

CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA DA ANOMALIA RIO SECO NO SUDESTE DO ESTADO DO PARÁ, POSSÍVEIS MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS EM TERRENOS ARQUEANOS.

Divanir Conego Junior^{1,*}
Lilia Albuquerque da Silva¹
Vanessa Ribeiro Biondo²
João Adauto de Souza Neto²

10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v27n2p123-142

1- Programa de Pós-Graduação em Geociências da UFPE,

junior_conego@hotmail.com; lilia_albuquerque@hotmail.com

2-Departamento de Geologia da UFPE, van.biondo@gmail.com; adauto@ufpe.br

* - autor correspondente

RESUMO

O sudeste do Estado do Pará é conhecido mundialmente pelas ocorrências de ouro em depósitos filoneanos (primários) e em depósitos *placer* (secundários). Os depósitos primários são bem menos pronunciados que os aluvionares. Essa região apresenta diversas anomalias magnéticas associadas principalmente às ocorrências de ouro primário. Este trabalho teve como foco a caracterização geofísica da anomalia magnética Rio Seco, visando a proposição desta como um corpo mineralizado, através da determinação de suas principais características físicas e contexto geológico. O corpo anômalo possui formato irregular com extensão maior na direção NE-SW, obtido a partir do processamento e interpretação geofísica que é concordante com o *trend* estrutural da região. A profundidade média para a anomalia Rio Seco foi de 134 metros, obtida a partir da Deconvolução de Euler e o contraste de susceptibilidade varia de 0.028 a 0.146 SI obtido a partir da inversão 3D. Diante dos resultados obtidos existe a possibilidade de a anomalia Rio Seco ser uma intrusão que possui diferenciação magmática ou até mesmo ser um núcleo *greenstone belt* preservado tectonicamente. Furos de sondagem são necessários para confirmar as hipóteses sugeridas.

Palavras Chave: Geofísica Aplicada, Província Mineral de Carajás, Inversão 3D, Magnetometria, *Greenstone Belt*.

ABSTRACT

The southeastern state of Pará is known worldwide for gold occurrences in both filonous (primary) and placer (secondary) deposits. Primary deposits are much less pronounced than alluvial deposits. This region presents several magnetic anomalies associated mainly to the occurrences of primary gold. This work focused on the geophysical characterization of the Rio Seco magnetic anomaly, aiming at the proposition of this as a mineralized body, through the determination of its main physical characteristics and geological context. The anomalous body has an irregular shape with greater extension in the NE-SW direction, obtained from the geophysical processing and interpretation which agrees with the structural trend of the region. The mean depth for the Rio Seco anomaly was 134 meters, obtained from the Euler Deconvolution and the susceptibility contrast varies from 0,028 to 0,146 SI obtained from the 3D inversion. In view of these results there is the possibility that the Rio Seco anomaly is an intrusion that has magmatic differentiation or even be a tectonically preserved greenstone belt core. Drill-hole studies are necessary to confirm the hypotheses suggested.

Keywords: Applied geophysics, Carajás Mineral Province, 3D Inversion, Magnetometric, *Greenstone Belt*

INTRODUÇÃO

O sudeste do Cráton Amazônico é uma região de ampla perspectiva mineral (Fig. 1C). Nesse segmento pode-se citar a reserva de minério de ferro de alto teor, representado pelas minas inseridas no complexo de Carajás, conhecido mundialmente. O minério de ferro foi descoberto no complexo em 1967 e entrou em produção somente em 1985 devido a implementação da infraestrutura para a mineração (Vale, 2013). Porém, o panorama mineral desta área é muito mais amplo, contando com reservas substanciais de recursos minerais, em destaque ouro, manganês, cobre, níquel, urânio, prata, paládio,

platina, dentre outros (DOCEGEO, 1988; Dardene & Schobbenhaus, 2001; Tassinari & Macambira, 2004).

Nos últimos anos, a partir do fomento do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), com mapeamento geológico, análise geoquímica e principalmente aerogeofísica de alta resolução, tornou-se possível a identificação de inúmeras áreas com características propícias a mineralizações (Costa-Silva, 2011). Isto foi comprovado através de mapeamento geológico e furos de sondagem, ou apenas a comparação das áreas identificadas com áreas de mineralizações comprovadas e bem estudadas.

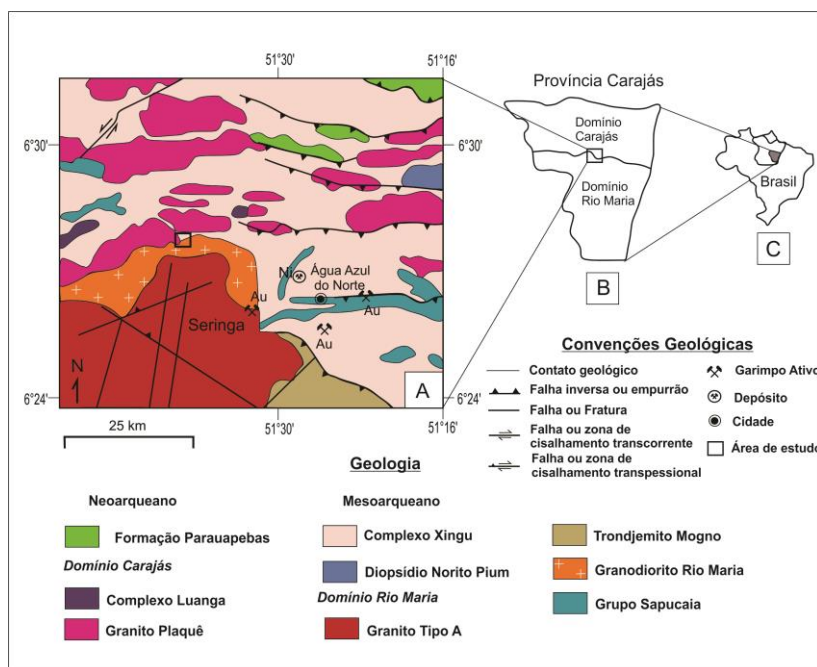


Figura 3: Mapa geológico regional, demonstrando as principais unidades litológicas e estruturas da área de estudo (A), principais domínios tectônicos a qual a área de estudo está inserida (B) e a localização da área de estudo no Estado do Pará (C) (modificado de Vasquez *et al.*, 2008b; Oliveira *et al.*, 2010, Almeida *et al.*, 2011). Qual é litologia da Fm. Parauapebas; Complexo Xingu; Grupo Sapucaia; Complexo Luanga

A área de estudo está inserida na Província Mineral de Carajás entre o

limite norte do domínio tectônico Rio Maria e o sul do domínio tectônico

Carajás (Fig. 1B) (Vasquez *et al.*, 2008a) é recortada por zonas de falhas e pelo contato de três litologias principais arqueanas: o granito Plaquê, granodiorito Rio Maria, Complexo Xingu e, a sul, a intrusão do granito paleoproterozóico Seringa; possui, também, em seu entorno o *greenstone belts* de Rio Maria. Na região de estudo existem diversas ocorrências, garimpos e indícios de mineralizações de ouro associadas aos contatos entre as litologias apontadas acima e também a zonas de falhas identificadas no mapeamento geológico (Faraco *et al.*, 2004).

As mineralizações auríferas na região ocorrem principalmente em concentrações secundárias de ouro (colúvio-aluvionares), próximo a zonas de falhas (Fig. 1A) identificadas em superfície e contatos geológicos (Delgado *et al.*, 1991). As ocorrências auríferas primárias (filoneana) são menos frequentes e ocorrem principalmente em *trends* entre os contatos do terreno granito-*greenstone* que foi preservado tectonicamente. Tais associações podem conter ouro e prata associada a veios de quartzo nas zonas de cisalhamento (Delgado *et al.*, 1991). Essas feições são identificadas a partir de dados geofísicos aerotransportados de alta resolução, onde todas as ocorrências estão associadas às anomalias magnéticas.

As características geológicas, tectônicas e geofísicas da região, onde a anomalia Rio Seco está inserida, possui uma área de forte perspectiva mineral para a mineralização aurífera primária, tendo em vista as ocorrências minerais identificadas em seu entorno (Faraco *et al.*, 2004).

Neste trabalho será desenvolvida a caracterização geofísica da fonte magnética associada à anomalia Rio Seco, trazendo à luz as principais características físicas do corpo em subsuperfície, para destacar uma área

possivelmente favorável a exploração mineral de ouro primário, levando-se em conta a correlação entre a geofísica e geologia.

ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS

A Província Carajás está inserida na Província Amazônia Central (Tassinari & Macambira, 2004), na porção leste do Cráton Amazônico onde é subdividida em duas unidades geotectônicas principais, representadas pelos domínios Rio Maria e Carajás (Santos *et al.*, 2000; Santos, 2003; Vasquez, 2008a). Os domínios apresentam evolução distinta, enquanto que no Domínio Rio Maria existe a ocorrência de porções de *greenstone belts*. O Domínio Carajás possui sequências metavulcano-sedimentares diversas com unidades ultramáficas raras. Ambos domínios apresentam magmatismo mesoarqueano, porém o Domínio Rio Maria apresenta tonalito-trondhjemitóide-granodiorito (TTG), sanukitóide e granito. Já no Domínio Carajás é constituído por magmatismo principal granítico. A região de estudo deste trabalho está inserida no limite entre estes domínios geotectônicos demonstrando uma grande potencialidade mineral (Fig. 1B).

O Domínio Rio Maria consiste em Terrenos Granito-*Greenstone* Rio Maria (Hunh *et al.*, 1988) com idade de 3,00 - 2,86 Ga (Macambira & Lafon, 1995; Dall'Agnol *et al.*, 2006). Este domínio consiste em sequências metavulcano-sedimentares do tipo *greenstone belt* e granitóides arqueanos, recobertos por sedimentos (rochas sedimentares?) do Grupo Rio Fresco, de idade arqueana. Estas litologias são cortadas por granitos tipo-A, paleoproterozóicos, da Suíte Jamon (Dall'Agnol *et al.*, 2005).

Os *greenstone belts* foram subdivididas nos grupos Gradaús, Serra do Inajá, Babaçu, Lagoa Seca, Tucumã e Sapucaia

e sua gênese se deu com processo vulcânico máfico-ultramáfico (Vasquez *et al.*, 2008a), gerando maior abundância de komatiitos e basaltos toleíticos com idades que variam de 2,97 a 2,9 Ga (Macambira 1992; Pimentel & Machado 1994; Souza 1994; Oliveira, 2009).

O domínio Rio Maria é formado em sua grande maioria por magmatismo do tipo TTG, e uma pequena porção formada por rochas sanukitóides com alto teor de Mg representadas pelo granodiorito Rio Maria (2.874 ± 10 Ma, Macambira & Lancelot, 1996; 2872 ± 5 Ma, Pimentel & Machado 1994), e leucogranitos potássicos de afinidade cálcio-alcálica, (Dall'Agnol *et al.*, 2006; Oliveira *et al.*, 2009). Mineralizações auríferas são encontradas nos limites do granodiorito Rio Maria associadas a zonas de cisalhamento regionais que interceptam as sequências *greenstone belts* dispersas na região (Faraco *et al.*, 2004).

O domínio Carajás foi denominado por Araújo *et al.* (1988) como Cinturão Itacaiúnas e apresenta como subdomínios tectônicos principais os sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento. A Falha Carajás representa a principal estrutura do sistema transcorrente de mesmo nome, composta por lineamentos descontínuos, anastomóticos, cuja direção preferencial é NW-SE (Pinheiro, 1997; Carneiro *et al.*, 2006) Que tipo de falha?. As rochas

deste domínio pertencentes à assembleias do embasamento e da cobertura, sendo estas últimas representadas por sequências vulcano-sedimentares de idade arqueana (Pinheiro, 1997).

O domínio Carajás está representado na área de estudo pelo Complexo Xingu (Silva *et al.*, 1974) e pela Suíte Plaquê (Fig. 2). O complexo Xingu corresponde a um conjunto de rochas gnáissicas tonalíticas, trondjemíticas, granodioríticas, graníticas e anfibolíticas (Araújo & Maia, 1991). Através do método U/P em zircão foi obtido idade de 2.859 ± 2 Ma para a migmatização dessas rochas (Machado *et al.*, 1991; Carneiro, 2006).

Contemporâneo à formação dos *greenstone belts* neoarqueanos que a região apresenta, ocorreu intenso magmatismo sintectônico granítico, subalcalino tipo A e cálcio-alcálico em 2,76-2,73 Ga, representado por corpos alongados segundo a direção WNW-ESSE. Como representante deste magmatismo pode ser indicado o granito Plaquê (Fig. 2). Este granito tem sua gênese ligada a fusão crustal durante o desenvolvimento do Cinturão Itacaiúnas (Jorge João & Araújo, 1992) com idades de 3,19 a 2,97 Ga (Sm-Nd) e valores negativos de ϵ_{Nd} (-0,38 e -2,06) indicando participação de fontes crustais mesoarqueanas na geração desta associação (Vasquez *et al.*, 2008).

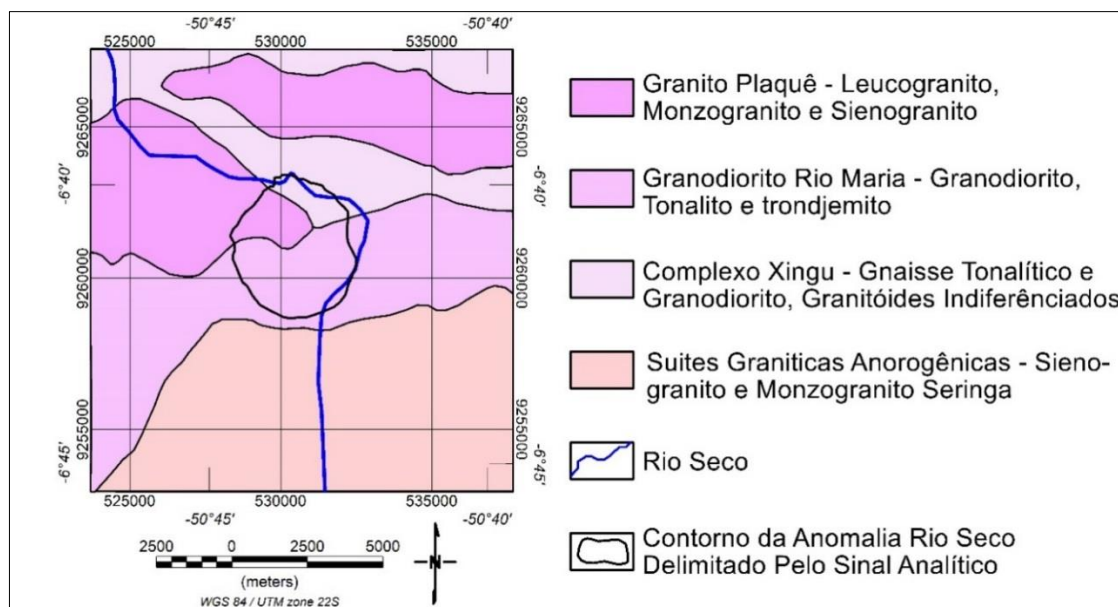


Figura 4: Mapa geológico da área de estudo (modificado de Faraco *et al.*, 2004).

MÉTODOS

Os levantamentos geofísicos vêm sendo aplicados com sucesso na identificação de novos depósitos mineralógicos mesmo em áreas exploradas a mais de 40 anos, como Bathurst Mining Camp, Canadá (Chung, 2003; Keating *et al.*, 2003). Esses levantamentos podem também evidenciar novas estruturas que possam abrigar mineralizações de interesse econômico (Ribeiro & Mantovani, 2017), e auxiliar mapeamentos geológicos e estruturais (Ribeiro *et al.*, 2013).

A magnetometria se baseia no contraste de magnetização associada a diferentes estruturas geológicas, tanto aflorantes quanto em subsuperfície. Esse método tem sua maior contribuição na localização e caracterização de depósitos minerais, mapeamento de estruturas em bacias sedimentares e definição de domínios magnéticos (Blakely, 1996; Hinze *et al.*, 2013).

A gamaespectrometria fundamenta-se na detecção de radiação gama oriunda do decaimento natural de núcleos atômicos instáveis. Os raios gama detectados por aerolevantamentos

apresentam energia de interesse entre 0,2 e 2,81 MeV, que representam o espectro de energia natural dos elementos equivalentes urânio (eU), tório (eTh) e do elemento potássio (K). Essa energia pode ultrapassar até 30 cm de solo e algumas centenas de metros na atmosfera até que seja totalmente desintegrada (IAEA, 1991).

O aerolevantamento foi efetuado no ano de 2014 pela CPRM contando com linhas de controle e de voo com 10000 metros e 500 metros de espaçamento entre as linhas de aquisição, e com altura nominal de 100 metros.

A análise do mapa de campo magnético residual (Fig. 3C) foi possível a partir da retirada da influência do campo magnético regional através do espectro de potência (Spector & Grant, 1970), que possibilita a identificação das influências de corpos localizados em diversas profundidades no sinal magnético (Fig. 3A). Com a retirada das influências profundas e ruídos superficiais do campo magnético total (CMT) (Figura 3B), foi obtido o mapa de campo magnético residual (CMR) evidenciando uma anomalia com magnetização normal (Fig. 3C).

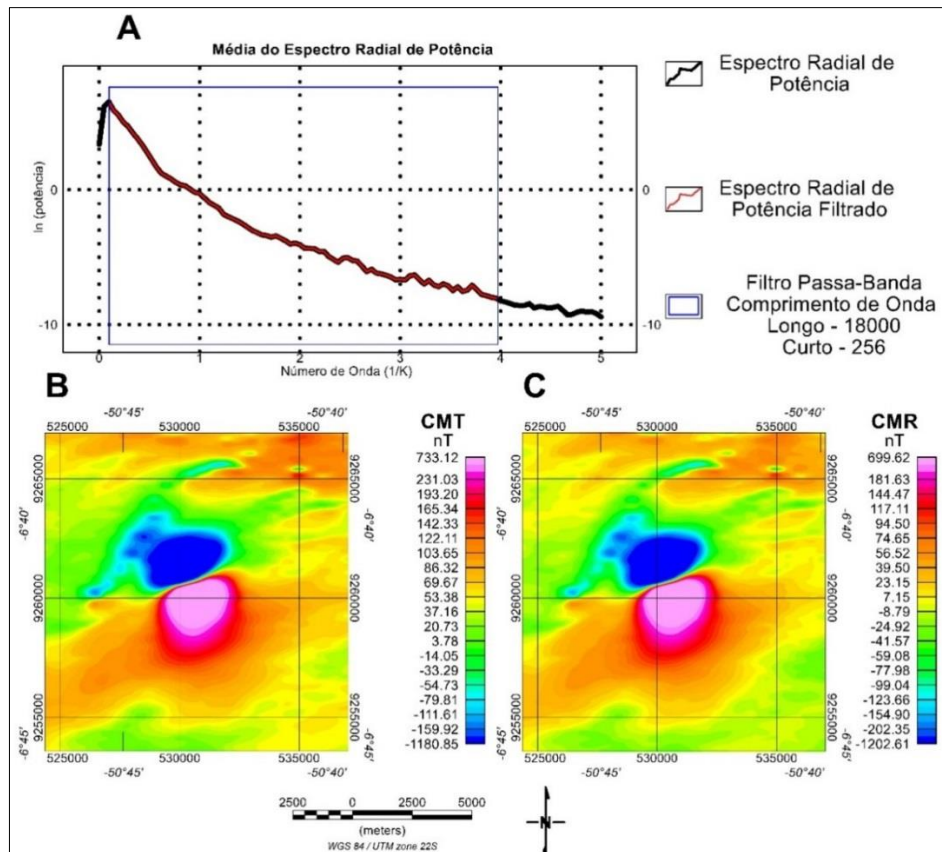


Figura 5: Demonstração da filtragem regional residual. O espectro de potência utilizado para remover a influência regional da anomalia Rio Seco (Spector & Grant, 1970), com o filtro passa banda utilizado (A). O campo magnético total (B). O campo magnético residual filtrado a partir do espectro de potência (C).

A partir da retirada do campo magnético regional foi possível uma análise criteriosa na área de estudo, observando através da tentativa de redução ao polo através do algoritmo proposto por Cooper e Cowan (2005) utilizando a inclinação, declinação e intensidade do campo magnético terrestre obtidos pelo IGRF calculado para a data do aerolevantamento como -7.88° , -19.91° e 2506 nT, respectivamente (Fig. 4A). Para a redução ao polo era esperado uma anomalia positiva, que seria centrada sobre o corpo geológico gerador da anomalia, porém nota-se que uma anomalia dipolar foi gerada, demonstrando que o corpo geológico possui magnetização remanente. Também foi utilizado o algoritmo de Fedi *et al.*, (1994) para efetuar a redução

ao polo implementado por Cordani e Shukowsky (2009), que parte de uma janela amostral de trinta pares de inclinação e declinação aleatórios, com número de iterações definido previamente e raio de confiança de 95%. O método busca o melhor par de inclinação e declinação, sempre excluindo o pior resultado e iniciando novo ajuste até que os resultados encontrados estejam todos dentro de uma dispersão do raio de confiança de 95%, gerando o mapa de campo residual reduzido ao polo com os melhores valores de inclinação e declinação. Para a anomalia de Rio Seco foram encontrados a inclinação de 67.1° , declinação de -16.71° , demonstrando assim que a anomalia em questão possui magnetização remanescente (Fig. 4B).

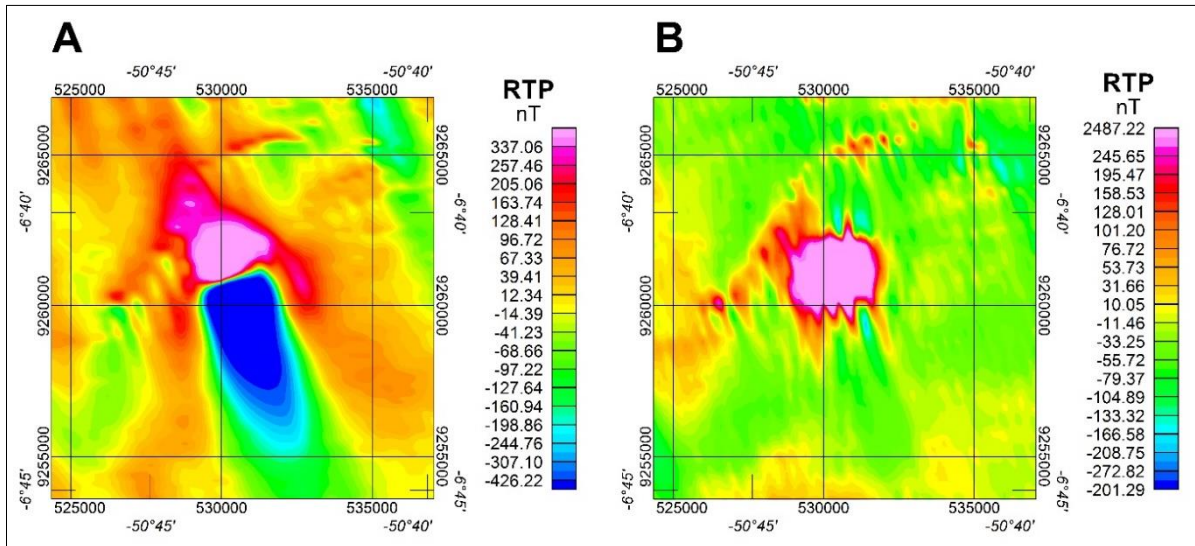


Figura 6: mapas demonstrando a redução ao polo pelos algoritmos de Cooper e Cowan (2005) (A) e de Fedi *et al.*, (1994) (B).

A etapa seguinte foi a determinação dos limites laterais da fonte geradora da anomalia magnética. Para tanto foi utilizada a amplitude do sinal analítico (ASA), que é uma função

deduzida a partir dos gradientes ortogonais do campo magnético residual (Roest *et al.*, 1992) com a seguinte formula:

$$|A(x, y, z)| = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2\right]} \quad (1)$$

onde $|A(x, y, z)|$ é o módulo da amplitude do sinal analítico nas coordenadas x, y e z e $\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial T}{\partial y}$ e $\frac{\partial T}{\partial z}$ são os gradientes direcionais nas direções cartesianas x, y e z, respectivamente. A

amplitude do sinal analítico corresponde a uma função simétrica com seu máximo coincidindo com o contato entre o corpo responsável pela anomalia magnética e sua rocha encaixante (Fig. 5).

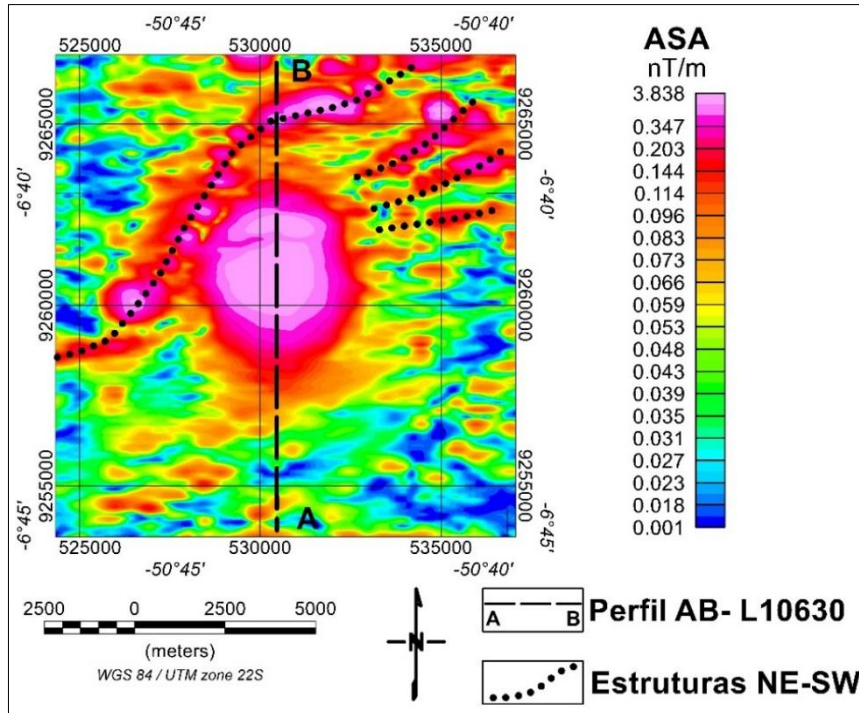


Figura 7: Mapa da amplitude do sinal analítico (ASA) para a anomalia Rio Seco, com o perfil de análise AB e com as principais estruturas interpretadas.

A ASA conseguiu delimitar as bordas do corpo gerador da anomalia magnética, mostrando um formado aproximadamente circular. Outro aspecto que chama muito a atenção é a anomalia delimitada pela ASA a NW do corpo, que mostra uma estruturação NE-SW. Pode se notar ainda que a NE do corpo existe a assinatura de mais duas estruturas, com forte intensidade que não teve sua continuidade a SW realçada pela

ASA, sendo necessário a utilização de outro método de realce para comprovar que tais estruturas cortam o corpo responsável pela anomalia Rio Seco. Com esse objetivo, optou-se pela inclinação do sinal analítico (ISA), denominada também de *tilt derivative* (Miller & Singh, 1994). O ISA se baseia na normalização da deriva vertical pela derivada horizontal total e tem a seguinte formula:

$$ISA(x, y, z) = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2}} \right) \quad (2)$$

onde $\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial T}{\partial y}$ e $\frac{\partial T}{\partial z}$ são os gradientes direcionais de x, y e z do campo magnético, respectivamente e varia de $-\frac{\pi}{2}$ a $+\frac{\pi}{2}$.

Com a análise da ISA foi possível a comprovação da continuidade das estruturas a SE, complementando o filtro ASA. As estruturas identificadas são parcialmente NE-SW, o que é

concordante com a tectônica da região. Nota-se ainda que existem duas estruturas principais que limitam o corpo a NW e a SE. Ainda pode se observar uma estrutura que corta a parte central do corpo anômalo. As três estruturas podem representar um alívio de pressão ocasionado pelo tectonismo da região que possibilitou o movimento do corpo e seu encaixe e uma possível mineralização.

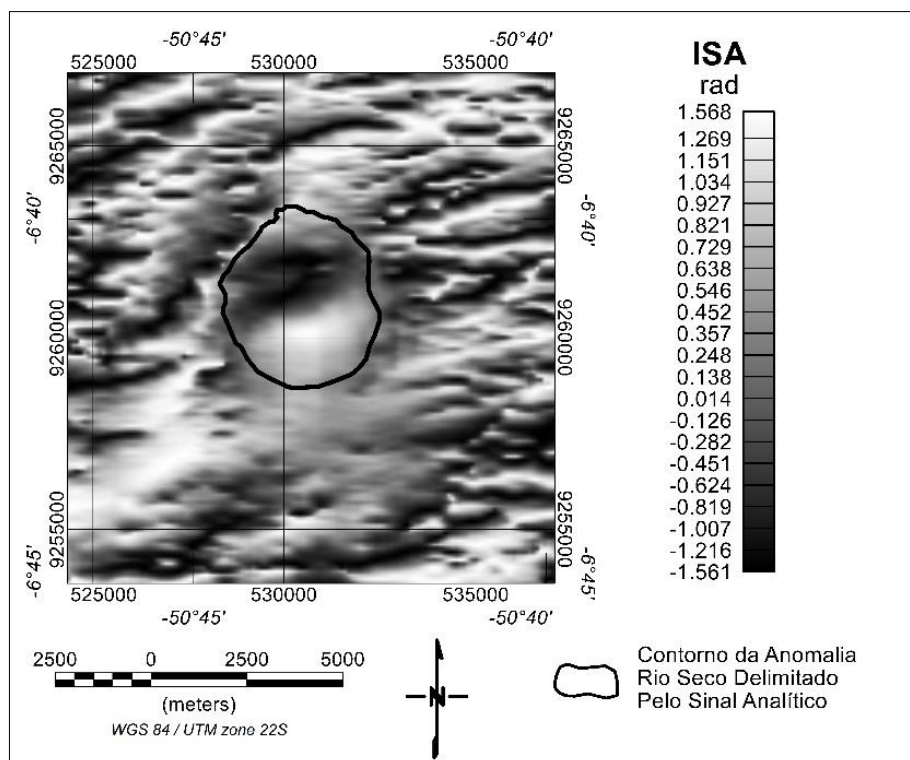


Figura 8: Mapa da inclinação do sinal analítico (ISA) para a anomalia Rio Seco e o contorno obtido pela ASA.

Analisando conjuntamente os resultados obtidos para uma linha de aquisição centrada no corpo anômalo (perfil AB na Fig. 5), é possível notar a aplicação precisa dos métodos geofísicos para o realce do corpo anômalo. Os métodos aplicados individualmente para o destaque da fonte anômala podem ser utilizados em conjunto, levando-se em conta que cada método possui sua proposição matemática, melhor solução e resolução. Porém quando utilizados em

conjunto na análise espacial da anomalia destacam os aspectos mais inerentes à anomalia magnética. Tal perspectiva gera, assim, uma confiança maior na interpretação. Tal fato pode ser evidenciado na Figura 7, onde utilizou-se uma linha de voo (linha 10630) centrada na anomalia magnética (Fig. 5) com o objetivo de demonstrar a utilização conjunta dos vários métodos de realce utilizados neste trabalho.

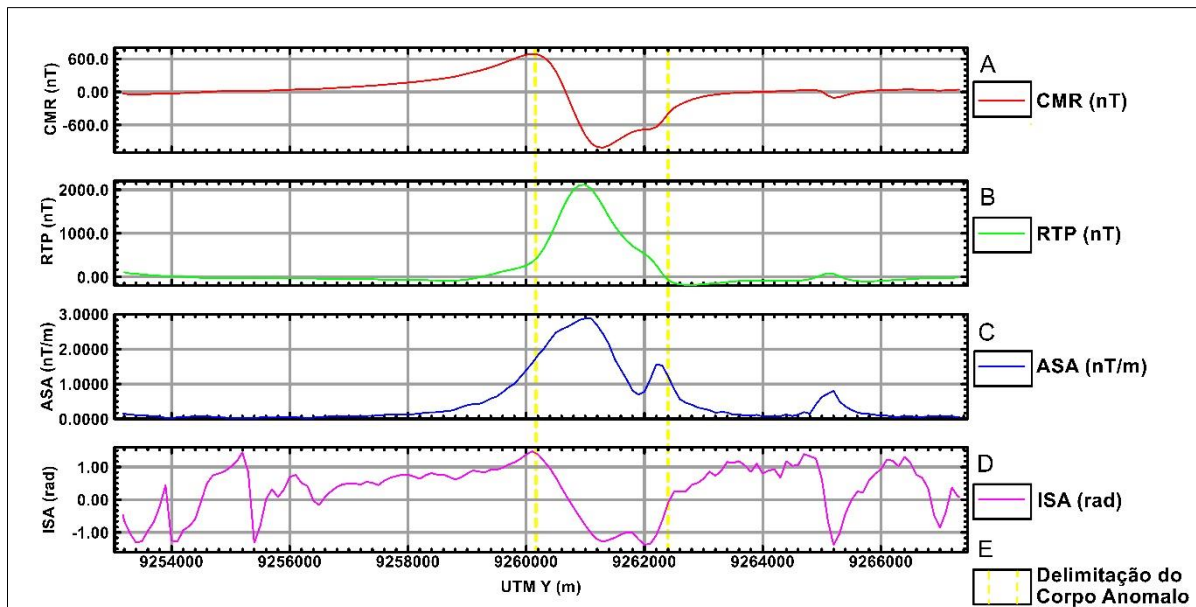


Figura 9: Demonstração dos métodos empregados na delimitação da anomalia Rio Seco (linha vertical em amarelo). Em A o perfil do campo magnético residual para a linha 10630. Em B o perfil da redução ao polo (Cooper & Cowan, 2005). Em C o perfil da amplitude do sinal analítico (Roest *et al.*, 1992). Em D o perfil da inclinação do sinal analítico (Miller & Singh, 1994).

Após a caracterização da fonte anômala é necessário identificar se a anomalia é aflorante. Para uma análise mais rápida pode ser utilizado o mapa ternário dos radio elementos tório (Th) e urânio (U) em ppm e potássio (K) em %. Esses elementos possibilitam uma análise da litologia levando em consideração a variação desses elementos nas litologias e a ampla distribuição dos mesmos nas rochas crustais (Ribeiro *et al.*, 2013). A partir da interpretação do mapa ternário dos radioelementos é possível separar as litologias da área de estudo, a falha NE-SW a NE do corpo anômalo, a qual não foi identificada no mapa geológico (Figura 2), bem como identificar a ação do curso d'água no entorno da anomalia

estudada, que deu nome à anomalia deste trabalho. Com a análise criteriosa da área de estudo observou-se que não há indícios que o corpo da anomalia Rio Seco seja aflorante ou mesmo tenha gerado indícios de alteração em superfície (Figura 8), demonstrando que o seu encaixe ocorreu em profundidade.

Com a interpretação dos dados geofísicos é possível notar a importância deste trabalho, pois na área são identificadas estruturas NE-SW que não constam nos mapas geológicos (Fig. 6). Uma dessas estruturas apresenta reflexos em superfície, identificada pela diminuição da contagem dos radioelementos (perfil pontilhado em branco na Fig. 8).

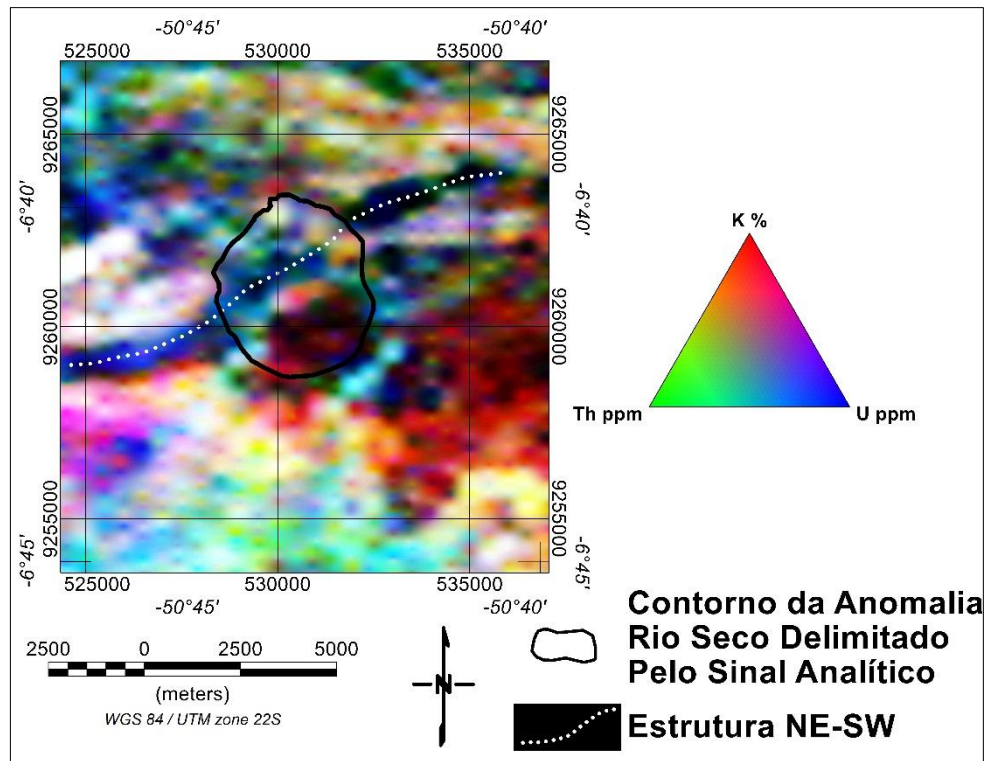


Figura 10: Mapa ternário, com padrão RGB (Red, Green e Blue), da distribuição superficial dos radioelementos Urânio (ppm), Tório (ppm) e Potássio (%), da região da anomalia Rio Seco com o contorno dos limites laterais obtido do ASA e a delimitação de uma estrutura NE-SW interpretada.

A região estudada conta com diversas mineralizações auríferas associadas à anomalias magnéticas, a limites litológicos e falhas que estão bem definidos em superfície. Nesse contexto, a falta de mineralizações reconhecidas em superfície ligadas a anomalia Rio Seco pode se dar pelo fato de a mesma se encontrar em profundidade.

Para a estimativa da profundidade de topo da anomalia magnética Rio Seco,

utilizou-se o método da Deconvolução de Euler (Thompson, 1982). Uma vantagem deste método é que ele independe da direção da polarização magnética, podendo ser aplicado para qualquer latitude e longitude e também independe do conhecimento prévio da fonte geológica que causa a anomalia magnética (Hinze *et al.*, 2013). A Deconvolução de Euler é a solução da seguinte equação:

$$x' \frac{\partial T_T(x, y, z)}{\partial x} + z' \frac{\partial T_T(x, y, z)}{\partial z} + N \times T = x \frac{\partial T_T(x, y, z)}{\partial x} + N \times T_T(x, y, z) \quad (3)$$

onde $T_T(x, y, z)$ é o campo magnético observado, T é o nível de base do campo, N é o índice estrutural indicado pelo usuário e x' e z' as localizações da solução de Euler e x o ponto amostrado.

Com a Deconvolução de Euler efetivada foi obtido o índice estrutural 3.0 (corpo com três dimensões) e as

profundidades para as amplitudes do sinal. O corpo responsável pela anomalia Rio Seco possui uma profundidade média de 134 metros, sendo que no centro o corpo apresenta profundidades menores (Fig. 9) do que os valores estimados para as bordas norte, leste e oeste.

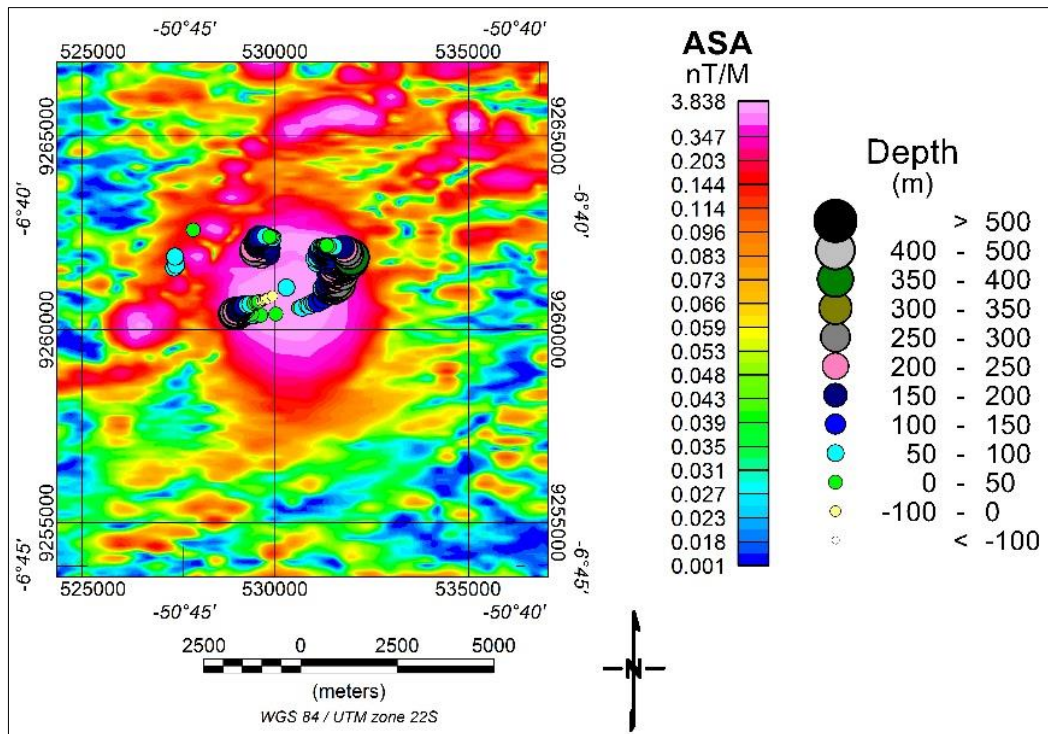


Figura 11: Mapa demonstrando as profundidades obtidas através da Deconvolução de Euler (Reid *et al.*, 1990) sobre o mapa de amplitude do sinal analítico (Roest *et al.*, 1992).

INVERSÃO

A partir do momento em que se caracterizou o corpo anômalo, obtendo os limites laterais, as estruturas as quais o corpo está limitado e a profundidade de seu topo, é possível usar esses parâmetros na caracterização tridimensional do mesmo. A inversão 3D é muito utilizada na área de prospecção pelo fato de indicar o contraste aparente de propriedade física do corpo causador da anomalia magnética e ainda estimar o volume do corpo geológico com relação aos minerais ferromagnéticos que constituem sua paragênese mineral.

Os dados magnéticos foram invertidos a partir do *software* MAG3D (Li & Oldenburg, 1996). A proposição do problema inverso é a seguinte:

$$\vec{d} = G\vec{\kappa} \quad (4)$$

onde $\vec{d}$ é o vetor que caracteriza os dados amostrados no levantamento magnético, G a matriz de sensibilidade e $\vec{\kappa}$ o vetor

triortogonal de susceptibilidade magnética que será criado na malha da inversão.

A inversão de dados magnéticos visa a obtenção do contraste de propriedades físicas aparente entre o corpo geológico e a rocha encaixante a partir dos dados adquiridos. Para tal é utilizada otimização de processos computacionais, fazendo com que uma função objetiva do modelo de susceptibilidade magnética seja minimizada e consiga reproduzir os dados reais de susceptibilidade dentro de um erro aceitável e que leve em consideração soluções de contorno.

Como identificado pela redução ao polo (Fedi *et al.*, 1994), a anomalia Rio Seco possui magnetização remanescente, que foi utilizada como parâmetro de contorno na inversão de dados. Os parâmetros e vínculos para a inversão 3D da anomalia Rio Seco são apresentados na tabela 1.

A inversão recuperou um corpo com contraste de susceptibilidade variando de 0.028 SI a 0.146 SI (Fig. 10).

Tabela 2: Tabela demonstrando os parâmetros da malha de interpolação, vínculos e parâmetros utilizados na inversão e seus respectivos erros.

Parâmetros utilizados na inversão e seus respectivos erros.

Parâmetros da Malha de interpolação				
Eixos	X (Leste)		Y (Norte)	Z (Vertical)
Extensão total	16400 m		17000 m	12000 m
Número de células	82		85	110
Tamanho das células	200 m		200 m	100*100 m, 10*200 m
Coordenadas iniciais	522637 m		9251880 m	656 m
Vínculos da Inversão				
Limite máximo de susceptibilidade (SI)	0.125 SI			
Limite mínimo de susceptibilidade (SI)	0.0001 SI			
Modelo inicial	0.01 SI			
Modelo de referência	null			
Length Scales (As,Ae, An, Az)	As = 0.0001	Ae = 0.6	An = 0.6	Az = 0.8
Parâmetros da Inversão				
Direção e magnitude do campo IGRF	Inclinação. -7,88°	Declinação. -19.81°	Amp. 25061.32 nT	
Parâmetros do campo MAG3D (incl, decl, geomag)	incl. -7.88 °	decl. -19,91°	geomag. 25061.32 nT	
Parâmetros do campo MAG3D (aincl, adecl, dir)	aincl. 67.1°	adecl. -19.91°	dir. 1	
Número de dados de entrada	51839			
Erro do dado de entrada	10% da amplitude do campo magnético no ponto			
Erro obtido pela inversão	Inferior a 5% da amplitude do campo magnético residual			

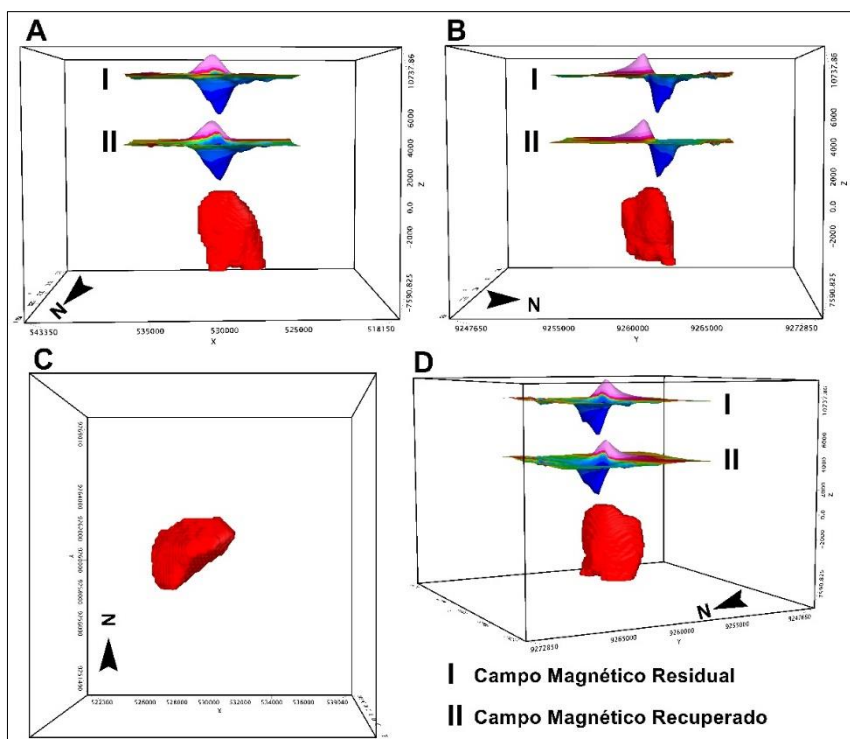


Figura 12: Inversão do campo magnético residual da anomalia Rio seco. A figura apresenta visualização norte-sul (A) com o campo magnético residual (I) e campo magnético recuperado pela inversão (II). Visualização leste-oeste (B), do topo (C) e perspectiva (D).

A susceptibilidade magnética aparente recuperada para a fonte magnética varia de $0,028 \times 10^{-3}$ SI a $50,146 \times 10^{-3}$ SI, levando em consideração que o corpo geológico está intrudido entre rochas granitoides, cuja susceptibilidade magnética varia de 0 a 50×10^{-3} SI (Telford *et al.*, 1990). O contraste de susceptibilidade obtido pode indicar que a anomalia de Rio Seco é resultado da diferenciação magmática entre o corpo intrusivo e o granodiorito Rio Maria (Magalhães *et al.*, 1994). A diferenciação magmática, pode ser responsável pela gênese de um depósito mineral considerável (Biondi, 2003), levando-se em consideração o contexto geológico a que a anomalia Rio Seco está inserida. Outra hipótese considera que o corpo invertido seja o resquício de um núcleo *greenstone belt*, o qual tem ocorrência em toda a região de encaixe da anomalia magnética Rio Seco, e

possui alguns núcleos isolados mapeados na região (Faraco *et al.*, 2004).

Com a análise entre o campo magnético residual e o campo magnético recuperado da inversão (Figs 10A, 10B e 10D), é possível notar a boa correlação entre eles, onde a amplitude máxima e mínima dos mesmos são compatíveis e não apresentam grande dispersão. A diferença entre o máximo e mínimo do campo magnético residual e o campo magnético recuperado pela inversão 3D apresenta diferença que representa valores inferiores a 5% do valor total, demonstrando assim que a parametrização 3D das características físicas da anomalia magnética Rio Seco é adequada (Fig. 11). Também se nota a partir do corpo recuperado que o mesmo possui formato que demonstra sua estruturação condicionada a zona de falha a qual está inserido de direção NE-SW (Fig. 10C).

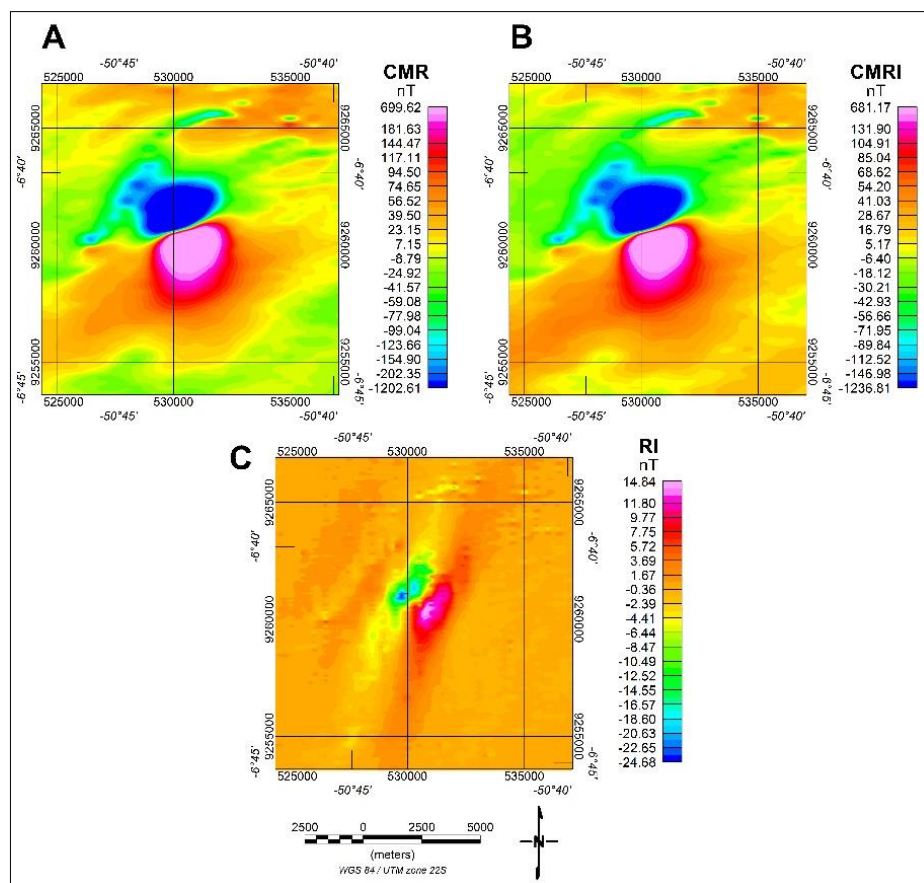


Figura 13: Mapas demonstrando a comparação entre o campo magnético residual (A), o campo magnético recuperado na inversão (B) e (C) mapa de resíduo da inversão (RI).

CONCLUSÕES

A região sudoeste do estado do Pará é reconhecidamente uma das maiores províncias auríferas do Brasil. Com a realização de projetos geofísicos de alta resolução, fomentados pela CPRM é possível a identificação de novas áreas com potencial exploratório. Este impulso permitiu a identificação da anomalia Rio Seco e o estudo de suas propriedades físicas com enfoque exploratório.

O corpo anômalo Rio Seco apresenta formato alongado (Figura 10C) com aproximadamente cinco quilômetros na direção NE-SW e dois quilômetros na direção NW-SE, concordante com o *trend* regional de outros corpos (Silva Leite *et al.*, 2004). A forma do corpo pode ter origem do condicionamento pelos esforços tectônicos da região e o

condicionamento com as falhas (Fig. 6 e Fig. 8). O topo do corpo está a uma profundidade de média de 134 metros e um índice estrutural 3.0 (corpo com três dimensões), obtidos através da Deconvolução de Euler (Figura 9), demonstrando uma profundidade passível de exploração.

Com os resultados obtidos na inversão 3D, pode-se notar o formato do corpo e limites laterais demonstrando a tendência das estruturas maiores da área de estudo (Fig. 10). A susceptibilidade magnética aparente recuperada pela inversão dá indícios de o corpo geológico ser um granitoide com diferenciação magmática, possuindo contraste de susceptibilidade máximo de 0.146 SI. Nota-se ainda que a diferença entre o campo magnético residual e o campo magnético recuperado pela inversão mostra uma diferença máxima e mínima menor que 5% o que mostra o

ótimo resultado obtido pela inversão 3D (Fig. 11).

Pode ser levantada ainda a hipótese de ser um núcleo de *greenstone-belt*, preservado pelo tectonismo da região, em meio aos granitoides arqueanos. Este foi considerado, pois existem na região diversos núcleos de *greenstone-belts* mapeados encaixados nos granitos arqueanos com ocorrências auríferas (Faraco *et al.*, 2004). Com as características geofísicas apresentadas e a correlação com a geologia, tectônica e ocorrências minerais, pode se notar a perspectiva mineral da anomalia Rio Seco. Entretanto, é necessário estudos de furo de sondagem na região para confirmar a natureza da intrusão magnética e sua possível mineralização em ouro.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Geofísica Aplicada da Universidade Federal de Pernambuco (LGA-UFPE), por ceder a licença do software Geosoft Oasis Montaj®. Um agradecimento especial para o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) pela disponibilização dos dados do Projeto Aerogeofísico Rio Maria, os quais possibilitaram a elaboração desde artigo e também ao Centro de Inversão Geofísica da Universidade de British Columbia (UBC-GIF) pela licença acadêmica do software MAG3D®.

REFERÊNCIAS

- Araújo, O.J.B., Maia, R.G., João, X.S.J., Costa, J.B.S., 1988. A mega-estruturação arqueana da folha Serra dos Carajás. In: SBG/DNPM, Congresso Latino-Americano de Geologia, 7, Belém, Anais, 1: 324-328.
- Araújo, O.J.B., Maia, R.G., 1991. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil. Projeto especial mapa de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás. Subprojeto Recursos Minerais. Serra dos Carajás, Folha SB.22Z-A. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral/DNPM – Companhia de Recursos Minerais/CPRM, 152p.
- Baranov, V., 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo gravimetric anomalies. *Geophysics*. 22(2): 359-383.
- Biondi, J. C., 2003. Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros. Oficina de Textos. 1ª ed. 528 p.
- Blakely, R. J., 1995. Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1ª ed. 441 p.
- Carneiro, C.C., Crósta, A.P., Silva, A.M., Pinheiro, R.V.L., 2006. Fusão de imagens altimétricas e aeromagnetométricas como ferramenta de interpretação geológica, exemplo da Província Mineral de Carajás (PA). *Revista Brasileira de Geofísica*. 24(2): 261-271.
- Chung., C.F., 2003. Use of aero geophysical surveys for constructing mineral potential maps. in: Goodfellow, W.D., McCutcheon, S.R., Peter, J.M., (Eds.). Massive sulfide deposits of the Bathurst Mining Camp, New Brunswick, and northern Maine. *Economic Geology Monograph*. 11: 879-891.
- Cooper, G.R.J; Cowan, D.R. 2005. Differential reduction to the pole. *Computers & Geosciences*, vol. 31, p. 989- 999.
- Cordani, R.; Shukowsky, W. 2009. Virtual pole from magnetic anomaly (VPMA): A procedure to estimate the age of a rock from its magnetic anomaly only: *Journal of*

- Applied Geophysics, 69, 96–102, doi: 10.1016/j.jappgeo.2009.07.001.
- Costa-Silva, E., 2011. Integração de Dados Geofísicos e Geológicos com Ênfase na Geração de Alvos Potenciais para Exploração Aurífera em terrenos Granito-Greenstone da região do Sudeste do Pará. Dissertação de Mestrado nº 281, Instituto de Geociências-UNB.170p.
- Dall'agnol, R., Teixeira, N.P., Ramo, O.T., Moura, C.A.V., Macambira, M.J.B., Oliveira, D.C., 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic rapakivi A-type granites of Carajás metallogenic province, Brazil. *Lithos*, 80: 101-129.
- Dall'agnol, R., Oliveira, M.A., Almeida, J.A.C., Althoff, F.J., Leita, A.A.S., Oliveira, D.C., Barros, C.E.M., 2006. Archean and paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian craton. IN: DALL'AGNOL, R., ROSA-COSTA, L.T., KLEIN, E.L. (Eds.). Symposium on magmatism, crustal evolution, and metallogenesis of the Amazonian craton. Abstracts volume and field trips guide. BELÉM, PRONEX-UFPA/SBG-NO, 99-150p
- Dardenne, M.A., Schobbenhaus, C., 2001. Metalogênese do Brasil. Editora Universidade de Brasília, Brasília. 292 p.
- Delgado, I. M., Araujo, O. J. B., Carvalho, J. M. A., 1991. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Projeto Especial Mapas de Recursos Minerais, de Solos e de Vegetação para a Área do Programa Grande Carajás. Subprojeto Recursos Minerais. Serra dos Carajás, Folha SB.22-Z-A. CPRM, Brasília. 152 p.
- DOCEGEO (Rio Doce Geologia e Mineração - Distrito Amazônia) 1988. Revisão litoestratigráfica da província mineral de Carajás, Pará. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Belém, Volume Província Mineral de Carajás-Litoestratigrafia e Principais Depósitos Minerais, Anexos. p. 11-54.
- Faraco, M. T. L., Marinho, P. A. C., Vale, A. G., Costa, E. J. S., Maia, R. G. N., Ferreira, A. L., Valente, C. R., Lacerda Filho, J. V., Moreton, L. C., Camargo, M. A., Vasconcelos, A. M., Oliveira, M., Oliveira, I. W. B., Abreu Filho, W. A., Gomes, I. P. 2004. Folha SB.22 – Araguaia. In: Schobbenhaus, C., Gonçalves, J. H., Santos, J. O. S., Abram, M. B., Leão Neto, R., Matos, G. M. M., Vidotti, R. M., Ramos, M. A. B., Jesus, J. D. A. (eds.). Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas. Programa Geologia do Brasil. CPRM, Brasília. CD-ROM.
- Fedi, M., Florio, G., Rapolla, A., 1994. A method to estimate the total magnetization direction from a distortion analysis of magnetic anomalies. *Geophysical Prospecting*, 42(3): 61-274.
- Fleck, A., Lindenmayer, Z.G., Paula, F.C., 2006. Alteração hidrotermal das rochas máficas do alvo estrela (Cu-Au), Serra dos Carajás, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*. 36: 138-151.
- Hinze, W. J., Von Frese, R. R. B., Saad, A. H. 2013. Gravit and Magnetic Exploration. Principles, Practices, and Applications, Cambridge, 1ª ed. 502 p.
- Huhn, S.R.B., Santos, A.B.S., Amaral, A.F., Ledsham, E.J., Gouveia, J.L., Martins, L.B.P., Montalvão, R.M.G., Costa, V.G., 1988. O terreno granito greenstone da

- região de Rio Maria - Sul do Pará. In: Congresso Brasileiro de Geologia. Anais do Congresso Brasileiro de Geologia. Belém, SBG. 3: 1438-1453.
- IAEA. 1991. Airborne gamma ray spectrometer surveying. Viena: International Atomic Energy Agency, 97 p. (Technical Report Serie, nº 323).
- Jorge João, X.S., Araújo, O.J.B., 1992. Magmatismo granítico sin-cisalhamento Itacaiúnas no sudoeste do Estado do Pará. In: Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo. Resumos. São Paulo: SBG. 2: 36-38.
- Keating, P., Thomas, M.D., Kiss, F. 2003. Significance of a high resolution magnetic and electromagnetic survey for exploration and geologic investigations, Bathurst Mining Camp, in: Goodfellow, W.D., McCutcheon, S.R., Peter, J.M. (Eds.), Massive sulfide deposits of the Bathurst Mining Camp, New Brunswick, and northern Maine. Economic Geology Monograph. 11:783-798.
- Lagle, B., 2011. Geologia e geoquímica das sequências vulcânicas paleoproterozóicas do Grupo Uatumã na região de São Félix do Xingu (PA), Cratão Amazônico. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica – USP. 154p.
- Li, Y., Oldenburg, D.W., 1996. 3D Inversion of Magnetic Data: Geophysics, 61: 394–408. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1443968>.
- Macambira, M.J.B., 1992. Chronologie U/Pb, Rb/Sr, K/Ar et croissance de la croûte continentale dans l'Amazonie du sud-est; exemple de la région de Rio Maria, Province de Carajás, Brésil. Montpellier, Tese de Doutorado - Université Montpellier II-France. 212 p.
- Macambira, M.J.B. & Lafon, J.M., 1995. Geocronologia da Província Mineral de Carajás; Síntese dos dados e novos desafios. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, série Ciências da Terra, Belém, 7: 263-287.
- Macambira, M.J.B. & LANCELOT, J., 1996. História arqueana da região de Rio Maria, SE do Estado do Pará, registrada em zircões detríticos de "greenstone belts" e de cobertura plataformar. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 3, Belém. Anais do Simpósio de Geologia da Amazônia. SBG. p. 59-69.
- Machado, N., Lindenmayer, Z., Krogh, T.E., Lindenmayer, D., 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. Precambrian Research, 49: 329-354.
- Magalhães, M. S., Dall'agnol, R., Sauck W. A., Luiz, J. G., 1994. Susceptibilidade magnética: Um indicador da evolução petrográfica de granitoides da Amazônia. Revista Brasileira de Geociências. 24(3): 139-149.
- Miller, H. G., Singh, V., 1994. Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources; J. Appl. Geophys, 32: 213–217.
- Oliveira, J.K.M., 2002. Caracterização estrutural da borda sudeste do Sistema Transcorrente Carajás com ênfase nas rochas do Terreno Granítico-Gnaissico. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica – UFPA. 138p.
- Oliveira, M.A., Dall'agnol, R., Althoff, F.J., 2006. Petrografia e geoquímica do granodiorito Rio

- Maria da região de Bannach e comparações com as demais ocorrências no Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria – Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, 36(2): 313-326.
- Oliveira, M.A., 2009. Petrogênese e evolução magmática da Suíte Sanukitóide Rio Maria, Terreno Granito – Greenstone de Rio Maria, Cráton Amazônico. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Instituto de Geociências – UFPA. 179p.
- Ostrovsky, E.A., 1975. Antagonism of Radioactive Elements in Wallrock Alteration Fields and Its Use in Aero Gamma Spectrometric. *Prospecting. International Geology Review*, 17: 461-468.
- Pimentel, M.M., Machado, N., 1994. Geocronologia U-Pb dos Terrenos granito-greenstone de Rio Maria, Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. Camboriú, 1988. Boletim de Resumos Expandidos. Camboriú, SBG. p. 390-39.
- Pinheiro R.V.L., 1997. Reactivation history of the Carajás and Cinzento Strike-Slip Systems, Amazon, Brazil. Ph.D. Thesis, University of Durham.408p.
- Ribeiro, V. B., Mantovani, M.S.M., 2017. A multidisciplinary characterization of Heath Steele Belt Deposits, Bathurst Mining Camp: basis to identify new targets for exploration. *Near Surface Geophysics*. DOI: 10.3997/1873-0604.2017010.
- Ribeiro, V. B., Mantovani, M.S.M., Louro, V.H.A., 2013. Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. *Terra e Didática*. 10: 29-51.
- Roest, W. R., Verhoef, J., Pilkington, M., 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*. 57:116–125.
- Santos, J.O.S., Hatmann, L.A., Gaudette, H.E., Groves, D.I., Mcnaughton, N.J., Fletcher, I.R., 2000. A new understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of fird mapping U-Pb an Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, 3(4): 453-488.
- Santos, J.O.S., 2003. Geotectônica dos Escudos das Guianas e Brasil-Central. In: Bizzi, L.A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R.M., Gonçalves, J.H. (eds.), *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*, Companhia de Recursos Minerais/CPRM, p.169-226.
- Silva, G.G., Lima, M.J.C., Andrade, A.R.F., Issler, R.S. & Guimarães, G., 1974. Geologia das Folhas SB-22 Araguaia e parte SC-22 Tocantins, Projeto RADAM-BRASIL, geologia, geomorfologia, solos e uso potencial da terra, Levantamento de Recursos Naturais (4), Rio de Janeiro. 143p.
- Silva Leite, A. A., Dall’agnol, R., Macambira, M. J. B., Althoff, F. J., 2004. Geologia e Geocronologia dos Granitóides Arqueanos da Região de Xinguara-PA e Suas Implicações na Evolução do Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, Cráton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências*. 34(4): 447-458.
- Souza, Z.S., 1994. Geologia e petrogênese do "GreenstoneBelt" Identidade: implicações sobre a evolução geodinâmica do terreno granito-greenstone de Rio Maria, SE do Pará. Tese de Doutorado – UFPA. 624p.
- Spector, A., Grant, F.S., 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*. 35: 293-302.

- Tassinari, C.C.G., Macambira, M.J.B., 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantesso-Neto, V. et al. (Ed.). *Geologia do continente Sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca. p.471-485.
- VALE, 2013. Projeto Ferro Carajás S11D: um novo impulso ao desenvolvimento sustentável do Brasil. Diretoria de Comunicação Corporativa. 25 p.
- Vasquez, M.L., Rosa-Costa, L.T., Silva, C.G., Ricci, P.F., Barbosa, J. O., Klein, E.L., Lopes, E. S., Macambira, E.B., Chaves, C.L., Carvalho, J.M., Oliveira, J.G., Anjos, C., Silva, H.R., 2008a. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: Texto Explicativo dos Mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará*. Escala 1:1.000.000. Belém:CPRM. p.39-54.
- Vasquez, M.L., Macambira, M.J.B., Armstrong, R.A., 2008. Zircon geochronology of granitoids from the western Bacajá domain, southeastern Amazonian craton, Brazil: Neoproterozoic to Orosirian evolution. *Prec. Res.*, 161:279-302.
- Zucchetti, M., 2007. Rochas máficas do Grupo Grão Pará e sua relação com a mineralização de ferro dos depósitos N4 e N5, Carajás, PA. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências –UFMG. 165p.