

# Modelamento do sinal gravimétrico e aeromagnético das Alcalinas de Morro do Engenho, sudoeste de Goiás.

Alanna C. Dutra, Yára R. Marangoni, IAG-USP

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility 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.

## Resumo

A Província Alcalina Rio Verde – Iporá, na borda norte da Bacia do Paraná é caracterizada pela presença de intrusões alcalinas com forte assinatura aeromagnética e gravimétrica, apresentando-se como anomalias quase circulares. O Complexo Morro do Engenho (ME) está ao norte da província e constitui uma intrusão circular zonada de cerca de 5 km de diâmetro em superfície. As anomalias gravimétricas variam de +15 a +30 mGal com relação ao campo gravimétrico regional, enquanto que as anomalias aeromagnéticas são da ordem de  $\pm 3000$ nT. O modelamento usando a técnica de inversão indica espessura variando de 10 a 12 km, com circunferência média em torno de 10 km. No modelamento conjunto 2,5D, o sinal aeromagnético parece ser gerado por um corpo de geometria cilíndrica vertical. Este corpo geométrico apresenta-se homogêneo e com profundidade compatível com os modelos gravimétricos.

## Introdução

A província Rio Verde Iporá, situada ao longo da margem norte da Bacia do Paraná, foi afetada por importantes eventos de magmatismo alcalino durante o Cretáceo Superior. Esta margem está caracterizada pela presença de intrusões alcalinas de tamanho e composição variada, cilíndricas, como bem exemplificam as ocorrências no extremo noroeste da província, próximo a Araguaina, onde aflora o Complexo Morro do Engenho (ME). O Complexo alcalino de Morro do Engenho constitui uma intrusão circular zonada de cerca de 5 km de diâmetro, composta por núcleo de dunito circundado por peridotito e piroxenito que gradam para gabro alcalino e nefelina sienito (Radaelli, 2000).

A Província Alcalina de Goiás é constituída por dunitos e piroxenitos alcalinos serpentinizados, aflorando esparsamente por toda a região. Segundo Radaelli (2000) os depósitos de níquel laterítico na região estão relacionados exclusivamente ao processo de enriquecimento supergênico em terrenos derivados de ultrabásicas alcalinas. Tais depósitos silicatados são constituídos, sobretudo por garnierita, concentrados principalmente em nível próximo ao serpentinito em suas fraturas.

As informações geofísicas disponíveis na área do complexo compõem-se de estações gravimétricas

espaçadas cerca de 5 km e dos dados aeromagnéticos do projeto Iporá, de 1972 e 1973 (Brasil, 1974).

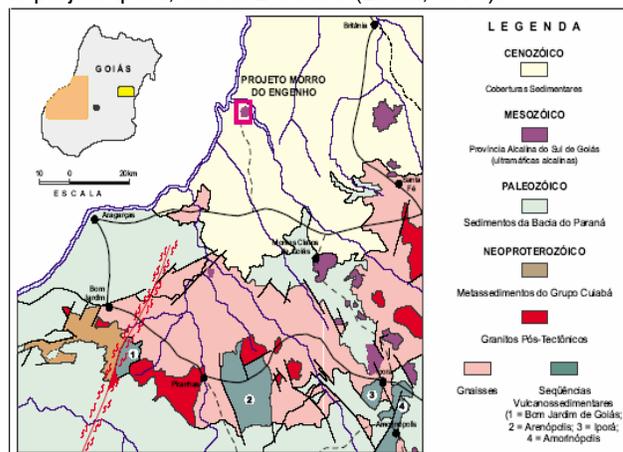


Figura 1. Esboço Geológico Regional (Radaelli, 2000).

O intemperismo das rochas máficas/ultramáficas e a presença de coberturas aluviais prejudicam o mapeamento geológico da superfície e pouco se conhece do comportamento do Complexo em subsuperfície. Por tratar-se de um corpo com níveis mineralizados em superfície que podem prolongar-se até profundidades maiores, é importante obter estimativas sobre largura e profundidade a que esse complexo pode alcançar. Neste estudo, dados gravimétricos e aeromagnéticos são analisados visando obter informações sobre a extensão do Complexo em subsuperfície. Para isso, dois métodos interativos de modelagem de corpos por processo de inversão e modelamento direto conjunto 2,5D foram empregados em uma área selecionada, onde ocorrem alguns dos mais importantes depósitos de níquel conhecidos no Complexo.

## Materiais e Métodos

### (a) Dados gravimétricos

Os dados gravimétricos foram obtidos em várias campanhas, a área de interesse já possuía dados medidos anteriores a 1990, obtidos com levantamento altimétrico por barometria e posicionamento geográfico por cartas topográficas. Em maio de 2004 foi realizado um novo levantamento com posicionamentos geográfico e altimétrico feito com um GPS de dupla frequência. Além de incorporar novos dados com melhor distribuição espacial, foi realizada coleta de material para determinar as propriedades físicas: densidade, susceptibilidade e magnetização remanescente.

Com os dados disponíveis foram elaborados mapas gravimétricos através do método de krigagem. Os perfis gravimétricos foram retirados usando os dados

interpolados a partir do mapa de anomalia Bouguer residual.

Para modelamento inverso o programa utilizado foi Multi (Silva et al., 2001) que usa vínculos de desigualdade, proximidade absoluta, compacidade e mínimo momento de inércia.

O vínculo de desigualdade consiste em estabelecer limites inferiores e superiores das estimativas do contraste de densidade. O contraste de proximidade absoluta impõe que os valores das estimativas do contraste de densidade estejam o mais próximo possível dos valores conhecidos. O vínculo de compacidade é usado para certificar que fonte não tenha nenhum buraco em seu interior (Silva et al., 2001). O mínimo momento de inércia garante que a maior parte da massa esteja concentrada ao redor de elementos geométricos que ajudam a delimitar o corpo. No caso atual, o elemento geométrico escolhido foi um ponto localizado na região de afloramento do corpo.

O algoritmo empregado usa valores iniciais para cada parâmetro do corpo a ser modelado, os quais podem ser modificados pelo analista, de modo a incorporar dados reais. Esses dados são manipulados interativamente na busca de um “melhor ajuste”, de modo que os parâmetros ajustados caiam dentro de limites de tolerância especificados pelo usuário. A qualidade do ajuste é medida pela relação da soma ponderada dos desvios quadráticos entre valores observados e calculados. Tomando-se como base a geologia da área de estudo, selecionou-se o modelo de cilindro espesso e finito como o mais apropriado para representar o Complexo.

### (b) Dados Aeromagnéticos

Os dados do levantamento aeromagnético são de 1972 e 1973 e encontram-se na forma de mapas de campo total na escala 1:50.000 (Brasil, 1974). A partir desses dados removeu-se o *IGRF – International Geomagnetic Reference Field* para o ano de 1973 (Marangoni et al, 2004). Os mapas aeromagnéticos foram elaborados na forma digital usando o programa Oásis Montaj 5.1 – Geosoft, através do método de curvatura mínima, com espaçamento de 1 km. Um mapa residual pode ser gerado para que as anomalias positivas e negativas fossem ressaltadas.

A partir dos mapas de contorno das anomalias magnéticas foram escolhidos perfis que cortassem as anomalias mais significativas de ME para o modelamento direto em conjunto com os dados gravimétricos utilizando informações geológicas e geométricas.

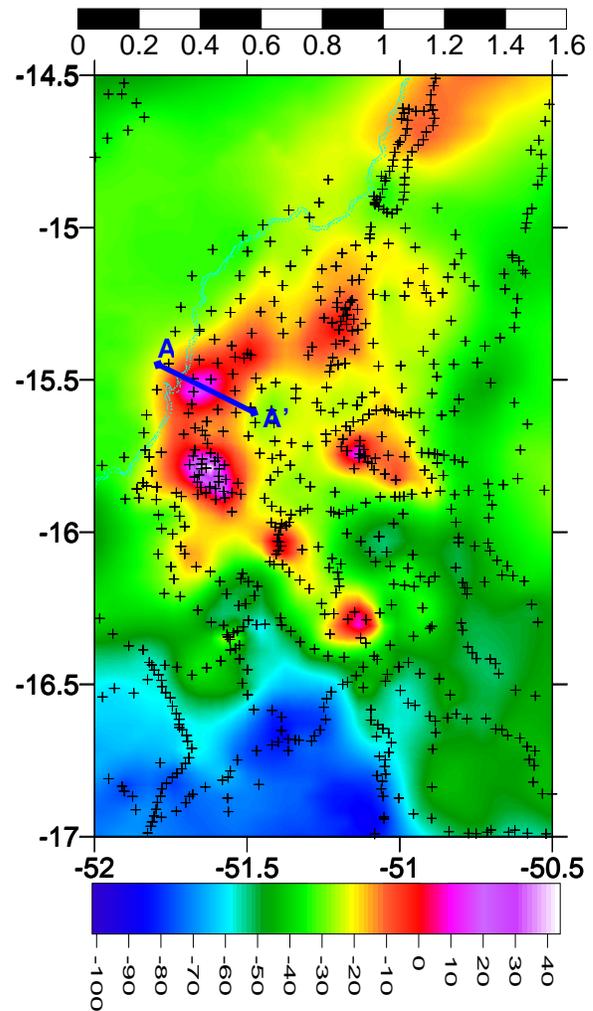
## Resultados

### (a) Inversão dos dados gravimétricos

No mapa de anomalia Bouguer da Província Rio Verde – Iporá da figura 2 encontra-se a localização dos dados .

As anomalias gravimétricas Bouguer variam de +15 a +45 mGal com relação ao campo gravimétrico regional,

apresentando-se como anomalias quase circulares (Marangoni et al., 2004).



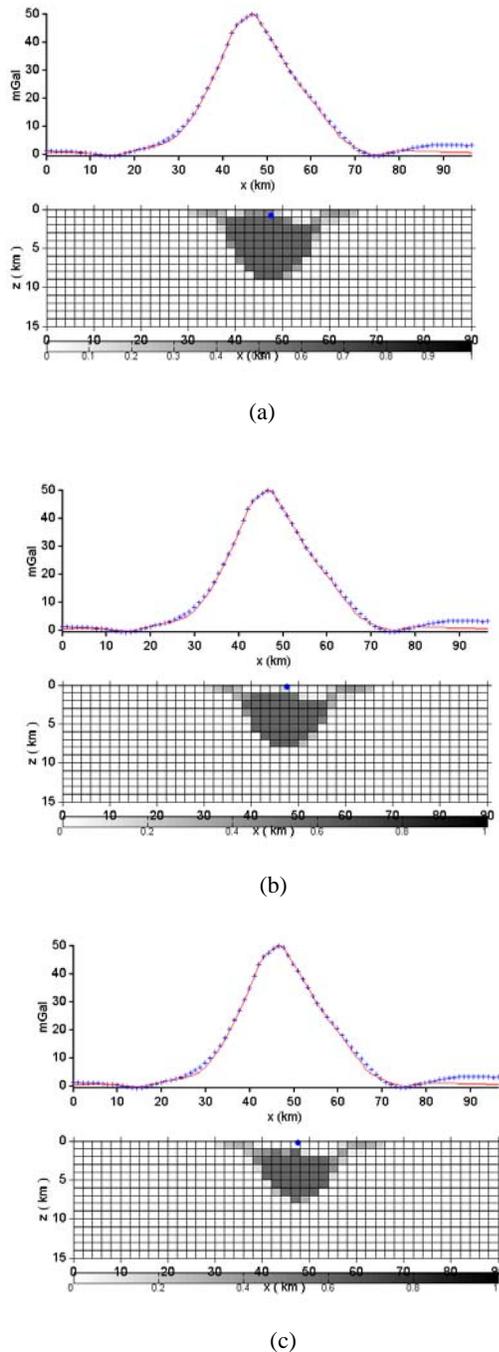
**Figura 2.** Mapa de Anomalia Bouguer, com as estações gravimétricas e o rio Araguaia em azul, e o perfil AA' retirado para inversão dos dados gravimétricos.

No modelamento inverso o programa utilizado foi Multi (Silva et al., 2001). O algoritmo empregado usa uma nova aproximação para interpretar anomalias gravimétricas 2D produzidas através de fontes múltiplas e complexas.

O modelo de interpretação assume um grid de prismas justapostos 2D, cujas densidades são os parâmetros a serem determinados. É especificado dentro do programa o contraste de densidade limite, com os elementos geométricos que definem cada vínculo da fonte. O método calcula o contraste de densidade, então a distribuição ajusta a observação dentro dos erros experimentais e representa as fontes compactas mais próximas aos elementos geométricos especificados. Pode-se aceitar, ou modificar os vínculos das fontes mudando a posição dos elementos geométricos iniciais e reinicia a inversão (Silva et al., 2001).

As inversões realizadas ajustaram melhor os dados para valores baixos de contrastes de densidade entre 0,2 e

0,25 g/cm<sup>3</sup>, que pode ser justificado pelos tipos litológicos encontrados na região.



**Figura 3.** Inversão com vínculo de compacidade e informação geológica do corpo. Limites em cada prisma:  $\Delta\rho_{min} = 0,0 \text{ g/cm}^3$  (a)  $\Delta\rho_{Max} = 0,2 \text{ g/cm}^3$  (b)  $\Delta\rho_{Max} = 0,25 \text{ g/cm}^3$  (c)  $\Delta\rho_{Max} = 0,3 \text{ g/cm}^3$ .

A maioria das fácies estudadas por Danni (1994), na região de Iporá, possui minerais de alteração, tais como:

serpentina, magnetita, iddingsita, natrolita, analcita, calcedônia e calcita.

Os minerais que comumente predominam como resultado deste processo de transformação metamórfica das rochas ultramáficas são as serpentinas, de onde vem a denominação de serpentinização para tal processo (Strieder, 1992). No processo de serpentinização há a possibilidade de se preservar texturas pseudomórficas onde há modificação de volume e fraturamentos impondo um maior espaço aos corpos ultramáficos. Essa modificação de volume provoca, conseqüentemente, variação no contraste de densidade entre o corpo ultramáfico e a rocha encaixante. Isso justifica o baixo contraste de densidade encontrado na inversão dos dados gravimétricos, havendo aumento do volume nas transformações e diminuição no valor de densidade do corpo. Segundo Telford et al. (1976), o valor de densidade da rocha metamórfica serpentinizada varia de 2,4 – 3,1 g/cm<sup>3</sup> com valor médio de 2,74 g/cm<sup>3</sup>.

Alguns resultados significantes da inversão dos dados de ME encontram-se na figura 3. Nesta inversão foi usada a informação a priori do ponto onde o corpo aflora. Os limites são os mesmos para cada prisma. A técnica de modelagem empregada permitiu o cálculo de parâmetros tais como largura e profundidade dos corpos de geometria simples. Os resultados da modelagem inversa indicaram corpos gravimétricos com larguras de 10 a 12 km, e espessuras entre 6 e 8 km.

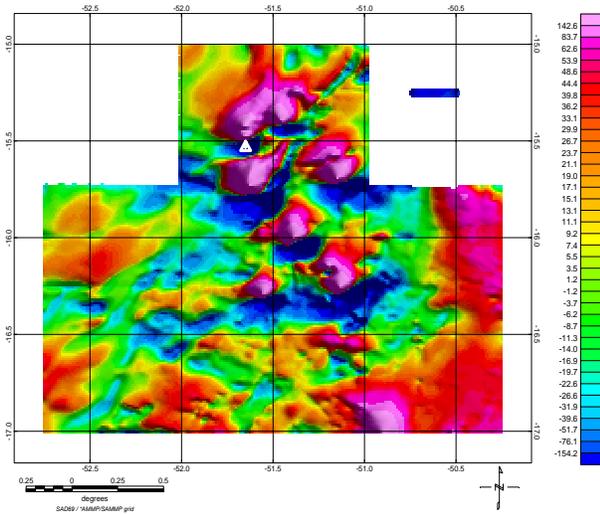
Esta informação foi utilizada para comparar com os resultados do modelamento conjunto de dados gravimétricos e aeromagnéticos.

#### (b) Mapas aeromagnéticos de contorno área estudada.

Aplicou-se aos dados magnéticos residuais gerados um filtro de redução ao Equador (considerando que na área estudada a inclinação do campo geomagnético é  $I = -9^\circ$ ), de modo a centrar as anomalias diretamente sobre os corpos causadores. Para esse e outros processamentos de filtros, utilizou-se o *software Magmap* (Geosoft, 1994).

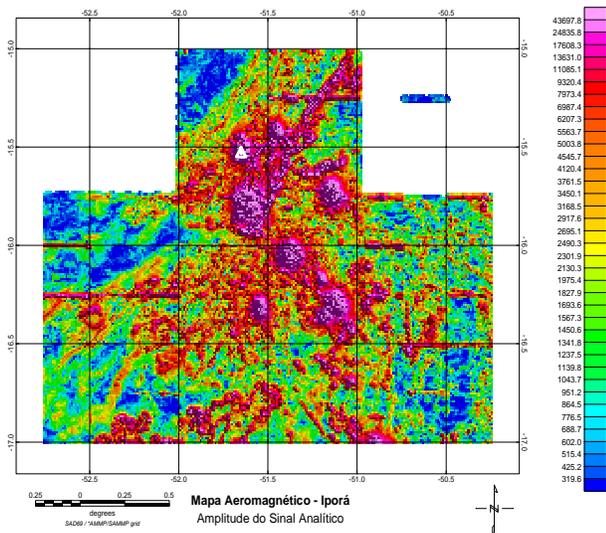
O processo de continuação para cima foi utilizado para eliminar o efeito de anomalias rasas e ressaltar detalhes sobre as fontes mais profundas. A figura 4 mostra o campo magnético reduzido ao equador e continuado a 2000 m, com o objetivo de extrair informações estruturais como localização corpos.

No mapa de amplitude do sinal analítico (figura 5) as anomalias demarcam exatamente a posição das estruturas. A importância da função do sinal analítico reside no contexto de interpretação, pois a mesma é completamente independente da direção de magnetização e da direção do Campo Magnético da Terra. Os picos da função do sinal analítico são simétricos e ocorrem diretamente sobre toda extensão das bordas dos corpos e centro dos limites dos corpos, interpretações de mapas do sinal analítico podem fornecer indicações da geometria das fontes magnéticas.



**Figura 4.** Mapa aeromagnético reduzido ao equador e continuado a 2000 m. O símbolo ▲ representa o local onde ME aflora.

A largura das anomalias é proporcional a sua profundidade, se as fontes dos picos são contatos magnéticos verticais.



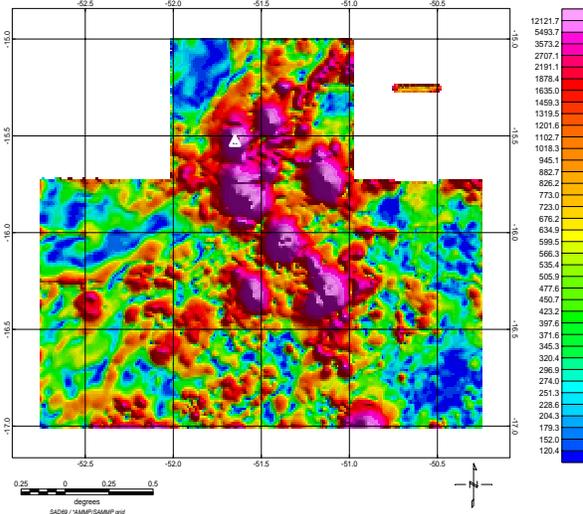
**Figura 5.** Mapa de amplitude do sinal analítico dos dados aeromagnéticos com o símbolo ▲ representando o local onde ME aflora.

A técnica amplitude do sinal analítico foi aplicada ao nível de 2000m com redução ao equador para obter melhor definição na localização e delimitação do corpo.

Para este trabalho estamos considerando as fontes como cilindros verticais. O pico da função sinal analítico limita as bordas do corpo e o diâmetro em ME é de 10 km aproximadamente.

Nos mapas das figuras 5 e 6 foram plotados os pontos onde o complexo ME aflora, na figura 5 o ponto se

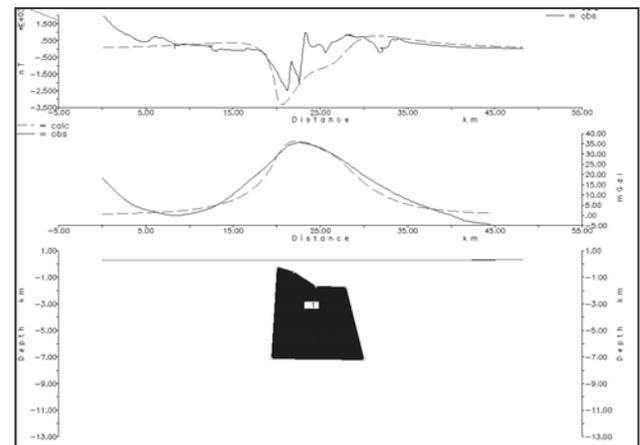
encontra mais ao sul do pico da função do sinal analítico, enquanto que na figura 6 o ponto está exatamente sobre o pico da anomalia, os filtros continuados para cima e redução ao equador serviram para localizar melhor o corpo e definir melhor seu limite.



**Figura 6.** Mapa aeromagnético de amplitude do sinal analítico continuado a 2000m reduzido ao equador com o símbolo ▲ representando o local onde ME

**(c) Modelamento conjunto direto 2,5 D dos sinais gravimétricos e magnetométricos.**

A modelagem conjunta com geometria 2,5D do Complexo ME foi realizada para perfis SN do complexo ME usando o programa GravMag (Pedley et al., 1993) que realiza o modelamento conjunto de usando uma geometria 2½D. O programa é baseado no método de prismas de faces poliédricas com geometria 2D, idealizado por Talwani et al. (1959) e posteriormente com correção de tamanho lateral do corpo, permitindo a geometria 2,5D.



**Figura 7.** Modelo dos sinais gravimétricos e magnéticos do Complexo ME.

Para o modelo direto 2,5D (figura 7) considera-se para o Complexo ME a densidade  $3,0 \text{ g/cm}^3$  e a densidade da rocha encaixante  $2,7 \text{ g/cm}^3$ . O valor de densidade atribuído a ME corresponde em média aos valores de densidade das litologias do gabro alcalino  $2,7 - 3,5 \text{ g/cm}^3$ . A susceptibilidade magnética adotada foi  $0,035$  (SI), o modelo direto 2,5 D dos dados gravimétricos e magnetométricos sugerem profundidade para a base do corpo, da ordem de 8 km e diâmetro pouco menor que 9 km.

### Discussão e Conclusões

A técnica de modelagem por processo de inversão com vínculos de compacidade permitiu a estimativa de parâmetros tais como largura e profundidade dos corpos de geometria simples. Os resultados da modelagem inversa indicaram corpos gravimétricos com larguras variando de 10 a 12 km, e profundidade da base chegando entre 6 e 8 km (a partir da superfície). Os contrastes de densidade obtidos parecem ser baixos, entre  $0,2$  e  $0,25 \text{ g/cm}^3$ . Isto pode ser explicado pelo profundo intemperismo encontrado no complexo ME na região de Iporá, onde minerais de alteração como a serpentina aparecem como resultado de processo de transformação metamórfica das rochas ultramáficas.

O modelo conjunto direto 2,5D sugere profundidade para a base do corpo da ordem de 8 km e diâmetro pouco menor que 9 km e o sinal aeromagnético, gerado também por zonas verticais, com o corpo sendo homogêneo como na resposta da inversão.

### Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o auxílio pesquisa da Fapesp n. 2003/05088-1 e bolsa de Mestrado da Fapesp de Alanna C. Dutra n. 04/01662-8.

### Referências

Brasil, Depto. Nac. Prod. Min., 1974. Mapa de interpretação magnética, Projeto Iporá, escala 1:250.000. Prospec S.A.

Danni, J. C. M., 1994. Os picritos alcalinos da região de Iporá: implicações na gênese dos complexos do tipo Central do Sul de Goiás. Rev. Bras. Geosc., 24(2): 112-119.

GEOSOFT- *Magmap*: 2D frequency domain processing. Geosoft Inc. Toronto, 1994.

Marangoni, Y. R., Moraes, F. R., Simão, M., Dutra, A. C., Machado, B. L. & Vieira, C. D., 2004. Modelamento do sinal gravimétrico e aeromagnético de Alcalinas da Província Rio Verde – Iporá. In: I Simpósio Regional da SBGF, São Paulo, 2004. *Anais ...* São Paulo, SBGF.

Radaelli, V.A., 2000. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil. Geologia e Recursos minerais do Estado de Goiás e do Distrito Federal. Informe de recursos minerais, Níquel do Morro do Engenho - Estado de Goiás. - Goiânia: CPRM, 1 v; il; 10p.

Silva, J. B. C., Medeiros, W. E. & Barbosa, V. C. F., 2001. Potential-field inversion: Choosing the appropriate

technique to solve a geological problem. Geophysics, 66: 511-520.

Strieder, A.J., 1992. Serpentinização e metassomatismo em rochas ultramáficas: discussão das características e recomendações para o tratamento geoquímico. Rev. Bras. Geoc. 22(3):329-337.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. & Keys, D. A., 1976. Applied Geophysics. Cambridge University Press, USA, 26p.

Pedley, R.C., Busby, J.P. e Dabek, Z.K., 1993. GRAVMAG User Manual - Interactive 2.5D Gravity & Magnetic Modelling. British Geological Survey, Technical Report WK/93/26/R, 73p.

Talwani, M., Worzel, J.L. e Landisman, M., 1959. Rapid gravity computations for two dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. J. Geophys. Res., 64: 49-59.