



## ESTRUTURAS GEOLÓGICAS EM SUB-SUPERFÍCIE DA PROVÍNCIA URANÍFERA LAGOA REAL (BA) A PARTIR DE DADOS AEROGEOFÍSICOS

Suze Nei P. Guimarães e Valiya M. Hamza, Observatório Nacional – ON/MCT, Rio de Janeiro.

Copyright 2009, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11<sup>th</sup> 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 11<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

The present work deals with recent advances in the analysis of air-born geophysical data of the Lagoa Real (BA) geological province. The methods employed in data processing include vertical derivative, analytic signal and Euler deconvolution. The results obtained have allowed identification of several new sub-surface structural features in the study area, unnoticed in previous geological and geophysical investigations. Prominent among these are the large number of magnetic lineaments in the northwest-southeast direction, arc-shaped structures in the west central parts and near-circular features in the southern and south-eastern parts of the study area. In addition, remarkable correlations have been found between regional-scale features identified in results of gamma-spectrometric studies and area-extent of blocks delimited by magnetic lineaments. There are indications that such blocks represent crustal segments affected by different degrees of metasomatic processes associated with Uranium mineralization. Also, it is likely that the lineaments identified in the present study are related to shear-zone structures. The results have also contributed to substantial improvements in outlining sub-surface extensions of several structural features identified in geological studies. An example is the small but prominent structure mapped in the southern part of the study area, classified as an irregular feature in previous studies, but is now identified as having a near circular shape, most probably an ultra-basic intrusion at shallow depths.

### Introdução

A identificação e delimitação das estruturas geológicas associadas às ocorrências de Urânio tornou-se, nos últimos tempos, um dos alvos de pesquisas geológicas em escalas regionais e locais. Nas regiões tropicais as características dos solos locais manifestam-se, geralmente, como obstáculos impedindo avanços rápidos no emprego de métodos de prospecção geológica convencional e na delimitação das zonas de mineralização. A dificuldade principal é oriunda da presença de espessas coberturas lateríticas, que não permitem avaliações diretas da extensão real das zonas de ocorrência de minério. Os dados de levantamentos aerogeofísicos, apresentam potencial nas tarefas de delimitação de estruturas geológicas mesmo em áreas com espessas camadas de coberturas lateríticas. Por

exemplo, na análise de dados aeromagnéticos, o uso de técnicas tais como a Deconvolução de Euler e de Sinal Analítico, propicia informações sobre a profundidade das fontes magnéticas que por sua vez auxiliam na delimitação das estruturas geológicas em sub-superfície.

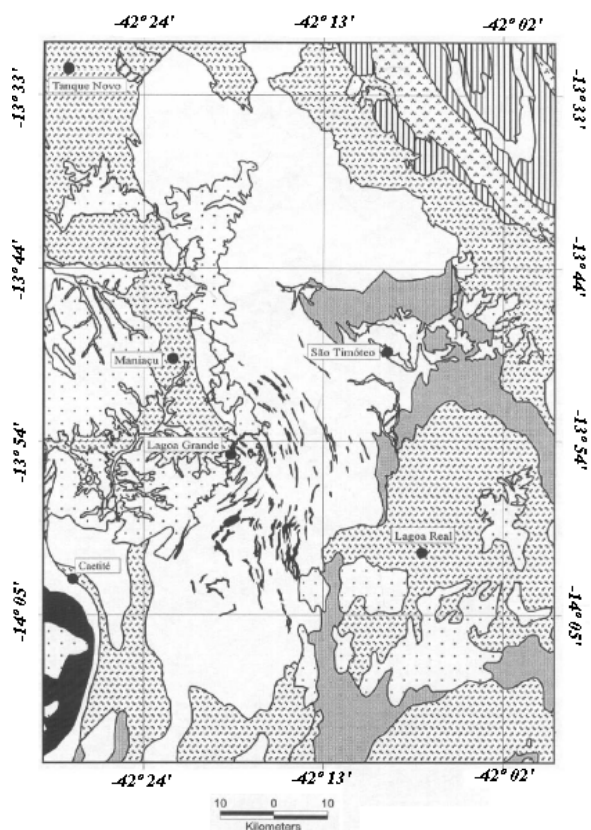
Contudo, para usufruir plenamente essa vantagem é necessário, não somente o domínio de novas técnicas para interpretação de dados de levantamentos aéreos, mas também os devidos cuidados com as etapas de pré-processamento (Nettelton & Cannon 1962, Clark 1997, Gunn & Dentith 1997). Enfatiza-se neste contexto, a necessidade de verificar os procedimentos utilizados nas etapas de pré-processamento, já que os resultados finais são sensíveis aos métodos empregados, tais como redução ao Equador.

O propósito do presente trabalho é utilização criteriosa das técnicas modernas de processamento e análise de dados aerogeofísicos, para a caracterização das estruturas e lineamentos na província geológica de Lagoa Real (BA). As zonas de mineralização de Urânio nesta província foram descobertas após os levantamentos aero-geofísicos no Quadrilátero Ferrífero, na década de 1970. Destes, o aerolevante realizado sob projeto São Timóteo - CPRM (Oliveira et al, 1985) confirmou a existência de vários bolsões de mineralização de Urânio.

### Geologia Regional

De acordo com os estudos geológicos anteriores (Almeida 1977, Cordani & Brito Neves 1982, Fyfe 1979) o contexto geológico e tectônico da região de Lagoa Real faz parte da evolução do Cráton São Francisco e dos ciclos e eventos geológicos sucessivos: Jequié, Transamazônico, Espinhaço e Brasileiro. A principal unidade lito-estratigráfica do embasamento é o complexo granítico-gnáissico de Lagoa Real, de idade Proterozóica inferior. Granitos, gnaiesses e albitos representam a principal fácies petrográficas encontradas na região. As rochas arqueano-proterozóicas da região estão agrupadas em três grandes unidades litoestratigráficas, Super Grupo São Francisco, Super Grupo Espinhaço (Sistema Dobrado Espinhaço e Série Chapada Diamantina) e Associação Pré-Espinhaço. O Complexo Granítico-Gnáissico Lagoa Real estende-se na direção norte-sul e abrange uma área superior a 2.000 km<sup>2</sup>. O Supergrupo Espinhaço é constituído por arenitos, conglomerados, siltitos, folhelhos, quartzitos, xistos e pela seqüência de vulcânicas ácidas, riolitos e riodacitos. Coberturas detrítico-laterítica terciárias e sedimentos aluviais quaternários completam o quadro geológico dessa região.

Existem nesta área, zonas de cisalhamento que são na maioria relacionada com as deformações oriunda da colisão N-S durante o evento Brasileiro (Fuzikawa, 1982; Villaça & Hashizume, 1982; Ribeiro et al, 1984; Lobato e Fyfe, 1990).



#### LEGENDA

- Areias e Argilas
- Arenitos, Arenitos Arcoseanos, Siltitos, Filitos e Xistos
- Riódacitos e Riólitos
- Albitos
- Monzogranitos, Quartzos, Sienogranitos, Ortognaisses e Granito
- Anfibólitos, BIF's, Gnaisses, Metachert, Mármore Metabasalto
- Granitoide, Migmatito, Ortognaisses

Figura (1) – Mapa geológico simplificado da área de estudo.

#### Bases de dados e Metodologia utilizada

Os levantamentos aerogeofísicos do Projeto São Timóteo teve suas linhas de vôo na direção leste-oeste (E-W) com espaçamento de 500 m e altura nominal de vôo de 150 m. Os dados gama espectrométricos incluem contagem total (CT) e contagens dos canais do Potássio (K), Urânio (U) e Tório (Th), em cps (contagem por segundo). Os dados magnéticos referem-se ao Campo Total (CMT). Os dados foram disponibilizados para fins de pesquisas acadêmicas pelo CPRM e foram utilizados, desde ano 2000, em diversos estudos (e.g. Pascholati et al, 2003; Santos, et al, 2006; etc).

**Dados Aeromagnéticos:** No pré-processamento dos dados aeromagnéticos foram corrigidos os efeitos das variações de altura dos vôos, variação diurna, remoção do campo magnético de referência internacional (IGRF), spikes, correções de heading e de LAG (erro sistemático causado pela distancia entre o sensor de medição e o sensor de posicionamento). No processamento, efetuou-se correções de nivelamento (mesmos valores para dados de linha de produção e linhas de controle) e

micronivelamento para eliminação de distorções das linhas de vôo (Minty, 1991). Os dados coletados neste aerolevantamento constam de vários saltos nas medidas, o que gerou um trabalho mais minucioso em seu processamento e interpolação, basicamente devido à ausência de um mecanismo de localização mais confiável, pois o levantamento consta da data de 1979 onde não se tinha o uso do GPS para navegação e posicionamento da aeronave. Na época do aerolevantamento, o sistema de localização geográfica da aeronave se baseava em cartas de navegação aérea e sistemas físicos baseados no efeito Doppler, e se utilizava fontes naturais como referência (árvore, rios, etc).

No presente trabalho, o método de redução ao Pólo foi substituído pelo método de redução ao Equador, visto que a inclinação magnética da área é de apenas -15°. Contudo, o resultado final não foi satisfatório na localização das fontes magnéticas. Acredita-se que baixos valores de inclinação magnética e variações na magnetização remanescente das rochas na área de estudo induzem efeitos indesejáveis nos resultados de métodos de redução. Na etapa seguinte do processamento de dados utilizou-se a técnica de interpolação por mínima curvatura (Biggs, 1974), com células de um quarto do valor do espaçamento das linhas de vôo (critério de Nyquist). Também foram utilizadas filtragens (direcionais) e de frequência (alta e baixa). Após esta etapa foram aplicadas técnicas geofísicas interpretativas, tais como derivada vertical, sinal analítico e deconvolução de Euler (Nettelton & Cannon, 1962, Clark 1997, Reid et al, 1990), nas análises dos dados corrigidos. O pacote de programas computacionais disponíveis em Geosoft® – Oásis Montag (2003) facilitaram as tarefas rotineiras de análise e de interpretação.

**Dados Gama-espectrométricos:** O pré-processamento destes dados incluiu análise estatística para verificação da consistência dos dados. Em seguida foram efetuadas correções dos efeitos de altura, do efeito Compton e do background. A interpolação dos dados foi realizada pelo método de mínima curvatura (Biggs, 1974). Neste caso também se seguiu o critério de Nyquist, com células de dimensão de ¼ do tamanho do espaçamento do aerolevantamento (125 m). A técnica de micronivelamento foi utilizada para eliminação de distorções das linhas de vôo em dados magnéticos, conforme procedimentos propostos por Minty (1991).

#### Resultados

As feições reveladas em levantamentos magnéticos começam a ter significado e coerência geológica a partir de mapas produzidos com base nas derivadas do campo magnético. No presente trabalho as análises de dados foram efetuadas em três etapas, nos quais foram avaliados os resultados de derivada vertical, sinal analítico e deconvolução de Euler.

**a) Derivada Vertical:** Os resultados de derivada vertical foram utilizados na identificação das feições magnéticas, conforme as práticas adotadas na literatura. Apresentam-se na Figura (2) os lineamentos e estruturas magnéticas identificadas. Na parte norte da área de estudo os lineamentos magnéticos identificados possuem direções

predominantemente NW-SE, coincidente com as direções preferenciais identificados nos levantamentos geológicos. Esta conformidade com as tendências estruturais é indicação de que as feições identificadas em mapas de derivadas verticais possuem significado geológico. Na parte sudoeste as feições magnéticas identificadas possuem formatos arqueados. As características estruturais desta região indicam ocorrências de eventos tectônicos de empurrão, na direção oeste para leste. Na parte sudeste foi identificado presença de uma estrutura quase circular, cujo significado é desconhecido. Os resultados também identificaram um lineamento na parte extremo sul, cujas características indicam ser de uma fratura preenchida com rochas básicas. Este lineamento não consta nos mapas geológicos locais.

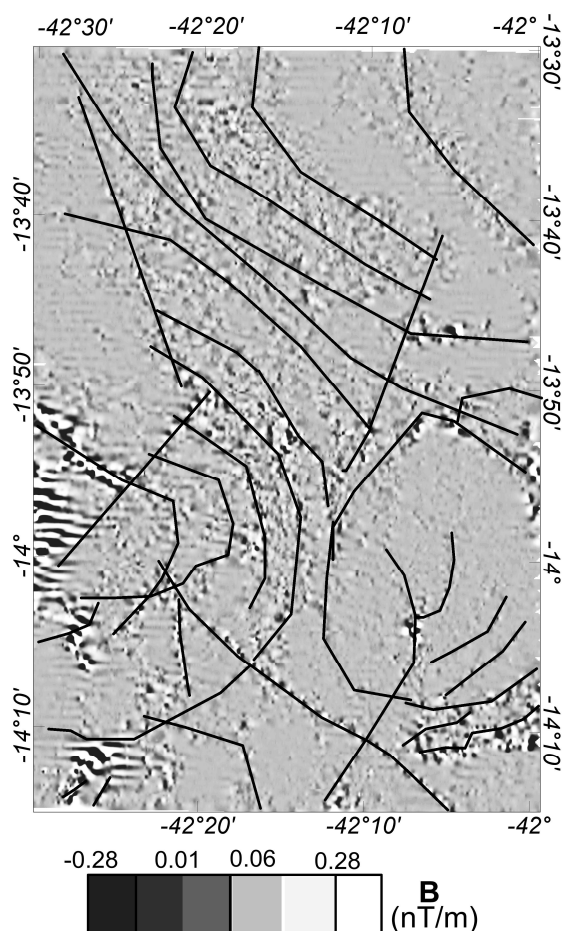


Figura (2) Derivada Vertical do campo magnético Corrigido

**b) Sinal Analítico:** O mapa do sinal analítico foi elaborado com a finalidade de delimitar as bordas de corpos que possuem contrastes magnéticos, na área de estudo. Ilustra-se na Figura (3) a distribuição geográfica das amplitudes das anomalias, conforme uma escala de cores selecionadas. De acordo com os resultados obtidos os magnitudes do sinal analítico variam de  $-0,03$  a  $+0,03$  nT/m. O fato notável neste mapa são as distribuições das anomalias ao longo dos lineamentos identificados no mapa da derivada vertical (Figura 2). É a indicação de

que lineamentos identificados no mapa da derivada vertical correspondem às localização dos corpos.

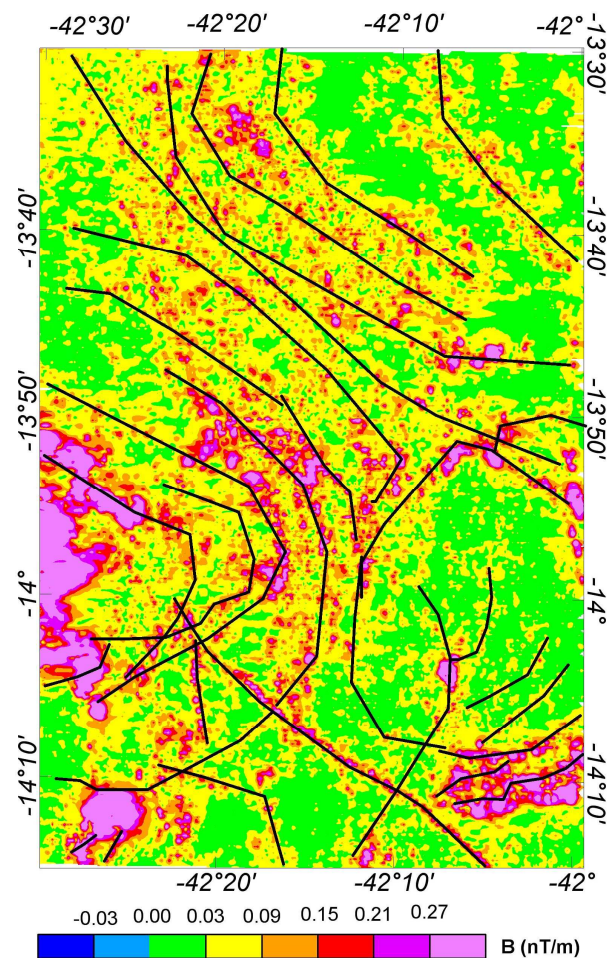


Figura (3) Sinal Analítico do Campo Magnético

**c) Deconvolução de Euler:** A técnica de deconvolução de Euler (Reid et al, 1990) foi utilizado para extrair informações sobre a profundidade das fontes magnéticas. Conforme práticas adotadas na literatura as variações nos graus de homogeneidade do campo são expressos como índices estruturais. No presente trabalho, algumas regras foram adotadas na utilização dessa técnica, a fim de minimizar erros na determinação das profundidades. As regras adotadas foram:

1. O limite estabelecido para a incerteza no valor da profundidade calculada, através da Equação de Euler, é de apenas 10%;
2. As estruturas magnéticas modeladas, consideradas aceitáveis, apresentam acúmulos de soluções e coerência em seus valores de profundidade; e
3. Para se caracterizar o melhor índice estrutural, a solução deverá apresentar coerências com estruturas geológicas locais (Hsu, 2002).

Os resultados obtidos são apresentados no conjunto de cinco mapas (a), (b), (c), (d) e (e) da Figura (4), correspondentes aos índices estruturais de 0, 0.5, 1, 2 e 3. Os mapas ilustram a localização dos corpos e as correspondências entre índices estruturais a características dos corpos identificados. O uso de escala



de cores nesses mapas indica informações sobre as profundidades dos corpos. Como no caso da Figura (3) foram sobrepostas também nessas mapas as feições magnéticas identificadas na derivada vertical. É fácil notar graus significativos de coerências com as feições indicadas no mapa da Figura (2). No caso de índice estrutural  $n=0$ , que representa contatos de diferentes tipos de rochas, os corpos identificados possuem profundidades que variam de 0 a 300m. Referindo-se ao caso de índice estrutural  $n=0.5$ , os resultados obtidos permitiram identificação não somente das principais falhas mapeadas em levantamentos geológicos, mas também outros que não foram mapeados. As profundidades inferidas variam de 100 a 500m. No caso de índice estrutural  $n=1$  (diques ou sills), encontramos a profundidade no intervalo de 200 a 750m. O alto grau de correspondência nos mapas da Figura (4) é a indicação de que os resultados de deconvolução de Euler possuem significado geológico.

#### Correlações com Anomalias Radiométricas

De acordo com dados de levantamentos radiométricos os valores médios dos principais radioelementos obtidos são: 1,65% para o Potássio, 7,7 ppm para o Urânio e 18,2 ppm para o Tório. As figuras (5a, b e c) ilustram as distribuições espaciais dos radioelementos eU, eTh e K, respectivamente, na área de estudo. Nota-se que a área de exploração do urânio, que são mineralizações conhecidas, coincide com os lineamentos magnéticos ao Sul evidenciado acima e com estruturas magnéticas observadas no mapa de derivada vertical. Outra informação relevante observada a partir dos resultados da deconvolução de Euler é a forma geométrica das rochas que contêm o urânio. Essas estruturas seguem a tendência de arcos, como citado por Oliveira et al (1985).

O mapa de Urânio também indica correlação com o relevo da região, sendo que as principais anomalias deste elemento se encontram em áreas com baixo relevo. Isto acontece, em grande parte, devido ao tipo de informação dos levantamentos espectrométricos, que é rasa, ou seja, são largamente influenciadas pelo processo de lixiviação, uma vez que uma grande parte do concentrado localizasse próximos à rede de drenagem do terreno.

#### Conclusões

Os principais resultados alcançados no presente trabalho foram:

- 1- Os lineamentos magnéticos, evidenciados com a derivada vertical do campo magnético, evidenciam os traços da geologia marcada pela colisão N/S no Brasileiro com arraste de informações geológicas E/W e explicam as estruturas mineralizadas ao longo das zonas de cisalhamento como fatores de combinações metassomática e retrometamorfismo (rochas do Supergrupo Espinhaço), (Lobato et al, 1985). As feições estruturais marcadas por traços magnéticos estão condizentes com a progressiva deformação causada por esta colisão.
- 2- Os resultados de sinal analítico apresentaram graus notáveis de correspondência com lineamentos identificados no mapa de derivada vertical;
- 3- Os modelos de falhas (índice estrutural de 0,5) e de contatos lineares (índice estrutural de 1) da deconvolução

de Euler foi o que apresentaram bons resultados, que se assemelham aos produzidos pelos mapas de derivadas (lineamentos magnéticos). As profundidades das fontes situam na maior parte até 300 m, revelando uma boa coerência com a geologia marcada e com o modelo digital do terreno.

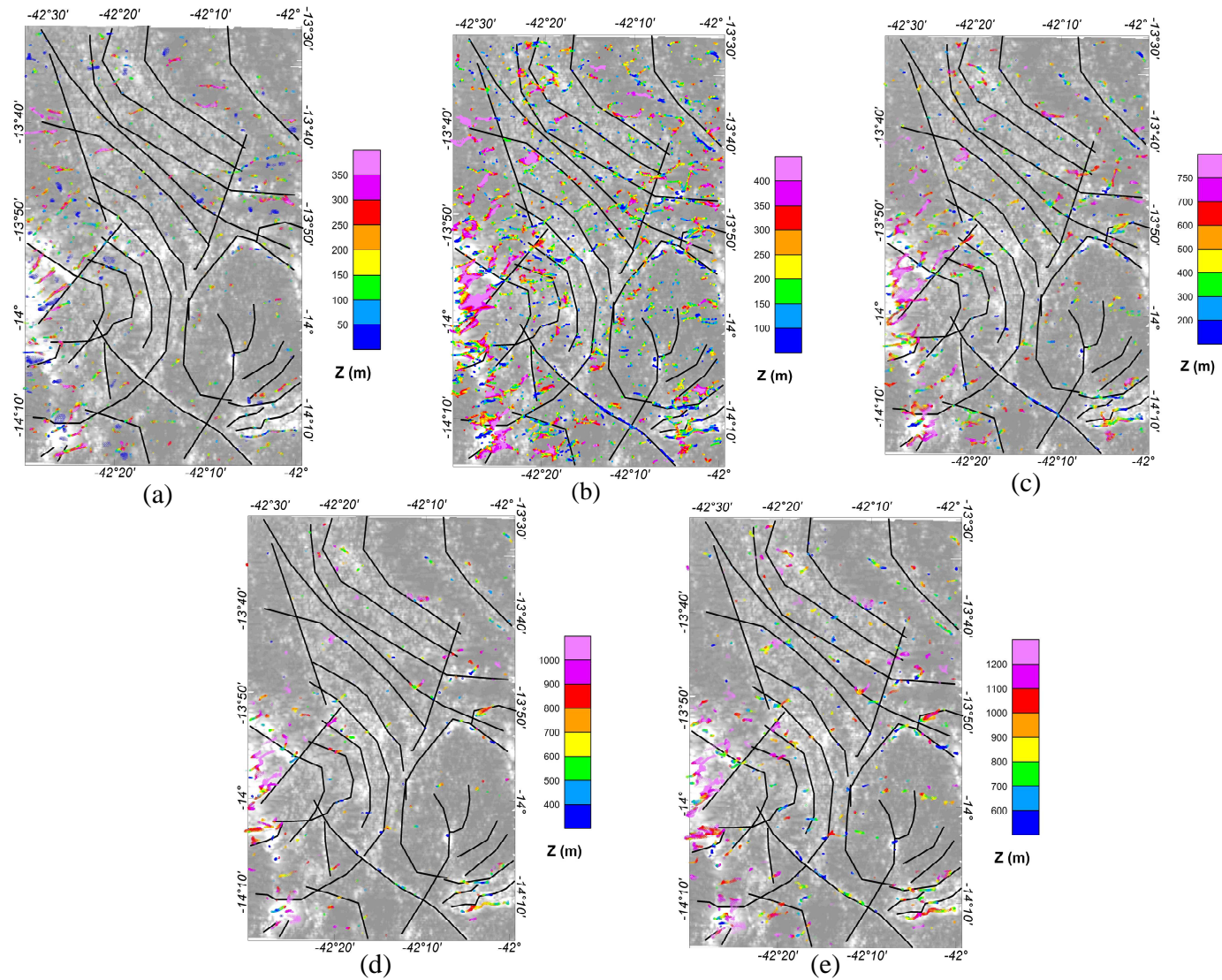
#### Agradecimentos

Agradecemos Drs. Jean-Marie Flexor e Cosme F. Ponte Neto pelo apoio e colaboração recebida na fase inicial deste trabalho.

#### Referencias

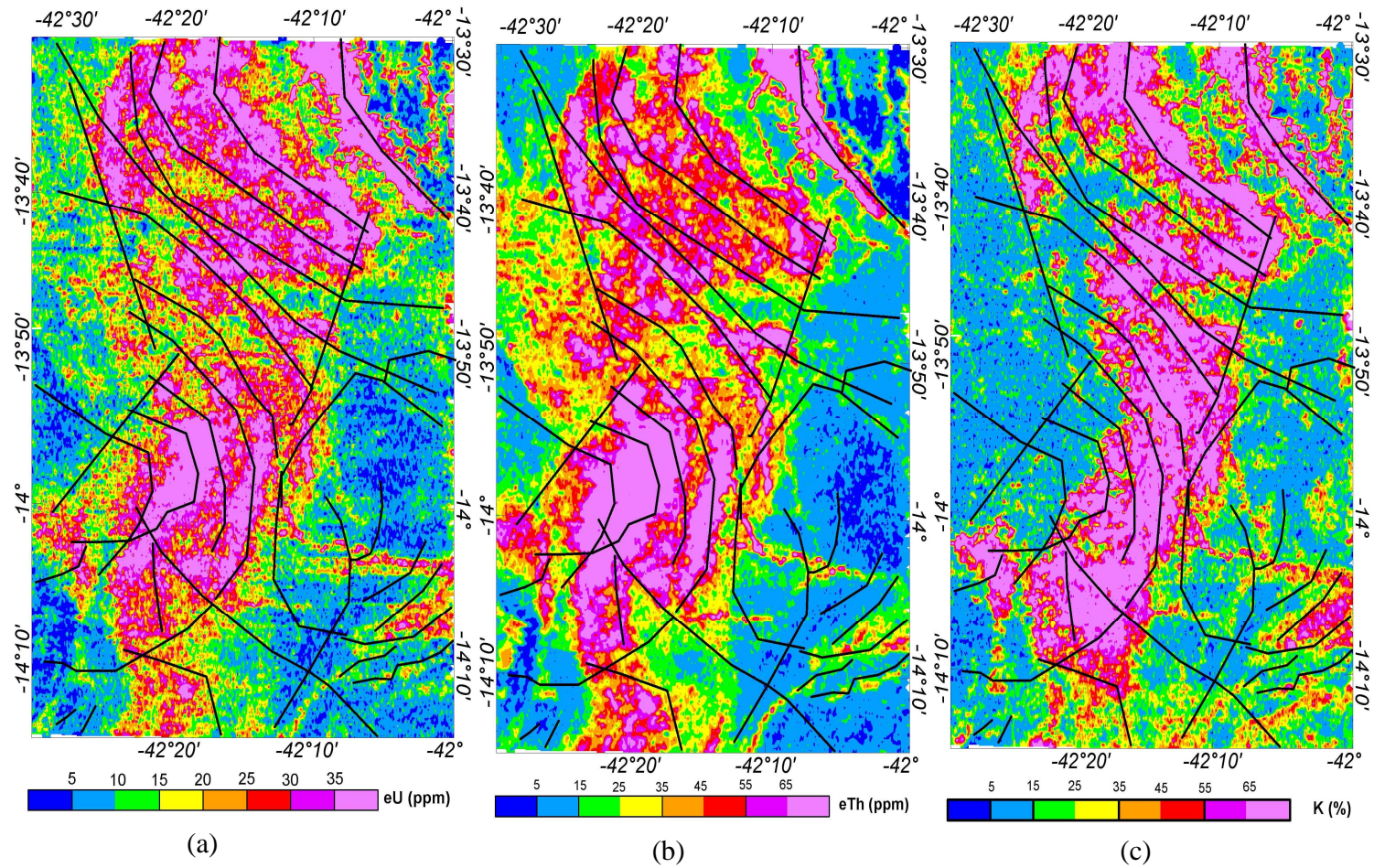
- Almeida, F.F.M.de, Hassui Y.** 1984, O Pré-Cambriano do Brasil, Ed. Edgard B1"ucher, São Paulo, 378p.
- Briggs I.C.**1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*,39:38-48.
- CPRM, 1995**, Catálogo geral dos produtos e serviços. Geologia. Levantamentos Aerogeofísicos. Base de Dados Aerogeofísicos, Rio de Janeiro, Geologia e Recursos Hídricos, 367p.
- Lobato, L.M.**, 1985, Metamorfism, metasomatism and mineralization at Lagoa Real, Bahia, Brazil", Ph.D Thesis, Univ.of Western Ontario, London, 305p.
- Minty, B.S.R.**, 1991, Simple micro-levelling for aeromagnetic data. *Explor.Geophys.*,22:591-592.
- Nettleton L.L & Cannon J.R.** 1962. Investigation of upward continuation system. *Geophysics*, 27: 796-806.
- Oliveira A.G., Fuzikawa K., Moura L.A.M., Raposo C.** 1985. Província urinífera de Lagoa Real – Bahia. In: C. Schobbenhaus. (ed.). Principais Depósitos Minerais do Brasil, 1, DNPM-MME: 105-120.
- Pacholati, E.M., Silva, C.L., Costa, S.S., Osako, L.S., Amaral, G., Rodrigues, I.P.**, 2003, Novas Ocorrências de Urânio na Região de Lagoa Real, a partir da superposição de dados geofísicos, geológicos e de sensoriamento remoto, *Revista Brasileira de Geociências* - 33 (2-Supl. 91- 98).
- Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millett, A.J. e Somerton, I.W.**, 1990, Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution, *Geophysics*, vol 55 -num 01, 80-91.
- Santos, E.F.S.**, 2006, Espectrometria Gama Aérea da Província Uranífera de Lagoa Real (Caetité-BA : Aspectos Geoambientais e Distribuição da dose absorvida no ar, Tese de mestrado, IRD/CNEN.





**Figura 4** – Deconvolução de Euler dos dados aeromagnéticos com índices estruturais (0, 0.5, 1, 2 e 3)





**Figura 5** – Distribuição do radioelementos (eU, eTh e K) na área do Projeto São Timóteo