



## Modelagem de dados geofísicos sintéticos e reais aplicada à interpretação geológica na Província Aurífera de Alta Floresta (PAAF).

Danilo Barbuena\* (Unicamp), Carlos Roberto de Souza Filho (Unicamp), Francisco José Fonseca Ferreira (LPGA/UFPR), Emilson Pereira Leite (Unicamp), Emílio Miguel Junior (Unicamp), Rafael Rodrigues de Assis (Unicamp), Roberto Perez Xavier (Unicamp), Antônio João Paes de Barros (METAMAT).

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12<sup>th</sup> 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 12<sup>th</sup> 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

This paper discusses the application of methods of geophysical data processing with the threefold aim of (i) identifying problems of signal instability related to the technique of reduction to the pole at low latitudes, (ii) to eliminate spurious features generated by such transformation that may affect the geological interpretation and (iii) to use higher quality geophysical products for geologic interpretation. By applying these methods to the gamma ray spectrometric and magnetic data of the Juruena-Teles Pires (Phase 1) Project, particularly to the slope of the analytical signal of the total horizontal gradient (ISA-THG), it was possible to expand and refine the interpretation of geological units and to map new magnetic structures in a segment of the Alta Floresta Gold Province (AFGP). Moreover, granitic rocks of medium to high potassium were recognized, which are considered relevant units for mineral exploration in the region. Furthermore, we postulate that the tectonic evolution previously proposed for the AFGP is not fully verifiable in the study area, suggesting the possibility of different tectonics scenarios for the compartmentalization of the province.

### Introdução

Atualmente, o avanço das fronteiras exploratórias e científicas para áreas de difícil acesso tem aumentado a demanda pela utilização de métodos indiretos na realização de mapeamentos geológicos. Nesse sentido, o uso conjunto da geofísica aérea e do sensoriamento remoto, bem como modelagens através da integração de dados multifonte, mostra-se útil em função da sua eficiência na determinação das características dos materiais em subsuperfície e na identificação de novos alvos com potencial exploratório.

A Província Aurífera de Alta Floresta (PAAF), situada na porção centro-norte do Estado do Mato Grosso, atingiu o auge da produção aurífera entre as décadas de 1970 e 1990 (Moreton & Martins, 2000), sendo ainda hoje considerada uma das principais regiões produtoras de

ouro no Brasil. Contudo, poucos foram os trabalhos realizados na província que fizeram uso de métodos exploratórios que transcendem aqueles utilizados em campanhas de mapeamento geológico tradicional. Isso possivelmente funciona como fator limitante nos resultados obtidos em exploração mineral na região, principalmente na individualização de corpos graníticos de médio a alto potássio e zonas de alteração fílica/sericítica, variáveis estas ligadas às mineralizações auríferas na região (Paes de Barros, 2007; Assis et al., 2010).

Nesse contexto, o trabalho pretende, através da análise de dados magnéticos teóricos e o processamento e interpretação de dados gamaespectrométricos e magnetométricos aéreos, refinar a delimitação das unidades geológicas já mapeadas, individualizar possíveis corpos graníticos ainda não cartografados e identificar as estruturas relacionadas a eventos tectônicos regionais.

### Província Aurífera de Alta Floresta (PAAF)

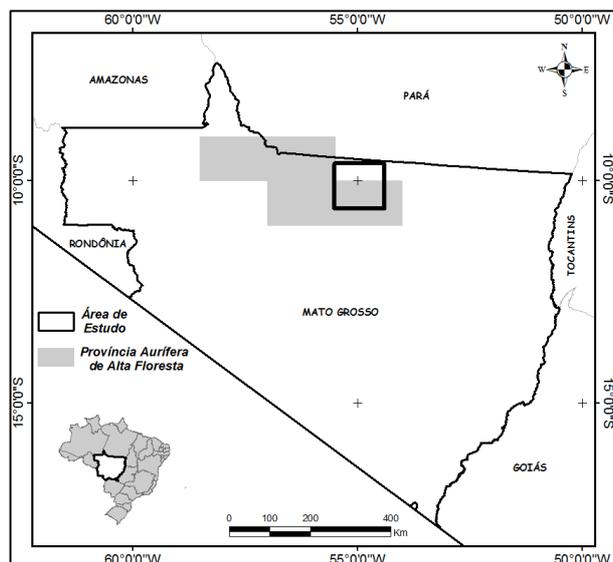
A PAAF está situada na porção centro-sul do cráton Amazônico, compreendendo partes das unidades geocronológicas-geotectônicas Ventuari-Tapajós (1,90-1,80 Ga) e Rio Negro-Juruena (1,80-1,55 Ga) (Tassinari & Macambira, 2004).

Atualmente, a PAAF ainda apresenta um potencial exploratório significativo, particularmente para depósitos auríferos primários, o que é comprovado pela ocorrência de quase uma centena de depósitos ao longo de um cinturão de direção NW, com mineralizações na forma de veios, sistema de veios e/ou disseminadas (Paes de Barros, 2007).

Uma parcela considerável desses depósitos hospeda-se preferencialmente em granitos paleoproterozóicos do tipo I, sub-alcálinos a cálcio-alcálinos, meta a peraluminosos, de médio a alto potássio, variando de tonalito-granodiorito a sienogranito. Esses granitos foram possivelmente formados em ambiente de arco magmático e provenientes de fonte crustal arqueana (Paes de Barros, 2007). Além disso, muitas dessas mineralizações relacionam-se espacialmente com alterações hidrotermais, sendo a alteração propilítica, com paragênese clorita ± epidoto ± carbonato, a que possui caráter mais regional. As alterações potássica com feldspato potássico e fílica (sericita/muscovita) geralmente situam-se em zonas mais próximas aos

depósitos auríferos hospedados em rochas graníticas (Assis et al., 2010).

Trabalhos recentes de mapeamento, geocronologia e evolução tectônica proporcionaram avanços na delimitação e caracterização de corpos graníticos relacionados às mineralizações auríferas registradas na área de estudo (Fig.1).



**Figura 1** – Mapa de localização da área de estudo na Província Aurífera de Alta Floresta.

Segundo Parro (1998), a estruturação regional da PAAF está ligada a dois eventos principais: (i) um mais antigo, caracterizado por zonas de cisalhamento transcorrentes E-W e lineamentos associados com orientações segundo o sistema Riedel: N75W (R), N15W(R'), E-W (Y-D), N75E (P), N15E (X) e N35W (T) e (ii) outro caracterizado por um conjunto de estruturas N35-45E que interceptam as anteriores.

Souza et al. (2005), apoiados em dados e interpretações anteriores do Projeto Alta Floresta, enquadraram as feições estruturais da PAAF num modelo de deformação desenvolvido sob um regime compressional sendo: (i) uma primeira fase, mais restrita, que afetou apenas unidades litoestratigráficas mais antigas (2,2 Ga a 1,99 Ga), responsável pela geração de estruturas NE-SW, em regime dúctil, de encurtamento crustal; e (ii) uma segunda fase de deformação não-coaxial, com a geração de megacisalhamentos transcorrentes sinistrais de direção NW-SE e estruturas de segunda ordem associadas, que resultou na estruturação final da PAAF.

### Métodos

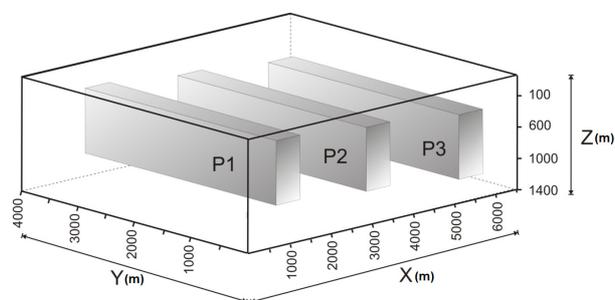
Mapas de contornos de anomalias magnéticas e gravimétricas são frequentemente utilizados para a determinação de contatos geológicos e delineação de estruturas impressas na crosta terrestre em diferentes profundidades. Apresentam sinais com grande variação

de amplitude, refletindo fontes situadas em diferentes níveis crustais, com diferentes geometrias e contrastes de suscetibilidade magnética. Além disso, anomalias magnéticas dependem da direção de magnetização (induzida e remanente) e da direção de aquisição dos dados.

Considerando apenas a magnetização induzida, a técnica de redução ao polo (RTP) permite que anomalias se posicionem diretamente sobre as fontes, minimizando os efeitos da inclinação magnética (Baranov, 1957). Contudo, tradicionalmente, a técnica de redução ao polo mostra-se bastante instável em baixas latitudes (entre -20° e +20°), uma vez que tanto a parte real quanto a imaginária, ambas presentes no denominador da equação do filtro RTP, aproximam-se de zero (e.g. Li, 2008).

Anomalias sintéticas provenientes de corpos magnetizados com geometria conhecida são fundamentais na avaliação de métodos de realce de feições de interesse, principalmente as decorrentes de modelos prismáticos, em função de suas aproximações às estruturas geológicas (Singh & Guptasarma, 2001).

Assim, através de modelos 3D teóricos propostos por Ferreira et al. (2010) (Fig. 2), cujos parâmetros geométricos e magnéticos estão indicados nas Tabelas 1 e 2, gerou-se um mapa de anomalias magnéticas, que posteriormente foi reduzido ao polo. A ambos os mapas foram aplicados os métodos de realce propostos, objetivando analisar a resposta esperada tanto para os mapas originais quanto para os mapas reduzidos ao polo, comparando-os com o modelo teórico de anomalias posicionadas sobre o polo magnético terrestre.



**Figura 2** - Representação dos modelos sintéticos 3D.

**Tabela 1** – Parâmetros geométricos dos modelos.

| Localização | Prisma P1 | Prisma P2 | Prisma P3 |
|-------------|-----------|-----------|-----------|
| X (m)       | 500-1000  | 3000-3500 | 5500-6000 |
| Y (m)       | 500-3500  | 500-3500  | 500-3500  |
| Z (m)       | 100-1100  | 200-1200  | 300-1300  |

**Tabela 2** – Parâmetros magnéticos dos modelos.

| Parâmetros | Alta Floresta | Polo        |
|------------|---------------|-------------|
| Latitude   | -10°15'00''S  | 85°00'00''N |

|                        |                           |                           |
|------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>Longitude</b>       | -55°00'00"W               | 132°36'00"E               |
| <b>Declinação (D°)</b> | -15,0°                    | 0,0°                      |
| <b>Inclinação (I°)</b> | -2,0°                     | 90,0°                     |
| <b>Magnitude (T)</b>   | 26.297 x 10 <sup>-9</sup> | 56.973 x 10 <sup>-9</sup> |
| <b>Ji (A/m)</b>        | 0,57                      | 1,25                      |

Mapas gamaespectrométricos, tradicionalmente utilizados como apoio ao mapeamento geológico regional, contribuíram, particularmente na última década, para a determinação de zonas com alteração hidrotermal, auxiliando na identificação de possíveis áreas de ocorrências de depósitos minerais hidrotermais.

O comportamento exibido pelos radionuclídeos nos diferentes ambientes mineralizados foi discutido por Dickson & Scott (1997), que constataram que as assinaturas gamaespectrométricas de depósitos de ouro são muito variáveis. Porém, aqueles autores observaram que o enriquecimento de potássio normalmente constitui um guia indireto para a localização de concentrações auríferas. Isso se deve, entre outros fatores, à importância do potássio nos processos hidrotermais em áreas mineralizadas (e.g. Airo, 2002).

Os teores dos radionuclídeos podem ser susceptíveis a efeitos ambientais, pedogenéticos, geomorfológicos, geoquímicos e variações litológicas (e.g. Dickson & Scott, 1997). Segundo Saunders et al. (1987), o tório, que apresenta menor mobilidade geoquímica, pode ser usado como controle litológico para definir valores ideais de potássio e urânio de cada amostra, para posteriormente suprimir tais efeitos do conjunto de dados analisados.

Dessa forma, a utilização de métodos como o potássio anômalo ( $K_d$ ) (Saunders et al. 1987; Pires, 1995), o urânio anômalo ( $U_d$ ) (Saunders et al. 1987; Pires, 1995), a razão eTh/K (e.g. Dickson & Scott, 1997) e o parâmetro F (e.g. Gnojek & Prichystal, 1985), constituem índices prospectivos mais adequados para a identificação de zonas hidrotermalizadas do que os canais básicos (K, eTh e eU).

### Processamento dos Dados Aerogeofísicos

O banco de dados aerogeofísicos (gamaespectrométricos e magnéticos) utilizado neste trabalho é proveniente da Base de Dados Aerogeofísicos do Brasil – AERO, a qual é formada por projetos executados pelo DNPM em convênio com a CPRM. Para este trabalho, foi utilizada a base aerogeofísica pertencente à Série 1000, código 1052 – Projeto Juruena-Teles Pires, Fase 1. Esses dados estão dispostos segundo linhas de voo N-S, com espaçamento de 2 km, intervalo de amostragem de 60m, altura de vôo de 150m e abrangem uma área de 36.300 km<sup>2</sup>. Através de um convênio de cooperação técnica entre a CPRM e o Serviço Geológico do Canadá, todos os dados aerogamaespectrométricos do Brasil foram reprocessados e micronivelados, através do *Brazil Airborne Radiometric Mapping Project* (BARMP, 1997).

Assim, os dados originais em contagens por segundo (cps), foram transformados para dose de CT (microR/h) e concentrações de K (%), eU (ppm) e eTh (ppm), através de um processo de retro-calibração.

Os dados geofísicos foram processados no software Oasis Montaj<sup>TM</sup>. Os dados gamaespectrométricos e magnéticos residuais foram interpolados em uma malha regular de 500 x 500 metros (1/4 do espaçamento nominal das linhas de voo) utilizando o método de curvatura mínima (e.g. Briggs, 1974). Esse método gera uma superfície suavizada com valores que se aproximam dos dados originais, sendo amplamente utilizado por sua eficiência computacional e eficácia. No caso dos dados magnéticos, o método foi aplicado através de um algoritmo bidirecional<sup>1</sup>. Primeiramente os dados foram interpolados ao longo das linhas de vôo e, subseqüentemente, na direção perpendicular às mesmas. O algoritmo bidirecional é indicado para interpolar dados que tenham sido levantados em linhas aproximadamente paralelas, uma vez que tendem a realçar as feições perpendiculares às linhas do levantamento.

Em seguida, os dados magnéticos foram reduzidos ao polo através do algoritmo de Phillips (2007). Por fim, foram aplicadas várias técnicas de realce, baseadas no cálculo de derivadas direcionais do campo magnético, objetivando delinear os limites das fontes das anomalias no sentido de facilitar a interpretação das estruturas. As grandezas calculadas foram: Amplitude do Sinal Analítico (ASA) (Nabighian, 1972; Roest et al., 1992), Gradiente Horizontal Total (GHT) (Cordel & Grauch, 1985), Inclinação do Sinal Analítico (ISA) (Miller & Singh, 1994), Gradiente Horizontal Total da Inclinação do Sinal Analítico (GHT-ISA) (Verduzco et al., 2004), Inclinação do Gradiente Horizontal Total (IGHT) (Cooper & Cowan, 2006) e Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total (ISA-GHT) (Ferreira et al., 2010). A deconvolução de Euler (Thompson, 1982) baseada no modelo de dique (SI=1), foi empregada a fim de estimar as profundidades das fontes magnéticas.

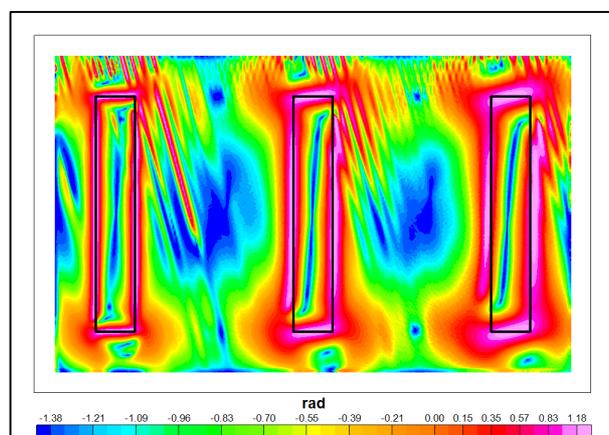
Os dados gamaespectrométricos, já reprocessados e micronivelados (BARMP, 1997), foram apenas suavizados através de um filtro passa-baixa, a fim de contemplar a Frequência de Nyquist. Em seguida, foram gerados os mapas dos canais individuais de K, eTh, eU e CT, além das razões eTh/K, eU/eTh, eU/K,  $K_d$ ,  $U_d$  e parâmetro F.

### Resultados

A partir dos resultados teóricos observou-se que não houve deslocamento significativo no posicionamento das anomalias em relação aos prismas (Fig. 2) nos mapas reduzidos e não reduzidos ao polo. Contudo, a declinação magnética gerou artefatos nos mapas reduzidos ao polo, principalmente quando aplicado o realce ISA-GHT (Fig. 3). Dessa forma, após a redução,

<sup>1</sup><http://www.geosoft.com/resources/papers/pdfs/topicsingri-ddingworkshop.pdf>. Acesso em 15/04/2011.

contatou-se a necessidade de suprimir essas tendências na direção da declinação através de um filtro direcional.



**Figura 3** – Mapa da ISA-GHT reduzido ao polo para o modelo prismático teórico.

Os dados magnéticos do Projeto Juruena - Teles Pires (Fase 1) foram submetidos à mesma metodologia aplicada aos modelos sintéticos. Inicialmente, o mapa de anomalias magnéticas foi reduzido ao polo. Em seguida, foram usados os seguintes filtros: (i) cosseno direcional com direção do centro no domínio do espaço igual a  $350^\circ$  e grau 1; (ii) continuação para cima com distância de 2000 m. Por fim, foram gerados os realces (i) ASA, (ii) GHT, (iii) ISA, (iv) GHT-ISA e (v) ISA-GHT e sobre os mapas derivados plotadas as soluções de Euler.

Roest et al. (1992) estendeu o conceito de amplitude do sinal analítico de Nabighian (1972) para corpos 3D, com o objetivo de estimar a profundidade das fontes magnéticas. Li (2006) mostrou que ASA depende da inclinação magnética e de outros parâmetros geomagnéticos, refutando conceitos vigentes até então. As soluções de Euler se posicionam sobre os máximos, mas também sobre amplitudes intermediárias, sugerindo que a atenuação do sinal deve-se a maior profundidade das fontes, uma vez que os contrastes de suscetibilidade magnética, a geometria e a magnetização das fontes sejam consideradas constantes (Ferreira et al., 2010). Dessa forma, observa-se que as interferências de fontes de diferentes profundidades resultam em anomalias relativamente circulares, tornando difícil a interpretação das estruturas através desse método de realce.

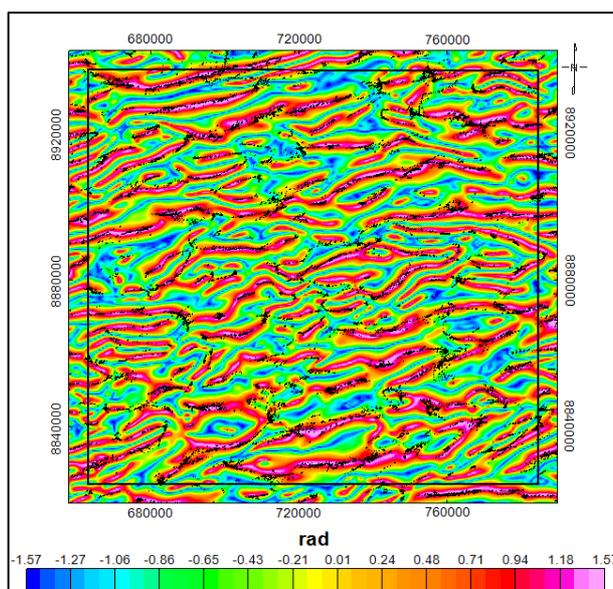
O GHT tem a propriedade de realçar as bordas (máximos) e os centros (mínimos) das fontes magnéticas, sendo que as amplitudes são gradativamente atenuadas com a profundidade dos modelos. Apesar de apresentar comportamento semelhante ao da ASA, esse algoritmo delinea de forma mais clara o contorno das estruturas.

A ISA possui como principais atributos equalizar as amplitudes, posicionar os máximos sobre os centros das fontes e ser independente da profundidade. Contudo, conforme assinalado por Cooper & Cowan (2008), este método não se caracteriza como detector de bordas. Ademais, ISA é influenciada pela latitude magnética

(Verduzco et al., 2004), o que amplifica as limitações do método quando os dados não são apropriadamente reduzidos ao polo, como em regiões de baixas latitudes magnéticas.

O GHT-ISA mostra-se eficiente para a interpretação qualitativa de estruturas magnéticas, em função de ser independente da inclinação e da intensidade da anomalia magnética (Verduzco et al., 2004), além de realçar e centralizar as amplitudes máximas sobre os limites das fontes. Contudo, apesar de realçar as bordas das fontes, as soluções de Euler se alinham sobre amplitudes intermediárias, mostrando a dependência do método com a profundidade dos corpos.

O método ISA-GHT, que apresenta características semelhantes ao GHT-ISA, equaliza as amplitudes do sinal, dispondo os máximos sobre as bordas das fontes e coincidentes com as tendências das soluções de Euler, revelando-se como um método ainda mais adequado para a interpretação qualitativa de dados de campos potenciais. Dessa forma, a partir do mapa ISA-GHT foram interpretadas as estruturas magnéticas da área de estudo (Fig. 4).



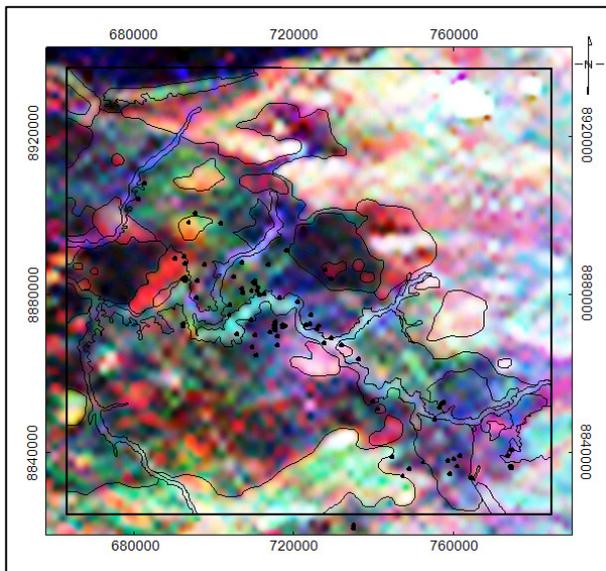
**Figura 4** – Mapa da ISA-GHT reduzido ao polo para os dados do Projeto Juruena -Teles Pires (Fase 1). Os pontos pretos representam as soluções de Euler.

A interpretação das unidades geológicas baseou-se nas respostas exibidas pelos produtos gamaespectrométricos e nos dados provenientes de diversos trabalhos de mapeamento realizados na região.

Os mapas dos canais individuais de K, eTh e eU não foram utilizados como parâmetros para a individualização das unidades em função da grande mobilidade do potássio, da relativa mobilidade do urânio e da imobilidade do tório durante o processo de intemperismo, que oblitera a resposta das rochas. Contudo, a composição RGB (K-eTh-eU) mostrou-se bastante

interessante do ponto de vista qualitativo para a interpretação de alguns litotipos (Fig. 5).

A fim de refinar a interpretação para garantir uma individualização mais criteriosa das rochas presentes na área, foram gerados produtos através da técnica *Fuzzy Clustering*, que consiste em um sistema de classificação por redes neurais não-supervisionada. O agrupamento das classes similares (*fuzzy clusters*) é feito a partir dos dados, sem a necessidade de pontos de treinamento (e.g. Magalhães, 2007). Dessa forma, os litotipos foram individualizados através da interpretação qualitativa da composição RGB em conjunto com os produtos do método *Fuzzy Clustering* (Fig.5).



**Figura 5** – Mapa da composição RGB (K-eTh-eU) indicando a interpretação dos litotipos. Os pontos pretos representam os depósitos auríferos conhecidos.

Os produtos gerados pelo processamento dos dados gamaespectrométricos de K, eTh e eU foram utilizados para a determinação de possíveis zonas com alteração hidrotermal. Para isso foram utilizados aqueles que evidenciam zonas com acumulação anômala de potássio,  $K_d$ , eTh/K, eU/K e parâmetro F, objetivando assim mapear áreas com alterações hidrotermais do tipo potássica e fílica, que comprovadamente estão associadas às mineralizações auríferas da região (Assis et al., 2010). Nesses mapas, as zonas de anomalias de alta amplitude delimitam as rochas graníticas ricas em potássio, em comparação aos outros dois elementos, e que são abundantes na área (e.g. Granito Aragão, Granito Flor da Mata, Granito Novo Mundo) (Fig. 6), enquanto as zonas de alteração mostram-se associadas às amplitudes intermediárias, denotando concentrações relativas de potássio inferiores às rochas graníticas.

### Conclusões

Os produtos gerados pelo processamento dos dados magnéticos foram considerados satisfatórios para a

interpretação estrutural, apesar das limitações da técnica de redução ao polo em baixas latitudes. Os artefatos gerados pela declinação magnética foram removidos com um filtro direcional, eliminando as tendências que poderiam interferir na aplicação dos métodos de realce.

A inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA-GHT) mostrou-se como o método de realce mais adequado para a interpretação de estruturas magnéticas, em função da amplitude do sinal não variar com a profundidade. Dessa forma, tanto as estruturas muito profundas como as de nível crustal intermediário puderam ser contempladas durante a interpretação (Fig.6).

Os lineamentos magnéticos interpretados mostram tendências estruturais principalmente nas direções E-W e NE-SW. Dessa forma, como já constatado por Paes de Barros (1994) e Parro (1998), as estruturas E-W seriam as mais antigas, de difícil identificação na superfície em função de possuírem raízes profundas. As estruturas NE-SW estariam conjugadas a essas estruturas E-W através de uma cinemática sinistral, que possibilitou a abertura nessa direção.

Contudo, as estruturas NW-SE, N-S e NE-SW mais recentes descritas por Parro (1998), não foram identificadas na área de estudo, possivelmente em função do predomínio do sinal das estruturas mais profundas. Ademais, há a possibilidade de que a estruturação regional proposta pelos diversos autores não explique de forma adequada toda a área do projeto Alta Floresta (folhas São João da Barra, Alta Floresta, Ilha 24 de Maio e Vila Guarita. Assim, por exemplo, Miguel Jr. (*in prep.*), sugere que arcabouços estruturais distintos formados sob diferentes eventos tectônicos em áreas da PAAF constituem alternativas a modelos que tentam explicar a complexidade estrutural da província com base em um mesmo arranjo cinemático. Deve-se também levar em conta que depósitos auríferos associados a rochas graníticas da PAAF formaram-se em vários estágios entre 1,96 Ga (e.g. Novo Mundo e Pé Quente) e 1,82 Ga (e.g. Serrinha de Matupá). Possivelmente nesse intervalo de 140 Ma regimes tectônicos distintos e/ou reativações devem ter influenciado na complexidade estrutural da PAAF.

Os resultados gerados a partir da base de dados gamaespectrométricos auxiliaram na identificação dos litotipos da área de estudo, complementando trabalhos anteriores desenvolvidos na região. Além disso, através dos mapas de realce de zonas anômalas em K, observou-se que alterações hidrotermais ricas nesse elemento associam-se a amplitudes intermediárias. Nesse caso, as altas amplitudes representam rochas graníticas mais ricas em potássio. Isso se deve, provavelmente, ao fato da alteração fílica/serícita, que possui níveis menos intensos de potássio, ser mais comum.

O mapa da Figura 6 mostra as unidades geológicas interpretadas a partir de dados de campo de trabalhos anteriores (Souza et al., 2005; Paes de Barros, 2007; Assis et al., 2010; Miguel Jr., *in prep.*) e através da interpretação da composição RGB (K-eTh-eU) e do mapa gerado por *Fuzzy Clustering*. A Unidade Granitos

