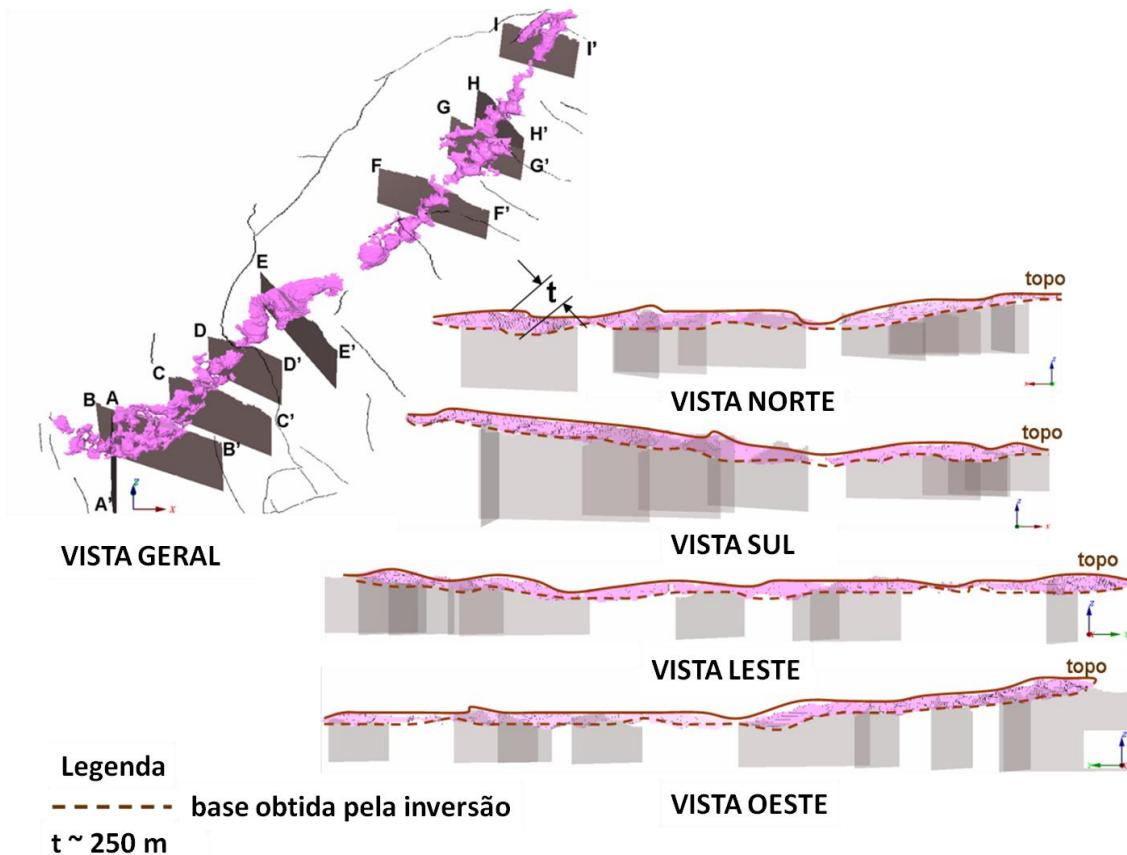


Figura 10-10. Seções verticais ao longo do *strike* do corpo de minério de ferro estimado mostrando a espessura recuperada através da inversão de UIEDA e BARBOSA (2012). A inserção a esquerda mostra a vista em perspectiva 3D do corpo de minério de ferro estimado via UIEDA e BARBOSA (2012).

A característica mais evidenciada pela estimativa obtida via o método de UIEDA e BARBOSA (2012) (Figura 10-10) é a quebra da formação ferrífera na parte central da área de estudo. Este resultado é razoável e parece ser controlado por um sistema de falhas noroeste-sudeste que segmenta esta região. Os mapas apresentados no painel

central nas Figuras 10-2 a 10-4 mostram os dados preditos pela estimativa da distribuição dos contrastes de densidade via UIEDA e BARBOSA (2012) mostrada nas Figuras 10-8(A) e Figura 10-10. Note que as seis componentes preditas ajustam razoavelmente as correspondentes componentes observadas. Para as seis componentes, a estimativa de UIEDA e BARBOSA (2012) mostrou-se capaz de ajustar a feição alongada da direção nordeste-sudoeste associada com os depósitos de minério ferro que são os alvos de prospecção e também capaz de ignorar com êxito outros sinais produzidos presumivelmente por outras fontes que não são alvos de prospecção. Nas Figuras 10-2 a 10-4 os mapas no painel inferior, mostrando os mapas de resíduos (diferença das componentes observadas e preditas), revelaram pequenos resíduos ao longo da Formação Cauê (alvo de prospecção) com direção nordeste-sudoeste e grandes resíduos nas demais áreas produzidos pelas fontes não-alvo de prospecção. Este tipo de ajuste dos dados adotado em UIEDA e BARBOSA (2012) é chamado de ajuste robusto e permite a escolha de fontes alvos para a interpretação sem ter que isolar o sinal geofísico produzido por estes alvos antes de proceder com a inversão. Observe que o método de inversão de UIEDA e BARBOSA (2012) tem a vantagem de não requerer nenhuma informação das fontes que não são alvos de exploração tais como seus contrastes de densidade e suas profundidades. Assim, o método de UIEDA e BARBOSA (2012), não necessita de pré-processamento de dados para remover os sinais de gradiente de gravidade produzidos pelas fontes que não são alvos de exploração. Este fato torna o método de UIEDA e BARBOSA (2012) operacionalmente simples.

O método de LI (2001) apesar de não evidenciar a segmentação da formação ferrífera entre as seções verticais E-E' e F-F' (Figura 10-9B) mostrou um corpo de minério de ferro alongado na direção nordeste-sudeste e tal como o método de UIEDA e

BARBOSA (2012) indicou que a máxima profundidade alcançada pelo minério de ferro não é superior a 250 metros. Os mapas de resíduos (mapas no painel inferior das Figuras 10-5 a 10-7) mostram que a estimativa do método de Li (2001) ajusta as três componentes invertidas. Para a obtenção deste ajuste razoável, fez-se necessário estabelecer um valor negativo para o limite mínimo do contraste de densidade - 0,1 g/cm³ a ser estimado via inversão de LI (2001).

10.4 Resultados detalhados

Para validar as geometrias 3D da formação de minério de ferro estimadas pelas inversões (Figuras 10-8A e 10-9A) apresentamos uma análise detalhada baseada na integração das informações de furos geológicos e das estimativas da distribuição dos contrastes de densidade.

Na área de estudo, 151 furos exploratórios foram perfurados com profundidades variáveis. Nessa tese utilizamos dados de sondagem geológica de 20 furos exploratórios. Foram elaboradas nove seções verticais das estimativas das distribuições de contraste de densidade (Figuras 10-8A e 10-9A) cujas localizações são coincidentes ou estão nas proximidades das coordenadas horizontais de um ou mais furos de sondagem disponíveis. As localizações das nove linhas que representam as seções transversais (A-A'- I-I' nas Figuras 10-8 a 10-10) e as coordenadas horizontais dos 20 furos de sondagem geológica são apresentadas nas Figuras 10-11A, 10-13A e 10-15A para as análises das inversões de UIEDA e BARBOSA (2012) e nas Figuras 10-12A, 10-14A e 10-16A para as análises das inversões de LI (2001).

Iniciamos a análise detalhada através da comparação das litologias nos intervalos mais superficiais dos furos com as unidades mapeadas pelo mapeamento geológico da área de estudo. Esta comparação objetiva correlacionar as unidades

superficiais mapeadas com as descrições litológicas em subsuperfície. Em seguida, extraímos nove seções verticais das distribuições dos contrastes de densidade estimadas via UIEDA e BARBOSA (2012) e LI (2001). Finalmente, cada um dos registros litológicos dos furos de sondagem, cujas coordenadas horizontais coincidem com uma seção vertical da distribuição dos contrastes de densidade estimada, foi sobreposto às estimativas obtidas pelas inversões de UIEDA e BARBOSA (2012) e LI (2001). Os dados dos furos de sondagem geológica que não coincidem mas que estão próximos a uma seção vertical da estimativa foram projetados sobre essa estimativa para facilitar a análise em relação ao contexto geológico da área.

Comparando as formas do minério de ferro estimadas via as inversões de UIEDA e BARBOSA (2012) e LI (2001) - (Figuras 10-8A e 10-9A) - com os dados de registros litológicos dos 20 furos de sondagem, pode-se validar (ou não) essas estimativas. Para esta comparação, as Figuras 10-11 a 10-16 ilustram a sobreposição dos dados de registros litológicos dos furos de sondagem e as geometrias do minério de ferro estimadas nas Áreas 1-3 obtidas pelas inversões de UIEDA e BARBOSA (2012) e LI (2001). Nas Figuras 10-11(A) a 10-16(A) estão representados os locais dos furos (círculos amarelos) e das seções verticais (linhas brancas) das distribuições dos contrastes de densidade estimadas. Nestas figuras, os mapas representam a componente do tensor do gradiente de gravidade G_{zz} produzida pelas respectivas distribuições de densidade. Os triângulos em branco nas Figuras 10-11(A), 10-13(A) e 10-15(A) são as projeções horizontais de todas as sementes utilizadas na aplicação do método de UIEDA e BARBOSA (2012).

As seções verticais com as estimativas dos contrastes de densidade (áreas coloridas) e os intervalos litológicos dos furos (faixas coloridas) são mostrados nas Figuras 10-11(B) a 10-16(B), nas Figuras 10-11(C) a 10-16(C) e nas Figuras 10-11(D) a

10-16(D). Como as formações de ferro são compostas de itabiritos e hematititos, as rochas utilizadas para a exploração são os: (1) os hematititos friáveis, semi-compactos e compactos e (2) os itabiritos friáveis, semi-compactos e compactos. Então, espera-se que os maiores valores estimados dos contrastes de densidade representem o minério de ferro. No caso da inversão via UIEDA e BARBOSA (2012), o valor atribuído ao contraste de densidade é $0,75 \text{ g/cm}^3$ (em rosa nas Figuras 10-11, 10-13 e 10-15) e no caso da inversão via LI (2001) o maior valor estimado do contraste de densidade é variado, tal como mostram as Figuras 10-12, 10-14 e 10-16. Conseqüentemente, espera-se uma coincidência dos maiores valores estimados dos contrastes de densidade com a presença nos furos de sondagem dos hematititos friáveis, semi-compactos e compactos e itabiritos friáveis, semi-compactos e compactos.

10.4.1 Resultados detalhados da Área 1

As Figuras 10-11 e 10-12 mostram, para a Área 1, uma análise integrada dos dados dos registros litológicos dos furos de sondagem geológica e dos resultados obtidos das inversões dos métodos de UIEDA e BARBOSA (2012) e LI (2001). Para analisar os resultados das inversões, foram selecionados os intervalos litológicos de nove furos de sondagem geológica e três seções verticais (A-A', B-B' e C-C') perpendiculares à direção (*strike*) do minério de ferro estimado por ambas as inversões. As localizações destas seções são mostradas nas Figuras 10-11(A) e 10-12(A) em linhas brancas.

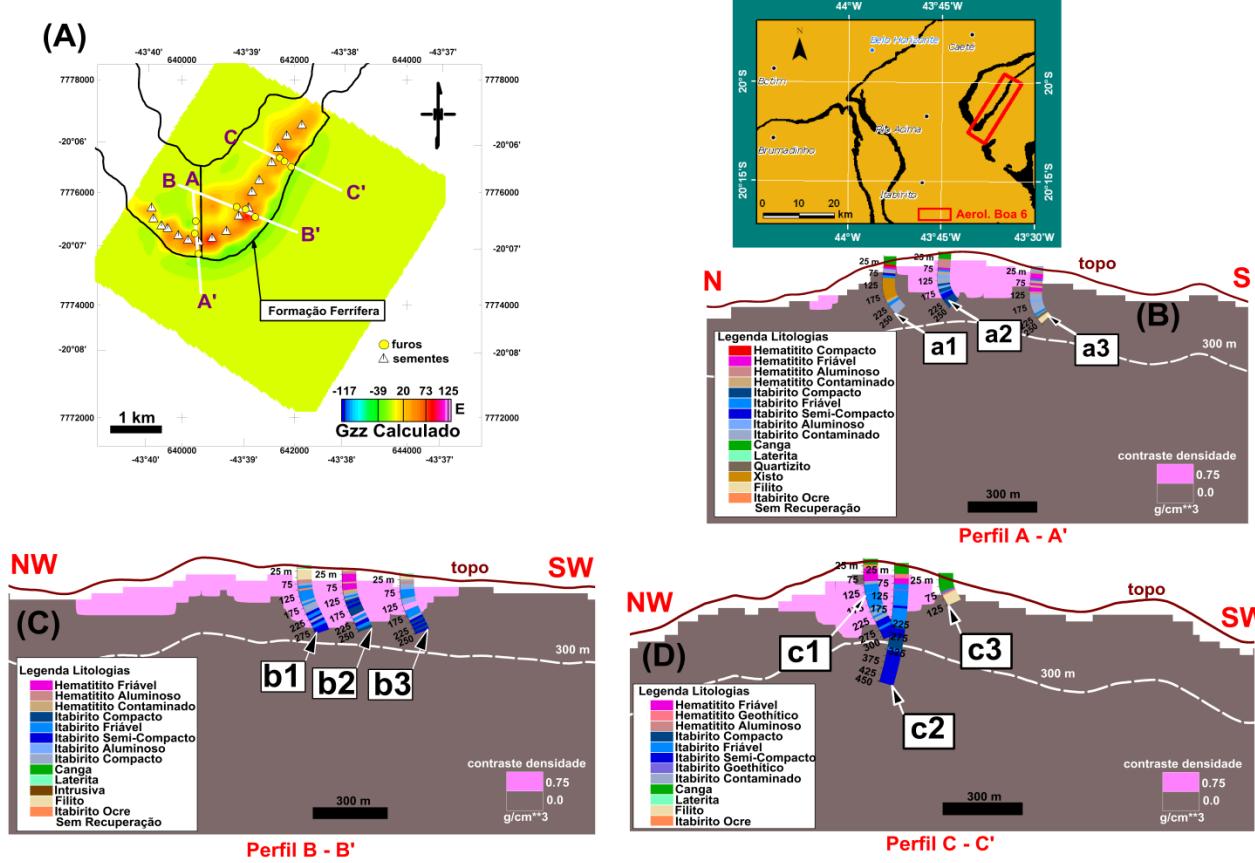


Figura 10-11. (A) Componente G_{zz} calculada do tensor do gradiente de gravidade utilizando o método de UIEDA e BARBOSA (2012) para a Área 1. As linhas brancas A-A', B-B' e C-C' mostram a localização das seções verticais apresentadas em (B), (C) e (D), respectivamente. Os círculos em cor amarela e os triângulos brancos mostram, respectivamente, a posição dos furos de sondagem geológica e as sementes utilizadas na inversão geofísica utilizando o método de UIEDA e BARBOSA (2012). As seções verticais ao longo dos perfis (B) A-A', (C) B-B' e (D) C-C' apresentam as distribuições estimadas dos contrastes de densidade (em rosa) com um único contraste de densidade de $0,75 \text{ g/cm}^3$. As faixas coloridas em (B)-(D) representam os intervalos geológicos cortados pelos furos (a1-a3, b1-b3, c1-c3). O polígono vermelho no mapa, canto superior direito da figura, mostra a localização da área de estudo no Quadrilátero Ferrífero.

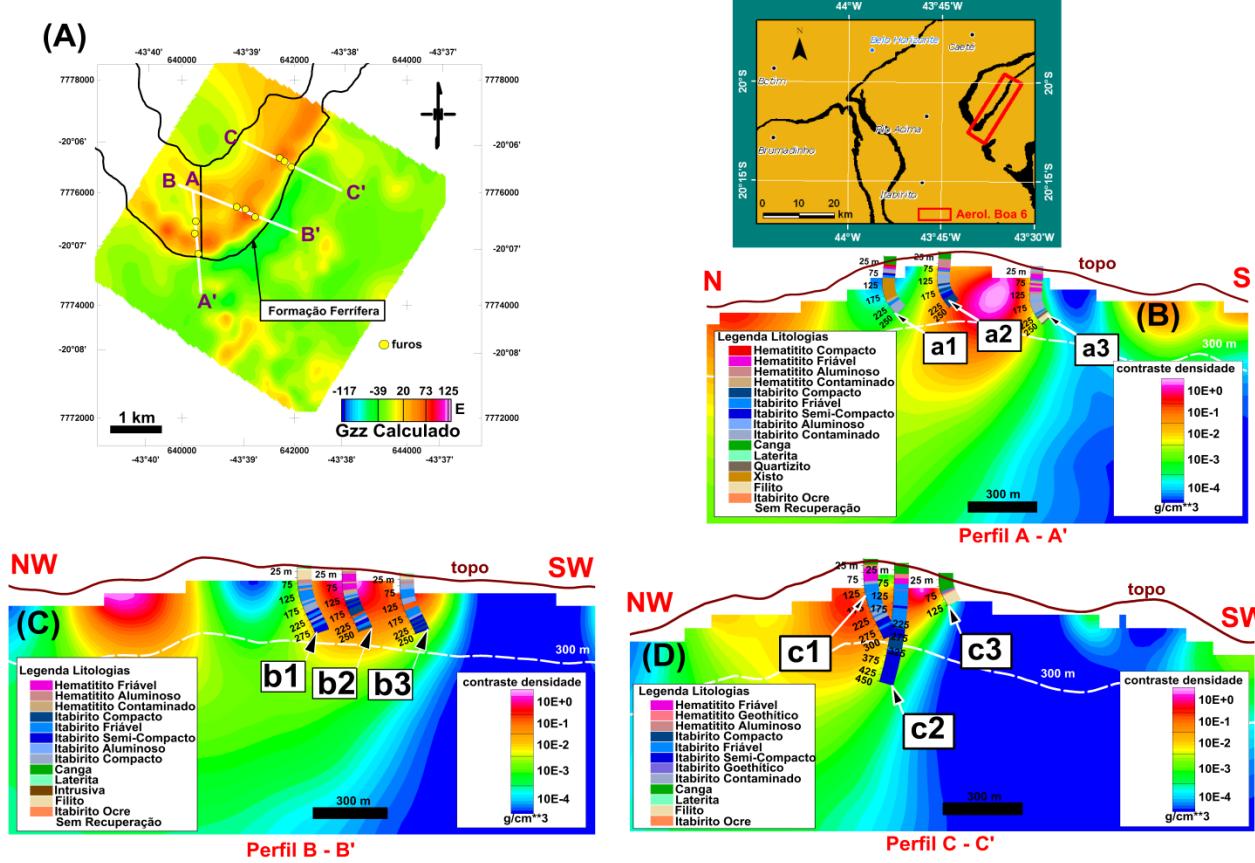


Figura 10-12. (A) Componente G_{zz} calculada do tensor do gradiente de gravidade utilizando o método de LI (2001) para a Área 1. As linhas brancas A-A', B-B' e C-C' mostram a localização das seções verticais apresentadas em (B), (C) e (D), respectivamente. Os círculos em cor amarela mostram a posição dos furos de sondagem geológica. As seções verticais ao longo dos perfis (B) A-A', (C) B-B' e (D) C-C' apresentam as distribuições estimadas dos contrastes de densidade pelo método de LI (2001). As faixas coloridas em (B)-(D) representam os intervalos geológicos cortados pelos furos (a1-a3, b1-b3, c1-c3). O polígono vermelho no mapa, canto superior direito da figura, mostra a localização da área de estudo no Quadrilátero Ferrífero.

As Figuras 10-11(B) e 10-12(B) mostram, para a seção vertical A-A' que coincidem com três furos de sondagem (a1-a3), as estimativas dos contrastes de densidade obtidas via inversões de UIEDA e BARBOSA (2012) e LI (2001), respectivamente. O furo de sondagem a1 atingiu a profundidade de 250 m. Este furo perfurou uma camada de 34 m de espessura de rochas não-alvo de exploração (canga), seguida de uma seqüência de rochas alvo composta por camadas de hematititos friáveis e compactos de 21 metros de espessura e por camadas de aproximadamente 39 metros de espessura de itabiritos friáveis, semi-compactos e compactos. Em profundidades superiores a 100 metros, o furo a1 perfurou uma seqüência de rochas que não são alvos de exploração tais como xistos e filitos. O furo a2, com uma profundidade total de perfuração de 250 m, também perfurou uma camada superficial de rochas não-alvo (e.g., canga e itabiritos contaminados), mas em seguida perfurou uma sequência de rochas alvos composta por itabiritos e hematititos semi-compactos e compactos. Finalmente, o furo a3 atravessou uma sequência de camadas predominantemente compostas por rochas não-alvo de exploração tais como filitos, quartzitos e itabiritos contaminados até à profundidade máxima de cerca de 250 metros.

Na Figura 10-11(B), a distribuição dos contrastes de densidade estimada (área rosa) utilizando o método de UIEDA e BARBOSA (2012) indica a existência de massas de minério de ferro na região entre os furos de sondagem geológica a1 e a2. Observa-se que essa estimativa mostra que o depósito de minério de ferro não se estende para o sul. Ao contrário, a estimativa do método de UIEDA e BARBOSA (2012) indica a presença de minério de ferro na porção setentrional do perfil do A-A' que poderá ser confirmada se um novo furo de sondagem for perfurado. Vale observar que a estimativa (área rosa)

utilizando o método de UIEDA e BARBOSA (2012) não foi capaz de recuperar a fina camada de poucos metros de rochas alvos do furo de sondagem a1.

Na Figura 10-12(B), a estimativa dos contrastes de densidade via LI (2001), para a seção vertical A-A', indica a presença do minério de ferro na região entre os furos a2 e a3. Note que este resultado concorda com a estimativa obtida via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012) mostrada na Figura 10-11(B). Observe que a estimativa do contraste de densidade via inversão de LI (2001) mergulha claramente para a direção norte (Figura 10-12B). Note que este mergulho não é visível no resultado do método de UIEDA e BARBOSA (2012).

As Figuras 10-11(C) e 10-12(C) mostram, para a seção vertical B-B' que coincidem com três furos de sondagem (b1-b3), as estimativas das distribuições dos contrastes de densidade obtidas via inversões de UIEDA e BARBOSA (2012) e LI (2001), respectivamente. Na Figura 10-11(C) a distribuição dos contrastes de densidade estimada pelo método de UIEDA e BARBOSA (2012) é consistente com os intervalos litológicos (faixas coloridas) dos furos b1, b2 e b3. Note que estes três furos perfuraram predominantemente rochas alvos para a exploração tais como hematititos e itabiritos. De acordo com a porção setentrional do perfil A-A' (Fig. 10-11B), a estimativa do método de UIEDA e BARBOSA (2012) (área em rosa na Figura 10-11C) mostra que o depósito de minério de ferro se estende até a parte noroeste do perfil B-B'. Note que as maiores estimativas do contraste de densidade via inversão de LI (2001) são consistentes com os itabiritos e hematititos interceptados pelos furos b1, b2 e b3. No perfil B-B' a distribuição dos contrastes de densidade estimada pelo método de LI (2001) sugere um mergulho da camada de minério de ferro para a direção noroeste (Figura 10-12C). A maior diferença entre as estimativas dos métodos de LI (2001) e UIEDA e BARBOSA (2012) no perfil B-B' é a continuidade da estimativa da formação ferrífera na direção

noroeste deste perfil. Na Figura 10-12C a distribuição dos contrastes de densidade pelo método de LI (2001) mostra uma quebra na continuidade da formação ferrífera ao longo da direção noroeste, enquanto que a estimativa do método de UIEDA e BARBOSA (2012) mostra uma continuidade da formação ferrífera ao longo desta direção (Figura 10-11C).

Na seção vertical C-C', que coincide com os três furos de sondagem geológica (c1-c3), as Figuras 10-11(D) e 10-12(D) mostram as estimativas das distribuições dos contrastes de densidade obtidos pelos métodos de UIEDA e BARBOSA (2012) e LI (2001), respectivamente. Observa-se que a distribuição dos contrastes de densidade estimada pelo método de UIEDA e BARBOSA (2012) (área rosa na Figura 10-11D) concorda com o furo c1 que corta, predominantemente, itabiritos (friáveis, compactos e semi-compactos) e hematititos (friáveis e contaminados). O furo c2 é o mais profundo da seção C-C' e foi perfurado até 450 metros de profundidade. Este furo interceptou camadas de canga, hematititos friável e goethítico e atravessou uma espessura considerável de itabirito semi-compacto. Nota-se que a distribuição dos contrastes de densidade estimada pelo método de UIEDA e BARBOSA (2012) (área rosa na Figura 10-11D) não estimou a massa de minério de ferro em subsuperfície próxima ao furo c3. Esta ausência de massa de ferro concorda razoavelmente bem com o furo c3 que perfurou uma rocha não-alvo para a exploração de ferro (camada de canga). Note que neste perfil C-C' a distribuição dos contrastes de densidade estimada pelo método de UIEDA e BARBOSA (2012) sugere a existência de um corpo de minério de ferro mergulhando suavemente para a direção noroeste (Figura 10-11D). Ressaltamos que a estimativa da distribuição dos contrastes de densidade de LI (2001) para a seção C-C' (Figura 10-12D) concorda muito bem com a estimativa do método de UIEDA e BARBOSA (2012) mostrada na Figura 10-11D. Note que a solução do método de LI

(2001), para a seção C-C', evidencia mais claramente o mergulho da estimativa do corpo do minério de ferro para a direção noroeste (Figura 10-12D).

Uma característica marcante nos três perfis da Área 1 (A-A', B-B' e C-C' nas Figuras 10-11B-D e 10-12B-D) é a existência de uma camada de canga recobrindo esta região de charneira do sinclinal Gandarela (Figuras 10-8A e 10-9A). No entanto, ressalta-se que as distribuições dos contrastes de densidade estimadas tanto pelo método de UIEDA e BARBOSA (2012) como pelo método de LI (2001) sugerem minério de ferro em subsuperfície. Vale ressaltar que a existência tanto de uma camada rasa de rochas não-alvo (canga) como de camadas mais profundas de rochas alvo (hematititos e itabiritos) para a exploração de ferro foi confirmada pela maioria dos furos de sondagem geológica na Área 1. Outra característica na Área 1 revelada pelas estimativas das distribuições dos contrastes de densidade é o mergulho do corpo de minério de ferro em direção ao eixo (direção noroeste) do sinclinal Gandarela.

10.4.2 Resultados detalhados da Área 2

As Figuras 10-13 e 10-14 mostram, para a Área 2, uma análise integrada dos dados dos registros litológicos dos furos de sondagem geológica e dos resultados obtidos das inversões de UIEDA e BARBOSA (2012) e LI (2001). Para analisar os resultados das inversões, selecionamos os intervalos litológicos de cinco furos de sondagem geológica e três seções verticais (D-D', E-E' e F-F') perpendiculares à direção (*strike*) do minério de ferro estimado por ambas as inversões. As localizações destas seções são mostradas nas Figuras 10-13(A) e 10-14(A) em linhas brancas.

Nas Figuras 10-13(B) e 10-14(B) o furo d1 interceptou uma camada de canga próxima à superfície e uma espessa camada de itabirito friável de aproximadamente 125 metros de espessura. Este furo coincide com a seção vertical D-D'. Nesta seção, pode-se

notar que a distribuição estimada dos contrastes de densidade pelo método de UIEDA e BARBOSA (2012) (cor rosa) mostra uma camada de ferro que se estende das proximidades do furo d1 até aproximadamente 400 metros em direção ao noroeste do perfil D-D' com uma espessura de aproximadamente 100 metros. Esta estimativa indica a existência de massas de minério de ferro que se estendem para a direção noroeste do perfil D-D'. Desconsiderando o vazio das células devido à discretização do modelo digital de terreno, observe que a estimativa do método de UIEDA e BARBOSA (2012) (área rosa na Figura 10-13B) concorda parcialmente com a espessura do minério de ferro nessa região do perfil D-D'. Por outro lado, a estimativa da distribuição dos contrastes de densidade do método de LI (2001) mostrada na Figura 10-14B não concorda com a informação do furo d1. Note na Figura 10-14B que as maiores estimativas do contraste de densidade estão restritas a uma pequena área de aproximadamente 200 metros de extensão horizontal localizada no centro do perfil D-D'. Diferentemente da Área 1 em que as estimativas dos contrastes de densidade de LI (2001) mostraram claramente o mergulho do minério de ferro para a direção noroeste, no perfil D-D' da Área 2 a estimativa da distribuição dos contrastes de densidade sugere a existência de um corpo vertical de minério de ferro.

As Figuras 10-13(C) e 10-14(C) mostram, para a seção vertical E-E', as estimativas das distribuições dos contrastes de densidade obtidas pelos métodos de UIEDA e BARBOSA (2012) e de LI (2001), respectivamente. A seção vertical E-E' coincide com dois furos de sondagem geológica (e1 e e2) que atravessaram uma sequência de camadas de itabiritos e de hematititos que são compostas principalmente de itabiritos friáveis, semi-compactos e contaminados e de hematítito compacto. Nesta seção E-E', a distribuição dos contrastes de densidade estimada via UIEDA e BARBOSA (2012) (área rosa na Figura 10-13C) recupera uma massa espessa de

minério de ferro, cuja profundidade máxima atinge aproximadamente 300 m. Similarmente, os maiores valores estimados do contraste de densidade pelo método de LI (2001) sugerem a existência de uma massa espessa de minério de Ferro (Figura 10-14C).

Nas proximidades do furo e1, as estimativas dos métodos tanto de UIEDA e BARBOSA (2012) como de LI (2001) indicam a existência de minério de ferro em profundidades superiores a 100 metros que é a máxima profundidade deste furo. Por outro lado, nas proximidades do furo e2 que perfura camadas de minério de ferro até a profundidade de 325 metros, a estimativa do método de UIEDA e BARBOSA (2012) falha indicando a existência de uma camada rasa de minério de ferro (Figura 10-13C). Ao contrário, a estimativa da distribuição dos contrastes de densidade pelo método de LI (2001) concorda com a profundidade do minério de ferro perfurada pelo furo e2 (Figura 10-14C).

As Figuras 10-13(D) e 10-14(D) mostram as estimativas das distribuições dos contrastes de densidade obtidas, respectivamente, pelos métodos de UIEDA e BARBOSA (2012) e de LI (2001) ao longo seção vertical F-F'. Esta seção coincide com dois furos de sondagem geológica (f1 e f2). Nota-se que o furo f1 interceptou camadas de laterita, itabirito friável e hematítito e o furo f2 atravessou camadas de canga, itabiritos ocre e friável. A estimativa da distribuição dos contrastes de densidade via o método de UIEDA e BARBOSA (2012) recuperou a espessura do minério de ferro na região do furo f2, porém, não recuperou na região do furo f1. Os mesmos resultados são observados na estimativa via inversão de LI (2001). A não recuperação do minério de ferro na região do furo f1 por ambos os métodos de inversão pode ser explicada pela presença de uma camada de rochas não alvo (e.g., laterita) sobreposta a uma fina camada de rochas alvo. Observe, ao longo do perfil F-F', que as estimativas dos

contrastos de densidade obtidas tanto pelo método de UIEDA e BARBOSA (2012) como por LI (2001) indicam um mergulho do minério de ferro na direção sudoeste.

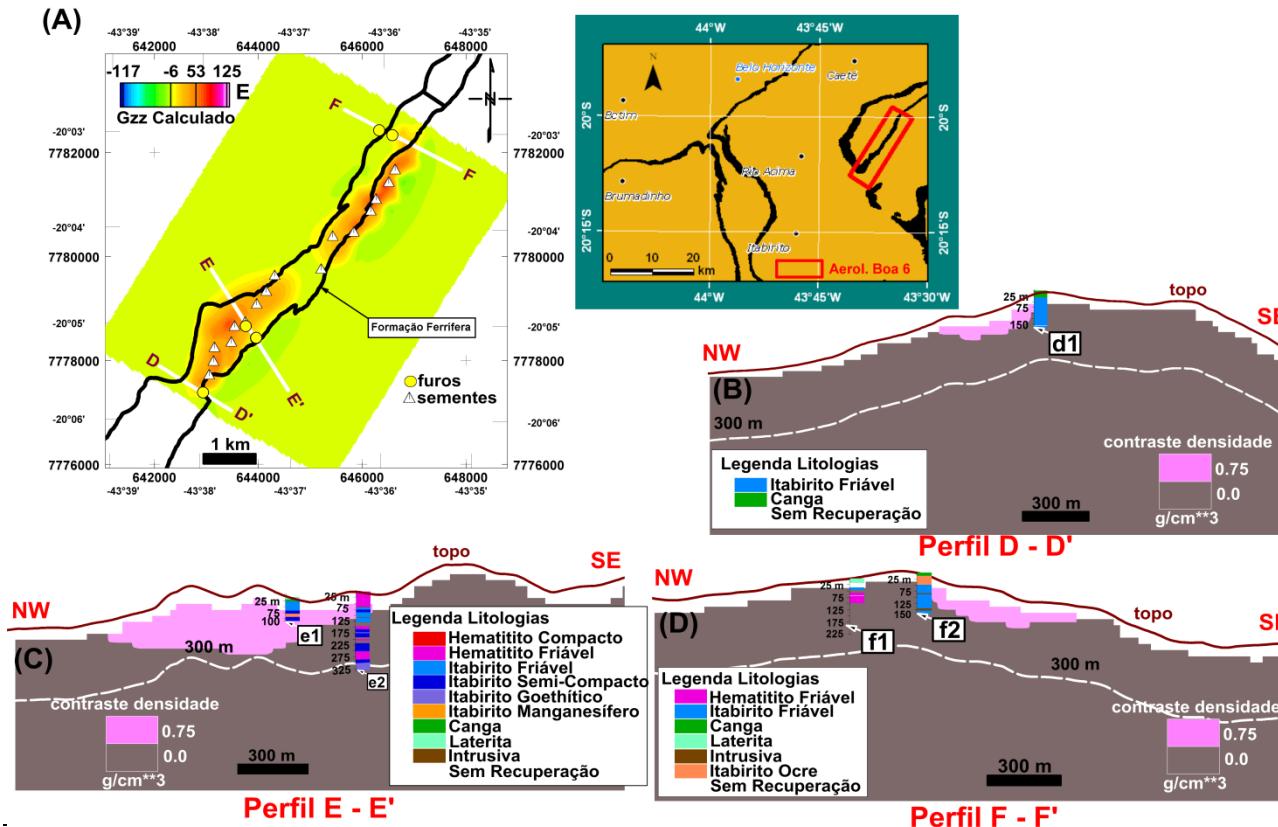


Figura 10-13. (A) Componente G_{zz} calculada do tensor do gradiente de gravidade utilizando o método de UIEDA e BARBOSA (2012) para a Área 2. As linhas brancas D-D', E-E' e F-F' mostram a localização das seções verticais apresentadas em (B), (C) e (D), respectivamente. Os círculos em cor amarela e os triângulos brancos mostram, respectivamente, a posição dos furos de sondagem geológica e as sementes utilizadas na inversão geofísica utilizando o método de UIEDA e BARBOSA (2012). As seções verticais ao longo dos perfis (B) D-D', (C) E-E' e (D) F-F' apresentam as distribuições estimadas do contraste de densidade (em rosa) com um único valor de densidade de $0,75 \text{ g/cm}^3$. As faixas coloridas em (B)-(D) representam os intervalos geológicos cortados pelos furos (d1, e1-e2, f1-f2). O polígono vermelho no mapa mostrado no canto superior direito da figura apresenta a localização da área de estudo no Quadrilátero Ferrífero.

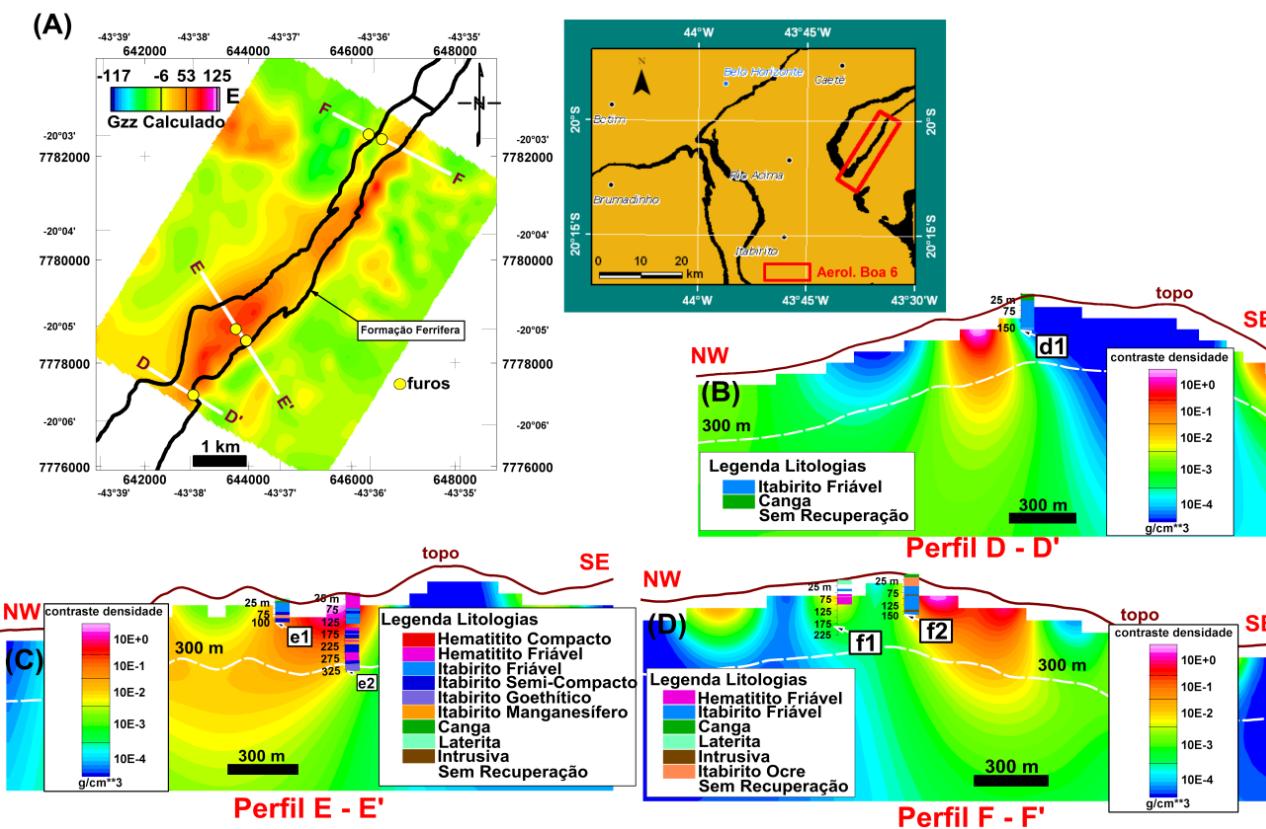


Figura 10-14. (A) Componente G_{zz} calculada do tensor do gradiente de gravidade utilizando o método de LI (2001) para a Área 2. As linhas brancas D-D', E-E' e F-F' mostram a localização das seções verticais apresentadas em (B), (C) e (D), respectivamente. Os círculos em cor amarela mostram a posição dos furos de sondagem geológica. As seções verticais ao longo dos perfis (B) D-D', (C) E-E' e (D) F-F' apresentam as distribuições estimadas dos contrastes de densidade pelo método de LI (2001). As faixas coloridas em (B)-(D) representam os intervalos geológicos cortados pelos furos (d1, e1-e2, f1-f2). O polígono vermelho no mapa mostrado no canto superior direito da figura apresenta a localização da área de estudo no Quadrilátero Ferrífero.

10.4.3 Resultados detalhados da Área 3

As Figuras 10-15 e 10-16 mostram, para a Área 3, uma análise integrada dos dados dos registros litológicos de furos de sondagem geológica e dos resultados obtidos das inversões de UIEDA e BARBOSA (2012) e LI (2001). Nesta análise, foram selecionadas três seções verticais (G-G', H-H' e I-I') perpendiculares à direção (*strike*) do minério de ferro estimado por ambas as inversões e cujas localizações são mostradas nas Figuras 10-15(A) e 10-16(A) em linhas brancas. Nesta análise utilizamos dados dos registros litológicos de seis furos de sondagem geológica e que estão representados por círculos na cor amarela nas Figuras 10-15(A) e 10-16(A).

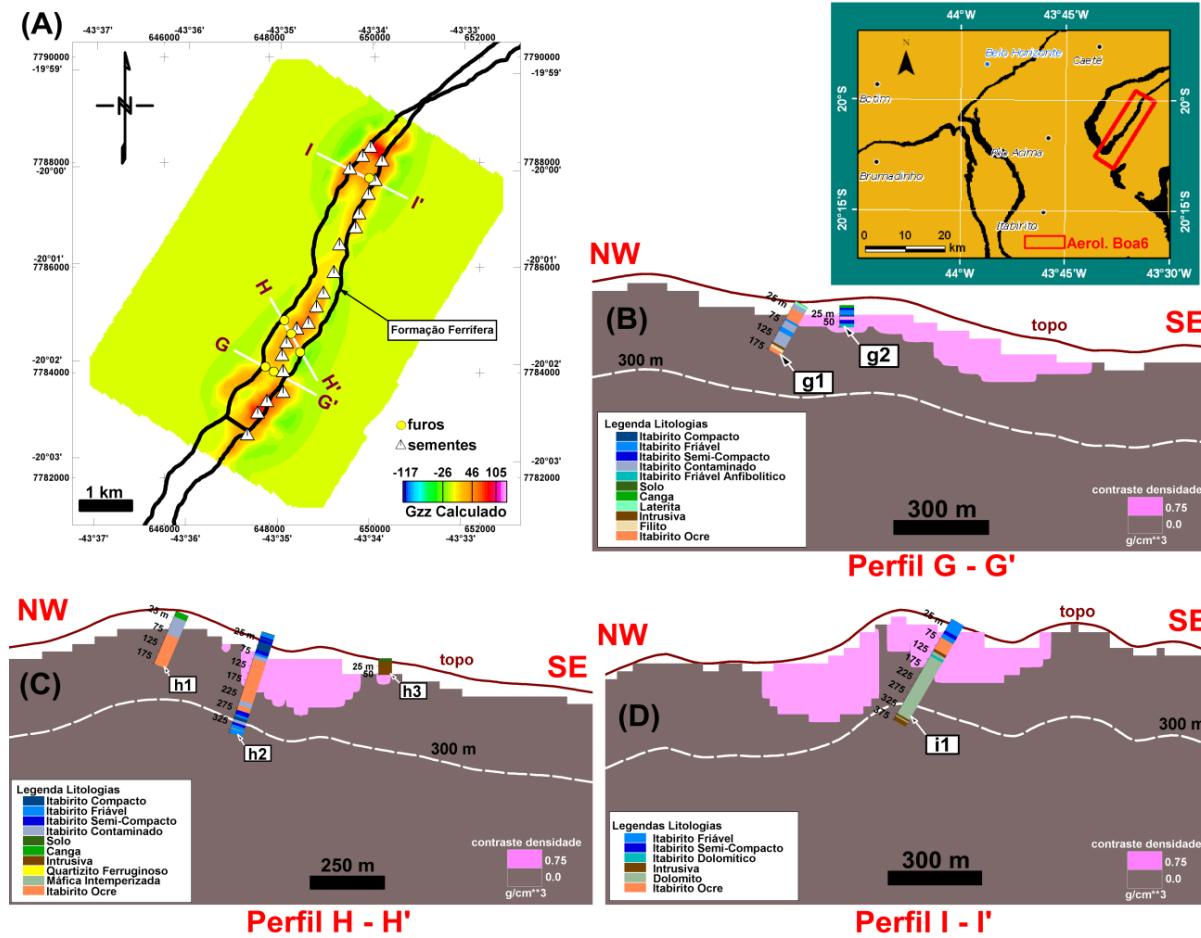


Figura 10-15. (A) Componente G_{zz} calculada do tensor do gradiente de gravidade utilizando o método de UIEDA e BARBOSA (2012) para a Área 3. As linhas brancas G-G', H-H' e I-I' mostram a localização das seções verticais apresentadas em (B), (C) e (D), respectivamente. Os círculos em cor amarela e os triângulos brancos mostram, respectivamente, a posição dos furos de sondagem geológica e as sementes utilizadas na inversão geofísica utilizando o método de UIEDA e BARBOSA (2012). As seções verticais ao longo dos perfis (B) G-G', (C) H-H' e (D) I-I' apresentam as distribuições estimadas do contraste de densidade (em rosa) com um único contraste de densidade de $0,75 \text{ g/cm}^3$. As faixas coloridas em (B)-(D) representam os intervalos geológicos cortados pelos furos (g1-g2, h1-h3, i1). O polígono vermelho no mapa, canto superior direito da figura, mostra a localização da área de estudo no Quadrilátero Ferrífero.

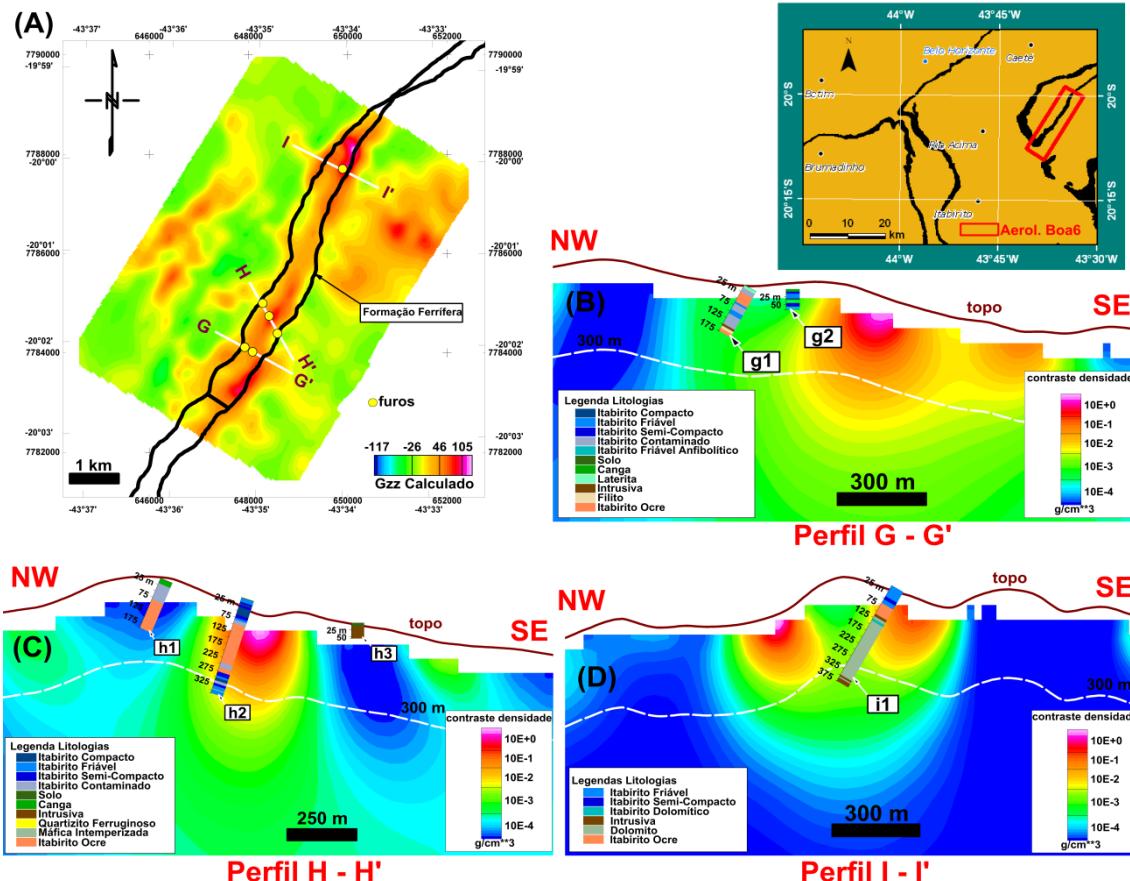


Figura 10-16. (A) Componente G_{zz} calculada do tensor do gradiente de gravidade utilizando o método de LI (2001) para a Área 3. As linhas brancas G-G', H-H' e I-I' mostram a localização das seções verticais apresentadas em (B), (C) e (D), respectivamente. Os círculos em cor amarela e os triângulos brancos mostram, respectivamente, a posição dos furos de sondagem geológica e as sementes utilizadas na inversão geofísica utilizando o método de LI (2001). As seções verticais ao longo dos perfis (B) G-G', (C) H-H' e (D) I-I' apresentam as distribuições estimadas dos contrastes de densidade pelo método de LI (2001). As faixas coloridas em (B)-(D) representam os intervalos geológicos cortados pelos furos (g1-g2, h1-h3, i1). O polígono vermelho no mapa, canto superior direito da figura, mostra a localização da área de estudo no Quadrilátero Ferrífero.

As Figuras 10-15(B) e 10-16(B) mostram as estimativas das distribuições dos contrastes de densidade obtidas, respectivamente, via os métodos de UIEDA e BARBOSA (2012) e LI (2001), ao longo da seção vertical G-G' que coincide com dois furos de sondagem (g1 e g2). O furo g2 atingiu a profundidade de aproximadamente 75 metros interceptando rochas não-alvo (canga) e rochas alvo (itabiritos friável, semi-compacto e compacto). Observa-se que em torno da coordenada horizontal do furo g2 a estimativa da distribuição dos contrastes de densidade obtida via a inversão de UIEDA e BARBOSA (2012) (cor rosa na Figura 10-15B) mostra que a profundidade máxima estimada para a parte inferior do corpo de minério de ferro é de cerca de 80 m. Assim, esta profundidade máxima estimada para a base do minério de ferro obtida através da inversão de UIEDA e BARBOSA (2012) coincide aproximadamente com a profundidade máxima atingida pelas rochas alvo do furo g2. Em contraste com furo g2 que é composto predominantemente por rochas alvos para a exploração de ferro, o furo g1 (Figura. 10-15B) interceptou 37 m de itabirito ocre seguido por 86 m em uma sucessão de itabiritos contaminado e friável. Nas proximidades da coordenada horizontal do furo de sondagem g1, nota-se que a estimativa da distribuição dos contrastes de densidade do método de UIEDA e BARBOSA (2012) (cor rosa na Figura 10-15B) recupera uma massa de ferro próxima à superfície. Conseqüentemente, nota-se que o método de UIEDA e BARBOSA (2012) não distingue as duas camadas delgadas de minério de ferro do furo g1. Este resultado é esperado porque é inevitável a perda de resolução dos dados de gradiente de gravidade com a profundidade. Nenhum método de inversão pode recuperar múltiplas e profundas camadas delgadas de minério de ferro. A estimativa da distribuição dos contrastes de densidade do método de LI (2001) na seção vertical G-G' (Figura 10-16B) mostra que na região dos furos de sondagem geológica

g1 e g2 esse método de inversão não recupera um contraste de densidade que permita a inferência sobre a presença de minério de ferro nessa região.

Uma característica marcante merece atenção na transição entre as Áreas 2 e 3. Na Área 3, a estimativa da distribuição dos contrastes de densidade (área rosa na Figura 10-15B) via método de UIEDA e BARBOSA (2012) mostra que a mineralização de minério de ferro não se estende para a direção noroeste do perfil G-G'. Ao contrário, a massa estimada de minério de ferro pelo método de UIEDA e BARBOSA (2012) se estende na direção sudeste do perfil G-G'. Esta orientação para sudeste da massa estimada de minério de ferro ao longo do perfil G-G' (Fig. 10-15B) localizado na Área 3 está em concordância com a orientação do corpo de minério de ferro estimado para a Área 2. No perfil F-F', localizado na Área 2, o método de UIEDA e BARBOSA (2012) também estima uma massa de minério de ferro (área rosa na Figura 10-13D) estendendo-se na direção sudeste. A falta de massa estimada de minério de ferro estendendo-se na direção noroeste é corroborada pelo furo g1 (Figura 10-15B), que não perfurou grandes massas de minério de ferro.

As Figuras 10-15(C) e 10-16(C) mostram as estimativas das distribuições dos contrastes de densidade obtidas, respectivamente, através dos métodos de UIEDA e BARBOSA (2012) e LI (2001), ao longo da seção vertical H-H' que coincide com três furos de sondagem geológica (h1-h3). Uma característica interessante para a análise desta seção é a presença de dois furos mais profundos (h1 e h2). As profundidades alcançadas pelas sondagens dos furos h1 e h2 foram de 175 m e 325 m, respectivamente. O furo h1 é caracterizado por rochas consideradas não-alvo para a exploração de ferro (canga, itabiritos contaminados e ocre). Observa-se que as estimativas dos contrastes de densidade obtidas pelos métodos de UIEDA e BARBOSA (2012) (Figura 10-15C) e de LI (2001) (Figura 10-16C) não estimaram a massa de

minério de ferro ao redor do furo de sondagem h1 mostrando concordância com as informações desse furo. O furo h2 atravessou duas seqüências compostas de camadas intercaladas de itabiritos friável e semi-compacto e compacto (rochas alvo) separadas por uma espessa camada de itabirito ocre (rocha não-alvo) com uma alta concentração de alumínio. A primeira sequência é caracterizada por camadas superficiais de itabiritos atingindo uma profundidade de aproximadamente 85 m. A segunda sequência é caracterizada por camadas profundas de itabiritos que são encontrados no intervalo de profundidade de 275-325 m. Como explicado anteriormente, os dados de gradiente de gravidade não apresentam resolução suficiente para recuperar duas camadas de minério de ferro em profundidades diferentes. Por isso, a distribuição dos contrastes de densidade estimada pelo método de UIEDA e BARBOSA (2012) (área rosa na Figura 10-15C) recuperou uma única massa de minério de ferro próxima à superfície, consistente com a resolução dos dados do gradiente de gravidade. O método de LI (2001) na região do furo h2 estimou uma distribuição dos contrastes de densidade que concordou com a estimativa do método de UIEDA e BARBOSA (2012). Similarmente a solução estimada via método de UIEDA e BARBOSA (2012) mostrada na Figura 10-15C, a estimativa via método de LI (2001) na região do furo h2 (Figura 10-16C) também não distinguiu as duas seqüências de rochas-alvo (itabiritos compactos, friáveis e semi-compactos) separadas por rochas não-alvo (solo, canga e quartzito ferruginoso) para a exploração de ferro. Na região do furo h3, a estimativa da distribuição dos contrastes de densidade via o método de UIEDA e BARBOSA (2012) recuperou massas de minério de ferro na superfície (área rosa na Figura 10-15C), no entanto o furo h3 interceptou rochas não-alvo para a exploração de ferro, indicando que a solução do método de UIEDA e BARBOSA (2012) nas proximidades do furo h3 falhou. No entanto, note que o furo h3 cortou uma camada de canga e uma rocha intrusiva que

apresentam alto contraste de densidade. Este alto contraste de densidade explica a estimativa de massa de ferro obtida pelo método de UIEDA e BARBOSA (2012) nas proximidades do furo h3. Os dados do gradiente de gravidade são sensíveis às densidades das rochas. Uma vez que o minério de ferro e as intrusivas podem ter a mesma densidade, é impossível diferenciar se os dados foram produzidos por minério de ferro ou por intrusivas. Por outro lado, a estimativa da distribuição dos contrastes de densidade utilizando o método de LI (2001) nas proximidades do furo h3 não apresenta valores positivos, não detectando, portanto, a presença da rocha intrusiva. Este fato é devido a discretização mais grosseira do modelo interpretativo usado na inversão de LI (2001). No entanto, vale observar que ambas as estimativas mostradas nas Figuras 10-15(C) e 10-16(C) concordam sobre a inexistência de rochas com alto contrastes de densidade em profundidade sejam elas rochas-alvo para a exploração ou rochas intrusivas.

Observa-se que ambos os perfis G-G' e H-H' (Figuras 10-15A e 10-16A) se localizam principalmente ao longo de uma área coberta por canga (Figuras 10-8B e 10-9B) com alta concentração de óxidos e hidróxidos de ferro e também de contaminantes como fósforo e alumina. Por este motivo a canga pode ser considerada uma rocha não-alvo para a prospecção de minério de ferro. No entanto, as estimativas das distribuições dos contrastes de densidade obtidas tanto pelo método de UIEDA e BARBOSA (2012) (Figuras 10-15B e 10-15-C) como pelo método de LI (2001) (Figuras 10-16B e 10-16-C) mostram a presença de minério de ferro em subsuperfície. Este fato é confirmado pelos furos de sondagem (g1, g2 e h2) que cortaram rochas alvo (minério de ferro) por debaixo da camada de canga ao longo desses perfis.

As Figuras 10-15(D) e 10-16(D) mostram as estimativas das distribuições dos contrastes de densidade obtidas, respectivamente, através dos métodos de UIEDA e

BARBOSA (2012) e LI (2001), ao longo da seção vertical I-I' que coincide com o furo de sondagem i1 cuja profundidade máxima de perfuração foi maior que 350 m. Este furo interceptou uma seqüência de 75 m de espessura de itabiritos friável e semi-compacto, itabirito ocre a uma profundidade de 75 a 100 m, e uma espessa camada de itabirito dolomítico a uma profundidade de aproximadamente 130 m a 330 m e uma camada de rocha intrusiva. As estimativas obtidas pelos métodos de UIEDA e BARBOSA (2012) e de LI (2001) mostradas, respectivamente, nas Figuras 10-15(D) e 10-16(D), recuperaram as camadas rasas do itabirito em concordância com a profundidade dos itabiritos perfurados pelo furo de sondagem i1. Adicionalmente, nota-se que ambos os métodos de inversão ao longo do perfil I-I' recuperaram uma distribuição de massa de minério de ferro localizada mais a noroeste do furo de sondagem i1. Note que nesse local não foi realizado nenhum furo de sondagem geológica para comprovação dessa massa de minério de ferro estimada pelas duas inversões (Figuras 10-15D e 10-16D).

11. Discussão dos Resultados

Neste capítulo discutiremos os resultados obtidos no Capítulo 10 das inversões dos dados de gradiometria gravimétrica utilizando os métodos de LI (2001) e UIEDA e BARBOSA (2012) para uma área com potencial de exploração de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero localizada na aba sul do sinclinal Gandarela. Apesar destes dois métodos de inversão estimarem imagens *voxel* da distribuição dos contrastes de densidade em subsuperfície, as soluções estimadas são muito diferentes uma vez que estes métodos incorporam diferentes informações *a priori* através de diferentes funções de regularização (Capítulo 5).

A seguir serão discutidas as características do depósito de ferro que foram reveladas pelas estimativas de LI (2001) e UIEDA e BARBOSA (2012) em virtude das diferentes informações *a priori* incorporadas por estes métodos. Em seguida, são discutidas as características semelhantes e contrastantes do depósito de ferro recuperado por estes dois métodos de inversão. Adicionalmente, são discutidas as limitações dos resultados. Finalmente, discute-se a melhor utilização dos resultados de inversão como guia no programa de sondagem exploratória.

11.1 Características do minério de ferro reveladas pelas estimativas dos métodos de LI (2001) e UIEDA e BARBOSA (2012) em virtude das diferentes informações *a priori*

O método de UIEDA e BARBOSA (2012) mostrou-se mais eficaz nas estimativas da geometria 3D e da massa do minério de ferro por apresentar uma característica importante, que é a possibilidade de apenas dois valores para o contraste

de densidade: zero ou o valor atribuído às sementes ($0,75 \text{ g/cm}^3$). Adicionalmente, o método de UIEDA e BARBOSA (2012) impõe compacidade à solução, isto significa que o corpo geológico estimado é um volume 3D compacto, não apresentando vazios em seu interior, como mostra a Figura 10-8A. Ao contrário, no método de LI (2001) as estimativas da geometria 3D e, consequentemente, da massa do minério de ferro são indefinidas (Figura 10-9A). Estas características são inerentes ao método de LI (2001) que estima uma distribuição suave dos contrastes de densidade. Neste trabalho consideramos que os maiores valores estimados dos contrastes de densidade via LI (2001) indicam o minério de ferro.

Desta forma a solução estimada por UIEDA e BARBOSA (2012) para o minério de ferro (Figura 10-8A) permitiu não somente a visualização tridimensional da geometria da formação ferrífera, mas também uma avaliação preliminar da massa de minério de ferro. Concretamente, através da estimativa de UIEDA e BARBOSA (2012) para o minério de ferro (Figura 10-8A) foi possível a obtenção do volume de 965 milhões de m^3 de minério na região do aerolevantamento de Boa 6. Considerando que o contraste de densidade estimado de $0,75 \text{ g/cm}^3$ (Figura 10-8A) é apenas devido a presença do itabirito compacto cuja densidade é $3,11 \text{ g/cm}^3$, então a massa estimada do minério de ferro é de aproximadamente 3 bilhões de toneladas.

Nas estimativas obtidas tanto via LI (2001) como via UIEDA e BARBOSA (2012) nota-se que a espessura e largura do corpo de minério de ferro são variáveis ao longo de toda a extensão da área do aerolevantamento. A estimativa obtida via UIEDA e BARBOSA (2012) revelou que a espessura e a largura do minério de ferro aumentam de norte para sul levando a um aumento do volume do depósito de ferro na região de charneira do sinclinal Gandarela (Área 1 na Figura 10-1). No entanto, em virtude da informação *a priori* incorporada pelo método de LI (2001), que impõe uma suavidade

na estimativa dos contrastes de densidade, este aumento do volume do ferro na região de charneira do sinclinal Gandarela não é claro na estimativa do método de LI (2001).

O maior volume da massa de minério de ferro na porção sul da área de estudo revelada pela estimativa de UIEDA e BARBOSA (2012) pode estar relacionada diretamente à estrutura do sinclinal Gandarela. É esperado um aumento do volume do minério de ferro na região de charneira do sinclinal Gandarela (porção sul da área de estudo), que corresponde a zona de máxima compreensão.

11.2 Características semelhantes e contrastantes do minério de ferro recuperado que foram reveladas pelas estimativas dos métodos de LI (2001) e UIEDA e BARBOSA (2012)

Em termos de semelhanças entre as estimativas dos métodos de LI (2001) e UIEDA e BARBOSA (2012) vale ressaltar os seguintes pontos.

As estimativas tanto do método de LI (2001) como do método de UIEDA e BARBOSA (2012) recuperaram um corpo de minério ferro com direção nordeste-sudoeste, concordando com o mapeamento de DORR (1969). Adicionalmente, notou-se que as estimativas do minério de ferro obtidas pelos dois métodos de inversão concordam razoavelmente bem com as informações fornecidas pelos furos de sondagem geológica. Observou-se também que as estimativas obtidas por ambos os métodos de inversão sugerem direções variáveis de mergulho do corpo de minério de ferro. Especificamente, notou-se que na região de charneira do sinclinal Gandarela (região mais ao sul - Área 1 na Figura 10-1) o mergulho do corpo de minério é na direção do eixo do sinclinal (direção noroeste). Na região mais a norte (Área 3 na Figura 10-1) o

corpo de minério mergulha para sudeste que é a direção oposta ao eixo do sinclinal Gandarela. Na região central da área de estudo (Área 2 na Figura 10-1) a formação ferrífera estimada é aproximadamente vertical. Finalmente, comparando o mapa geológico com as estimativas obtidas pelos métodos de LI (2001) e por UIEDA e BARBOSA (2012) notou-se que os depósitos de minério de ferro podem (ou não) estar cobertos por canga.

Em termos de contrastes entre as estimativas de LI (2001) e de UIEDA e BARBOSA (2012) vale ressaltar que a estimativa via o método de LI (2001) indica que a formação ferrífera da região do aerolevantamento do sinclinal Gandarela é aparentemente contínua sem quebras estruturais enquanto que a estimativa via o método de UIEDA e BARBOSA (2012) mostrou que a formação ferrífera não é contínua na parte central do aerolevantamento (Área 2 na Figura 10-1). Esta quebra da formação ferrífera revelada na estimativa via inversão de UIEDA e BARBOSA (2012) e não mostrada na estimativa via inversão de LI (2001) pode ser devida as diferentes informações *a priori* incorporadas por estes métodos ou pode ser devida ao modelo interpretativo composto por prismas menores usado na inversão via UIEDA e BARBOSA (2012).

11.3 Limitações das estimativas dos métodos de LI (2001) e UIEDA e BARBOSA (2012)

Duas limitações nos resultados obtidos merecem atenção. A primeira limitação está relacionada à resolução dos dados do gradiente de gravidade. Os resultados obtidos mostraram que não é possível resolver múltiplas camadas finas de minério de ferro que estão separadas umas das outras por rochas não-alvo para a exploração (e.g., canga, solo, xistos, filitos e quartzitos). Esta limitação atinge as estimativas obtidas tanto via LI

(2001) como também via UIEDA e BARBOSA (2012). Assim por exemplo, na região do furo h2 as estimativas via métodos de UIEDA e BARBOSA (2012) e de LI (2001), respectivamente, mostradas nas Figuras 10-15C e 10-16C, não distinguem as duas seqüência de rochas-alvo (itabiritos compactos, friáveis e semi-compactos) separadas por rochas não-alvo (solo, canga e quartzito ferruginoso) para a exploração de ferro.

A segunda limitação é devida a ambigüidade inerente à interpretação de dados potenciais. Os itabiritos da formação ferrífera e a rocha intrusiva têm praticamente a mesma densidade produzindo, portanto, o mesmo sinal do gradiente de gravidade. Conseqüentemente, nenhum método de inversão de dados potenciais é capaz de distinguir se a fonte geológica causadora do sinal é uma formação ferrífera ou uma rocha intrusiva. Assim por exemplo, na região do furo h3, que perfurou rochas intrusivas, a estimativa via método de UIEDA e BARBOSA (2012) recuperou altos contrastes de densidade, interpretados como minério de ferro (Figura 10-15C).

11.4 Considerações finais

Ressaltamos que as estimativas da massa de minério de ferro tanto via método de UIEDA e BARBOSA (2012) como via LI (2001) concordam razoavelmente bem com as informações fornecidas pelos furos de sondagem geológica. Contudo, apesar dessa concordância, chamamos a atenção que as inversões dos dados de gradiente de gravidade foram feitas após a execução dos furos de sondagem geológica. Note que se as inversões fossem realizadas nos primeiros estágios de exploração desta área de estudo, sem a execução prévia dos furos de sondagem, a estimativa da geometria do depósito de minério de ferro poderia ser utilizada como guia no programa de sondagem exploratória. Como consequência, o número de furos de sondagem geológica poderia ser reduzido e locações mais apropriadas para os furos de sondagem poderiam ter sido escolhidas.

12. Conclusões

Os mapeamentos geológicos prévios do depósito de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais) delimitaram as bordas da formação ferrífera em superfície. Entretanto, parte deste mapeamento é inferido porque o minério de ferro é mascarado por uma cobertura de canga. Adicionalmente, o formato tridimensional detalhado do minério de ferro em subsuperfície é desconhecido e é uma importante informação para a geração de modelos geológicos de exploração de minério de ferro dessa área.

Apresentamos nesta tese de doutorado uma interpretação quantitativa do depósito de minério de ferro do flanco sul do sinclinal Gandarela que está localizado no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Especificamente, esta tese de doutorado objetiva estimar, detalhadamente, a geometria tridimensional do minério de ferro em subsuperfície e a massa deste minério sob esta área. Para esta interpretação utilizamos dados aerotransportados do gradiente de gravidade, informações litológicas de registros de furos de sondagem geológica e mapeamentos geológicos prévios.

Para a interpretação dos dados de aerogradiometria gravimétrica utilizamos dois diferentes tipos de técnicas. Primeiro, utilizamos várias técnicas de interpretação que tem por objetivo realçar os limites horizontais das fontes. Dentre estas técnicas destacamos: i) o cálculo dos invariantes e dos autovalores; ii) o cálculo amplitude do sinal analítico direcional; iii) o cálculo da magnitude do gradiente horizontal e; iv) o cálculo da curvatura e da magnitude da curvatura. Estas técnicas objetivaram uma análise qualitativa ou semi-quantitativa dos corpos geológicos que estão em subsuperfície, tais como, mapeamento dos limites horizontais dos corpos de minério de ferro e mapeamento no plano x-y de possíveis falhamentos.

O segundo tipo de técnica que utilizamos é a inversão 3D de dados de gradiente de gravidade. Para tanto, usamos os métodos de LI(2001) e UIEDA e BARBOSA (2012). As inversões dos dados do gradiente de gravidade objetivaram a recuperação da geometria 3D da formação ferrífera em subsuperfície. Estes dois métodos de inversão estimam uma distribuição tridimensional dos contrastes de densidade definida em uma malha de prismas tridimensionais que contém a superfície topográfica e incluem os corpos geológicos em subsuperfície (e.g., formação ferrífera). Estas estimativas produzem imagens *voxels* da distribuição tridimensional dos contrastes de densidade. Como as rochas encaixantes são menos densas que o minério de ferro, há uma expectativa que os maiores valores estimados dos contrastes de densidade correspondam ao minério de ferro que no Quadrilátero Ferrífero, que é composto pelo itabirito da Formação Cauê.

Embora estes dois métodos de inversão estimem imagens *voxels* da distribuição dos contrastes de densidade em subsuperfície, as imagens estimadas são muito diferentes porque estes métodos incorporam diferentes informações *a priori* através de diferentes funções de regularização. O método de LI(2001) impõe a informação de distribuição suave das massas anômalas em subsuperfície. O método de UIEDA e BARBOSA (2012) impõe a informação de concentração de massas anômalas no entorno de sementes que são prismas com um contraste de densidade definido *a priori*. Estas sementes funcionam como um esqueleto dos corpos geológicos em subsuperfície e a concentração de massas no entorno delas forçam a compacidade da solução. No método de UIEDA e BARBOSA (2012) são considerados apenas dois valores para o contraste de densidade: zero ou o valor atribuído às sementes que corresponde ao contraste de densidade entre a rocha encaixante e o minério de ferro. Estas informações

impostas pelo método de UIEDA e BARBOSA (2012) permitem a visualização da geometria 3D do minério de ferro em superfície.

Antes de interpretarmos os dados reais do levantamento de aerogradiometria gravimétrica sobre o flanco sul do sinclinal Gandarela, aplicamos as técnicas de interpretação e os métodos de inversão a dados sintéticos das componentes do gradiente de gravidade produzidos por corpos geológicos que simulam a formação ferrífera da região de estudo. Especificamente, a formação ferrífera simulada é alongada na direção nordeste-sudoeste, descontínua, com topo na profundidade de 50 metros, espessura de 250 metros e tem contraste de densidade de $0,75 \text{ g/cm}^3$ em relação à rocha encaixante. Na aplicação a dados sintéticos, notamos que as bordas da formação ferrífera simulada são mapeadas pelos valores negativos do invariante 1 e do autovalor 3 e pelos valores positivos do autovalor 1, da magnitude do gradiente horizontal e das amplitudes do sinal analítico direcional nas direções y e z . Concluímos, portanto, que estas interpretações podem auxiliar na delimitação das bordas da formação ferrífera no plano horizontal e consequentemente no posicionamento das sementes, necessárias ao método de UIEDA e BARBOSA (2012). Na inversão dos dados sintéticos do tensor do gradiente de gravidade via método de LI(2001) atribuímos como limites inferior e superior para todos os contrastes de densidade a serem estimados os valores de -0,1 e $0,75 \text{ g/cm}^3$. Adicionalmente, atribuímos o contraste de densidade de $0,50 \text{ g/cm}^3$ para todos os elementos do parâmetro de referência. Comprovamos que a inversão via o método de LI(2001) recupera uma imagem suavizada da distribuição dos contrastes de densidade. No entanto, verificamos que os maiores contrastes de densidade estimados pelo método de LI (2001) recuperaram a espessura e a largura da formação ferrífera simulada. Na inversão dos dados sintéticos do tensor do gradiente de gravidade via método de UIEDA e BARBOSA (2012) utilizamos um conjunto de sementes com

contrastos de densidade de $0,75 \text{ g/cm}^3$ e que foram localizadas em planta sobre os maiores valores da componente G_{zz} do gradiente de gravidade e em uma profundidade constante de 175 metros. Comprovamos que a inversão via o método de UIEDA e BARBOSA (2012) recupera uma imagem da geometria 3D do minério de ferro simulado. Ressaltamos que ambos os métodos de inversão recuperaram razoavelmente a espessura, a largura e a descontinuidade do minério de ferro simulado.

Para a interpretação do dado real do levantamento de aerogradiometria gravimétrica sobre o flanco sul do sinclinal Gandarela, realizamos um pré-processamento dos dados brutos. O pré-processamento consistiu, simplificadamente, dos seguintes passos: (1) compensações devidas ao aerolevantamento aerogeofísico, (2) correção de terreno, e (3) nivelamento das linhas de vôo. Este pre-processamento gerou dados corrigidos de aerogradiometria gravimétrica. Também, verificamos o controle de qualidade dos dados do aerolevantamento de gradiometria gravimétrica da área de estudo através do cálculo da razão sinal-ruído. Este controle de qualidade mostrou que todas as linhas de vôo do aerolevantamento obedeceram a todos os critérios de navegação pré-estabelecidos. Adicionalmente, o cálculo da razão sinal-ruído para este conjunto de dados reais foi de aproximadamente 400 vezes mais sinal que ruído, sendo, portanto, um valor aceitável.

Nas interpretações do dado real do levantamento de aerogradiometria gravimétrica da área de estudo notamos que, diferentemente dos resultados obtidos na aplicação a dados sintéticos, as bordas da formação ferrífera não são mapeadas completamente. Especificamente, os valores negativos do invariante 1 e do autovalor 3 aparentemente delimitaram o limite leste da formação ferrífera sobre o flanco sul do sinclinal Gandarela. Por outro lado, os valores positivos do autovalor 1, da magnitude do gradiente horizontal e das amplitudes do sinal analítico direcional nas direções y e z,

aparentemente mapeiam o limite leste da formação ferrífera da área de estudo. Este mapeamento, parcial, da projeção horizontal das bordas da formação ferrífera pode ser explicado por diferentes fatores tais como, a falta de homogeneidade e a variabilidade na espessura, na profundidade no topo e na direção de mergulho da formação ferrífera a área de estudo.

Invertemos o dado real do levantamento de aerogradiometria gravimétrica da área de estudo utilizando os métodos de LI (2001) e UIEDA e BARBOSA (2012) e estimamos duas distribuições tridimensionais dos contrastes de densidade. Os resultados das duas inversões foram integrados com as informações advindas de mapeamento geológico e com os dados das litologias de furos de sondagem. Esta integração objetivou validar a geometria tridimensional do minério de ferro no flanco sul do sinclinal do Gandarela. O método de UIEDA e BARBOSA (2012) não resolve sistemas lineares e não requer o cálculo e o armazenamento de grandes matrizes. Estas características possibilitaram a discretização da subsuperfície em uma malha com 8,5 milhões de cubos com arestas de 30 metros, resultando em uma distribuição tridimensional detalhada do contraste de densidade da área de estudo. Adicionalmente, estas características viabilizaram a inversão conjunta de todas as seis componentes do gradiente de gravidade totalizando aproximadamente 91 mil observações. Diferentemente de UIEDA e BARBOSA (2012), o método de LI (2001) resolve sistemas lineares e requer o cálculo e o armazenamento de grandes matrizes. Estas características demandam uma grande quantidade de tempo e de memória computacional. Por estes motivos, na aplicação do método de LI (2001) invertemos três componentes (G_{yy} , G_{yz} e G_{zz}) totalizando aproximadamente 46 mil observações e discretizamos a subsuperfície em uma malha com 3,1 milhões de cubos com arestas de

50 metros, resultando em uma distribuição tridimensional relativamente menos detalhada do contraste de densidade da área em estudo.

Na aplicação do método de inversão de UIEDA e BARBOSA (2012) aos dados reais, atribuímos a todas as sementes uma profundidade constante de 50 metros e o valor de 0,75 g/cm³ para o contraste de densidade. As coordenadas horizontais das sementes foram, predominantemente, coincidentes com os valores máximos do sinal da componente G_{zz} . Em uma área onde o sinal da componente G_{zz} é muito fraco as coordenadas horizontais das sementes foram definidas usando-se as interpretações do dado real da área de estudo. A todas as sementes atribuímos o valor de 0,75 g/cm³ para o contraste de densidade. Na aplicação do método de inversão de LI (2001) aos dados reais, atribuímos como limites inferior e superior para todos os contrastes de densidade a serem estimados os valores de -0,1 e 3,31 g/cm³. Adicionalmente, atribuímos o valor constante de densidade de 2,0 g/cm³ para todos os elementos do parâmetro de referência.

Concordando com o mapeamento geológico realizado, as estimativas das distribuições dos contrastes de densidade obtidas tanto pelo método de LI (2001) como pelo método de UIEDA e BARBOSA (2012) recuperaram um corpo de minério ferro com direção nordeste-sudeste. Adicionalmente, ambas estimativas concordam com as informações fornecidas por dados de furos de sondagem geológica. Ressaltamos que estas estimativas, principalmente a estimativa obtida via o método de UIEDA e BARBOSA (2012), revelaram que o depósito de minério de ferro é controlado por eventos tectônicos associados ao sinclinal Gandarela. O maior volume estimado da massa de minério de ferro ocorre na região da zona de charneira do sinclinal Gandarela onde há uma maior compressão das massas. A direção de mergulho do minério de ferro parece ser variável. Na zona de charneira do sinclinal Gandarela o minério de ferro

mergulha na direção do eixo do sinclinal (mergulho para noroeste). Nas porções central e norte da área de estudo, o minério de ferro aparenta mergulho, respectivamente, vertical e para a direção oposta do eixo do sinclinal Gandarela (mergulho para sudeste).

Diferentemente de mapeamentos geológicos anteriores, o resultado de UIEDA e BARBOSA (2012) discorda em relação à continuidade da formação ferrífera enquanto o resultado de LI (2001) sugere uma formação ferrífera aparentemente contínua. O resultado de UIEDA e BARBOSA (2012) mostrou uma quebra da formação ferrífera na área central da região do aerolevantamento que pode ser explicada por um sistema de faltamentos perpendicular ao eixo do sinclinal Gandarela.

A estimativa de UIEDA e BARBOSA (2012) que apresentamos nesta tese permitiu não apenas a visualização tridimensional da geometria da formação ferrífera sobre o flanco sul do sinclinal Gandarela, mas também uma avaliação preliminar da massa de minério de ferro. Usando a solução estimada por UIEDA e BARBOSA (2012) para o minério de ferro obtivemos um volume de 965 milhões de m^3 de minério na área de estudo. Considerando que o contraste de densidade estimado de $0,75 \text{ g/cm}^3$ pela inversão de UIEDA e BARBOSA (2012) é apenas devido a presença do itabirito compacto cuja densidade é $3,11 \text{ g/cm}^3$, então a massa total estimada do minério de ferro foi de aproximadamente 3 bilhões de toneladas.

Como trabalhos futuros destacamos as seguintes diretrizes:

1. A possibilidade de utilização de outras configurações (diferentes posições) das sementes de contraste de densidade principalmente na região do faltamento para verificação da eficiência do algoritmo de UIEDA e BARBOSA (2012).

2. A utilização de outros furos de sondagem geológica que não foram utilizados nessa tese, mas que poderão agregar mais informações sobre a geologia da região.
3. Posicionamento de todas as seções perpendicular ao *strike* da formação ferrífera e que coincidam com o maior número possível de furos de sondagem geológica.
4. Possibilidade de melhorias no método de LI (2001) que permitam a elaboração de modelos com células menores que 50 metros.
5. Apresentação das relações matemáticas entre os acelerômetros dos instrumentos do gradiente de gravidade objetivando o cálculo da razão sinal ruído a partir dessas relações e não das componentes observadas.
6. Visualização das seções em *slices* horizontais evidenciando as várias profundidades das estimativas da distribuição 3D de contraste de densidade.
7. Inversão conjunta utilizando dados de gradiometria gravimétrica e aeromagnetometria.

13. Referências Bibliográficas

ABT, T.L. **Detection of a Local Mass Anomaly in the Shallow Subsurface by Applying a Matched Filter.** Report n. 497, Geodetic Science, Ohio State University, Columbus, Ohio, 2011.

ALKMIM, F.F.; MARSHAK S. The Transamazonian orogeny in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: Paleoproterozoic collision and collapse in the Southern São Francisco Craton region. **Precambrian Research**, v. 90, n. 1-2, p.29-58, 1998.

ALKMIM, F.F.; MARTINS-NETO; M.A. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 33, n. 1, p.127-139, 2012.

AMES, C. B.; FORWARD, R.L.; LAHUE, P.M.; PETERSON, R.W.; ROUSE, D.W. **Prototype Moving-Base Gravity Gradiometer**, AFCRL-73-TR-73-0141. Hughes Researcher Laboratories, Malibu, California, 1973.

BADER, G.E. Geophysical History of the Anahuac Oil Field, Chambers County, Texas. **Geophysics**, v. 12, n. 2, p.191-199, 1947.

BEIKI, M. Analytic signals of gravity gradient tensor and their application to estimate source location. **Geophysics**, v. 75, n. 6, p.I59-I74, 2010.

BEIKI, M.; PEDERSEN, L.B. Eigenvector analysis of gravity gradient tensor to locate geologic bodies. **Geophysics**, v. 75, n. 6, I37-I49, 2010.

BELL, C.C. **Gravity Gradient Study.** Hughes Research Laboratories. Final Report. Contract NAS-8-24788. Malibu, Califórnia, USA. 1971.

BELL, R.E.; ANDERSON, R.; PRATSON, L. Gravity gradiometry resurfaces. **The Leading Edge**, v. 16, n. 1, p.55-59, 1997.

BRAGA, Marco Antonio da Silva. **Aplicação de Aerogradiometria Gravimétrica 3D-FTG na Prospecção de Minério de Ferro no Quadrilátero Ferrífero (MG) e Modelagem 2D e 3D para Estimativa de Massa do Depósito de Ferro de N1 em Carajás (PA)**. 2009. 271 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

BRAGA, M.A.; GALBIATTI, H.F.; CARLOS, D.U.; SOUSA, R.R.; ALMEIDA, T. Planejamento e Controle de Qualidade de Dados de Gradiometria Gravimétrica 3D-FTG. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 3, p.447-457, 2009.

BRETT, J. **Theory of FTG measurements**, 2008. Disponível em <http://www.bellgeo.com/tech/technology_theory_of_FTG.html>. Acesso em 12 set. 2011.

BRETT, J.; BREWSTER, J. **Accelerometer and Rate Sensor Package for Gravity Gradiometer Instruments**. U.S. Patent 7788975 B2, Sep. 7, 2010.

BRZEZOWSKI, S.J.; HELLER, W.G. Gravity gradiometer survey errors. **Geophysics**, v. 53, n. 10, p.1355-1361, 1988.

BRZEZOWSKI, S.J.; GOLDSTEIN, J. D.; HELLER, W.G.; TAYLOR, T.H.; WHITE, J.V. **Recent test results for gravity gradiometer survey system rail data**. Proc. of 7th Ann. Gravity Gradiometer Conf., GL-TR-90-0067, ADA223568, Geophysics Laboratory, Air Force System Command, Hanscom Air Force Base, 1990.

CARLOS, D. U., UIEDA, L., BARBOSA, V. C. F., BRAGA, M. A., GOMES JR., A. A. S. In-depth imaging of an iron orebody from Quadrilatero Ferrifero using 3D gravity gradient inversion. **SEG Technical Program Expanded Abstracts**, p. 902-906, 2011.

CHEMALE, F.; Jr.; ROSIÈRE, C.A.; ENDO, I. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Precambrian Research**, v. 65, n.1-4, p.25-54, 1994.

DEGREGORIA, A. **Gravity Gradiometry and Map Matching: and Aid to Aircraft Inertial Navigation Systems**. 2010. 130 p. Master's Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, 2010.

DORR, J.V.N. Nature and origin of the high-grade hematite ores of Minas Gerais, Brazil. **Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists**, v. 60, n. 1, p.1–46, 1965.

DORR, J.V.N. **Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. Washington, USGS/DNPM. Prof. Paper 641-A, 110p, 1969.

DOSCH, D.E.; SIERACKI, D.L. **Gravity gradiometer and method for calculating a gravity tensor with increased accuracy**. U.S. Patent 6799459 B2, Oct. 5, 2004.

DRANSFIELD, Mark. H. **Airborne gravity gradiometry**. 1994. PhD. Thesis - University of Western Australia, 254 p.

DRANSFIELD, M.H. **Airborne Gravity Gradiometry in the Search for Mineral Deposits**, in: Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, p.341-354, 2007.

DRANSFIELD, M.H.; GAMA, F. Processamento de Dados Gradiométricos Gravimétricos do Sistema FALCON (AGG). **Boletim da Sociedade Brasileira de Geofísica**, n. 4, ISSN 2177-9090, 2010.

ECKHARDT, E.A. A Brief History of the Gravity Method of Prospecting for Oil. **Geophysics**, v. 5, n. 3, p.231-242, 1940.

ENDO, I.; ROCHA FILHO, O.G. Estratigrafia, arcabouço estrutural e controle da mineralização ferrífera da mina de Gongo Soco, MG. 48 p. Relatório Interno, 2003.

GASPARINI, P.; MANTOVANI, M.S.M.; CORRADO, G.; RAPOLLA, A. Depth of Curie temperature in continental shields: a compositional boundary? **Nature**, v. 278, p.845–846, 1979.

GROSSI, J.; VALENTE, J.; REIS, E.; FLETCHER, R.; CASTRO, V.H. **Norma para Classificação de Recursos e Reservas Minerais**, 2003. Disponível em:<<http://www.geologo.com.br/JORC.ASP>>. Acesso em 12 nov. 2013.

HANSEN, P.C. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve, **SIAM Review**, 34, p.561-580, 1992.

HEILAND, C.A. Geophysical methods of prospecting, principles and recent successes. **Colorado School of Mines Quarterly**, n. 24, 1929.

HEILAND, C.A. A rapid method for measuring the profile components of horizontal and vertical gravity gradients. **Geophysics**, v. 8, n. 2, p.119-133, 1943.

HOFMEYER, G.M; AFFLECK, C.A. **Rotating Accelerometer Gradiometer**. U.S. Patent 5357802, Oct. 25, 1994.

HOPKINS, J. Gravity Gradiometry - A Rebirth. **Canadian Journal of Exploration Geophysics**, v. 11, n. 1, p.34-37, 1975.

HUANG, H. Airborne geophysical data leveling based on line-to-line correlations. **Geophysics**, v. 73, n. 3, p.F83-F89, 2008.

HUSTON, H.H.; SESTAK, H. Methodology for interpreting 3-D marine gravity gradiometry data. **The Leading Edge**, v. 18, n. 4, p.482-485, 1999.

JEKELI, C. The gravity gradiometer survey system (GGSS). **Eos**, v. 69, n. 8, p.105-117, 1988.

JEKELI, C. A review of gravity gradiometer survey system data analyses. **Geophysics**, v. 58, n. 4, p.508-514, 1993.

JEKELI, C. Airborne Gradiometry Error Analysis. **Survey in Geophysics**, v. 27, n. 2, p.257-275, 2006.

JEKELI, C.; ABT, T.L. **The Statistical Performance of the Matched Filter for Anomaly Detection Using Gravity Gradients**. Report no. 494, Geodetic Science, Ohio State University, Columbus, Ohio, 2010.

KLAUS, H. An Introduction to the Second Derivative Contour Method of Interpreting Torsion Balance Data. **Geophysics**, v. 3, n. 3, p.234-246, 1938.

KLAUS, H. Faulting in the Billings Oilfield, Oklahoma, as Interpreted from Torsion Balance Data, and from Subsequent Drilling: **Geophysics**, v. 8, n. 4, p.362-378, 1943.

LANE, R.J.L. **Integration ground and airborne data into regional gravity compilations**, in: Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity Workshop: Geoscience Australia Record, p.81-97, 2004.

LI, Y.; OLDENBURG, D.W. 3-D inversion of magnetic data. **Geophysics**, v. 61, n. 2, p.394–408, 1996.

LI, Y. and OLDENBURG, D. W. 3-D Inversion of DC resistivity data using an L-curve criterion. **SEG Technical Program Expanded Abstracts**, p.251-254, 1999.

LI, Y. 3-D Inversion of gravity gradiometer data. **SEG Technical Program Expanded Abstracts**, p.1470-1473, 2001.

LOBATO, L.M.; BALTAZAR, O.F.; REIS, L.B.; ACHTSCHIN, A.B.; BAARS, F.J.; TIMBÓ, M.A.; BERNI, G.V.; MENDONÇA, B.R.V.; FERREIRA, D.V. **Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa**. Belo Horizonte: CODEMIG. DVD, 2005.

LYRIO, Julio Cesar Soares Oliveira. **Processing and Inversion of Full Tensor Gravity Gradiometry Data**. 2009. 256 p. PhD Thesis - Department of Geophysics, Colorado School of Mines, Golden, 2009.

MARTINEZ, C.; LI, Y.; KRAHENBUHL, R.; BRAGA, M.A. 3D inversion of airborne gravity gradiometry data in mineral exploration: A case study in the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. **Geophysics**, v. 78, n.1, p.B1-B11, 2013.

MATARAGIO, J.; KIELEY, J. Application of full tensor gradient invariants in detection of intrusion-hosted sulphide mineralization: implications for deposition mechanisms. **First Break**, v. 27, n. 7, p.95-98, 2009.

MCGUKIN, G.M. History of the Geophysical Exploration of the Cameron Meadows Dome, Cameron Parish, Louisiana. **Geophysics**, v. 10, n. 1, p.1-16. 1945.

MCLEMORE, E.W.; WEAVER, P.; BARTON, D.C. The Crosbyton Anomaly, Southeastern Crosby County, Texas. **Geophysics**, v. 7, n. 2, p.179-191, 1942.

METZGER, E. H. **Overview, Rotating Accelerometer Gradiometer for Correcting Inercial Navigation Systems for the Deflection of the Vertical**; Bell Aerospace Company; Buffalo, New York, 1974.

MURPH, C.A. **The Air-FTG Airborne Gravity Gradiometer System**, in: R. Lane, ed., Airborne Gravity 2004 Workshop. Geoscience Australia Record, 2004/18, p.7-14, 2004.

MURPHY, C. A.; BREWSTER, J. **Target delineation using full tensor gravity gradiometry data**. ASEG, 2007.

NABIGHIAN, M.N. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms – Fundamental relations. **Geophysics**, v.49, n. 6, p.780-786, 1984.

NAGY, D.; PAPP, G.; BENEDEK, J. The gravitational potential and its derivatives for the prism. **Journal of Geodesy**, v. 74, n. 7-8, p.552-560, 2000.

NAGY, D.; PAPP, G.; BENEDEK, J. Corrections to “The gravitational potential and its derivatives for the prism”. **Journal of Geodesy**, v. 76, n. 8, p.475, 2002.

OLIVEIRA JR., V. C. **Inversão Gravimétrica Radial por Camadas para Reconstrução de Corpos Geológicos 3D**. 2010. 142 p. Dissertação de Mestrado, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, 2010.

OLIVEIRA JR.; V.C.; BARBOSA, V.C.F. 3-D radial gravity gradient inversion. **Geophysical Journal International**, v. 195, n. 2, p.883-902, 2013.

PADILHA, A.L. **Implementação da Metodologia para Interpretação Magnética e sua Aplicação aos dados do Quadrilátero Ferrífero (MG)**. 1982. 147 p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1982.

PAOLETTI, V.; IALONGO, S.; FLORIO, G.; FEDI, M.; CELLA, F. Self-constrained inversion of potential fields. **Geophysical Journal International**, v. 195, n. 2, p.854-869, 2013.

PARASNIS, D.S. **Mining Geophysics**. Elsevier: Amsterdam. Methods in Geochemistry and Geophysics 3, 356 p, 1966.

PEDERSEN, L.B.; RASMUSSEN, T.M. The gradient tensor of potential field anomalies: Some implications on data collection and data processing of maps. **Geophysics**, v. 55, n. 12, p.1558-1566, 1990.

PFOHL, L.; RUSNAK, W.; JIRCITANO, A.; GRIERSON, A. **Moving-base gravity gradiometer survey system (GGSS) program**: Final Report, Mar 1983 - Apr. 1988. Textron Bell Aerospace Co., Buffalo, NY, 1988.

PHILLIPS, N.D. **Geophysical Inversion in an Integrated Exploration Program: Examples from the San Nicolás Deposit**. 2001, 263 p. Master's, The Faculty of Graduate Studies, Earth and Ocean Sciences, The University of British Columbia, 2001.

PLOUFF, D. Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections. **Geophysics**, v. 41, n .4, p.727–741, 1976.

ROEST, W.R.; VERHOEF, J.; PILKINGTON, M. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. **Geophysics**, v. 57, n. 1, p.116-125, 1992.

ROGERS, M.M. **An Investigation into the Feasibility of Using Modern Gravity Gradient Instrument for Passive Aircraft Navigation and Terrain Avoidance**. 2009. 180 p. Master's Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, 2009.

ROLIM, Silvia. B. A. **Resposta Geofísica dos Depósitos de Ouro da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero, MG**. 2001. 290 p. Tese de Doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

ROSIÈRE, C.A.; RIOS, F.J. The Origin of Hematite in High-Grade Iron Ores based in Infrared Microscopy and Fluid Inclusion Studies: The Example of the Conceição Deposit, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. **Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists**, v. 99, n. 3, p. 611- 624, 2004

SAVITZKY, A.; GOLAY, M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. **Anal. Chem.**, v. 36, n. 8, p.1627-1639, 1964.

SILVA, A.M. **Integração de dados geológicos e geofísicos utilizando-se uma nova técnica estatística para seleção de alvos para exploração mineral, aplicada ao Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero.** 1999. 195 p. Tese de Doutoramento, Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

SILVA DIAS, F.J.; BARBOSA, V.C.F.; SILVA, J.B. 3D gravity inversion through an adaptive-learning procedure. **Geophysics**, v. 73, n. 3, p.I9-I21, 2009.

SPEAKE, C.C.; HAMMOND, G.D.; TRENKEL, C. The torsion balance as a tool for geophysical prospecting. **Geophysics**, v. 66, n. 2, 527-534, 2001.

TARANTOLA, A. **Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation**, SIAM, 2005.

TAVARES, P. **Identificação de Áreas Potencialmente Favoráveis a Mineralização Aurífera, a partir de Dados Estruturais e Aerogeofísicos aplicados a Terrenos do tipo “Greenstone Belt”: O Caso da Folha Caeté, QF, MG.** 1998. 209 p. Tese de Doutoramento, Departamento de Geologia, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1998.

TERRA, F.A. **Aplicação da Curva L em Problemas Inversos: Metodologias de Extração do Parâmetro Ótimo de Regularização.** Trabalho de Graduação. 2007. 94 p. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2007.

TÓTH, G. Prediction by Eotvos' Torsion Balance Data in Hungary. **Periodica Polytechnica Ser. Civ. Eng.**, v. 46, n. 2, p.221-229, 2002.

TRAGESER, M.B.; JOHNSON, D.O. **Preliminary Gravity Gradiometer System Definition Report;** C-4196; The Charles Stark Draper Laboratory; Cambridge, Massachusetts, 15 Jul. 1974.

UIEDA, L.; BARBOSA, V.C.F. Robust 3-D gravity gradient inversion by planting anomalous densities. **Geophysics**, v. 77, n. 4, p.G55-G66, 2012.

VILLAÇA, J.N.; MOURA, L.A.M. **Uranium in the Precambrian Moeda Formation, Minas Gerais, Brazil.** United States Geological Survey Professional Paper 1161-T, p.T1–T14, 1981.

WENDLER, A.P. Geophysical History of the Lovell Lake Oil Field, Jefferson County, Texas. **Geophysics**, v.11, n. 3, p.302-311, 1946.

WOOLLEY, W.C. Geophysical History of the La Gloria Field, Jim Wells and Brooks Counties, Texas. **Geophysics**, v. 11, n. 3, p.292-301, 1946.

Apêndice - Relação entre o sistema de coordenadas dos IGG's e coordenadas geográficas

Apresentação explícita da transformação de coordenadas dos Instrumentos do Gradiente de Gravidade do sistema 3D-FTG para o sistema de medidas da Terra (**NED** - *Northing-Easting-Dow*).

As medidas dos gradientes de gravidade dos instrumentos de gradiente de gravidade para o sistema de coordenadas **NED** conforme Brewster et al., (2003) e Brewster (2006).

$$\begin{bmatrix} G_{zz} \\ (G_{yy} - G_{xx})/2 \\ G_{xy} \\ G_{yz} \\ G_{zz} \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} I_2 - I_1 \\ I_3 - I_2 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (\text{A-1}),$$

em que I_i ($i=1,2,3$) representa os acelerômetros em linha (*in-line*) e C_i ($i=1,2$ e 3) representa os acelerômetros cruzados (*cross*). A matriz \mathbf{M} é obtida por manipulações algébricas e seus elementos relacionam cada ângulo dos instrumentos do gradiente de gravidade com as coordenadas do sistema **NED**. Esta matriz é dada por:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{2}{3} & \frac{2}{3} & \frac{2}{3} \\ b_1 \cos(2\theta - \frac{7}{6}\pi) & b_1 \cos(2\theta - \frac{3}{2}\pi) & b_3 \cos(2\theta - \frac{2}{3}\pi) & b_3 \cos(2\theta - \frac{4}{3}\pi) & b_3 \cos(2\theta) \\ b_1 \cos(2\theta - \frac{5}{3}\pi) & b_1 \cos(2\theta) & b_3 \cos(2\theta - \frac{7}{6}\pi) & b_3 \cos(2\theta - \frac{11}{6}\pi) & b_3 \cos(2\theta - \frac{1}{2}\pi) \\ b_2 \cos(\theta - \frac{11}{6}\pi) & b_2 \cos(\theta - \frac{3}{2}\pi) & b_4 \cos(\theta - \frac{4}{3}\pi) & b_4 \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & b_4 \cos(\theta) \\ b_2 \cos(\theta - \frac{1}{3}\pi) & b_2 \cos(\theta) & b_4 \cos(\theta - \frac{11}{6}\pi) & b_4 \cos(\theta - \frac{7}{6}\pi) & b_4 \cos(\theta - \frac{1}{2}\pi) \end{bmatrix} \quad (\text{A-2})$$

em que

$$b_1 = \frac{2}{9}\sqrt{3}, \quad b_2 = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}}, \quad b_3 = \frac{2}{3} \quad \text{e} \quad b_4 = \frac{\sqrt{2}}{3}.$$

Escrevendo explicitamente cada uma das componentes temos:

$$\begin{aligned} G_{xx} &= \frac{2}{3}C_1 + \frac{2}{3}C_2 + \frac{2}{3}C_3 \\ G_{xz} &= b_2(I_2 - I_1)\cos\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) + b_2(I_3 - I_2)\cos(\theta) + b_4C_1 \cos\left(\theta - \frac{11}{6}\pi\right) + b_4C_2 \cos\left(\theta - \frac{7}{6}\pi\right) + b_4C_3 \cos\left(\theta - \frac{1}{2}\pi\right) \\ G_{yz} &= b_2(I_2 - I_1)\cos\left(\theta - \frac{11}{6}\pi\right) + b_2(I_3 - I_2)\cos\left(\theta - \frac{3}{2}\pi\right) + b_4C_1 \cos\left(\theta - \frac{4}{3}\pi\right) + b_4C_2 \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) + b_4C_3 \cos(\theta) \quad (\text{A-3}) \\ G_{yy} &= b_1(I_2 - I_1)\cos\left(2\theta - \frac{5}{3}\pi\right) + b_1(I_3 - I_2)\cos(2\theta) + b_3C_1 \cos\left(2\theta - \frac{7}{6}\pi\right) + b_3C_2 \cos\left(2\theta - \frac{11}{6}\pi\right) + b_3C_3 \cos\left(2\theta - \frac{1}{2}\pi\right) \\ \left(\frac{G_{yy} - G_{xx}}{2}\right) &= b_1(I_2 - I_1)\cos\left(2\theta - \frac{7}{6}\pi\right) + b_1(I_3 - I_2)\cos\left(2\theta - \frac{3}{2}\pi\right) + b_3C_1 \cos\left(2\theta - \frac{2}{3}\pi\right) + b_3C_2 \cos\left(2\theta - \frac{4}{3}\pi\right) + b_3C_3 \cos(2\theta) \end{aligned}$$