

## MAPEAMENTO LITOLÓGICO POR CORRELAÇÃO ENTRE DADOS DE AEROMAGNETOMETRIA E AEROGRAVIOMETRIA GRAVIMÉTRICA 3D-FTG NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS, BRASIL

Marco Antonio Braga<sup>1</sup>, Dionísio Uendro Carlos<sup>2</sup>, Tiago de Almeida<sup>3</sup>, Henrique Dayan<sup>4</sup>,  
Rodrigo Rocha Sousa<sup>5</sup> e Carlos A. Braga<sup>6</sup>

Recebido em 3 outubro, 2008 / Aceito em 5 maio, 2009  
Received on October 3, 2008 / Accepted on May 5, 2009

**ABSTRACT.** We report here an application of the Poisson relation useful when a joint magnetic and gravity gradient survey has been made. Susceptibility contrast to density contrast ratio map (which we call the "pseudolithologic" map) can be estimated. As a test of these techniques we have applied to gravity gradiometry and magnetic airborne surveys collected over Baú-Gandarela area in Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais State, Brazil. The main idea here is to highlight the prospecting of hematites bodies in the area. The computed pseudolithologic map clearly distinguishes the regions of the map that we already have a hematite mine and hematites bodies.

**Keywords:** gravity gradiometry, magnetometry, pseudolithologic map, Quadrilátero Ferrífero, hematite.

**RESUMO.** O presente trabalho de pesquisa apresenta uma aplicação da relação de Poisson que pode ser utilizada em dados de magnetometria e gradiometria gravimétrica utilizando o exemplo na mesma região. A razão entre o contraste de suscetibilidade e o contraste de densidade (mapa litogeofísico) pode ser calculada. Como um teste destas técnicas, aplicamos esta relação nos dados de magnetometria e gradiometria gravimétrica 3D-FTG coletados na área do Baú-Gandarela no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. A idéia principal foi estabelecer prioridades para prospecção de hematita na região supracitada. O mapa litogeofísico produzido mostra as regiões onde já existe uma mina de hematita e estabelece áreas para prospecção do minério.

**Palavras-chave:** aerograviometria gravimétrica, magnetometria, mapa litogeofísico, Quadrilátero Ferrífero, hematita.

---

<sup>1</sup>Vale, 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-mail: marco.antonio.braga@vale.com

<sup>2</sup>Vale, 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-mail: dionisio.carlos@vale.com

<sup>3</sup>Vale, 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-mail: almeidageo@yahoo.com.br

<sup>4</sup>UFRJ, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil – E-mail: dayan@geologia.ufrj.br

<sup>5</sup>Vale, 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-mail: rodrigo.rocha.sousa@vale.com

<sup>6</sup>Vale, Gerência de Geotecnia, Escritório Central Cauê, Itabira, MG, Brasil – E-mail: carlos.alberto.braga@vale.com

## INTRODUÇÃO

Os métodos gravimétricos e magnetométricos guardam semelhanças entre si e obedecem a Teoria do Campo Potencial, permitindo que transformações lineares semelhantes possam ser aplicadas a ambas. Seus campos físicos são fonte natural passiva sempre presente, pronta para ser medida.

A gravimetria, regida pela lei da gravitação de Newton, permite o estudo de diminutas variações do campo gravitacional terrestre causadas pela distribuição de massas no subsolo, ou melhor, pela presença de rochas de diferentes densidades (Dransfield et al., 1994).

O método da magnetometria mede distorções locais no campo magnético terrestre geradas pela concentração de minerais magnéticos nas rochas ou a zonas de falha (Dransfield et al., 1994).

Tomando como base o trabalho de Dransfield et al. (1994), que reporta a utilização da relação de Poisson para dados de magnetometria e gradiometria gravimétrica, é possível criar um mapa litológico a partir da combinação desses dados, visando otimizar a pesquisa de hematita nas áreas de minério de ferro.

## CONTEXTO GEOLÓGICO

### Geologia regional

O Quadrilátero Ferrífero está inserido na Província São Francisco, como pode ser observado na Figura 1, situando-se no extremo sul da área ocupada pelo Cráton de mesmo nome e corresponde a um fragmento crustal poupado, em parte, da Orogênese Brasileira, o qual abriga em seus domínios jazidas de ferro, ouro e outros recursos minerais (Almeida, 1977; Almeida & Hassuy, 1984).

### Estratigrafia

As unidades litoestratigráficas que integram o Quadrilátero Ferrífero são: os Complexos Metamórficos, o Supergrupo Rio das Velhas, o Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi (Fig. 2). Localmente ocorrem bacias terciárias como Fonseca e Gandarela (Alkmim & Marshak, 1998).

O Supergrupo Minas representa uma seqüência metassedimentar de idade paleoproterozóica constituída por filitos, xistos, quartzitos, dolomitos e itabiritos, assentada discordantemente sobre rochas do embasamento ou do Supergrupo Rio das Velhas (Derby, 1906; Harder & Chamberlin, 1915; Guimarães, 1931, 1951; Lacourt, 1936; Dorr, 1969; Ladeira, 1980; Marshak & Alkmim, 1989; Chemale Jr. et al., 1991; Alkmim & Marshak, 1998).

O Grupo Itabira constitui a seqüência química intermediária, sendo também dividido em duas formações: Cauê e Gandarela. A Formação Cauê está na base do grupo e é formada quase que

exclusivamente por itabiritos e corpos ricos em hematita, sendo explotada como minério de ferro. Estes itabiritos podem ser diferenciados pela mineralogia, granulometria e composição química. Na borda leste do Quadrilátero Ferrífero, devido aos dobramentos e falhamentos, em regime de encurtamento crustal, os itabiritos têm grande volume. Acima e em contato gradacional está a Formação Gandarela constituída por dolomito, formação ferrífera, marga, filito dolomítico e filito.

## ÁREA DO LEVANTAMENTO GEOFÍSICO

### Localização

Os levantamentos aerogeofísicos magnetométrico e 3D-FTG foram realizados na aba sul do Sinclinal do Gandarela que está situado na região leste do Quadrilátero Ferrífero (Fig. 3), nos municípios de Santa Bárbara e Barão de Cocais, estado de Minas Gerais, aproximadamente a 120 km de Belo Horizonte.

A área dos levantamentos geofísicos 3D-FTG e magnetometria (Fig. 3) recobre rochas mapeadas como sendo do Supergrupo Minas e do Supergrupo Rio das Velhas.

O Supergrupo Minas é o alvo principal desta prospecção, pois nele se encontram as hematitas e itabiritos da Formação Cauê do Grupo Itabira.

O mapa geológico da região do Baú-Gandarela contém o detalhamento das litologias que compõem os Grupos Itabira, Piracicaba e Caraça, e as litologias do Supergrupo Rio das Velhas, Modelo de Dorr (1969) (Figs. 2 e 4).

Segundo medições de susceptibilidade magnética e densidade realizadas no laboratório da Vale a hematita da região do Baú-Gandarela é antiferromagnética e possui densidade de 4.7 g/cm<sup>3</sup>, sendo que seu contraste de densidade para com as rochas encaixantes varia de 1.5 a 2.11 g/cm<sup>3</sup>.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Planejamento da aquisição de dados

A Figura 5 apresenta as linhas de vôo do levantamento de aerogradiometria gravimétrica e magnetometria, as mesmas foram orientadas na direção NE-SW. A altura do vôo foi de 80 metros, com espaçamento entre linhas de aproximadamente 100 metros, visando mapear os corpos de hematita, em um total de 54 linhas levantadas que recobriram 927 km e aproximadamente 93 km<sup>2</sup>. Foi empregada uma aeronave Caravan C-208, com velocidade de cruzeiro de 300 km/h, velocidade em operação geofísica de 260 km/h.

### Relação de Poisson

O tensor de gradiente de gravidade é a segunda derivada do potencial gravitacional (Dransfield et al., 1994).

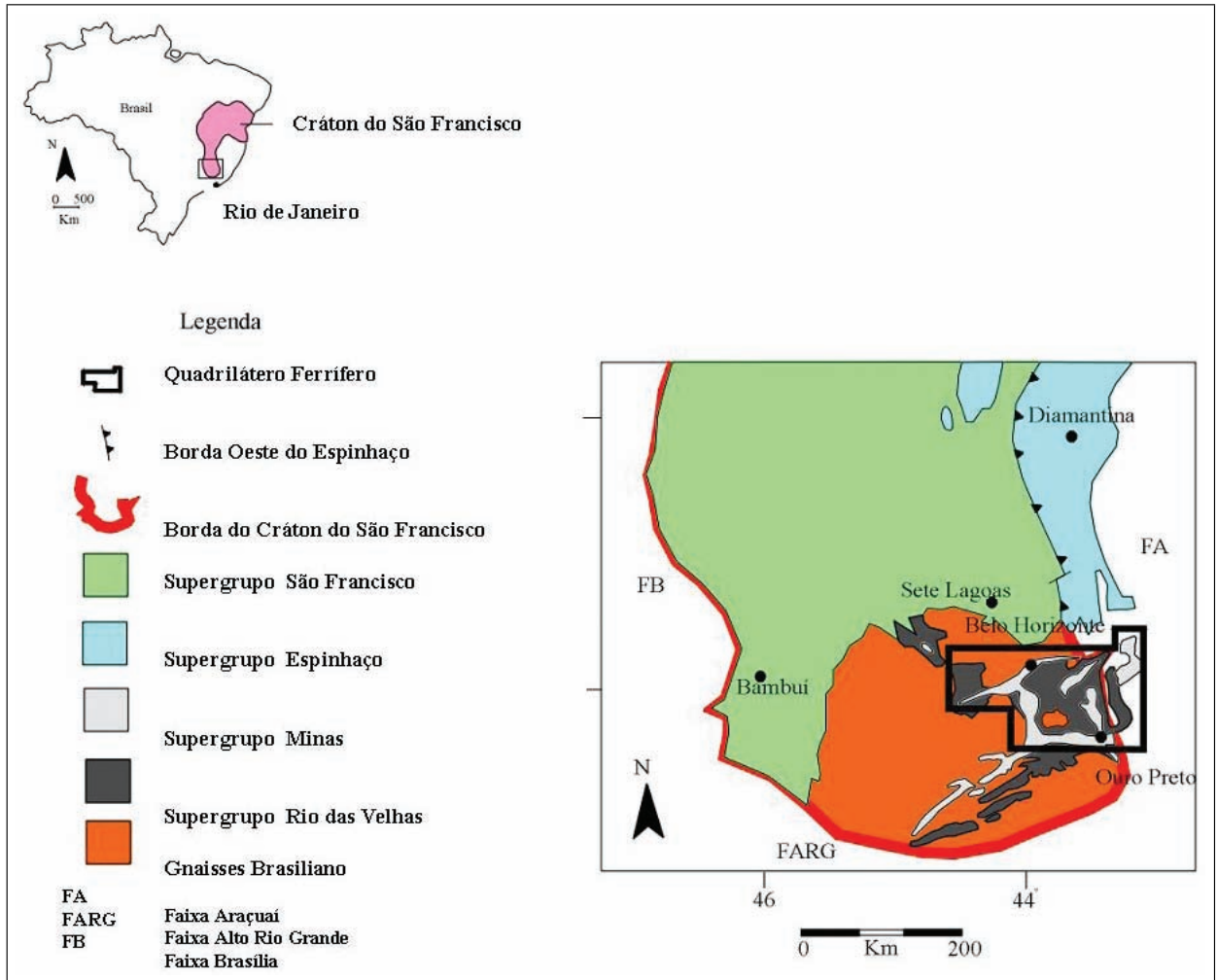


Figura 1 – Mapa de situação, mostrando a inserção do Quadrilátero Ferrífero na porção meridional do Cráton do São Francisco (Marshak & Alkmim, 1989).

O campo magnético pode ser determinado similarmente como sendo a primeira derivada do potencial magnético.

Considerando como fonte um corpo homogêneo com contraste de densidade  $\rho$  e contraste de suscetibilidade representado por  $k$ ; esse corpo foi magnetizado por indução pelo campo magnético terrestre,  $H$ .  $H$  pode ser expresso em termos de magnitude e o vetor  $a = (\cos(t) \cos(\delta), \cos(t) \sin(\delta), \sin(t))$ . O ângulo  $t$  é a inclinação e  $\delta$  a declinação do campo. A relação de Poisson entre as componentes  $B_i(x)$  e  $\Gamma_{ij}(x)$  dos campos magnéticos e gravimétricos gradiométricos com a fonte homogênea no ponto  $x$  pode ser escrito por:

$$G\rho B_i(x) = kH \sum_{j=1}^3 a_j \Gamma_{ij}(x) \quad (1)$$

onde  $G$  é a constante gravitacional. Essa relação pode ser ex-

pressa pela aceleração gravitacional,  $g_i$ ,

$$B_i(x) = \frac{1}{G\rho} M \bullet \nabla = g_i(x) \quad (2)$$

onde  $M$  é o vetor de magnetização. Grant & West (1965) escreveram a Equação 2 em função de  $\alpha$ , a “direção de magnetização”, definida por

$$M \bullet \nabla = \frac{M\partial}{\partial\alpha}.$$

As medidas do campo magnético em geofísica de exploração quase sempre são da magnitude do campo total, da qual se extrai a projeção do vetor  $B$  na direção  $a$ ; este campo magnético projetado foi denotado  $B(x)$ . A relação de Poisson para  $B(x)$  é então:

$$G\rho B_i(x) = kH \sum_{j=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_j a_j \Gamma_{ij}(x) \quad (3)$$

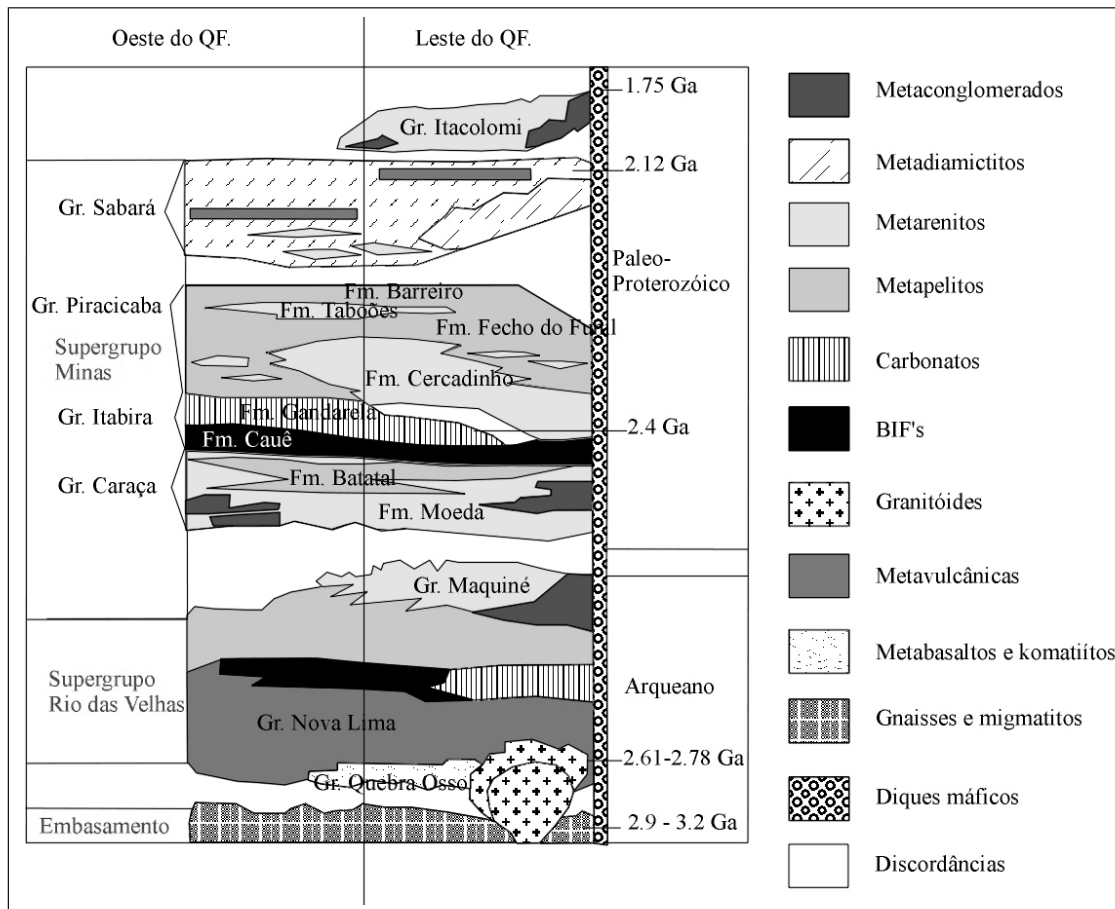


Figura 2 – Coluna estratigráfica proposta para o Quadrilátero Ferrífero (Alkmim & Marshak, 1998).

**O campo pseudo-magnético**

A relação de Poisson mostra que o campo gravimétrico gradiométrico para uma fonte particular pode ser usado para gerar um vetor do campo pseudo-magnético,  $\beta$ , definido pela relação:

$$\beta_i(x) = \lambda \sum_{j=1}^3 a_j \Gamma_{ij}(x) \tag{4}$$

onde  $\lambda$  representa a razão entre o contraste de suscetibilidade e o contraste de densidade para cada tipo de rocha e é dado por:

$$\lambda = \frac{kH}{\rho G} \tag{5}$$

onde  $k$  é a suscetibilidade,  $\rho$  a densidade,  $H$  o campo magnético e  $G$  a constante gravitacional.

Existem muitas razões para que o campo pseudo-magnético e o campo magnético medido sejam diferentes: o campo magnético medido sofre influência da remanescência, desmagnetização

e anisotropia, não incluídas na definição do campo pseudo-magnético. Porém há bastante semelhança entre ambos os campos (Fig. 9).

Diante de todas as considerações anteriores, é possível esperar que, usando medidas de ambos os campos magnético e gravimétrico gradiométrico, poderemos separar os efeitos causados por uma fonte, comparando o campo magnético medido com o campo pseudo-magnético gerado pelo gradiente de gravidade e o valor de  $\lambda$  para aquela fonte. Gunn (1975) desenvolveu uma técnica com base no filtro de Wiener, para uso em perfis de dados magnéticos e dados de gradiente da gravidade.

Através do campo magnético  $B$  e do campo de gradiente de gravidade  $\Gamma$  que um campo magnético filtrado.

$$B'_i = B_i - \beta_i = B_i - \lambda \sum_{j=1}^3 a_j \Gamma_{ij} \tag{6}$$

pode ser construído, onde  $\lambda$  é um parâmetro de filtro a ser escolhido.

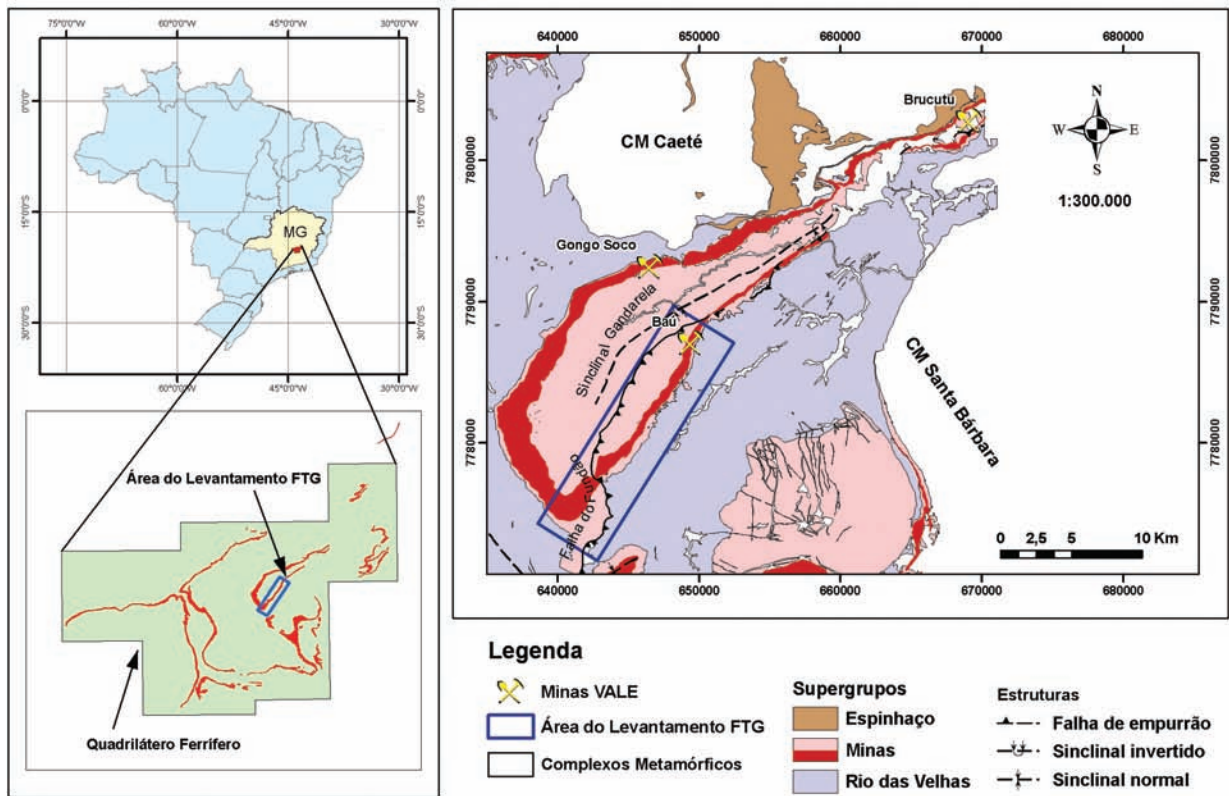


Figura 3 – Mapa de localização da área dos levantamentos geofísicos 3D-FTG e magnetometria.

Esta técnica é chamada de filtro pseudo-magnético, Baranov (1957). Para usar este método no campo magnético total, foi usado o filtro análogo abaixo,

$$B' = B - \lambda \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 a_i a_j \Gamma_{ij} \quad (7)$$

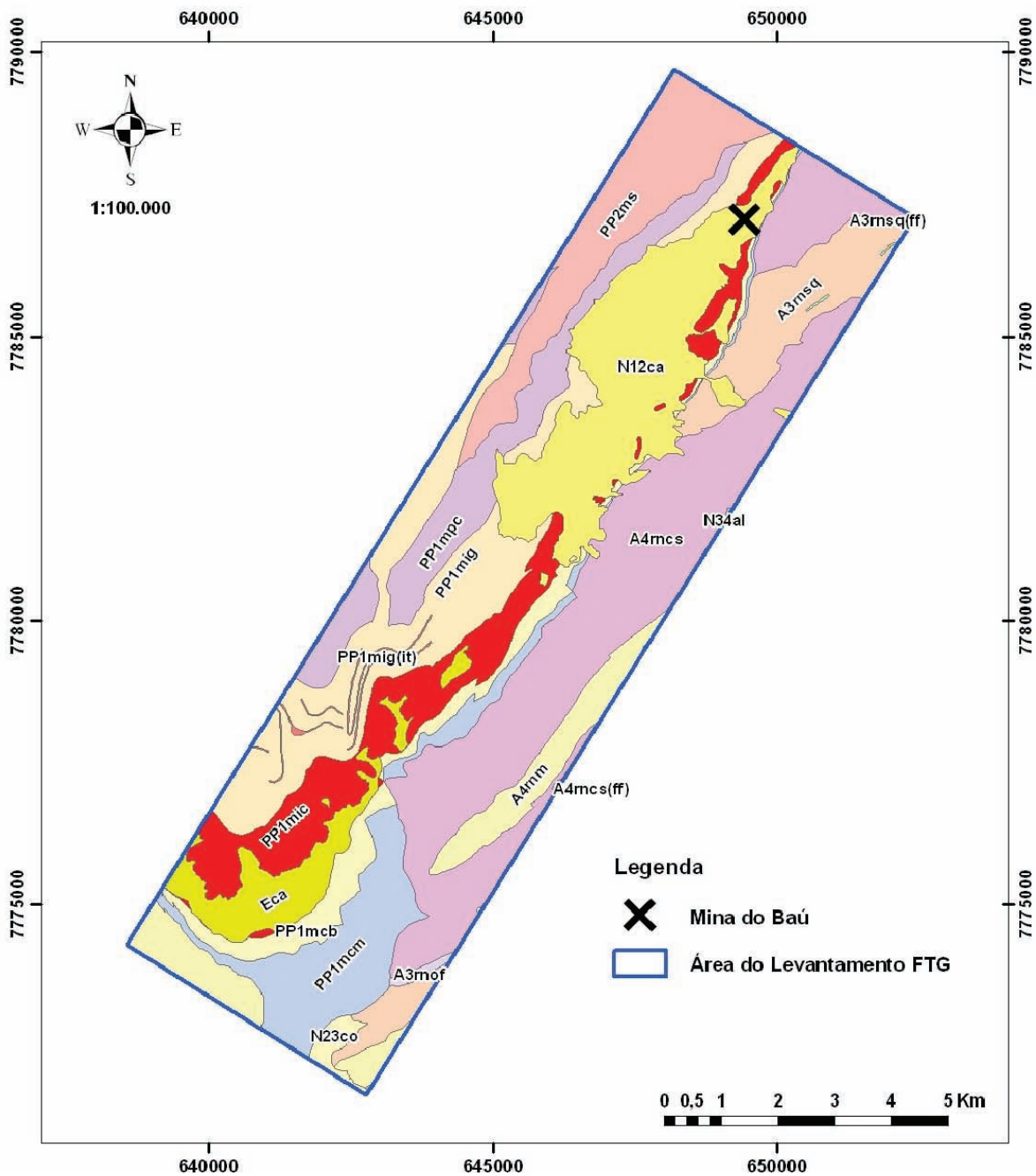
A relação de Poisson dada pela Equação 1 mostra que o gradiente de gravidade observado pode ser transformado em um campo magnético. Esta observação foi explorada no filtro pseudo-magnético. Além disso, também fica claro que em (1) podem ser usadas as medidas de  $B$  e  $\Gamma$  para calcular a razão entre contraste de suscetibilidade e contraste de densidade,  $\lambda$ , e assim chegar diretamente ao conhecimento de propriedades físicas que poderiam identificar os diferentes tipos de rochas. Esta capacidade poderia representar um avanço significativo em geofísica de campo potencial. A estimativa de  $\lambda$  é o primeiro passo do processo, se os valores de  $\lambda$  forem desconhecidos.

O método mais simples de calcular  $\lambda$  é dividindo o campo magnético medido, pelo campo pseudo-magnético, Equação 4, calculado através do gradiente de gravidade.

Um mapa de valores calculados de  $\lambda$  exibirá uma estimativa da relação de contraste de suscetibilidade e contraste de densidade a cada ponto. Isto pode prover informação sobre as características litológicas da rocha fonte, cujas propriedades dominam os campos daquele ponto. Este o mapa é chamado de litogeofísico.

O mapa da componente Free-Air,  $T_{zz-FA}$  (Fig. 6), mostra o resultado do levantamento de aerogravimetria gravimétrica na região do Baú-Gandarela,  $T_{zz}$  reflete diretamente a geologia da subsuperfície, revela as variações do campo gravitacional terrestre causadas pela distribuição de massas no subsolo, ou melhor, pela presença de rochas de diferentes densidades. Esses dados serão utilizados na implementação da relação de Poisson dada por (1) estimando o mapa do campo pseudo-magnético (4).

O mapa de Campo Magnético Total (Fig. 7) mostra o resultado do levantamento de aeromagnetometria na região do Baú-Gandarela e revela as distorções locais no campo magnético terrestre geradas pela concentração de minerais magnéticos nas rochas. Esses dados serão utilizados na implementação da relação de Poisson dada em (1) e para estimar o mapa pseudo-litológico.

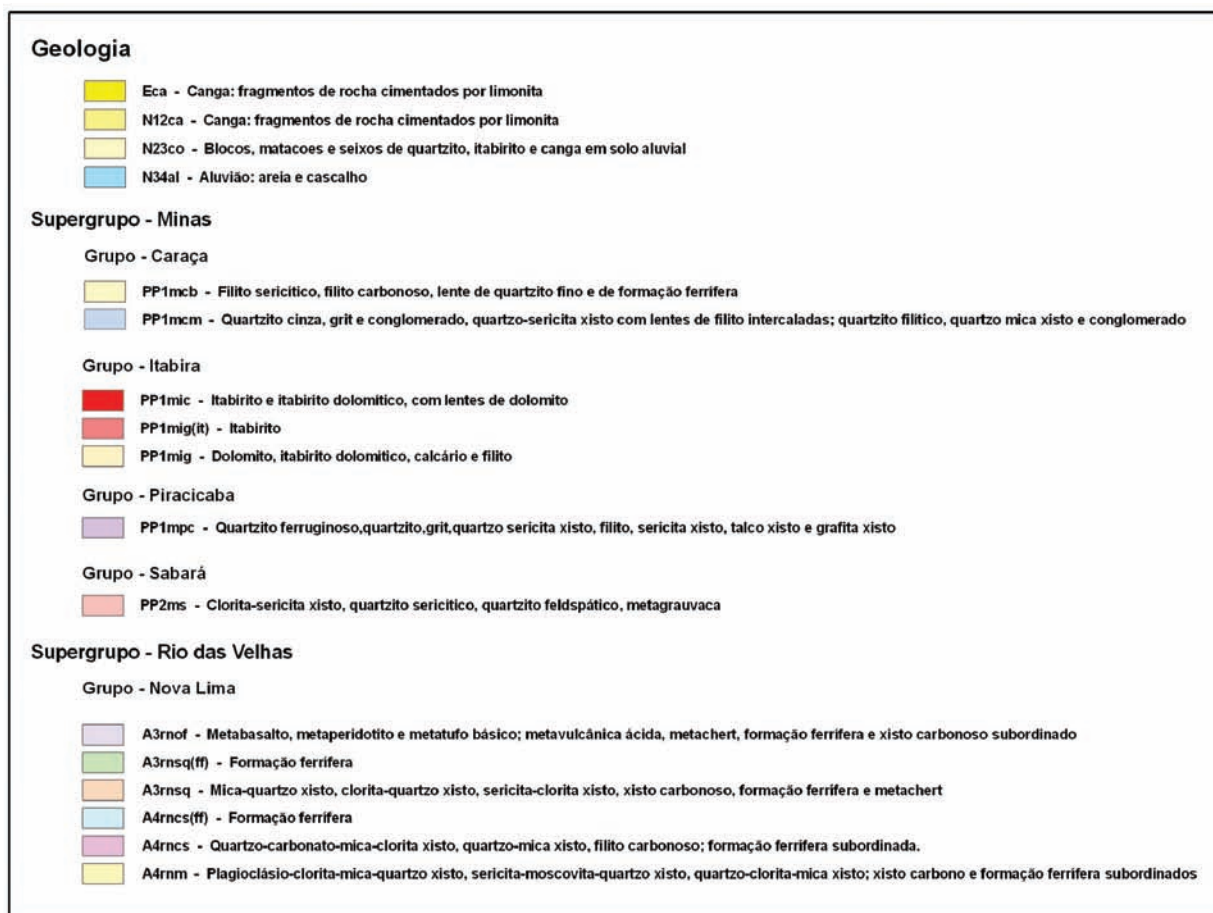


**Figura 4** – Mapa litológico da região do Baú-Gandarela, contendo o detalhamento das litologias que compõem as Formações dos Grupos Itabira, Piracicaba e Caraça, e as litologias do Supergrupo Rio das Velhas, onde foi realizado o levantamento geofísico 3D-FTG, modelo de Dorr (1969).

O mapa do campo pseudo-magnético (Fig. 8), foi calculado a partir da relação de Poisson que mostra que o campo gravimétrico gradiométrico para uma fonte particular pode ser usado para gerar um vetor do campo pseudo-magnético,  $\beta$ , definido pela relação dada em (4).

Esses dados serão utilizados na implementação da relação de Poisson de (1) na tentativa de estimar o mapa pseudo-litológico.

É possível perceber na Figura 9 que as grandes feições, separadas pelas linhas pontilhadas, do mapa do campo total (a) foram preservadas no mapa do campo pseudo-magnético (b).



**Figura 4 (continuação)** – Mapa litológico da região do Baú-Gandarela, contendo o detalhamento das litologias que compõem as Formações dos Grupos Itabira, Piracicaba e Caraça, e as litologias do Supergrupo Rio das Velhas, onde foi realizado o levantamento geofísico 3D-FTG, modelo de Dorr (1969).

As diferenças entre ambos deve-se ao fator que o campo magnético medido sofre influência da remanescência, desmagnetização e anisotropia, não incluídas na definição do campo pseudo-magnético.

O mapa litogeofísico (Fig. 10) foi calculado a partir da razão entre o campo magnético medido (Fig. 7) e o campo pseudo-magnético (Fig. 8) calculado a partir do campo gravimétrico gradiométrico. O mapa litogeofísico foi utilizado juntamente com o mapa geológico para a interpretação da geologia da região do Baú-Gandarela.

### Interpretação dos dados

Comparando o mapa pseudo-litológico com o mapa geológico da região do Baú-Gandarela é possível perceber que a Mina do Baú (detalhe Fig. 11) que é uma mina de hematita aparece clara-

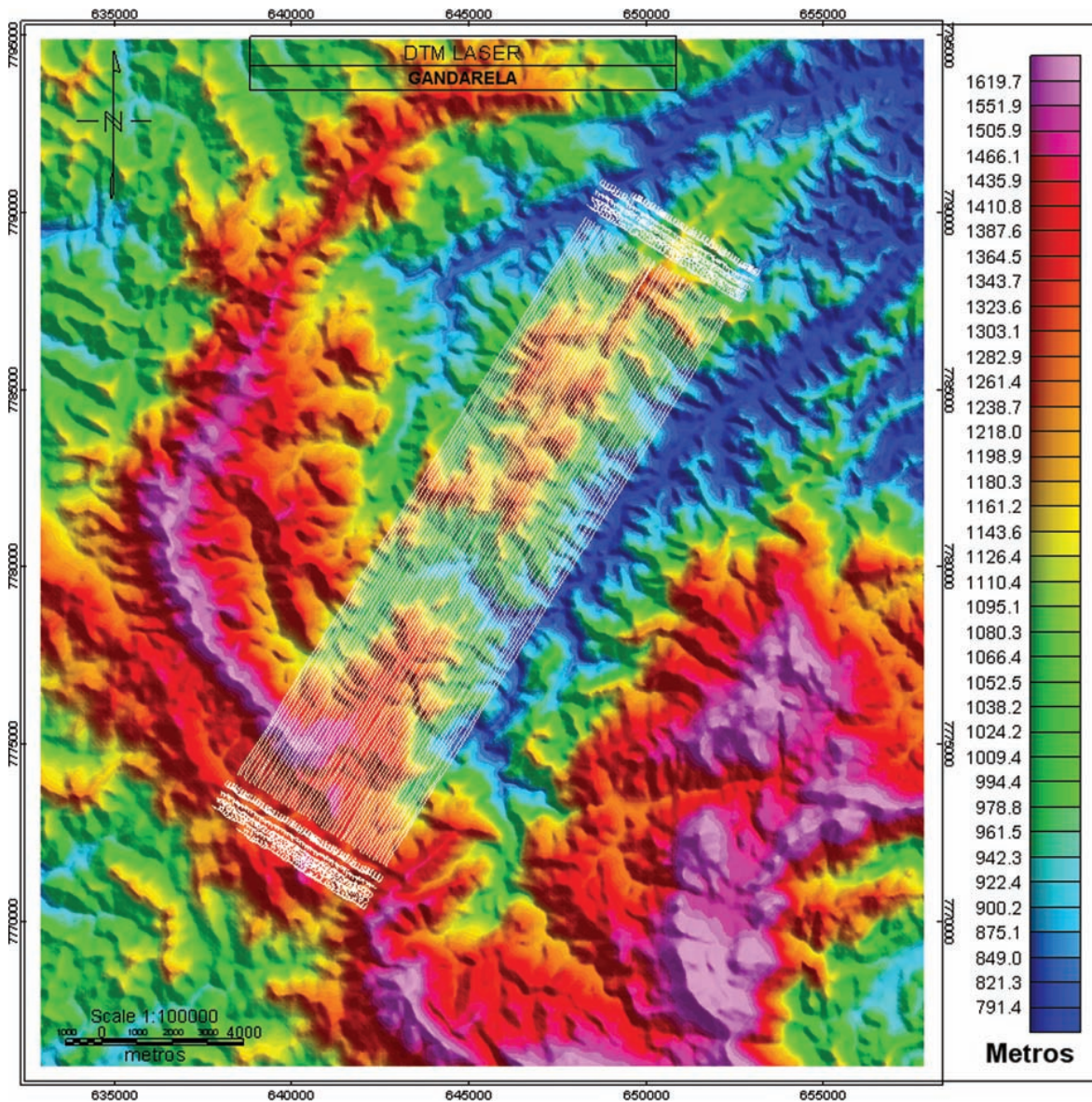
mente com sinal de  $\lambda$  menor que 1, ou seja, os valores que indicarão onde prospectar hematita serão os valores menores que 1 (cores verde e azul) dentro da formação ferrifera do mapa pseudo-litológico.

### CONCLUSÕES

Utilizando a relação de Poisson para dados de magnetometria e gradiometria um mapa litogeofísico foi criado.

Os resultados são animadores, uma nova ferramenta de prospecção poderá ser utilizada, visto que a Mina do Baú foi detectada no mapa litogeofísico e as áreas em azul já estão sendo prospectadas para hematita e algumas fontes potenciais deste minério estão sendo avaliadas.

Foi possível perceber que as diferenças entre o mapa do campo total e o mapa do campo pseudo-magnético, devem-se ao fato de que o campo magnético medido sofre influência da



**Figura 5** – Mapa com a posição das linhas de voo do levantamento geofísico de aerogradiometria gravimétrica 3D-FTG e magnetometria na região do Baú-Gandarela, as linhas foram orientadas na direção NE-SW com espaçamento entre linhas de aproximadamente 100 metros em um total de 54 linhas.

remanescência, desmagnetização e anisotropia, não incluídas na definição do campo pseudo-magnético.

Esta técnica pode ser utilizada no auxílio a prospecção de outros bens minerais principalmente aqueles onde haja contraste de densidade e susceptibilidade magnética.

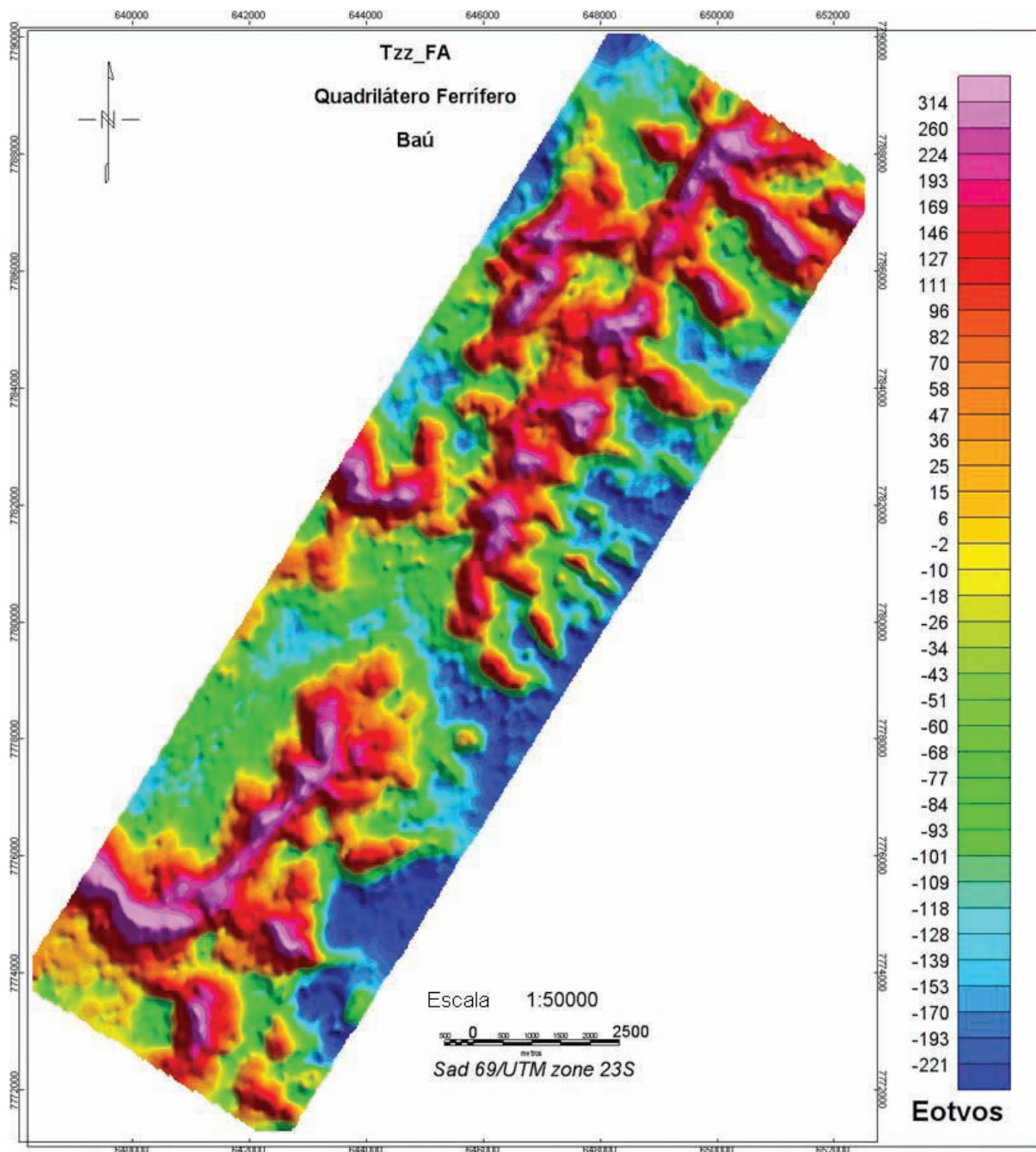
#### AGRADECIMENTOS

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

#### REFERÊNCIAS

- ALKMIM FF & MARSHAK S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29–58.
- ALMEIDA FFM. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Bras. Geoc.*, 7(4): 349–364.
- ALMEIDA FFM & HASSUY Y (Coords.). 1984. *O Precambriano do Brasil*. São Paulo. Edgard Blucher. 542p.





**Figura 6** – Mapa Free-Air da componente  $T_{zz}$  do tensor de gradiometria gravimétrica da região do Baú-Gandarela.

BARANOV V. 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*, 22: 359–383.

CHEMALE JR F, ROSIÈRE CA & ENDO I. 1991. Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: Um modelo. *Revista Pesquisas – UFRS*, 18(2): 104–127.

DERBY OA. 1906. The Serra of Espinhaço. *Journ. Geol.*, 14: 374–401.

DORR JVN. 1969. Physiographic stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington, DNP/USGS, 109p. (Prof. Paper 641-A).

DRANSFIELD MH, BUCKINGHAM MJ & VAN KANN FJ. 1994. Lithological Mapping by Correlating Magnetic and Gravity Gradient Airborne Measurements. *Exploration Geophysics*, 25: 25–30.

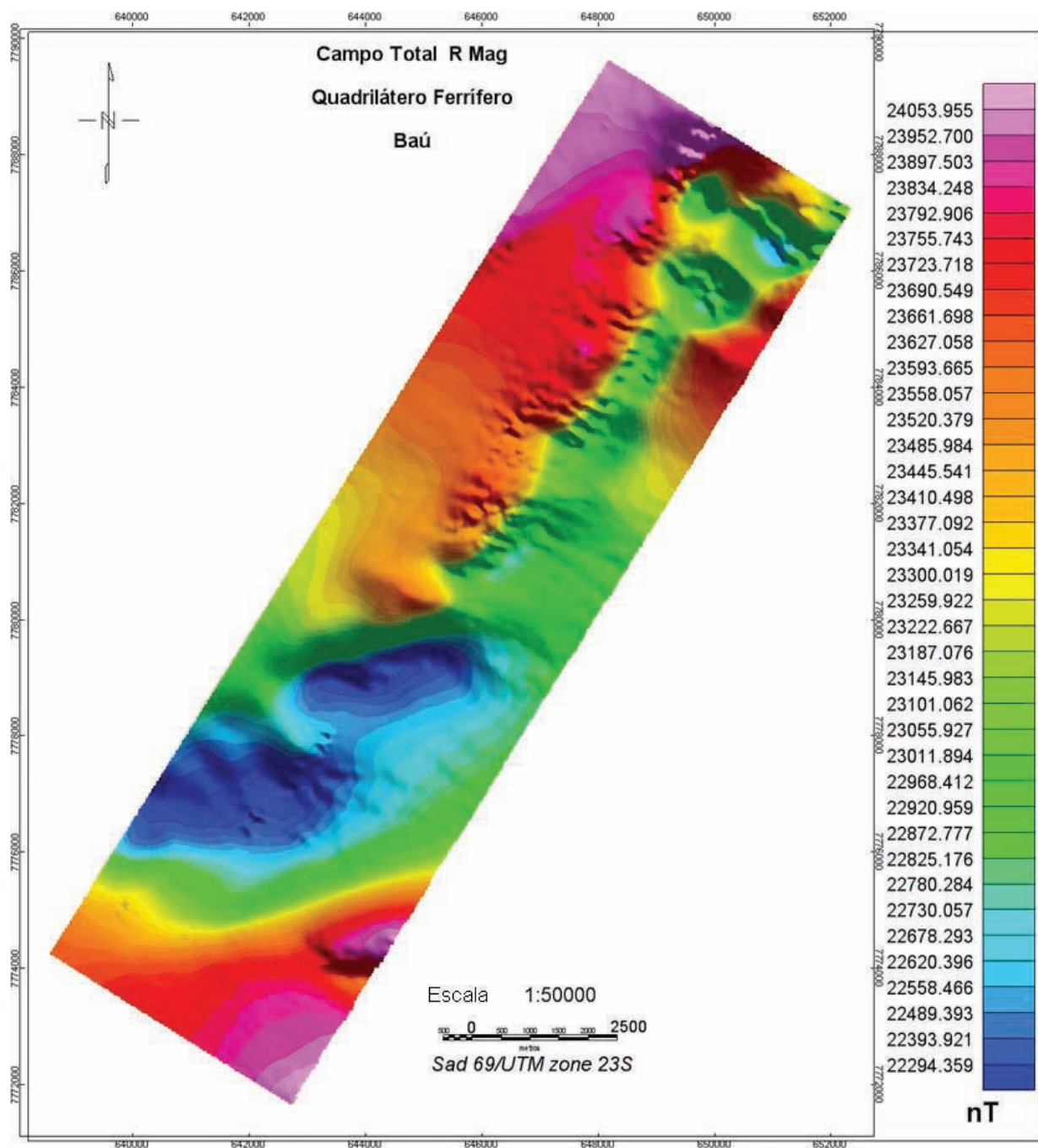


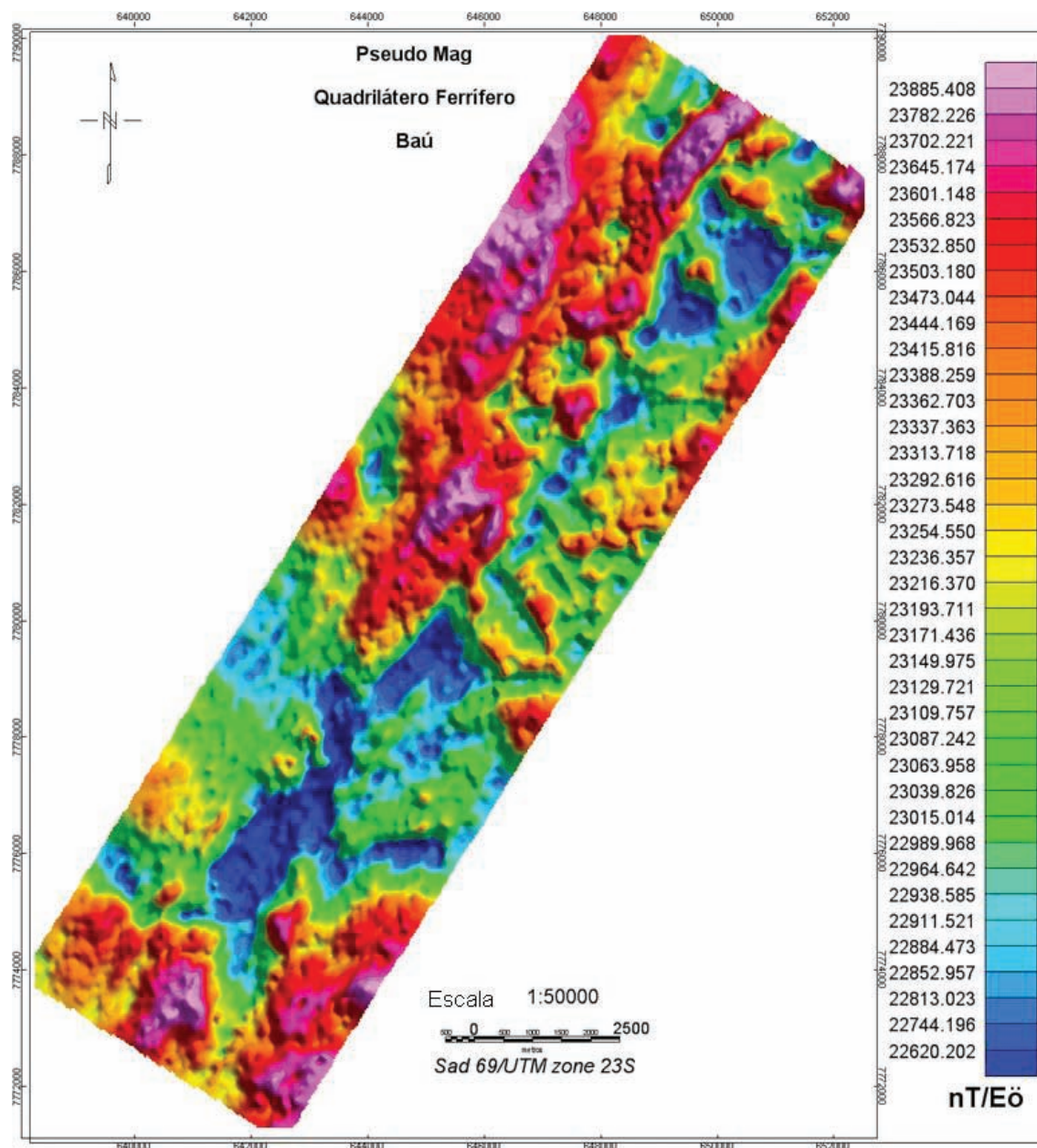
Figura 7 – Mapa do campo magnético total da região do Baú-Gandarela.

GRANT FS & WEST GF. 1965. Interpretation Theory in Applied Geophysics. McGraw-Hill Book Company, Toronto.

GUIMARÃES D. 1951. Arqui-Brasil e sua evolução geológica. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM. Boletim, 88: 314p.

GUIMARÃES D. 1931. Contribuição à geologia do Estado de Minas Gerais, Brasil. Dept. P.M., Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil, Bol., 55: 36p.

GUNN PJ. 1975. Detection of Bodies with Specified Density-Magnetization Ratios by the Use of Multichannel Wiener Filters. Geophysics, 40: 617-620.



**Figura 8** – Mapa do campo pseudo-magnético da região do Baú-Gandarela.

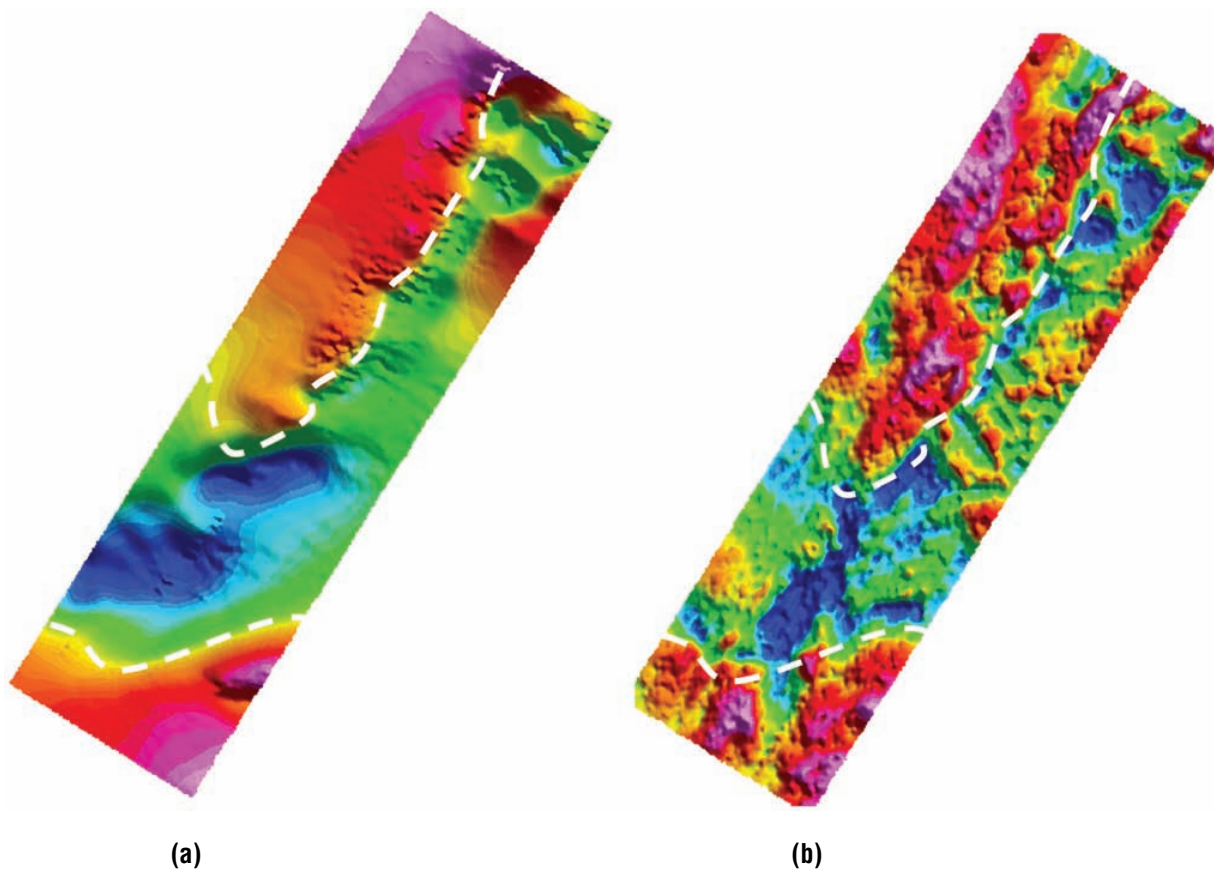
HARDER EC & CHAMBERLIN RT. 1915. The geology of central Minas Gerais, Brazil. *Journal of Geology*, 23: 341–378.

LACOURT F. 1936. Resumo da geologia da Folha de Ouro Preto. *Anais Esc. Minas de Ouro Preto*, 27: 47p.

LADEIRA EA. 1980. Metallogeneses of gold at the Morro Velho mine and

in the Nova Lima district, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ontário. Universidade de Ontário, Canadá. Tese de doutoramento*. 272p.

MARSHAK S & ALKMIM FF. 1989. Proterozoic Contractions/Extension tectonics of the Southern São Francisco Region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics*, 8(3): 555–571.



**Figura 9** – Comparação entre o mapa do campo magnético total **(a)** e o mapa do campo pseudo-magnético **(b)** da região do Baú-Gandarela.

## NOTAS SOBRE OS AUTORES

**Marco Antonio Braga.** Doutor e Mestre 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 é coordenador de geofísica da área de Ferrosos 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 de concreto radioativo para calibração de detectores gama portáteis e aerotransportados da América Latina. Atualmente trabalha na Vale, realizando processamento de dados de aerogravimetria 3D-FTG e aeromagnetometria.

**Tiago de Almeida.** Mestrando em Geofísica Aplicada pela UFRGS. É especialista em métodos geofísicos aplicados ao minério de ferro.

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

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

**Carlos Alberto Braga.** Geólogo pela UFRJ, especialista em Geofísica Aplicada à Geotecnia e barragens. Atualmente trabalha na área de Geotecnia e barragens da Vale.

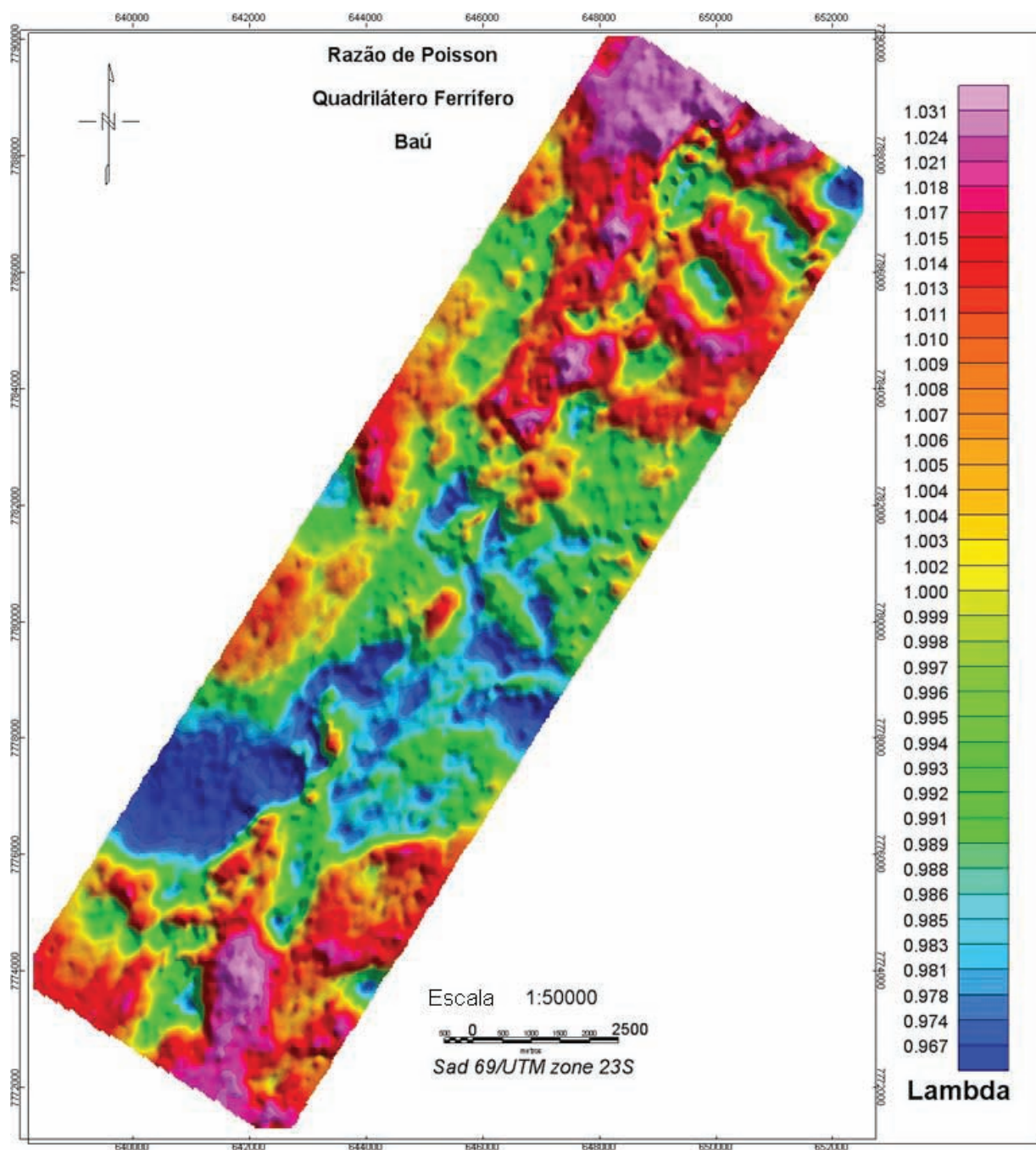
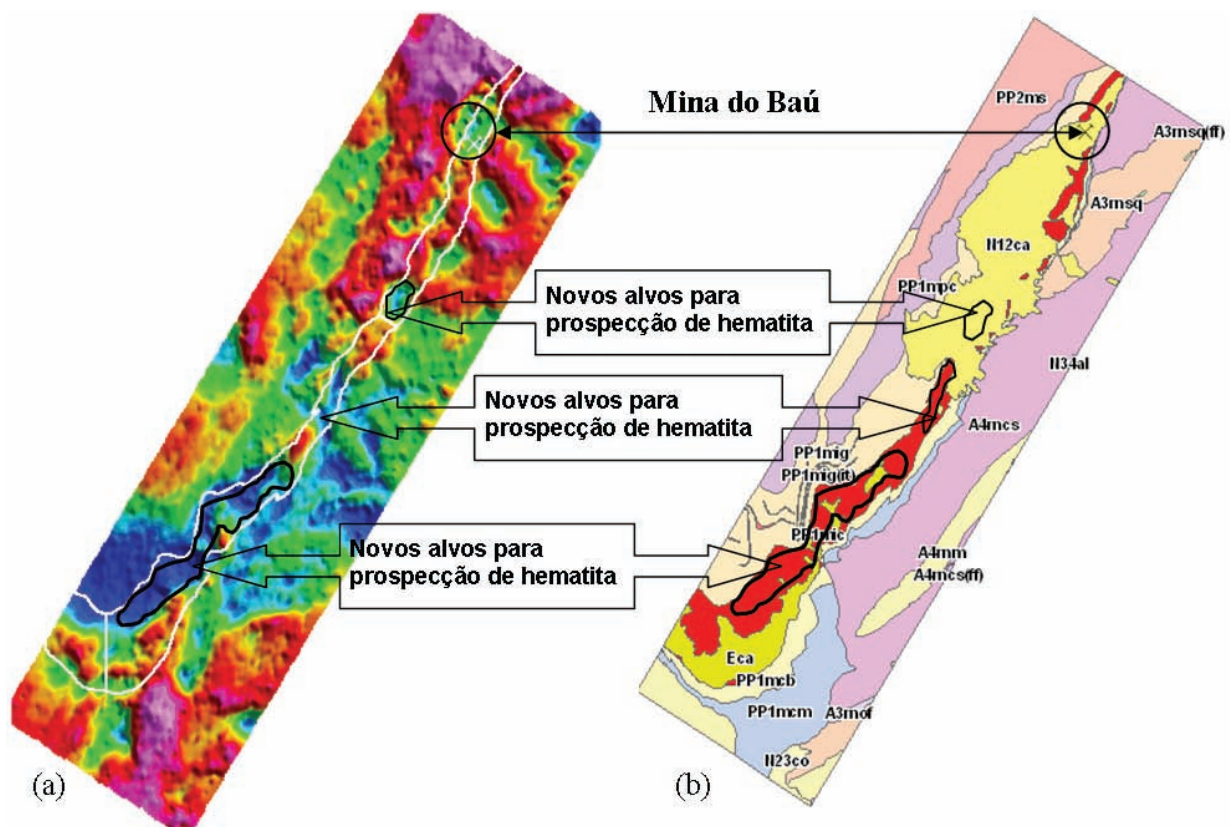


Figura 10 – Mapa litogeofísico da região do Baú-Gandarela.



**Figura 11** – Comparação entre o mapa pseudo-litológico(a) e o mapa geológico(b) da região do Baú-Gandarela. A linha branca no mapa pseudo-litológico(a) mostra os 'outline' da formação ferrífera. As áreas verde e azul dentro desse 'outline' devem ser prospectadas para hematita.