

INVERSÃO DO VETOR DE MAGNETIZAÇÃO, COM E SEM O USO DE VÍNCULO GEOLÓGICO, NAS REGIÕES DE ARAXÁ E TAPIRA, MINAS GERAIS – BRASIL

Janaina Gattermann Pereira, Geosoft Latinoamérica; José Luis Ando, Geosoft Latinoamérica; Ray Diego Barbosa, Geosoft Latinoamérica; Telma Aisengart, Geosoft Latinoamérica; Mariana Pardal, Geosoft Latinoamérica; Monia Rech, Geosoft Latinoamérica.

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14th 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

Inversion of geophysical data has recently been incorporated into the suite of processes that are applied to geophysical data, due to the evolution of the hardware and cloud computing. Although the ambiguity of inversion applies to all geophysical data, each data type has its own challenges. For magnetic data, the biggest challenge is associated with remanence. The Magnetization Vector Inversion (MVI) solves this problem by inverting for the Magnetization Vector instead of regular susceptibility. To demonstrate this statement, we have inverted two very well-known anomalies in Minas Gerais, Brazil, the Araxá and the Tapira, which are Alkaline-Carbonatite Complexes. For the Araxá anomaly, both results matched the published information on size, depth and shape of the bodies. For Tapira, the susceptibility inversion was not able to recover the shape and depth of the body, while the MVI matched the published information. The MVI Tapira result were further refined with the introduction of a geological constraint, based on published information leading to a more focused final model as shown below.

Introdução

Os trabalhos de modelagem são um desafio em termos de confiabilidade. Isso se deve à grande variedade de resultados obtidos a partir dos dados geofísicos e à complexidade geológica das áreas investigadas. Tratando-se de dados magnéticos ainda há um desafio maior, que é a magnetização remanescente.

Do ponto de vista geológico, rochas intrusivas alcalinas possuem características físicas e mineralógicas relacionadas à sua composição e origem que as diferenciam do ambiente encaixante em termos de anomalias magnéticas, decorrentes de contrastes de susceptibilidade. Na região centro-oeste do Estado de Minas Gerais ocorrem dois complexos intrusivos alcalino-carbonatíticos (CAC): o CAC de Araxá, ao sul do município de Araxá, e o CAC de Tapira, localizado na cidade homônima (fig. 1). Uma vez que o sinal magnético observado nessas duas regiões está diretamente relacionado aos limites dos corpos intrusivos, a inversão geofísica, com o auxílio da modelagem geológica, pode

ser empregada para mapear tais corpos e elaborar um modelo a partir deste sinal.

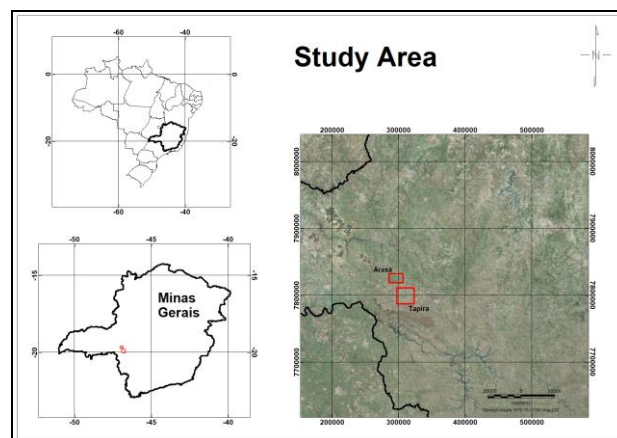


Fig. 1 – Localização da área de estudo e das duas áreas alvo selecionadas para inversão, Araxá e Tapira.

Contexto Geológico

Na Província do Alto Paranaíba ocorrem intrusões ultramáficas-carbonatíticas de dimensões relativamente grandes (até 65km²), compreendendo os complexos de Catalão I e II no sul de Goiás, e Serra Negra, Salitre I, II e III, Araxá e Tapira, no oeste de Minas Gerais.

Os Complexos Araxá e Tapira têm idades que remetem ao Cretáceo Superior e intrudem rochas metamórficas neoproterozóicas dos domínios da Faixa Brasília, as quais são tipicamente deformadas em estruturas dômicas (Brod et al, 2004). O intemperismo tropical predominante na região e os padrões de drenagem centrípeta desenvolvidos a partir de encaixantes mais resistentes resultaram no desenvolvimento de uma cobertura de solo muito espessa na maioria dos complexos, favorecendo a concentração econômica do fosfato e nióbio tradicionalmente explorados na região, além de concentrações de titânio e terras raras ainda não aproveitados comercialmente (Bezerra & Brod, 2013).

O CAC de Araxá está encaixado em quartzitos e xistos pré-existentes do Grupo Araxá e apresenta uma forma circular com cerca de 5Km de diâmetro (fig. 2A). Hospeda a maior reserva mundial de nióbio e é minerado para fosfato e nióbio (Biondi, 2003, CPRM, 2007 e Santo et al. 2002). Seu perfil de intemperismo pode atingir 250m de espessura.

O CAC de Tapira deformou xistos, filitos e metarenitos encaixantes do grupo Canastra e apresenta uma estrutura dômica quase elíptica com cerca de 5,2Km de diâmetro e área total de 35Km² (fig. 2B). Concentrações de titânio, fosfato, nióbio, terras raras e vermiculita estão associadas com o manto de intemperismo. O complexo é atualmente minerado para fosfato e titânio (ainda sem aproveitamento comercial) (Biondi, 2003, CPRM, 2007 e Santo *et al.* 2002).

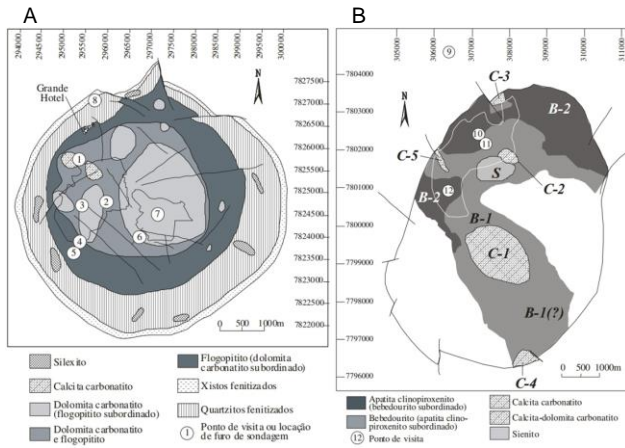


Fig. 2 – Geologia dos Complexos intrusivos alcalino-carbonatíticos de Araxá (A) e Tapira (B). (Brod *et al.*, 2004).

Metodologia

Este estudo utiliza dados aeromagnetométricos adquiridos pela CODEMIG em convênio com a CPRM. As linhas de voo têm direção N-S espaçadas de 0,4Km, linhas de controle E-W espaçadas de 8Km e altura média de voo de 100m acima do terreno (fig. 5).

O processo de inversão do vetor de magnetização (MVI – Magnetization Vector Inversion), aqui utilizado, considera que o sinal magnético anômalo observado na superfície está associado não somente a contrastes de susceptibilidade, mas também com a direção de magnetização do campo, o que permite verificar a presença de remanescência. Os modelos gerados foram ainda refinados usando a técnica de ponderação iterativa e para a área de Tapira foi criado um modelo geológico 3D utilizado como vínculo para uma nova inversão.

Teoria da Inversão

Em geral os problemas físicos são formulados para calcular a resposta a partir das propriedades físicas das rochas no interior da Terra. Este seria o problema direto (fig. 3). No caso do problema inverso nós calculamos os parâmetros físicos a partir dos dados observados.

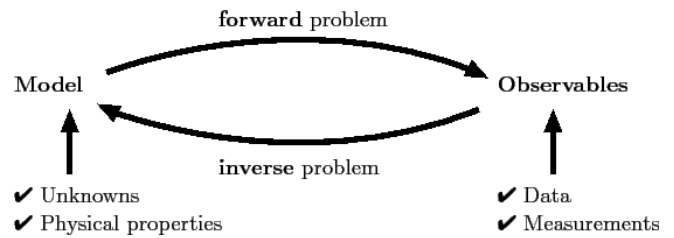


Fig. 3 – Problema Direto e Inverso

Inversão do Vetor de Magnetização (MVI)

Vamos assumir que as propriedades magnéticas da terra podem ser representadas pelo volume de magnetização, $M(r)$ (Telford *et al.* 1990). Não estamos definindo se a origem da magnetização da fonte é induzida, remanente, ou outra.

Da magnetoestática, o campo magnético B num ponto r_j resultante de um volume V contendo magnetização $M(r)$, é dado por:

$$B(r_j) = \nabla \int_V M(r) \cdot \nabla \frac{1}{|r - r_j|} dr^3 \tag{1}$$

Através dessa expressão podemos ver a contribuição natural da magnetização para a inversão.

Se o volume V consiste de um conjunto de N sub-volumes V_k cada um de magnetização constante m_k , então:

$$B_\beta(r_j) = \sum_{k,\alpha}^{N,3} m_{k,\alpha} \int_{V_k} \partial_\alpha \partial_\beta \frac{1}{|r - r_j|} dr^3 \tag{2}$$

Assim é definido o problema direto: dada uma série de fontes m_k ($k=1, \dots, N$) então B_j é o campo magnético anômalo previsto nos pontos, r_j ($j=1, \dots, M$). Note que a coordenada α é somada indicando que nós estamos livres para escolher a coordenada interna mais conveniente computacionalmente. Também sugere-se que uma coordenada invariante como a amplitude, $M(r) = |M(r)|$, será mais fortemente determinada a partir dos dados. Para simplificação, iremos apresentar a Eq.3 como:

$$B = Gm \tag{3}$$

O problema inverso do vetor de magnetização é definido resolvendo m dado B sujeito a uma condição de regularização apropriada (Zhdanov, 2002).

Princípio Físico do MVI

O material magnético em subsuperfície é afetado pelo campo Geomagnético da Terra e esta magnetização gera nos dipolos magnéticos uma alteração na forma como

são dispostos. Esses domínios magnéticos (ou dipolos magnéticos), na ausência do campo geomagnético, são orientados de forma randômica ou aleatória (fig. 4A).

Na presença do campo geomagnético estes domínios passam a ser orientados de maneira mais ordenada (fig. 4B). Os fatores que vão controlar essa ordem serão a indução, remanescência, anisotropia, desmagnetização e outras. A desconsideração desses parâmetros, principalmente para regiões de baixa latitude, pode gerar interpretações equivocadas (Aisengart, 2013).

Softwares convencionais comumente fazem a inversão de susceptibilidade, que considera que os domínios magnéticos irão se orientar paralelamente ao campo geomagnético, o que não ocorre sempre (fig. 4C).

Na técnica de Inversão do Vetor de Magnetização – **MVI**, além da magnetização induzida, o método leva em consideração a remanescência, a desmagnetização e a anisotropia dos materiais magnéticos para calcular a amplitude e direção dos domínios, dessa forma, gerando um modelo 3D muito mais real e próximo da realidade complexa das estruturas geológicas em subsuperfície.

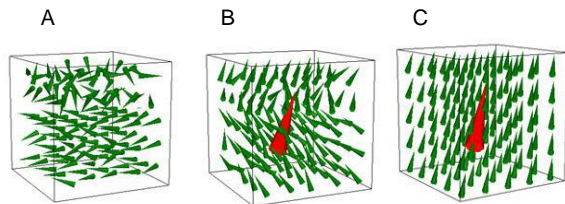


Fig. 4.- (A) Domínios magnéticos aleatoriamente ordenados na ausência do campo geomagnético da Terra. (B) Domínios magnéticos mais ordenados na presença do campo geomagnético da Terra (cone vermelho). (C) Domínios magnéticos totalmente alinhados na presença do campo geomagnético da Terra (cone vermelho).

Inversão Iterativa Ponderada (IRI)

A técnica IRI (Iterative Reweighting Inversion) utiliza um resultado de inversão inicial como entrada e é aplicado como um vínculo em uma nova inversão para obter um modelo mais refinado e focado (Fig. 7B e 8B) (Barbosa, R.D & Pereira, 2013). Esse processo de iteração pode ser repetido várias vezes até se obter um resultado final satisfatório.

Os modelos em subsuperfície obtidos com a inversão padrão não demonstram serem focados/refinados na ausência de vínculos. O VOXI foi desenvolvido para produzir modelos que somente tenham as estruturas absolutamente necessárias para reproduzir o dado de entrada. Esses modelos não são tão focados. Por isso o IRI dá ao usuário o poder de produzir um modelo muito mais real em termos de geologia e amplitude.

Modelagem Explícita Wireframing

A ferramenta Wireframing de Modelagem Explícita desenvolvida pela Geosoft permite ao usuário fazer interpretações em seções e em planos em 2D e a criação

de sólidos e superfícies em 3D a partir dessas interpretações.

Exemplos

As anomalias magnéticas de Araxá e Tapira podem ser visualizadas na Fig.5 e 6, nos mapas de campo magnético Anômalo e Sinal Analítico, respectivamente. Os modelos magnéticos 3D obtidos com a solução de inversão na nuvem da Geosoft VOXI Earth Modelling, utilizando principalmente a técnica de Inversão do Vetor de Magnetização – MVI, serão apresentados a seguir.

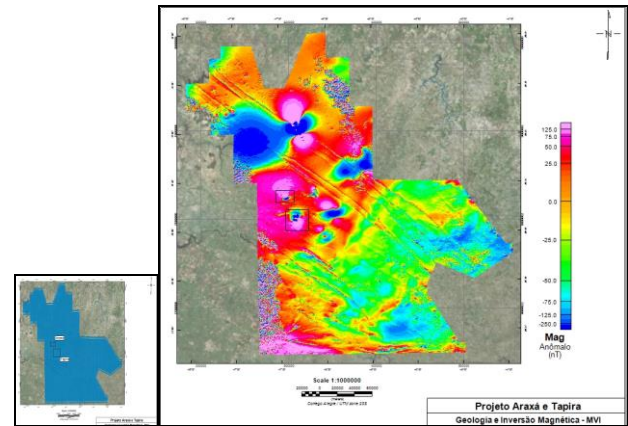
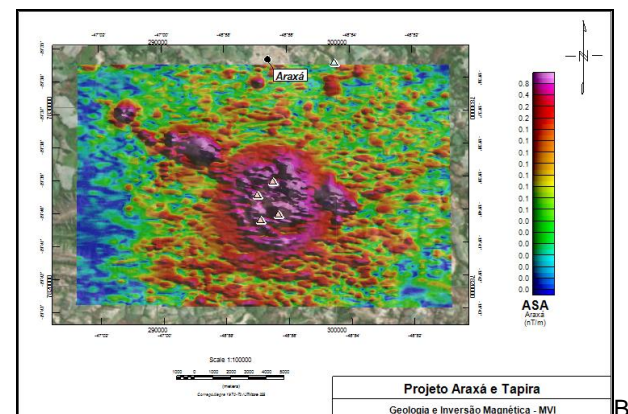


Fig. 5 – Área do levantamento Aeromagnetométrico (CPRM/CODEMIG, 2006): Linhas de voo à esquerda e mapa do Campo Magnético Anômalo com indicação das 2 áreas invertidas, Araxá e Tapira.

O dado utilizado como entrada para a inversão foi o Campo Magnético Anômalo (nivelado e corrigido) (fig 5). O primeiro resultado da inversão foi utilizado como entrada para a aplicação da técnica IRI (Iterative Reweighting Inversion) para obtenção de modelo mais refinado e focado. Para a área de Tapira foi criado ainda um modelo geológico 3D com a ferramenta Wireframing para ser utilizado como vínculo em uma nova inversão.



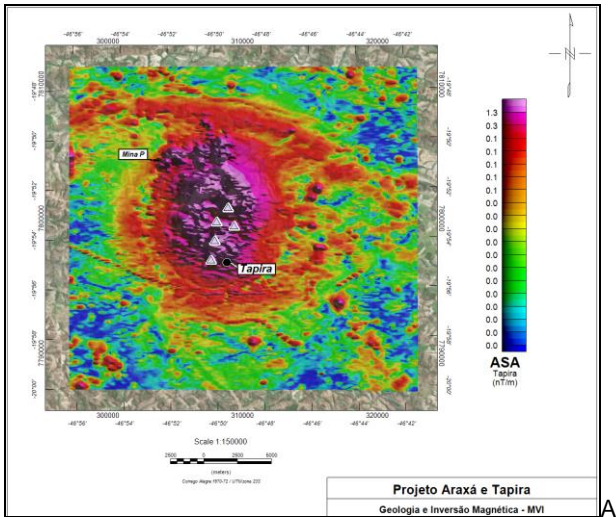


Fig. 6 – Mapa de Sinal Analítico das Anomalias de Araxá (A) e Tapira (B). Os símbolos no centro indicam as ocorrências minerais segundo CPRM, 2007.

Resultados

Os resultados das inversões das duas áreas geraram modelos 3D das anomalias magnéticas e mostraram a existência de remanescência em ambas, sendo a de Tapira de maior intensidade. Os resultados obtidos para a anomalia magnética de Araxá estão apresentados na Fig. 7. A anomalia de Araxá é um dipolo normal (Cordani & Shukowsky, 2009) e teve a sua feição circular muito bem delimitada tanto pela inversão de susceptibilidade convencional quanto pela inversão do vetor de magnetização. Essa semelhança entre os dois modelos e o modelo vetorial nos leva a inferir que essa área possui pouca remanescência.. O modelo final gerado para Araxá tem cerca de 6,5Km de diâmetro e alcançou uma profundidade de cerca de 3500m.

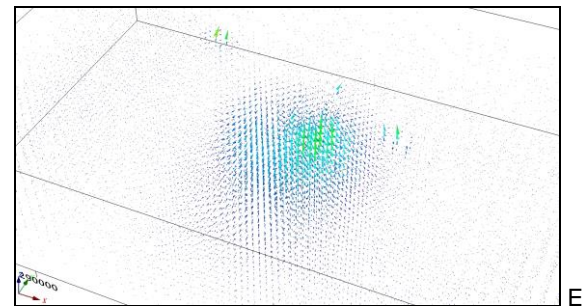
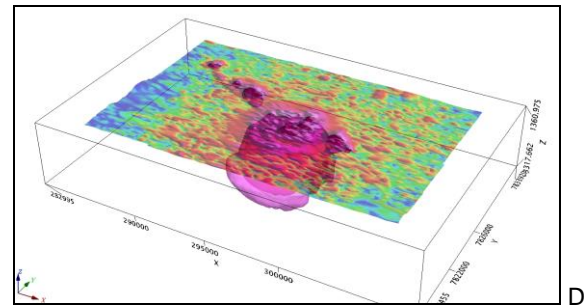
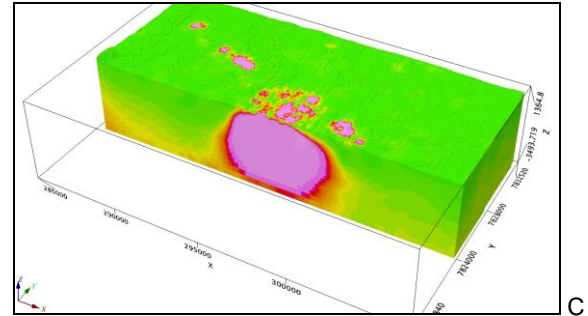
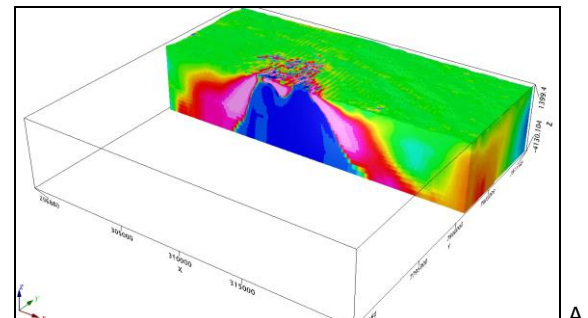
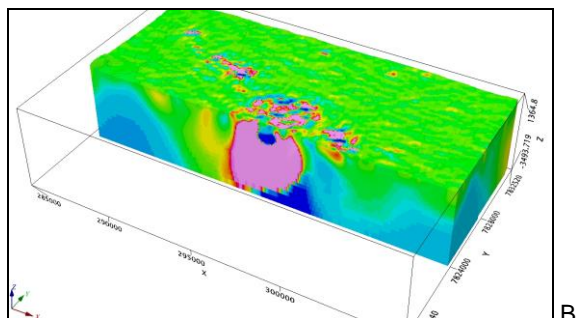
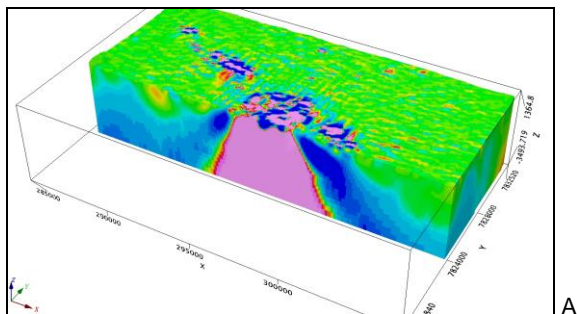


Fig. 7 – Resultados das inversões para a área de Araxá: (A) Inversão de Susceptibilidade Magnética, (B) IRI, (C) MVI, (D) Isosuperfície de 0.02SI do modelo MVI e (E) direção e intensidade dos Vetores de Magnetização.

Já a anomalia magnética de Tapira, cujos resultados estão na Fig. 8, é um dipolo invertido (Cordani & Shukowsky, 2009) e sua feição elíptica foi muito melhor marcada pela inversão do vetor de magnetização nos levando a crer que há forte remanescência (fig. 8E). Além disso, também foram delimitados dois corpos com remanescência de maior intensidade e direção de magnetização distinta da do corpo principal indicando duas intrusões posteriores.



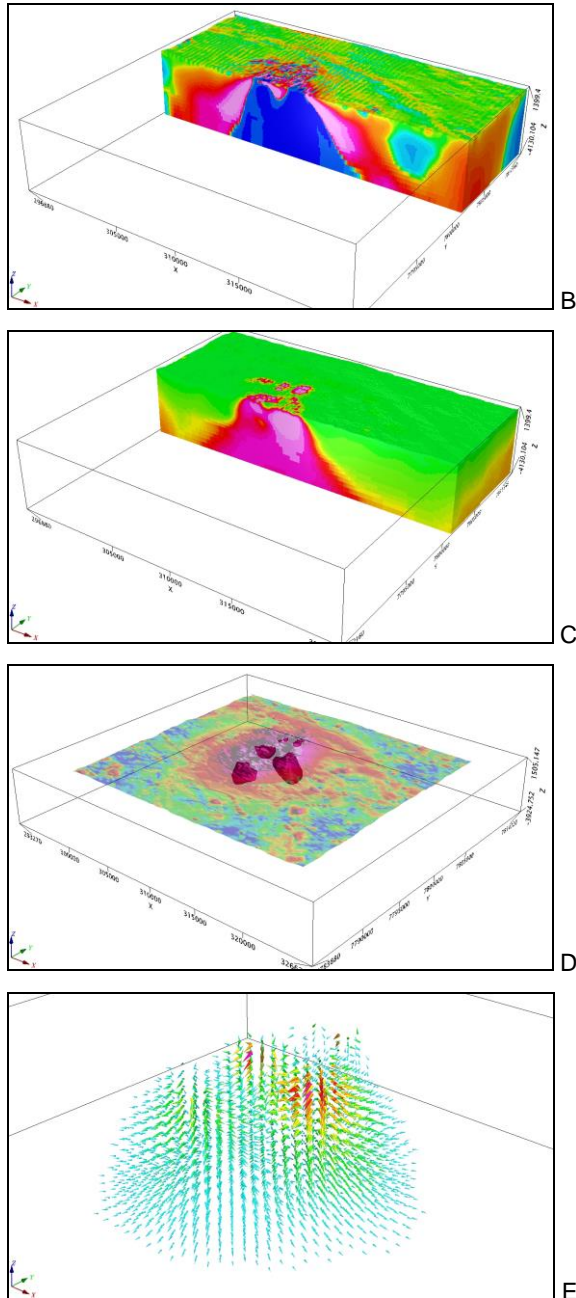


Fig. 8 – Resultados das inversões para a área de Tapira: (A) Inversão de Susceptibilidade Magnética, (B) IRI, (C) MVI, (D) Isuperfície de 0.02SI do modelo MVI e (E) direção e intensidade dos Vetores de Magnetização.

Nos resultados de Tapira é possível observar uma continuidade do corpo em profundidade. Para tentar recuperar esse dado em profundidade e obter um modelo ainda mais próximo da realidade foi criado um modelo geológico 3D. Esse modelo foi utilizado como vínculo para uma nova inversão (fig. 9). O modelo geológico foi construído com a ferramenta *Wireframing* da Geosoft através de interpretações feitas em planos extraídos do modelo MVI resultante tendo como base dados já publicados na bibliografia. O modelo resultante mais

refinado (fig. 10), apresenta uma melhor definição do complexo e suas intrusões, tem cerca de 8Km de diâmetro e alcançou uma profundidade de cerca de 10000m.

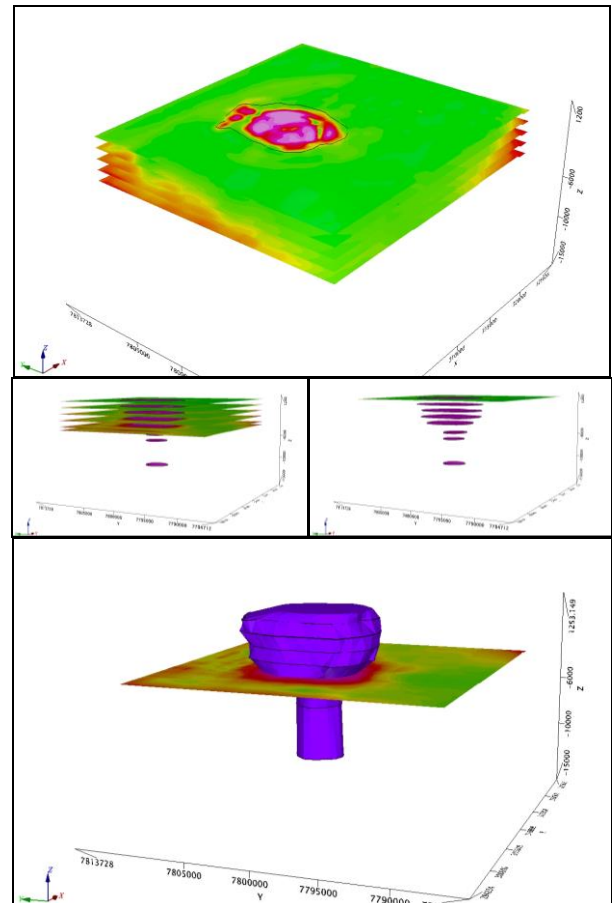


Fig. 9 – Construção do Modelo Geológico 3D para a área de Tapira através de interpretações em subníveis.

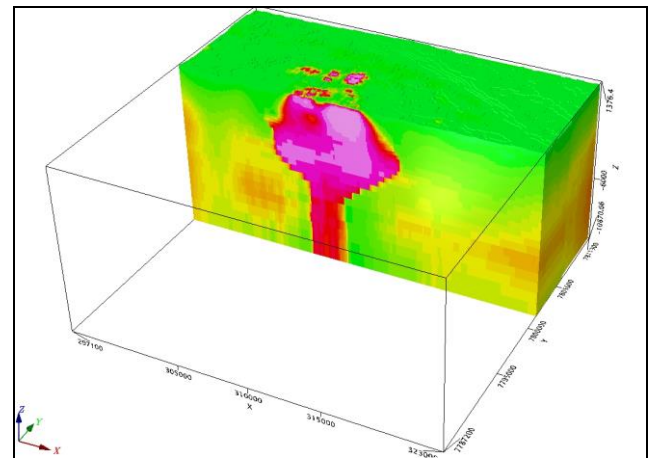


Fig. 10 – Resultado da Inversão do Vetor de Magnetização (MVI) para a área de Tapira onde o modelo geológico foi utilizado como vínculo.

Conclusões

Araxá:

- Dipolo normal.
- Feição circular muito bem delimitada tanto pela inversão de susceptibilidade como pelos vetores de magnetização.
- Modelo final com cerca de 6.5Km de diâmetro e profundidade de cerca de 3500m.
- Indica baixa presença de magnetização remanescente

Tapira:

- Dipolo invertido.
- Feição elíptica bem marcada apenas pelos vetores de magnetização.
- Modelo final com cerca de 8Km no eixo N-S e 5km E-W e profundidade de cerca de 4100m .
- Indica uma continuidade da intrusão em profundidade.
- Apresenta alta presença de magnetização remanescente
- Modelo final com Vínculo Geológico com maior definição do complexo e prováveis intrusões com cerca de 7Km no eixo N-S e 5km E-W e chegando a uma profundidade de 10000m.

A técnica da Inversão Iterativa Ponderada se mostrou muito eficiente para focar os resultados.

Inversão do Vetor de Magnetização é indicada para áreas com remanescência.

Inversão Geofísica e Modelagem Geológica são metodologias rápidas e eficientes tanto para estudos prévios como para estudos posteriores em áreas já trabalhadas e exploradas.

Agradecimentos

Agradecimentos à Geosoft Latinoamérica, pelos recursos cedidos, à Mariana Pardal, pela colaboração técnica, e às instituições GODEMIG e CPRM pela disponibilização pública de dados geocientíficos.

Referências

AISENGART, T. 3D Inversion of Magnetic Data at Low Magnetic Latitudes. Thirteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro. 2013.

BARBOSA, R.D & PEREIRA, J.G. Inversão 3D de dados Magnéticos na Região de Mara Rosa – Goiás, Brasil, utilizando Geosoft VOXI. Thirteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro. 2013.

BEZERRA, M. A. & BROD, J. A. Mineralogia da Apatita do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Tapira. In: 65ª Reunião Anual da SBPC, Recife/PE, 2013.

BIONDI, J.C. Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros. São Paulo, Oficina de Textos. 2003.
BROD J. A.; RIBEIRO C. C.; GASPAR J. C.; JUNQUEIRA-BROD T. C.; RIFFEL B. F.; SILVA J. F.; CHABAN N.; A. J. D. FERRARI. Excursão 1: Geologia e Mineralizações dos Complexos Alcalino- Carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba. In: Congresso brasileiro de geologia, 42, Araxá, 2004.

CORDANI, R. & SHUKOWSKY, W. Magnetização Remanescente: Um Parâmetro Crucial Para A Interpretação E Modelamento De Anomalias Magnéticas Em Território Brasileiro. Revista Brasileira de Geofísica, 27(4): 659-667. 2009.

CPRM/CODEMIG. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos, área7, Patos de Minas, Araxá, Divinópolis. [Belo Horizonte], CPRM/CODEMIG, 2006.

MAPA ESTADUAL DE MINAS GERAIS 1:1.000.000. RECORTE DA GEOLOGIA DO ESTADO GERADO A PARTIR DA UNIÃO DAS FOLHAS DO GIS - BRASIL. CPRM, 2007.

SANTOS, R.L.C.; SOBRAL, L.G.S.; ARAÚJO, R.V.V.; EQUIPE TÉCNICA FOSFERTIL/CMT. Produção de fosfato no Brasil: Complexo de mineração Tapira / Fosfertil. Contribuição técnica ao XIXENTMME-Recife, Pernambuco. 2002.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERRIFF, R.E.; KEYS, D.A. Applied Geophysics, Cambridge University Press. 1990.

ZDHANOV, M.S. Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems, Method in Geochemistry and Geophysics 36, Elsevier Science B.V., Amsterdam, The Netherlands. 2002.