

MODELAGEM NUMÉRICA E VALIDAÇÃO DE DADOS TENSORIAIS DE AEROGRAVIOMETRIA GRAVIMÉTRICA 3D-FTG

Marco Antonio Braga¹, Jadir C. Silva², Henrique Dayan³, Dionísio Uendro Carlos¹,
Henry Galbiatti¹, Tiago de Almeida⁴, Rodrigo Rocha Sousa¹ e Gilmar Carmo¹

Recebido em 31 maio, 2007 / Aceito em 2 março, 2010
Received on May 31, 2007 / Accepted on March 2, 2010

ABSTRACT. Iron oxide mineralization style is usually controlled by both crustal and local scale structures such as major shear, fault zones and lithological contacts. Air-FTG (Airborne Full Tensor Gravity Gradiometry) is nowadays the only existing airborne full tensor gradiometer technology can be used for both detailed and regional surveys. The system takes real time measurements of gravity gradient field in three orthogonal directions and at same time compensates for bias in the orientation and accelerations of the aircraft. Each one of these measurements is related to either the density contrast or the geometry of discrete bodies. The aim of this work was to implement a numerical algorithm to compute the five g_{xx} , g_{xy} , g_{xz} , g_{yy} and g_{yz} independent tensor components and use the knowledge acquired with them to help in real data interpretation and Air-FTG validation. To go over this subject, Air-FTG survey was flown over the Quadrilátero Ferrífero region, in Minas Gerais state, Brazil, to delineate and to map structures associated with iron oxide mineralizations. A complete procedure for data processing, together with joint interpretation of the geological models, ground gravity and air gravity gradiometry tensor components, indicates the high precision capability of the Air-FTG system in mapping and detecting iron oxide bodies with high accuracy. Results show that gradiometer depict a more observable advantage for identification of those near surface targets, revealing structures such as lineament, edges, corners and as a consequence, body shapes and their thickness. We have concluded that the best images of the subsurface rocks acquired by the Air-FTG platform can provide more realistic targets information than the conventional ground gravity field instruments.

Keywords: full tensor gravity gradiometry, iron ore.

RESUMO. Mineralizações de óxido de ferro são geralmente controladas por estruturas crustais e locais, como zonas de cisalhamento, zonas de falha e contatos litológicos. O sistema Air-FTG (*Airborne Full Tensor Gravity Gradiometry*) é atualmente a única tecnologia aérea existente capaz de medir o tensor total gradiente de gravidade associado a estas mineralizações. Ele faz medidas em tempo real do gradiente do campo gravitacional em três direções ortogonais e ao mesmo tempo corrige a orientação e as acelerações da aeronave. Cada uma destas medidas é relacionada a contrastes de densidade ou a geometria de corpos superficiais discretos. O objetivo deste artigo é implementar um algoritmo numérico capaz de calcular as cinco componentes independentes do tensor e utilizar o conhecimento adquirido com ele para auxiliar na interpretação dos dados reais e na validação do método. A aquisição de dados com o sistema Air-FTG foi realizada no Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, Brasil, tendo como objetivo mapear os corpos de hematita compacta. Foi aplicado um procedimento completo para processamento dos dados de gravimetria terrestre com o intuito de compará-los com os dados reais de FTG. Os resultados indicam, juntamente com a interpretação conjunta dos modelos geológicos, que as componentes do tensor comprovam a alta resolução do sistema, permitindo a identificação de corpos de minério de ferro com grande precisão. Os resultados mostram também que as componentes do sistema FTG conseguem detectar corpos mineralizados mais próximos da superfície, além de estruturas geológicas como lineamentos, extremidades, cantos e, como consequência, a forma dos corpos. Conclui-se com base nos resultados do levantamento adquirido com a plataforma Air-FTG que este sistema pode prover informações mais detalhadas dos alvos do que a gravimetria terrestre convencional.

Palavras-chave: tensor total de aerogravimetria gravimétrica, minério de ferro.

¹Vale, Gerência de Exploração Mineral de Ferrosos – GAEMF, Av. de Ligação, 3580, Águas Claras, Centro de Tecnologia de Ferrosos, 34000-000 Nova Lima, MG, Brasil. Tel.: +55(31) 3215-4200 – E-mails: marco.antonio.braga@vale.com; dionisio.carlos@vale.com; henry.galbiatti@vale.com; rodrigo.rocha.sousa@vale.com; gilmar.carmo@vale.com

²UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Geologia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil/Universidade de Leeds, Inglaterra – E-mail: dayan@geologia.ufrj.br

⁴FTGeo Geologia e Geofísica – E-mail: ftgeologia@gmail.com

INTRODUÇÃO

A atividade de exploração geofísica normalmente demanda altos riscos e grandes investimentos. A proposição de novas técnicas e até mesmo novas tecnologias e ferramentas computacionais ou numéricas adicionais, que juntamente com outras já disponíveis no mercado, aumentam a confiabilidade na avaliação de reservas de minério e outros recursos de interesse econômico, reduzindo riscos sem adicionar altos custos, é de grande utilidade. Tradicionalmente, em se tratando do método gravimétrico, a componente vertical da força gravitacional era até pouco tempo a única componente medida, principalmente pela facilidade de obtenção associada à simplicidade na interpretação dos dados. Entretanto, vale salientar que este método, embora tradicional, geralmente não permite diferenciar corpos rasos e de menor dimensão dos ruídos que inevitavelmente contaminam os dados. Para contornar este problema, tornou-se necessário desenvolver um novo método que permitisse medir diretamente o tensor gradiente de gravidade. Uma balança de torsão foi inicialmente utilizada para este fim; no entanto, sem sucesso devido à dificuldade de uso, adicionado aos intrincados problemas de interpretação e entendimento (Bell, 1998). Entretanto, a importância e utilidade do tensor gradiente da gravidade na localização de objetos rasos em subsuperfície tem sido o objetivo de muitas companhias (Butler, 1995). Os desenvolvimentos recentes nos sistemas de aerograviometria têm resultado em interesse renovado nas medidas do gradiente da gravidade, especialmente na delimitação de corpos anômalos rasos e médios, como, por exemplo, corpos de minérios (Jekeli, 1988; Vasco, 1989). Na verdade, a era moderna da gradiometria nasceu quando a Bell Aerospace explorou a viabilidade de desenvolvimento de um instrumento de aerograviometria gravimétrica de base móvel (GGI) (Metzger, 1982). Em 1990 a BHP Billiton construiu o sistema FALCON™, com o instrumento AGG (*Airborne Gravity Gradiometer*), cuja operação de rotina só começou de fato no fim de 1999 e início de 2000 (Lee, 2001). Contudo, a possibilidade de se medir as componentes do tensor de gravidade só apareceu recentemente, com o advento do sistema 3D-FTG (*Tridimensional Full Tensor Gravity Gradiometer*), que na verdade só precisa medir as cinco componentes linearmente independentes do tensor de gradiente T_{xx} , T_{xy} , T_{xz} , T_{yy} e T_{yz} (ou g_{xx} , ..., g_{yz} , como são algumas vezes denominados) do campo da gravidade, em diferentes direções. Este sistema é genericamente denominado de "aerograviometria gravimétrica 3D". Este trabalho tem como principal objetivo a descrição e validação do sistema de aerograviometria gravimétrica 3D-FTG, assim como a modelagem

numérica das componentes linearmente independentes do tensor com o intuito de evidenciar no subsolo as possíveis anomalias de densidade relacionadas à ocorrência de depósitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, região central do estado de Minas Gerais/Brasil. Como objetivos secundários, mas de igual importância, serão abordados os principais procedimentos para análise de controle da qualidade e processamento destes dados e dos dados de gravimetria terrestre, utilizando o *software* Xcelleration Gravity™ em ambiente Geosoft Oasis Montaj™ a serem utilizados para validação dos dados de aerograviometria gravimétrica 3D-FTG.

METODOLOGIA

A metodologia a ser seguida neste trabalho é dividida em duas partes. A primeira apresenta a modelagem numérica das componentes do tensor Air-FTG, enquanto a segunda trata das proposições para validação da técnica supracitada, com dados reais. Antes, porém, algumas informações de ordem matemática sobre a teoria básica do tensor de aerograviometria gravimétrica serão abordadas.

É notório que o campo gravitacional \mathbf{g} satisfaz as equações gerais

$$\nabla \cdot \mathbf{g} = -4\pi G\rho, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{g} = 0, \quad (2)$$

onde G é a constante universal gravitacional e ρ é a distribuição anômala de densidade no volume D a ser levantado. A solução destas equações é dada por

$$\mathbf{g}(\mathbf{r}) = \iiint_D \rho(\mathbf{r}') \frac{\mathbf{r}' - \mathbf{r}}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|^3} dv', \quad (3)$$

onde \mathbf{r} é um ponto de observação, sendo que a integração é conduzida sobre a variável \mathbf{r}' . O campo gravitacional pode ser expresso pelo seguinte potencial gravitacional:

$$\mathbf{g}(\mathbf{r}) = \nabla U(\mathbf{r}), \quad (4)$$

onde

$$U(\mathbf{r}) = G \iiint_D \frac{\rho(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|} dv'. \quad (5)$$

A segunda derivada do potencial gravitacional

$$g_{\alpha\beta} = \frac{\partial^2}{\partial\alpha\partial\beta} U(\mathbf{r}), \quad \alpha, \beta = x, y, z, \quad (6)$$

conduz ao tensor gradiente de gravidade, isso é,

$$\hat{\mathbf{g}} = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Para a implementação da primeira parte da metodologia proposta neste trabalho, baseada nas Equações (1)-(7), as etapas de modelagem numérica são indicadas abaixo. Estas etapas têm por fundamento a redução das Equações (1)-(7) em uma expressão simplificada para o tensor gradiente de gravidade tridimensional (3D) e posterior elaboração de uma rotina computacional em linguagem FORTRAN para os cálculos das componentes $g_{\alpha\beta}$. Para isto, propomos os seguintes passos, conforme sugerido por Zhdanov (2002):

- (a) Discretização da região 3D em células de dimensões dx , dy e dz nas três direções coordenadas X , Y e Z , respectivamente;
- (b) Definição dos pontos centrais de cada célula ou cubo $\mathbf{r}' = (x'_k, y'_k, z'_k)$, onde $k = 1, 2, \dots, M$, sendo M o número total de células;
- (c) Definição do número discreto de pontos de medidas na altitude de vôo h , isto é, $\mathbf{r} = (x_n, y_n, z_n=h)$, para $n = 1, 2, \dots, N$, sendo N o número total de pontos de medida;
- (d) Usando modelos discretos de parâmetros e dados definidos nos passos (b) e (c), desenvolvemos o seguinte operador de modelagem direta para calcular as componentes do tensor gradiente de gravidade:

$$g_{\alpha\beta}(\mathbf{r}_n) = \sum_{k=1}^M A_{nk}^{\alpha\beta} \rho_k, \quad (8)$$

$$n = 1, \dots, N \quad \text{e} \quad \alpha, \beta = x, y, z.$$

Após várias manipulações numéricas da Equação (3) chega-se a

$$A_{nk}^{\alpha\beta} = G \frac{dx \cdot dy \cdot dz}{r_{nk}^3} K_{nk}^{\alpha\beta}, \quad (9)$$

sendo que r_{nk} é a distância entre \mathbf{r}' e \mathbf{r} , e

$$K_{nk}^{\alpha\beta} = \begin{cases} 3 \frac{(\alpha'_k - \alpha_n)(\beta'_k - \beta_n)}{r_{nk}^2}, & \alpha \neq \beta \\ 3 \frac{(\alpha'_k - \alpha_n)^2}{r_{nk}^2} - 1, & \alpha = \beta. \end{cases}$$

- (e) Desenvolver uma rotina FORTRAN para calcular as componentes g_{xx} , g_{xy} , g_{xz} , g_{yy} e g_{yz} . Como a componente g_{zz} é aquela que realmente determina o contraste

de densidade do meio, ela pode ser calculada como o negativo da soma das componentes g_{xx} e g_{yy} , de acordo com a equação de Laplace.

A segunda parte da metodologia trata da validação da técnica Air-FTG. Nela propomos avaliar os resultados da técnica em questão comparando-os com dados de gravimetria terrestre. Para isto, propomos as três etapas abaixo discriminadas:

- (1) Aos dados de gravimetria terrestre serão aplicados processos de continuação para cima, até uma altitude comparável com aquela dos dados Air-FTG;
- (2) Aplicar primeira derivada vertical aos dados resultantes da fase (1), processadas as necessárias configurações de escala;
- (3) Comparar os resultados da etapa (2) com os dados reais de aerogravimetria gravimétrica 3D adquiridos sobre a mesma região dos dados de gravimetria terrestre.

O EQUIPAMENTO

Air-FTGTM é um instrumento altamente sensível que requer para sua correta operação um ambiente livre de ruído e estável para obter o máximo de eficiência. Isto não é possível no mundo real, de forma que as vibrações e acelerações da aeronave devem ser administradas. Além disso, o sistema FTG deve ser instalado perto do centro de gravidade da aeronave (Fig. 1). A aeronave Cessna Caravan é de tamanho suficiente para abrigar o sistema FTG e é atualmente a aeronave preferida para este tipo de levantamento. Os ruídos e vibrações que atuam no sistema ao longo de cada vôo são monitorados por 2 acelerômetros externos e os dados são compensados dos ruídos.

Como o sinal do Air-FTGTM decai com o cubo da distância ao alvo, é importante voar o mais próximo possível do terreno para capturar as pequenas amplitudes associadas aos corpos mineralizados. Para esse tipo de pesquisa é usada a técnica *drape* a uma altitude de 100 m do solo. Esta é a altura de vôo que é considerada segura, dados os níveis de desempenho de aeronave.

Como outros métodos geofísicos, as escolhas do espaçamento entre as linhas de vôo e da orientação das linhas e altura de vôo são fundamentais para uma boa coleta de dados. O tamanho estimado dos corpos mineralizados, orientação, topografia, contraste de densidade e profundidade do alvo são a chave para determinar os parâmetros de vôo.



Figura 1 – Plataforma móvel, sistema FTG disposto dentro da aeronave Caravan (C-208).

RESULTADOS SINTÉTICOS

Os resultados sintéticos a serem mostrados neste artigo foram adquiridos usando a técnica *drape*, onde a altura de vôo é fixa com relação à superfície do terreno. Para os modelos geológicos sintéticos aqui propostos, esta altura de vôo foi de 100 m e os valores dos gradientes de gravidade serão valores apenas relativos, pois estaremos assumindo o valor de $G = 1,0$. Além disso, será feita uma modificação essencial com relação ao modelo publicado por Zhdanov (2002). Suporemos que o meio geológico é constituído por um meio de fundo com densidade ρ_0 e incluso nele corpos discretos com densidade ρ_1, ρ_2 , etc. Neste caso, visando otimizar o algoritmo em termos de tempo de computação, os valores dos gradientes de gravidade para este modelo de fundo serão determinados separadamente através de solução semi-analítica mostrada na Figura 2.

Como estamos supondo um meio de fundo homogêneo, isotrópico e linear, as componentes do tensor são retas com coeficientes lineares nulos e coeficientes angulares crescentes ou decrescentes, a depender da componente em questão.

A seguir, os cálculos somente precisam ser feitos discretizando as anomalias e inserindo na Equação (8) apenas os seus contrastes com relação à densidade de fundo, i.e., $\rho = \rho_n - \rho_0$. Isto significa menor região a ser discretizada e, por conseguinte, uma apreciável redução de cálculos e tempo de computador. A

Figura 2 foi obtida posicionando a aeronave no centro de um modelo de área $4000 \times 4000 \text{ m}^2$, a uma altura de vôo de 100 m, e com valores crescentes da densidade de fundo ρ_0 , variando de $2,0 \text{ g/cm}^3$ até $3,0 \text{ g/cm}^3$. Para o modelo sintético proposto neste trabalho, obtemos as componentes do gradiente de gravidade pela expressão simples:

$$g_{\alpha\beta} = a_{\alpha\beta}\rho_0, \quad (10)$$

onde ρ_0 é a densidade de fundo e $\alpha, \beta = x, y, z$.

Neste caso, $a_{xx} = -1,767$; $a_{xy} = 0,006$; $a_{xz} = 0,019$; $a_{yy} = -1,452$ e $a_{yz} = 3,538$. Os círculos superpostos as linhas da Figura 2 são exemplos dos valores das componentes do tensor calculados para uma densidade de fundo $\rho_0 = 2,45 \text{ g/cm}^3$. Verificamos os ajustes perfeitos para todas as medidas quando utilizamos as informações da Equação (10) com seus respectivos valores numéricos. A Figura 3 mostra uma simulação das componentes do tensor de aerogradiometria gravimétrica adquiridos sobre um terreno de massa específica $2,7 \text{ g/cm}^3$ perfazendo uma área de $1000 \times 1000 \text{ m}^2$, tendo em seu centro uma massa anômala de minério de massa específica $4,2 \text{ g/cm}^3$, de volume $250 \times 250 \times 250 \text{ m}^3$. O topo do alvo dista de 100 m da superfície do solo. As semelhanças dos resultados da Figura 3 com o exemplo sintético publicado por Murphy (2004) corroboram a validade e eficiência do algoritmo aqui implementado. Pode-

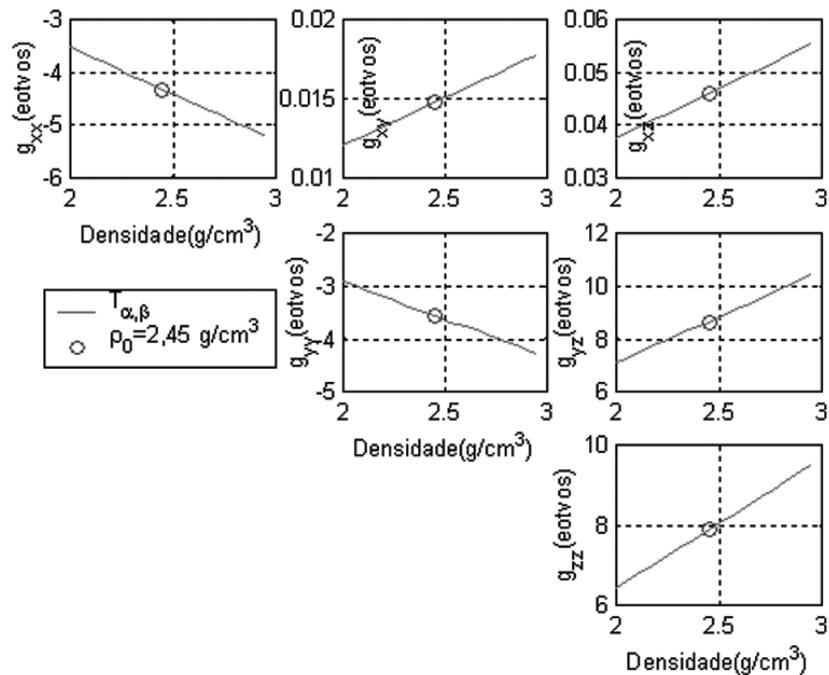


Figura 2 – Componentes do tensor de aerogravimetria gravimétrica, em função da variação de densidade, adquiridos no ponto central de um meio de fundo homogêneo, isotrópico e linear.

se ver facilmente que a componente g_{xx} identifica com exatidão as bordas leste oeste do corpo, e a componente g_{yy} , as bordas norte-sul. A característica de quadrupolos da componente g_{xy} , com dois altos e dois baixos gravimétricos bem definidos, tem forte correlação com corpos discretos, sendo bastante eficiente na identificação de corpos de minério. As componentes g_{xz} e g_{yz} , conforme já descrito por Murphy (2004), identificam os centros de massa da anomalia.

VALIDAÇÃO

Uma das maneiras para avaliar os dados de aerogravimetria gravimétrica FTG é comparando-as com a gravimetria terrestre. Isso pode ser feito por integração espacial dos dados das componentes do tensor do FTG para estimar os dados de gravidade vertical ou fazendo a transformação espacial das medidas verticais da gravimetria terrestre para gerar as estimativas do tensor.

Os valores resultantes da diferença entre os dados da aerogravimetria gravimétrica e gravimetria terrestre proporcionam uma estimativa dos erros combinados na gravimetria terrestre e FTG. O valor rms pode ser tomado como uma estimativa do limite máximo de ruído nos dados do levantamento aéreo FTG.

A área objeto dos ensaios de gravimetria terrestre e aerogravimetria gravimétrica situa-se nas proximidades da mina do Fazendão, complexo Mineiro Mariana-MG, distante cerca de 40 km

a norte do município de Mariana-MG.

Na área onde foi realizado o levantamento de aerogravimetria gravimétrica, as linhas de vôo foram orientadas na direção Norte-Sul com espaçamento entre linhas de aproximadamente 200 m em um total de 53 linhas levantadas.

A aquisição dos dados foi realizada a uma altitude de 100 m sobre a superfície de solo. O plano de vôo incluiu o *drape* para manter uma altitude constante durante cada linha de pesquisa. Porém, devido a limitações na capacidade da aeronave para subir e descer, não foi possível manter uma altitude constante pois o terreno muda rapidamente.

Os dados de gravimetria terrestre representados pelo mapa Bouguer (Fig. 4) foram adquiridos com espaçamento de 50 m entre as estações, as linhas tinham orientação noroeste-sudeste e espaçamento de 250 m.

As leituras foram feitas automaticamente, após o equipamento estar nivelado sobre uma estação. A operação de nivelamento foi assistida por sensores de alta precisão. É importante salientar que sempre que o equipamento não se mostrou devidamente nivelado, dentro de certos limites, a leitura não foi aceita, e o equipamento foi re-nivelado. O tempo de tomada dos registros da gravidade foi definido pelo operador, sendo a leitura final representativa do valor médio das amostras acompanhado de seu respectivo desvio padrão.

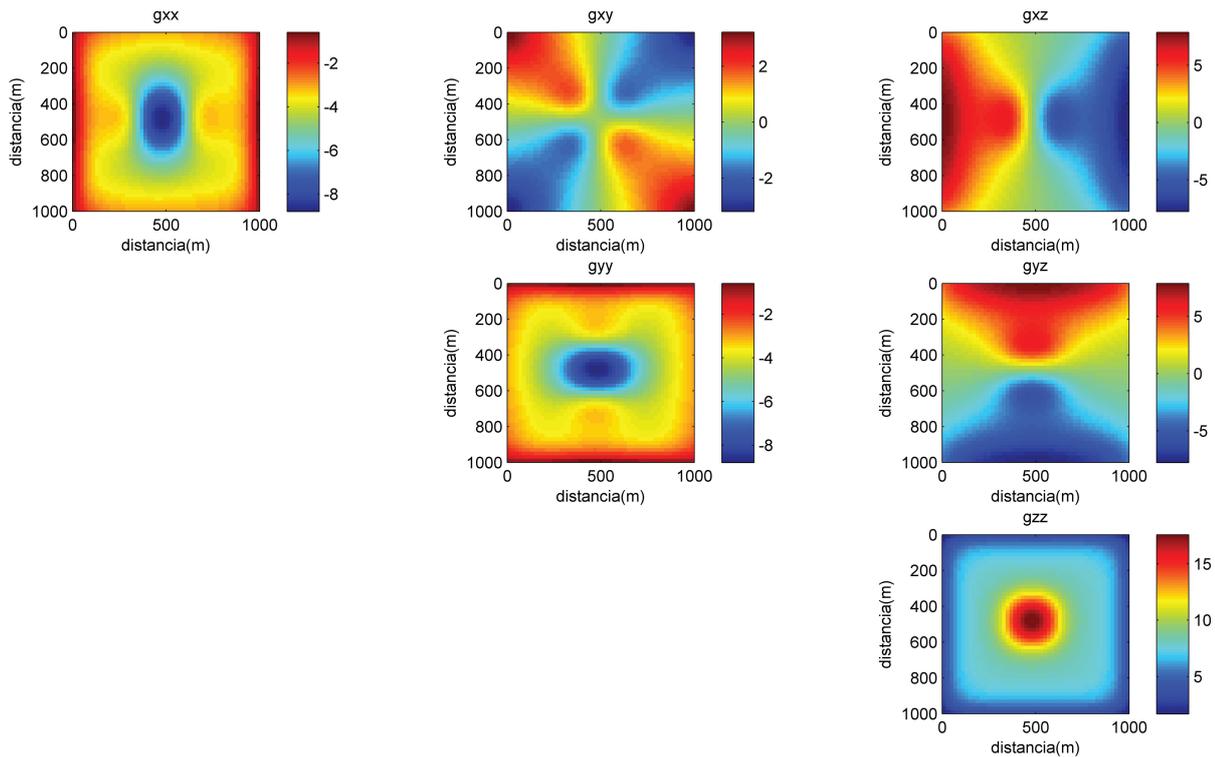


Figura 3 – Componentes do tensor de aerogradiometria gravimétrica adquiridos sobre um terreno de massa específica $2,7 \text{ g/cm}^3$, perfazendo uma área de $1000 \times 1000 \text{ m}^2$, e tendo em seu centro uma massa anômala de minério de massa específica $4,2 \text{ g/cm}^3$, volume $250 \times 250 \times 250 \text{ m}^3$ e cujo topo dista 100 m da superfície do solo.

O processamento dos dados foi essencialmente realizado através do *software* Xcelleration Gravity™ (específico para tratamento de dados gravimétricos), ambiente Geosoft Oasis Montaj™.

Precisão dos resultados

Para efeito de avaliação dos dados do Air-FTG™ foi feita uma transformação espacial das medidas da gravimetria terrestre gerando estimativas do tensor a partir desses dados. Para isso foi utilizada a porção central dos dados de gravimetria. Aos dados de gravimetria terrestre foi aplicada a continuação para cima, para alinhar esses dados com a superfície do *drape* do levantamento de aerogradiometria gravimétrica FTG. Em seguida foi aplicada a primeira derivada vertical gerando o T_{zz} a partir da gravimetria terrestre (Fig. 5(a)). Para compatibilizar as unidades, o gradiente vertical continuado para cima dos dados de gravimetria terrestre foi multiplicado por 10^4 .

De posse dos dados do T_{zz} medido pelo sistema FTG (Fig. 5(b)) e do T_{zz} calculado a partir dos dados de gravimetria terrestre (Fig. 5(a)), foi feita uma subtração entre os dois *grids* e quantitativamente a diferença entre o T_{zz} medido pelo sistema

FTG e o T_{zz} calculado a partir dos dados de gravimetria terrestre tem um desvio padrão de 28 Eo (Fig. 5(c)), resultado este contaminado pelos efeitos de borda. Percebemos, no entanto, que na parte central da área levantada, este desvio tende a valores muito mais baixos. As cores verde, amarelo e azul indicam as áreas onde os dados do T_{zz} medido e o T_{zz} calculado estão muito próximos. As áreas em vermelho mostram onde as diferenças entre o T_{zz} medido e o T_{zz} calculado são grandes, devidos aos efeitos de bordas mencionados acima.

Para melhor avaliarmos o desempenho do sistema Air-FTG™ comparamos o espectro radial médio dos dados de gravimetria terrestre com o espectro radial médio dos dados do Air-FTG™, pois os dados de gravimetria terrestre foram coletados na direção NO-SE e as linhas de vôo do sistema FTG na direção N-S, além do que no sistema aerotransportado a turbulência sofrida pela aeronave é composta por sinais de alta frequência (neste caso ruído) que são introduzidos ao sinal captado pelo sistema FTG que também são de alta frequência (atração dos acelerômetros a corpos superficiais) durante a coleta de dados.

Os espectros médios radiais de ambos os levantamentos foram avaliados em ambiente Oasis Montaj™ e foi usado um filtro

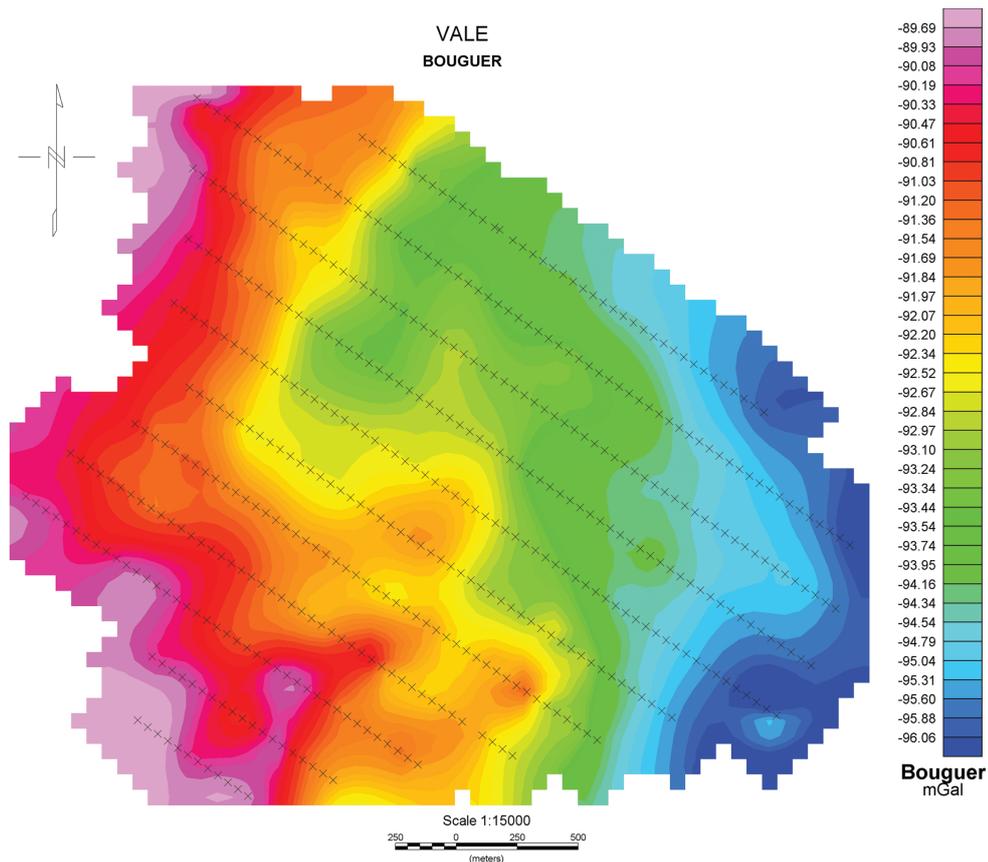


Figura 4 – Mapa Bouguer, com espaçamento de 50 m entre as estações de medição e linhas na direção NO-SE, com espaçamento de 250 m.

para suavizar os sinais de alta frequência na região do espectro onde eles se concentravam.

Observamos nas Figura 6(a) e 6(b) a similaridade entre as frequências de ambos os levantamentos.

Resultados com dados reais na mina de São Luiz

As minas de São Luís, Tamanduá/Almas e Fazendão Sul formam a jazida de Fazendão, que está situada na região leste do Quadrilátero Ferrífero, no município de Catas Altas, estado de Minas Gerais, aproximadamente a 120 km de Belo Horizonte.

O levantamento de aerogravimetria gravimétrica foi realizado com as linhas de vôo orientadas na direção NE-SW e espaçamento entre linhas de aproximadamente 200 m em um total de 24 linhas levantadas, cobrindo um total de 173 km lineares e uma área de aproximadamente 30 km².

A aquisição dos dados foi realizada a uma altitude de 100 m sobre a superfície de solo. O plano de vôo incluiu o *drape* para manter uma altitude constante durante cada linha de pesquisa. Porém, devido a limitações na capacidade da aeronave para subir

e descer, não foi possível manter uma altitude constante pois o terreno muda rapidamente.

A Figura 7 mostra o *grid* de cada componente tensor e identifica exatamente os limites da mina de São Luiz do complexo de Fazendão.

Pode-se verificar facilmente que a componente T_{xx} identifica com exatidão as bordas leste e oeste do corpo mineralizado da mina de Fazendão, e a componente T_{yy} , as bordas norte e sul. A característica de quadrupolos da componente T_{xy} , com dois altos e dois baixos gravimétricos bem definidos, tem forte correlação com corpos discretos, sendo bastante eficiente na identificação de corpos de minério. As componentes T_{xz} e T_{yz} , conforme já descrito por Murphy (2004), identificam os centros de massa do corpo mineralizado.

A Figura 8 mostra o detalhe da componente T_{zz} delimitando perfeitamente o corpo mineralizado da mina de São Luiz.

A Figura 9 mostra o *grid* da componente T_{xy} e identifica a forma de quadrupolo com 2 altos e 2 baixos que estão associados com a forma do corpo da mina de São Luiz do complexo de Fazendão.

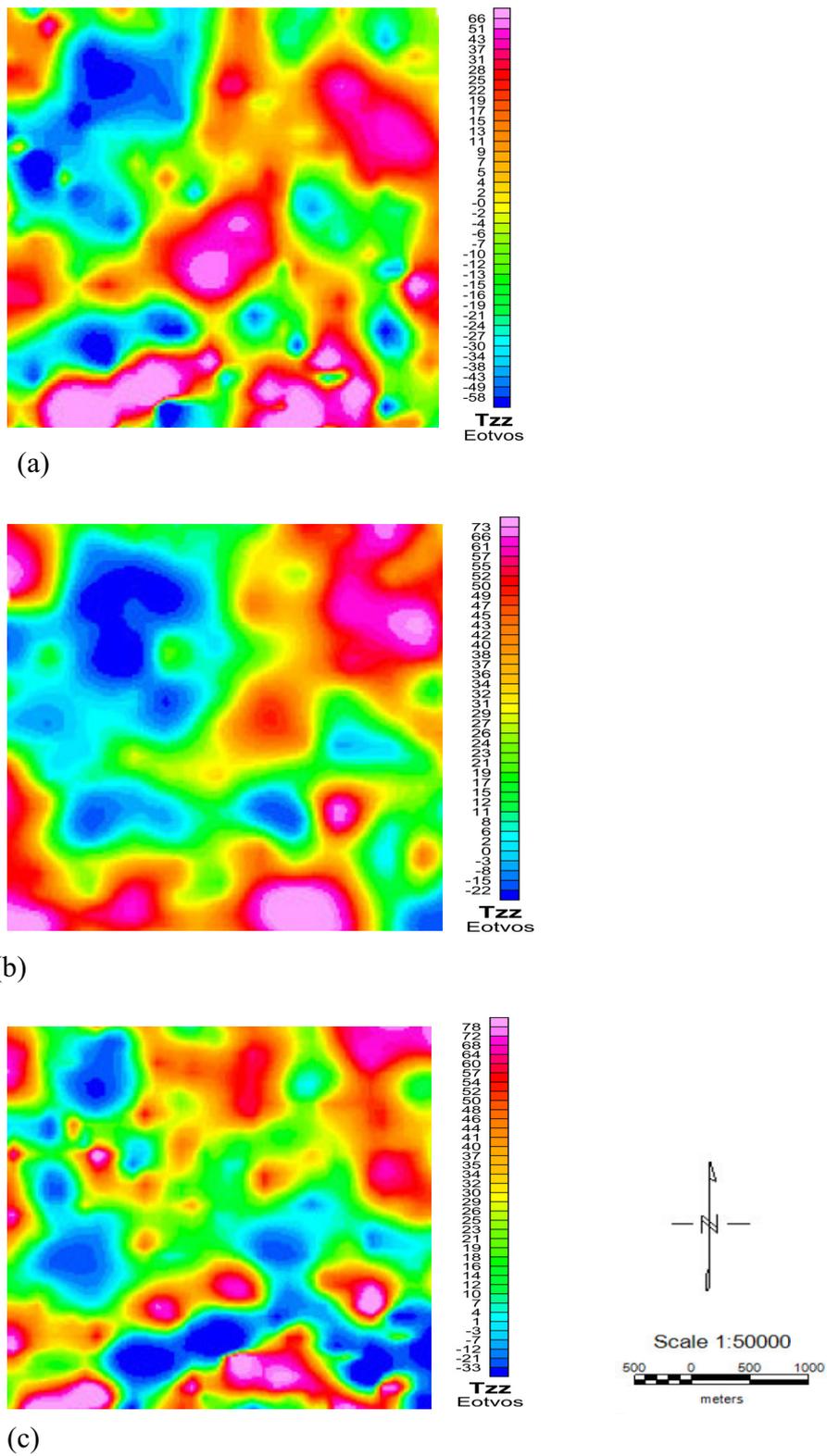


Figura 5 – (a) T_{zz} gerado a partir dos dados de gravimetria terrestre, (b) Air-FTGTM T_{zz} , (c) Diferença para os valores de T_{zz} do Air-FTGTM e o T_{zz} gerado da gravimetria terrestre.

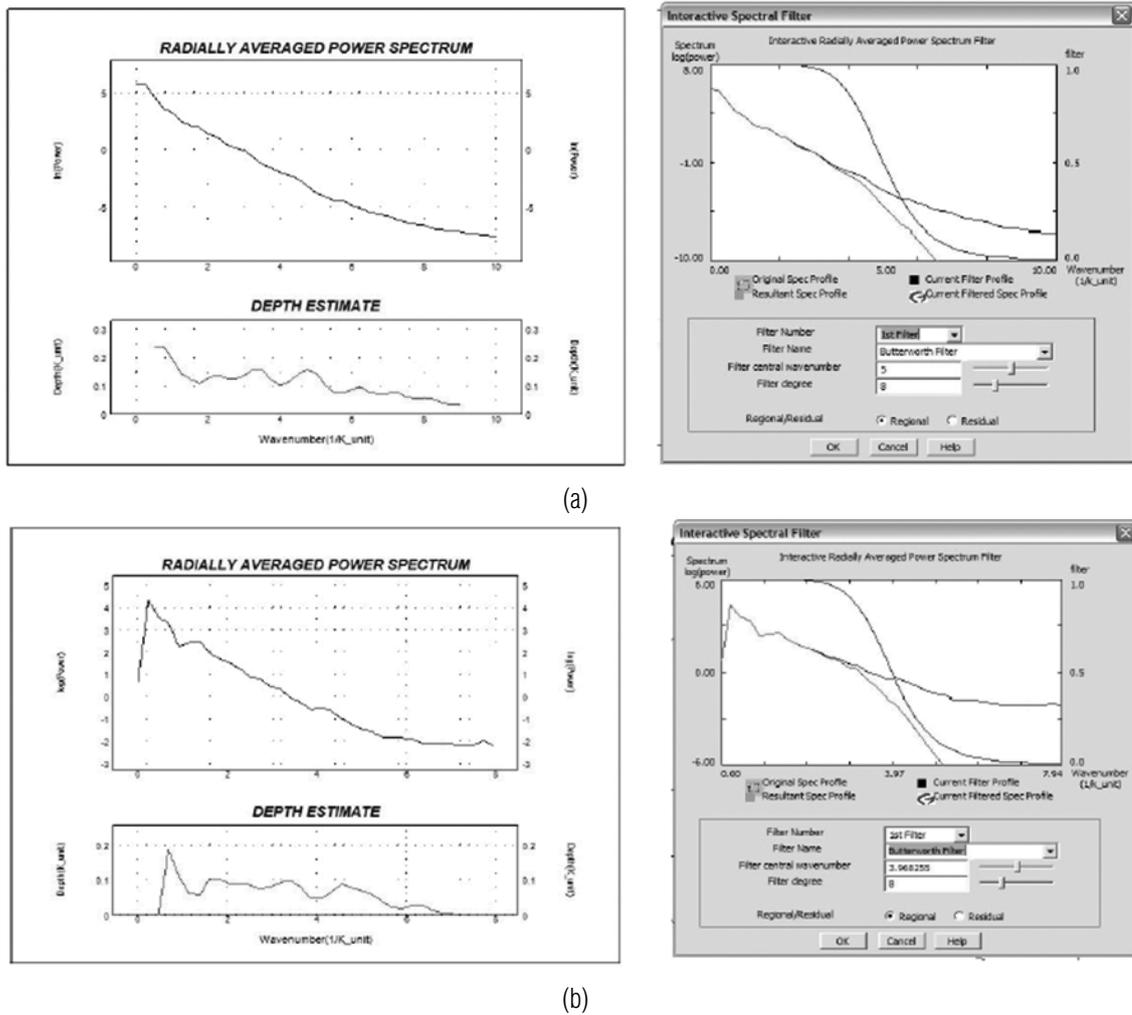


Figura 6 – (a) Espectro de potência radial médio do T_{zz} gerado a partir dos dados de gravimetria aérea e (b) terrestre; e os respectivos filtros usados para suavizar o efeito das altas frequências.

Os resultados aqui mostrados comprovam a eficiência do sistema Air-FTGTM. Percebemos ver claramente que a componente T_{xy} identificou a forma de quadrupolo com 2 altos e 2 baixos que estão associados com a forma do corpo mineralizado. Por outro lado, a componente T_{zz} identificou exatamente os limites da mina de São Luiz do complexo de Fazendão, conforme identificamos no mapa litológico da Figura 10.

CONCLUSÕES

Um algoritmo numérico rápido e eficiente foi implementado para calcular as cinco (5) componentes linearmente independentes do tensor de aerogravimetria gravimétrica 3D. A proposição de um meio de fundo, identificado por uma solução semi-analítica, e a necessidade de discretizar apenas as regiões que apresentam

contraste de densidade com este meio, reduziram sensivelmente os tempos de computador. Notamos que o sistema apresenta máxima eficiência quando os alvos são corpos discretos e relativamente rasos. No entanto, concluímos, baseados nos resultados apresentados, que a presença de heterogeneidades muito rasas e contrastantes com o meio de fundo, independentes dos tamanhos e densidades, tornam o reconhecimento dos alvos um pouco difícil, principalmente aquelas componentes relacionadas com as dimensões do alvo. Embora isto pareça uma limitação da técnica FTG, percebemos que a componente g_{zz} , que na verdade inclui todas as características geológicas relacionadas com a densidade do alvo, permite separar o alvo de outras heterogeneidades, consideradas ruídos. Notamos que o sistema Air-FTGTM é muito sensível às acelerações verticais relacionadas à turbulência e às manobras “roll, pitch e yaw” da aeronave. Em

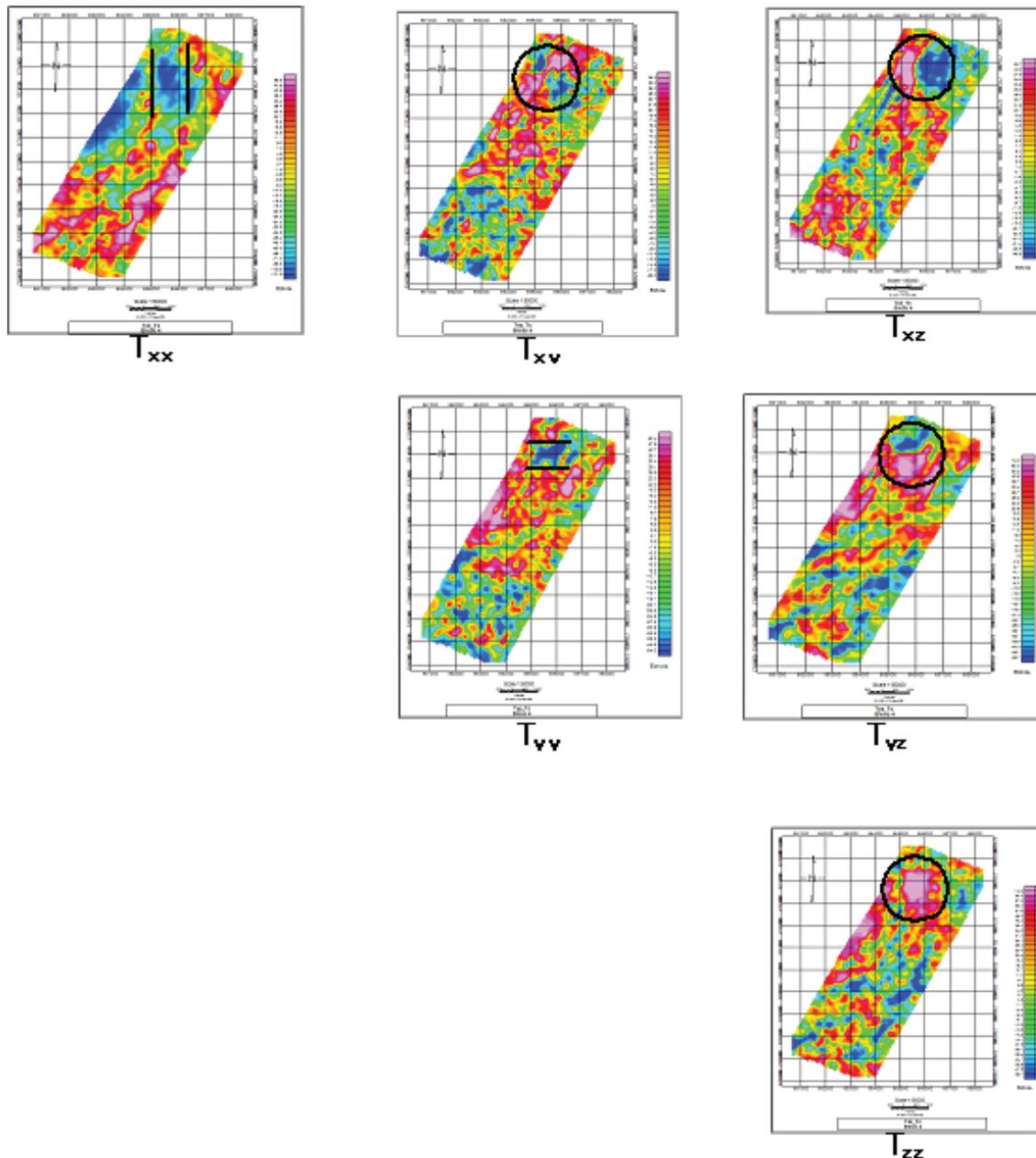


Figura 7 – Componentes do tensor de gradiometria gravimétrica sobre a mina de São Luiz, complexo de Fazendão.

áreas onde a topografia é acidentada como as do Quadrilátero Ferrífero deve-se programar o *drape* de forma que as linhas de vôo sejam as mais suaves possível para inserir uma menor quantidade de ruído aos dados coletados e a altura de vôo tem que ser a mais baixa possível, estando de acordo com as normas de segurança. Mesmo usando um filtro para suavizar os sinais de alta frequência, o resultado da diferença entre o T_{zz} gerado da gravimetria terrestre e o T_{zz} do Air-FTGTM não altera significati-

vamente o *grid* final. O teste de precisão aqui realizado demonstra que o resultado do levantamento onde foi utilizado o sistema Air-FTGTM obteve sucesso, visto que os resultados obtidos na mina de São Luiz comprovam a eficiência do sistema Air-FTGTM. A componente T_{xy} identificou a forma de quadrupolo com dois altos e dois baixos que estão associados com a forma do corpo mineralizado e a componente T_{zz} identificou exatamente os limites da mina de São Luiz do complexo de Fazendão.

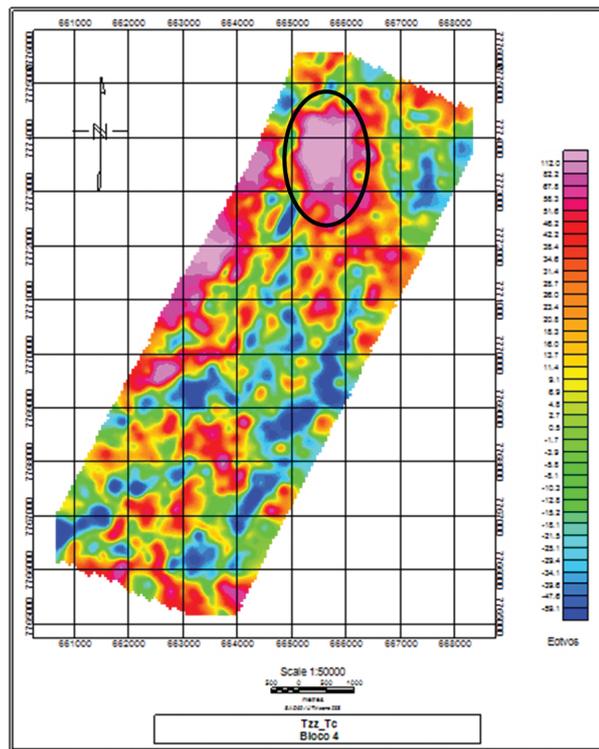


Figura 8 – Grid da componente T_{zz} .

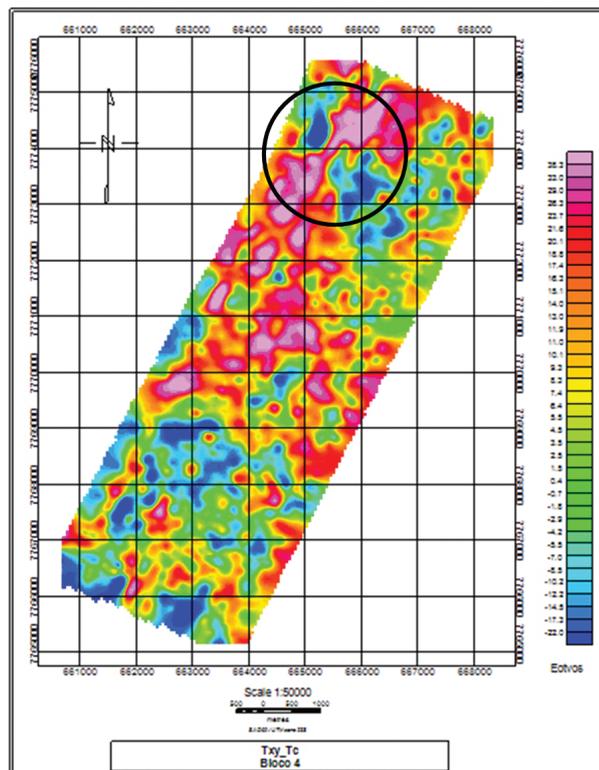


Figura 9 – Grid da componente T_{xy} .

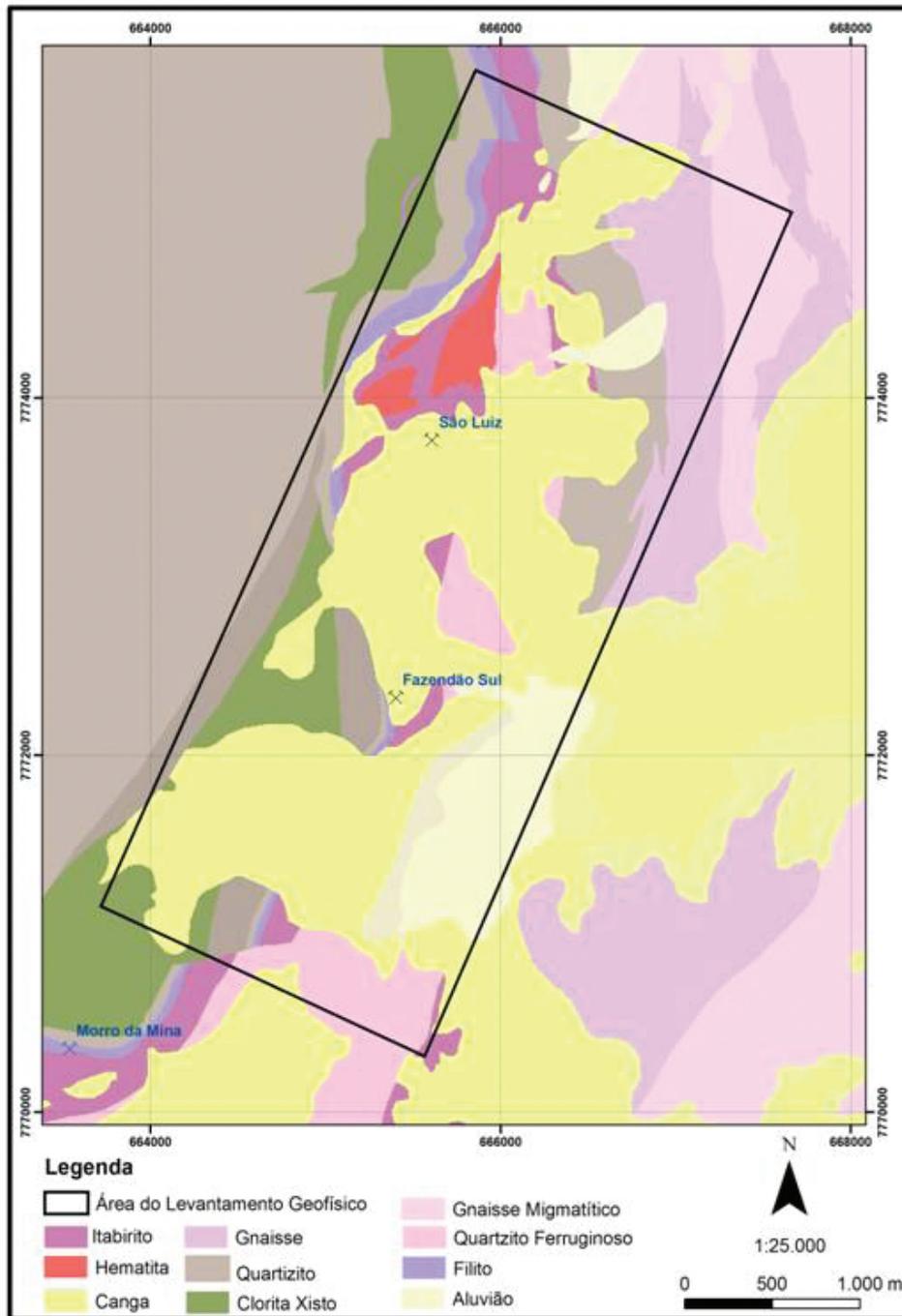


Figura 10 – Mapa litológico regional com a área do sobrevôo da mina de São Luiz.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Vale S.A., especialmente à Diretoria de Ferrosos pela oportunidade de publicação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BELL R. 1998. Gravity gradiometer. *Scientific American*, 278: 24–79.

BUTLER DK. 1995. Generalized gravity gradient analysis for 2-D inversion. *Geophysics*, 60: 1018–1028.

JEKELI C. 1988. The gravity gradiometer survey system (GGSS). *EOS Transaction of the American Geophysical Union*, 69: 116–117.

LEE JB. 2001. FALCON gravity gradiometer technology. *Exploration Geophysics*, 32: 247–250.

METZGER EH. 1982. Development experience of gravity gradiometer system. *IEEE Plans*, 323–332.

MURPHY CA. 2004. The Air-FTG airborne gravity gradiometer system. *ASEG-PESA, Sydney-2004*, 7–14.

VASCO DW. 1989. Resolution and variance operators of gravity and gravity gradiometry. *Geophysics*, 54: 889–899.

ZHDANOV MS. 2002. *Geophysical inverse theory and regularization problems*. Elsevier Science Publishing Co. Inc. 628 pp.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Marco Antonio Braga. Graduado em Geologia pela UFRJ, Mestre e Doutor em Geologia com ênfase em Geofísica Aplicada pela Universidade Federal do Rio de Janeiro/Colorado School of Mines em 2009. Especialista em métodos geofísicos aplicados à exploração de minério de ferro. Atualmente trabalha no Centro de Tecnologia de Ferrosos da Vale como coordenador de geofísica da área de Ferrosos.

Jadir da Conceição da Silva (*in memoriam*). Graduado em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Kennedy (1984), Mestrado em Ciências Técnicas Nucleares pela UFMG (1988) e Doutorado em Geofísica pela UFPA (1993). Foi professor da UFRJ, UENF e consultor da Vale. Faleceu em 26 de maio de 2007.

Henrique Dayan. Ph.D. pela Universidade de Leeds, Inglaterra, 1981; Geologia Estrutural/Zonas de Cisalhamento. Atualmente é professor de Geologia Estrutural da UFRJ e consultor da Vale.

Dionísio Uendro Carlos. Bacharel e Mestre em Geofísica pelo IAG/USP, respectivamente em 2002 e 2006. Especialista em aerogamaespectrometria, tendo desenvolvido os primeiros blocos transportáveis de concreto radioativo para calibração de detectores gama portáteis e aerotransportados da América Latina. Atualmente trabalha no Centro de Tecnologia de Ferrosos da Vale, realizando processamento de dados aerogeofísicos 3D-FTG e aeromagnetometria.

Henry Galbiatti. Mestre em Geologia Estrutural e Mestre em Geotecnia pela Universidade Federal de Ouro Preto. Atualmente é gerente de Exploração Mineral de Ferrosos da Vale.

Tiago de Almeida. Mestrando em Geofísica Aplicada pela UFRGS. É especialista em métodos geofísicos aplicados ao minério de ferro. Trabalha na empresa FTGeo Geologia e Geofísica.

Rodrigo Rocha Sousa. Técnico em Geologia e Mineração pelo CEFET-RN no ano de 2003. Tendo especialização em SIG, atualmente trabalha para a Vale na Gerência de Exploração de Ferrosos.

Gilmar Carmo. Bacharel em Geofísica pelo IAG/USP em 2006, mestrando em Geologia na UFMT. Atualmente trabalha para a Vale na Gerência de Exploração Mineral de Ferrosos.