



Inversão de Dados de Aerogravimetria Gravimétrica 3D-FTG aplicada a exploração mineral na Região do Quadrilátero Ferrífero

Dionísio Uendro Carlos (VALE S.A./Observatório Nacional – ON/MCT), Valéria C. F. Barbosa, Leonardo Uieda (Observatório Nacional – ON/MCT), Marco A. Braga (VALE S.A.)

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

We have interpreted the airborne gravity gradiometry data from Quadrilátero Ferrífero, an iron ore province in southeastern Brazil. Aiming at retrieving the geometry of the iron body, we have used a fast and novel gravity inversion method for estimating a 3D density-contrast distribution defined on a grid of prisms. This inversion approach combines robust data-fitting with an iterative procedure that does not require the solution of a large equation system. By using a systematic search algorithm, the estimated mass grows around prismatic elements called “seeds”. The interpreter specifies the locations and the associated density contrasts of the seeds. Automatically, the inversion method fits the observations and favors compact gravity sources closest to the seeds. To produce a more robust data fitting than least-squares fit, the inversion method minimizes the L_1 -norm of the residuals. Hence, it allows the presence of large residuals, so that outliers produced by non-targeted bodies can be handled. By using 126 seeds which were assigned density contrasts of 0.5 g.cm^{-3} and whose locations were based on our knowledge about the QF area, we have retrieved a continuous elongated iron body that fits the observed components of the gravity gradient. Our inversion result agrees reasonably with previous geophysical interpretations. In addition, our result honors the borehole information about the iron body depth.

Introdução

As maiores reservas de ferro da Terra são constituídas por formações ferríferas bandadas (*Banded Iron Formations* - BIFs), que são rochas sedimentares estratificadas alteradas formadas por camadas alternadas de hematita e magnetita sílica, bem como carbonatos e silicatos de ferro. O termo BIF é uma nomenclatura internacionalmente usada para designar sedimentos e metassedimentos químicos finamente bandados constituídos por alternância de chert ou quartzo e óxidos de ferro. Uma das mais importantes províncias de ferro no Brasil é o Quadrilátero Ferrífero (QF), localizado no Cráton São Francisco, sudeste do Brasil. O QF é reconhecido por seu elevado volume de

reservas de ferro e a alta qualidade do minério produzido e acumulado. A maioria das jazidas de ferro no QF estão hospedados nos itabiritos oxidados, metamorfoseados e heterogeneamente deformados que são as formações ferríferas bandadas (BIFs) da Formação Cauê. Os BIFs do QF são localmente chamados de itabiritos e estão associados ao Supergrupo Minas, mais precisamente ao Grupo Itabira da Formação Cauê, e contém fácies do minério de óxido de ferro, como hematita, magnetita e martitas.

Recentes progressos tecnológicos dos gradiômetros de gravidade aerotransportados viabilizou as medidas com precisão das componentes independentes do tensor de gradiente de gravidade. Assim, gradiometria de gravidade aérea passou a ser uma ferramenta útil para a interpretação de jazidas minerais. Em comparação com os métodos de interpretação da componente vertical da anomalia gravimétrica, a aerogravimetria gravimétrica tem a vantagem de ser extremamente sensível a variações do contraste de densidade local dentro de um ambiente geológico complexo (Zhdanov et al., 2010). Recentemente, alguns algoritmos de inversão de gradiente de gravidade foram adaptados para interpretar dados coletados sobre alvos de exploração mineral. Todos estes métodos discretizam a subsuperfície da Terra em células prismáticas e estimam a distribuição 3D dos contrastes de densidade que recuperam a imagem de corpos de minério (Martinez et al. 2010, Zhdanov et al., 2004, Li et al., 2001, Jorgensen e Kisabeth, 2000).

Neste trabalho interpretamos um corpo de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero usando um novo método de inversão robusta de dados do gradiente de gravidade desenvolvido por Uieda e Barbosa (2011). Interpretamos uma grande área de estudo que se estende por 95 km^2 , com dimensões de aproximadamente 19 km por 5 km . O método de Uieda e Barbosa (2011) estima uma distribuição discreta 3D dos contrastes de densidade a partir de dados gradiométricos de gravidade. A região da subsuperfície contendo as fontes geológica é discretizada em uma malha $m_x \times m_y \times m_z$ de M prismas elementares 3D justapostos, cujos contrastes de densidade são desconhecidos. O método presume que o contraste de densidade em cada prisma é constante e estima o contraste de densidade para todos os prismas. Este método utiliza “sementes” que são prismas isolados da malha do modelo interpretativo cujos valores de contrastes de densidade são pré-especificados. Como na inversão de gravidade 2D proposta por Renè (1986), no método de Uieda e Barbosa (2011) densidades anômalas crescem ao redor destas sementes. Para estimar uma imagem nítida de múltiplas fontes geológicas adjacentes, Uieda e Barbosa (2011) impõem uma restrição de

compacidade para os corpos estimados usando uma função de regularização adaptada a partir do método de inversão 3D de dados gravimétricos usando uma estratégia de aprendizagem adaptativa desenvolvido por Silva Dias et al. (2009). No método de Uieda e Barbosa (2011) cada semente é um prisma 3D do modelo interpretativo com um contraste de densidade especificado pelo intérprete. Portanto, neste método diferentes contrastes de densidade podem ser atribuídos a diferentes sementes com base no conhecimento do intérprete sobre a geologia da área de estudo. O método de Uieda e Barbosa (2011) permite a interpretação de vários corpos geológicos com diferentes contrastes de densidade produzindo anomalias interferentes. Iterativamente, no método de Uieda e Barbosa (2011) a massa estimada aumenta pela adição de prismas, com contrastes de densidade diferentes de zero, na vizinhança da solução atual. Nas primeiras iterações, prismas são adicionados na vizinhança das sementes com contrastes de densidade da correspondente semente. Em cada iteração a solução estimada é atualizada e novos vizinhos são incorporados à cada semente. Nas iterações seguintes, novos prismas são adicionados a atual solução estimada fazendo-se uma busca sistemática ao conjunto dos prismas vizinhos a cada semente. Iterativamente, uma distribuição discreta 3D dos contrastes de densidade cresce ao redor destas sementes sob as restrições de ajustar o dado observado e de manter a compacidade da solução.

A maior vantagem do algoritmo do método inverso de Uieda e Barbosa (2011) é não ser necessária a solução de sistemas lineares. Além disso, a matriz de sensibilidade do sistema linear não é requerida em sua totalidade durante as iterações do algoritmo. Esta demanda limitada da matriz de sensibilidade é porque apenas prismas nas vizinhanças de cada semente são adicionados à solução seguindo uma busca sistemática por uma distribuição 3D de contraste de densidade que ajuste os dados e favoreça soluções apresentando fontes gravimétricas compactas em torno das sementes pré-especificadas. Iterativamente apenas algumas colunas da matriz de sensibilidade são calculadas quando demandadas e descartadas quando não são mais utilizadas. Especificamente, uma vez que um prisma na vizinhança de uma semente é permanentemente adicionado a solução, a correspondente coluna não é mais necessária e pode ser descartada. Isto é possível uma vez que o efeito gravimétrico produzido por este prisma adicionado é calculado definitivamente em todos os pontos observacionais. Isto permite um grande aumento na velocidade da inversão e uma drástica queda nas necessidades de memória RAM. Portanto o método de Uieda e Barbosa (2011) possui uma baixa demanda computacional, tanto de memória como de tempo de processamento.

Assim, com o método de Uieda e Barbosa (2011) é possível inverter grandes conjuntos de dados observados do tensor gradiente gravimétrico utilizando uma malha fina composta por pequenos prismas 3D na discretização da subsuperfície. Adicionalmente, o método de Uieda e Barbosa (2011) utiliza um processo robusto de ajuste dos dados através da minimização da norma L_1 dos resíduos.

Isso permite a presença de resíduos de grande amplitude. Conseqüentemente, dados espúrios do tensor gradiente gravimétrico produzidos por fontes que não são alvos geológicos podem ser manipulados na inversão sem interferirem na interpretação das fontes que são alvos de interesse geológico.

Apresentamos uma interpretação 3D de um conjunto de dados do tensor gradiente gravimétrico (mais de 45.500 dados) de uma província economicamente importante de minério de ferro na região Sudeste do Brasil, chamada Quadrilátero Ferrífero. Invertamos este conjunto de dados através da aplicação do método de Uieda e Barbosa (2011). A área de estudo é de 95 km² de extensão. Discretizamos a subsuperfície em uma malha composta por um grande número de prismas 3D (usamos mais de 237 mil prismas 3D). Nossa interpretação tem como objetivo delinear em profundidade a geometria do corpo de minério de ferro. Ao aplicar a inversão robusta 3D dos dados do tensor gradiente gravimétrico para os dados do QF, obtivemos uma imagem de profundidade do corpo de ferro compatíveis com os dados de sondagem disponíveis.

Geologia da área em estudo

O Quadrilátero Ferrífero (QF) abriga em seus domínios jazidas de ferro, ouro e outros recursos minerais (Almeida, 1977; Almeida & Hassuy, 1984). As unidades litoestratigráficas que compõem o QF são: Complexos Metamórficos, Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi. O Supergrupo Minas representa uma sequência metassedimentar de idade Paleoproterozóica constituída por filitos, xistos, quartzitos, dolomitos e itabiritos, assentada discordantemente sobre rochas do embasamento ou do Supergrupo Rio das Velhas (Braga, 2009). O Grupo Itabira constitui a sequência química intermediária, dividido em duas formações: Cauê e Gandarela. A Formação Cauê está na base no grupo e é formada quase que exclusivamente por itabiritos e corpos ricos em hematita, sendo a mesma explotada como minério de ferro.

Área do Aerolevanteamento 3D-FTG

O aerolevanteamento recobriu a aba sul do Sinclinal Gandarela, situado na região leste do Quadrilátero Ferrífero onde são encontradas rochas do Supergrupo Minas e do Supergrupo Rio das Velhas. No Supergupo Minas estão as hematitas e itabiritos da Formação Cauê do Grupo Itabira. A área está localizada a aproximadamente 120 km da cidade de Belo Horizonte (MG). A Figura 1 apresenta o modelo digital do terreno da área e as linhas de vôo do aerolevanteamento executado. Medições de densidades do minério realizadas em laboratório mostram um contraste de densidade em relação às rochas encaixantes de 1.5 g.cm⁻³ a 2.1 g.cm⁻³ (Braga et al., 2009).

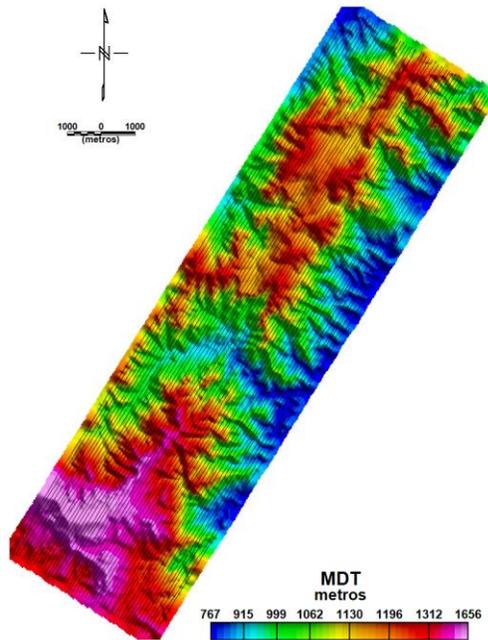


Fig. 1. Modelo Digital do Terreno da área do aerolevantamento. Sobrepostas estão as linhas de voo.

Resultados Obtidos

Para a aplicação do método de inversão desenvolvido por Uieda e Barbosa (2011), as sementes de densidades utilizadas foram distribuídas na região do aerolevantamento seguindo as principais feições geológicas que aparecem nas componentes observadas do tensor gradiente gravimétrico G_{yy}^o , G_{yz}^o e G_{zz}^o (Figura 2). Neste trabalho invertemos estas 3 componentes que totalizam 45798 medições. Aplicamos uma correção de terreno a cada uma das componentes usando-se a densidade de 2.67 g.cm^{-3} . A malha 3D do modelo interpretativo utilizada na inversão foi composta por 237770 prismas. Na inversão incorporamos a topografia apresentada na Figura 1. Um total de 126 sementes foi utilizada na inversão. A Figura 2 mostra em pontos pretos as projeções horizontais das posições das sementes utilizadas na inversão. Atribuímos a todas as sementes um contraste de densidade de 0.5 g.cm^{-3} . O contraste de densidade das sementes foi escolhido presumindo que a formação ferrífera apresenta um contraste de densidade de aproximadamente 0.5 g.cm^{-3} em relação as rochas encaixantes. A especificação do conjunto de sementes que definem a jazida de ferro foi baseada no nosso conhecimento sobre a área estudada. Tal conhecimento foi fornecido por informações provenientes de furos de sondagem. A Figura 3 mostra a estimativa da distribuição 3D dos contrastes de densidade obtida usando a metodologia de Uieda e Barbosa (2011). Este resultado mostra um corpo de minério de ferro alongado, parcialmente contínuo e homogêneo. A Figura 4 mostra um perfil da estimativa da distribuição do contraste de densidade em que notamos um corpo de minério de ferro compacto, contínuo e com espessuras variáveis. De um modo geral as profundidades da estimativa desta fonte ferrífera concordam com as

profundidades do minério de ferro encontrado nos furos de sondagem e também estão em concordância com resultados apresentados em Braga (2009), Martinez et al.(2010) e Uieda e Barbosa (2011). A Figura 2 mostra as três componentes ajustadas (G_{yy}^f , G_{yz}^f e G_{zz}^f) do tensor de gradiente gravimétrico obtidas via ajuste robusto por norma L_1 produzidas pela solução estimada (Figura 3). Nota-se que os ajustes das três componentes invertidas produzidos pela solução estimada via inversão de Uieda e Barbosa (2011) são aceitáveis e explicam a principal anomalia gradiométrica da gravidade (anomalia alongada nas componentes observadas), que é a anomalia alvo do estudo. Ressalte-se que anomalias negativas, espúrias de pequenas amplitudes são desprezadas via o ajuste robusto.

Conclusão

Usamos um método de inversão robusta 3D para interpretar um conjunto de dados do tensor gradiente gravimétrico produzido por um corpo de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero (Brasil). Este método estima uma distribuição 3D do contraste de densidade pela combinação de um algoritmo de busca sistemática com um processo robusto de ajuste dos dados via norma L_1 dos resíduos. Ao utilizar um algoritmo de busca sistemática, a massa anômala estimada cresce em torno de elementos prismáticos chamados de "sementes" que são especificados pelo intérprete. Ao utilizar um ajuste robusto dos dados, o método permite resíduos grandes associados com as anomalias espúrias produzidas por fontes que não são alvos. Como esse método de inversão não resolve sistemas lineares, podemos interpretar rapidamente um grande conjunto de parâmetros e um grande volume de dados do tensor do gradiente gravimétrico. Esta é uma vantagem importante, pois elimina a necessidade de paralelização do algoritmo e elimina a necessidade de processos de compressão dos dados. Os resultados da inversão estão de acordo com interpretações anteriores utilizando diferentes métodos de inversão.

Agradecimentos

Os autores agradecem a VALE S.A. pela permissão da utilização dos dados de 3D-FTG.

Referências Bibliográficas

- Almeida, F. F. M., 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7(4), 349-364.
- Almeida, F. F. M., Hassuy, Y. 1984. O Pré-cambriano do Brasil. São Paulo. Edgard Blucher, 542 pp.
- Braga, M. A. 2009. Aplicação de Aerogravimetria Gravimétrica 3D-FTG na Prospecção de Minério de Ferro no Quadrilátero Ferrífero (MG) e Modelagem 2D e 3D para Estimativa de Massa do Depósito de Ferro de N1 em Carajás (PA). Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 245 pp.

Braga, M. A., Carlos, D. U., Almeida, T., Dayan, H., Sousa, R. R., Braga, C. A., 2009. Mapeamento Litológico por Correlação entre Dados de Aeromagnetometria e Aerograviometria 3D-FTG no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27(2), 255-268.

Jorgensen, G. J., and J. L. Kisabeth, 2000. Joint 3D inversion of gravity, magnetic and tensor gravity fields for imaging salt formations in the deepwater Gulf of Mexico: 70th Annual International Meeting, SEG, *Expanded Abstracts*, 424–426.

Li, Y. and Oldenburg, D. W., 1998, 3D inversion of gravity data, *Geophysics*, 63, 109-119.

Martinez, C., Li, Y., Krahenbuhl, R., 2010. 3D Inversion of airborne gravity gradiometry for iron ore exploration in Brazil. 80th Annual International Meeting, SEG, *Expanded Abstracts*, 1753-1757.

Renè, R. M. 1986. Gravity Inversion using open, reject and “shape-of-anomaly” fill criteria. *Geophysics*, 51(4), 988-994.

Silva Dias, F. J. S., V. C. F. Barbosa, and J. B. C. Silva, 2009. 3D gravity inversion through an adaptive-learning procedure: *Geophysics*, 74, I9–I21.

Uieda L. and V.C.F. Barbosa, 2011. 3D gravity Gradient Inversion by Planting Density Anomalies: 73rd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC, *Expanded Abstracts*, 1-5.

Zhdanov M.S. X. Liu, and G. Wilson, 2010. Potential field migration for rapid 3D imaging of entire gravity gradiometry surveys: *First Break*, 28, 47-51.

Zhdanov M.S., R.G. Ellis, and S. Mukherjee, 2004. Regularized focusing inversion of 3-D gravity tensor data: *Geophysics* 69, 925–937.

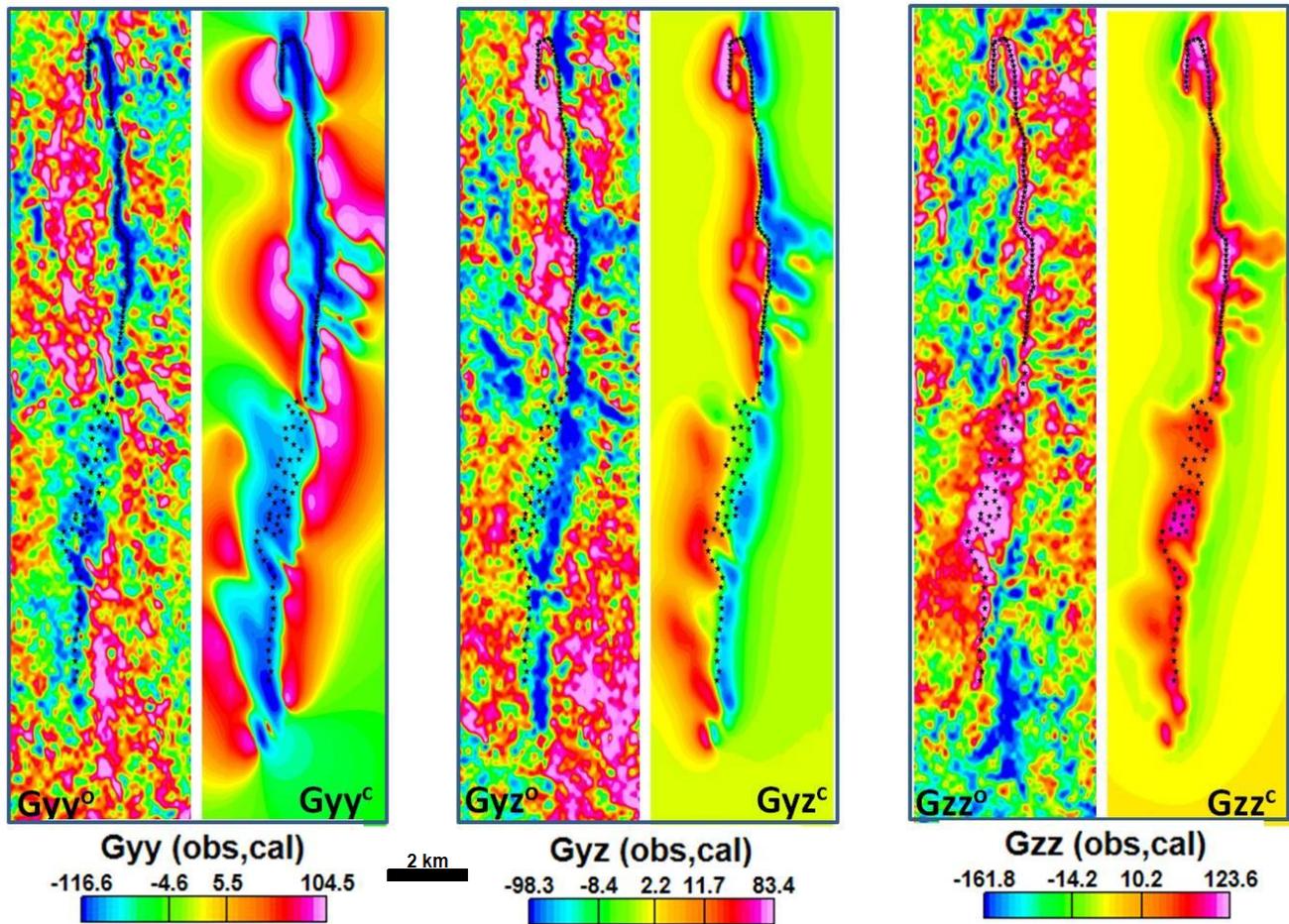


Fig. 2. Componentes observadas (Gyy^o , Gyz^o e Gzz^o) e calculadas (Gyy^c , Gyz^c e Gzz^c) do tensor gradiente gravimétrico Gyy , Gyz e Gzz deste trabalho; estas últimas componentes foram produzidas pelo corpo mineralizado estimado mostrado na Figura 3. As projeções horizontais das sementes estão indicadas pelos pontos pretos sobrepostos as componentes de aerogradiometria gravimétrica. As figuras foram rotacionadas ($\sim 32^\circ$) para facilitar a comparação visual.

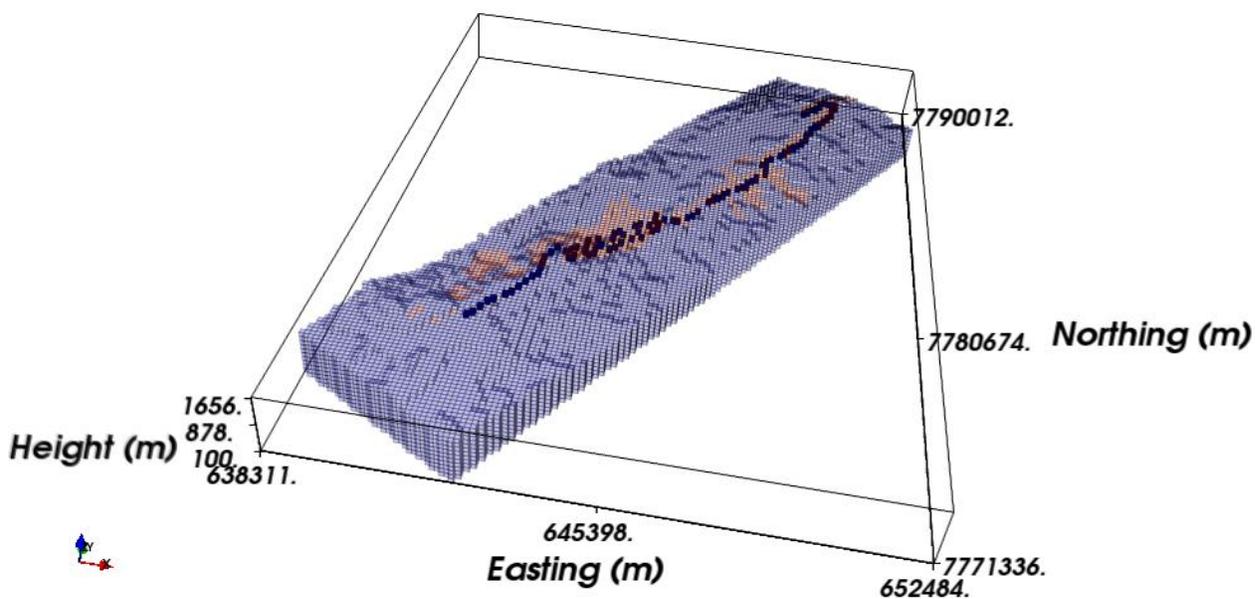


Fig. 3. Resultado da inversão usando o método de Uieda e Barbosa (2011) - A malha do modelo interpretativo e a topografia da região estão representadas em azul claro. As células em vermelho claro representam um contraste de densidade de 0.5 g.cm^{-3} e representam a estimativa do corpo de minério de ferro. As células em azul escuro são as sementes utilizadas na inversão.

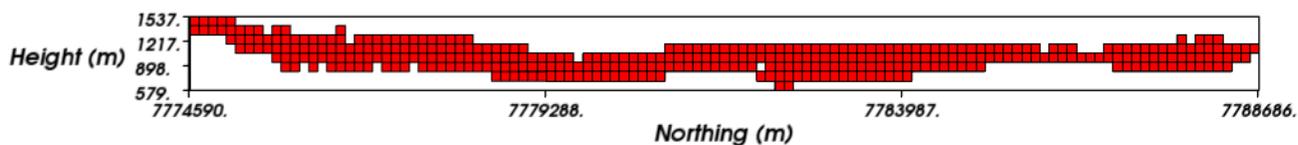


Fig. 4. Visão lateral (vista de leste) do resultado da inversão, apresentando somente os prismas com contraste de densidade positiva de 0.5 g.cm^{-3} .