

Anomalias magnéticas da Província Alcalina Rio Verde - Iporá, sudoeste de Goiás.

Alanna C. Dutra, IAG/USP, Brasil

Yára R. Marangoni, IAG/USP, Brasil

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th 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

The Rio Verde - Iporá Province is a suite of alkaline rocks predominantly mafic-ultramafic, in central Brazil. These alkaline complexes are characterized by a series of small bodies with strong aeromagnetic signal presenting themselves as almost circular anomalies. The aeromagnetic anomaly varies from +6000 to -3000 nT. The anomaly magnetic field was used in the 3D inversion to model the magnetic susceptibility distribution. The model has a maximum value for magnetic susceptibility 0.1 (SI) in prisms that reaches up to 10 km depth under the alkaline anomalies. The bodies resemble magmatic chambers emplaced in the upper crust in a NW-SE direction.

Introdução

O limites da Bacia do Paraná são delineados por atividade tectônica de arcos e lineamentos estruturais, paralelos ou transversais a suas bordas. Esta região apresenta um padrão estrutural caracterizado por deslocamentos de blocos e por falhamentos escalonados de diversas magnitudes, cujos principais traços de falhas e de fraturas alinham-se principalmente segundo NE-SW, secundariamente na direção NW-SE e, mais raramente, N-S. Estas orientações dominantes correlacionam-se fortemente com os regimes distensivos que propiciaram as ascensões dos basaltos toleíticos (Formação Serra Geral) e do magmatismo alcalino que caracterizam importantes eventos de magmatismo que ocorreram durante o Cretáceo Superior ao longo de sua margem norte.

Na borda norte da Bacia do Paraná encontra-se a província de rochas alcalinas Rio Verde – Iporá (fig. 1), caracterizada pela presença de intrusões com forte assinatura magnética. A anomalia magnética está relacionada às propriedades físicas da subsuperfície (susceptibilidade magnética) por uma relação linear. A partir de um conjunto de observações magnéticas produzidas por fontes arbitrárias tri-dimensionais é possível recuperar informações da distribuição do contraste de susceptibilidade magnética em subsuperfície por inversão ou modelamento direto.

A Província Rio Verde – Iporá inclui mais de 20 complexos alcalinos, vários diques e produtos vulcânicos locais que ocorrem ao longo de uma faixa orientada na direção NW-SE com cerca de 250 km de comprimento por 70 km largura que corresponde às falhas que têm servido como condutos para o magma alcalino.

As rochas alcalinas são as intrusivas (Morro do Engenho, Santa Fé, Montes Claros de Goiás, Arenópolis, Buriti, Córrego dos Bois e Morro do Macaco) e vulcânicas (Amarinópolis, Águas Emendadas e Santo Antônio da Barra) sugeridas por Junqueira-Brod et al.(2002).

Este estudo pretende indicar modelos para a estrutura desses corpos em profundidade e ajudar na compreensão de modelos tectônicos para o alojamento na crosta continental.

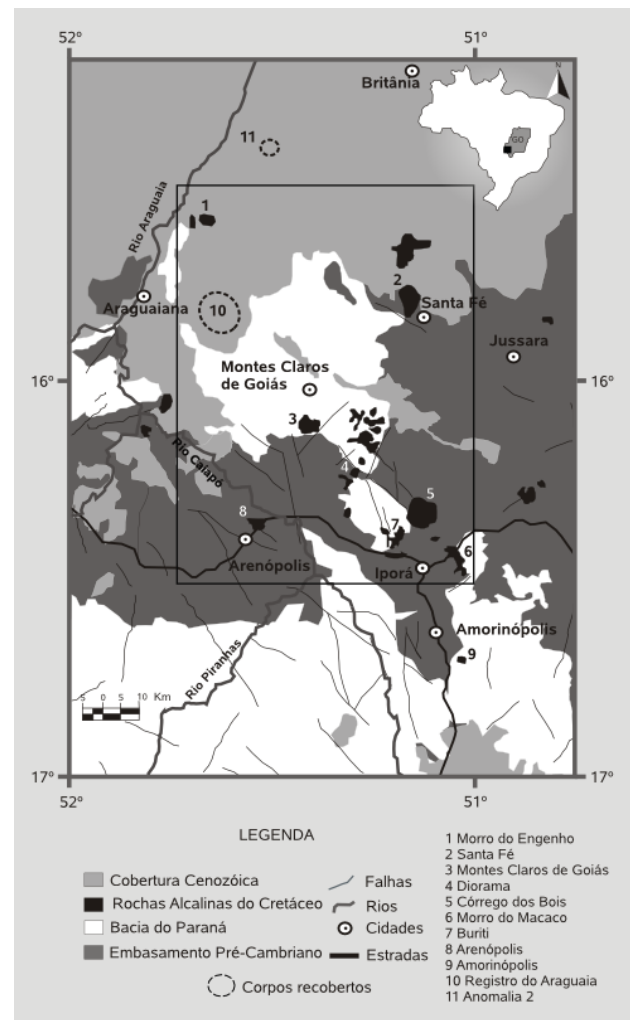


Figura 1: Mapa geológico da Província Alcalina Rio Verde – Iporá, modificado de Junqueira-Brod et al.(2002).

Dados Aeromagnéticos

Os dados aeromagnéticos relativos ao Projeto Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás fazem parte das informações geofísicas disponíveis na área de estudo. As anomalias ocorrem em todos os corpos alcalinos da parte norte da Província e em alguns da parte central (figura 2).

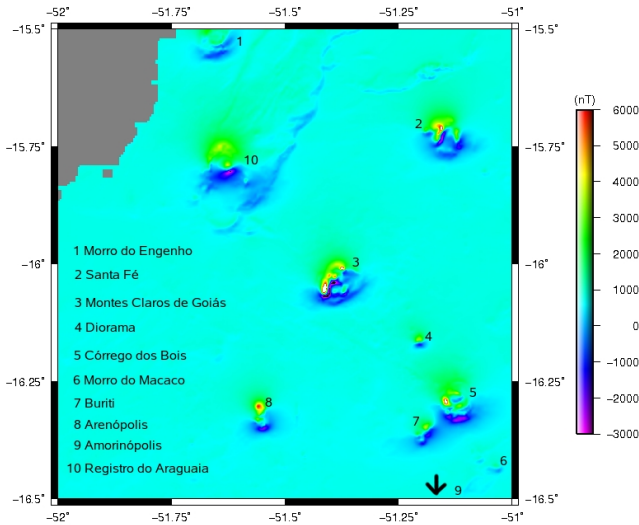


Figura 2: Mapa do anomalia magnética de campo total.

As informações aeromagnéticas da porção norte e central da província, parcialmente tratadas em Dutra e Marangoni (2009), foram trabalhadas novamente após a aquisição de dados de aerolevantamentos mais recentes e com melhor precisão. No Projeto Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás foram executados perfis na direção N-S com espaçamento 0,05 km. Ao longo dos perfis foram realizadas dez leituras do aeromagnetômetro por segundo (intervalo entre as medições consecutivas de 0,1 s), posicionados com sistema de navegação de observação de satélite GPS, de precisão melhor do que 10m. As linhas de controle foram na direção E-W com espaçamento de 5,0 km. A altura média do levantamento é de 100 m (Brasil, 2004). O processamento dos dados magnéticos adquiridos envolveu etapas como: remoção da variação diurna; correção do erro de paralaxe, que é gerado pela defasagem nos tempos de medição do magnetômetro e altímetros com sistema de posicionamento; nivelamento e micronivelamento do perfis e remoção do IGRF calculado na altitude média da região do levantamento (800 m), referidos ao ano de 2000 e atualizados para a data de 15/08/2004.

Inversão 3D dos Dados Magnéticos

Para o campo magnético anômalo $T(x_i, y_i, z_i)$ produzido pela distribuição de magnetização tem-se a seguinte equação:

$$T(x_i, y_i, z_i) = -\mu \nabla_0 \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \vec{J} \nabla \frac{1}{r} dx dy dz \quad (1)$$

onde $J = J_x, J_y, J_z$ representa o vetor magnetização, que pode variar com a direção; $\mu = 1$ em emu é a permeabilidade magnética no vácuo, $T(x_i, y_i, z_i)$ do j-ésimo prisma retangular com dimensões descritas $x_1' \leq x' \leq x_2', y_1' \leq y' \leq y_2'$ e $z_1' \leq z' \leq z_2'$, usando coordenadas cartesianas como mostra a figura 3.

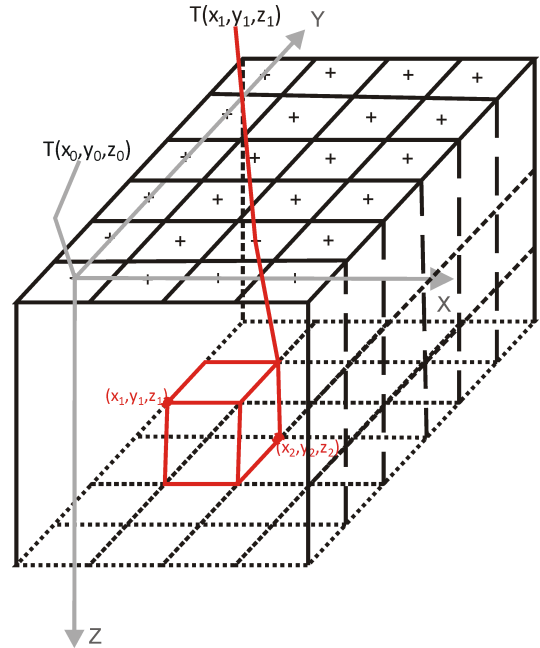


Figura 3: Discretização da subsuperfície com prismas. Estações magnéticas $T(x_0, y_0, z_0)$ estão localizadas ao centro da face superior do prisma no topo da camada.

Na inversão a fonte mais o substrato é discretizado em M células, sendo que em cada célula a susceptibilidade magnética é constante. As observações $T(x_i, y_i, z_i)$ são aproximadas por um funcional contínuo (as integrais da equação 1) expressando a relação entre a propriedade física e as observações magnéticas correspondentes. Alguns métodos utilizam a formulação linear como formulação do problema inverso representando o substrato por uma malha homogênea, de posição e tamanho conhecidos, mas com contraste da propriedade física desconhecido.

Os modelos interpretativos consistem de um grid de prismas 3D justapostos com susceptibilidade magnética constante a ser determinada. A distribuição de magnetização nestes blocos delinea a fonte magnética na região gerando a anomalia de campo total observada, representada pela relação 1.

Li e Oldenburg (1996) desenvolveram uma técnica de inversão 3D (programa MAG3D, 2002) para determinar a distribuição da susceptibilidade magnética. O algoritmo assume que a região da fonte está representada por um conjunto de células retangulares em uma malha ortogonal 3D com susceptibilidade magnética (κ) constante em cada célula.

Para inversão magnética é importante a definição do 'modelo'. Em geral, prefere-se que o modelo seja diretamente proporcional à anomalia do campo e que varie em uma escala linear.

A função objeto do modelo usada no algoritmo MAG3D (2002) tem a forma:

$$\begin{aligned} \phi_m(\vec{k}, \vec{k}_0) = & \alpha_s \int_V W_s w(z) [\vec{k} - \vec{k}_0]^2 dV + \\ & \alpha_x \int_V W_x \left(\frac{\partial w(z) [\vec{k} - \vec{k}_0]}{\partial x} \right)^2 dV + \\ & \alpha_y \int_V W_y \left(\frac{\partial w(z) [\vec{k} - \vec{k}_0]}{\partial y} \right)^2 dV + \\ & \alpha_z \int_V W_z \left(\frac{\partial w(z) [\vec{k} - \vec{k}_0]}{\partial z} \right)^2 dV \quad (2) \end{aligned}$$

Na função objeto do modelo w_s , w_x , w_y e w_z são funções peso espacialmente dependentes e α_s , α_x , α_y e α_z são coeficientes que afetam a importância relativa dos diferentes componentes na função objeto. Aqui $w(z)$ é a função peso da profundidade. É conveniente escrever a equação 2 como $\phi_m(p) = \phi_{ms} + \phi_{mv}$ onde ϕ_{ms} refere-se ao primeiro termo na equação 2 e ϕ_{mv} coletivamente aos três termos restantes que envolvem a variação do modelo em três direções espaciais. O modelo de referência pode ser incluído em ϕ_{ms} e se necessário, remover algum outro termo restante.

$$\phi_m = \|W_m(\vec{k} - \vec{k}_0)\|^2 \quad (3)$$

Li e Oldenburg (1996) usaram uma função peso, $w(z) = (z - z_0)^{-\beta/2}$, aplicada dentro de ϕ_{ms} , e opcionalmente em ϕ_{mv} , onde β é geralmente igual a 3 e z_0 depende do comprimento da célula da discretização do modelo e da altitude da observação dos dados.

Definido o modelo inicial, o programa busca uma solução que minimize ϕ_m e explique os dados dentro de uma precisão experimental (δ). Isto é obtido pela minimização de $\phi = \phi_d + \lambda \phi_m$ (equação 4), onde ϕ é a função objeto global e λ é o multiplicador de Lagrange. Os passos para discretização do modelo estão descritos em Li e Oldenburg (1996).

$$\phi = \|W_d(d^{obs} - d^{calc})\|^2 + \lambda \|W_m(\vec{k} - \vec{k}_0)\|^2 \quad (4)$$

Inversão: Melhorando a estimativa inicial.

Uma das etapas anteriores a inversão propriamente dita, é a estimativa de um modelo inicial que incorpore toda informação geológica que deve ser traduzida matematicamente. O mapa da figura 4 mostra a amplitude do sinal analítico (ASA) e o mapa da figura 5 mostra a derivada vertical da anomalia magnética de campo total. A aplicação destas técnicas delineou cada intrusão alcalina. As figuras 4 e 5 mostram sinais aproximadamente circulares correlacionados com as anomalias magnéticas informadas na legenda figura 4.

A figura 4 mostra a anomalia Bouguer residual que apresenta formas aproximadamente circulares e sobrepõe-se ao mapa da amplitude do sinal analítico. Assumimos que cada anomalia é produzida por um corpo isolado, como um cilindro vertical. A anomalia de Registro do Araguaia não aflora, a profundidade do seu topo e diâmetro, estimados em Dutra e Marangoni (2008), foram de 2 km e 10 km para topo e diâmetro.

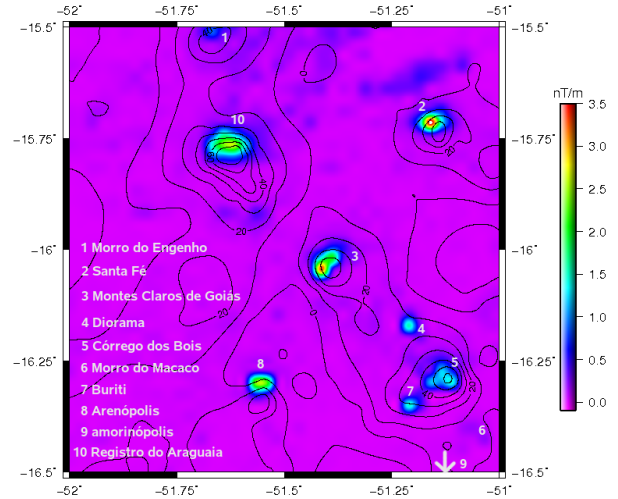


Figura 4: Mapa de amplitude do sinal analítico da anomalia magnética de campo total em cores e anomalia Bouguer residual, linhas de contorno preta (mGals).

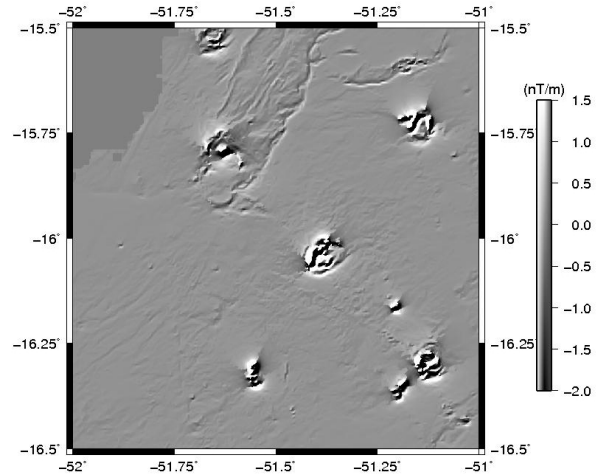


Figura 5: Mapa da derivada vertical da anomalia magnética de campo total.

Para algumas formas geométricas a ASA é aproximadamente independente da direção de magnetização e da direção do campo da Terra. Os picos da função do sinal analítico ocorrem diretamente sobre toda extensão dos corpos. O mapa de amplitude do sinal analítico e derivada vertical fornecem indicações da geometria das fontes magnéticas, sendo possível inferir o tamanho dos corpos. Como as fontes dos picos são contatos magnéticos verticais, a largura da anomalia é proporcional a sua profundidade.

Na definição do modelo inicial é importante a determinação da direção da magnetização total dos corpos. Nós trabalhamos com a soma vetorial da magnetização remanescente e induzida, com o uso de informações paleomagnéticas (paleolatitudes da região no Cretáceo) para obter a inclinação da magnetização remanescente (I_R). A direção da magnetização total ($I = 40^\circ$ e $D = -13^\circ$) foi a soma vetorial das duas componentes:

magnetização induzida ($I=-9,5^\circ$ e $D=-13^\circ$) e magnetização remanescente ($I_R=-43^\circ \pm 5^\circ$ e $D_R=-13^\circ$) (Marangoni e Dutra, 2007).

Para os valores iniciais de susceptibilidade magnética (κ) do modelo, usaram-se as medidas de laboratório em amostras de afloramentos das rochas alcalinas região de estudo com κ variando de 0,01 a 0,1 (SI).

Resultados da Inversão

A região de interesse foi discretizada em um conjunto de células retangulares, 2×2 km, e cada uma com susceptibilidade magnética constante. O modelo inicial são cilindros nas posições dos corpos delineados nas figuras 4 e 5, variando de 0 a 12 km de profundidade.

O modelo obtido para a distribuição de susceptibilidade magnética é mostrado na figura 6, com limites de

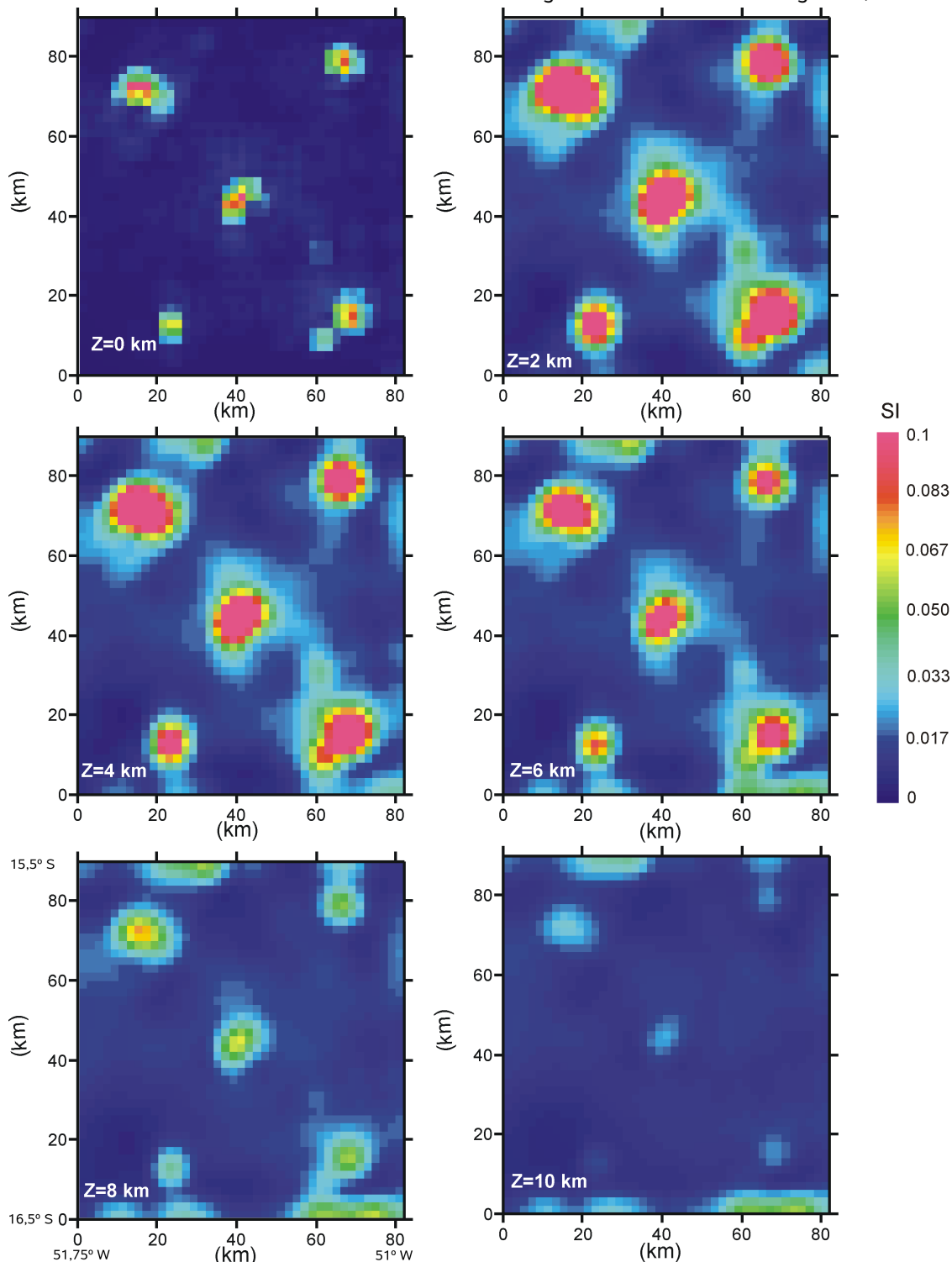


Figura 6: Resultados da distribuição de susceptibilidade magnética da inversão das anomalias magnéticas mostradas na figura 2, seções cortadas em profundidade.

susceptibilidade impostos em cada prisma de $\kappa_{min} = 0,0$ (SI) e $\kappa_{max} = 0,1$ (SI). A aplicação desta técnica de inversão aos dados magnéticos resultou em distribuição de susceptibilidade magnética ocupando mais células nas direções x e y que o modelo de referência utilizado. A profundidade ficou em torno de 10 km para a maioria dos corpos da província.

A distribuição (fig. 6) mostrou um formato mais esférico que cilíndrico para os modelos obtidos, com corpos isolados na subsuperfície. A partir deste modelo foi calculado o campo magnético por modelamento direto e comparado com o valor verdadeiro na figura 7.

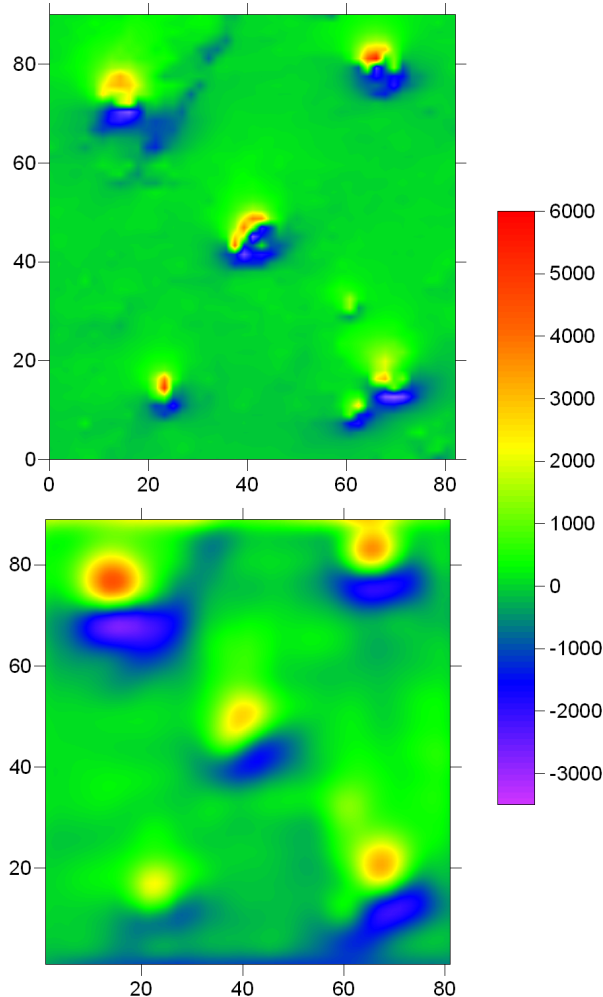


Figura 7: (a) Anomalia magnética de campo total verdadeira para região da Província Ígnea Rio Verde – Iporá comparada com (b) anomalia magnética calculada a partir da distribuição de susceptibilidade magnética obtida com a inversão.

O modelo produz um resultado para a anomalia magnética que se ajusta aos dados em valor de amplitude, mas com distribuição do modelo mais suave, como se observa na figura 7(b). Essa suavização é resultado da limitação do número de células que o programa comporta. O enfoque neste trabalho é entender a colocação dos corpos dentro da crosta, o que nos levou a usar um tamanho maior de cada célula para inverter a área inteira. Para o estudo individual de cada anomalia a área será subdividida.

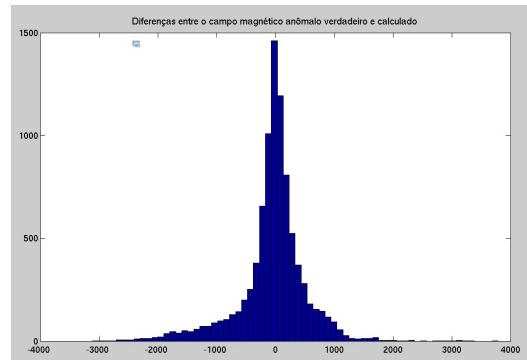


Figura 8: Histograma das diferenças do campo magnético anômalo verdadeiro e calculado, modelo para os corpos de Rio Verde – Iporá.

O histograma das diferenças entre o campo magnético anômalo e o calculado (fig. 8) mostra que os valores com maiores frequências (> 300) estão entre +ou- 400 nT e representam até 10 % do máximo ou mínimo do campo magnético anômalo verdadeiro. Os resultados representam a contribuição do campo magnético produzido pela magnetização remanescente mais magnetização induzida.

Conclusões

Nossas interpretações de dados aeromagnéticos combinados com informações da geologia permitiu o conhecimento da estrutura de corpos alcalinos no norte da Bacia do Paraná, dentro da Província ígnea Rio Verde- Iporá. As interpretações de mapas de amplitude do sinal analítico e derivada vertical nos forneceram indicações da geometria das fontes magnéticas e os contatos dos corpos ficaram localizados nas bordas da anomalia. Resultados da inversão magnética (figura 6) indicam que os corpos podem atingir uma profundidade que chega até 10 km.

O contraste de susceptibilidade magnética estimada sugere que os corpos são compactos com uma distribuição mais esférica. Os corpos aparecem separados e com tendência na direção NW-SE. Os resultados podem ser interpretados como corpos alojados dentro da crosta superior com uma forma preferencialmente esférica. Possivelmente esses corpos foram emplacados em um zona de fratura usando uma região de fraqueza para atingir níveis superiores da crosta e câmaras magmáticas foram formadas ali, penetrando as fendas e podendo fluir através das rochas.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelos processos nº 2006/00201-2 e n. 2007/53179-7.

Referências

- Brasil**, 2004, Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás, 1ª etapa.
- Dutra, A.C., e Marangoni, Y.R.**, 2008, Aeromagnetic data of Registro Araguaia, South-West Goiás, Anais do 44º Congresso Brasileiro de Geologia.

Dutra, A.C., e Marangoni, Y.R., 2009, Gravity and Magnetic 3-D Inversion of Morro do Engenho Complex, Central Brazil, Journal of South America Earth Science, in press, [doi:10.1016/j.jsames.2009.02.006](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.02.006).

Junqueira-Brod, T.C., Riog, H.L., Gaspar, J.C., Brod, J.A., Meneses, P.R., 2002. A província alcalina de Goiás e a extensão de seu vulcanismo kamafugítico. Revista Brasileira de Geociências 32 (4), 559-566.

Li, Y., Oldenburg, D.W., 1996, 3D inversion of magnetic data, Geophysics, 61, 394-408.

MAG3D, 2002, A program library for forward modelling and inversion of magnetic data over 3D structures, version 3.1, Department of Earth and Ocean Sciences, University British Columbia, Vancouver.

Marangoni, Y.R., e Dutra, A.C., 2007, Gravity and magnetic 3-D inversion of Morro do Engenho Alkaline intrusion, EOS Transactions AGU, Suppl., 88, GP31A-02.