

Luis Mauricio Marques Santos Lima

**UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA 3D-FTG NA IDENTIFICAÇÃO DE
CORPOS FERROSOS NA BORDA SUDESTE DO SINCLINAL
GANDARELA, QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

Trabalho de Conclusão de Curso
(Bacharelado em Geologia)

UFRJ
Rio de Janeiro
2008



UFRJ

Luis Mauricio Marques Santos Lima

**UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA 3D-FTG NA IDENTIFICAÇÃO DE
CORPOS FERROSOS NA BORDA SUDESTE DO SINCLINAL
GANDARELA, QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores:

Henrique Dayan

Jadir da Conceição da Silva (*in memoriam*)

Rio de Janeiro

Julho de 2008

LIMA, Luis Mauricio Marques Santos

Utilização da tecnologia 3D-FTG na identificação de corpos ferrosos na borda sudeste do Sinclinal Gandarela, Quadrilátero Ferrífero / Luis Mauricio Marques Santos Lima -- Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2008.

xv, 54 p. : il.; 30cm

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2008.

Orientador(es): Henrique Dayan, Jadir da Conceição da Silva (*in memoriam*)

1. Geologia. 2. Setores de Geologia Geral e Geofísica – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Henrique Dayan, Jadir da Conceição da Silva (*in memoriam*). II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências,

Luis Mauricio Marques Santos Lima

UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA 3D-FTG NA IDENTIFICAÇÃO DE
CORPOS FERROSOS NA BORDA SUDESTE DO SINCLINAL
GANDARELA, QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Geologia do Instituto de
Geociências, Universidade Federal do Rio
de Janeiro – UFRJ, apresentado como
requisito necessário para obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.

Orientadores:

Henrique Dayan

Jadir da Conceição da Silva (*in memoriam*)

Aprovada em: 07.julho.2008

Por:

Orientador: Henrique Dayan (UFRJ)

Joel Gomes Valença (UFRJ)

João Baptista Filho (UFRJ)

UFRJ
Rio de Janeiro
2008

Dedico este trabalho aos meus pais, Amaro e Marilia. Sem eles, nada disso seria possível.

Agradecimentos

Dedico este trabalho ao meu pai, Amaro, à minha mãe, Marília, à minha avó, Faraildes, aos meus irmãos, Marília, Luis Marcio e Luis Mauro, aos meus tios Nelson, Maria Emília e Marta, à minha madrinha Dalila, aos meus sobrinhos Luiz Felipe e Vinicius e às minhas cunhadas, Thaísa e Regina, por toda ajuda durante esse anos de faculdade.

Ao amigo e orientador, Henrique Dayan, por todos os ensinamentos e conselhos fornecidos durante a monitoria e durante a realização de trabalho de conclusão de curso.

Ao amigo e co-orientador, Jadir da Conceição da Silva (*in memoriam*), por me mostrar um mundo fascinante que é a Geofísica.

Aos amigos Marco Antônio da Silva Braga, Thiago de Almeida e Rodrigo Rocha de Sousa, por toda ajuda dada durante a realização deste trabalho.

Ao geofísico Dionisio Uendro Carlos, pelas aulas de Geosoft Oasis Montaj.

À Vale, pela concessão da bolsa e por fornecer os dados com os quais pude fazer este trabalho.

A todos os amigos e aqueles que colaboram para a realização deste trabalho de conclusão de curso.

“– Ah, o sorriso que tenho nos lábios é um sorriso geológico – o sorriso de quem sabe, olha, vê e compreende.”

Monteiro Lobato

Resumo

LIMA, Luis Mauricio Marques Santos. Utilização da Tecnologia 3D-FTG na Identificação de Corpos Ferrosos na Borda Sudeste do Sinclinal Gandarela, Quadrilátero Ferrífero. 2008. xv, 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Com o mercado mundial de minério de ferro extremamente aquecido faz-se necessário descobertas de novas jazidas e em um curto prazo de tempo. O 3D-FTG (Three Dimensional Full Tensor Gravity Gradiometry), tecnologia desenvolvida nos anos 70 para uso militar e hoje com fins exploratórios, vem ajudar nestas buscas por ser um método barato (comparativamente a outros métodos), rápido (um único levantamento pode cobrir enormes áreas) e confiável. Este trabalho faz uma apresentação do método 3D-FTG mostrando a teoria envolvida, descrevendo a aparelhagem utilizada nos levantamentos e explicando as etapas de aquisição e processamento dos dados. Este trabalho, mostra um levantamento feito na borda sudeste do sinclinal Gandarela, Quadrilátero Ferrífero – MG, região de grande potencial exploratório já que no mesmo sinclinal encontram-se as grandes jazidas de Brucutu e de Dois Irmãos. Neste levantamento é feita uma análise de densidade com o objetivo de melhor detalhar potenciais alvos exploratórios. Para validar o método é feita uma comparação de grids das componentes do tensor total da gravidade entre dados sintéticos e dados reais, obtidos no levantamento. Para finalizar é feita uma análise da intensidade do sinal da componente T_{zz} com material obtido através de furos de sondagem. Concluiu-se com este trabalho que é muito importante que em levantamentos feitos em regiões de terrenos acidentados se utilize modelos digitais do terreno de alta precisão e que o método sozinho não fornece todas as respostas, que ainda é necessário e importante o mapeamento de campo e as campanhas de sondagem.

Palavras-chave: 3D-FTG; sinclinal Gandarela; gravidade.

Abstract

LIMA, Luis Mauricio Marques Santos. **The Utilization of 3D-FTG Technology in Identification of Iron Bodies in Southeast Border of the Gandarela Syncline, Quadrilátero Ferrífero.** 2008. xv, 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

In current days there is a great demand for iron ore due to the present world situation. The 3D-FTG (Three Dimensional Full tensor Gravity Gradiometry) technology was created in the late 70's for military purposes. Today the 3D-FTG is used for exploratory means as an aid in the search for ore deposits. The present work was carried out in the SE side of the Gandarela syncline, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais state. This particular area shows a good potential for iron ore deposits. Two mines, Brucutu and Dois Irmão, presently in full operation, are located in this region. The present work shows a density analysis in order to determine potential exploratory areas. We compare here two sets of data: (i) data gathered in the field area, and (ii) synthetic data. Finally an analysis of the signal intensity of the component T_{zz} taken from drilled core samples. This work shows the importance of using either very precise digital terrain models together with good geological mapping data, as the geophysics method is not capable of giving us straight answers.

Key-Words: 3D-FTG; Gandarela syncline; gravity

Lista de figuras

Figura 1 – Mapa de localização do sinclinal Gandarela (Dorr, 1969).	1
Figura 2 – Ortofoto do flanco sudeste do sinclinal Gandarela com retângulo em amarelo mostrando a área levantada.	2
Figura 3 – Diagrama esquemático onde as setas em dourado representam as componentes do campo gravitacional e em vermelho as componentes do tensor (Murphy, 2003).	6
Figura 4 – Modo como são dispostos os dois pares de acelerômetro dentro de um GGI (Hammond e Murphy, 2003).	7
Figura 5 - GGIs com projeção dos eixos formando ângulos de 120° entre si e inclinação constante em relação ao plano horizontal (Hammond e Murphy, 2003).	7
Figura 6 – O três eixos de rotação de uma aeronava: <i>pitch</i> , <i>roll</i> e <i>yaw</i> . Extraído de http://quest.arc.nasa.gov/aero/virtual/demo/aeronautics/tutorial/motion.html .	8
Figura 7 – Mapa Estrutural e Estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero e adjacências.	11
Figura 8 - Coluna estratigráfica proposta para o Quadrilátero Ferrífero, modificada. (Alkmin & Marshak, 1998).	12
Figura 9 – Sinclinal Gandarela dividido em segmentos Nordeste, Central e Sul e com a localização da jazida de Brucutu, da jazida de Dois Irmãos, da falha das Cambotas, da falha do Fundão e da Serra do Tamanduá.	20
Figura 10 – Perfil NW-SE do sinclinal Gandarela. (Oliveira <i>et al</i> , 2005).	22
Figura 11 – Coluna estratigráfica do sinclinal Gandarela, sem escala (Suckau, 1991).	23
Figura 12 – Linhas de vôo.	25
Figura 13 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 1,10 g/cm ³ .	28
Figura 14 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 1,20 g/cm ³ .	28
Figura 15 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 1,30 g/cm ³ .	29
Figura 16 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 1,40 g/cm ³ .	29
Figura 17 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 1,50 g/cm ³ .	30
Figura 18 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 1,60 g/cm ³ .	30
Figura 19 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 1,70 g/cm ³ .	31

Figura 20 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 1,80 g/cm ³ .	31
Figura 21 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 1,90 g/cm ³ .	32
Figura 22 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,00 g/cm ³ .	32
Figura 23 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,10 g/cm ³ .	33
Figura 24 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,20 g/cm ³ .	33
Figura 25 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,30 g/cm ³ .	34
Figura 26 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,40 g/cm ³ .	34
Figura 27 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,50 g/cm ³ .	35
Figura 28 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,60 g/cm ³ .	35
Figura 29 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,70 g/cm ³ .	36
Figura 30 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,80 g/cm ³ .	36
Figura 31 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,90 g/cm ³ .	37
Figura 32 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 3,00 g/cm ³ .	37
Figura 33 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 3,10 g/cm ³ .	38
Figura 34 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 3,20 g/cm ³ .	38
Figura 35 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 3,30 g/cm ³ .	39
Figura 36 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 3,40 g/cm ³ .	39
Figura 37 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 3,50 g/cm ³ .	40
Figura 38 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 3,60 g/cm ³ .	40
Figura 39 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 3,70 g/cm ³ .	41
Figura 40 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 3,80 g/cm ³ .	41
Figura 41 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 3,90 g/cm ³ .	42
Figura 42 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 4,00 g/cm ³ .	42
Figura 43 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,10 g/cm ³ com alvos em potencial demarcados pelas elipses.	43

- Figura 44 – Grid de altimetria SRTM da NASA e o grid da componente Tzz corrigida para densidade $4,00 \text{ g/cm}^3$. As elipses em branco assinalam três grandes falsas anomalias. 44
- Figura 45 – Grid da componente Tzz corrigida para densidades $1,10 \text{ g/cm}^3$. 45
- Figura 46 – Componentes do tensor de aerogradiometria gravimétrica adquiridos sobre um terreno de massa específica $2,7 \text{ g/cm}^3$, perfazendo uma área de $2000 \times 2000 \text{ m}^2$, e tendo em seu centro uma massa anômala de minério de massa específica $4,2 \text{ g/cm}^3$, volume $400 \times 400 \times 400 \text{ m}^3$ e cujo topo dista 100 m da superfície do solo (Extraído de Braga, 2006). 46
- Figura 47 – Grid da componente Txx corrigida para densidade $2,10 \text{ g/cm}^3$ mostrando um alvo com os limites leste e oeste definidos. 48
- Figura 48 – Grid da componente Txy corrigida para densidade $2,10 \text{ g/cm}^3$ mostrando os quadrupolos, com dois altos e dois baixos. 48
- Figura 49 – Grid da componente Txz corrigida para densidade $2,10 \text{ g/cm}^3$ mostrando o eixo do centro de massa da anomalia. 49
- Figura 50 – Grid da componente Tyy corrigida para densidade $2,10 \text{ g/cm}^3$ mostrando um alvo com os limites norte e sul definidos. 49
- Figura 51 – Grid da componente Tyz corrigida para densidade $2,10 \text{ g/cm}^3$ mostrando o eixo do centro de massa da anomalia. 50
- Figura 52 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade $2,10 \text{ g/cm}^3$ mostrando a localização do alvo. 50
- Figura 53 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade $2,10 \text{ g/cm}^3$ com a localização dos furos de sondagem. 51

Lista de tabelas

Tabela 1 – Furos de sondagem localizados em possível alvo exploratório e suas espessuras de cada tipo de material extraído e espessuras total, com legenda. 52

Tabela 2 – Furos de sondagem localizados dentro da formação ferrífera mas fora de possíveis alvos exploratórios e suas espessuras de cada tipo de material extraído e espessuras total, com legenda. 53

Sumário

Resumo	viii
<i>Abstract</i>	ix
Lista de figuras	x
Lista de tabelas	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 <i>THREE DIMENSIONAL - FULL TENSOR GRAVITY GRADIOMETRY (3D-FTG)</i>	4
1.1 Breve Histórico	4
2.2 A Teoria 3D-FTG	4
2.3 O Sistema Air-FTG™	6
3 GEOLOGIA	9
3.1 Geologia Regional	9
3.2 Litoestratigrafia	12
3.2.1 Complexo granítico-gnáissico	13
3.2.2 Supergrupo Rio das Velhas	13
3.2.3 Supergrupo Minas	14
3.2.4 Intrusivas Pós-Minas	18
3.2.5 Grupo Itacolomi	18
3.2.6 Sedimentos Cenozóicos	19
3.2.6.1 Formação Fonseca	19
3.3 Geologia Local	20
4 METODOLOGIA	24
4.1 Aquisição dos Dados	24
4.2 Processamento	26
5 ANÁLISE DE DENSIDADE	27
6 COMPARAÇÃO DE GRIDS DAS COMPONENTES DO TENSOR TOTAL ENTRE DADOS SINTÉTICOS E DADOS REAIS	46
7 ANÁLISE DA INTENSIDADE DO SINAL DA COMPONENTE TZZ DE ACORDO COM MATERIAL OBTIDO EM FUROS DE SONDAGEM	51
8 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	54

Referências bibliográficas 56

1 INTRODUÇÃO

Localizado na porção centro-leste do Quadrilátero Ferrífero – MG (Figura 1) e limitado pelos paralelos $19^{\circ} 57' 30''$ e $20^{\circ} 09' 30''$ de latitude sul e pelos meridianos $43^{\circ} 22' 30''$ e $44^{\circ} 07' 30''$ de longitude oeste, o sinclinal Gandarela é formado por metassedimentos do Supergrupo Minas em contato com o Grupo Nova Lima, pertencente ao Supergrupo Rio das Velhas e o embasamento composto por rochas graníticas do Complexo Metamórfico Caeté.

O acesso pode ser feito, a partir de Belo Horizonte, através de estradas asfaltadas, pelas cidades de Rio Acima ou Barão de Cocais, distantes 35 e 54 quilômetros respectivamente. A partir destas cidades as estradas passam a ser de terra, com algumas apresentando tráfego permanente.

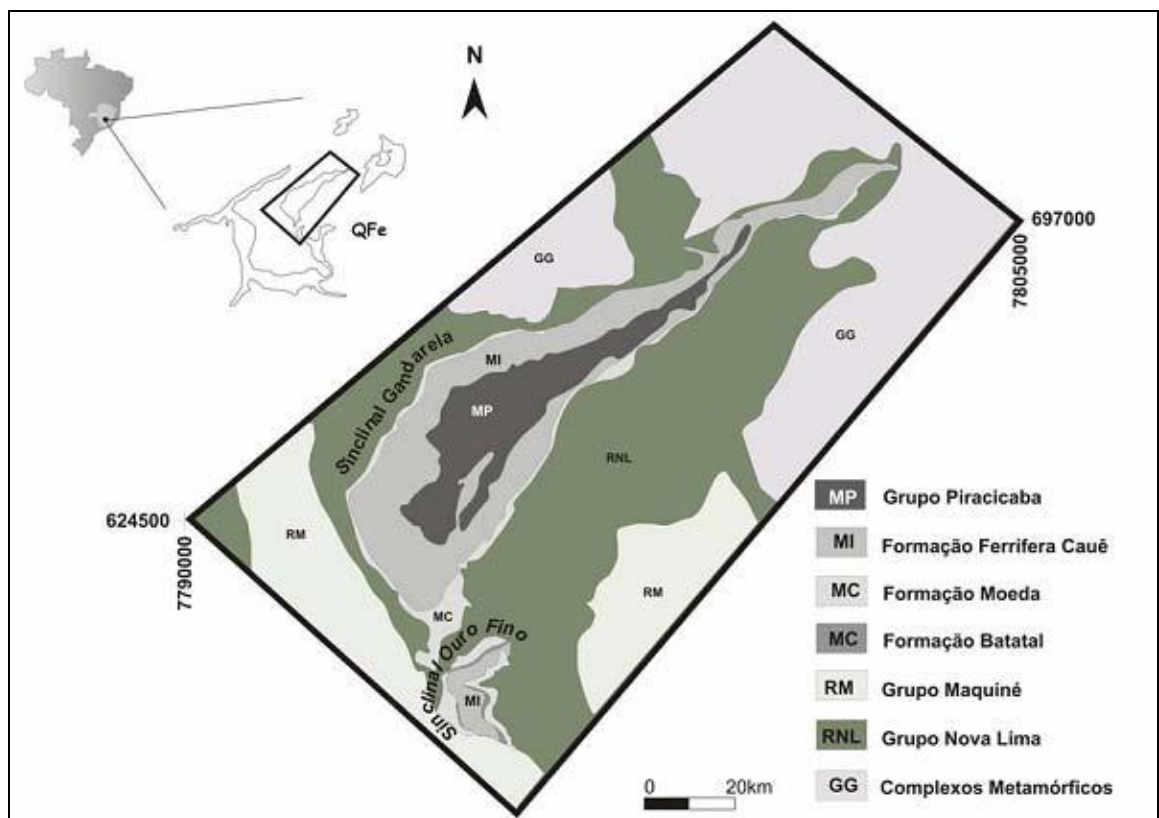


Figura 1 – Mapa de localização do sinclinal Gandarela (Dorr, 1969).

A figura 2 mostra a área sobrevoada pelo Air-FTG[®] (que é o sistema 3D-FTG aerotransportado). A ausência de coordenadas nesta figura e em todas as outras a partir deste ponto deve-se porque a Vale, fornecedora de praticamente todos os dados deste trabalho, proibiu a divulgação de coordenadas por se tratar de dados sigilosos.

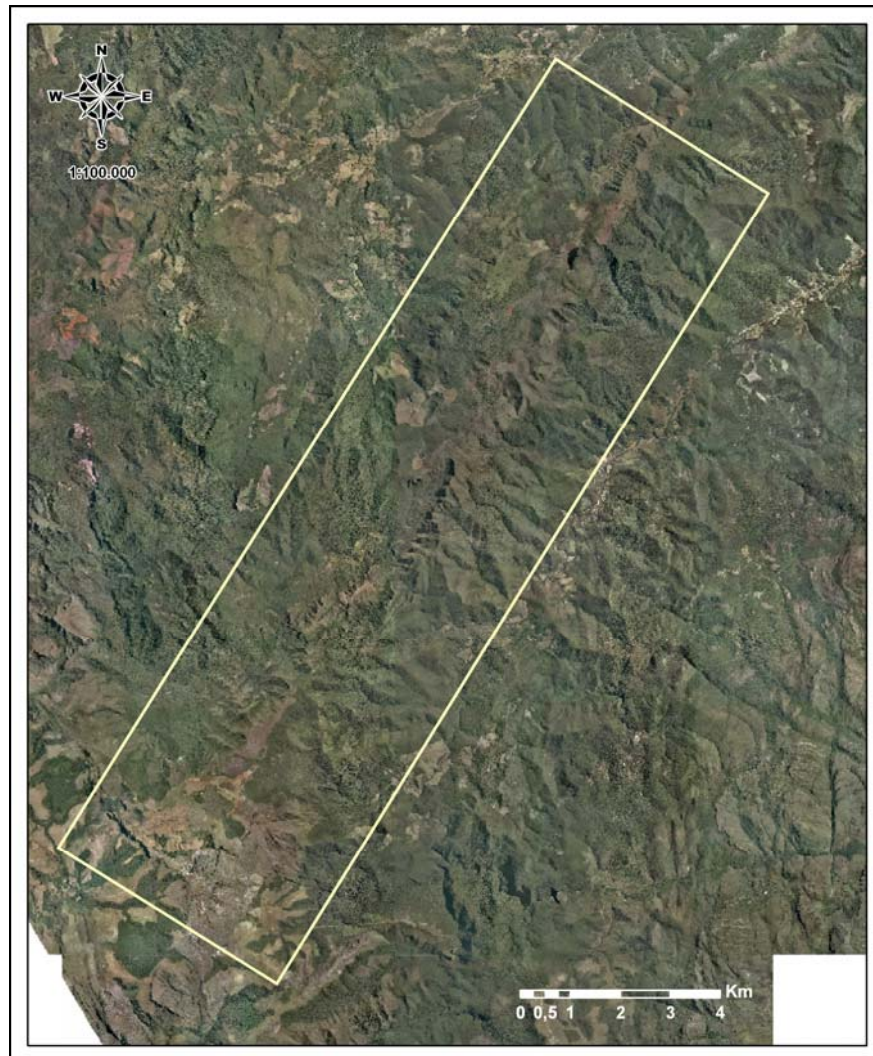


Figura 2 – Ortofoto do flanco sudeste do sinclinal Gandarela com retângulo em amarelo mostrando a área levantada.

O método 3D-FTG (*Three Dimensional - Full Tensor Gravity Gradiometry*), método que utiliza todas as componentes do tensor da gravidade em levantamentos regionais, ainda é pouco conhecido no Brasil e no mundo, existindo poucos trabalhos a respeito. Da mesma maneira, não há na literatura geológica muitos trabalhos, principalmente em geofísica, sobre o sinclinal Gandarela. Fatos estes foram desafiadores e ao mesmo tempo motivadores deste presente estudo.

Este trabalho tem como objetivo mostrar a ferramenta de análise de densidade para delimitar de maneira mais adequada as anomalias gravimétricas, validar o método ao comparar dados sintéticos e dados reais e estudar através de furos de sondagem, a relação entre a intensidade do sinal gravimétrico e o material de subsuperfície.

O presente estudo tem como finalidade a identificação de anomalias gravimétricas localizadas na formação ferrífera Cauê no flanco sudeste do sinclinal Gandarela a serem usadas como alvos exploratórios.

2 THREE DIMENSIONAL - FULL TENSOR GRAVITY GRADIOMETRY (3D-FTG)

2.1 Breve Histórico

A tecnologia *Three Dimensional - Full Tensor Gravity Gradiometry* (3D-FTG) foi desenvolvida pela Bell Aerospace (atual Lockheed Martin) para a Marinha dos Estados Unidos da América para ser utilizada nos submarinos nucleares classe *Trident* em 1973. Em 1998 a Bell Geospace, detentora dos direitos da tecnologia 3D-FTG, começou a utilizar o 3D-FTG para exploração de petróleo no Golfo do México, recebendo o nome comercial de Marine-FTG[®]. Em 2001 começaram modificações no sistema para transformá-lo em aéreo. No ano seguinte, o sistema modificado foi acoplado em um avião Cessna Grand Caravan e lançado como Air-FTG[™].

2.2 A Teoria 3D-FTG

O campo gravitacional é um campo vetorial que pode ser decomposto em três componentes mutuamente perpendiculares (G_x , G_y e G_z). Estes vetores representam a aceleração da gravidade nas três direções coordenadas. Gradiometria gravimétrica envolve medições de variações espaciais (gradientes) do campo gravitacional. Cada uma das três componentes vetoriais do campo gravitacional tem um gradiente paralelo a cada um dos três eixos coordenados mutuamente perpendiculares. Um gradiente representa a taxa de variação de cada componente de gravidade, com mudança da posição nas três direções coordenadas. Deste modo, um instrumento FTG deve medir ou derivar nove componentes do tensor

gradiente da gravidade, T_{ij} , onde i e j são x , y ou z (Figura 3). Estes nove elementos podem ser dispostos sob a forma de uma matriz 3×3 . Seja T a matriz do tensor total, então,

$$T = \begin{pmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{zz} \end{pmatrix}$$

Apesar de o tensor total consistir de nove componentes, apenas cinco são verdadeiramente independentes. O campo gravitacional é um campo conservativo, o que significa que o trabalho necessário para mover uma massa de A para B dentro do campo independe do caminho percorrido, somente importam o ponto inicial e final. De acordo com Blakely (1995), o tensor gradiente da gravidade é simétrico em relação à diagonal principal (i.e. $T_{xy} = T_{yx}$, $T_{zy} = T_{yz}$ e $T_{zx} = T_{xz}$). Para medições feitas acima da superfície da Terra e ignorando a massa da atmosfera, o potencial gravitacional obedece à Equação de Laplace e a soma dos elementos da diagonal principal é igual a 0 (i.e. $T_{xx} + T_{yy} + T_{zz} = 0$) (Blakely, 1995). Então, as cinco componentes independente do tensor do gradiente total são T_{xy} , T_{xz} , T_{yz} e quaisquer dois entre T_{xx} , T_{yy} e T_{zz} . Em prática, o gradiente gravitacional vertical ou termo T_{zz} é dado mesmo se T_{xx} e T_{yy} sejam dados também porque T_{zz} é o gradiente que é mais facilmente relacionado geologia de subsuperfície.

Gradientes são medidos em unidades de eotvos, onde 1 Eo é igual a 0,1 mGal/km. Como 1 mGal é igual a 10^{-5} m/s^2 , 1 Eo é igual a $10^{-9}/\text{s}^2$.

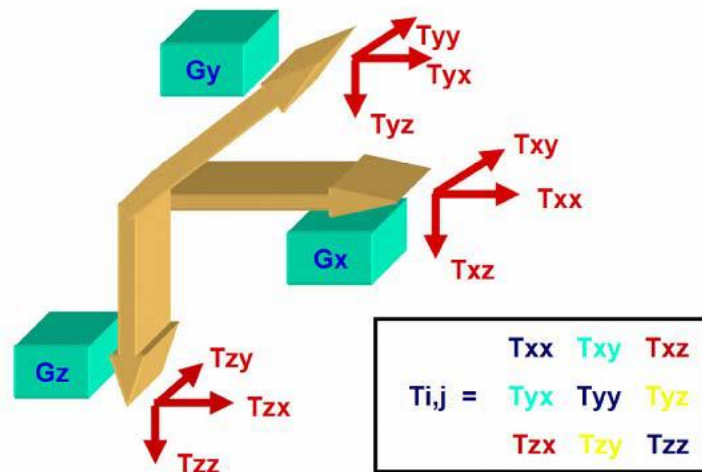


Figura 3 – Diagrama esquemático onde as setas em dourado representam as componentes do campo gravitacional e em vermelho as componentes do tensor (Murphy, 2003).

2.3 O Sistema Air-FTG™

O sistema Air-FTG™ consiste de três *Gravity Gradiometer Instruments* (GGIs). Dentro de cada GGI estão dois pares de acelerômetros dispostos ortogonalmente em um disco (Figura 4), separados por uma distância de 10 cm. Os gradientes do campo gravitacional são medidos pela diferença lida entre os pares de acelerômetros opostos em cada disco. Os discos giram à frequência de 0,5 Hz. Os três GGIs são montados, de modo que se vistos de cima, a projeção de seus eixos formem ângulos de 120° entre si. Seus eixos são mutuamente perpendiculares e cada um tem o mesmo ângulo em relação a vertical (Figura 5). Para minimizar qualquer influência relacionada à orientação ou à direção do movimento do instrumento, a assembléia de GGIs tem uma rotação constante em relação ao eixo vertical.

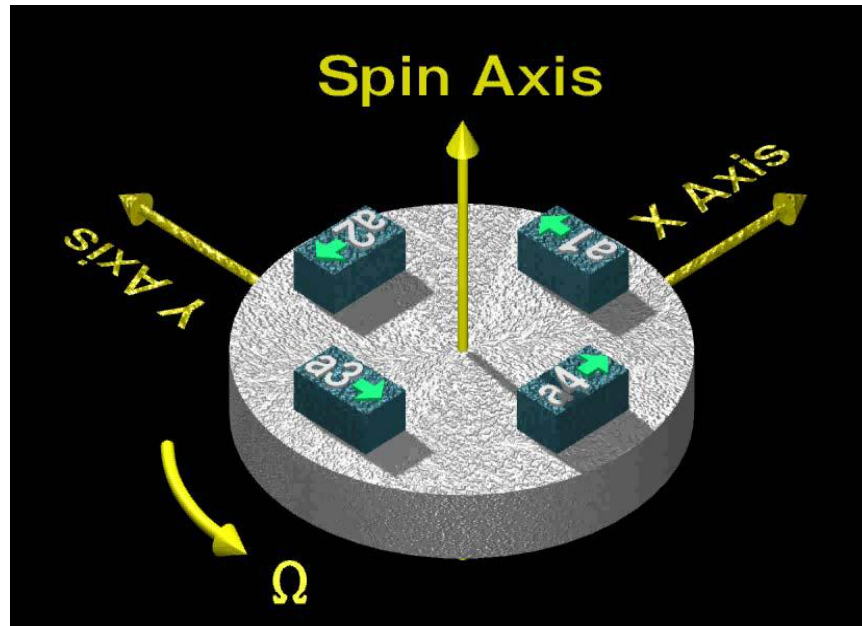


Figura 4 – Modo como são dispostos os dois pares de acelerômetro dentro de um GGI (Hammond e Murphy, 2003).

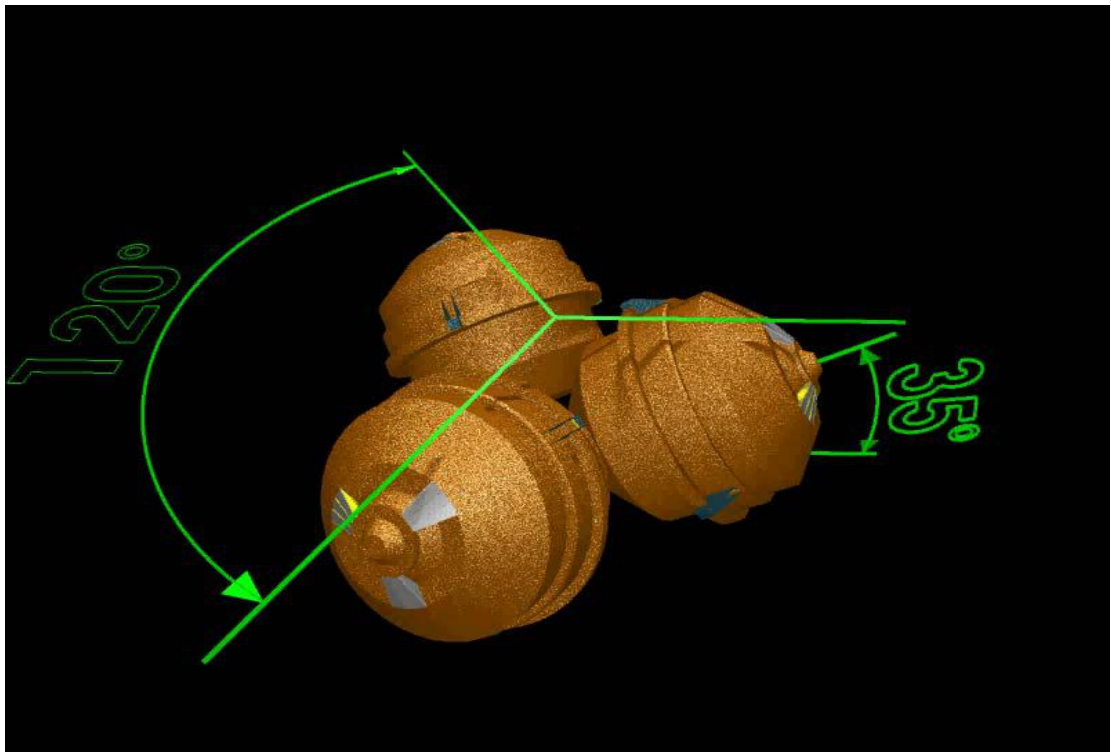


Figura 5 - GGIs com projeção dos eixos formando ângulos de 120° entre si e inclinação constante em relação ao plano horizontal (Hammond e Murphy, 2003).

O acelerômetro é composto por uma massa (“proof mass”) envolta em uma bobina e presa a um campo magnético gerado por um dipolo. A massa está presa ao campo magnético

e qualquer movimento feito pela massa (que é sensível a massas externas) é registrado pelo “*capacitive pick off*”. Esse valor lido (corrente elétrica) passa por um filtro e por um amplificador e é aplicado de volta na espira que fica envolta na massa (“*proof mass*”) para mantê-la parada. Essa corrente elétrica é traduzida em tensão elétrica e essa voltagem é proporcional à aceleração.

O sistema Air-FTG™ é capaz de compensar a turbulência sofrida pela aeronave e reter apenas os sinais de alta frequência importantes ao levar em conta a diferença do campo gravitacional sentida por cada par de acelerômetros.

A plataforma móvel que contem o Air-FTG™ é instalada no centro de gravidade da aeronave, próxima ao centro de *pitch*, *roll* e *yaw* para minimizar as acelerações rotacionais.

Pitch, *roll* e *yaw* são rotações que a aeronave pode sofrer durante o voo. *Pitch* é a rotação em relação ao eixo lateral, *roll* é a rotação em relação ao eixo longitudinal e *yaw* é a rotação em relação ao eixo vertical (Figura 6).

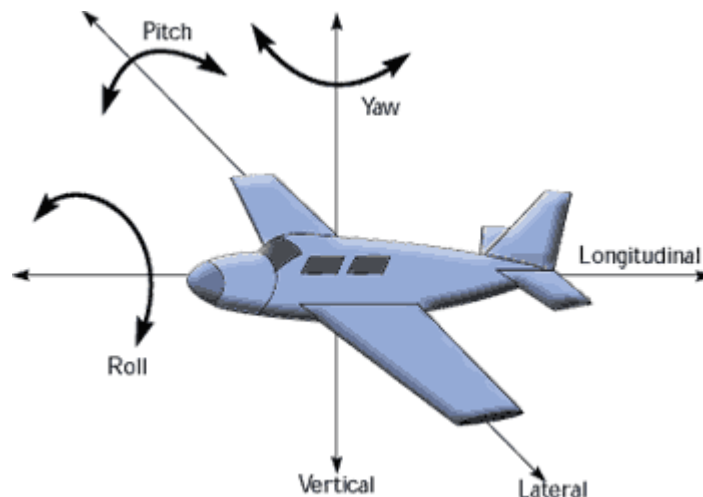


Figura 6 – O três eixos de rotação de uma aeronave: *pitch*, *roll* e *yaw*. Extraído de <http://quest.arc.nasa.gov/aero/virtual/demo/aeronautics/tutorial/motion.html>.

Dois acelerômetros dedicados medem qualquer aceleração residual e durante a compensação “post mission” a influência desta aceleração é removida.

3 GEOLOGIA

3.1 Geologia Regional

Alocado entre as latitudes 19° 45' S e 20° 30' S e longitudes 43° 22' 30'' W e 44° 7' 30'' W, o Quadrilátero Ferrífero (Figura 7) representa uma região geologicamente importante do Pré-Cambriano brasileiro, devido a suas riquezas minerais, principalmente ferro, ouro e manganês. Localiza-se na região central do Estado de Minas Gerais e ocupa uma área de aproximadamente 7.000 km². Segundo Dorr (1969), o Quadrilátero Ferrífero foi denominado por Gonzaga de Campos, recebe seu nome em referência à riqueza de formações ferríferas bandadas (BIF's) e de depósitos de minério de ferro.

A região é um dos sítios clássicos de rochas pré-Cambrianas do mundo. Possuidoras de uma geologia complexa, as rochas do Quadrilátero Ferrífero se subdividem em pelo menos três séries, separadas por discordâncias principais.

O Quadrilátero ferrífero tem sido alvo de estudos geológicos com as mais variadas finalidades desde os estudos pioneiros de Eschwege (1822, 1832, 1833, *apud* Wildhagen, 1998) na região de Ouro Preto, contando com a descrição geral de diversas unidades conhecidas hoje.

Entre o período de 1881 e 1906, Gorceix e Derby iniciaram uma nova fase de estudos da região, culminando na definição da Série Minas por Derby (1906) que mais tarde seria subdividida em cinco formações (Quartzito Caraça, Xisto Batatal, Itabira, Piracicaba e Quartzito Itacolomi) por Harder & Chamberlin (1915).

A primeira metade do século XX foi um momento de extensa produção científica no local, principalmente quando da publicação do mapa geológico do estado de Minas Gerais ao milionésimo, por Guimarães e Barbosa em 1934 (Bertolino, 2006).

O convênio USGS-DNPM, estabelecido no final da década de 40 e desenvolvido nas décadas de 50 e 60, permitiu a caracterização cartográfica da região na escala de 1:25.000. No final do projeto, um relatório foi publicado, com a redefinição estratigráfica e estrutural das rochas proterozóicas, levando-se em conta as feições sedimentares preservadas. Este convênio permitiu um fortalecimento do conhecimento geológico, que foi reunido por Dorr (1969).

A coluna estratigráfica definida por Dorr (1969) é utilizada até hoje como referência para estudos geológicos do Quadrilátero Ferrífero, apesar de ter sofrido inúmeras redefinições e rearranjos ao longo do tempo.

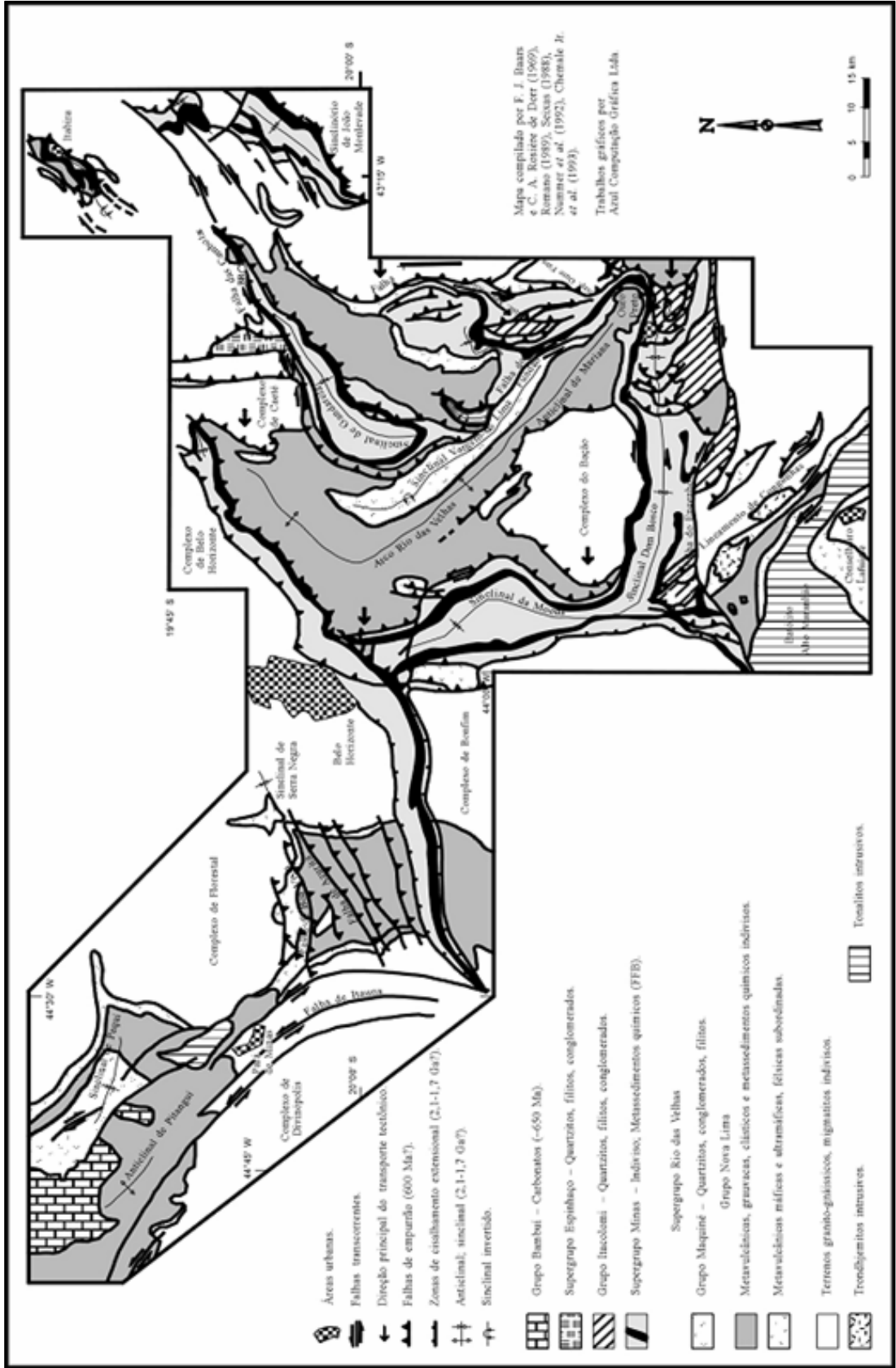


Figura 7 – Mapa Estrutural e Estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero e adjacências.

3.2 Litoestratigrafia

O Quadrilátero ferrífero compõe-se de três grandes unidades: (1) complexo granítico-gnáissico (embasamento cristalino); (2) "greenstone belt" do Arqueano (Supergrupo Rio das Velhas); (3) as seqüências metassedimentares supracrustais do Proterozóico (Supergrupo Minas). Observam-se ainda as rochas metassedimentares do Grupo Itacolomi e localmente são observadas bacias terciárias como Fonseca e Gandarela. Na Figura 8, está esquematizada a coluna geológica padrão para o Quadrilátero Ferrífero.

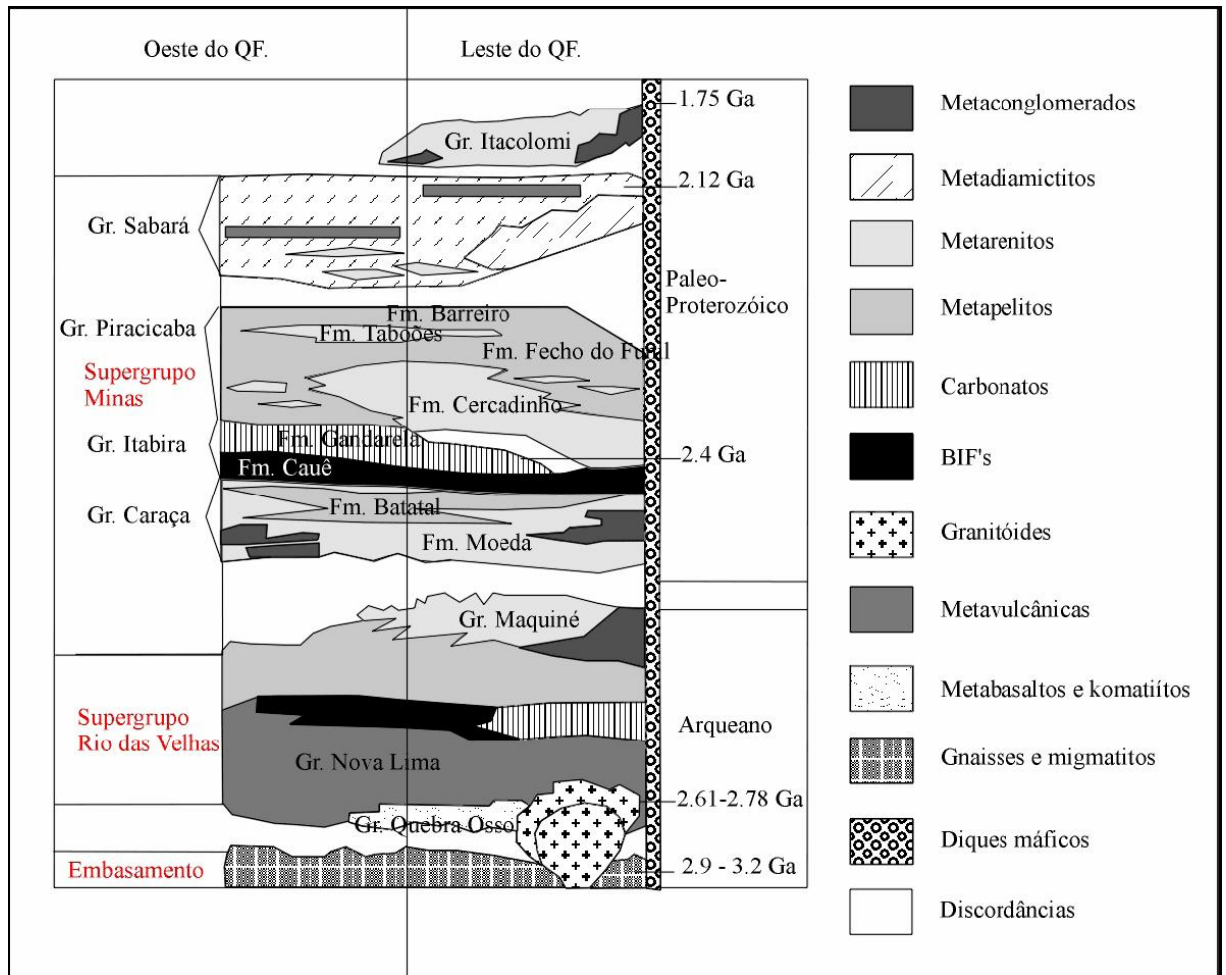


Figura 8 - Coluna estratigráfica proposta para o Quadrilátero Ferrífero, modificada. (Alkmin & Marshak, 1998).

3.2.1 Complexo granítico-gnáissico

Considerado o embasamento dos supergrupos Rio das Velhas e Minas, o complexo granítico-gnáissico é composto por complexos gnáissicos metamórficos, metaultramafitos, migmatitos, metatonalitos a gnaisses, anfibolitos e pegmatitos, formados principalmente no Arqueano e no Proterozóico (Transamazônico). As rochas desta unidade Apresentam metamorfismo nas fácies anfibolito a granulito, e retrometamorfismo na fácies xisto-verde.

Análises geocronológicas em amostras de rochas de alguns destes complexos revelaram idades de 2,9 – 3,2 Ga. E também, duas gerações de plútons para o Neoarqueano: 2,78 – 2,77 Ga. (plútons cálcio alcalinos) e 2,73 – 2,62 Ga. (granitos anorogênicos) (Carneiro 1992, Carneiro *et al.* 1995, *apud* Wildhagen, 1998).

Os complexos são denominados de Complexo Congonhas (a Sudoeste do Quadrilátero Ferrífero), Complexo Bonfim e Complexo Moeda (a Oeste da Serra da Moeda), Complexo Caeté (a Leste da cidade de Caeté), Complexo Santa Rita (a Sudoeste da Serra de Ouro Branco), Complexo de Belo Horizonte situado ao Norte da Serra do Curral e a Leste da Serra do Caraça Complexo de Santa Bárbara. O Complexo do Bação está localizado na porção central do Quadrilátero Ferrífero, apresentando uma estrutura dômica.

3.2.2 Supergrupo Rio das Velhas

O Supergrupo Rio das Velhas é composto por uma seqüência vulcano-sedimentar, do tipo “greenstone belts” levemente metamorfizadas, possui idade arqueana e se sobrepõe cronologicamente às rochas do Supergrupo Minas. Dorr *et al* (1957) descreveu estas rochas e as subdividiu com base em uma discordância pouco expressiva em dois grupos: Nova Lima (base) e Maquiné (topo).

Segundo Ladeira (1980), os sedimentos do Grupo Nova Lima representam uma seqüência vulcano-sedimentar do tipo “greenstone belt”, podendo ser subdividido em três unidades: (1) uma unidade basal de rochas metavulcânicas ultramáficas, representada por serpentinitos, talco-xistos, esteatitos, metabasaltos, metatufos, anfibolitos metamorfizados, bem como komatiitos com estrutura spinifex; (2) uma unidade intermediária, de rochas metassedimentares químicas, composta por formações ferríferas bandadas, metacherts, xistos carbonáticos e filitos; e (3) uma unidade superior, de rochas metassedimentares clásticas, constituída por quartzo-xistos, quartzo filitos, quartzitos impuros e metaconglomerados.

O Grupo Maquine sobrepõe-se ao Grupo Nova Lima. Seu contato se apresenta ora discordante, ora concordante e ora gradacional. Este grupo foi subdividido por Dorr (1969) em duas formações: A Formação Palmital (inferior), composta por quartzitos sericíticos, filitos quartzosos e filitos, sotoposta à Formação Casa Forte (superior), originalmente definida por Gair (1962), constituída por quartzitos sericíticos, cloríticos a xistosos e filitos. O contato entre as formações é gradacional, e caracteristicamente marcado por um nível conglomerático.

Schorscher (1979, *apud* Wildhagen, 1998) propôs a inclusão de uma seqüência de rochas ultramáficas–máficas, com estruturas spinifex, na base do Supergrupo Rio das Velhas, denominada de Grupo Quebra Ossos.

3.2.3 Supergrupo Minas

A Série Minas foi denominada por Derby (1906), e desde então, principalmente pelo avanço dos conhecimentos geológicos da área, muitas modificações foram feitas. Hoje a série de Derby é denominada Supergrupo Minas, e se compõe de uma seqüência de rochas metassedimentares com pequena contribuição vulcânica, constituída de quartzito, quartzo-

mica-xistos, metaconglomerados, filitos, formações ferríferas bandadas do tipo lago superior e rochas carbonáticas (Alkmim & Marshak, 1989).

Baseando-se nos ciclos de sedimentação, Dorr (1969) subdivide o Supergrupo Minas em quatro grupos da base para o topo: Grupo Tamanduá, Grupo Caraça, Grupo Itabira e Grupo Piracicaba.

O Grupo Tamanduá foi definido por Simmons e Maxwell (1961, *apud* Dorr, 1969) e subdivide-se em duas formações: Formação Cambotas, na base, que inclui quartzitos, xistos e filitos, e, no topo, por uma formação não nominada, composta por filitos, formação ferrífera dolomítica, conglomerados, quartzitos grosseiros e xistos quartzosos. Sua localidade tipo, segundo os autores, situa-se na Serra do Tamanduá.

O Grupo Caraça é basicamente composto por rochas clásticas, metassedimentares e subdivide-se nas formações Moeda e Batatal.

Segundo Dorr (1969), a Formação Moeda apresenta caracteristicamente duas fácies intergradacionais de composição predominantemente quartzosa. A fácies basal é constituída por espesso pacote de quartzito grosso com estruturas sedimentares preservadas. A fácies superior é silicosa de granulometria fina e em algumas regiões confunde-se com os filitos da Formação Batatal. Harder & Chamberlin (1915) consideram as rochas quartzíticas desta unidade como a porção basal da Série Minas; Guimarães (1931, *apud* Bertolino, 2006) a incluiu na Série Itacolomi. A partir de Barbosa (1954, *apud* Bertolino, 2006), as rochas desta unidade voltaram a ser consideradas como sendo a porção basal da Série Minas.

Moraes (1985) considera os depósitos de filitos da Formação Moeda, itabiritos da Formação Cauê e os carbonatos da Formação Gandarela como originados a partir de uma transgressão marinha, e estes sedimentos poderiam estar associados às fácies distais da Formação Moeda.

Dorr (1969) subdivide a Formação Batatal em duas unidades litológicas. A unidade basal é composta de muscovita-sericita-xisto, localmente com brechas, níveis quartzíticos e camadas lenticulares de turmalinito preto de granulometria fina, boudinados, e localmente intercalados com delgadas lentes de dolomito. A unidade do topo compreende finas camadas de chert e hematita. Pires (1983) observou tanto na parte inferior como na superior da Formação Batatal a presença de material vulcânico.

A Formação Batatal se sobrepõe, em sua maior parte, em contato brusco com a Formação Moeda, e está sotoposta gradacionalmente ao Grupo Itabira, tendo seu contato caracteristicamente marcado pelo incremento de hematita nos filitos da Formação Batatal.

O Grupo Itabira foi denominado por Dorr *et al.* (1957), e engloba predominantemente sedimentos essencialmente químicos. Duas formações constituem este grupo: a Formação Cauê e a Formação Gandarela.

A Formação Cauê se destaca economicamente, pois contém grandes depósitos de ferro e se distribui amplamente em toda a região do Quadrilátero Ferrífero. Esta formação é representada por três litotipos, ora intercalados com pequenas lentes de filito e rocha carbonática e com alguns horizontes manganésíferos: (1) itabirito (quartzo, hematita e magnetita), trata-se de uma formação ferrífera do tipo lago superior que ocorre de forma predominante na formação; (2) itabirito dolomítico (quartzo, hematita, magnetita e dolomita) e (3) itabirito anfíbolítico.

A Formação Gandarela foi denominada por Dorr (1958), na região do sinclinal Gandarela, a leste do Quadrilátero Ferrífero. Compõe-se de camadas de rochas carbonáticas, representadas principalmente por dolomitos e subordinadamente por itabiritos, filitos dolomíticos e filitos. Os dolomitos, avermelhados, esbranquiçados ou acinzentado, são característicos; tipicamente apresentam granulometria fina a média, estratificados ou maciços, podendo apresentar estruturas indicativas de fluxo sedimentar e estruturas brechóides.

Esta unidade apresenta grande variação de espessura ao longo do Quadrilátero Ferrífero. Na região do sinclinal Dom Bosco varia de 200–250 metros, podendo chegar a mais de 400 metros na região do ribeirão da Colônia.

A Formação Gandarela apresenta contato gradacional com a Formação Cauê. Já seu contato superior, com o Grupo Piracicaba, é de natureza erosional, marcando a mudança da seqüência deposicional predominantemente química para a seqüência clástica.

Pires *et al.* (1984) propuseram a subdivisão da Formação Gandarela na região do sinclinal Dom Bosco em duas unidades informais: inferior e superior. Os autores sugeriram que os sedimentos desta formação, e pelo menos a base do Grupo Piracicaba tenham sido depositados em ambiente orogênico, com freqüentes perturbações do assoalho oceânico e desmoronamento subaquoso.

Dorr *et al.* (1957), individualizaram o Grupo Piracicaba em cinco formações (Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões, Barreiro e Sabará), sendo equivalente à Formação Piracicaba de Harder & Chamberlin (1915). Esse grupo é composto por metassedimentos clásticos, incluindo conglomerado fino, quartzito e filito grafitoso, contendo subordinadamente precipitados químicos ou bioquímicos. Na maioria das vezes, a identificação das formações que compõem este grupo torna-se muito difícil devido à natureza dos contatos entre as mesmas.

A Formação Cercadinho inclui quartzito ferruginoso, filito ferruginoso, filito, quartzito e pequenas lentes de dolomito. O contato superior com a Formação Fecho do Funil é de natureza gradacional. O contato inferior, com o Grupo Itabira, se apresenta de duas formas: pode ser uma discordância angular ou uma desconformidade erosional na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero.

A Formação Fecho do Funil, denominada por Simmons (1968, *apud* Bertolino, 2006), é representada por uma seqüência de filitos dolomíticos marrom e cinza escuro, dolomitos

argilosos e silicosos, filitos cinza e marrom, metassiltitos e dolomitos impuros. Alguns filitos contêm certo teor de ferro, mas nenhum possui tanta hematita quanto o filito da Formação Cercadinho.

A Formação Taboões é composta por quartzito fino e maciço. A Formação Barreiro é representada por filito e filito grafitoso. A Formação Sabará constitui-se por filito, cloritaxisto, grauvacas e localmente tufos e cherts.

Moraes (1985) considera a Formação Cercadinho como representante de um sistema deltáico originado a partir de uma seqüência regressiva interrompida por uma fase transgressiva responsável pelos filitos dolomíticos da Formação Fecho do Funil e filitos grafitosos da Formação Barreiro.

3.2.4 Intrusivas Pós-Minas

Uma série de delgados veios de pegmatitos com idade incerta intrudem o Supergrupo Minas, bem como uma série de granitóides também não datados. O embasamento deste supergrupo é cortado por pegmatitos similares, datados de 2.06 Ga. O plúton de granitóide Alto do Maranhão, aflorante a sudeste do Quadrilátero Ferrífero, apresenta idade U-Pb de 2.08 Ga. O Supergrupo Minas é ainda intrudido por uma série de diques máficos com strike norte a noroeste, sendo um deles datado por U-Pb de 1.714 Ga.

3.2.5 Grupo Itacolomi

Definido por Guimarães (1931, *apud* Bertolino, 2006) como Série Itacolomi, corresponde a uma unidade sobreposta discordantemente aos sedimentos do Supergrupo Minas. Atualmente esta série é denominada de Grupo Itacolomi e é constituída por quartzitos

e metaconglomerados na base, filitos na porção mediana e quartzito no topo, depositados em ambiente litorâneo ou deltáico (Dorr 1969).

Glockner (1981, *apud* Bertolino, 2006) considera o Grupo Itacolomi como o registro de um bloco tectonicamente alóctone de posição estratigráfica incerta.

Segundo Alkmim *et al.* (1988) o Grupo Itacolomi foi depositado em uma margem de bacia intra ou epicontinental, estes autores propõem uma correlação entre os metassedimentos desse grupo com os da Formação Moeda e do Grupo Tamanduá, compondo uma mesma unidade faciológica, no entanto, para muitos autores a posição estratigráfica desse grupo permanece indefinida.

3.2.6 Sedimentos Cenozóicos

3.2.6.1 Formação Fonseca

Identificada por Maxwell (1972), esta formação apresenta rochas sedimentares pouco litificadas, encontradas sob a “Chapada de Canga” distribuindo-se por uma área plana e não deformada. Litologicamente, esta formação é caracterizada por sedimentos argilo-arenosos flúvio-lacustres, recobertos por depósitos rudáceos ferruginosos (“canga”), incluídos nesta unidade e interpretados como remanescentes da sedimentação na borda da bacia de Fonseca. A datação desta unidade, feita com base em fósseis, indica idades não mais novas que o Terciário superior.

3.3 Geologia Local

Segundo Chemale Jr. & Endo (1990), o sinclinal Gandarela, localizado na parte centro-leste do Quadrilátero Ferrífero, é uma estrutural sinformal, de eixo segundo NE – SW e vergência para NW em sua maior extensão. Por apresentar estilos estruturais distintos ao longo de sua extensão, o sinclinal é dividido em três partes: o segmento nordeste com eixo N60E, que está balizado pelas falhas Cambotas e do Fundão; o segmento central com eixo N40E, que não foi muito afetado pela tectônica EW, de idade brasileira; e o segmento sul, com direção NS (Figura 9).

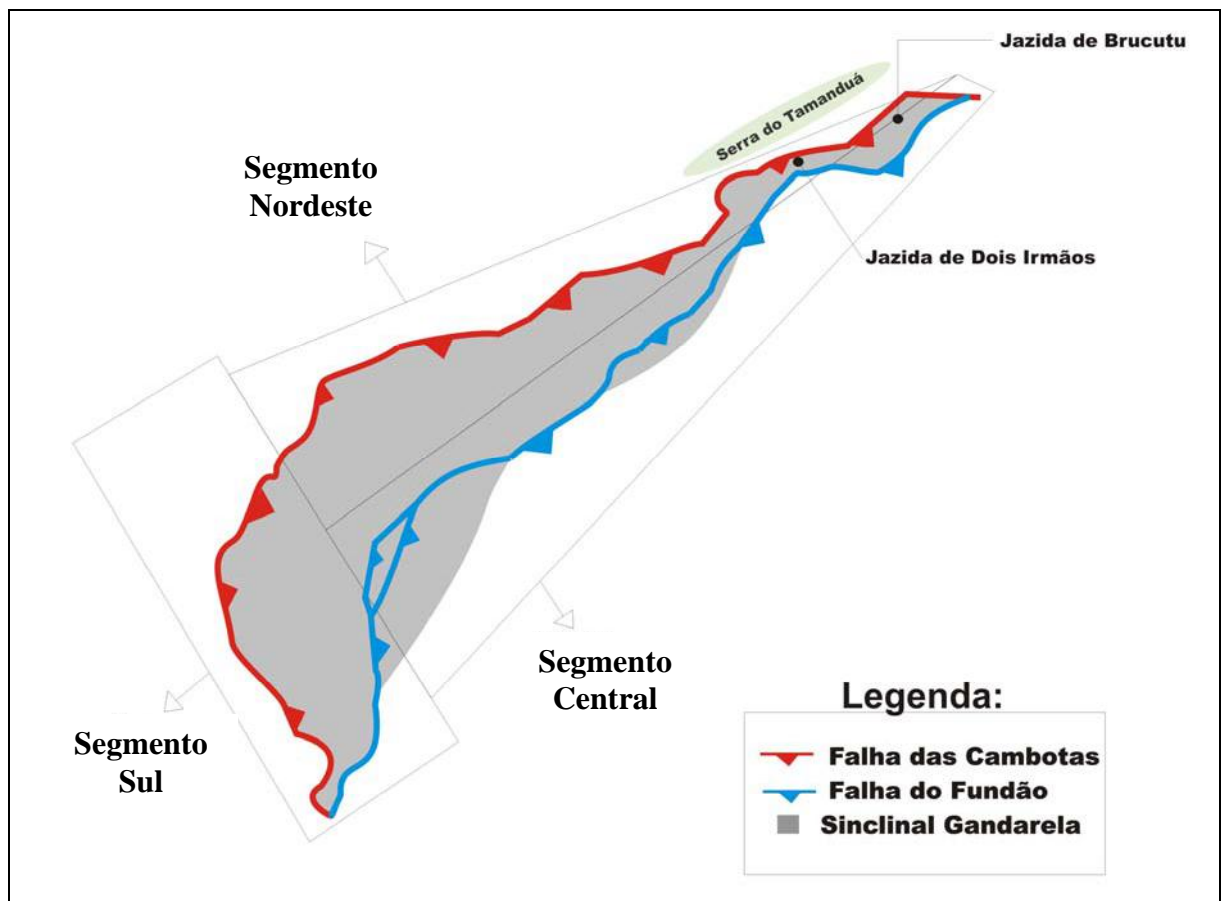


Figura 9 – Sinclinal Gandarela dividido em segmentos Nordeste, Central e Sul e com a localização da jazida de Brucutu, da jazida de Dois Irmãos, da falha das Cambotas, da falha do Fundão e da Serra do Tamanduá (Norte para o topo da imagem e sem escala).

O segmento nordeste exibe no seu flanco NW a falha das Cambotas, a qual cisalhou intensa e paralelamente a estratificação sedimentar. O flanco invertido SE também é cisalhado por uma das diverticulações da Falha do Fundão, disposta nessa porção quase paralela à falha das Cambotas. Como resultado da ação dessas duas falhas do Sistema de Cavalgamento Fundão-Cambotas, este segmento foi comprimido contra o Complexo Granito-Gnáissico de Caeté, resultando numa intensa milonitização das rochas do Supergrupo Minas e na rotação de 20° a 30°, no sentido horário, dessa porção da mega estrutura em relação ao segmento Central.

O segmento nordeste do sinclinal Gandarela forma um homoclinal em contato de baixo ângulo, onde as litologias do grupo Piracicaba situam-se sobre as do grupo Itabira. Nesta região inserem-se duas jazidas de minério de ferro, constituídas basicamente por itabiritos. No extremo nordeste está a jazida de Brucutu (Figura 9), onde localiza-se a mina homônima, em operação pela Vale. A sudoeste desta mina está a jazida de Dois Irmãos (Figura 9). Esta faixa de itabiritos está sotoposta, em discordância tectônica, a quartzo-sericita-talco-xistos do grupo Nova Lima, e é limitada a norte pela serra do Tamanduá (Figura 9), em aparente discordância angular. Uma capa de canga, com 5m a 8m em média de espessura, cobre ambas as jazidas.

O segmento central é o que está mais bem preservado. Os estratos mostram-se cortados por zonas de cisalhamento descontínuas ou então apresentam uma xistosidade pouco desenvolvida. Neste segmento a Falha do Fundão joga o flanco SE sobre o núcleo da estrutura dobrada e corta, em seguida, a megaestrutura longitudinalmente, na região da charneira. Apesar da baixa magnitude de deformação nesse segmento, a sua estruturação interna apresenta-se bem mais complexa que a do segmento nordeste.

O segmento sul exibe uma forma alongada, onde metaconglomerados, quartzitos, filitos e milonitos do Grupo Caraça constituem um homoclinal que se estende em direção NNE-SSW e mergulhos baixos a moderados (0° a 40°) para ESE. A oeste e ao sul deste segmento,

os sedimentos repousam em contato tectônico, discordantemente sobre as rochas xistosas do Grupo Nova Lima. A leste acha-se truncado pela falha do Fundão, que provocou o cavalgamento das rochas do Grupo Nova Lima. Uma espessa zona de cisalhamento desenvolveu-se na extremidade NE, onde a falha inflete para NW, resultando na quase total obliteração do acamamento por intensa milonitização e a formação de dobras isoclinais.

A figura 10 mostra um perfil NW-SE cortando o sinclinal Gandarela nos segmentos nordeste e central.

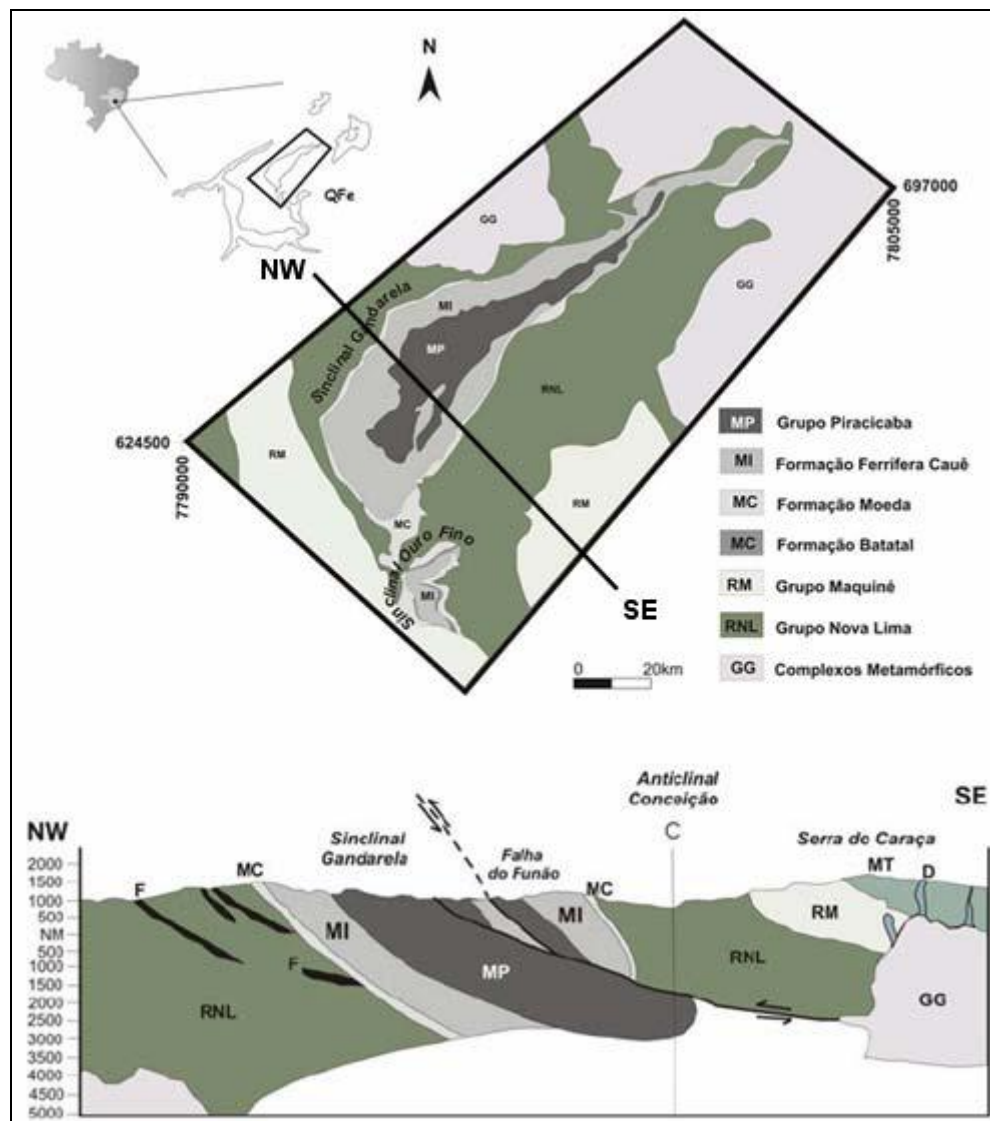


Figura 10 – Perfil NW-SE do sinclinal Gandarela. (Oliveira *et al*, 2005).

A figura 11 mostra a estratigrafia do sinclinal Gandarela, segundo Suckau (1991).

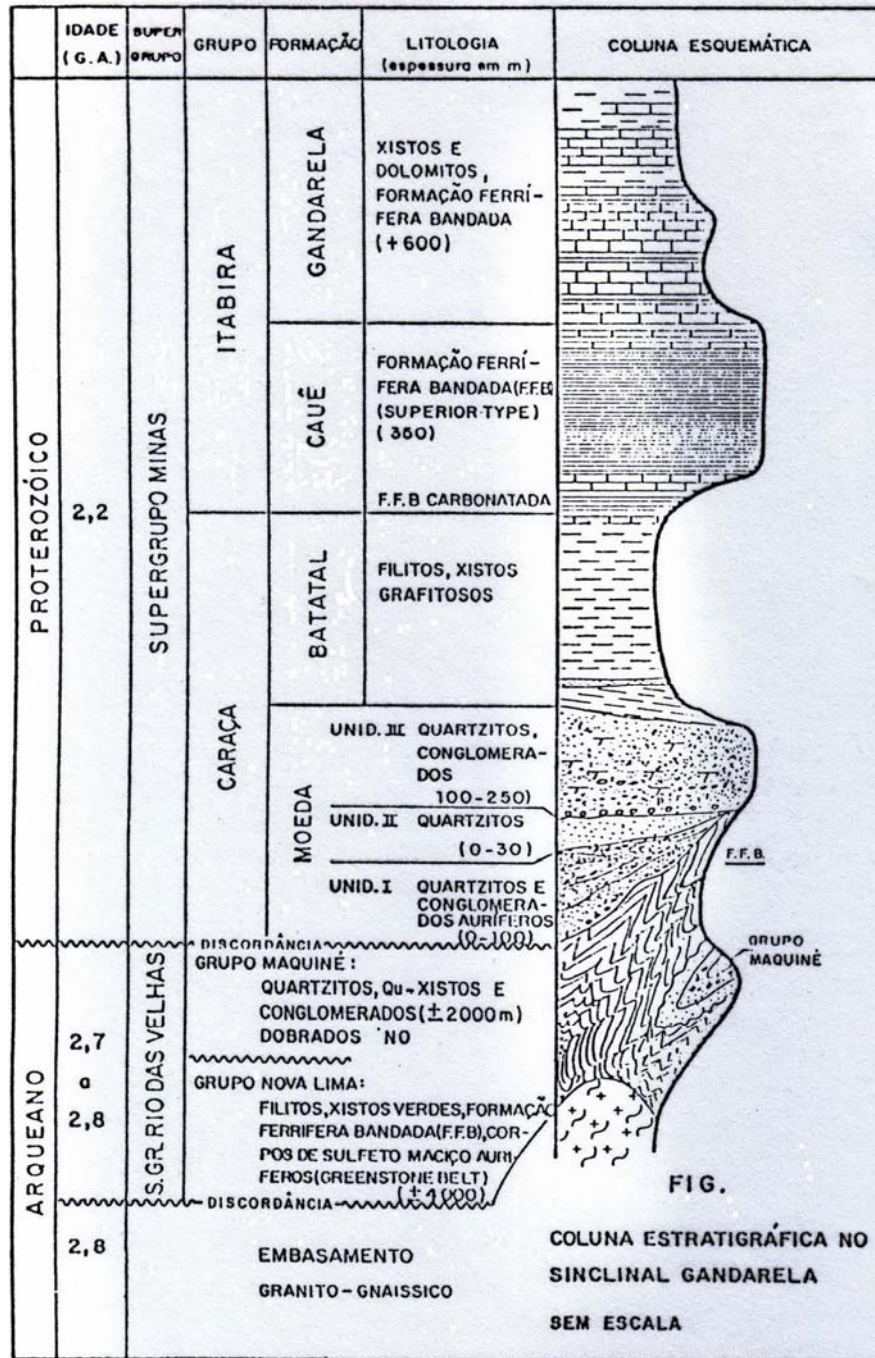


Figura 11 – Coluna estratigráfica do sinclinal Gandarela, sem escala (Suckau, 1991).

4 METODOLOGIA

4.1 Aquisição dos Dados

Os dados foram adquiridos entre os dias 31 de agosto de 2005 e 06 de setembro de 2005. A aeronave utilizada foi um Cessna Caravan C-208. A figura 12 mostra as linhas de vôo na área onde foi realizado o levantamento de aeroradiometria gravimétrica. As linhas estão orientadas na direção NE – SW, com espaçamento de 100 metros entre elas em um total de 50 linhas, perfazendo um total 925 km lineares e uma área de aproximadamente 90,65 km².

A altura de vôo foi de 100 metros, altura esta necessária porque a intensidade do sinal do gradiente decai com o cubo da distância (i. e. $T_{ij} \propto 1/R^3$). Para tentar manter a altura constante utilizou-se a técnica *drape* (técnica de vôo onde piloto tenta, sempre que possível, manter uma altura constante em relação ao solo). O terreno na área apresenta relevo de morros e vales, o que não permitiu que a aeronave mantivesse a altura constante durante todo o tempo de vôo em todas as linhas.

A posição da aeronave é corrigida diferencialmente (DGPS), o que dá confiabilidade à localização da mesma ao voar cada linha.

Após cada vôo, os dados são transferidos para um computador onde algoritmos são utilizados para compensar efeitos que influem nos dados adquiridos, tais como: a turbulência sofrida pela aeronave; a diferença de massa (causada pelo consumo do combustível); as manobras *roll*, *pitch* e *yaw*; a aceleração vertical.

Os dados, após serem aprovados por um rigoroso controle de qualidade, podem ser levados para o processamento.

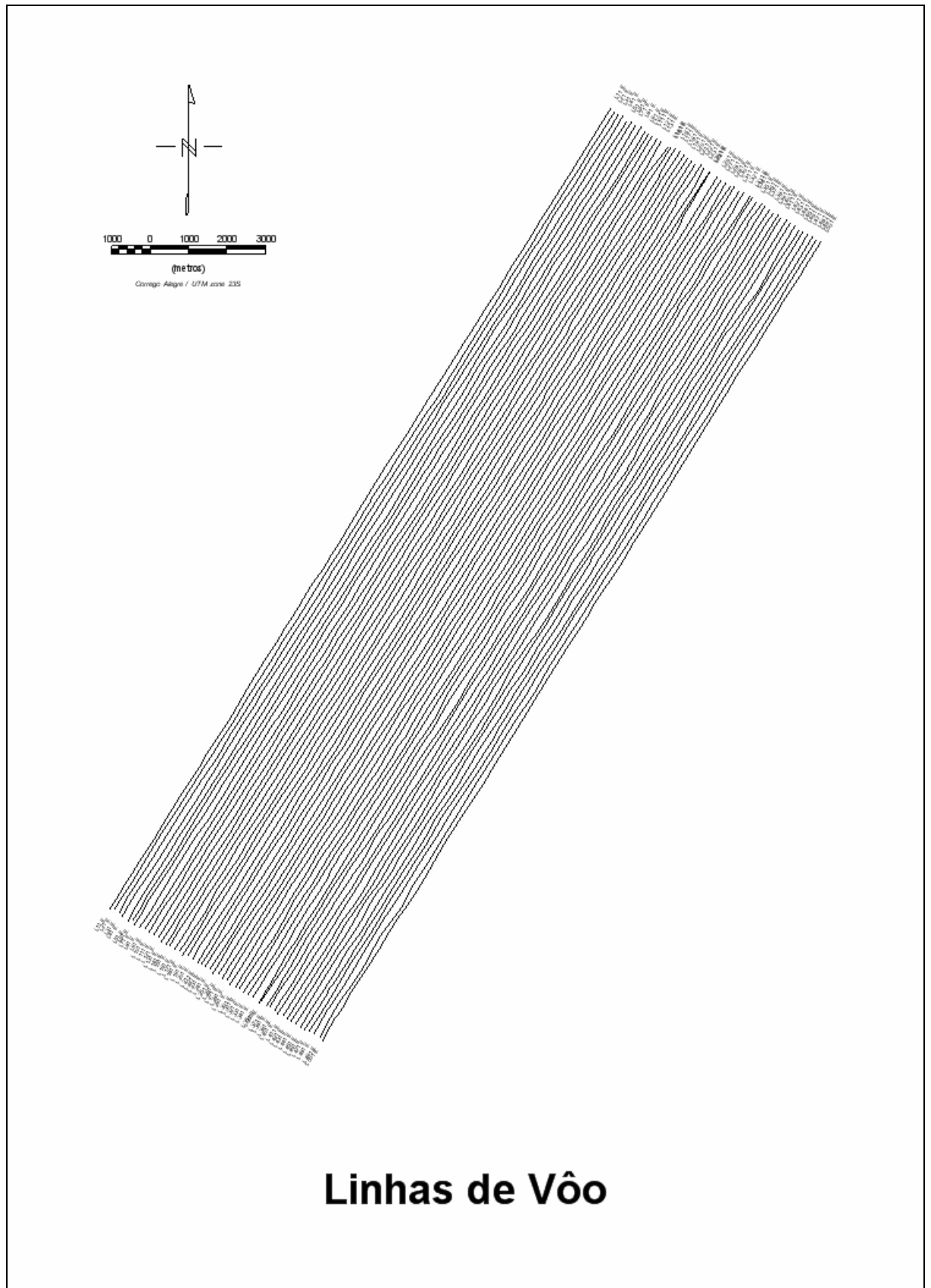


Figura 12 – Linhas de vôo.

4.2 Processamento

O processamento é composto de duas etapas: “*High Rate*” e “*Post Mission Processing*”. Na etapa *High Rate* é feita a correção das forças centrípetas resultantes dos giros dos discos, a aplicação de uma correção *self-gradient* relacionada ao movimento da aeronave e ao consumo do combustível, e a correção das acelerações atuantes no instrumento. Depois os dados são demodulados a fim de serem preparados para a próxima etapa. Durante a demodulação, os dados são *re-sampled* a 0,5 Hz (intervalos de 2 segundos), e as componentes do tensor são extraídas e transformadas de um sistema interno de coordenada para um sistema de coordenada real.

Na etapa *Post Mission Processing* é utilizado um procedimento chamado “*Line Correction*” que contabiliza o movimento dos GGI e utiliza DGPS e dados de navegação inercial para corrigir erros de direção de vôo. Após este procedimento é feito o nivelamento e o micro-nivelamento.

No final da etapa *Post Mission Processing* é aplicada a rotina “*Denoising*”. Esta técnica faz uso das propriedades das medições do tensor total para identificar e remover ruídos residuais nos dados. A rotina *Denoising* tenta identificar uma anomalia em uma das componentes do tensor total e então procura sistematicamente pela resposta correspondente em cada um dos outros componentes. Se a resposta esperada não é encontrada, a anomalia é considerada ruído e então eliminada dos dados.

Correções do terreno são rotineiramente aplicadas aos dados do Air-FTGTM durante a seqüência de processamento. Para isto ser feito é necessário um modelo digital do terreno para calcular as correções.

5 ANÁLISE DE DENSIDADE

Com o intuito de melhorar a determinação de potenciais alvos a serem explorados é feito uma análise de densidade, a qual consiste em fazer correções do terreno na componente Tzz para determinadas densidades, com objetivo de descobrir com que densidade a resposta desta componente fica de acordo com a geologia. É levada em consideração também a densidade do material que se deseja explorar.

Para fins práticos, estas correções funcionam como um limite de corte onde os materiais com densidade abaixo do limite apresentam sinal negativo e os materiais com densidade acima apresentam sinal positivo.

Utiliza-se para fazer as correções a seguinte fórmula:

$$Tzz_TC_d = Tzz_FA - (d \times TC_Tzz_100), \text{ onde}$$

d são os valores de densidade que corrigirão o terreno (i.e. no caso de uma densidade de 3,5 g/cm³ a fórmula fica da seguinte maneira: $Tzz_TC_3,50 = Tzz_FA - (3,50 \times TC_Tzz_100)$)

Tzz_TC_d é a componente Tzz com correção de terreno a uma densidade “d”

Tzz_FA é a componente Tzz Ar Livre

TC_Tzz_100 é o fator de correção de terreno para Tzz a uma densidade de 1.00 g/cm³

Foram feitas correções a partir de densidade 1,10 g/cm³ até 4,00 g/cm³.

Tanto a análise de densidade como os grids de cada componente do tensor total foram gerados no software *Geosoft Oasis Montaj*[®].

As figuras 13 até 42 mostram os grids da componente Tzz corrigida para a densidade de 1,10 g/cm³ até 4,00 g/cm³. As linhas em preto demarcam a formação ferrífera.

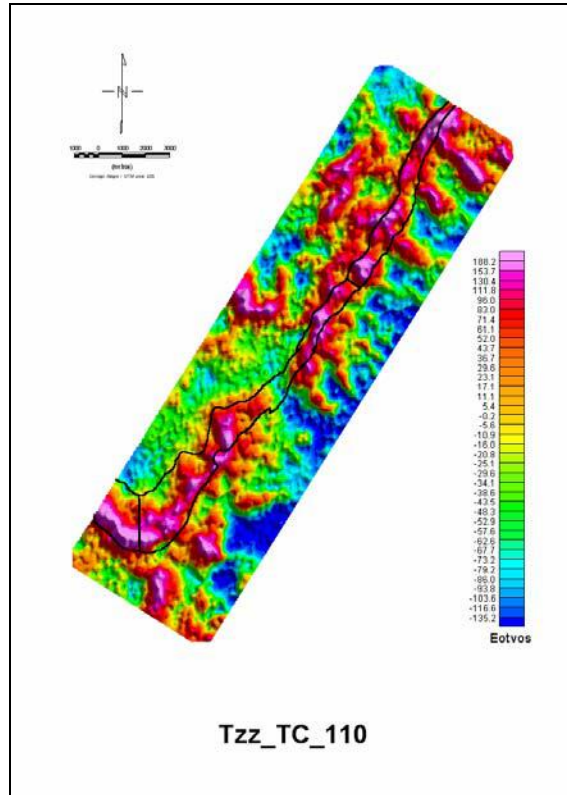


Figura 13 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 1,10 g/cm³.

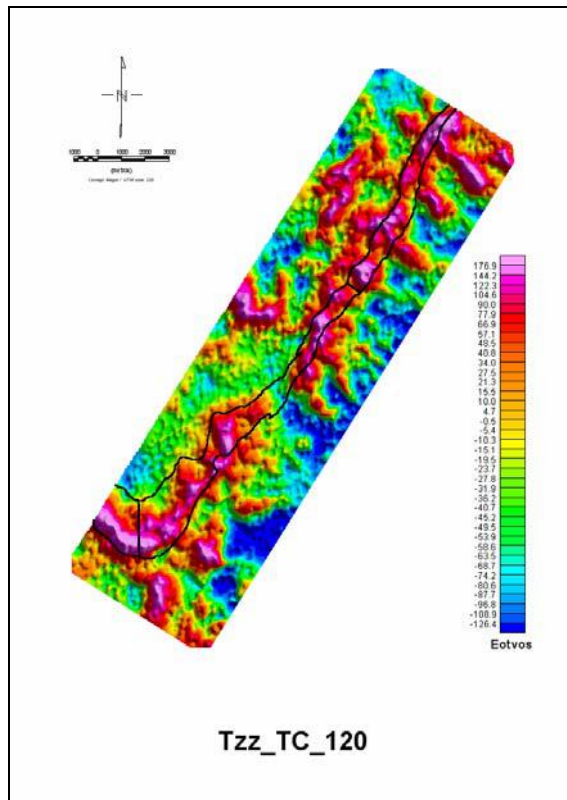


Figura 14 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 1,20 g/cm³.

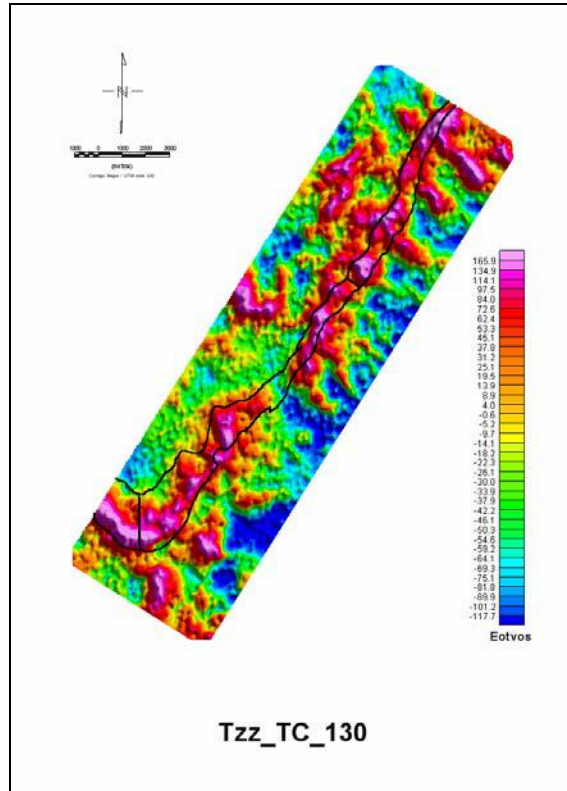


Figura 15 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 1,30 g/cm³.

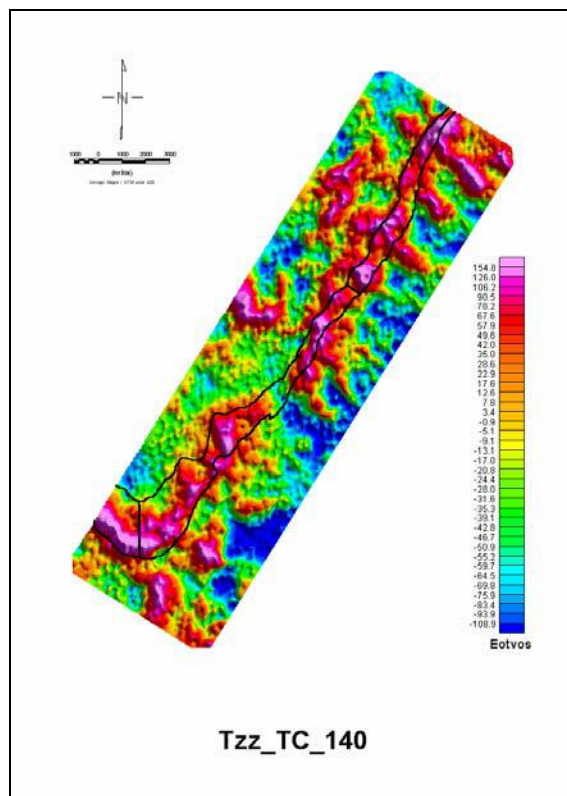


Figura 16 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 1,40 g/cm³.

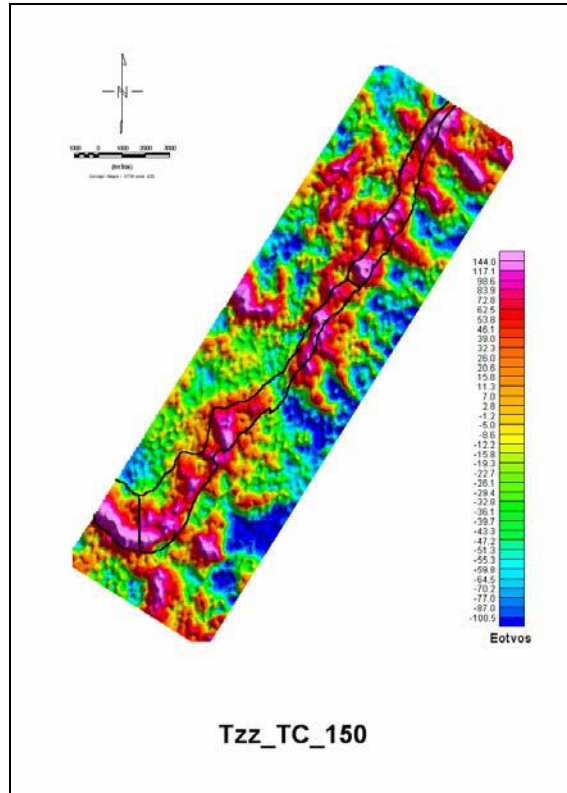


Figura 17 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 1,50 g/cm³.

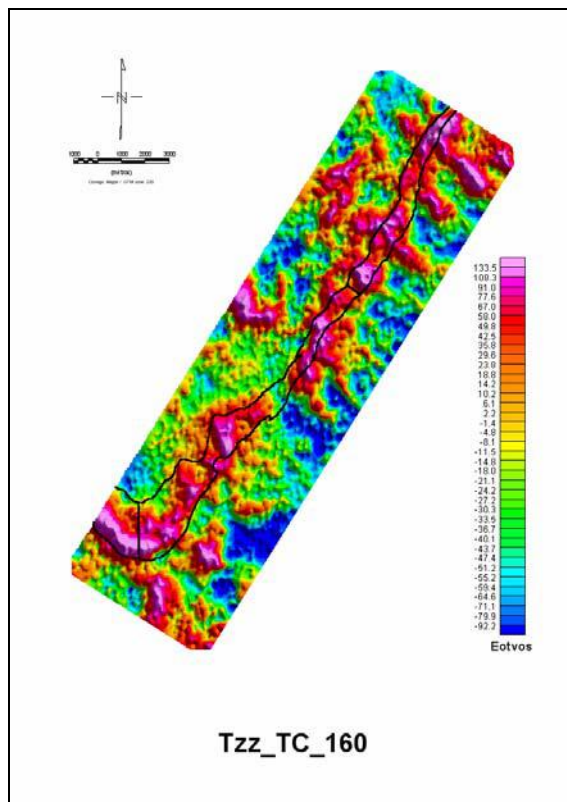


Figura 18 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 1,60 g/cm³.

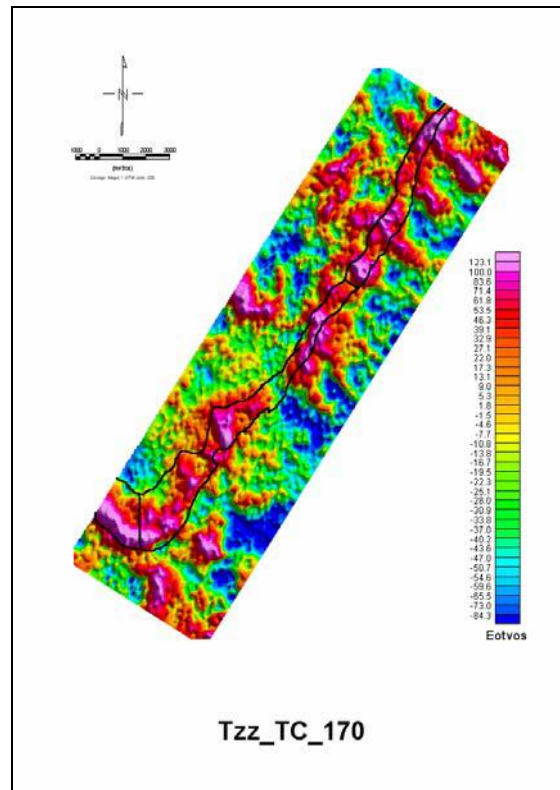


Figura 19 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade $1,70 \text{ g/cm}^3$.

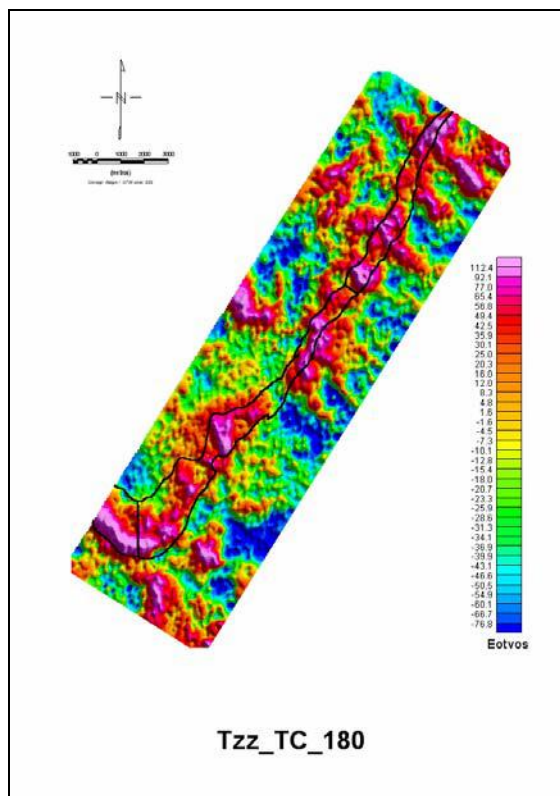


Figura 20 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade $1,80 \text{ g/cm}^3$.

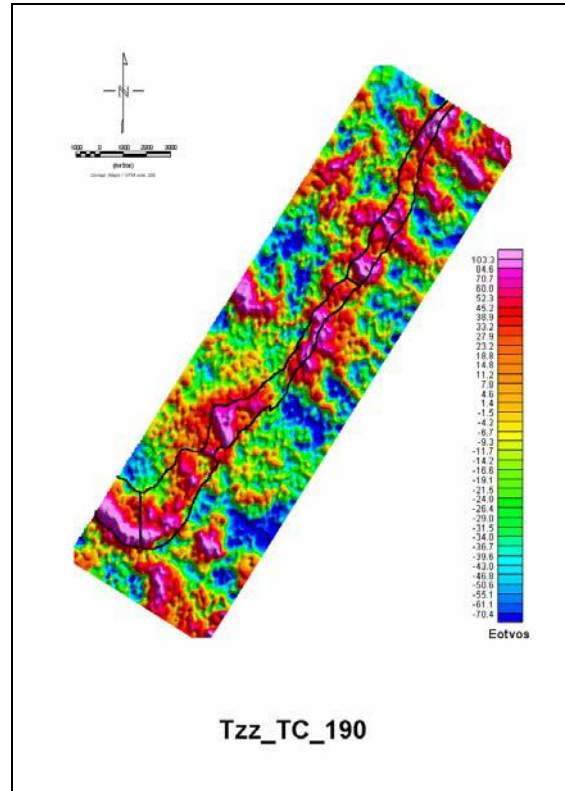


Figura 21 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 1,90 g/cm³.

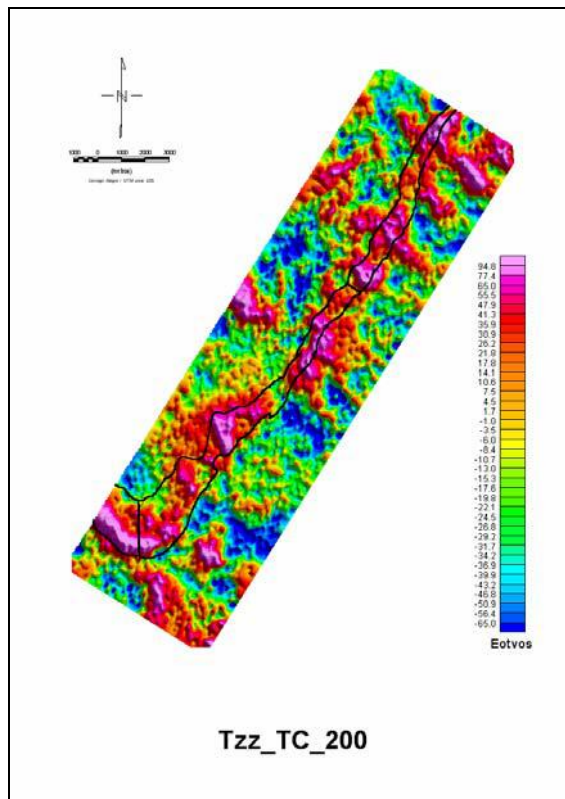


Figura 22 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,00 g/cm³.

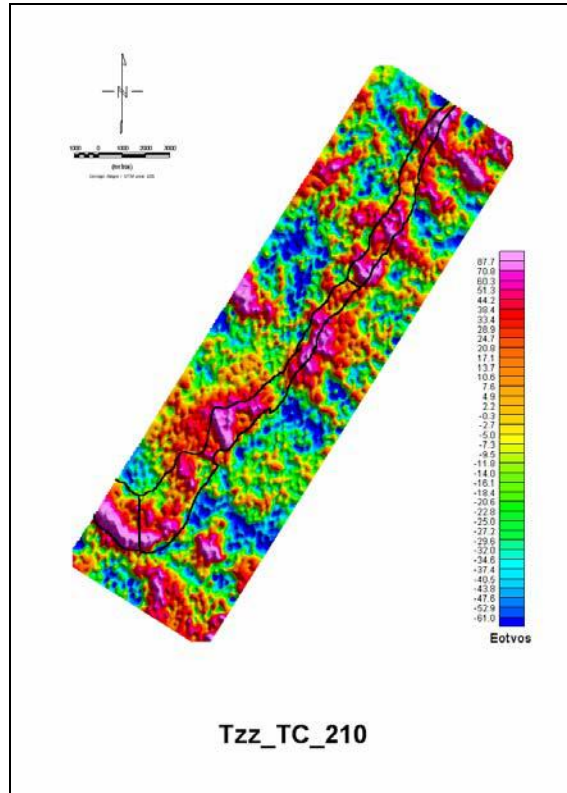


Figura 23 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,10 g/cm³.

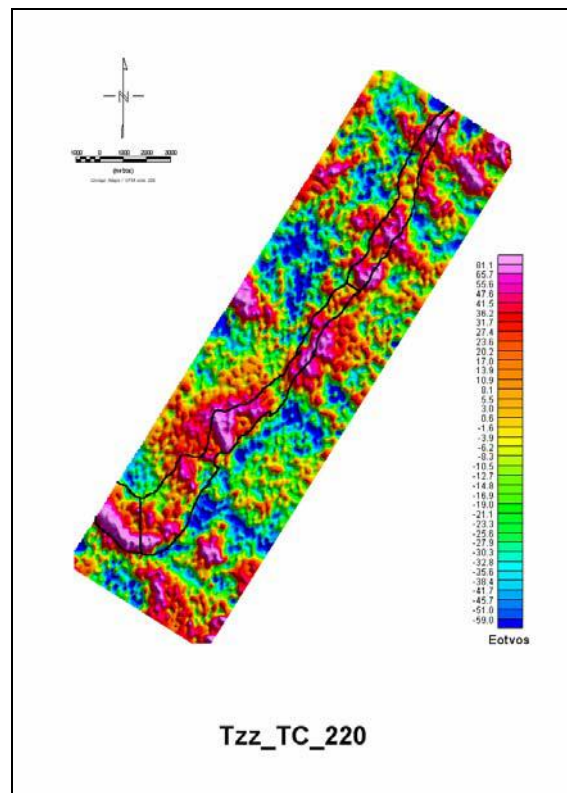


Figura 24 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,20 g/cm³.

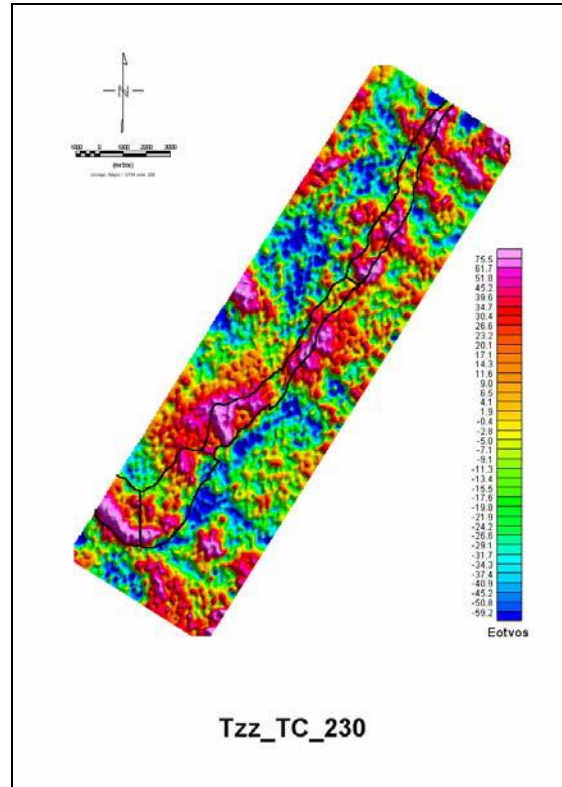


Figura 25 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,30 g/cm³.

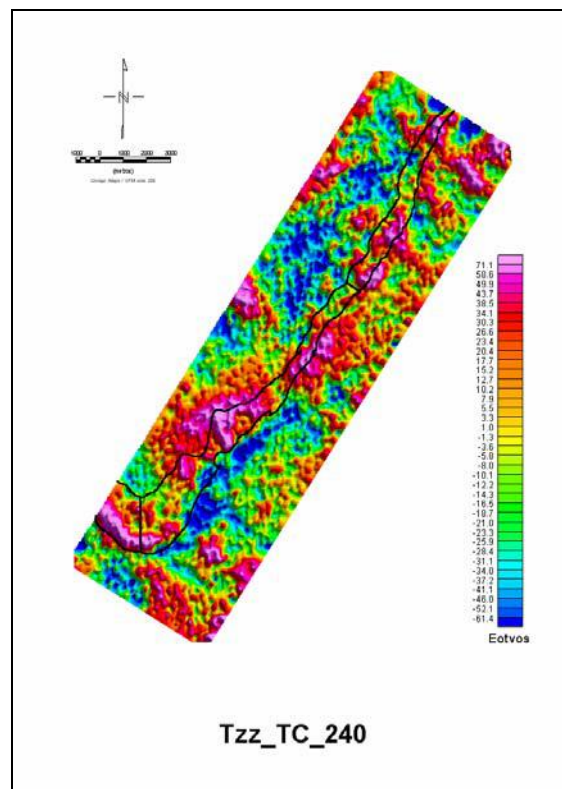


Figura 26 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,40 g/cm³.

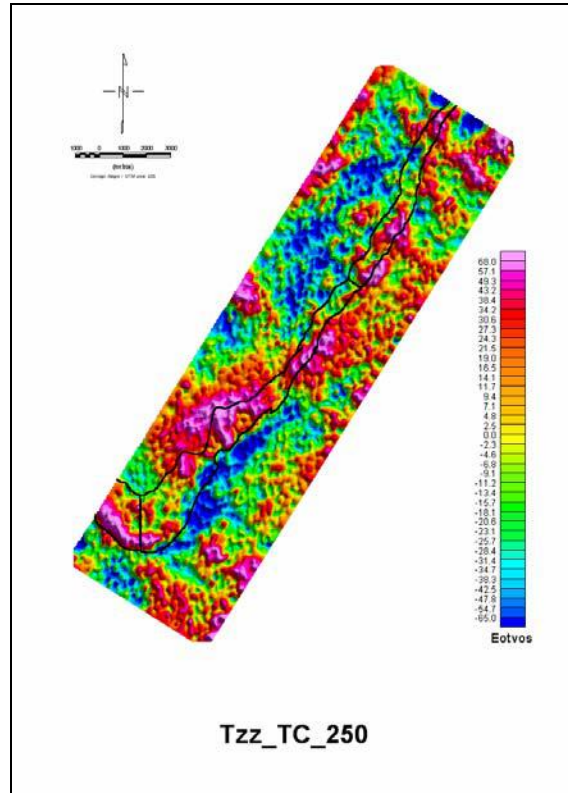


Figura 27 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,50 g/cm³.

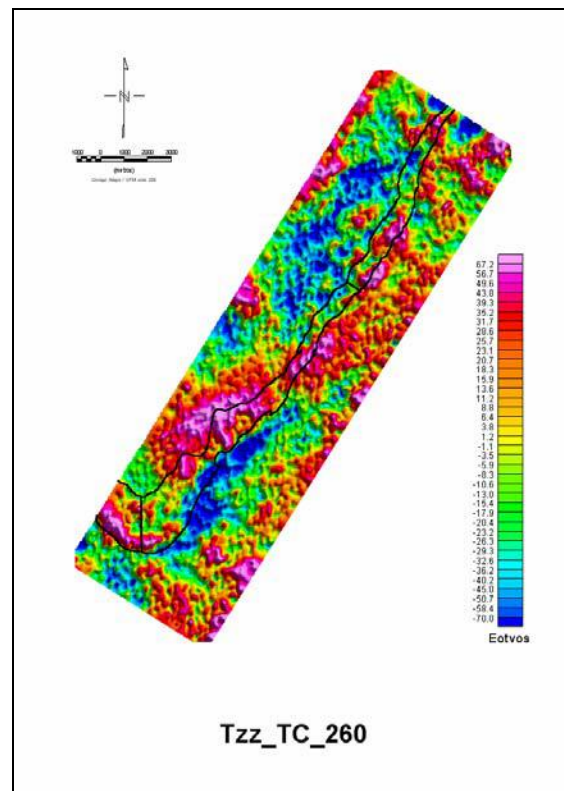


Figura 28 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,60 g/cm³.

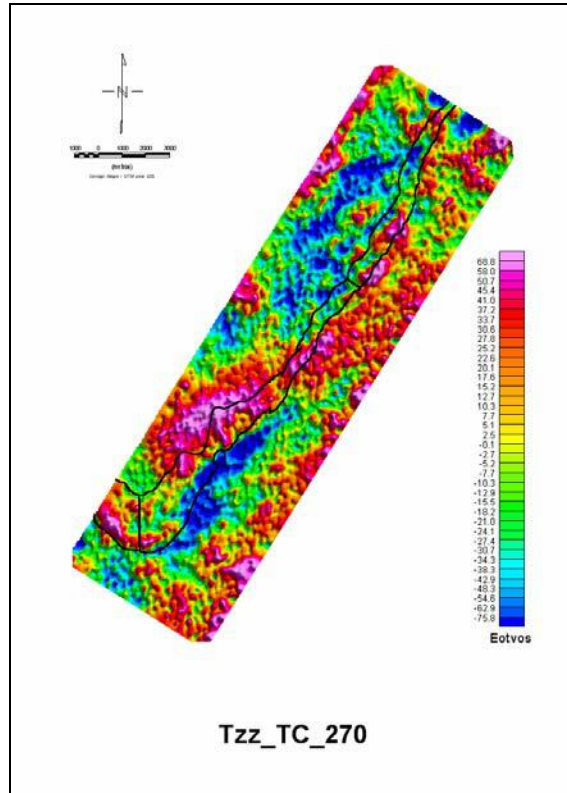


Figura 29 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade $2,70 \text{ g/cm}^3$.

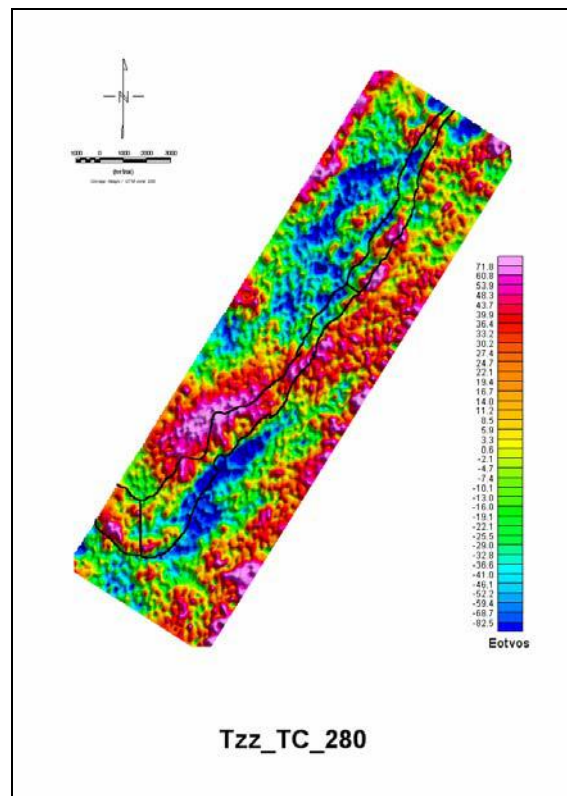


Figura 30 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade $2,80 \text{ g/cm}^3$.

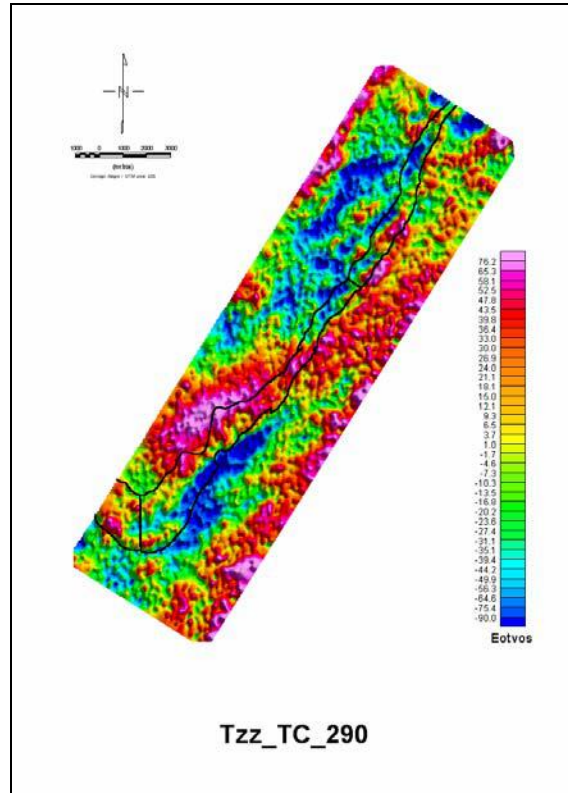


Figura 31 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade $2,90 \text{ g/cm}^3$.

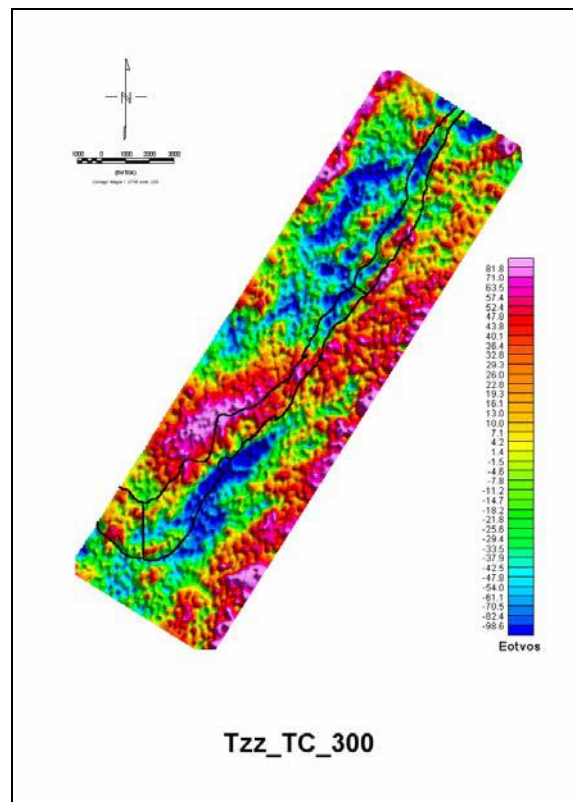


Figura 32 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade $3,00 \text{ g/cm}^3$.

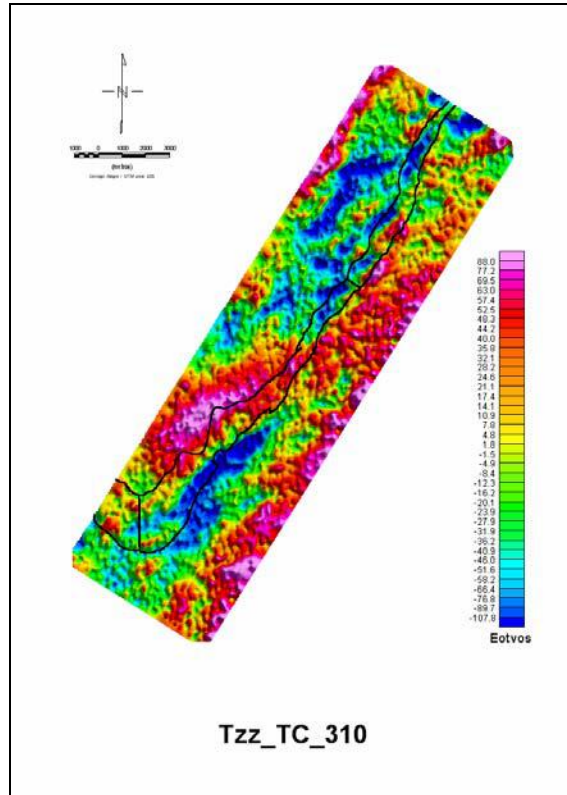


Figura 33 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 3,10 g/cm³.

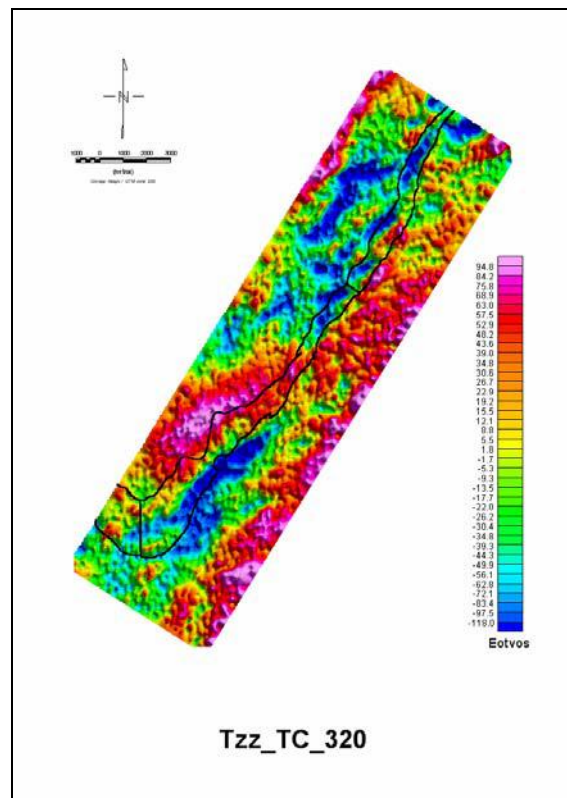


Figura 34 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 3,20 g/cm³.

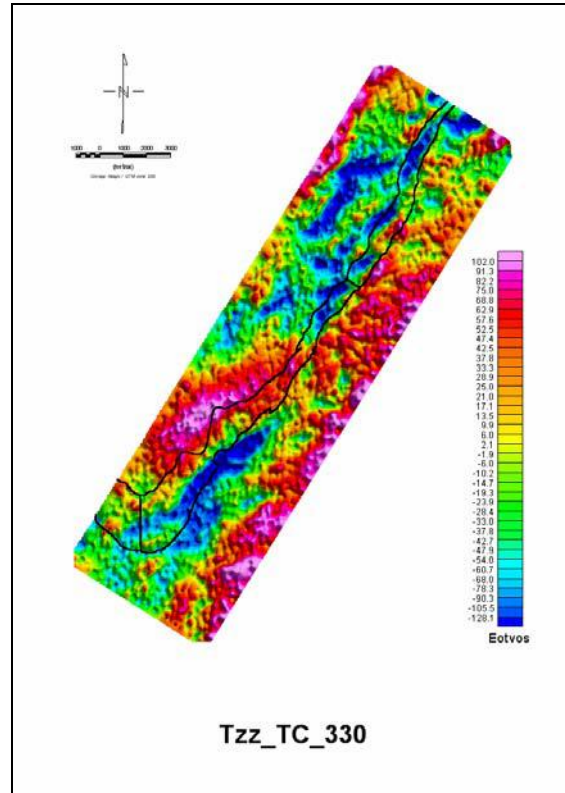


Figura 35 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 3,30 g/cm³.

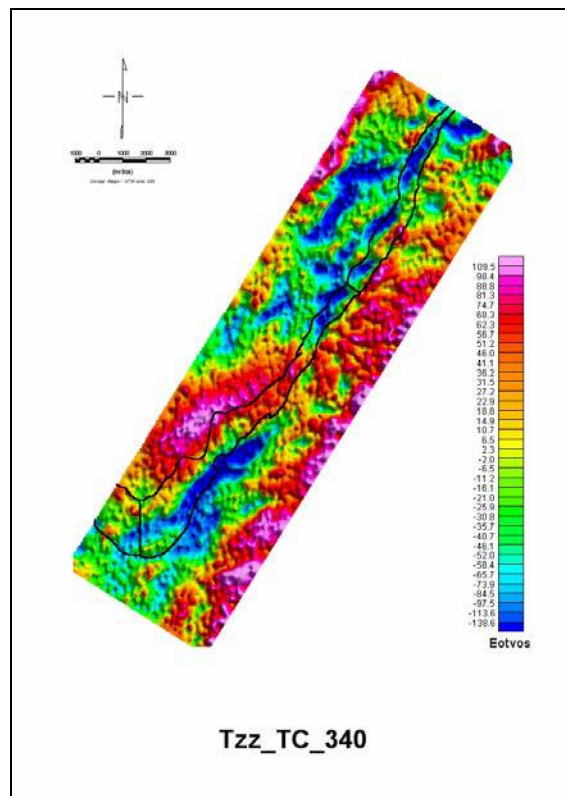


Figura 36 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 3,40 g/cm³.

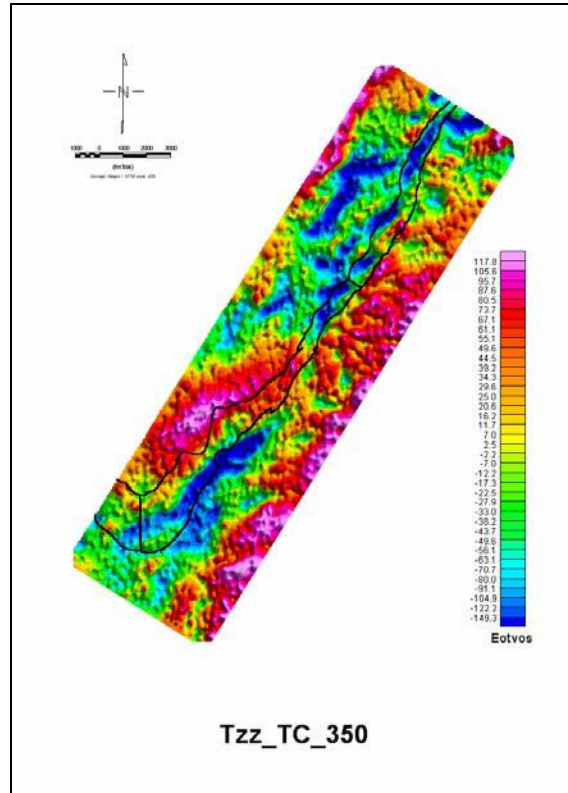


Figura 37 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade $3,50 \text{ g/cm}^3$.

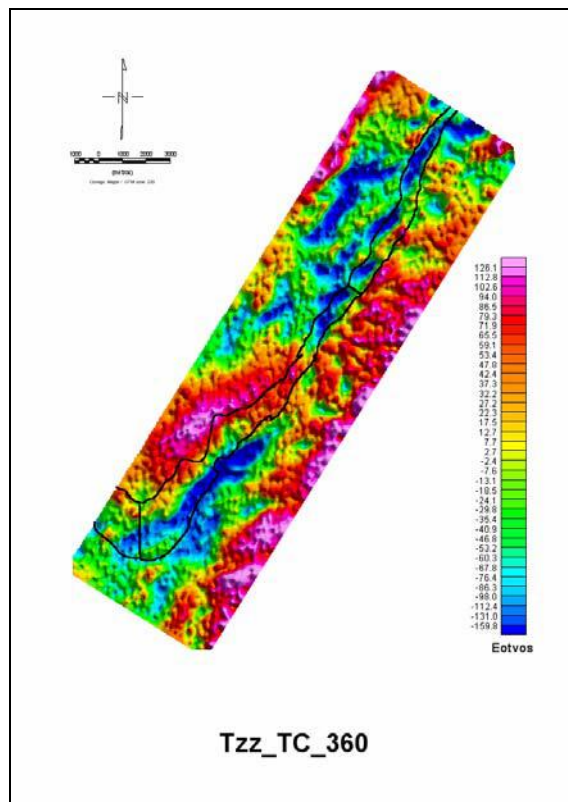


Figura 38 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade $3,60 \text{ g/cm}^3$.

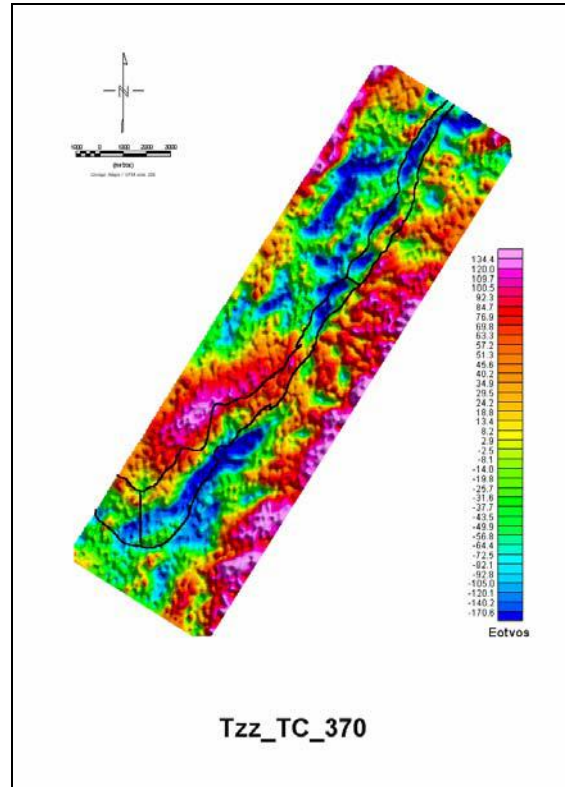


Figura 39 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 3,70 g/cm³.

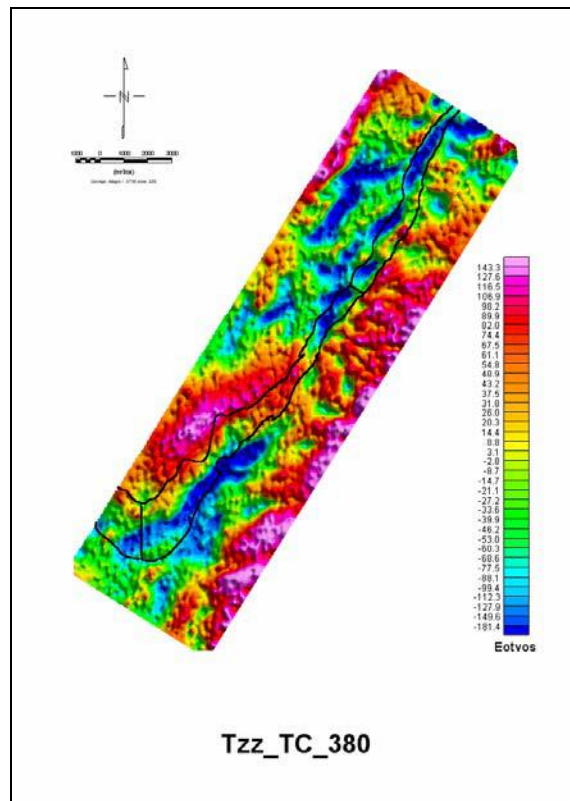


Figura 40 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 3,80 g/cm³.

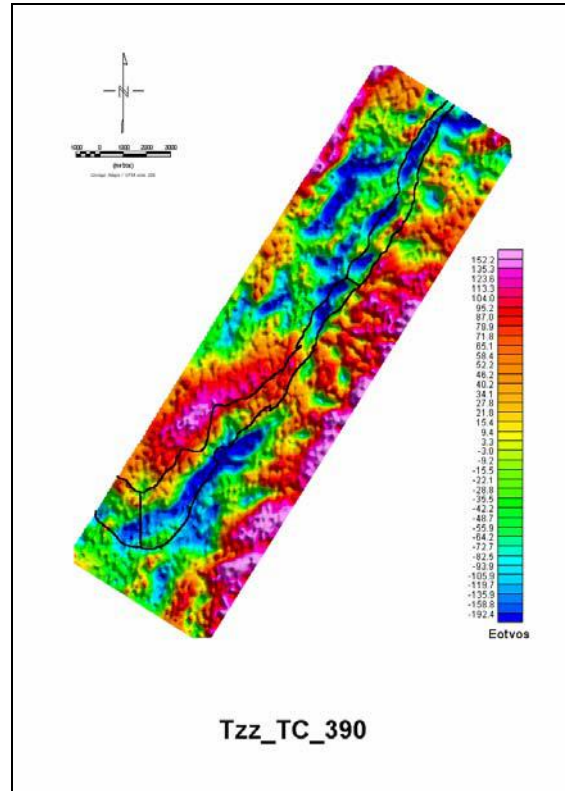


Figura 41 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 3,90 g/cm³.

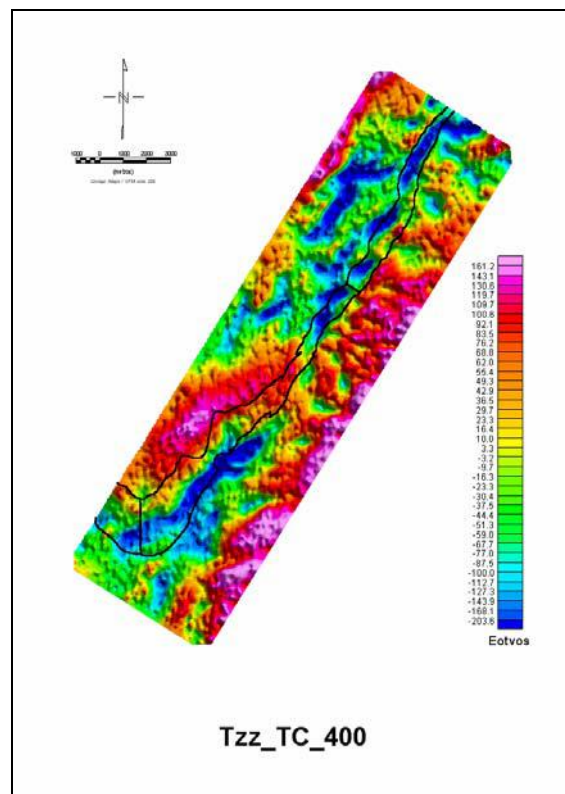


Figura 42 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 4,00 g/cm³.

Ao analisar os grids da componente Tzz corrigida destacam-se pela adequação à formação ferrífera aqueles com densidade entre $1,80 \text{ g/cm}^3$ e $2,30 \text{ g/cm}^3$. Levando em consideração que a densidade de um xisto decomposto é $1,80 \text{ g/cm}^3$ e a de um itabirito friável ocre é $2,30 \text{ g/cm}^3$, o grid de densidade $2,10 \text{ g/cm}^3$ é escolhido para a determinação de potenciais alvos a serem explorados. As elipses em branco na figura 43 mostram os alvos escolhidos de acordo com as anomalias gravimétricas.

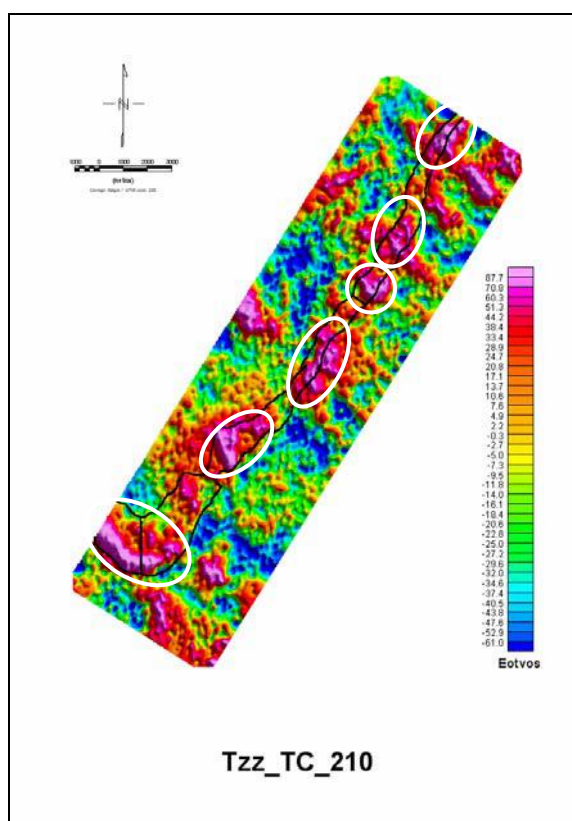


Figura 43 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade $2,10 \text{ g/cm}^3$ com alvos em potencial demarcados pelas elipses.

Comparando o grid da componente Tzz corrigida para a densidade $1,10 \text{ g/cm}^3$ (Figura 45) com o grid para $4,00 \text{ g/cm}^3$ (Figura 44) ficam evidenciados três grandes áreas delimitadas pelas elipses em branco na figura 44 que tiveram o sinal gravimétrico aumentado, ao invés de diminuído como era o esperado. Com o auxílio do grid de altimetria (Figura 44) vê-se que as três áreas encontram-se em vales. Isto mostra a importância de uma correção bem feita, já que

ao corrigir a densidade do terreno para valores acima da densidade dita ótima cria-se anomalias em áreas onde não tem terreno, neste caso, os vales.

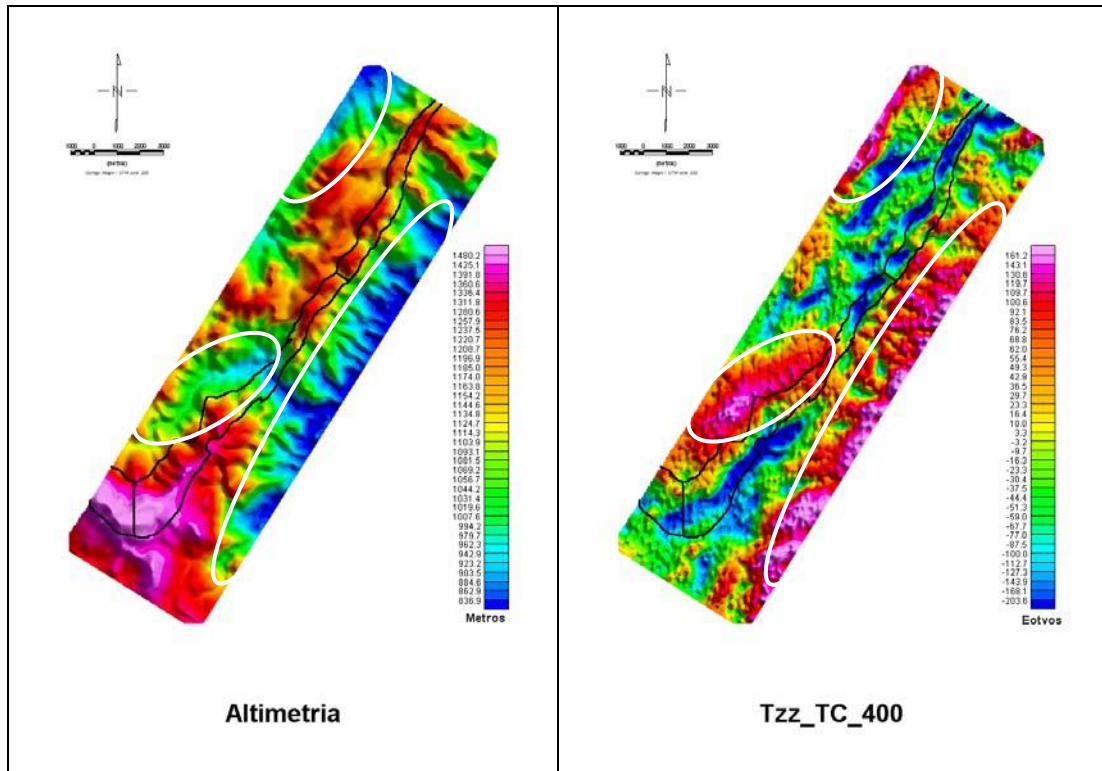


Figura 44 – Grid de altimetria SRTM da NASA e o grid da componente Tzz corrigida para densidade $4,00 \text{ g/cm}^3$. As elipses em branco assinalam três grandes falsas anomalias.

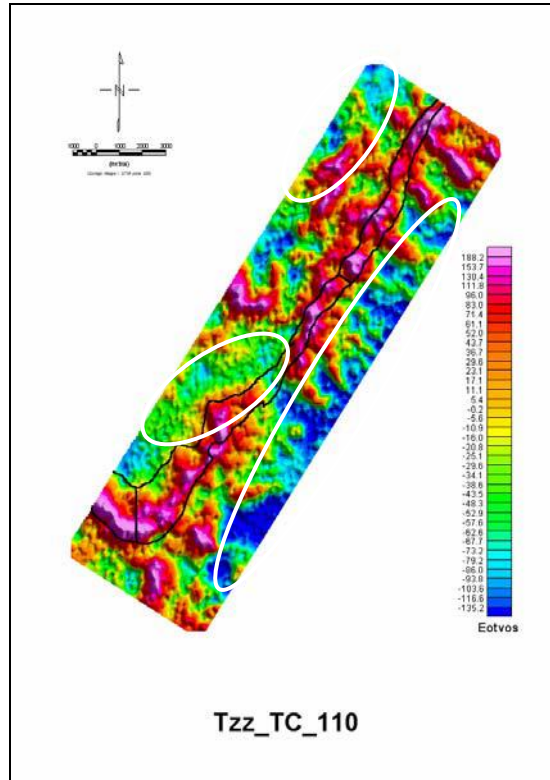


Figura 45 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade $1,10 \text{ g/cm}^3$.

6 COMPARAÇÃO DE GRIDS DAS COMPONENTES DO TENSOR TOTAL ENTRE DADOS SINTÉTICOS E DADOS REAIS

Com o intuito de validar o método exploratório é feita uma comparação entre as respostas das componentes T_{xx} (g_{xx}), T_{yy} (g_{yy}), T_{xy} (g_{xy}), T_{xz} (g_{xz}), T_{yz} (g_{yz}) e T_{zz} (g_{zz}) de um alvo sintético (Figura 46) e um alvo real.

Braga (2006) utiliza em seu trabalho um alvo sintético, um cubo de 400 metros de aresta, seu topo dista 100 metros da superfície e tem massa específica de $4,2 \text{ g/cm}^3$. Este alvo encontra-se no centro de um terreno de massa específica $2,7 \text{ g/cm}^3$ que tem área de $2000 \times 2000 \text{ m}^2$.

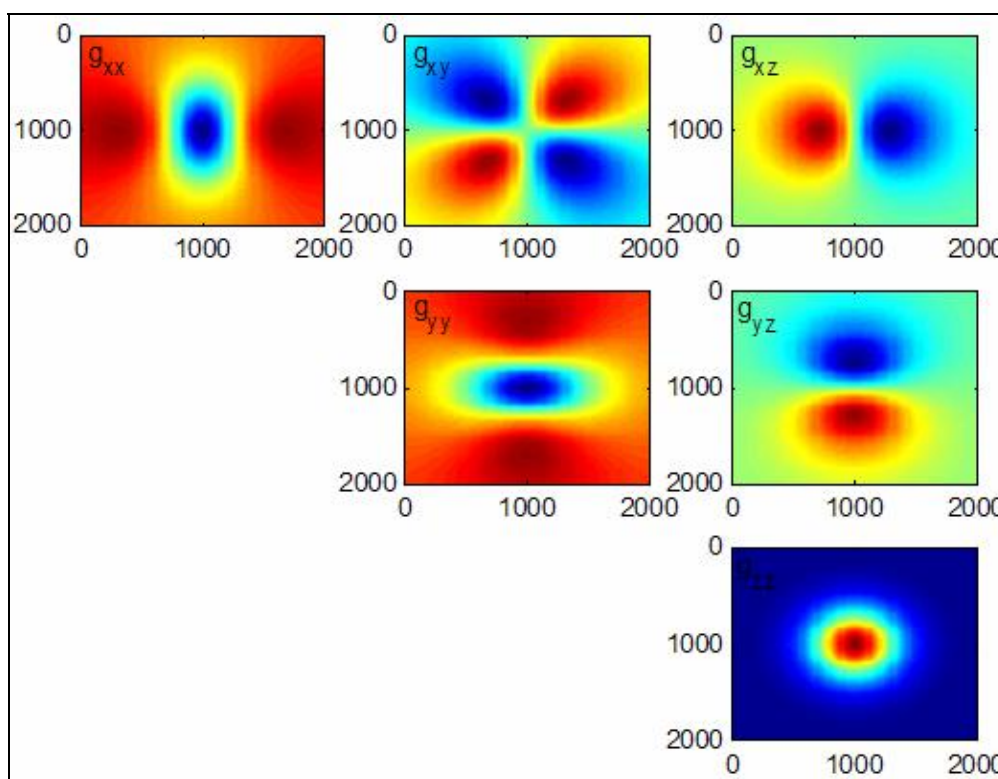


Figura 46 – Componentes do tensor de aerogravimetria gravimétrica adquiridos sobre um terreno de massa específica $2,7 \text{ g/cm}^3$, perfazendo uma área de $2000 \times 2000 \text{ m}^2$, e tendo em seu centro uma massa anômala de minério de massa específica $4,2 \text{ g/cm}^3$, volume $400 \times 400 \times 400 \text{ m}^3$ e cujo topo dista 100 m da superfície do solo (Extraído de Braga, 2006).

Na figura 46 pode-se ver que a componente g_{xx} identifica os limites leste e oeste do corpo e a componente g_{yy} os limites norte e sul. As componentes g_{xz} e g_{yz} mostram os eixos dos centros de massa da anomalia. A componente g_{xy} tem como resposta um quadrupólo, com dois altos e dois baixos gravimétricos bem definidos. A componente g_{zz} localiza o alvo.

As componentes do tensor do alvo real foram corrigidas para a densidade $2,10 \text{ g/cm}^3$, utilizando fórmula semelhante à usada na análise de densidade:

$$T_{zz_TC_210} = T_{zz_FA} - (2,10 \times TC_T_{zz_100}), \text{ onde}$$

$T_{zz_TC_210}$ é a componente T_{zz} com correção de terreno a uma densidade $2,10 \text{ g/cm}^3$

T_{zz_FA} é a componente T_{zz} Ar Livre

$TC_T_{zz_100}$ é o fator de correção de terreno para T_{zz} a uma densidade de 1.00 g/cm^3

Para corrigir as outras componentes substitui-se T_{zz} , na fórmula, por T_{xx} , T_{xy} , T_{xz} , T_{yy} e T_{yz} .

As figuras 47, 48, 49, 50, 51 e 52 mostram as componentes do tensor de aerogravimetria gravimétrica T_{xx} , T_{xy} , T_{xz} , T_{yy} , T_{yz} e T_{zz} , respectivamente, de um alvo real.

Comparando as respostas das componentes de alvo sintético de Braga (2006) com as resposta do alvo real nota-se semelhanças muito grandes, o que valida o método. As algumas diferenças apresentadas devem-se à forma anômala do alvo real, visto que o modelo sintético tem a forma de cubo.

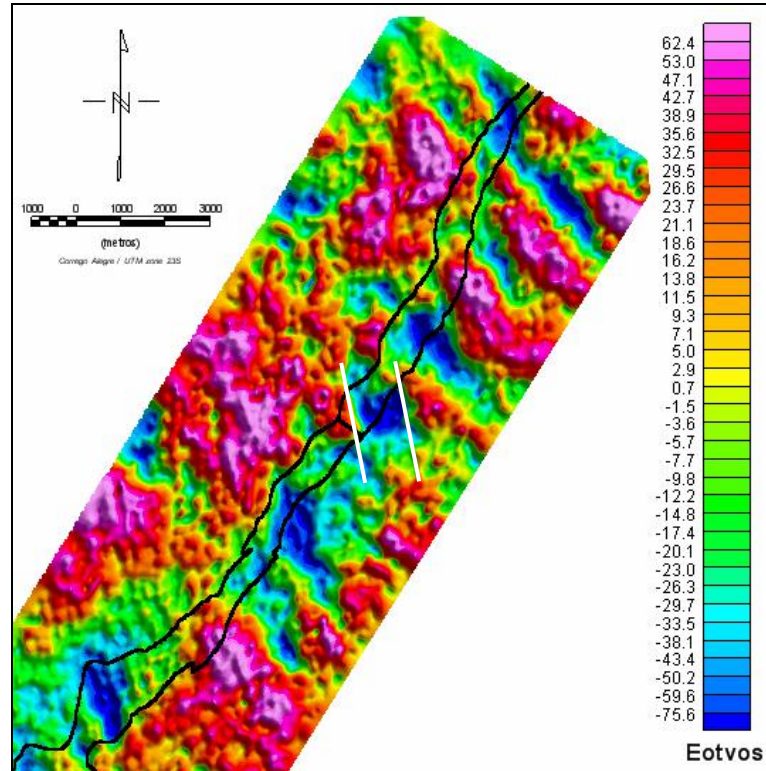


Figura 47 – Grid da componente Txx corrigida para densidade $2,10 \text{ g/cm}^3$ mostrando um alvo com os limites leste e oeste definidos.

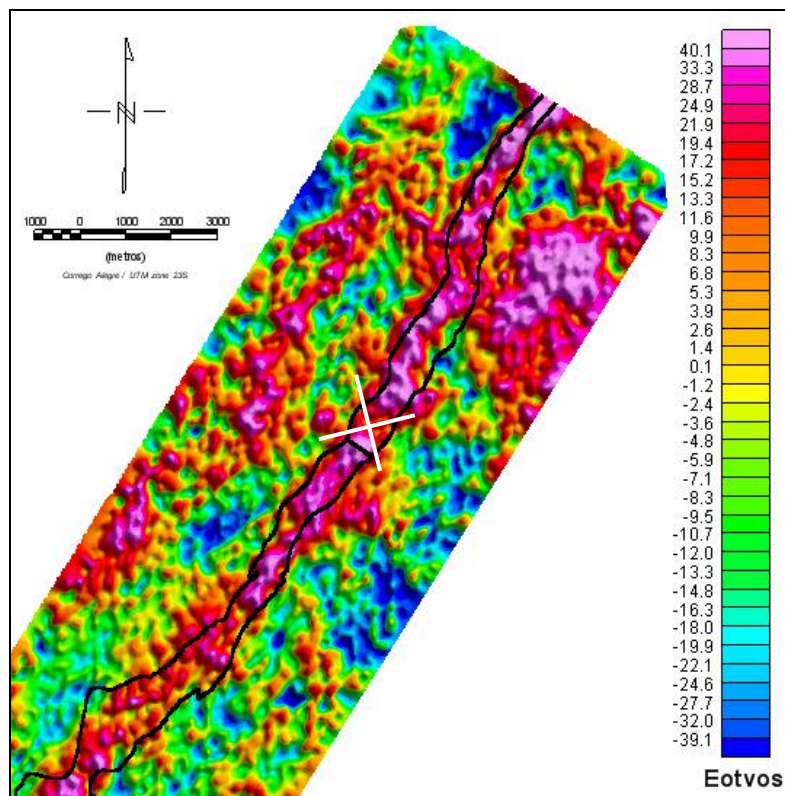


Figura 48 – Grid da componente Txy corrigida para densidade $2,10 \text{ g/cm}^3$ mostrando os quadrupolos, com dois altos e dois baixos.

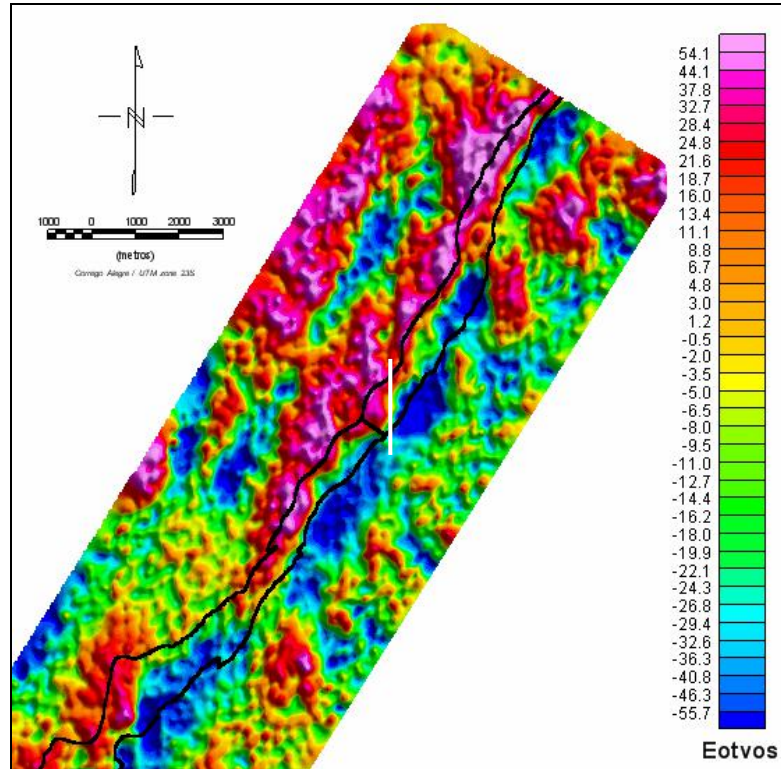


Figura 49 – Grid da componente Txz corrigida para densidade $2,10 \text{ g/cm}^3$ mostrando o eixo do centro de massa da anomalia.

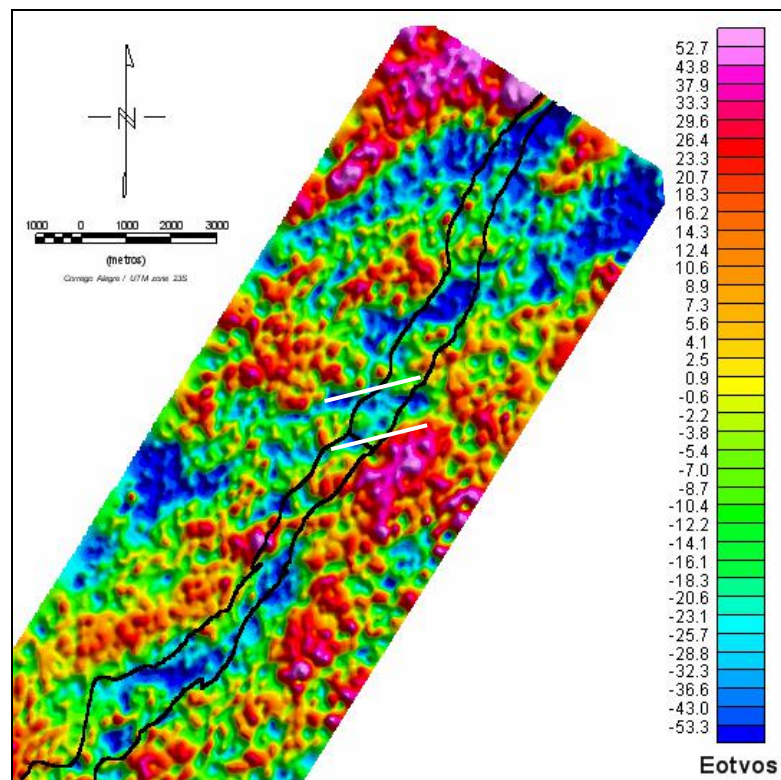


Figura 50 – Grid da componente Tyy corrigida para densidade $2,10 \text{ g/cm}^3$ mostrando um alvo com os limites norte e sul definidos.

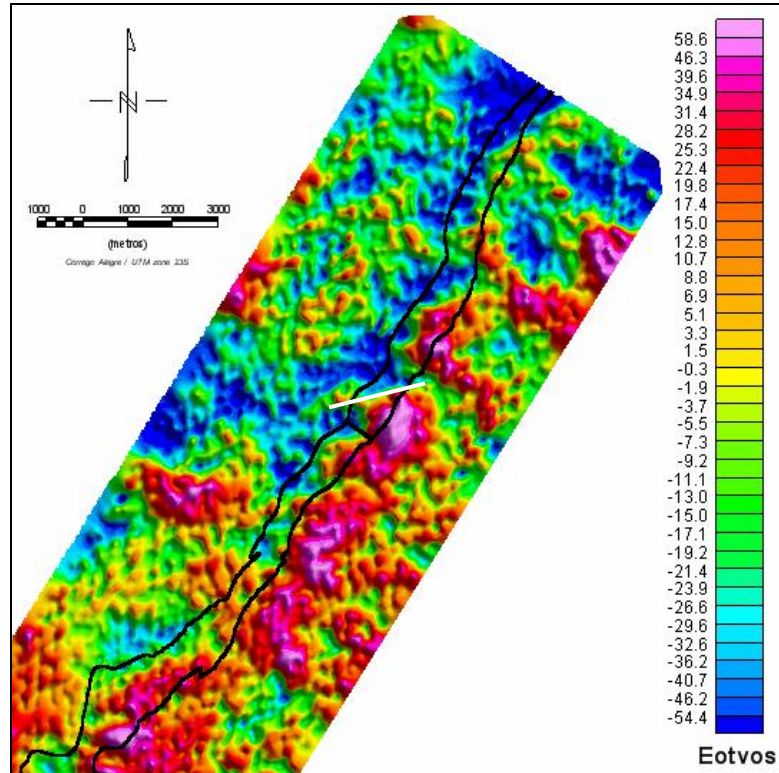


Figura 51 – Grid da componente Tyz corrigida para densidade $2,10 \text{ g/cm}^3$ mostrando o eixo do centro de massa da anomalia.

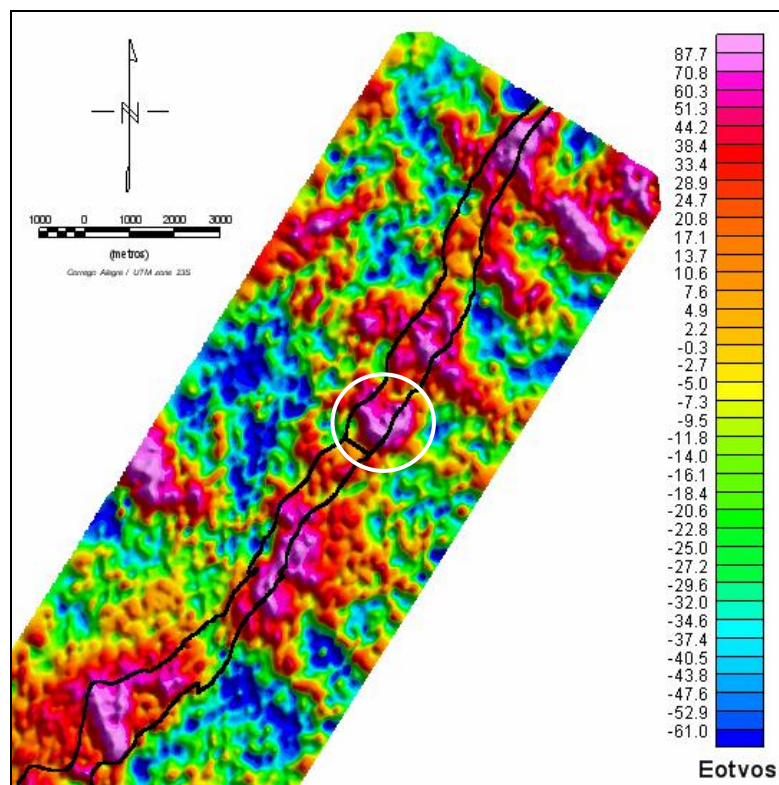


Figura 52 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade $2,10 \text{ g/cm}^3$ mostrando a localização do alvo.

7 ANÁLISE DA INTENSIDADE DO SINAL DA COMPONENTE TZZ DE ACORDO COM MATERIAL OBTIDO EM FUROS DE SONDAGEM

Utilizando furos de sondagem pode-se estudar a causa da intensidade do sinal gravimétrico de acordo com o material em subsuperfície. A figura 53 mostra um grid da componente Tzz corrigida para a densidade 2,10 g/cm³ e nele estão plotados a localização de 15 furos de sondagem executados na região do Baú, na parte norte da área levantada.

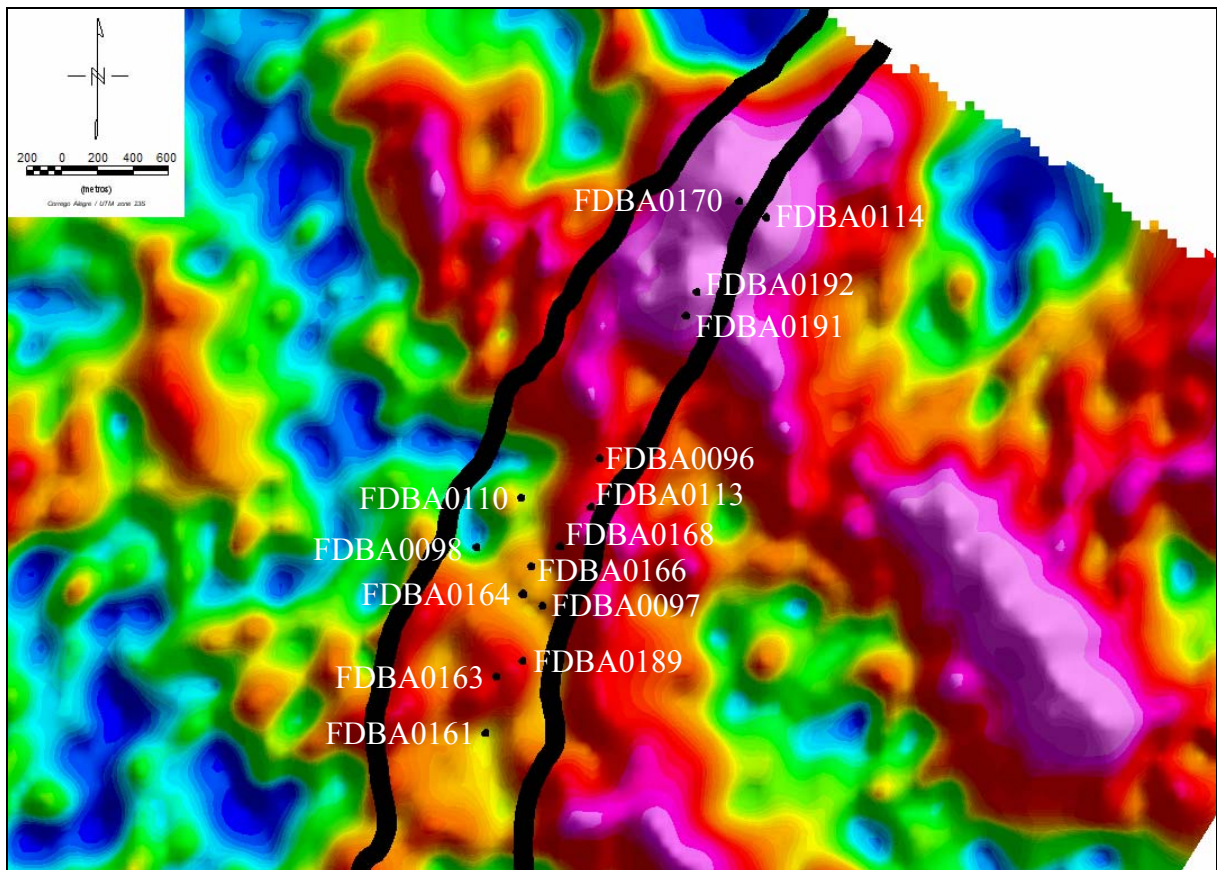


Figura 53 – Grid da componente Tzz corrigida para densidade 2,10 g/cm³ com a localização dos furos de sondagem.

Dos quinze furos disponíveis na região, apenas oito são utilizados devido à profundidade obtida na sondagem (acima de 150 metros). Quatro estão localizados em cima

de um potencial alvo exploratório, são eles FDBA0114, FDBA0170, FDBA0191 e FDBA0192. E outros quatro estão localizados numa área de sinal positivamente fraco a médio: FDBA0097, FDBA0098, FDBA0110 e FDBA0161. Os furos têm, em média, azimute de 300° e dip de 70°. A tabela 1 mostra a espessura total de cada tipo de material extraído e a espessura total dos furos FDBA0114, FDBA0170, FDBA0191 e FDBA0192.

Tabela 1 – Furos de sondagem localizados em possível alvo exploratório e suas espessuras de cada tipo de material extraído e espessuras total, com legenda.

FDBA0170 → LT : 3,3 m; CG : 14,1 m; IF : 46,85 m; HF : 26,5 m; HMN : 19 m; IS : 20,7 m; IMN : 12,3 m; IN : 225,8 m; DO : 49,75 m ; ET : 418,3 m
FDBA0114 → AT : 0,6 m; CG : 2,4 m; XI : 38,6 m; IF : 34,55 m; HS : 9,95 m; HF : 8,05 m; IS : 47,3 m; IMN : 14,15 m; SR : 3 m; IC : 21,2 m; IN : 13 m; IDO : 10,8 m; DO : 22,6 m; ET : 226,2 m
FDBA0191 → IF : 56,6 m; OC : 42,4 m; IS : 12 m; IN : 28,8 m; IDO : 8,65 m; DO : 224,65 m; ET : 373,1 m
FDBA0192 → LT : 5,3 m; CG : 10,9 m; IF : 85,8 m; IC : 19 m; IDO : 36,7 m; DO : 68,5 m; ET : 226,2 m
Legenda: AT : Aterro, CG : Canga, DO : Dolomito, ET : Espessura Total, HF : Hematita Friável, HMN : Hematita Manganésifera, HS : Hematita Semi-Compacta, IC : Itabirito Compacto, IDO : Itabirito Dolomítico, IF : Itabirito Friável, IMN : Itabirito Manganésífero, IN : Rocha Intrusiva, IS : Itabirito Semi-Compacto, LT : Laterita, OC : Itabirito Ocre, SR : Sem Recuperação, XI : Xisto

Analisando os furos FDBA0114, FDBA0170, FDBA0191 e FDBA0192 conclue-se que a resposta em magenta nessa área (intensa anomalia gravimétrica) foi causada pelos pacotes de canga (densidade 3,2 g/cm³) e hematitas (entre 3,8 g/cm³ e 4,5 g/cm³). Não se pode pensar que o causador desta resposta seja a rocha intrusiva do furo FDBA0170 e o dolomito (2,8 g/cm³) do furo FDBA0191 porque a rocha intrusiva neste lugar não é sã (uma rocha intrusiva sã tem densidade em torno de 2,95 g/cm³) e tem densidade em torno de 2 g/cm³. Outro motivo é porque o FTG não consegue captar as fontes mais profundas já que o sinal decai ao cubo da distância entre a fonte e o receptor FTG. O FTG capta apenas as fontes mais rasas.

A tabela 2 mostra a espessura total de cada tipo de material extraído e a espessura total dos furos FDBA0097, FDBA0098, FDBA0110 e FDBA0161.

Tabela 2 – Furos de sondagem localizados dentro da formação ferrífera mas fora de possíveis alvos exploratórios e suas espessuras de cada tipo de material extraído e espessuras total, com legenda.

FDBA0097 → IF : 107,3 m; HF : 5,6 m; IMN : 21,05 m; ICT : 81,95 m; XI : 13,15 m; IS : 12,6 m; SR : 4,7 m; IC : 41,2 m; QF : 54,3 m; QT : 5,95 m; ET : 347,8 m
FDBA0098 → AT : 2,1 m; CG : 8,6 m; XI : 29,9 m; IF : 169,35 m; ICT : 41,85 m; SR : 12 m; ET : 263,8 m
FDBA0110 → AT : 0,7 m; CG : 3,8 m; OC : 76,35 m; IF : 98,25 m; SR : 4 m; IS : 40,1 m; XI : 4,45 m; ET : 227,65 m
FDBA0161 → IF : 92,15 m; IS : 6,75 m; SR : 1,8 m; ICT : 59,2 m; ET : 159,9 m
Legenda: AT : Aterro, CG : Canga, ET : Espessura Total, HF : Hematita Friável, IC : Itabirito Compacto, ICT : Itabirito Contaminado, IF : Itabirito Friável, IMN : Itabirito Manganêsífero, IS : Itabirito Semi-Compacto, OC : Itabirito Ocre, QF : Quartzito Ferruginoso, QT : Quartzito, SR : Sem Recuperação, XI : Xisto

Analisando os furos FDBA0097, FDBA0098, FDBA0110 e FDBA0161 e comparando-os com os furos citados anteriormente nota-se que apesar destes furos mostrarem grandes pacotes de minério de ferro, principalmente itabirito friável (densidade 2,7 g/cm³), entre outros, a resposta do sinal gravimétrico é muito baixa. Isto acontece por duas razões, a primeira é que apesar dos oitos furos mostrarem pacotes de minério de ferro, o segundo conjunto de furos não tem a canga e a hematita que o primeiro conjunto tem. E segundo, é possível que a correção do terreno feita a partir de altimetria SRTM não seja precisa, uma altimetria de maior precisão, como a laser, poderia dar uma resposta mais de acordo com a realidade.

8 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Neste presente trabalho, no capítulo 5, comparando os grids da componente Tzz corrigida para densidades $1,10 \text{ g/cm}^3$, da componente Tzz corrigida para densidade $4,00 \text{ g/cm}^3$ e de altimetria SRTM da NASA ficaram evidenciadas três falsas anomalias gravimétricas, em regiões de vale. Isto mostra a importância da escolha do valor da densidade a ser usada para corrigir o terreno. Valores acima da densidade dita ótima criam falsas anomalias. É como se fosse colocada rocha onde não existe, no caso acima, nos vales.

Por ser um método recente e de poucos trabalhos, principalmente no Brasil, foi feita uma comparação entre o padrão de resposta das componentes entre dados reais e dados sintéticos. A semelhança entre os tipos validou o método. A semelhança não foi maior devido à forma anômala do corpo em subsuperfície.

Ao analisar o material extraído pela sondagem de um potencial alvo exploratório, determinado em função da intensidade do sinal gravimétrico, notou-se que em todos os furos havia muitos pacotes de minério de ferro, mas as respostas apresentadas pelos dois conjuntos de furos foram muito diferentes. Isso pode ter ocorrido porque no primeiro conjunto há mais pacotes de rochas com grande densidade como a canga e as hematitas. Essa diferença também pode ser explicada pela altimetria utilizada para fazer a correção do terreno, a SRTM, que não tem grande precisão. Melhor resposta teria se fosse utilizada uma altimetria de precisão, como a laser, por exemplo.

Como o sinal decai ao cubo da distância entre o receptor FTG e a fonte, melhor qualidade do sinal seria obtida se o levantamento fosse feito de helicóptero, onde se poderia voar a uma altitude mais baixa (diminuindo a distância fonte-receptor) e de acordo com o relevo, principalmente em relevos acidentados.

Neste trabalho conclui-se que todos os alvos apontados em magenta são causados por hematita e canga por causa de sua alta densidade, mas estes não são os únicos alvos com interesse exploratório. Há alvos de cor magenta fora da formação ferrífera que devem ser investigados também. E há regiões que mesmo não tendo uma grande resposta devem ser exploradas também, mostrando a importância do mapeamento geológico e das campanhas de sondagem.

Referências bibliográficas

- Alkmin, F.F., Quade, H., Evangelista, M.T. 1988. Sobre a história da deformação dos metassedimentos do Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Ouro Preto. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 45p.
- Alkmin, F.F, Marshak, S. 1989. Proterozoic contraction/extension tectonics of the Southern São Francisco Region, Minas Gerais, Brazil. *In: Tectonics*, v. 8, n. 3, p. 555 – 571.
- Bertolino, L. C. 2006. Quadrilátero Ferrífero – MG. Rio de Janeiro. Versão, 22. ago. 2006. Disponível em: <http://www.labgeoffp.com/HTML/quadrilatero.html>. Acesso em: 01. ago. 2007.
- Blakely, R. J. 1995. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press, 441 p.
- Braga, M. A. da S. 2006. *Modelagem Numérica e Validação de Dados Tensoriais de Aerogradiometria Gravimétrica 3D – FTG*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 77p.
- Braga, M. A. da S. & Silva, J. da C. da. 2005. Modelagem numérica de dados tensoriais de aerogradiometria gravimétrica 3D. *In: 9th International Congress of The Brazilian Geophysical Society*. Salvador.
- Chemale Jr., F. & Endo, I. 1990. Projeto Sinclinal do Gandarela Parte II. Departamento de Geologia. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 16p.
- Derby, O.A. 1906. The Serra of Espinhaço. *In: Journal of Geology*, Chicago, v. 14, p. 374 – 401.
- Dorr, J. V. N., Gair, J. E., Pomerene, J. B. & Rynearson, G. A. 1957. Revisão da Estratigrafia Pré-Cambriana do Quadrilátero Ferrífero: Brasil, Depto. Nac. Prod. Min., Avulso 81, 31p.
- Dorr, J.V.N. 1958. The Gandarela Formation. *In: Boletim da Sociedade Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 7. p. 63 – 64.
- Dorr, J. V. N. 1969. Physiographic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U. S. Geology Survey Professional Paper, Washington, n.611–A, p. 109.
- Duarte, O. de O. 1997. *Dicionário Enciclopédico Inglês – Português de Geofísica e Geologia – 1^a ed.* Rio de Janeiro, PETROBRAS. 304 p.
- Fernandes, C. E. de M. 1984. Prospecção Gravimétrica. *In: Fundamentos de Prospecção Geofísica*. Editora Interciência, p. 108 – 149.
- Fernandes, C. E. de M. 2007. Campo Gravimétrico Terrestre: Conceitos; Propriedades; Efeitos. *In: Fundamentos de física para geociências*. Editora Interciência, p. 1 – 48.
- Gair, J.E. 1962. Geology and ore deposits of the Nova Lima and Rio Acima quadrangles, Minas Gerais, Brazil. *In: U.S. Geology Survey Professional Paper*, Washington, n.341–A, 67p.
- Hammond, S. & Murphy, C. A. 2003. Air-FTGTM: Bell Geospace's Airborne Gravity Gradiometer – A Description and Case Study. *ASEG Preview*, 105: 24 – 26.
- Harder, E.C. & Chamberlin, R.T. 1915. The geology of central Minas Gerais, Brazil. *In: Journal of Geology*, n.13, p. 341 – 378, 385 – 424.
- Ladeira, E.A. 1980. *Metallogenesis of gold at the Morro Velho mine and in the Nova Lima district, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Ontário, Tese de Doutorado, 272p.

- Luiz, J. G. & Silva, L. M. da C. e. 1995. Método Gravimétrico. *In: Geofísica de Prospecção*. Editora Cejup, p. 115 – 201.
- Mawwell, C.H. 1972. Geology and ore deposits of the Alegria District, Minas Gerais, Brasil. *In: U.S. Geology Survey Professional Paper*, Washington, n.341-J, 72p.
- Moraes, M.A.S. 1985. Reconhecimento de fácies sedimentares em rochas metamórficas da região de Ouro preto, Minas Gerais. *In: Anais do 3º Simp. Geol. Minas Gerais, Belo Horizonte. Boletim 5*, p. 84 – 93.
- Murphy, C. A. 2004. The Air-FTGTM airborne gravity gradiometer system. *In: Airborne Gravity 2004 Workshop*, Sidney, 2004, 7 – 14.
- Oliveira, N. V. de; Endo, I; Oliveira, L. G. S. de. 2005. Geometria do Sinclinal Gandarela Baseada na Deconvolução Euler 2D e 3D – Quadrilátero Ferrífero (MG). *In: Revista Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3. p. 221 – 232.
- Pires, F.R.M. 1983. Greenstones as a part of the Minas Supergroup in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *In: Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 13. p. 106 – 112.
- Pires, F.R.M., Palermo, N., Sarcia, M.N.G. 1984. Análise de deformação e revisão litoestratigráfica do Supergrupo Minas no Sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero, MG, Brasil. *In: Anais do 33º Congresso Brasileiro de Geologia*, Rio de Janeiro, p. 3151 – 3164.
- Wildhagen, A. 1998. As Minas Gerais. Belo Horizonte. Versão, 08. mar. 2007. Disponível em: <http://www.asminasgerais.com.br/?item=CONTEUDO&codConteudoRaiz=98&codConteudoAtual=1005>. Acesso em: 11. mar. 2008.