



Universidade de Brasília – UnB
Instituto de Geociências – IG
Programa de Pós-Graduação em Geologia

**CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA DE ESTRUTURAS
ASSOCIADAS ÀS MINERALIZAÇÕES DE COBRE E OURO NO
ARCO MAGMÁTICO DE ARENOPÓLIS – GOIÁS - BRASIL**

Éderson Ribeiro da Silva

Dissertação de Mestrado n° 442

Brasília, 2019

Éderson Ribeiro da Silva

**CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA DE ESTRUTURAS
ASSOCIADAS ÀS MINERALIZAÇÕES DE COBRE E OURO NO
ARCO MAGMÁTICO DE ARENOPÓLIS – GOIÁS - BRASIL**

Dissertação de Mestrado n° 442

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Geologia do
Instituto de Geociências da Universidade de
Brasília – IG/UnB, como pré-requisito para
obtenção do título de Mestre em Geologia

Área de concentração: Geologia Econômica e Prospecção

Orientadora: Prof. Dra. Adalene Moreira Silva (UnB)

Co-Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Leão Santos (UFG)

Banca examinadora: Prof. Dra. Yara Regina Marangoni (USP)

Prof. Dr. José Eduardo Pereira Soares (UnB)

Suplente: Prof. Dr. Reinhardt Adolfo Fuck (UnB)

Brasília, 2019

"Nos defrontamos não com vários erros e uma verdade, mas sim com várias verdades parciais, e como encaixá-las coerentemente é, então, o quebra-cabeça supremo."

Ken Wilber

Agradecimentos

Nossos pensamentos são alimentados pelas ideias e ações de todos que estão a nossa volta. Por isso, se produzimos algo com o nosso pensar, devemos agradecer a todos aqueles que de alguma forma se expressaram com opiniões, sugestões, motivações, inspirações ou outro auxílio de qualquer natureza, pois todos eles, mesmo sem saber, contribuíram de modo muito especial para o produto final realizado.

Agradeço primeiramente à minha orientadora, professora Dr^a Adalene Moreira, por ter me aceito como seu orientando e guiado todo o trabalho com muita sensibilidade e paciência. Agradeço igualmente ao professor da Universidade Federal de Goiás - UFG, Dr. Marcelo Leão-Santos, pelos conselhos, revisões e incentivos.

Aos colegas do Serviço Geológico do Brasil - CPRM, do projeto Oeste de Goiás: Joffre Lacerda, Jonatas Carneiro, Karina Hattingh, Felipe Martins, Debora Santos, João Olímpio, Paulo Meneghini, Karine Gollmann e Daliane Eberhardt pelo compartilhamento dos conhecimentos adquiridos nas discussões geológicas acaloradas e muito importantes do projeto.

Ao colega de trabalho da CPRM de Recife, geofísico Roberto Gusmão, pelos ensinamentos e *insights* no processamento e interpretação de dados gravimétricos.

Aos geofísicos da CPRM de Goiânia, Adolfo Barbosa e Felipe Alves, pelas discussões geofísicas, dicas e principalmente pela amizade.

À colega de trabalho, Cimara Monteiro, por ter colaborado e incentivado desde o início do projeto.

À minha ex-esposa e hoje amiga, Camila Prado, pela compreensão e incentivo no início dessa jornada.

Aos colegas da pós-graduação da UnB: Lila Queiroz, Marcel Passos, Eduardo Seimetz, Jéssica Moreira, Gabriela Menezes e Moríá Araújo, pelas dicas, companheirismo e amizade.

Por fim, agradeço as instituições UnB e CPRM, por fornecerem condições, estrutura e incentivos muito importantes para o desenvolvimento e conclusão desse trabalho.

Resumo

O Arco Magmático de Arenópolis tem sido alvo de diversas pesquisas para exploração de cobre e ouro, constituindo-se como um terreno estratégico para o fomento da indústria mineral no estado de Goiás. Com a finalidade de identificar características geofísicas de estruturas importantes na mineralização de cobre e ouro na região oeste de Goiás, realizou-se processamento e interpretação de dados de gravimetria e magnetometria.

A utilização de dados gravimétricos terrestres e aerolevantamentos magnéticos permitiu a análise de estruturas locais de segunda ordem de poucas dezenas de quilômetros até grandes zonas de cisalhamento de centenas de quilômetros no estado de Goiás. Os dados geofísicos foram correlacionados com estruturas, litologias e ocorrências minerais mapeadas. Além da análise bidimensional, realizou-se a inversão de dados geofísicos que permitiu a construção de modelos tridimensionais das anomalias selecionadas.

Em escala regional, o estudo teve como foco as zonas de cisalhamento Transbrasiliano e Moiporá-Novo Brasil no estado de Goiás. A análise realizada permitiu mapear e sugerir o prolongamento do lineamento Moiporá-Novo Brasil. Por meio da interpretação de dados gravimétricos sugerimos a extensão dessa estrutura da cidade de Araguapaz até São Simão, alcançando cerca de 450 km de extensão. O resultado dessa interpretação nos permite inferir que essa zona de cisalhamento esteja conectada ao manto terrestre.

Com enfoque na região oeste de Goiás, analisamos a assinatura gravimétrica das sequências metavulcanossedimentares Bom Jardim, Arenópolis Piranhas, Iporá-Amorinópolis e Jaupaci que se localizam no Arco Magmático de Arenópolis, entre os lineamentos Transbrasiliano e Moiporá-Novo Brasil. A análise do mapa de anomalia Bouguer residual permitiu correlacionar altos gravimétricos com as sequências metavulcanossedimentares mapeadas. Sugere-se que as sequências Bom Jardim e Arenópolis-Piranhas estendam-se em profundidade para a direção sul, prolongando-se cerca de 40 km sob a Bacia do Paraná.

A correlação de anomalias gravimétricas, lineamentos magnéticos, litotipos e ocorrências minerais mostra que alguns depósitos de cobre da região de Bom Jardim alinham-se com um conjunto de estruturas magnéticas que foram nomeadas neste

trabalho de Lineamento Bom Jardim. De modo análogo, na região de Fazenda Nova as ocorrências minerais alinham-se aos lineamentos de segunda ordem da zona de cisalhamento Moiporá-Novo Brasil. Tais ocorrências minerais ficaram circunscritas às anomalias gravimétricas situadas nas adjacências das zonas de cisalhamento Transbrasiliano e Moiporá-Novo Brasil.

As inversões de dados gravimétricos permitiram a geração de modelos simples que forneceram estimativas de profundidades e formas geométricas das anomalias de densidade relacionadas às quatro sequências metavulcanossedimentares mencionadas. Por outro lado, as inversões de dados magnéticos mostraram, além da forma geométrica, as direções dos vetores de magnetização que proporcionaram a interpretação de dobras e diferenciação litológica nas proximidades das ocorrências minerais de ouro e cobre das regiões de Fazenda Nova e Bom Jardim de Goiás.

Abstract

The Arenópolis Magmatic Arc has been the object of several researches for copper and gold exploration, constituting as a strategic terrain for the mineral industry promotion in the Goiás state. In order to identify geophysical characteristics of important structures in the mineralization of copper and gold in the Goiás western region, gravimetric and magnetic data processing and interpretation was carried out.

The use of terrestrial gravimetric data and aeromagnetic surveys allowed the analysis of second-order local structures from tens of kilometers to large shear zones of hundreds of kilometers in the Goiás state. Geophysical data were correlated with structures, lithologies and mapped mineral occurrences. In addition to the two-dimensional analysis, the inversion of geophysical data allowed the construction of three-dimensional models of the selected anomalies.

On a regional scale, the study focused on the Transbrasilian and Moiporá-Novo Brasil shear zones in the Goiás state. The analysis allowed to map and suggest the extension of the Moiporá-Novo Brasil lineament. Through the interpretation of gravimetric data, we suggest the extension of this structure from the Araguapaz to São Simão city, reaching about 450 km. The result of this interpretation allows us to infer that this shear zone is connected to the Earth's mantle.

Focusing on the Goiás western region, we analyzed the gravimetric signature of the metavulcanosedimentary sequences Bom Jardim, Arenópolis Piranhas, Iporá-Amorinópolis and Jaupaci that are located in the Arenópolis Magmatic Arc, between the Transbrasilian and Moiporá-Novo Brasil lineaments. The analysis of the Bouguer residual anomaly map, allowed to correlate high gravimetric values with the mapped metavulcanosedimentary sequences. It is suggested that the Bom Jardim and Arenópolis-Piranhas sequences extend in depth to the south direction, extending about 40 km under the Paraná Basin.

The correlation of gravimetric anomalies, magnetic lineaments, lithotypes and mineral occurrences shows that some copper deposits in the Bom Jardim region are aligned with a set of magnetic structures that were named in this work as Bom Jardim Lineament. Similarly, in the Fazenda Nova region, the mineral occurrences are aligned with the second-order lineaments of the Moiporá-Novo Brasil shear zone. These mineral

occurrences were confined to the gravimetric anomalies located in the vicinity of the Transbrasilian and Moiporá-Novo Brasil shear zones.

The inversions of gravimetric data allowed the creation of simple models that provided estimates of depths and geometric forms of density anomalies related to the mentioned four metavulcanosedimentary sequences. On the other hand, the inversions of magnetic data showed, besides the geometric form, the directions of the magnetization vectors that provided the interpretation of folds and lithological differentiation in the vicinities of the gold and copper mineral occurrences of the Fazenda Nova and Bom Jardim de Goiás regions.

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Mapa geológico regional com as principais unidades geológicas (Moreira <i>et al.</i> , 2008) e a localização da área de estudo.....	17
Figura 1.2 - Localização dos aerolevantamentos geofísicos utilizados e a localização da área de estudo.	19
Figura 1.3 - Mapa gravimétrico Bouguer do estado de Goiás com a distribuição das estações gravimétricas e a localização da área de estudo.....	21
Figura 1.4 - Mapa gravimétrico Bouguer da área de estudo com a distribuição das estações gravimétricas indicadas pelo símbolo em preto.....	22
Figura 1.5 - Mapa gravimétrico Bouguer residual com filtro passa alta ($\lambda=67$ km) com a distribuição das estações gravimétricas indicadas pelo símbolo em preto.....	23
Figura 1.6 - Espectro de potência dos dados gravimétricos da anomalia Bouguer da região delimitada pela área do projeto. A seta verde indicada na parte inferior da figura destaca o ponto de corte das baixas frequências.....	23
Figura 1.7 - Imagens magnetométricas com a junção de todos os aerolevantamentos utilizados. (a) Campo Magnético Anômalo (CMA) (b) Sinal analítico 3D. (c) Primeira derivada vertical do campo magnético anômalo.	25
Figura 2.1(a) Mapa geológico regional com as principais unidades geológicas e a localização da área de estudo. (b) Mapa com as principais unidades tectônicas do estado de Goiás e a localização da área de estudo (Modificado de Pimentel <i>et al</i> (2000))......	40
Figura 2.2 - Imagem magnética do Sinal Analítico com destaque para os lineamentos magnéticos das zonas de cisalhamento Transbrasiliano e Moiporá-Novo Brasil, além da localização da área de estudo no estado de Goiás e no território brasileiro.	44
Figura 2.3 - Mapa gravimétrico Bouguer com as principais estruturas interpretadas e a área de estudo sobrepostas.....	45
Figura 2.4 - Mapa de unidades geológicas regionais com as principais estruturas interpretadas e com a área de estudo sobrepostas.....	46
Figura 2.5 - Mapa de anomalia Bouguer da área de estudo. Os contornos em preto são as sequências metavulcanossedimentares mapeadas (Lacerda Filho <i>et al.</i> , 2019) localizadas entre os lineamentos Moiporá-Novo Brasil e Transbrasiliano no Arco Magmático de Arenópolis.	48

Figura 2.6 - Espectro de potência dos dados gravimétricos da anomalia Bouguer da região delimitada pela área de estudo . A seta em verde indica o ponto escolhido para a separação regional residual.....	49
Figura 2.7 - Mapa gravimétrico Bouguer residual com filtro passa alta ($\lambda=67$ km). Os contornos em preto representam as litologias mapeadas (Lacerda Filho <i>et al.</i> , 2019) das sequências metavulcanossedimentares.	50
Figura 2.8 - Mapa de unidades geológicas regionais da área de estudo. Os contornos em preto indicam os limites dos altos gravimétricos relacionados às sequências metavulcanossedimentares.	51
Figura 2.9 – (a) Imagem da derivada vertical com as ocorrências de ouro sobrepostas. (b) Ocorrências de ouro e interpretação de lineamentos e anomalias magnéticas.	53
Figura 2.10 – Imagem da anomalia Bouguer residual juntamente com minas, garimpos e ocorrências de ouro da região de Jaupaci (a) Sobreposição de estruturas mapeadas. (b) Sobreposição de lineamentos magnéticos interpretados e contornos das litologias mapeadas.	54
Figura 2.11 - (a) Imagem do Sinal Analítico com depósitos de cobre sobrepostos. (b) Ocorrências de cobre e interpretação de lineamentos magnéticos.	55
Figura 2.12 - Imagem da anomalia Bouguer residual juntamente com ocorrências de cobre da região de Bom Jardim (a) Sobreposição de estruturas mapeadas. (b) Sobreposição de lineamentos magnéticos interpretados e contornos das litologias mapeadas.	56
Figura 2.13 - Seções do modelo de inversão obtido com os dados gravimétricos de anomalia Bouguer residual. As elipses coloridas destacam quatro anomalias relacionadas às sequências metavulcanossedimentares. As imagens possuem exagero vertical de 2x. (a) As elipses azul e vermelha referem-se às sequências Arenópolis-Piranhas e Iporá-Amorinópolis, respectivamente. (b) As elipses branca e preta referem-se às sequências Bom Jardim e Jaupaci, respectivamente.....	57
Figura 2.14 Imagens do resultado da inversão dos dados gravimétricos da região de Jaupaci – GO vistas por dois ângulos diferentes. As estruturas na cor laranja referem-se a uma isosuperfície ($\rho > 0.033\text{g/cm}^3$).....	59
Figura 2.15 Imagem do resultado da inversão dos dados gravimétricos da região de Bom jardim de Goiás vistas por dois ângulos diferentes. As estruturas na cor laranja referem-se a uma isosuperfície ($\rho > 0.036\text{g/cm}^3$).....	60

Figura 2.16 - Imagem magnética do Sinal Analítico. Os retângulos em preto correspondem às áreas onde se realizou a inversão dos dados magnéticos.....	61
Figura 2.17 - Imagem do Sinal Analítico na região de Bom jardim de Goiás – GO, juntamente com as ocorrências de cobre. O retângulo em preto corresponde à área onde se efetuou a inversão dos dados magnéticos.	62
Figura 2.18 - Imagens do resultado da inversão dos dados magnéticos da região de Bom jardim de Goiás – GO vistas por duas direções diferentes. As estruturas na cor vermelha referem-se a uma isosuperfície ($\kappa > 0.02$ SI).	63
Figura 2.19 - Imagem do resultado da inversão dos dados magnéticos e os vetores com as direções de magnetização. Os vetores na cor rosa são as soluções obtidas pela inversão e os vetores em preto são interpretações das direções preferenciais médias... ..	64
Figura 2.20 - Imagem do Sinal Analítico na região de Fazenda Nova – GO, juntamente com as ocorrências de ouro. O retângulo em preto corresponde à área onde realizou-se a inversão dos dados magnéticos.....	65
Figura 2.21 - Imagens do resultado da inversão dos dados magnéticos da região de Fazenda Nova – GO vistas por duas direções diferentes. As estruturas na cor vermelha referem-se a uma isosuperfície ($\kappa > 0.05$ SI).	66
Figura 2.22 - Imagem do resultado da inversão dos dados magnéticos e os vetores com as direções de magnetização ($\kappa > 0.05$ SI).	67

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	16
1.2	Localização da área de estudo	16
1.3	Materiais e métodos	18
1.3.1	Dados magnetométricos	18
1.3.2	Dados gravimétricos	19
1.3.3	Processamento de dados gravimétricos	20
1.3.4	Processamento de dados magnetométricos.....	24
1.3.5	Inversão geofísica – Utilizando o algoritmo VOXI Earth Modeling	26
1.3.6	Inversão de dados gravimétricos.....	26
1.3.7	Inversão de dados magnetométricos.....	28
1.4	Estrutura da dissertação.....	31
2	CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA DE ESTRUTURAS ASSOCIADAS ÀS MINERALIZAÇÕES DE COBRE E OURO NO ARCO MAGMÁTICO DE ARENÓPOLIS – GOIÁS - BRASIL	32
2.1	Introdução	35
2.2	Geologia Regional	37
2.2.1	Unidades geotectônicas	37
2.2.2	Estruturas regionais.....	38
2.2.3	Mineralizações de cobre e ouro no Arco Magmático de Arenópolis.....	39
2.3	Materiais e Métodos.....	40
2.3.1	Dados gravimétricos e magnéticos	40
2.3.2	Abordagem de interpretação	41

2.4 Resultados	42
2.4.1 Caracterização geofísica das zonas de cisalhamento regionais do estado de Goiás	42
2.4.2 Assinatura gravimétrica das sequências metavulcanossedimentares do Arco Magmático de Arenópolis	47
2.4.3 Estruturas de segunda ordem e ocorrências minerais.....	52
2.4.4 Modelos gravimétricos	57
2.4.5 Modelos magnéticos	60
2.4.5.1 Modelo 1 - Bom Jardim de Goiás – GO	61
2.4.5.2 Modelo 2 - Fazenda Nova-GO	65
2.5 Discussões e Conclusões	68
2.6 Referências	70
3 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	75
4 BIBLIOGRAFIA	78

1 INTRODUÇÃO

O estado de Goiás é reconhecido pelo seu potencial metalogenético, pois possui expressivo número de ocorrências minerais, garimpos desativados e minas de ouro. Mais precisamente no Arco Magmático de Goiás–Arenópolis vislumbra-se grande potencial para metais bases e nobres, já que abriga importantes depósitos minerais como ouro em Fazenda Nova, cobre e níquel em Americano do Brasil, cobre em Bom Jardim, entre outros (Ramos, 2010; Lacerda Filho *et al.*, 2019).

A análise estrutural desempenha um papel fundamental na exploração de recursos minerais. Quase todos os estilos de depósitos minerais são controlados direta ou indiretamente por alguma forma ou tipo de estrutura geológica. Isso pode ser observado em escala local ou regional, e em níveis crustais rasos ou profundos. Uma compreensão adequada das configurações estruturais e estruturas chave, dentro de uma determinada região, nos permite contrastar certas feições com configurações de estilos de depósitos conhecidos ou modelados, além de criar modelos preditivos para a localização de alvos potenciais (Isles & Rankin, 2013).

Uma das limitações do mapeamento de campo, especialmente em áreas com afloramentos escassos, é a densidade altamente variável de informações, particularmente no mapeamento estrutural em escala de detalhe. As inter-relações de estruturas vistas apenas em afloramentos amplamente separados podem ser de difícil compreensão, particularmente entre estruturas de primeira e segunda ordem. Em contraste, dados aeromagnéticos e gravimétricos frequentemente fornecem continuidade de informações-chave que podem ser usadas para avaliação de problemas estruturais em uma ampla gama de escalas (Grauch & Hudson, 2011; Gunn, 1997).

Na escala regional destaca-se a importância das grandes zonas de cisalhamento, pois estas atuam como canais para o fluxo de magma e fluidos hidrotermais que proporcionam a concentração de bens minerais e geram depósitos de minério economicamente significativos, por exemplo, a *Eastern Goldfields Province* no *Yilgarn Block*, oeste da Austrália (Cox, 1999) e na zona de falha Carajás, Brasil (Holdsworth & Pinheiro, 2000).

A existência de conexão entre zonas de cisalhamento e o manto superior pode ser reforçada por meio de dados geofísicos. As zonas de cisalhamento de escala continental são caracterizadas por anisotropias regionais no manto superior. Essa

anisotropia pode ser caracterizada como anomalias de alto gravimétrico associadas à elevação localizada do limite entre crosta e manto (Pili *et al.*, 1997). Como exemplo podemos citar o alto gravimétrico do Brasil Central que acompanha o lineamento Transbrasiliano (Ventura *et al.*, 2011).

Na escala local destacam-se os lineamentos de segunda ordem que estão associados às grandes zonas de cisalhamento. Marques *et al.* (2019) correlacionou o depósito de Fazenda Nova à falha Bacilândia, uma estrutura NNW de segunda ordem relacionada a zona de cisalhamento Moiporá-Novo Brasil. De acordo com esse autor, a falha Bacilândia pode ter atuado como uma estrutura profunda que canalizou os magmas das intrusivas Bacilândia assim como os fluidos hidrotermais.

Além de contribuir no mapeamento de estruturas no plano bidimensional, os dados aeromagnéticos e gravimétricos possuem a propriedade de reconhecer corpos de rochas magnéticas e/ou densas em 3D e fornecem uma excelente ferramenta na compreensão das estruturas na área de interesse.

Por meio da modelagem e inversão de dados geofísicos é possível recuperar a distribuição da propriedade física em profundidade e determinar parâmetros geométricos das fontes magnéticas, tais como profundidade, extensão vertical, mergulho, direção do mergulho, etc (Li & Oldenburg, 1996).

A modelagem e inversão de dados geofísicos tem sido parte essencial de diversos programas de exploração mineral tanto nas grandes empresas quanto na academia. Como exemplo podemos citar o depósito *Raglan* no norte de Quebec onde a inversão de dados aeromagnéticos resultou em uma melhor compreensão sobre a natureza do depósito e identificou alvos de potenciais mineralizações que foram confirmadas através de furos de sondagem (Oldenburg & Pratt, 2007).

No Brasil, podemos citar como exemplo a inversão de dados magnéticos no estudo da província mineral de Carajás, onde se obteve boa correlação da geologia e corpos de minério conhecidos com os corpos magnéticos modelados (Leão-Santos *et al.* 2015). Outro exemplo é a aplicação da inversão de dados gravimétricos para exploração de minério de ferro na região do quadrilátero ferrífero em Minas Gerais. Como os corpos de minério possuem grande contraste de densidade com a rocha encaixante, constatou-se anomalias bem definidas nos dados adquiridos (Martinez *et al.*, 2012).

A meta principal desse trabalho é a caracterização de estruturas de médio a grande porte que estão relacionadas às mineralizações de cobre e ouro no Arco Magmático de Arenópolis. Para atingir esse objetivo escolheu-se utilizar dados

gravimétricos e magnéticos juntamente com mapas geológicos e um banco de dados de ocorrências minerais.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo caracterizar estruturas geológicas regionais e locais por meio do uso de dados geofísicos e realizar a correlação dessas estruturas com as mineralizações de cobre e ouro no Arco Magmático de Arenópolis.

Como objetivos específicos propõem-se:

1. Identificar assinaturas geofísicas das zonas de cisalhamento Transbrasiliano e Moiporá-Novo-Brasil;
2. Identificar assinaturas gravimétricas das sequências metavulcanossedimentares do Arco Magmático de Arenópolis;
3. Correlacionar os lineamentos magnéticos de segunda ordem com as ocorrências de cobre e ouro no Arco Magmático de Arenópolis e
4. Realizar a inversão de dados gravimétricos e magnéticos para a geração de modelos em 3D de anomalias selecionadas.

1.2 Localização da área de estudo

A área de estudo encontra-se na porção oeste do estado de Goiás e estende-se da cidade de Bom Jardim à oeste, até a cidade de Jaupaci à leste (Figura 1.1)

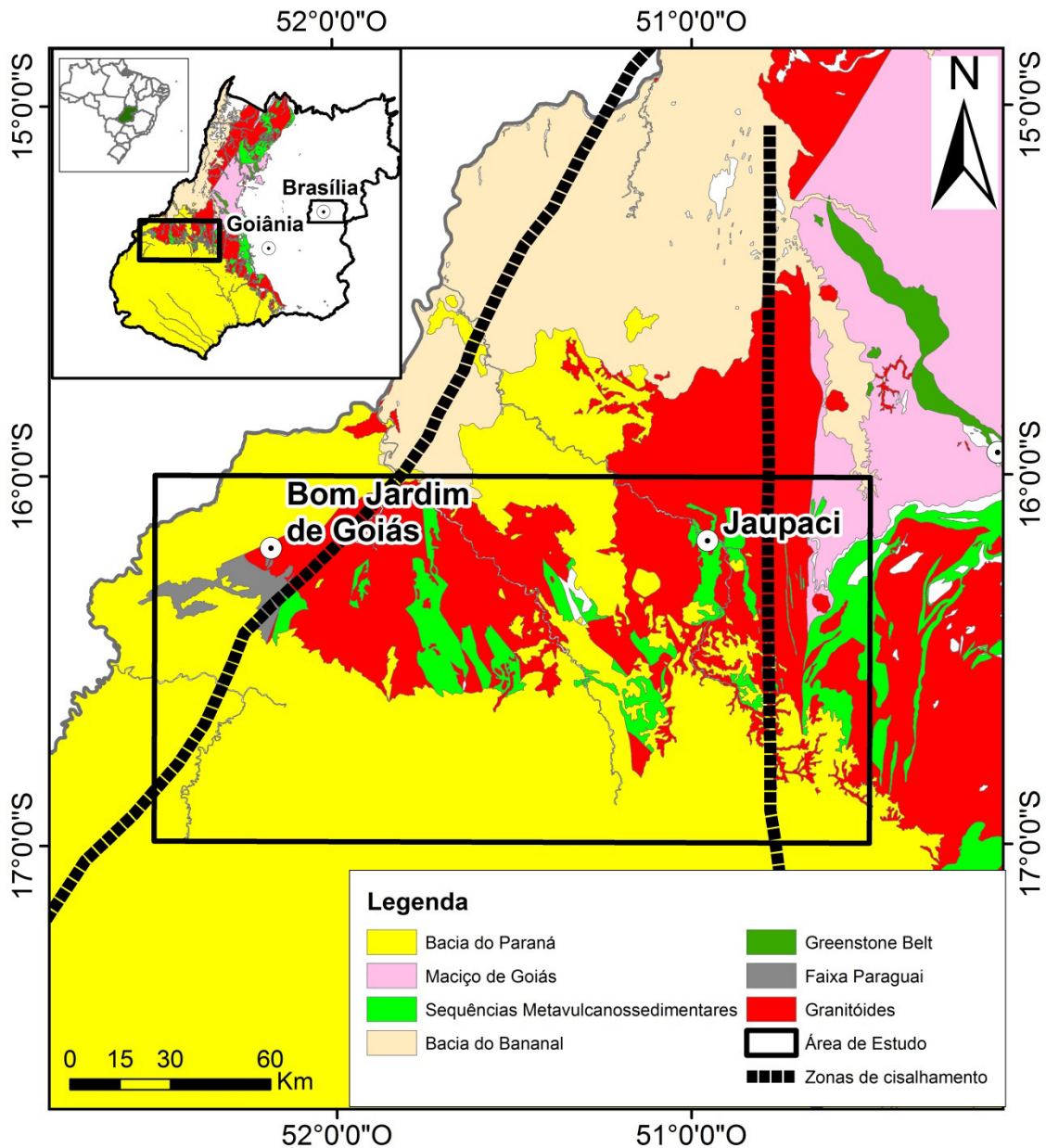


Figura 1.1 - Mapa geológico regional com as principais unidades geológicas (Moreira *et al.*, 2008) e a localização da área de estudo.

A área de estudo está contida no Arco Magmático de Arenópolis e é limitada pelas zonas de cisalhamento Transbrasiliano à oeste e Moiporá-Novo Brasil à leste. A sul, é limitada pela bacia do Paraná e a norte pela bacia do Bananal.

1.3 Materiais e métodos

Nesse trabalho foram analisados e interpretados dados geofísicos e geológicos com o objetivo de caracterizar as principais zonas de cisalhamento do estado de Goiás, identificar assinaturas geofísicas das sequências metavulcanossedimentares presentes na área de estudo e correlacionar estruturas de segunda ordem com as mineralizações de cobre e ouro presentes nas regiões de Bom Jardim e Fazenda Nova.

Foram utilizados dados de gravimetria terrestre e de quatro projetos aerogeofísicos que serão descritos a seguir.

1.3.1 Dados magnetométricos

Os aerolevantamentos geofísicos utilizados foram os seguintes: Sudeste do Mato Grosso (LASA, 2011), Oeste do Arco Magmático de Mara Rosa (LASA, 2005), Arco Magmático de Arenópolis-Sequência Juscelândia (LASA, 2004) e Arco Magmático de Mara Rosa (LASA, 2004). Todos os aerolevantamentos utilizados possuem alta resolução espacial e foram realizados pela LASA Engenharia e Prospecções S.A e constam de perfis magnetométricos e gamaespectrométricos. As características básicas de aquisição são as seguintes:

- Direção das linhas de voo: N-S
- Espaçamento entre as linhas de voo: 0,5 km
- Direção das linhas de controle: E-W
- Espaçamento entre as linhas de controle: 5,0 km
- Intervalo entre medições geofísicas consecutivas: 0,1 s (magnetômetro) e 1,0 s (espectrômetro)
- Altura média de voo: 100 m
- Velocidade aproximada de voo: 290 km/h

A figura 1.2 mostra a localização dos quatro projetos aerogeofísicos utilizados.

Para informações mais detalhadas de cada aerolevantamento consultar

<http://www.cprm.gov.br/aero/aero.htm>.

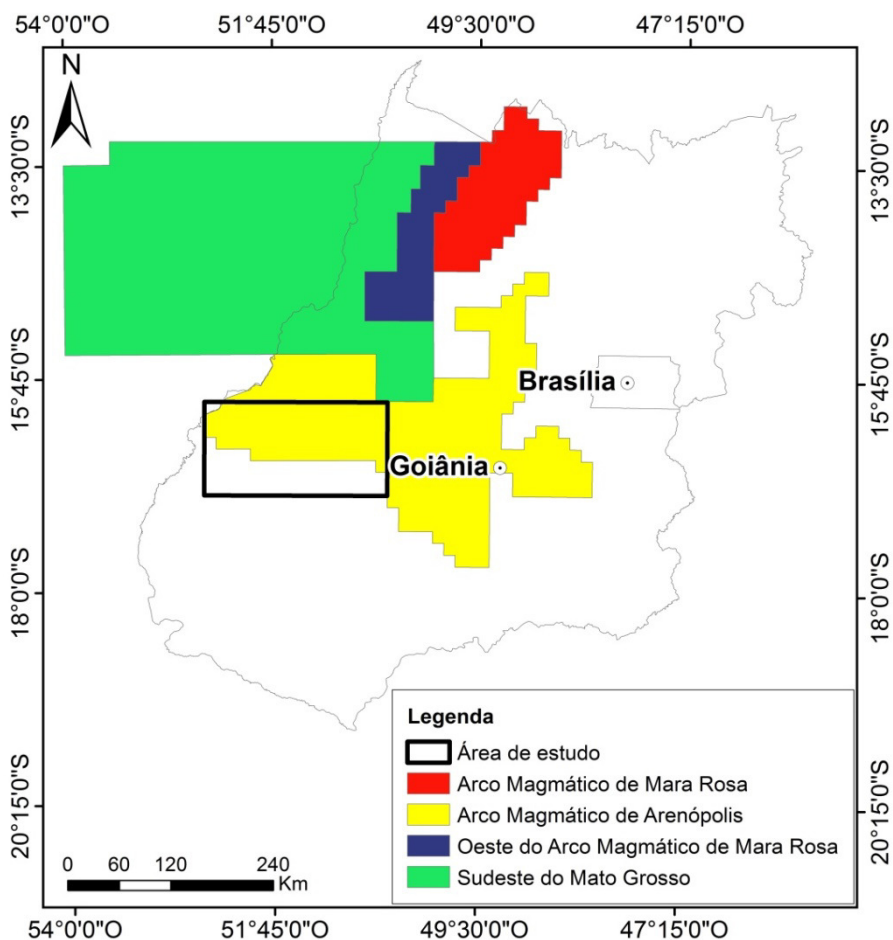


Figura 1.2 - Localização dos aerolevantamentos geofísicos utilizados e a localização da área de estudo.

1.3.2 Dados gravimétricos

Os dados de gravimetria terrestre são parte da compilação de projetos anteriores desenvolvidos por várias instituições, dentre elas o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP), Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB). Ao todo utilizamos os dados de 10235 estações gravimétricas distribuídas em todo o estado de Goiás, Distrito Federal e áreas adjacentes (Figura 1.3).

1.3.3 Processamento de dados gravimétricos

Nesse trabalho foi definido o mapa de anomalias Bouguer como mapa base para o processamento e interpretação dos dados gravimétricos. A anomalia Bouguer é obtida após a remoção de efeitos que não estão diretamente ligados a variações de densidade na crosta terrestre do campo gravimétrico observado. Esse processo é denominado de redução do dado gravimétrico (Blakely, 1996; Reynolds, 2011).

A gravimetria terrestre foi disponibilizada somente como dados de anomalia Bouguer. Estes dados não possuem distribuição regular na área de estudo (Figura 1.3) e foram utilizados principalmente para analisar as assinaturas dos lineamentos Transbrasiliano e Moiporá-Novo-Brasil. Para analisar as assinaturas das sequências metavulcanossedimentares do Arco Magmático de Arenópolis, utilizamos apenas os dados selecionados da janela de interesse (Figura 1.4), que corresponde a um recorte dos dados da anomalia Bouguer do estado de Goiás, porém com reajuste da escala de cores.

Os dados de anomalia Bouguer foram interpolados com o método da curvatura mínima e utilizou-se um tamanho de célula de 3000 m.

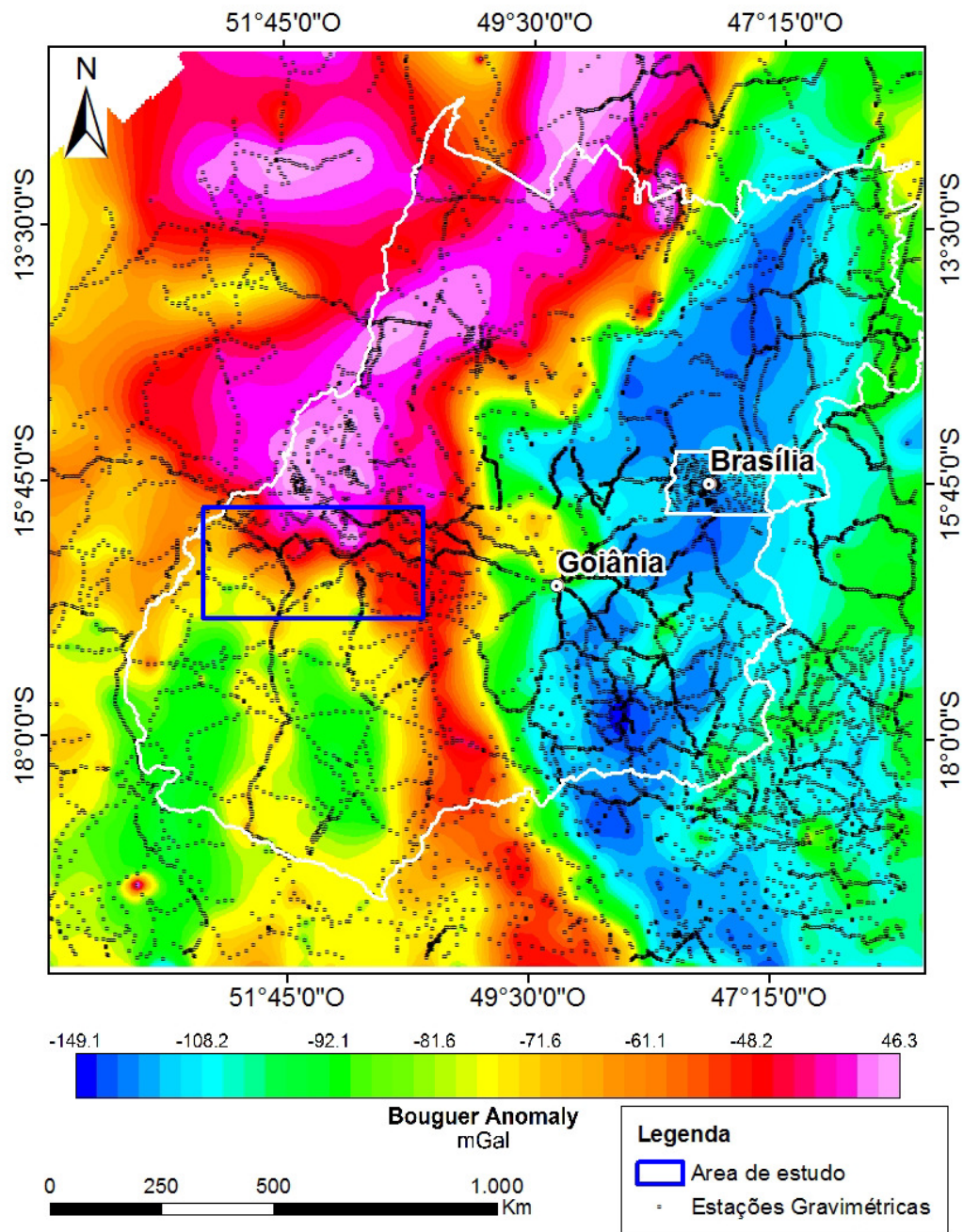


Figura 1.3 - Mapa gravimétrico Bouguer do estado de Goiás com a distribuição das estações gravimétricas e a localização da área de estudo.

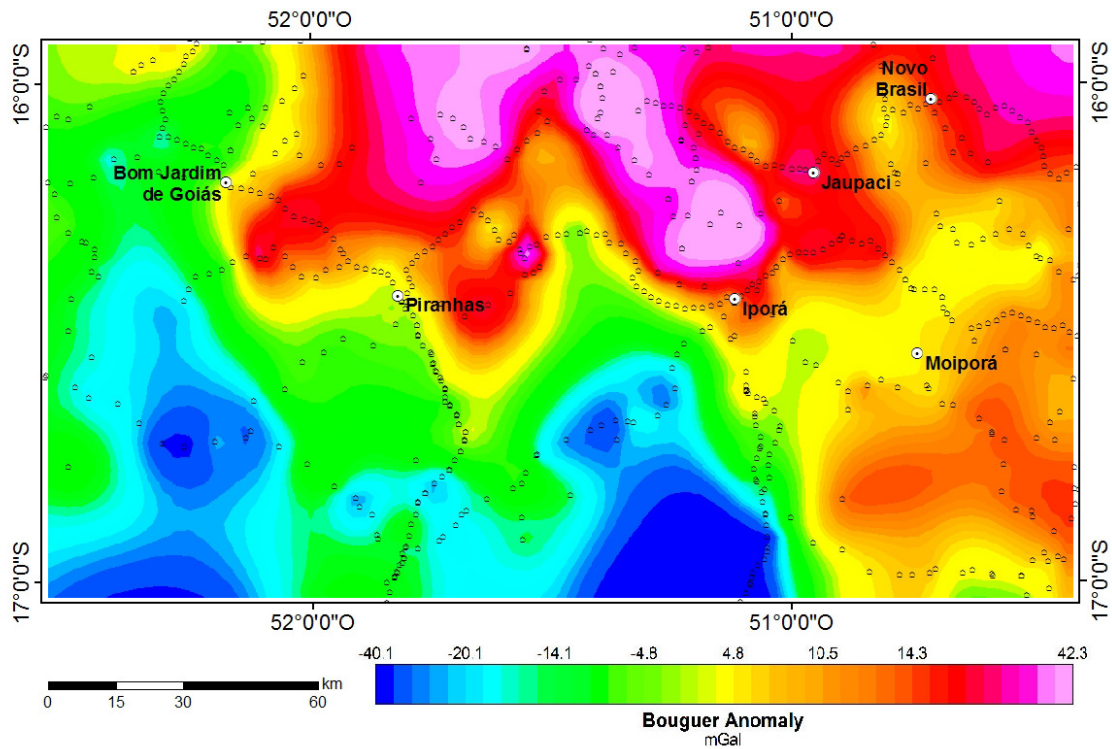


Figura 1.4 - Mapa gravimétrico Bouguer da área de estudo com a distribuição das estações gravimétricas indicadas pelo símbolo em preto.

Para uma melhor caracterização gravimétrica das seqüências metavulcanossedimentares presentes na área de estudo, foi removido a componente regional dos dados de anomalia Bouguer. Desse modo, permanece apenas uma componente residual que representa as fontes gravimétricas com profundidades inferiores a 20 km (Figura 1.5). Para isto foi aplicado um filtro gaussiano de separação regional-residual. O ponto de corte escolhido no espectro de potência (Figura 1.6) corresponde ao número de onda 0,015 que, no espaço, representa um comprimento de onda de 67 km.

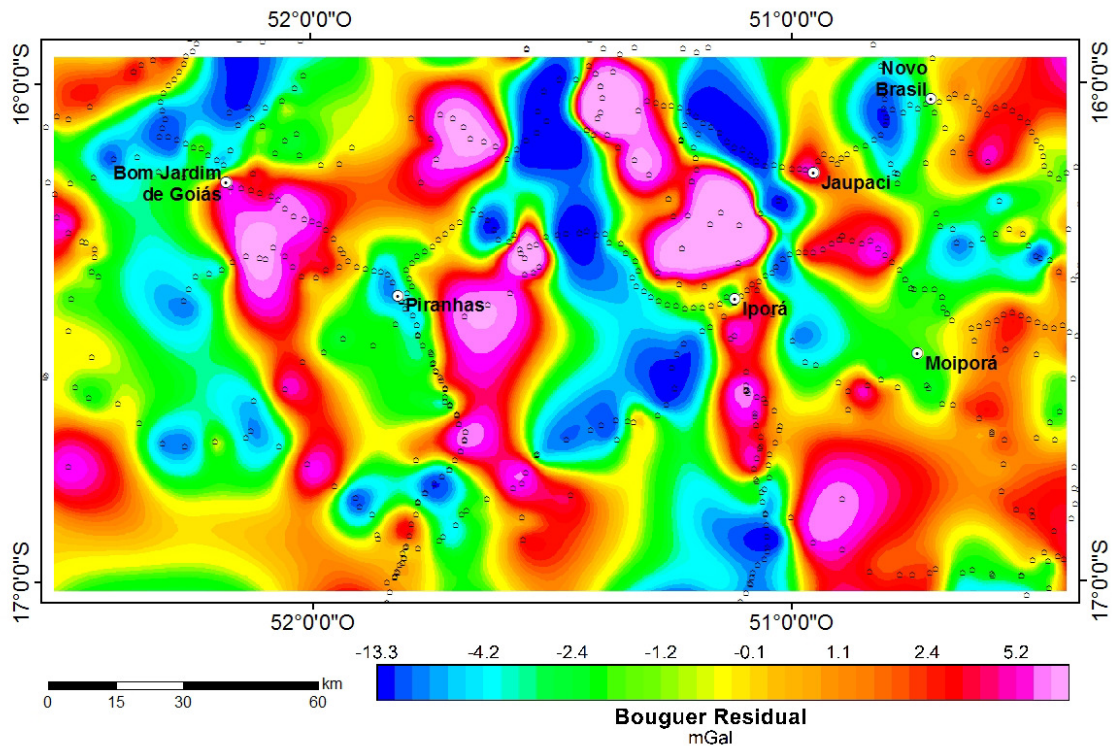


Figura 1.5 - Mapa gravimétrico Bouguer residual com filtro passa alta ($\lambda=67$ km) com a distribuição das estações gravimétricas indicadas pelo símbolo em preto.

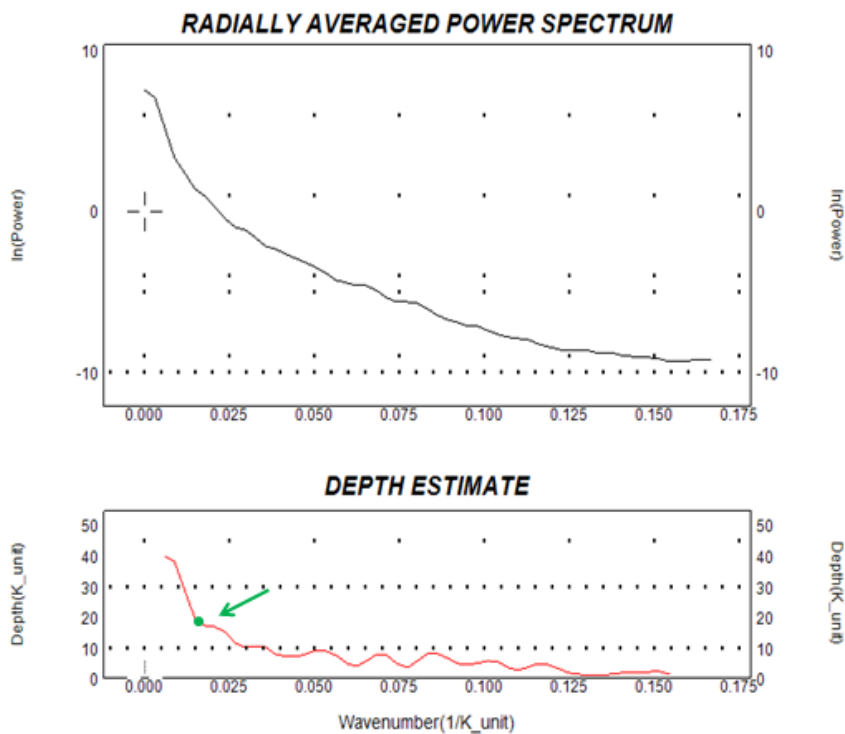


Figura 1.6 - Espectro de potência dos dados gravimétricos da anomalia Bouguer da região delimitada pela área do projeto. A seta verde indicada na parte inferior da figura destaca o ponto de corte das baixas frequências.

1.3.4 Processamento de dados magnetométricos

As etapas de pré-processamento padrão foram realizadas pela empresa LASA Engenharia e Prospecções, estas etapas envolvem: remoção da variação magnética diurna, correção do erro de paralaxe, nivelamento dos perfis, micronivelamento dos perfis e remoção do IGRF (LASA, 2011).

Para a geração dos grids dos dados magnetométricos, foi utilizada a rotina do *Oasis Montaj* de gridagem bidirecional. Seguindo a metodologia proposta por Reeves (2005), os mapas foram elaborados a partir de grids regulares, interpolados em malha quadrada, com dimensões de 125m x 125m, o que equivale a um quarto do espaçamento entre as linhas de voo.

Duas abordagens foram utilizadas para a geração de produtos a partir da imagem do Campo Magnético Anômalo (CMA) (Figura 1.7a). A princípio utilizamos uma abordagem regional com a finalidade de identificar os lineamentos magnéticos relacionados às grandes zonas de cisalhamento do estado de Goiás, e uma abordagem local nas regiões de Fazenda Nova e Bom Jardim de Goiás.

Na abordagem regional utilizamos o sinal analítico 3D (Figura 1.7b) que é obtido pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos três gradientes horizontais derivados do campo magnético nas direções x , y e z . Essa técnica foi desenvolvida primeiramente em duas dimensões por Nabighian (1972) e de forma genérica, centraliza a anomalia independentemente da orientação da magnetização do corpo (Isles & Rankin, 2013). O sinal analítico 2D irá mapear de forma eficaz corpos localizados em baixas inclinações magnéticas ou na presença de magnetização remanente, pois é independente das características direcionais da magnetização de origem, o que não se estende ao caso 3D (Li, 2006). Para este, a forma e o valor absoluto do sinal analítico são também dependentes das direções de magnetização e do valor do campo, além de outros fatores como a profundidade do topo da borda abaixo do nível da observação e de seu mergulho, que determinam o deslocamento sofrido pela anomalia em relação ao centro do corpo.

Na abordagem local, além da imagem do sinal analítico, foram utilizadas também as derivas direcionais do campo magnético anômalo. As derivadas horizontais realçam os limites dos corpos nas direções x e y . A derivada vertical é um filtro passa-alta, amplamente utilizado, que ressalta os limites dos corpos das anomalias rasas, localizando fontes de forma mais precisa (Figura 1.7c) (Cooper & Cowan, 2005).

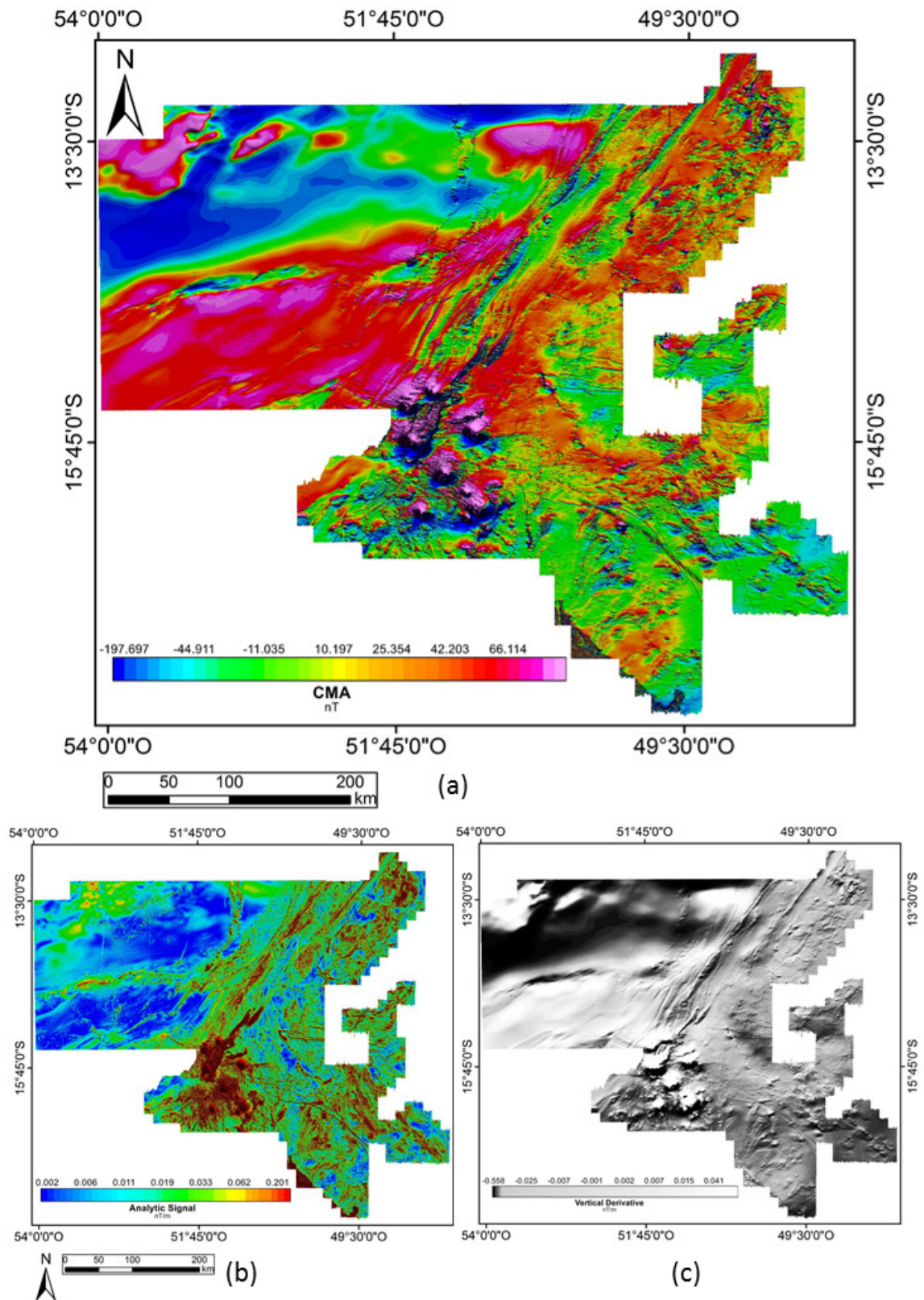


Figura 1.7 - Imagens magnetométricas com a junção de todos os aerolevantamentos utilizados. (a) Campo Magnético Anômalo (CMA) (b) Sinal analítico 3D. (c) Primeira derivada vertical do campo magnético anômalo.

1.3.5 Inversão geofísica – Utilizando o algoritmo VOXI Earth Modeling

O *VOXI Earth Modeling* é um método para criar modelos geofísicos em 3D a partir de dados magnéticos e gravimétricos. Este método opera dentro da plataforma de exploração do programa computacional *Oasis montaj* e possui técnicas para a modelagem dos dados geofísicos que fornecem maior compreensão, inferindo sobre estruturas em subsuperfície (Geosoft, 2019).

O *VOXI* utiliza o processamento da plataforma na nuvem para executar inversões de dados geofísicos. Ele utiliza uma célula cartesiana de corte (CCC) e um algoritmo iterativo de inversão de ponderação desenvolvido por Ingram *et al.* (2003) e simplificado por Ellis & MacLeod (2013) para representar superfícies geológicas com maior precisão.

1.3.6 Inversão de dados gravimétricos

A gravimetria tem sido utilizada em investigações de ampla gama de escalas, como estudos tectônicos, exploração mineral, problemas de engenharia e ambientais (Hinze, 1990). A inversão de dados gravimétricos visa à construção de modelos 3D de contraste de densidade, um passo importante na interpretação quantitativa, uma vez que tais modelos fornecem mais informações que podem ser extraídas dos dados gravimétricos (Li & Oldenburg, 1998).

Na modelagem direta de dados gravimétricos a componente vertical do campo gravimétrico é dada por

$$g_z(\mathbf{r}_0) = \gamma \int_V \rho(\mathbf{r}) \frac{z - z_0}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^3} dv, \quad (1)$$

onde \mathbf{r}_0 é o ponto de observação, γ é a constante gravitacional, V é o volume de massa anômala, $\rho(\mathbf{r})$ é o valor de densidade, e \mathbf{r} é a localização da fonte. O sistema de coordenadas adotado assume o eixo z verticalmente para baixo. O objetivo é recuperar a densidade ρ diretamente dos dados gravimétricos g_z .

Os algoritmos de inversão assumem um conjunto de prismas retangulares ou células, cada um com um valor de densidade constante. Para a discretização, divide-se a

região de interesse em um conjunto de células prismáticas 3D e define-se os tamanhos de células que variam com a quantidade de dados adquiridos, dado que as menores células resultam em maior resolução dos dados. Além disso, define-se também a quantidade das células nos três eixos x, y e z. O campo gravimétrico na j-ésima posição é dada por

$$d_j = \sum_{k=1}^M G_{jk} \rho_k, \quad j = 1 \dots M, \quad (2)$$

onde G_{jk} é a matriz de sensibilidade que quantifica a contribuição da k-ésima célula na j-ésima posição.

$$G_{jk} = \gamma \int_{\Delta V_k} \frac{z - z_{0j}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{0j}|^3} dv, \quad (3)$$

onde ΔV_k é o volume da k-ésima célula.

O desajuste dos dados ou *misfit* é obtido através de

$$\phi_d = \|W_d(\mathbf{d} - \mathbf{d}^{obs})\|_2^2, \quad (4)$$

onde \mathbf{d}^{obs} é o vetor de dados observados, \mathbf{d} são os dados previstos e W_d é o desvio padrão do erro associado ao i-ésimo dado. Um modelo aceitável é aquele que minimiza ϕ_d a um valor suficientemente pequeno.

Existem infinitos modelos que reduzem o *misfit* a um valor desejável, porém para encontrar um modelo particular, define-se uma função objetiva (*objective function*) que visa minimizar as grandezas subjetivas ajustando os dados adequadamente.

A função objetiva se utiliza de um modelo de referência que seja suave nas três direções espaciais, pode ser um modelo de densidade, estimado a partir de investigações anteriores ou um modelo de *background*. O modelo de referência e outras funções de ponderação da função objetiva permitem incorporar informação adicional na inversão (Li & Oldenburg, 1998).

1.3.7 Inversão de dados magnetométricos

A inversão de dados magnetométricos é utilizada para gerar modelos de susceptibilidade 3D. A principal vantagem dos modelos de susceptibilidade 3D é o acréscimo de informações sobre a geometria e profundidade das fontes magnéticas que não estão imediatamente disponíveis na imagem bidimensional do campo magnético anômalo. No entanto, a magnetização remanente é uma das principais dificuldades a ser enfrentada durante o processamento e interpretação dos dados magnetométricos (Ellis *et al.*, 2012).

Cada rocha contém uma quantidade pequena de minerais magnéticos. Estes grãos podem ser magnetizados permanentemente durante a formação da rocha ou por algum processo posterior. A magnetização remanente (\mathbf{M}_r) está relacionada ao campo geomagnético do passado geológico, já a magnetização induzida (\mathbf{M}_i) é adquirida pela influência do campo geomagnético atual em decorrência do tempo em que a rocha ficou exposta a este campo. Como normalmente a direção de \mathbf{M}_r é diferente de \mathbf{M}_i , a magnetização total (\mathbf{M}_t) é a soma vetorial das magnetizações remanente e induzida.

$$\mathbf{M}_t = \mathbf{M}_r + \mathbf{M}_i . \quad (5)$$

Na maioria das inversões baseadas em *VOXEL*, assume-se que a resposta magnética decorre inteiramente da magnetização induzida. No entanto, na última década, vários estudos mostraram que a magnetização remanente é muito mais prevalente do que se pensava anteriormente (McEnroe *et al.*, 2009) e afeta as porções mais rasas da crosta e as zonas de mineralização. Infelizmente, a magnetização remanente pode distorcer seriamente a inversão com base na suposição de que a fonte contém apenas magnetização induzida.

Ellis *et al.* (2012) apresenta a técnica chamada de Inversão do Vetor de Magnetização (MVI) que incorpora a magnetização remanente e induzida sem o conhecimento prévio da direção ou intensidade da magnetização remanente.

Partindo da suposição geral de que as propriedades magnéticas da Terra podem ser representadas por uma magnetização volumétrica (Telford *et al.*, 1990), o campo magnético no ponto \mathbf{r}_j gerado por uma fonte magnética com volume V contendo uma magnetização $\mathbf{M}(\mathbf{r})$, é dada pela seguinte equação:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}_j) = \nabla \int_V \mathbf{M}(\mathbf{r}) \cdot \nabla \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|} d\mathbf{r}^3. \quad (6)$$

Se a fonte magnética com volume V é discretizada em v_k ($k = 1, 2, \dots, N$) volumes, cada qual com uma magnetização \mathbf{m}_k constante, assumindo as componentes tridimensionais, a equação (6) pode ser reescrita como:

$$B_\beta(\mathbf{r}_j) = \sum_{k,\alpha}^{N,3} m_{k,\alpha} \int_{v_k} \partial_\alpha \partial_\beta \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|} d\mathbf{r}^3. \quad (7)$$

A equação 7 define o problema direto. Dado um conjunto de fontes \mathbf{m}_k ($k=1,2,\dots,N$), então $B_\beta(\mathbf{r}_j)$ é a anomalia de campo magnético predita nos pontos \mathbf{r}_j ($j=1,2,\dots,M$). Os índices α e β indicam os componentes espaciais dos vetores. De forma generalista, pode-se reescrever a expressão anterior de maneira simplificada como:

$$\mathbf{B} = \mathbf{G}\mathbf{m}, \quad (8)$$

onde \mathbf{G} é a matriz de sensibilidade. O problema magnético inverso é baseado na solução da equação 8 para \mathbf{m} quando \mathbf{B} é dado. Para poder resolver este problema inverso, é necessário sujeitar \mathbf{B} às condições de regularização, uma vez que há a questão da não unicidade nas soluções.

Ellis *et al.*(2012) descrevem o método MVI e seu uso no programa computacional de inversão Geosoft VOXI, baseado na regularização de Tikhonov (Tikhonov, 1943), para resolver o problema inverso para o vetor magnetização, pela minimização da diferença entre o campo calculado e o medido.

A principal tarefa na solução do problema magnético inverso é determinar a distribuição espacial da susceptibilidade magnética (κ), que é relacionada com \mathbf{M} por:

$$\mathbf{M} = \kappa \mathbf{H}_e, \quad (9)$$

onde \mathbf{H}_e é o campo magnético externo. O algoritmo da técnica MVI resolve o problema inverso considerando a natureza anisotrópica da susceptibilidade magnética no ambiente geológico, ou seja, a susceptibilidade magnética anisotrópica é representada

matematicamente como um vetor 3D. Esta é uma generalização no espaço tridimensional da susceptibilidade magnética escalar convencional. Utilizando essa generalização, a equação 9 pode ser reescrita como:

$$\mathbf{M} = \kappa \mathbf{H}_e, \quad (10)$$

onde $H_e = |\mathbf{H}_e|$. Apesar dessa generalização, a técnica MVI também considera a Magnetização Remanente Normal (NMR, representada como \mathbf{M}_{NMR}) que é um termo usado para descrever os vários tipos de magnetização remanente, o que inclui magnetizações químicas, detriticas, isotérmicas, termo-remanentes entre outras.

$$\mathbf{M}_{NMR} = \kappa_{NMR} \mathbf{H}_e, \quad (11)$$

onde κ_{NMR} é a pseudo susceptibilidade magnética causada pela NMR. Define-se a magnetização efetiva (\mathbf{M}_{eff}) como:

$$\mathbf{M}_{eff} = \mathbf{M} + \mathbf{M}_{NMR}. \quad (12)$$

Usando as equações (10) e (11) podemos reescrever a equação (12) como:

$$\mathbf{M}_{eff} = \kappa_{MVI} \mathbf{H}_e, \quad (13)$$

onde:

$$\kappa_{MVI} = \kappa + \kappa_{NMR}. \quad (14)$$

A equação (14) mostra a susceptibilidade magnética usada no problema inverso, resolvido pelo VOXI MVI. A inclinação e declinação magnética da susceptibilidade magnética “efetiva” podem ser estimadas (Aisengart, 2015), o que pode ser uma informação útil para inferir sobre diferenciação de litologias, idades ou eventos de magnetização de corpos de rochas.

1.4 Estrutura da dissertação

Essa dissertação de mestrado está estruturada em três partes principais:

1. A primeira apresenta uma introdução do projeto e objetivos para o desenvolvimento da pesquisa, bem como introduz os materiais, métodos utilizados e localização da área de pesquisa;
2. A segunda parte está organizada em formato de artigo que será submetido a uma revista indexada, intitulado “Caracterização geofísica de estruturas associadas às mineralizações de cobre e ouro no Arco Magmático de Arenópolis – Goiás - Brasil”;
3. Na terceira parte encontram-se as discussões e conclusões sobre os resultados obtidos e as referências utilizadas.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA DE ESTRUTURAS ASSOCIADAS ÀS MINERALIZAÇÕES DE COBRE E OURO NO ARCO MAGMÁTICO DE ARENÓPOLIS – GOIÁS - BRASIL

Resumo

O Arco Magmático de Arenópolis tem sido alvo de diversas pesquisas para exploração de cobre e ouro, constituindo-se como um terreno estratégico para o fomento da indústria mineral no estado de Goiás. Com a finalidade de identificar características geofísicas de estruturas importantes na mineralização de cobre e ouro na região oeste de Goiás, realizou-se processamento e interpretação de dados de gravimetria e magnetometria.

A utilização de dados gravimétricos terrestres e aerolevantamentos magnéticos permitiu a análise de estruturas locais de segunda ordem de poucas dezenas de quilômetros até grandes zonas de cisalhamento de centenas de quilômetros no estado de Goiás. Os dados geofísicos foram correlacionados com estruturas, litologias e ocorrências minerais mapeadas. Além da análise bidimensional, realizou-se a inversão de dados geofísicos que permitiu a construção de modelos tridimensionais das anomalias selecionadas.

Em escala regional, o estudo teve como foco as zonas de cisalhamento Transbrasiliano e Moiporá-Novo Brasil no estado de Goiás. A análise realizada permitiu mapear e sugerir o prolongamento do lineamento Moiporá-Novo Brasil. Por meio da interpretação de dados gravimétricos sugerimos a extensão dessa estrutura da cidade de Araguapaz até São Simão, alcançando cerca de 450 km de extensão. O resultado dessa interpretação nos permite inferir que essa zona de cisalhamento esteja conectada ao manto terrestre.

Com enfoque na região oeste de Goiás, analisamos a assinatura gravimétrica das sequências metavulcanossedimentares Bom Jardim, Arenópolis Piranhas, Iporá-Amorinópolis e Jaupaci que se localizam no Arco Magmático de Arenópolis, entre os lineamentos Transbrasiliano e Moiporá-Novo Brasil. A análise do mapa de anomalia Bouguer residual permitiu correlacionar altos gravimétricos com as sequências metavulcanossedimentares mapeadas. Sugere-se que as sequências Bom Jardim e

Arenópolis-Piranhas estendam-se em profundidade para a direção sul, prolongando-se cerca de 40 km sob a Bacia do Paraná.

A correlação de anomalias gravimétricas, lineamentos magnéticos, litotipos e ocorrências minerais mostra que alguns depósitos de cobre da região de Bom Jardim alinham-se com um conjunto de estruturas magnéticas que foram nomeadas neste trabalho de Lineamento Bom Jardim. De modo análogo, na região de Fazenda Nova as ocorrências minerais alinham-se aos lineamentos de segunda ordem da zona de cisalhamento Moiporá-Novo Brasil. Tais ocorrências minerais ficaram circunscritas às anomalias gravimétricas situadas nas adjacências das zonas de cisalhamento Transbrasiliiano e Moiporá-Novo Brasil.

As inversões de dados gravimétricos permitiram a geração de modelos simples que forneceram estimativas de profundidades e formas geométricas das anomalias de densidade relacionadas às quatro sequências metavulcanossedimentares mencionadas. Por outro lado, as inversões de dados magnéticos mostraram, além da forma geométrica, as direções dos vetores de magnetização que proporcionaram a interpretação de dobras e diferenciação litológica nas proximidades das ocorrências minerais de ouro e cobre das regiões de Fazenda Nova e Bom Jardim de Goiás.

Palavras chaves: *Arco Magmático de Arenópolis, lineamento Moiporá-Novo Brasil, gravimetria, magnetometria, inversão geofísica.*

Abstract

The Arenópolis Magmatic Arc has been the object of several researches for copper and gold exploration, constituting as a strategic terrain for the mineral industry promotion in the Goiás state. In order to identify geophysical characteristics of important structures in the mineralization of copper and gold in the Goiás western region, gravimetric and magnetic data processing and interpretation was carried out.

The use of terrestrial gravimetric data and aeromagnetic surveys allowed the analysis of second-order local structures from tens of kilometers to large shear zones of hundreds of kilometers in the Goiás state. Geophysical data were correlated with structures, lithologies and mapped mineral occurrences. In addition to the two-

dimensional analysis, the inversion of geophysical data allowed the construction of three-dimensional models of the selected anomalies.

On a regional scale, the study focused on the Transbrasilian and Moiporá-Novo Brasil shear zones in the Goiás state. The analysis allowed to map and suggest the extension of the Moiporá-Novo Brazil lineament. Through the interpretation of gravimetric data, we suggest the extension of this structure from the Araguapaz to São Simão city, reaching about 450 km. The result of this interpretation allows us to infer that this shear zone is connected to the Earth's mantle.

Focusing on the Goiás western region, we analyzed the gravimetric signature of the metavulcanosedimentary sequences Bom Jardim, Arenópolis Piranhas, Iporá-Amorinópolis and Jaupaci that are located in the Arenópolis Magmatic Arc, between the Transbrasilian and Moiporá-Novo Brasil lineaments. The analysis of the Bouguer residual anomaly map, allowed to correlate high gravimetric values with the mapped metavulcanosedimentary sequences. It is suggested that the Bom Jardim and Arenópolis-Piranhas sequences extend in depth to the south direction, extending about 40 km under the Paraná Basin.

The correlation of gravimetric anomalies, magnetic lineaments, lithotypes and mineral occurrences shows that some copper deposits in the Bom Jardim region are aligned with a set of magnetic structures that were named in this work as Bom Jardim Lineament. Similarly, in the Fazenda Nova region, the mineral occurrences are aligned with the second-order lineaments of the Moiporá-Novo Brasil shear zone. These mineral occurrences were confined to the gravimetric anomalies located in the vicinity of the Transbrasilian and Moiporá-Novo Brasil shear zones.

The inversions of gravimetric data allowed the creation of simple models that provided estimates of depths and geometric forms of density anomalies related to the mentioned four metavulcanosedimentary sequences. On the other hand, the inversions of magnetic data showed, besides the geometric form, the directions of the magnetization vectors that provided the interpretation of folds and lithological differentiation in the vicinities of the gold and copper mineral occurrences of the Fazenda Nova and Bom Jardim de Goiás regions.

Keywords: Arenópolis Magmatic Arc, Moiporá-Novo Brazil lineament, gravimetry, magnetometry, geophysical inversion.

2.1 Introdução

O estado de Goiás é reconhecido pelo seu potencial metalogenético, pois possui expressivo número de ocorrências minerais, garimpos desativados e minas de ouro. Mais precisamente no Arco Magmático de Goiás–Arenópolis vislumbra-se grande potencial para metais bases e nobres, já que abriga importantes depósitos minerais como ouro em Fazenda Nova, cobre e níquel em Americano do Brasil, cobre em Bom Jardim, entre outros (Ramos, 2010; Lacerda Filho *et al.*, 2019).

A análise estrutural desempenha um papel fundamental na exploração de recursos. Quase todos os estilos de depósitos minerais são controlados direta ou indiretamente por alguma forma ou tipo de estrutura. Isso pode ser em escala local ou regional, e em níveis crustais rasos ou profundos. Uma compreensão adequada das configurações estruturais e estruturas chave, dentro de uma determinada região, nos permite contrastar certas feições com configurações de estilos de depósitos conhecidos ou modelados, além de criar modelos preditivos para a localização de alvos potenciais (Isles & Rankin, 2013).

Uma das limitações do mapeamento de campo, especialmente em áreas com afloramentos escassos, é a densidade altamente variável de informações, particularmente no mapeamento estrutural em escala de detalhe. As inter-relações de estruturas vistas apenas em afloramentos amplamente separados podem ser de difícil compreensão, particularmente entre estruturas de primeira e segunda ordem. Em contraste, dados aeromagnéticos e gravimétricos frequentemente fornecem continuidade de informações-chave que podem ser usadas para avaliação de problemas estruturais em uma ampla gama de escalas (Grauch & Hudson, 2011; Gunn, 1997).

Na escala regional destaca-se a importância das grandes zonas de cisalhamento, pois estas atuam como canais para o fluxo de magma e fluidos hidrotermais que proporcionam o acúmulo de depósitos de minério economicamente significativos, por exemplo, a *Eastern Goldfields Province* no *Yilgarn Block*, oeste da Austrália (Cox, 1999) e na zona de falha Carajás, Brasil (Holdsworth & Pinheiro, 2000).

A existência de conexão entre zonas de cisalhamento e o manto superior pode ser reforçada por meio de dados geofísicos. As zonas de cisalhamento de escala continental são caracterizadas por anisotropias regionais no manto superior. Essa anisotropia pode ser caracterizada como anomalias de alto gravimétrico associadas à elevação localizada do limite entre crosta e manto (Pili *et al.*, 1997).

Na escala local destacam-se os lineamentos de segunda ordem que estão associados às grandes zonas de cisalhamento. Marques *et al.* (2019) correlacionou o depósito de Fazenda Nova à falha Bacilândia, uma estrutura NNW de segunda ordem da zona de cisalhamento Moiporá-Novo Brasil. De acordo com esse autor, a falha Bacilândia pode ter atuado como uma estrutura profunda que canalizou os magmas das intrusivas Bacilândia assim como os fluidos hidrotermais.

Além de contribuir no mapeamento de estruturas no plano bidimensional, os dados aeromagnéticos e gravimétricos possuem a propriedade de reconhecer corpos de rochas magnéticas e/ou densas em 3D e fornecem uma excelente ferramenta na compreensão das estruturas na área de interesse.

Por meio da modelagem e inversão de dados geofísicos é possível recuperar a distribuição da propriedade física em profundidade e determinar parâmetros geométricos das fontes magnéticas, tais como profundidade, extensão vertical, mergulho, direção do mergulho, etc (Li & Oldenburg, 1996).

A modelagem e inversão de dados geofísicos tem sido parte essencial de diversos programas de exploração mineral tanto nas grandes empresas quanto na academia. Como exemplo podemos citar o depósito *Raglan* no norte de Quebec onde a inversão de dados aeromagnéticos resultou em uma melhor compreensão sobre a natureza do depósito e identificou mineralizações em profundidade que foram confirmadas através de furos de sondagem (Oldenburg & Pratt, 2007).

No Brasil, podemos citar como exemplo a aplicação da inversão de dados magnéticos no estudo da província mineral de Carajás, onde se obteve boa correlação da geologia e corpos de minério conhecidos com os corpos magnéticos modelados (Leão-Santos *et al.* 2015). Outro exemplo é a aplicação da inversão de dados gravimétricos para exploração de minério de ferro na região do quadrilátero ferrífero em Minas Gerais. Como os corpos de minério possuem grande contraste de densidade com a rocha encaixante, constatou-se anomalias bem definidas nos dados adquiridos (Martinez *et al.*, 2012).

A meta principal desse trabalho é a caracterização de estruturas de médio a grande porte que estão relacionadas às mineralizações de cobre e ouro no Arco Magmático de Arenópolis. Para atingir esse objetivo escolheu-se utilizar dados gravimétricos e magnéticos juntamente com mapas geológicos e um banco de dados de ocorrências minerais.

2.2 Geologia Regional

2.2.1 Unidades geotectônicas

A Província Tocantins é um cinturão orogênico Neoproterozóico composto por três faixas de dobramentos denominados Araguaia, Paraguai e Brasília. Essa província foi desenvolvida como resultado da colisão de três blocos continentais: Amazonas, São Francisco/Congo e Paranapanema (Brito Neves e Cordani, 1991).

A Província Tocantins localiza-se entre os Cráton Amazônico a oeste, São Francisco a leste, e é recoberta pelos sedimentos Fanerozóicos da Bacia do Paraná a sul, Bacia do Parecis a oeste e da Bacia do Parnaíba a norte (Almeida *et al.*, 1981) (Figura 2.1).

A área de estudo situa-se na Faixa Brasília que é composta por uma zona externa representada por metassedimentos plataformais de baixo grau metamórfico e uma zona interna constituída por rochas metassedimentares de fácies mais profundas, localmente associadas a corpos ofiolíticos tectonicamente alojados nas rochas do Grupo Araxá (Pimentel *et al.*, 1991) (Figura 2.1b).

Mais especificamente, a zona interna da faixa Brasília é composta por: (i) um núcleo metamórfico, no qual estão inclusos os Grupos Araxá e Canastra e o complexo granulítico Anápolis-Itaçu; (ii) O Maciço de Goiás que é constituído pelo Bloco Arqueano-Paleoproterozóico de Goiás e pelos complexos máfico-ultramáficos acamadados e sequências metavulcanossedimentares associadas; (iii) e o Arco Magmático de Goiás que consiste em um sistema de arcos vulcânicos neoproterozóicos expostos em dois seguimentos: a norte chamado de Arco de Mara Rosa e a sul conhecido como Arco de Arenópolis (Marques, 2017).

O Arco Magmático de Arenópolis está exposto entre as cidades de Bom Jardim de Goiás e Edéia. Compreende sete sequências metavulcanossedimentares de idades distintas, de Oeste para Leste: Bom Jardim de Goiás (ca. 750 Ma), Arenópolis-Piranhas (ca. 929 Ma), Iporá-Amorinópolis (ca. 630 Ma), Jaupaci (ca. 747 Ma), Mossâmedes (ca. 900 Ma), Adelândia (<630 Ma) e Anicuns-Itaberaí (ca. 830 Ma), separadas entre si por metaplutônicas de composição tonalítica a granodiorítica, formadas em ambiente de arcos insulares e cordilheiranos (Laux *et al.*, 2005, Guimarães *et al.*, 2012, Marques, 2017, Rodrigues *et al.*, 1999).

O lineamento Moiporá-Novo Brasil separa essas faixas em dois setores distintos. O setor oriental abrange tonalitos calci-alcalinos, milonitizados da região de

Sanclerlândia (ca. 800 Ma) e intrusões graníticas e máficas de Choupana e Turvânia (ca. 600 Ma), os quais estão separados por tonalitos milonitizados, peraluminosos, dispostos ao longo de zonas de cisalhamento de direção norte-sul. Bordejam esse conjunto as sequências metavulcanossedimentares Anicuns-Itaberaí, a leste e Mossâmedes, a norte. As rochas metavulcânicas nesses complexos representam basaltos e andesitos, em geral toleíticos de baixo potássio a calci-alcálicos. Esse conjunto está deformado e empurrado sobre o complexo Anápolis-Itauçu a leste, bem como sobre o Maciço de Goiás a norte. O setor ocidental consiste em uma janela erosiva da Bacia do Paraná, em que as sequências metavulcanossedimentares de Jaupaci, Iporá-Amorinópolis, Arenópolis-Piranhas e Bom Jardim de Goiás estão expostas entre tonalitos com idades entre ca. 900 e 640 Ma. A deformação no setor é acomodada por zonas de cisalhamento de direção NNW-SSE, com o limite mais ocidental marcado por lineamentos de direção NE-SW, os quais configuram o Lineamento Transbrasiliano (Seer, 1985, Curto *et al.*, 2014).

2.2.2 Estruturas regionais

No estado de Goiás duas estruturas se destacam pelo tamanho e importância no contexto geológico regional, são elas o Lineamento Transbrasiliano e o Lineamento Moiporá-Novo Brasil (Figura 2.1a).

O Lineamento Transbrasiliano é um sistema *strike-slip* situado entre o Cráton Amazônico e a porção leste da plataforma Sul-Americana. É considerado uma descontinuidade de escala continental que se prolonga da Argentina ao nordeste do Brasil, estendendo-se também ao continente africano sob o nome de *Kandi Lineament* com mais de 4000 km de extensão. Esse lineamento é constituído por uma sucessão de zonas de cisalhamento dúcteis profundas provavelmente cortando toda a litosfera (Cordani *et al.*, 2013). O modelo mais aceito, proposto por Fuck *et al.* (2013), interpreta o lineamento como um sistema de deformação intracontinental *strike slip* de movimento dextral, formado durante a fase final da orogênese Brasileira.

O Lineamento Moiporá-Novo Brasil é uma zona de cisalhamento de direção N-S. É considerado uma ramificação do lineamento Transbrasiliano que separa unidades geotectônicas neoproterozóicas do Arco Magmático de Arenópolis de unidades arqueanas do Maciço de Goiás, na porção norte (Mota-Araújo *et al.*, 2002). De acordo com Jost *et al.* (1986) o Lineamento Moiporá-Novo Brasil é composto por feixe de

falhas direcionais de rejeito sinistral, com progressiva diminuição da deformação de sul para norte. Contrariamente, Marques (2017) caracteriza a zona de cisalhamento Moiporá-Novo Brasil como uma estrutura litosférica profunda, porém com cinemática dextral.

2.2.3 Mineralizações de cobre e ouro no Arco Magmático de Arenópolis

O Arco magmático de Goiás engloba o chamado cinturão de ouro-cobre de Arenópolis-Mara Rosa que hospeda inúmeros depósitos de ouro e cobre-ouro (Oliveira *et al.*, 2000). Mais especificamente no Arco Magmático de Arenópolis são conhecidos os depósitos de Bom Jardim de Goiás (Cu-Au) e Fazenda Nova (Au), além de diversas ocorrências de ouro e cobre mapeadas.

A mineralização do depósito de Fazenda Nova está hospedada em diques das intrusivas Bacilândia com três estágios de alteração: i) o estágio mineralizante consiste de alteração pervasiva biotítica associada com disseminação de sulfeto e sericitização dos feldspatos acompanhada por *stock-work* de quartzo e brechas silicificadas; ii) O estágio intermediário é composto por *stock-work* de calcita e quartzo com uma assembleia hidrotermal de clorita, epidoto, turmalina e titanita associado a sulfetos como pirrotita-pirita-arsenopirita. A arsenopirita desse estágio não apresenta inclusões de sulfetos e nem de ouro; iii) O último estágio é composto por veios e brechas composto apenas por calcita-ankerita sem alteração hidrotermal ou mineralização aurífera. O depósito de Fazenda Nova foi classificado como *Reduced Intrusion Related* (Marques, 2017).

O depósito de cobre de Bom Jardim está inserido na borda oeste do Arco Magmático de Arenópolis e está localizado em rochas metavulcanossedimentares que ocorrem agrupadas no Grupo Bom Jardim de Goiás (Seer, 1985). Regionalmente, as sequências metavulcanossedimentares são constituídas por rochas metavulcânicas com subvulcânicas associadas, de composição que varia de basaltos toleíticos a riolitos metamorfisados em fácies xisto verde e anfíbolito (Pimentel & Fuck, 1986). Nesse depósito, as rochas hospedeiras da mineralização são rochas piroclásticas compostas predominantemente por tufos de composição intermediária e caráter cálcio-alcalino, que podem ter sido formadas em ambiente subaquoso a subaéreo de arcos vulcânicos (Guimarães *et al.*, 2012).

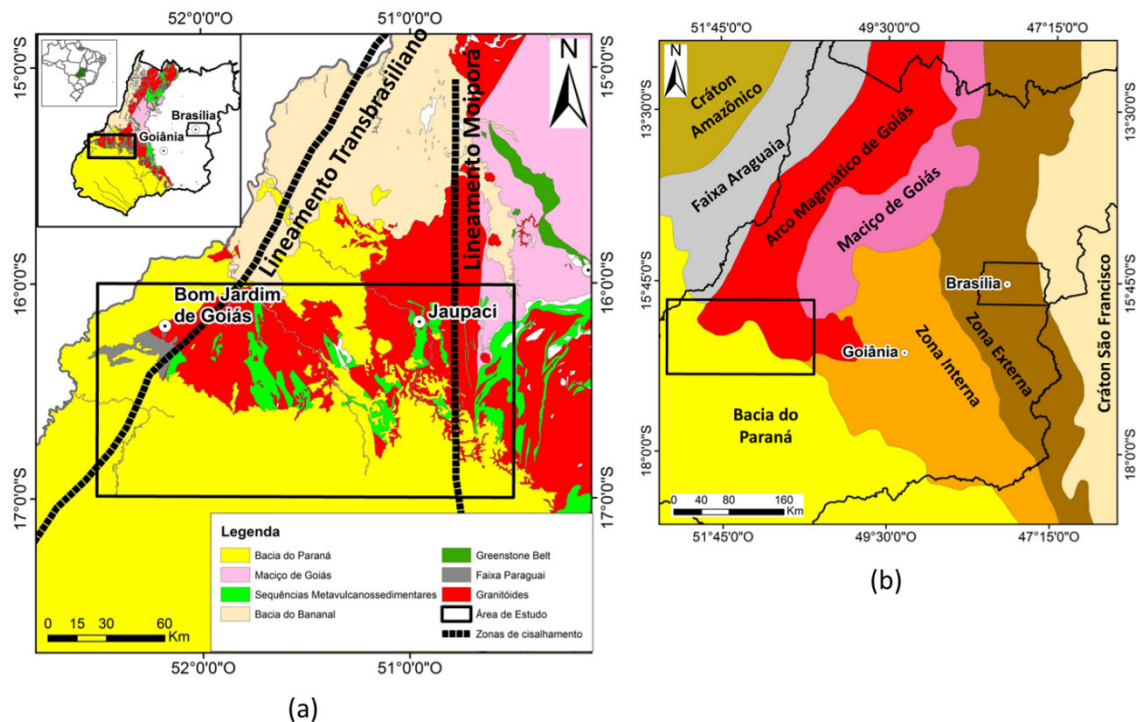


Figura 2.1(a) Mapa geológico regional com as principais unidades geológicas e a localização da área de estudo. (b) Mapa com as principais unidades tectônicas do estado de Goiás e a localização da área de estudo (Modificado de Pimentel *et al* (2000)).

2.3 Materiais e Métodos

2.3.1 Dados gravimétricos e magnéticos

Foram utilizados dois tipos de dados geofísicos. Os dados gravimétricos do estado de Goiás e áreas adjacentes resultam da união de levantamentos gravimétricos terrestres feitos por várias universidades brasileiras e instituições governamentais compondo um total de 10235 estações gravimétricas distribuídas em todo o estado de Goiás que foram cedidas pelo BNDG (Banco Nacional de Dados Gravimétricos) pertencente a ANP (Agência Nacional do Petróleo).

O conjunto de dados magnetométricos consta de quatro projetos aerogeofísicos, são eles: Sudeste do Mato Grosso (LASA, 2011), Oeste do Arco Magmático de Mara Rosa (LASA, 2005), Arco Magmático de Arenópolis-Sequência Juscelândia (LASA, 2004) e Arco Magmático de Mara Rosa (LASA, 2004). Todos os projetos aerogeofísicos utilizados foram realizados pela LASA Engenharia e Prospecções S.A e adquiridos com linhas de direção N-S espaçadas de 500 m, linhas de controle de direção

E-W espaçadas de 5 km e altura constante de 100 m. Para uma descrição detalhada dos levantamentos aeromagnéticos disponíveis no Brasil, incluindo a área estudada, consulte o site da CPRM - Serviço Geológico do Brasil (<http://www.cprm.gov.br/aero/aero.htm>).

2.3.2 Abordagem de interpretação

Dados gravimétricos e magnéticos são amplamente utilizados para estudar tanto a tectônica regional quanto estruturas e assinaturas de unidades geológicas locais. A interpretação geofísica/geológica baseia-se na evidência de que determinada feição, regional ou local, pode estar associada à densidade e/ou a magnetização anômalas e a partir dessa caracterização estabelece-se assinaturas geofísicas que podem auxiliar no entendimento e reconhecimento de áreas com potencial mineral.

A partir dos dados magnéticos extraímos a imagem da primeira derivada vertical e do Sinal Analítico (Roest et al., 1992 e Li, 2006) com a finalidade de identificar os lineamentos magnéticos tanto das zonas de cisalhamento principais quanto dos lineamentos de segunda ordem que bordejam as grandes estruturas.

Utilizamos a estratégia de sobrepor e correlacionar dados geológicos, gravimétricos, interpretações magnéticas e ocorrências minerais de ouro e cobre com a finalidade de caracterizar, do ponto de vista geofísico, as áreas com potencial para cobre e ouro no Arco Magmático de Arenópolis.

Uma das dificuldades na interpretação dos dados geofísicos foi a identificação de assinaturas gravimétricas das sequências metavulcanossedimentares, pois a influência de estruturas profundas pode mascarar a resposta de corpos mais rasos com pouco contraste de densidade em relação ao seu entorno. Para reduzir essa dificuldade, além do mapa de anomalia Bouguer, utilizamos também um mapa de anomalia Bouguer residual, resultado de uma filtragem passa-alta, preservando comprimentos de onda menores que 67 km.

Os produtos finais têm por objetivo uma análise tridimensional através dos modelos gerados por meio das inversões de dados gravimétricos e magnéticos. A inversão de dados gravimétricos visa à construção de modelos de contraste de densidade, um passo importante na interpretação quantitativa (Li & Oldenburg, 1998).

A principal dificuldade na inversão de dados geofísicos é a não unicidade inerente a qualquer método baseado em campos potenciais. Uma vez que o campo

gravitacional ou magnético é conhecido somente na superfície, existe uma infinidade de modelos de distribuição de densidade ou susceptibilidade magnética que se ajusta aos dados adquiridos.

Na inversão de dados magnéticos enfrenta-se dois problemas adicionais em relação aos dados gravimétricos, são eles a baixa latitude magnética e a remanência. Conseguimos minimizar esses problemas utilizando a técnica de Inversão do Vetor de Magnetização (MVI) baseada no artigo de Ellis *et al.* (2012) que incorpora a magnetização remanente e induzida na inversão 3D, não sendo necessário o conhecimento prévio da direção e intensidade da magnetização remanente.

Para o processamento e inversão de dados geofísicos utilizamos o programa computacional *Oasis Montaj 9.5* juntamente com a sua plataforma *VOXI*. Para realizar a correlação dos dados geológicos, geofísicos e interpretações utilizamos o programa *ArcGis versão 10.2*.

2.4 Resultados

2.4.1 Caracterização geofísica das zonas de cisalhamento regionais do estado de Goiás

De modo geral as zonas de cisalhamento intraplaca são regiões de acomodação de esforços horizontais que podem ocorrer tanto na litosfera oceânica quanto na continental. Essas estruturas geralmente possuem alto ângulo e podem se estender de dezenas a centenas de quilômetros tanto em comprimento quanto em profundidade (Woodcock & Schubert, 1994).

Em ambientes continentais, tais regiões formam zonas de fraqueza muito persistentes devido à alta fluabilidade da litosfera continental o que impede a sua subducção e facilita sua reativação durante diferentes fases de deformação ao longo de períodos de tempo muito longos (até 1 Ga ou mais). Durante períodos de convergência essas zonas de deformação ajudam a transferir grandes deslocamentos para o interior das placas ao passo que em períodos de divergência tectônica elas atuam como zonas de transferência que dividem os segmentos, as margens continentais passivas (Storti *et al.*, 2003).

As zonas de cisalhamento consideradas significativas possuem dezenas de quilômetros de largura e centenas de quilômetros de comprimento. A partir das dimensões superficiais e do ângulo das falhas da zona de cisalhamento pode-se estimar

a profundidade de alcance dessas falhas. De acordo com Walsh & Watterson (1988) e Cowie & Scholz (1992) uma zona de falha subvertical com comprimento e largura maiores que 300 km e 30 km, respectivamente, é muito provável que seja de tamanho suficiente para cortar muito, se não toda a litosfera.

A figura 2.2 mostra os lineamentos magnéticos relacionados às zonas de cisalhamento Transbrasiliano e Moiporá-Novo Brasil. O recorte dos dados utilizados restringe o lineamento Transbrasiliano entre as cidades de Novo Planalto e Bom Jardim de Goiás, já o lineamento Moiporá-Novo Brasil fica restrito entre as cidades de Araguapaz e Moiporá.

No estado de Goiás o lineamento Transbrasiliano está associado em parte a um alto gravimétrico e é caracterizado por uma faixa de lineamentos magnéticos que se estendem por aproximadamente 460 km de comprimento e 55 km de largura (Figura 2.3). Os lineamentos magnéticos do lineamento Transbrasiliano concentram-se na região oeste do alto gravimétrico que é conhecido como alto gravimétrico do Brasil central (Ventura *et al.*, 2011). Essa região é associada à zona sísmica Goiás-Tocantins onde concentram-se grande quantidade de sismos rasos e de baixa magnitude. O modelo proposto por Assumpção e Sacek (2013) interpreta essa anomalia Bouguer como variações na topografia da Moho, sendo a região do alto gravimétrico do Brasil central associado a uma crosta afinada. Soares *et al.* (2006) também sugerem a correlação da zona sísmica Goiás-Tocantins com uma crosta fina.

O alto gravimétrico do Brasil central acompanha o lineamento Transbrasiliano até a região de Bom Jardim de Goiás, a sul dessa cidade os sedimentos da Bacia do Paraná atenuam o efeito das anomalias gravimétricas, pois os sedimentos possuem densidade menor do que a média da crosta terrestre. Assim a continuação do lineamento Transbrasiliano para sul é marcada por uma descontinuidade gravimétrica mais suave, seguindo na direção NE-SW (Figura 2.3).

O lineamento Moiporá-Novo Brasil ainda é pouco estudado, porém sua porção norte é bem caracterizada por uma faixa de lineamentos magnéticos com direção N-S que se estendem da cidade de Araguapaz até Moiporá (Figura 2.2), observa-se também uma descontinuidade gravimétrica que se prolonga para sul, na mesma direção desse lineamento (Figura 2.3). Apesar de receber o nome das cidades Moiporá e Novo Brasil, sugerimos que esse lineamento possa, com base nessa descontinuidade gravimétrica, estender-se da cidade de São Simão até Araguapaz, alcançando aproximadamente 450 km de extensão (Figura 2.3).

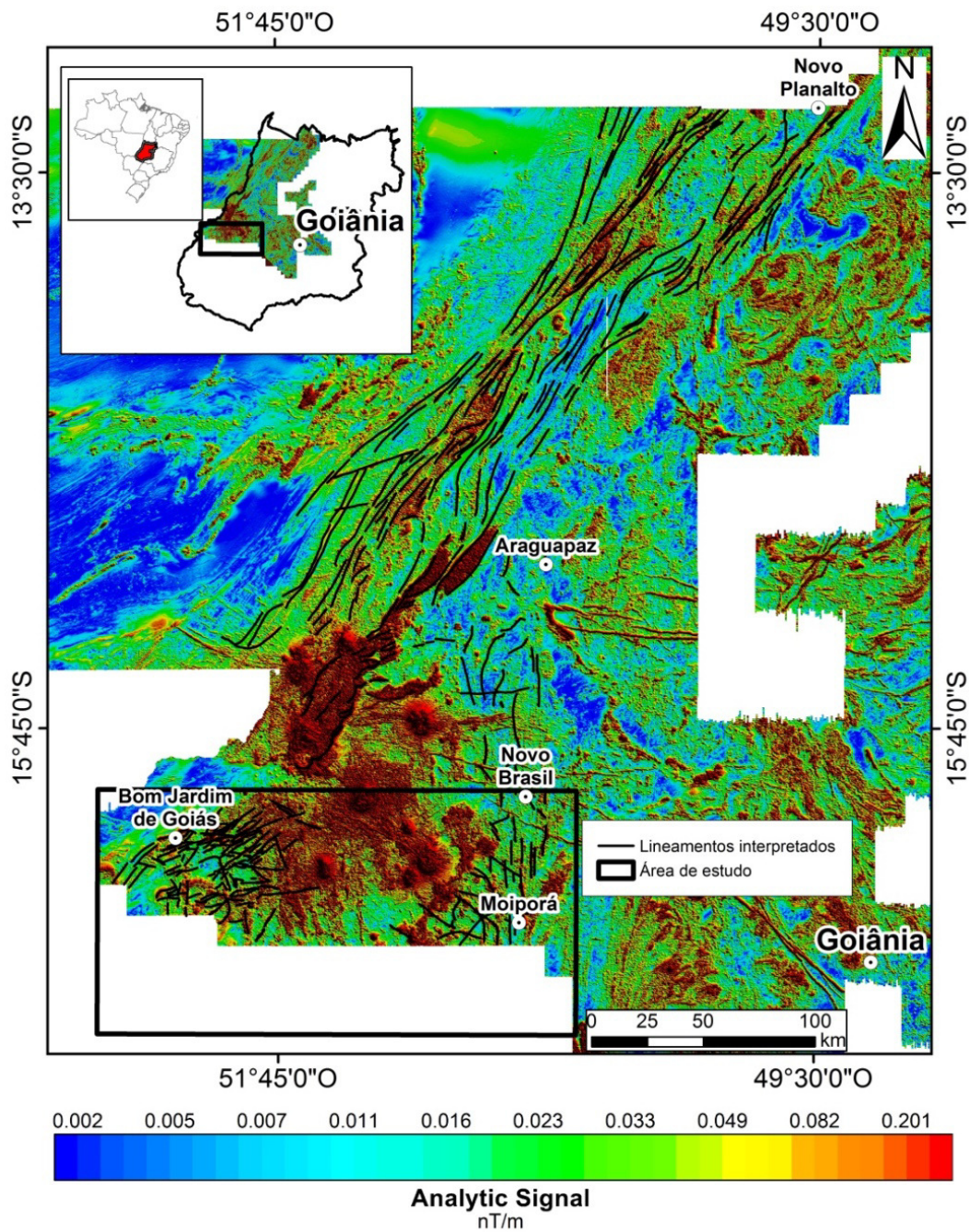


Figura 2.2 - Imagem magnética do Sinal Analítico com destaque para os lineamentos magnéticos das zonas de cisalhamento Transbrasiliano e Moiporá-Novos Brasil, além da localização da área de estudo no estado de Goiás e no território brasileiro.

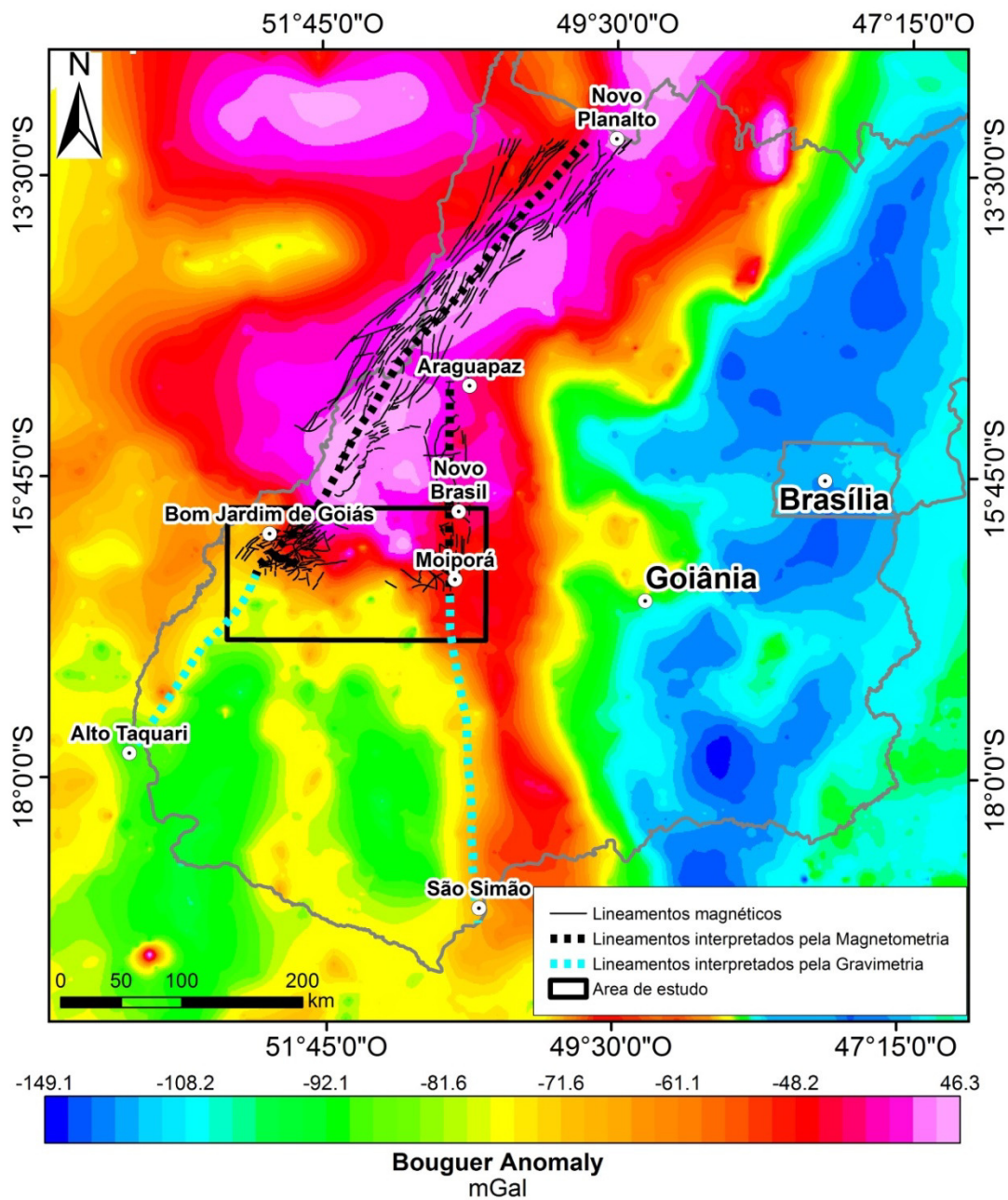


Figura 2.3 - Mapa gravimétrico Bouguer com as principais estruturas interpretadas e a área de estudo sobrepostas.

Do ponto de vista geológico verifica-se que na porção norte o Lineamento Moiporá-Novo Brasil separa o maciço de Goiás do Arco Magmático de Arenópolis. Na região central separa dois níveis crustais distintos, a leste caracterizado prioritariamente por um regime dúctil com alto grau de deformação e a oeste um regime rúptil mais raso. Por fim, na região sul separa os sedimentos do grupo Bauru do grupo São Bento – Formação Serra Geral (Figura 2.4) (Lacerda Filho *et. al.*, 2019).

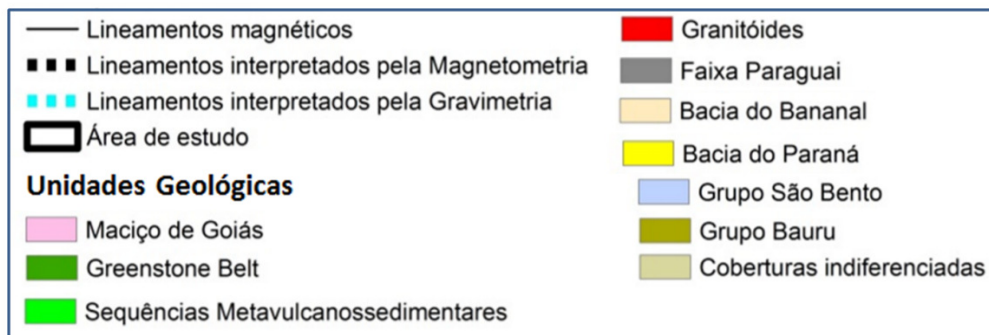
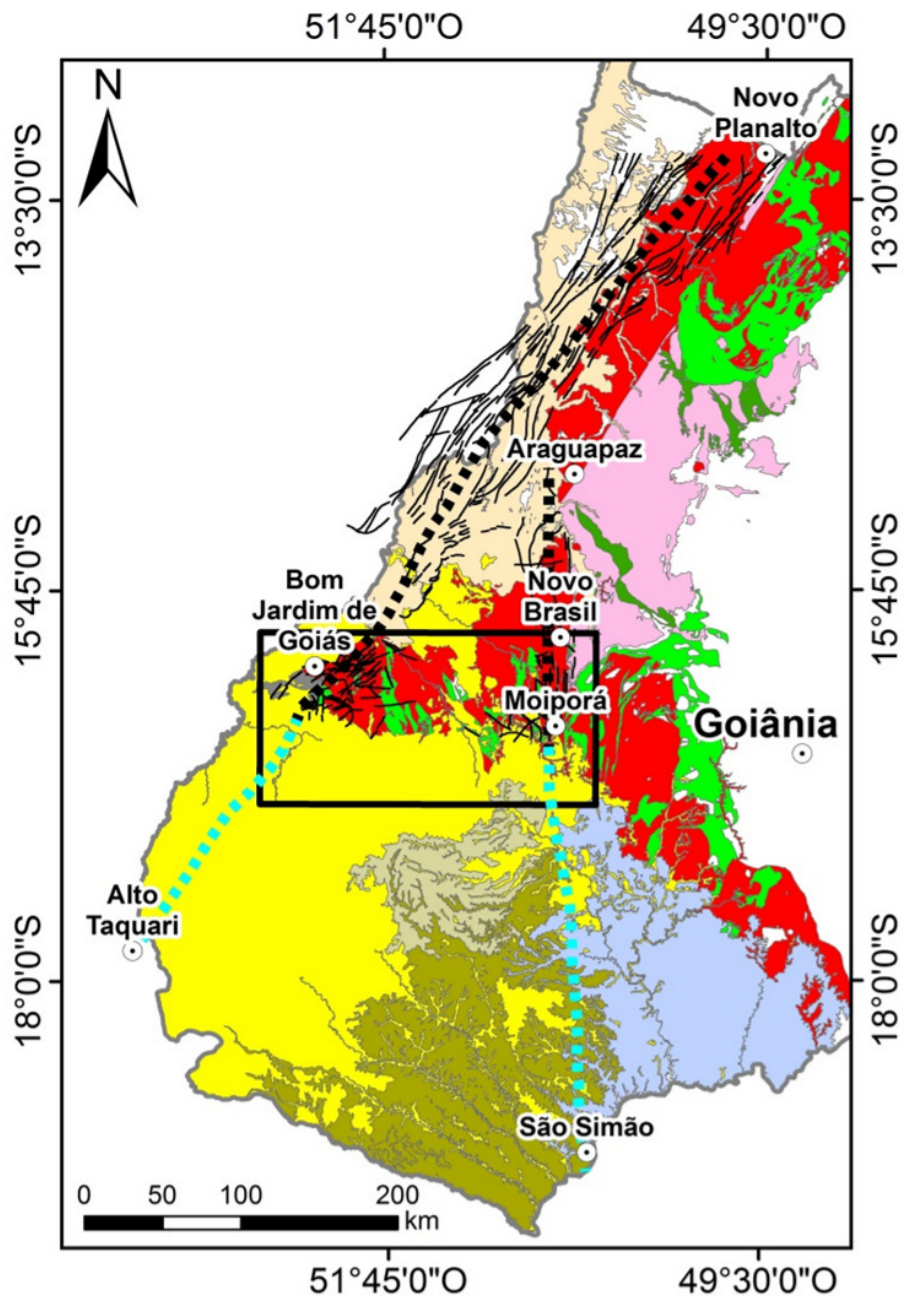


Figura 2.4 - Mapa de unidades geológicas regionais com as principais estruturas interpretadas e com a área de estudo sobrepostas.

Na região delimitada pela Bacia do Paraná, verifica-se um alto gravimétrico na porção leste do lineamento Moiporá-Novo Brasil (Figura 2.3), sugerindo um deslocamento litosférico vertical que posicionou o embasamento num nível superior na porção leste desse lineamento. Observa-se que o pacote de sedimentos depositados na porção oeste é mais espesso do que na porção leste. Na porção oeste tem-se a estratigrafia completa da bacia do Paraná, enquanto que na porção leste tem-se somente o grupo São Bento sobre o embasamento paleoproterozóico, de modo que não consta a presença da sequência basal da Bacia do Paraná (Moreira *et al.*, 2008). Dessa forma, sugerimos a presença de uma falha regional com rejeito vertical que pode ser relacionada ao lineamento Moiporá-Novo Brasil.

Conhecendo as dimensões superficiais dos dois lineamentos analisados pode-se dizer que ambos possuem os pré-requisitos suficientes, de acordo com Walsh & Watterson (1988) e Cowie & Scholz (1992), para sugerir que possuem profundidades que podem alcançar o manto superior. O lineamento Transbrasiliano por possuir uma extensão bem maior do que o Moiporá-Novo Brasil, espera-se que alcance profundidades ainda maiores.

2.4.2 Assinatura gravimétrica das sequências metavulcanossedimentares do Arco Magmático de Arenópolis

Na região delimitada pelo Arco Magmático de Arenópolis, entre as duas grandes zonas de cisalhamento Moiporá-Novo Brasil e Transbrasiliano, verifica-se a existência de quatro sequências metavulcanossedimentares, são elas: Bom Jardim, Arenópolis-Piranhas, Iporá-Amorinópolis e Jaupaci. Essas unidades litológicas possuem grande potencial mineral e por esse motivo faz-se necessário identificarmos suas assinaturas geofísicas.

As unidades litológicas expostas presentes nessas sequências metavulcanossedimentares são compostas por tonalitos e andesitos de idades entre 900 e 640 Ma (Lacerda Filho *et al.*, 2019). Essas rochas em geral possuem densidade média em torno de $2,75 \text{ g/cm}^3$, enquanto que a densidade média da crosta superior é por volta de $2,7 \text{ g/cm}^3$ (Telford *et al.*, 1990). Por esse motivo espera-se que esses corpos apresentem anomalias gravimétricas positivas, porém no mapa gravimétrico Bouguer regional torna-se difícil identificar esses corpos de maneira clara, pois a influência de

sinais de longo comprimento de onda (respostas gravimétricas das regiões mais profundas da crosta) podem mascarar os sinais de comprimento de onda curto ou médio (respostas gravimétricas das regiões mais rasas da crosta) (Figura 2.5).

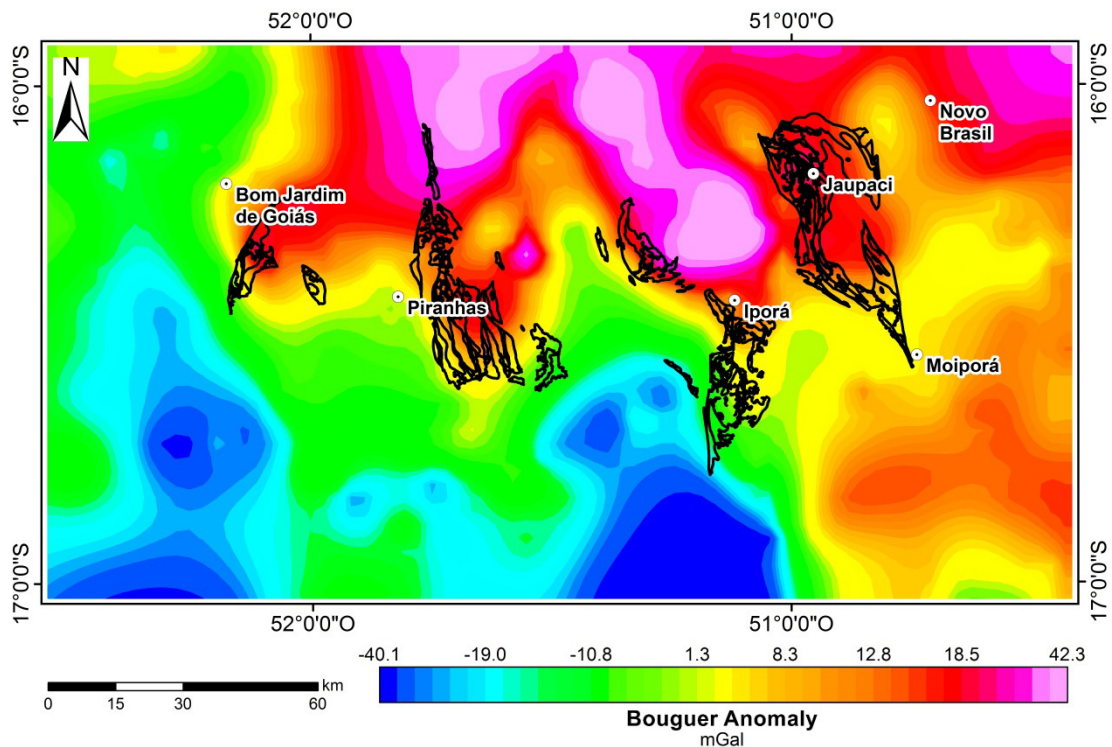


Figura 2.5 - Mapa de anomalia Bouguer da área de estudo. Os contornos em preto são as sequências metavulcanossedimentares mapeadas (Lacerda Filho *et al.*, 2019) localizadas entre os lineamentos Moiporá-Novo Brasil e Transbrasiliano no Arco Magmático de Arenópolis.

Para uma melhor caracterização gravimétrica das sequências metavulcanossedimentares presentes na área de estudo, foi removido, dos dados de anomalia Bouguer, a componente regional, deixando uma componente residual que representa as fontes gravimétricas com profundidades inferiores a 20 km. Para isto, foi aplicado um filtro gaussiano de separação regional-residual. O ponto de corte escolhido, no espectro de potência, corresponde ao número de onda 0,015, que no espaço representa um comprimento de onda de 67 km (Figura 2.6).

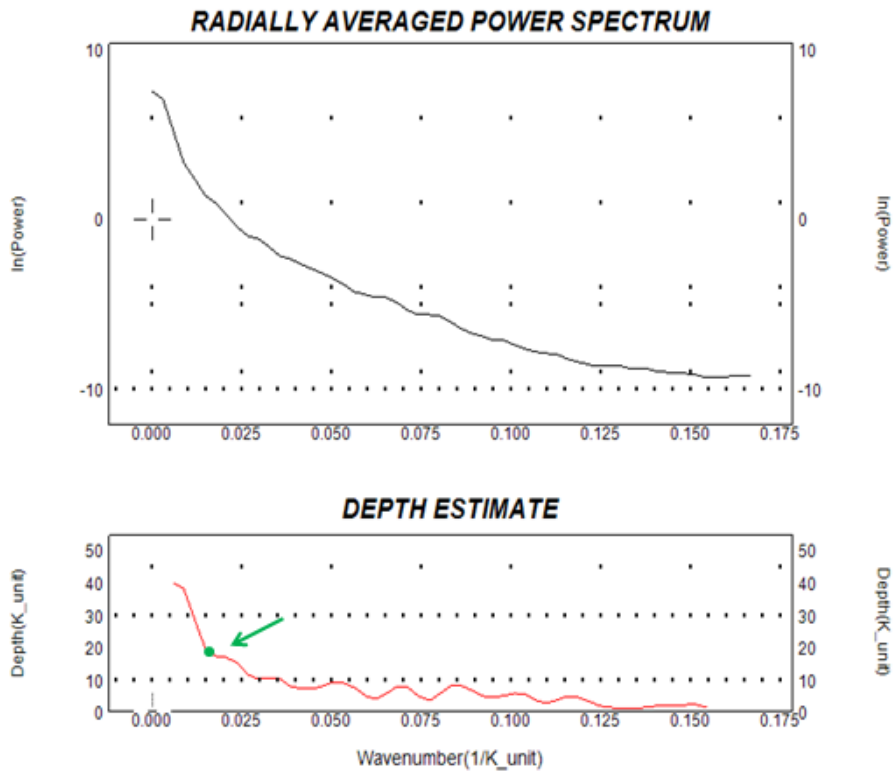


Figura 2.6 - Espectro de potência dos dados gravimétricos da anomalia Bouguer da região delimitada pela área de estudo . A seta em verde indica o ponto escolhido para a separação regional residual.

A profundidade máxima estimada por meio do espectro de potência (Figura 2.6) para as fontes gravimétricas representadas nos dados de anomalia Bouguer da figura 2.5 é de aproximadamente 40 km. É possível supor que esta profundidade corresponda aproximadamente à interface de densidade associada com a descontinuidade de Moho.

Aplicando o filtro correspondente a esse comprimento de onda, obtemos a imagem da figura 2.7.

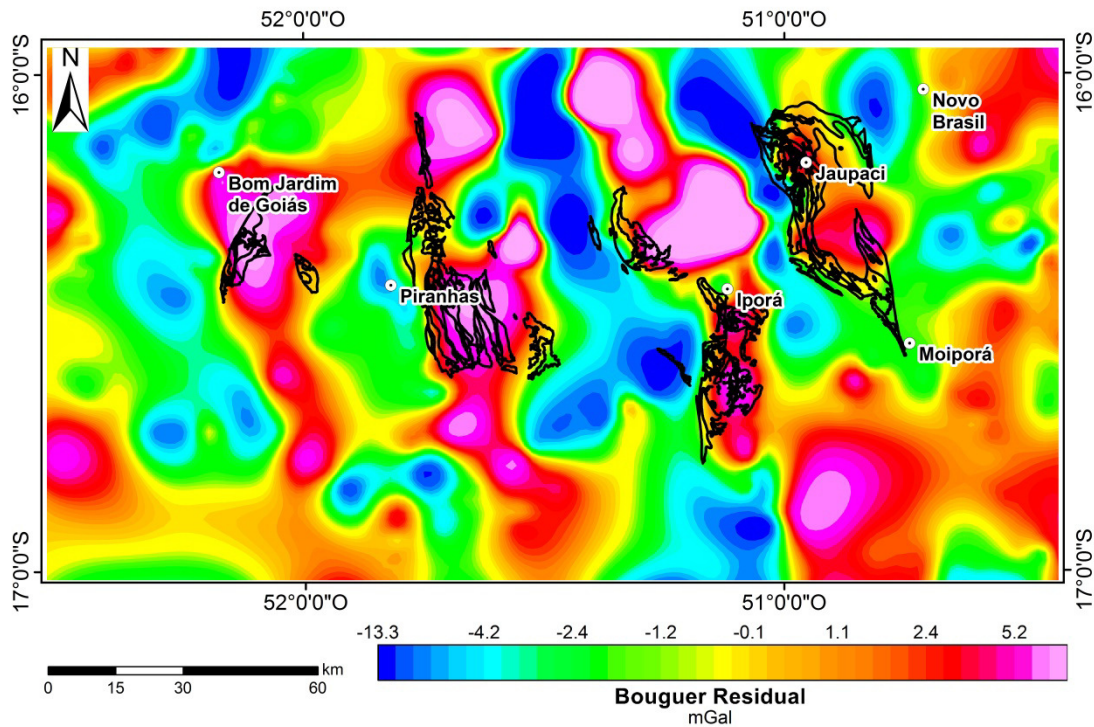


Figura 2.7 - Mapa gravimétrico Bouguer residual com filtro passa alta ($\lambda=67$ km). Os contornos em preto representam as litologias mapeadas (Lacerda Filho *et al.*, 2019) das seqüências metavulcanossedimentares.

A anomalia Bouguer residual representa as anomalias gravimétricas da crosta superior, cujas fontes estão localizadas no máximo a 20 km de profundidade. A partir dessa imagem é possível estabelecer uma correspondência das regiões mapeadas como seqüências metavulcanossedimentares com altos gravimétricos.

A figura 2.8 mostra a correspondência entre o mapa das unidades geológicas e o contorno das anomalias gravimétricas associadas às seqüências metavulcanossedimentares. Percebe-se que parte dos altos gravimétricos observados extrapola a região mapeada como seqüência e seguem na direção da porção norte da Bacia do Paraná.

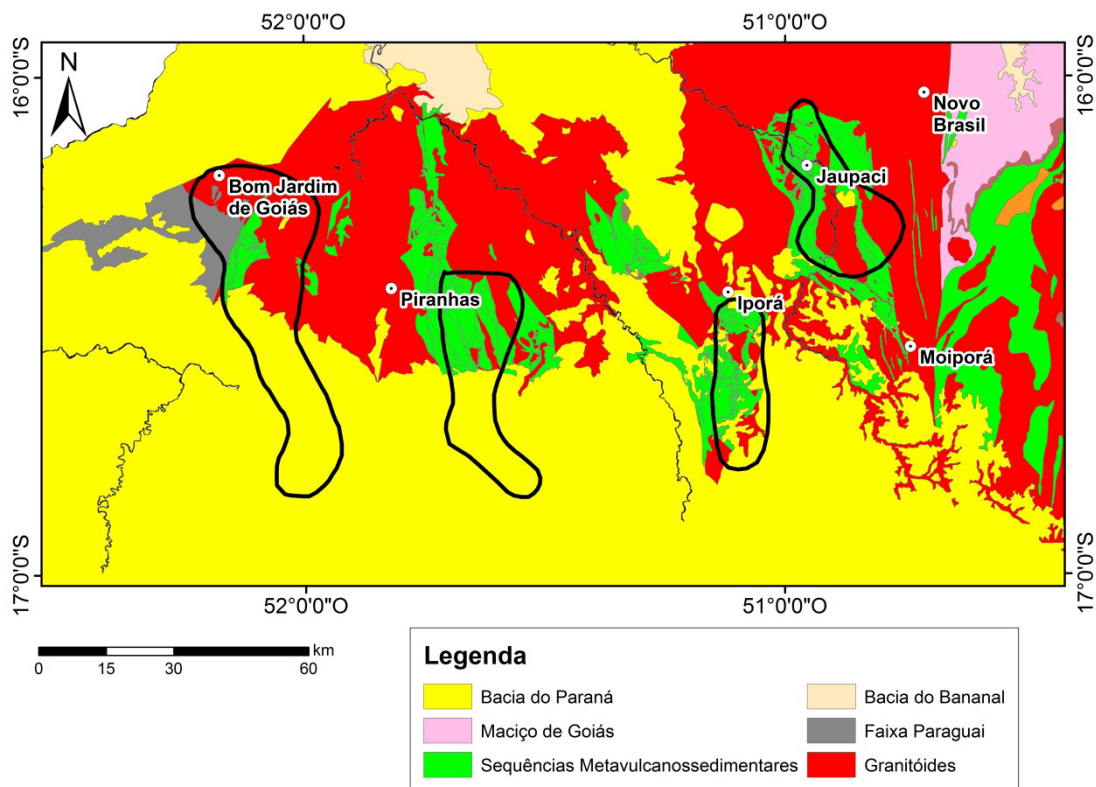


Figura 2.8 - Mapa de unidades geológicas regionais da área de estudo. Os contornos em preto indicam os limites dos altos gravimétricos relacionados às sequências metavulcanossedimentares.

Analisando de oeste para leste observa-se que existe uma associação da sequência metavulcanossedimentar de Bom Jardim com um alto gravimétrico. O prolongamento deste alto para sul, além dos contatos dos sedimentos das Formações Furnas e Ponta Grossa, sugere que esta sequência continua no embasamento da bacia.

De modo análogo, o alto gravimétrico associado à sequência metavulcanossedimentar Arenópolis-Piranhas também se prolonga na direção sul, o que indica que essa sequência pode se prolongar por debaixo dos sedimentos das Formações Furnas e Ponta Grossa.

A sequência Iporá-Amorinópolis também é marcada por um alto gravimétrico. O limite sul da área cartografada dessa sequência coincide com o limite da anomalia geofísica. Diferentemente das outras, aparentemente essa sequência não possui nenhuma região encoberta pela bacia.

A sequência metavulcanossedimentar Jaupaci também está associada a um alto gravimétrico bem restrito à área cartografada.

2.4.3 Estruturas de segunda ordem e ocorrências minerais

Zonas de cisalhamento regionais, como a Zona de Cisalhamento Moiporá-Novo Brasil, são importantes prospectos para a mineralização de ouro, já que constituem zonas onde ocorreram intensas atividades hidrotermais. Contudo, as zonas de cisalhamento secundárias são tão ou mais importantes para as mineralizações quanto as zonas de cisalhamento principais, pois abrigam grande parte das ocorrências e depósitos minerais (Groves *et al.*, 1998).

De acordo com Marques (2017) as mineralizações de ouro do depósito de Fazenda Nova possuem uma forte relação espacial com a falha Bacilândia, uma estrutura NNW de segunda ordem da Zona de Cisalhamento Moiporá-Novo Brasil. De acordo com o mesmo autor, a falha Bacilândia pode ter atuado como uma estrutura profunda que canalizou os magmas das intrusivas Bacilândia assim como os fluidos hidrotermais.

A partir dos dados magnetométricos, foram identificadas outras ramificações ou estruturas de segunda ordem que se conectam ao Lineamento Moiporá-Novo Brasil (Figura 2.9). Essas estruturas conectam essa zona de cisalhamento às sequências metavulcanossedimentares Jaupaci e Iporá Amarinópolis.

A importância do mapeamento das estruturas magnéticas é a identificação de possíveis falhas não aflorantes, além disso, os lineamentos identificados na magnetometria conseguem fornecer uma informação de continuidade das estruturas que muitas vezes são difíceis de serem encontradas nos afloramentos em campo.

A princípio faremos uma diferenciação dos lineamentos magnéticos utilizando como parâmetro a sua direção média. Os lineamentos de segunda ordem que possuem direção diversa e estão nas proximidades da zona de cisalhamento principal serão diferenciados destes. Além disso, inserimos as minas, garimpos e ocorrências minerais de ouro e cobre sobre o mapa de estruturas magnéticas com a finalidade de identificarmos correlações entre as estruturas e os recursos minerais mapeados. Primeiramente analisaremos a região de Fazenda Nova (Figura 2.9).

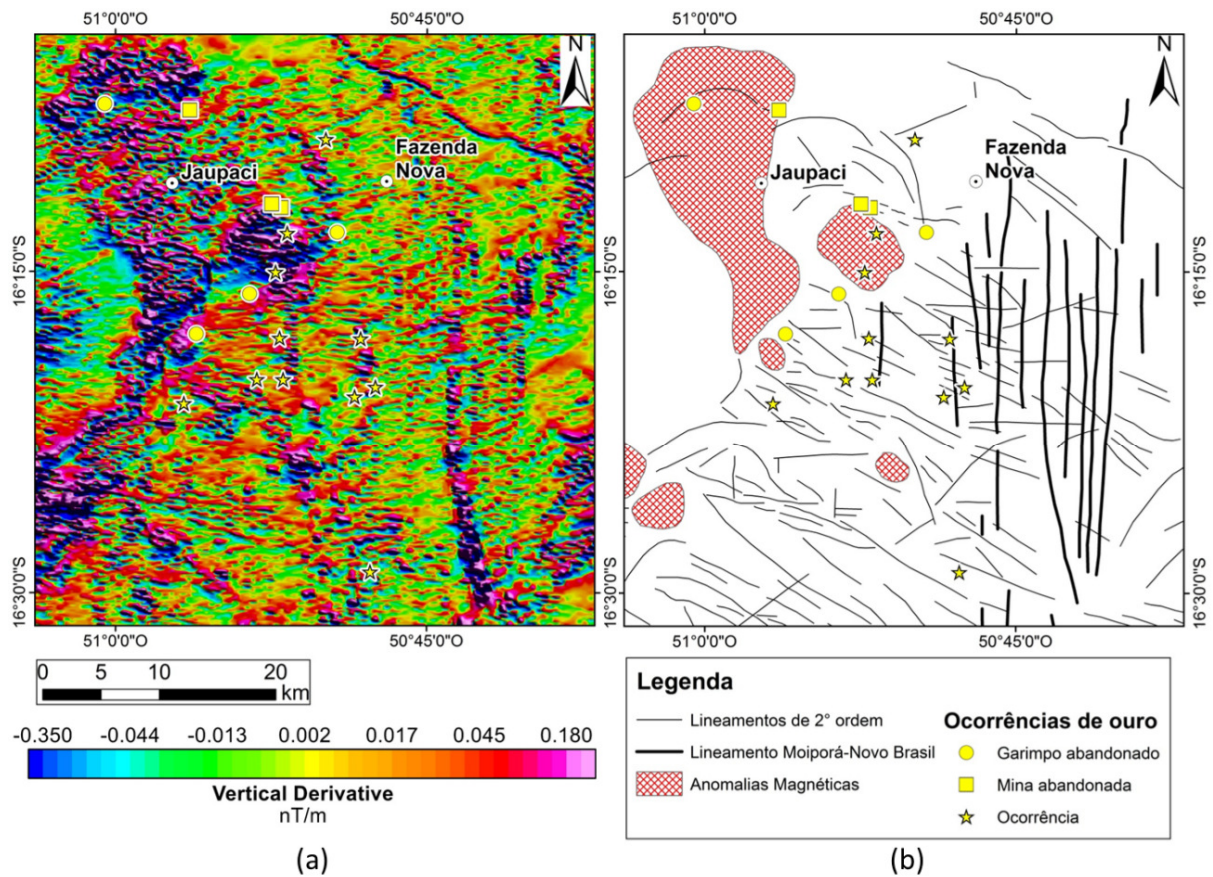


Figura 2.9 – (a) Imagem da derivada vertical com as ocorrências de ouro sobrepostas. (b) Ocorrências de ouro e interpretação de lineamentos e anomalias magnéticas.

Além dos lineamentos, anomalias magnéticas e ocorrências minerais (Figura 2.9), podemos correlacionar a imagem do mapa gravimétrico residual, juntamente com as litologias principais e estruturas mapeadas da região de Fazenda Nova, conforme figura 2.10.

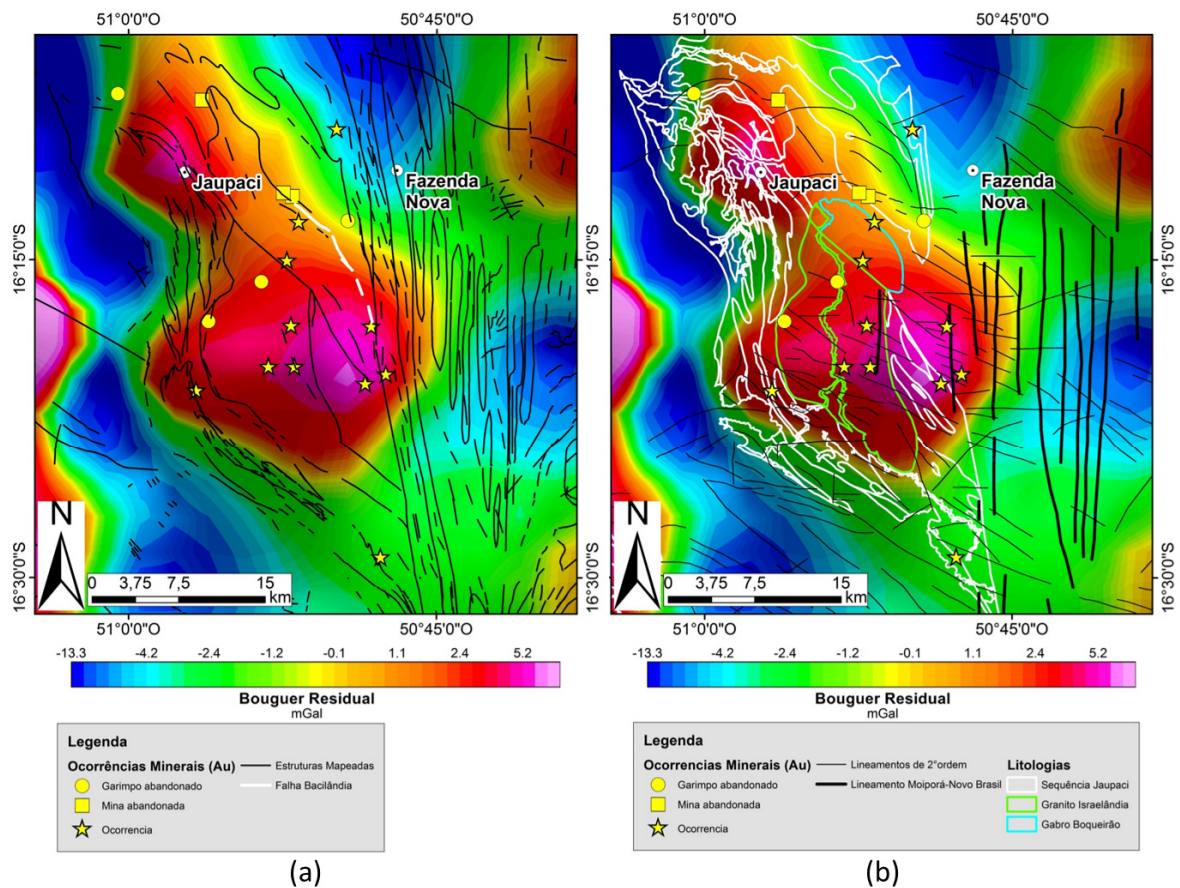


Figura 2.10 – Imagem da anomalia Bouguer residual juntamente com minas, garimpos e ocorrências de ouro da região de Jaupaci (a) Sobreposição de estruturas mapeadas. (b) Sobreposição de lineamentos magnéticos interpretados e contornos das litologias mapeadas.

Sob um ponto de vista regional, verifica-se que as ocorrências, garimpos e minas abandonadas estão localizadas sobre a anomalia gravimétrica da região de Jaupaci, adjacente à zona de cisalhamento Moiporá-Novo Brasil. Sob um ponto de vista mais local observa-se que as ocorrências de ouro estão associadas a estruturas, sejam elas limites dos corpos mapeados ou lineamentos magnéticos.

As duas minas abandonadas que ocorrem a norte do Gabro Boqueirão são chamadas de Bacilândia (à esquerda) e Fazenda Nova (à direita). De acordo com Marques (2017) esses depósitos estão associados à falha Bacilândia (figura 2.10a), porém apenas a sua porção norte pode ser visualizada nos dados magnéticos. Verifica-se que ambas as minas estão localizadas no limite mapeado da sequência Jaupaci que coincide também com o limite da anomalia gravimétrica, muito embora reconheçamos a baixa resolução dos dados gravimétricos.

À leste do granito Israelândia percebe-se uma anomalia gravimétrica interna de maior intensidade. Suas bordas são marcadas por lineamentos magnéticos de direção N-S e cinco ocorrências de ouro.

De maneira geral podemos associar sete ocorrências e dois garimpos abandonados aos lineamentos magnéticos interpretados, além de mais dois garimpos abandonados nos limites da anomalia gravimétrica.

De modo análogo, podemos realizar a mesma forma de análise na região de Bom Jardim de Goiás, onde se encontram depósitos e ocorrências de Cobre (Figura 2.11).

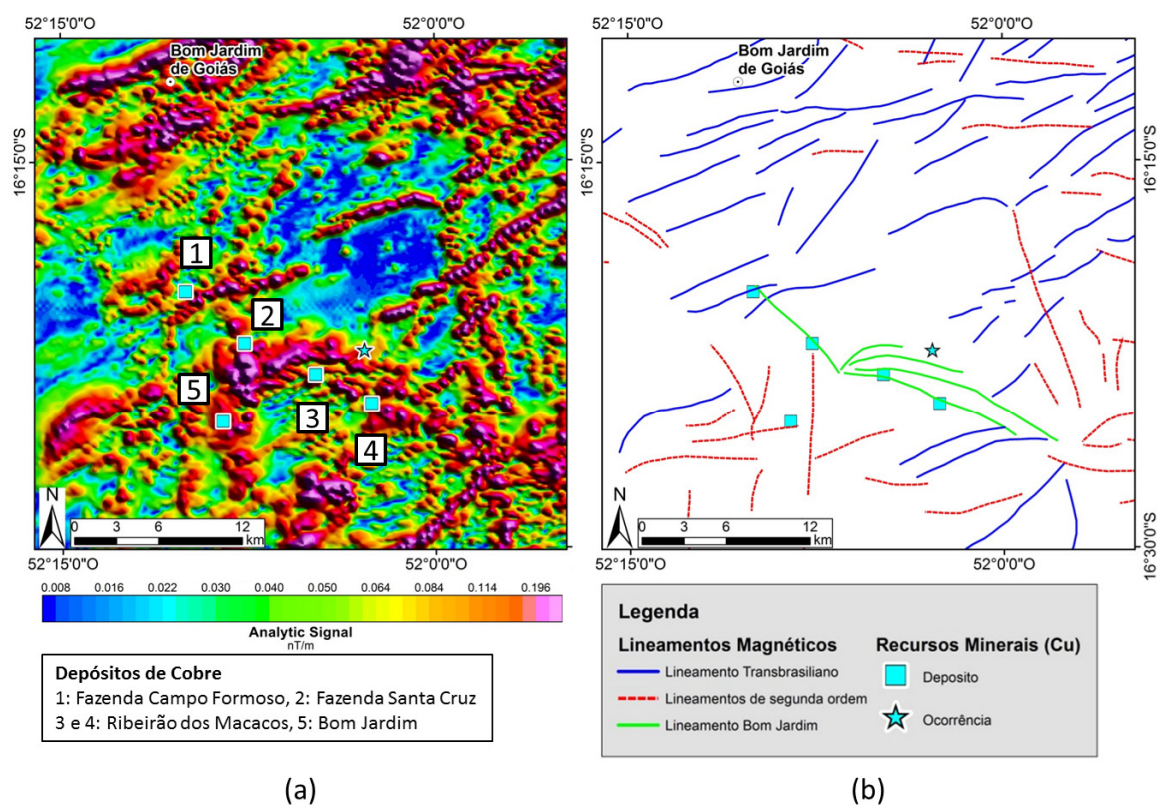


Figura 2.11 - (a) Imagem do Sinal Analítico com depósitos de cobre sobrepostos. (b) Ocorrências de cobre e interpretação de lineamentos magnéticos.

Verifica-se que quatro depósitos de cobre estão localmente relacionados a um conjunto de lineamentos magnéticos de segunda ordem semelhante a um *splay* de falha na forma de uma estrutura rabo de cavalo, que nomeamos, neste trabalho, de Lineamento Bom Jardim (figura 2.11b). Esses lineamentos possuem direção NW-SE que diverge da direção do lineamento Transbrasiliano.

A figura 2.12 a seguir inclui o mapa gravimétrico residual e o contorno das principais litologias associadas aos depósitos de cobre.

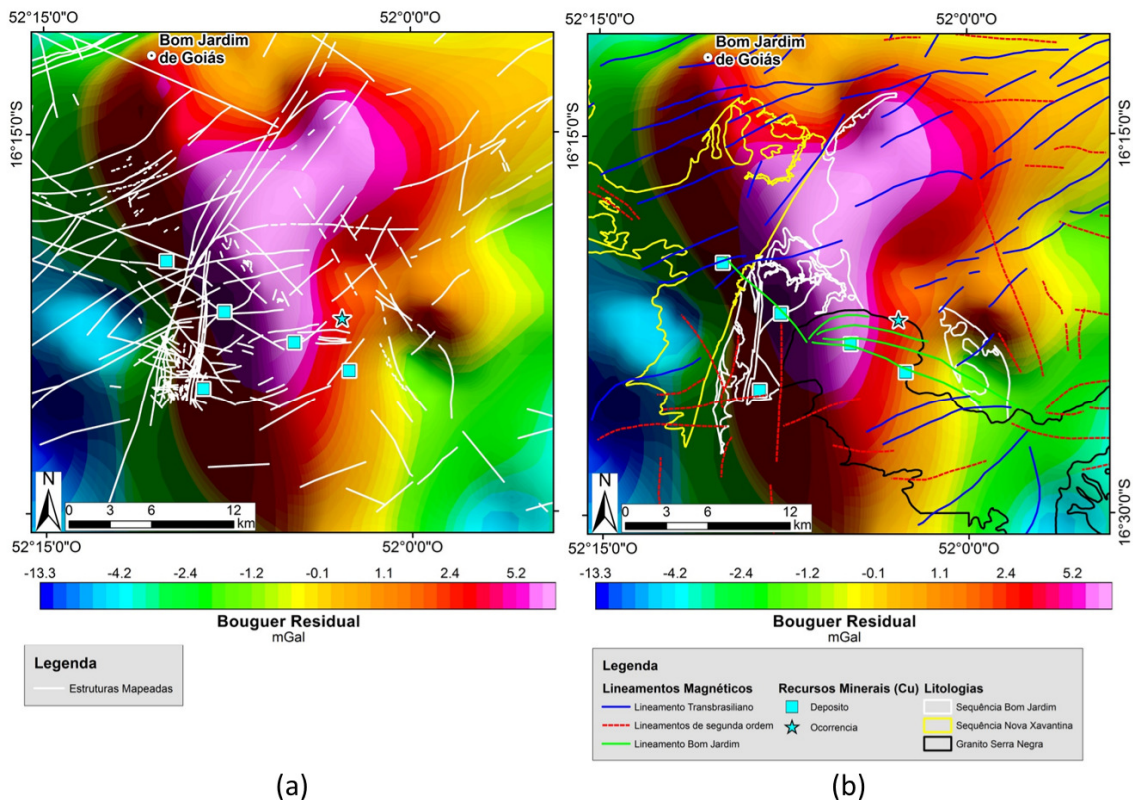


Figura 2.12 - Imagem da anomalia Bouguer residual juntamente com ocorrências de cobre da região de Bom Jardim (a) Sobreposição de estruturas mapeadas. (b) Sobreposição de lineamentos magnéticos interpretados e contornos das litologias mapeadas.

De modo análogo à região de Jaupaci, sob um ponto de vista regional, os depósitos e a ocorrência de cobre estão localizados sobre a anomalia gravimétrica positiva da região de Bom Jardim, adjacente à zona de cisalhamento Transbrasiliana.

Os depósitos de cobre associados localmente ao lineamento Bom Jardim estão localizados sobre três litologias diferentes (Granito Serra Negra, Sequência Bom Jardim e Sequência Nova Xavantina) (Figura 2.12b), o que corrobora a ideia do controle estrutural da mineralização. O lineamento Bom Jardim, como um todo, não consta como uma estrutura mapeada (Figura 2.12a), ele aparece com clareza nos dados magnéticos, porém pode estar em subsuperfície e por isso não foi completamente cartografado.

O depósito de Bom Jardim localizado na porção sul da sequência metavulcanossedimentar Bom Jardim (figura 2.11a) aparentemente está associado a outro conjunto de lineamentos magnéticos interpretados que possuem direção N-S e E-W.

2.4.4 Modelos gravimétricos

Além da assinatura gravimétrica visualizada em planta, podemos explorar também aspectos tridimensionais dessas anomalias por meio da inversão de dados gravimétricos.

Os algoritmos de inversão assumem um conjunto de prismas retangulares ou células, cada um com um valor de densidade constante. Para a discretização, define-se os tamanhos de células que variam com a quantidade de dados adquiridos, sendo que menores células resultam em maior resolução dos dados. Na inversão gravimétrica realizada escolheu-se uma célula de dimensões $x=1000\text{m}$, $y=1000\text{m}$ e $z=1586\text{m}$.

Para realizar a inversão dos dados gravimétricos utilizou-se a componente residual da anomalia Bouguer, obtendo um modelo tridimensional com a distribuição de densidades até a profundidade de 14 km, conforme figura 2.13 a seguir.

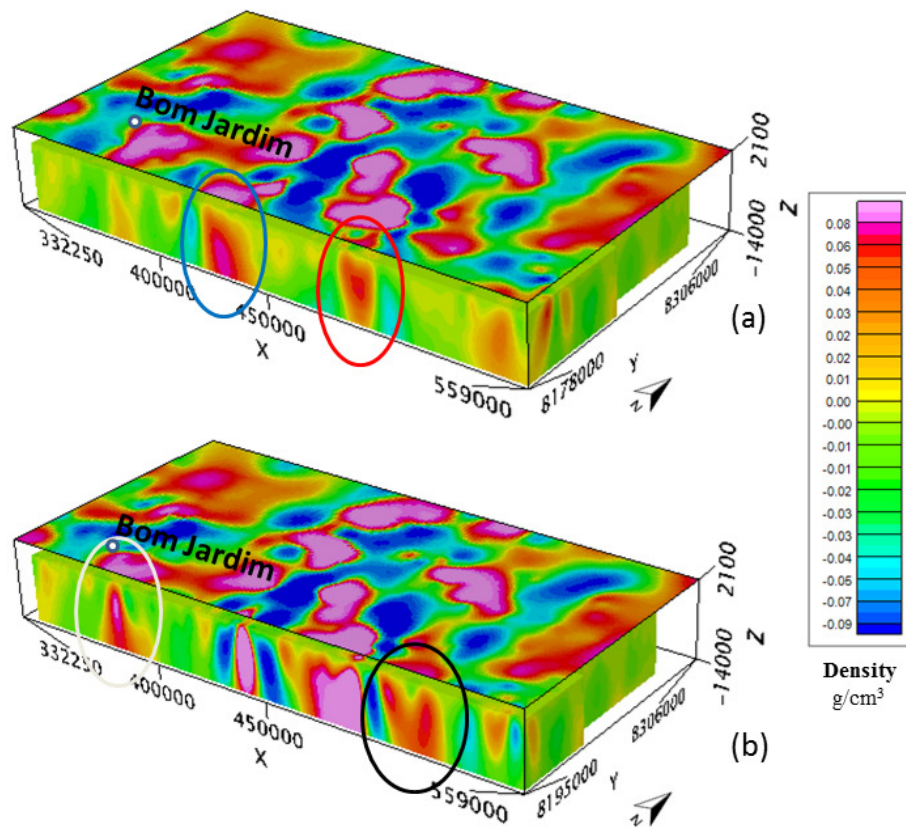


Figura 2.13 - Seções do modelo de inversão obtido com os dados gravimétricos de anomalia Bouguer residual. As elipses coloridas destacam quatro anomalias relacionadas às sequências metavulcanossedimentares. As imagens possuem exagero vertical de 2x. (a) As elipses azul e vermelha referem-se às sequências Arenópolis-Piranhas e Iporá-Amorinópolis, respectivamente. (b) As elipses branca e preta referem-se às sequências Bom Jardim e Jaupaci, respectivamente.

Os valores de densidade obtidos não possuem correlação com os valores de densidade absolutos esperados, porém possuem a finalidade de demonstrar os contrastes de densidade entre as unidades na área de estudo.

De modo geral a inversão obteve, como soluções, corpos verticalizados com geometria bastante simples, já que os dados não possuem resolução suficiente para modelar corpos com maior riqueza de detalhes. Todas as sequências metavulcanossedimentares apresentaram alto gravimétrico que se prolonga até aproximadamente 14 km de profundidade.

A anomalia referente à sequência Arenópolis-Piranhas destacada com a elipse azul na figura 2.13a é, entre os quatro corpos analisados, o que possui maior largura mapeada em superfície. Verificou-se, por meio da inversão, que a resposta de alto gravimétrico acompanhou esse corpo largo na forma simples de uma anomalia positiva verticalizada que se prolonga por mais de 14 km de profundidade.

A anomalia referente à sequência Iporá-Amorinópolis destacada com a elipse vermelha na figura 2.13a possui formato mais afinado, coerente com a porção mapeada em superfície. Observa-se o padrão de corpo verticalizado que se prolonga até aproximadamente 14 km de profundidade.

A anomalia referente à sequência Bom Jardim destacada com a elipse branca na figura 2.13b apresenta forma bastante afinada e alongada alcançando a profundidade de cerca de 14 km. Aparentemente é a sequência que possui os maiores valores de densidade alcançando aproximadamente 0.08 g/cm^3 , enquanto que as demais chegam, no máximo, a 0.07 g/cm^3 .

A anomalia referente à sequência Jaupaci destacada com a elipse preta na figura 2.13b possui dois segmentos de alto gravimétrico separados por um baixo gravimétrico mapeado em superfície como o granito Iporá. O segmento a oeste aparentemente é mais raso, alcançando cerca de 6 km de profundidade e possui uma inclinação para leste. O segmento a leste é mais profundo, chegando a cerca de 12 km de profundidade e possui uma leve inclinação para oeste. Os dois segmentos aparentemente se unem em profundidade, o que geologicamente faz sentido já que esses segmentos foram mapeados como a mesma sequência Jaupaci, porém geralmente a falta de resolução de dados pode dar a falsa sensação de junção de anomalias separadas.

Por terem correlação com uma maior quantidade de ocorrências minerais, destacamos a seguir as imagens das anomalias gravimétricas referentes às sequências Jaupaci e Bom Jardim de Goiás (Figuras 2.14 e 2.15).

Os modelos 3D calculados são geralmente difíceis de analisar, por isso utilizam-se alguns recursos para facilitar a visualização, neste caso utilizou-se uma isosuperfície, que consiste de uma envoltória onde os valores de densidade sejam superiores a um dado valor específico, nesse caso utilizou-se $\rho > 0.033\text{g/cm}^3$ (Figura 2.14).

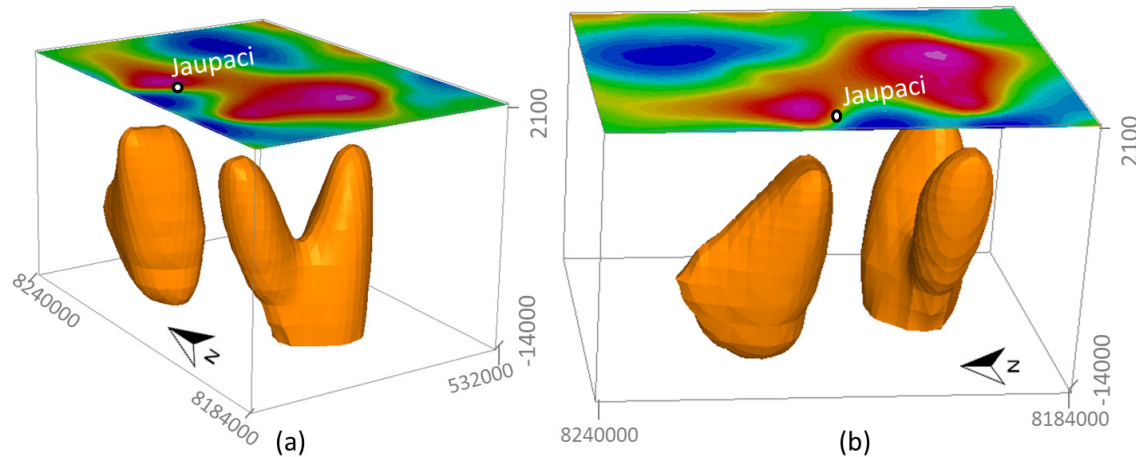


Figura 2.14 Imagens do resultado da inversão dos dados gravimétricos da região de Jaupaci – GO vistas por dois ângulos diferentes. As estruturas na cor laranja referem-se a uma isosuperfície ($\rho > 0.033\text{g/cm}^3$).

As discontinuidades gravimétricas marcam também estruturas. Na anomalia de Jaupaci verificou-se a presença de dois lineamentos magnéticos de direção N-S nas bordas de uma anomalia gravimétrica interna de maior intensidade onde há cinco ocorrências de ouro (Figura 2.10b).

A inversão gravimétrica mostra dois corpos, uma anomalia em formato de “Y” onde o segmento superior direito (Figura 2.14a) corresponde a anomalia interna de maior intensidade e o outro corpo na região norte possui formato verticalizado, porém mostra ser mais raso na sua porção sul. O granito Israelândia possivelmente preenche a lacuna superior da forma em “Y” e pode alcançar cerca de 7 km de profundidade.

A imagem da inversão gravimétrica na região de Bom Jardim foi realizada com uma isosuperfície $\rho > 0.036\text{g/cm}^3$ (Figura 2.15) e gerou uma anomalia única com três ramos principais: um de maior largura e dois laterais mais delgados.

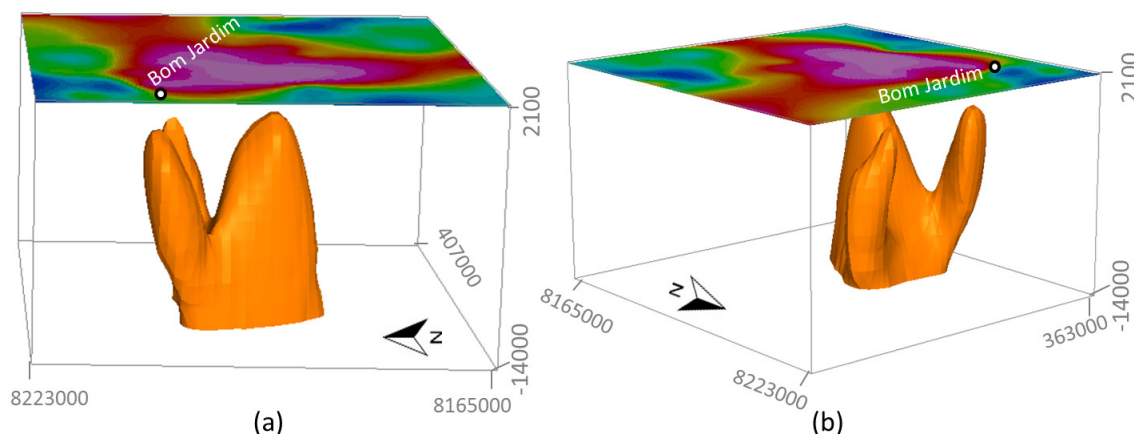


Figura 2.15 Imagem do resultado da inversão dos dados gravimétricos da região de Bom Jardim de Goiás vistas por dois ângulos diferentes. As estruturas na cor laranja referem-se a uma isosuperfície ($\rho > 0.036\text{g/cm}^3$).

A imagem tridimensional da anomalia gravimétrica de Bom Jardim pode sugerir uma descontinuidade gravimétrica de direção E-W que se insere entre o ramo mais largo e os dois laterais mais delgados.

Os modelos gerados, apesar de serem simples, fornecem uma ideia de como os corpos mais densos estão distribuídos em profundidade. A sequência Bom Jardim não necessariamente está relacionada a todo o alto gravimétrico, porém é bem provável que esteja associada a sua porção superior. Caso haja de fato algum tipo de relação entre a mineralização e estes corpos mais densos, os modelos gerados seriam úteis em estudos mais detalhados de prospecção mineral.

2.4.5 Modelos magnéticos

Como discutido anteriormente, as ocorrências minerais estão associadas às estruturas magnéticas de segunda ordem nas proximidades das grandes zonas de cisalhamento. Com a finalidade de analisar tais estruturas e outros corpos magnéticos em 3D, realizou-se a inversão de dados magnéticos do Campo Magnético Anômalo em duas regiões. A primeira inversão localiza-se na região do depósito de cobre-ouro em Bom Jardim-GO e a segunda na região do depósito de ouro próximo a cidade de Jaupaci-GO, conforme indicado na figura 2.16 a seguir.

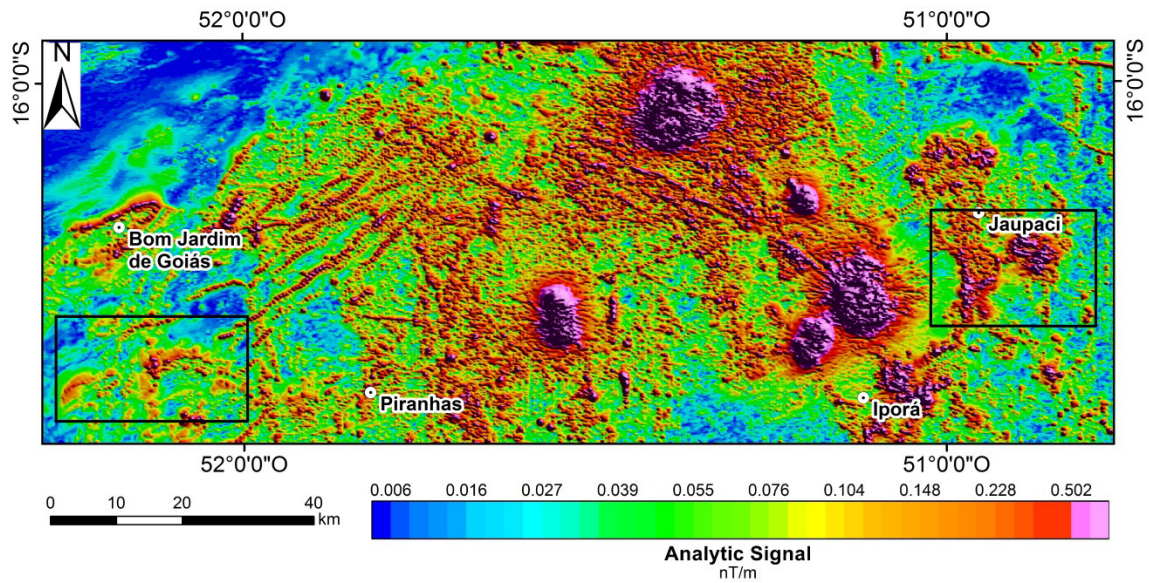


Figura 2.16 - Imagem magnética do Sinal Analítico. Os retângulos em preto correspondem às áreas onde se realizou a inversão dos dados magnéticos.

A seguir apresentamos os resultados das inversões realizadas através da técnica MVI baseada em Elis *et al.* (2012) para a região de Bom Jardim de Goiás e Fazenda Nova.

2.4.5.1 Modelo 1 - Bom Jardim de Goiás – GO

A área escolhida compreende a região do lineamento Bom Jardim e áreas adjacentes. Essa região possui cinco depósitos (figura 2.11) e uma ocorrência de cobre. As anomalias magnéticas não associadas ao lineamento Bom Jardim foram utilizadas para comparação e identificação de assinaturas ou padrões de magnetização (figura 2.17).

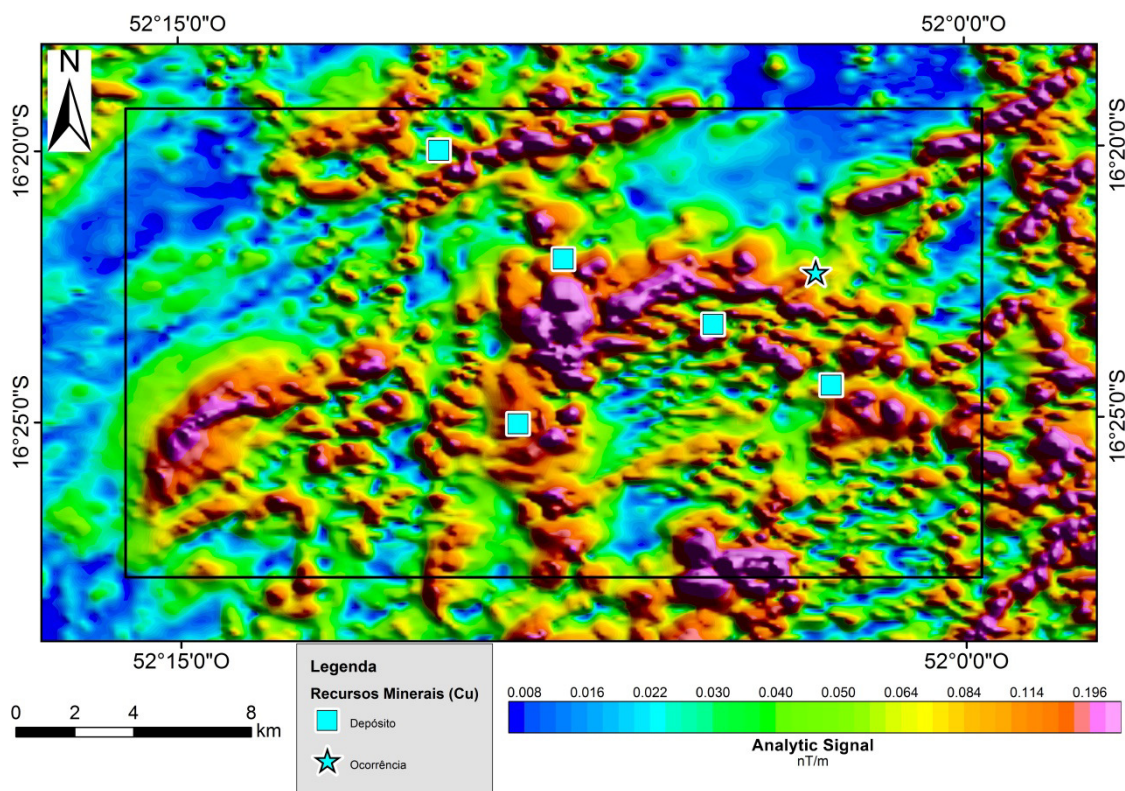


Figura 2.17 - Imagem do Sinal Analítico na região de Bom jardim de Goiás – GO, juntamente com as ocorrências de cobre. O retângulo em preto corresponde à área onde se efetuou a inversão dos dados magnéticos.

O objetivo da inversão magnética é gerar um modelo de distribuição da susceptibilidade magnética (κ) que se ajuste aos dados magnéticos observados. De modo análogo à inversão de dados gravimétricos analisados anteriormente, deve-se escolher as configurações da célula a ser utilizada na inversão. As dimensões escolhidas para a célula foram $x=250\text{m}$, $y=250\text{m}$ e $z=500\text{m}$.

De modo análogo à inversão de dados gravimétricos, utilizou-se uma isosuperfície com o objetivo de selecionar valores de susceptibilidade magnética, nesse caso utilizou-se $\kappa > 0.02 \text{ SI}$.

Os resultados obtidos pela inversão (Figura 2.18) mostram duas estruturas principais que se estendem em profundidade até cerca de 4.5 km. A estrutura principal de direção NW-SE está relacionada ao lineamento Bom Jardim, ela possui forte magnetização ($\kappa > 0.02 \text{ SI}$) e alcança maiores profundidades na sua porção leste, mergulhando verticalmente. A segunda estrutura, na região oeste da figura, possui direção NE-SW, tendo dimensões mais reduzidas em relação à primeira e alcançando uma profundidade de cerca de 3 km. Essa estrutura possui a mesma direção do

Lineamento Transbrasiliiano e não há ocorrências minerais encontradas em seus arredores.

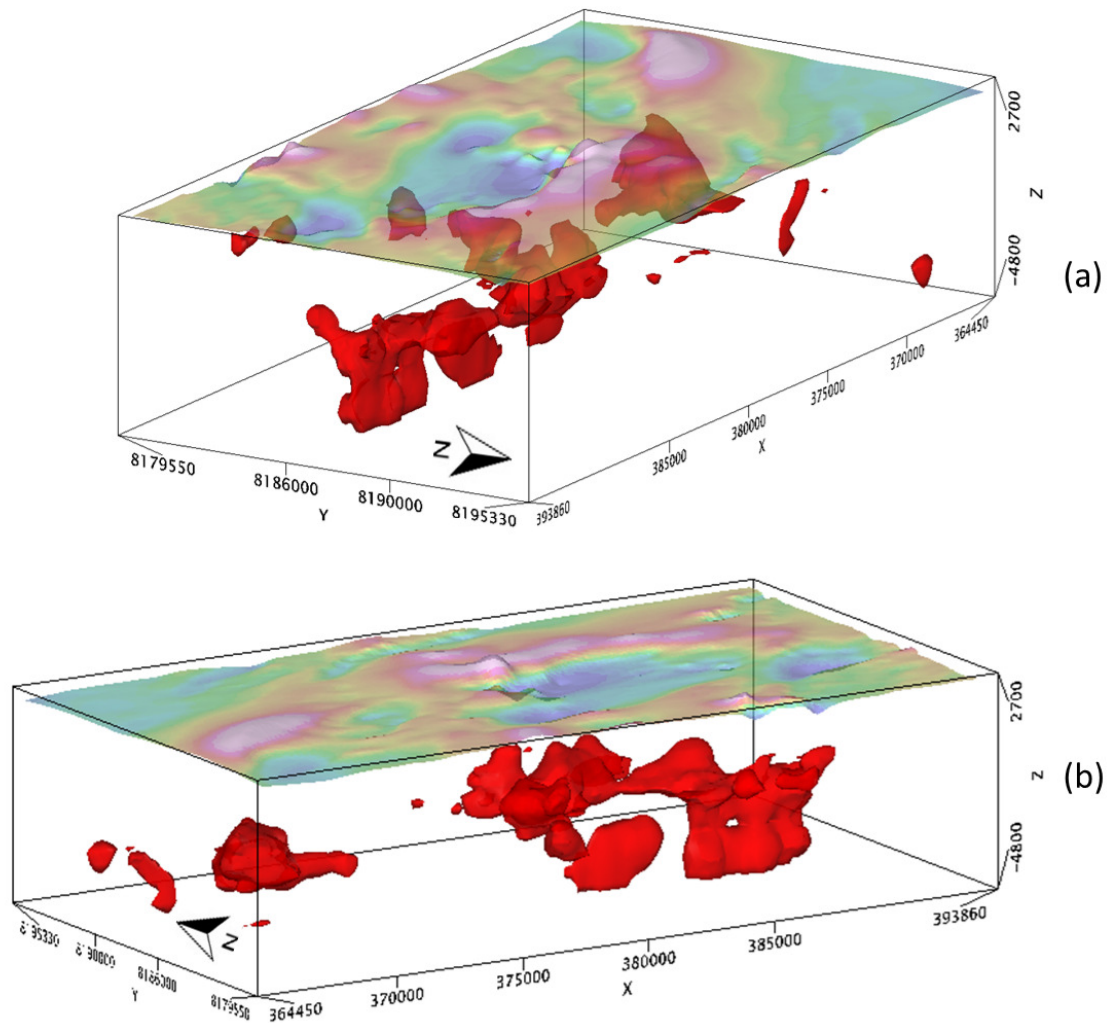


Figura 2.18 - Imagens do resultado da inversão dos dados magnéticos da região de Bom jardim de Goiás – GO vistas por duas direções diferentes. As estruturas na cor vermelha referem-se a uma isosuperfície ($\kappa > 0.02$ SI).

Conseguimos recuperar também as direções de magnetização conforme figura 2.19 a seguir.

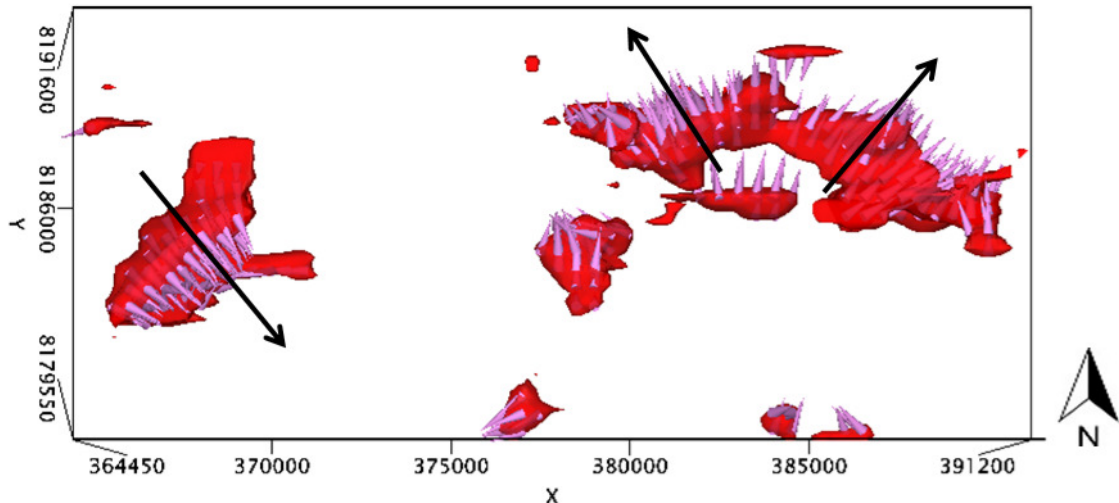


Figura 2.19 - Imagem do resultado da inversão dos dados magnéticos e os vetores com as direções de magnetização. Os vetores na cor rosa são as soluções obtidas pela inversão e os vetores em preto são interpretações das direções preferenciais médias.

Além da direção da anomalia magnética, a direção de magnetização pode auxiliar na distinção entre dois corpos que podem ter sido formados em épocas diferentes. A mineralização também pode ser associada a uma dada direção de magnetização já que a formação das estruturas deve ser anterior ao evento de mineralização.

Percebe-se que a estrutura maior, relacionada ao lineamento Bom Jardim, pode ser dividida em dois segmentos. A porção leste possui direção de magnetização NE-SW apontando para nordeste, já a porção oeste possui direção de magnetização praticamente NW-SE, apontando para noroeste (figura 2.19). A imagem sugere que a estrutura como um todo parece ter sofrido leve arqueamento fazendo com que um grupo tenha direção NE-SW e o outro NW-SE, mas de maneira geral as direções de magnetização não divergem drasticamente, sugerindo a possibilidade de um corpo único, formado no mesmo evento.

A estrutura menor, localizada na porção oeste da figura 2.19, possui direção de magnetização NW-SE, apontando para sudeste. O sentido e direção de magnetização desse corpo divergem drasticamente do corpo analisado anteriormente, sugerindo que estes possuem origens distintas.

2.4.5.2 Modelo 2 - Fazenda Nova-GO

Além das estruturas de segunda ordem relacionadas ao lineamento Moiporá-Novo Brasil, dois corpos magnéticos localizados na região de Fazenda Nova chamam atenção por estarem localizados onde concentram-se algumas minas, garimpos e ocorrências de ouro (figura 2.20).

A anomalia localizada a oeste na figura 2.20 está associada à sequência metavulcanossedimentar Jaupaci enquanto que a anomalia à leste está associada ao Gabro Boqueirão. A identificação da geometria dos corpos magnéticos em 3D pode auxiliar na caracterização das unidades geológicas correspondentes em profundidade.

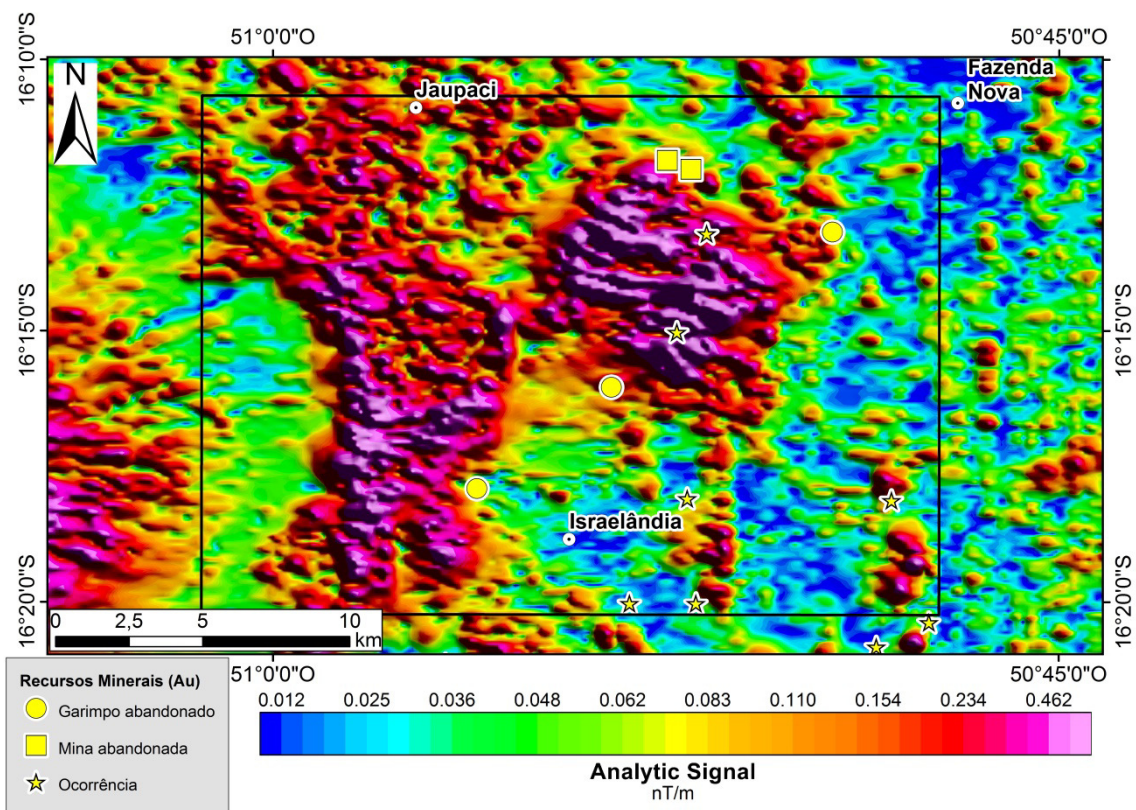


Figura 2.20 - Imagem do Sinal Analítico na região de Fazenda Nova – GO, juntamente com as ocorrências de ouro. O retângulo em preto corresponde à área onde realizou-se a inversão dos dados magnéticos.

As dimensões escolhidas para a célula foram $x=250\text{m}$, $y=250\text{m}$ e $z=463\text{m}$. Para visualizar a geometria das estruturas em subsuperfície utilizou-se uma isosuperfície ($\kappa > 0.05 \text{ SI}$). Os resultados obtidos pela inversão mostram duas estruturas principais que se estendem até cerca de 4 km de profundidade (Figura 2.21).

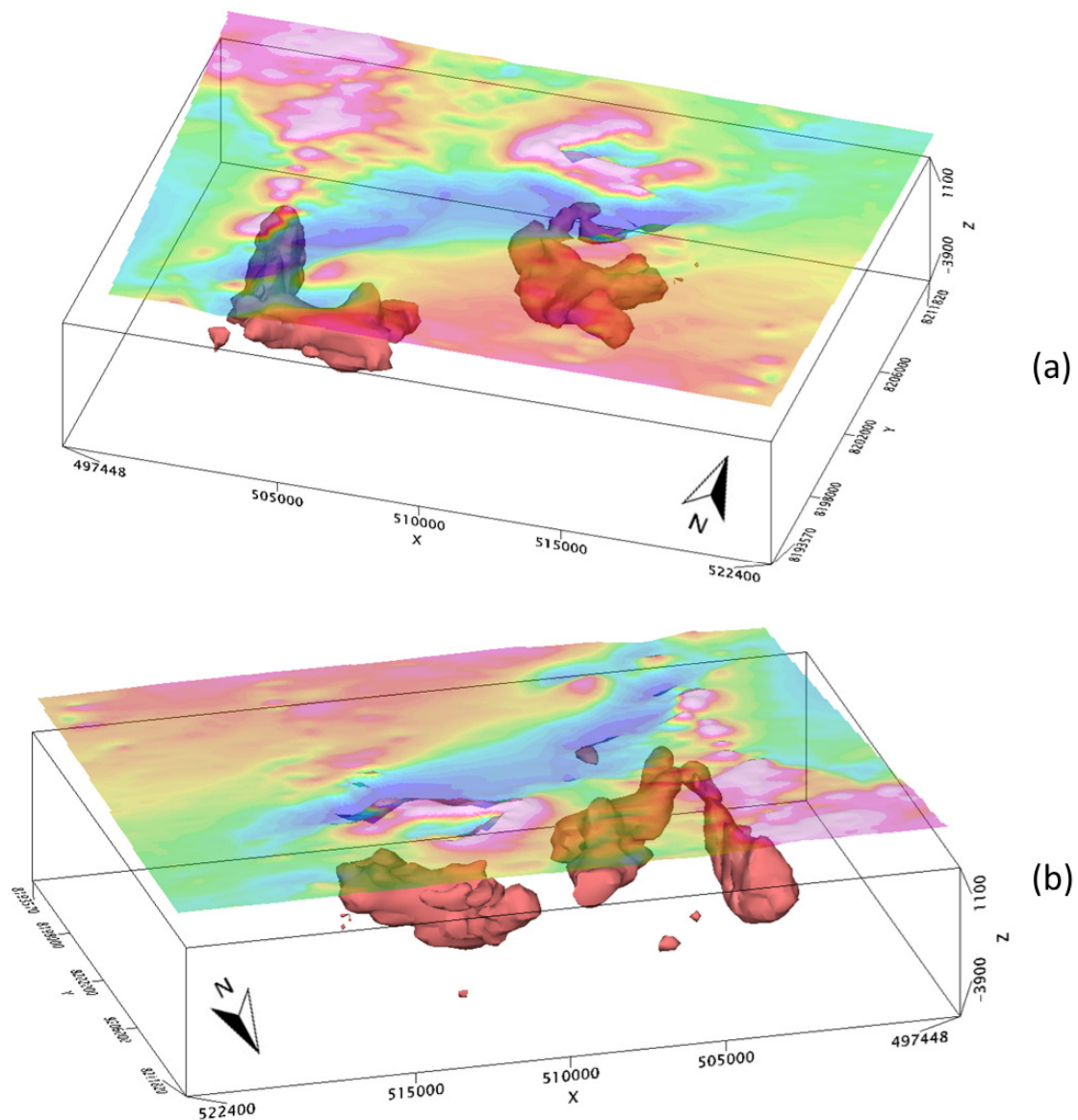


Figura 2.21 - Imagens do resultado da inversão dos dados magnéticos da região de Fazenda Nova – GO vistas por duas direções diferentes. As estruturas na cor vermelha referem-se a uma isosuperfície ($\kappa > 0.05$ SI).

A anomalia a oeste na figura 2.21a está associada à parte da sequência metavulcanossedimentar Jaupaci, essa região magnética da sequência possui um formato em "V" o que sugere a existência de uma dobra não cartografada no mapa geológico. A outra anomalia, a leste, está associada ao Gabro Boqueirão e apesar de apresentar formato aproximadamente circular na imagem do Sinal Analítico (Figura 2.20), na inversão apresentou um formato mais complexo com variações internas de susceptibilidade magnética.

Conseguimos recuperar também as direções de magnetização conforme figura 2.22 a seguir.

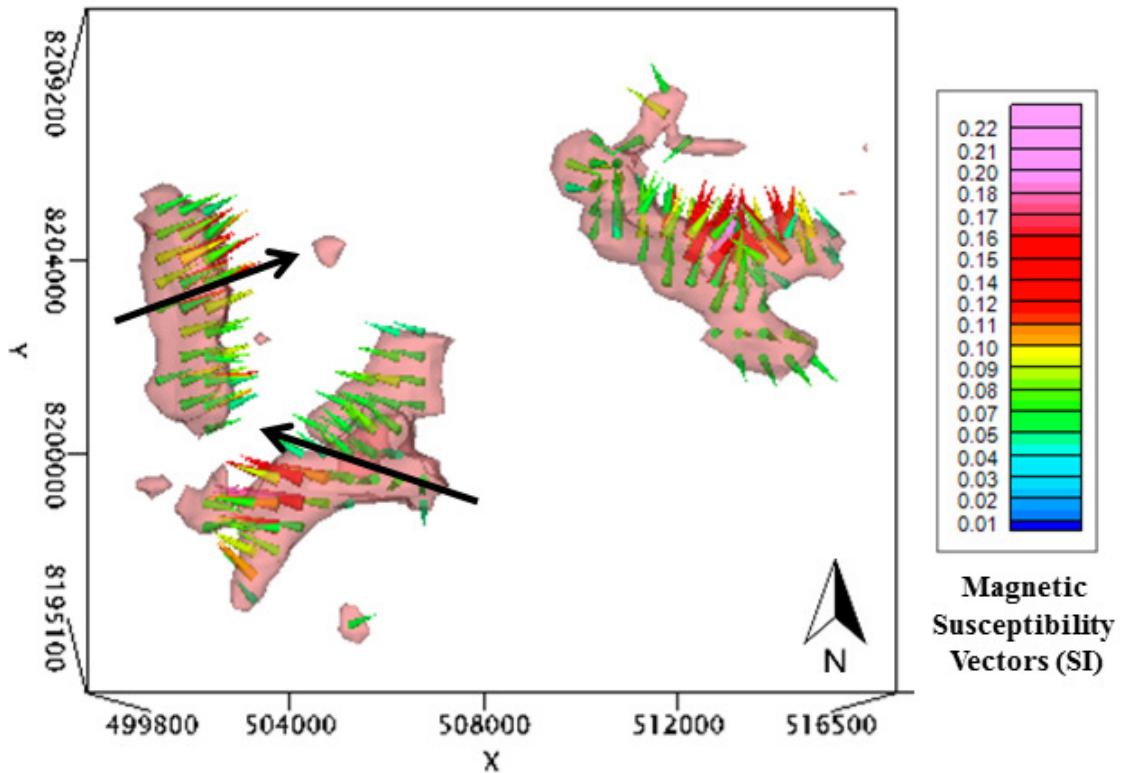


Figura 2.22 - Imagem do resultado da inversão dos dados magnéticos e os vetores com as direções de magnetização ($\kappa > 0.05$ SI).

Percebe-se diferentes intensidades de magnetização através das diferentes cores dos vetores de magnetização. A anomalia localizada a oeste na figura 2.22 pode ser dividida em dois seguimentos, um com direção N-S e outro com direção NE-SW. Observa-se que a direção de magnetização está aproximadamente perpendicular a direção de ambos os seguimentos o que sugere que esses corpos podem ter sido magnetizados num mesmo evento e posteriormente sofrido esforços que dobraram a estrutura.

A anomalia localizada a oeste, relacionada ao Gabro Boqueirão, apresenta grande complexidade nos vetores de magnetização sugerindo que este corpo não é tão homogêneo quanto parecia. A complexidade tanto no formato da anomalia magnética quanto nos vetores de magnetização, pode sugerir estruturas internas que separam regiões com intensidades discrepantes de magnetização e diferentes direções de magnetização.

Apesar de o programa computacional fornecer uma estimativa da direção de magnetização, só podemos confirmar ou não tais direções através do estudo de dados paleomagnéticos de amostras de rochas da região.

2.5 Discussões e Conclusões

As zonas de cisalhamento possuem importante papel nas mineralizações de cobre e ouro no Arco Magmático de Arenópolis. As ocorrências e depósitos principais localizam-se nas adjacências desses grandes lineamentos, sendo que as ocorrências de cobre situam-se na borda do lineamento Transbrasiliano e as ocorrências de ouro nas proximidades do lineamento Moiporá-Novo Brasil.

O lineamento Moiporá-Novo Brasil mapeado, liga-se a uma grande descontinuidade gravimétrica de direção N-S na Bacia do Paraná. Essa descontinuidade pode nos indicar uma extensão do comprimento desse lineamento que pode chegar a 450 km. Essa interpretação pode corroborar a ideia de que essa feição alcança grandes profundidades, podendo estar conectada ao manto.

As unidades geológicas que hospedam a maioria dos depósitos e principais ocorrências de cobre e ouro no Arco Magmático de Arenópolis são as sequências metavulcanossedimentares. Na região de estudo há quatro sequências metavulcanossedimentares e todas elas apresentaram anomalias gravimétricas positivas. Com o auxílio da filtragem regional/residual conseguimos relacionar os altos gravimétricos às sequências mapeadas em superfície e verificamos que as anomalias relacionadas às sequências Bom Jardim e Arenópolis-Piranhas estendem-se além das áreas mapeadas e indicam que essas sequências se prolongam por baixo dos sedimentos da Bacia do Paraná.

Embora tenhamos identificado quatro sequências metavulcanossedimentares com assinaturas gravimétricas semelhantes, apenas as sequências Bom Jardim de Goiás e Jaupaci, localizadas nas bordas das grandes zonas de cisalhamento, possuem grande quantidade de ocorrências minerais de cobre e ouro, o que indica a importância das grandes zonas de cisalhamento no processo de mineralização.

Mais localmente observam-se estruturas magnéticas próximas às grandes zonas de cisalhamento, mas que possuem direção divergente destas. Na região de Jaupaci destacam-se os lineamentos de segunda ordem de direção NW-SE que estão

relacionados a duas minas de ouro e diversas ocorrências minerais. Nomeamos o lineamento magnético Bom Jardim, na região homônima, que possui direção aproximadamente NW-SE e está localmente relacionado com quatro depósitos de cobre. Essa análise destaca a importância do potencial metalogenético desse lineamento que pode ser estudado na escala de detalhe por prospectores com interesse em cobre. Além disso, as anomalias gravimétricas relacionadas às sequências Bom Jardim e Jaupaci parecem delimitar as ocorrências e depósitos minerais em suas respectivas áreas.

Com o auxílio da inversão de dados gravimétricos conseguimos modelar as anomalias gravimétricas relacionadas às quatro sequências metavulcanossedimentares presentes na área de estudo. Foi detalhada a geometria dos corpos relacionados às sequências Jaupaci e Bom Jardim de Goiás na intenção de delimitar variações gravimétricas e sugerir modelos de estruturas em profundidade que se ajustam aos dados observados.

Por fim, os corpos magnéticos associados espacialmente às ocorrências de cobre e ouro foram modelados por meio da inversão magnética. Na região de Fazenda Nova modelamos as anomalias relacionadas ao Gabro Boqueirão e parte da sequência Jaupaci. Por meio da direção de magnetização extraída da inversão MVI, sugerimos a existência de uma dobra localizada na sequência Jaupaci e verificamos que a complexidade no formato da anomalia referente ao Gabro Boqueirão pode sugerir estruturas internas ao corpo.

Na região de Bom Jardim modelamos o lineamento homônimo e comparamos com outra anomalia magnética nas proximidades. Foi possível estabelecer características geométricas do lineamento Bom Jardim bem como diferenciá-lo da anomalia magnética adjacente por possuírem direções de magnetização muito discrepantes.

A análise dos dados geofísicos permitiu estabelecer relações entre anomalias gravimétricas, lineamentos locais e regionais juntamente com as ocorrências minerais e principais depósitos de cobre e ouro no Arco Magmático de Arenópolis. As estruturas regionais mais profundas, evidenciadas pela gravimetria, relacionam-se com as estruturas locais mais rasas evidenciadas pela magnetometria. As ocorrências e depósitos de cobre e ouro na área de estudo aparentemente foram condicionados pelo controle estrutural que pôde ser evidenciado pelas interpretações dos dados geofísicos.

2.6 Referências

- Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Brito Neves, B. B., & Fuck, R. A. (1981). Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, 17(1-2), 1-29.
- Assumpção, M., & Sacek, V. (2013). Intra-plate seismicity and flexural stresses in central Brazil. *Geophysical Research Letters*, 40(3), 487-491.
- Brito Neves, B. B., & Cordani, U. G. (1991). Tectonic evolution of South America during the late Proterozoic. *Precambrian Research*, 53(1-2), 23-40.
- Cordani, U. G., Pimentel, M. M., De Araújo, C. E. G., Basei, M. A. S., Fuck, R. A., & Girardi, V. A. V. (2013). Was there an Ediacaran Clymene ocean in central South America?. *American Journal of Science*, 313(6), 517-539.
- Cowie, P. A., & Scholz, C. H. (1992). Growth of faults by accumulation of seismic slip. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B7), 11085-11095.
- Cox, S. F. (1999). Deformational controls on the dynamics of fluid flow in mesothermal gold systems. *Geological Society, London, Special Publications*, 155(1), 123-140.
- Curto, J. B., Vidotti, R. M., Fuck, R. A., Blakely, R. J., Alvarenga, C. J., & Dantas, E. L. (2014). The tectonic evolution of the Transbrasiliiano Lineament in northern Paraná Basin, Brazil, as inferred from aeromagnetic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3), 1544-1562.
- Ellis, R. G., de Wet, B., & Macleod, I. N. (2012). Inversion of magnetic data for remanent and induced sources. *ASEG Extended Abstracts*, 2012(1), 1-4.
- Fuck, R. A., Dantas, E. L., Vidotti, R. M., Roig, H. L., & Almeida, T. (2013). Deformação Intracontinental em sistemas transcorrentes: o caso do Lineamento Transbrasiliiano: Geometria, idade e significado. *XIV Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, Chapada dos Guimarães. XIV Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos. São Paulo: SBG.*
- Grauch, V. J. S., & Hudson, M. R. (2011). Aeromagnetic anomalies over faulted strata. *The Leading Edge*, 30(11), 1242-1252.
- Groves, D. I., Goldfarb, R. J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S. G., & Robert, F. (1998). Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore geology reviews*, 13(1-5), 7-27.

Guimarães, S. B., Moura, M. A., & Dantas, E. L. (2012). Petrology and geochronology of the Bom Jardim de Goiás copper deposit (GO). *Revista Brasileira de Geociências*, 42, 4.

Gunn, P. J. (1997). Quantitative methods for interpreting aeromagnetic data: a subjective review. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17, 105-114.

Holdsworth, R. E., & Pinheiro, R. V. (2000). The anatomy of shallow-crustal transpressional structures: insights from the Archaean Carajás fault zone, Amazon, Brazil. *Journal of Structural Geology*, 22(8), 1105-1123.

Isles, D. J., & Rankin, L. R. (2013). Geological interpretation of aeromagnetic data. *Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration Geophysicists*.

Jost, H., Fuck, R. A., Barbosa, P.A.R., & Pimentel, M. M. (1986). Estudos estruturais sobre o lineamento Messianópolis-Novo Brasil, Goiás. *In: XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia. Boletim nº1. Resumos e Breves Comunicações. Goiânia*.

Lacerda Filho, J.V., Santos, D.R.V., Martins, F.R., Souza, J.O., Gollmann, K., Carneiro, J.S.M., Meneghini, P.F.V.B., Hattingh, K., Silva, E.R., Eberhardt, D.B. (2019). Projeto Oeste de Goiás. Levantamento Geológico e Potencial de Novas Fronteiras. *Programa Gestão Estratégica da Geologia, da Mineração e da Transformação Mineral. Executado pela CPRM-Serviço Geológico do Brasil. Superintendência Regional de Goiânia*.

LASA Engenharia e Prospecções S.A., (2004). Projeto Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás – 1ª Etapa – Arco Magmático de Arenópolis – Complexo Anápolis - Itauçu – Sequência Vulcano-Sedimentar de Juscelândia - Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos, Convênio de Cooperação Técnica entre a SGM/MME/CPRM e SIC/SGM/FUNMINERAL/Estado de Goiás, *Relatório Final, 22 vol., Texto e Anexos (mapas), Rio de Janeiro*.

LASA Engenharia e Prospecções S.A., (2004). Projeto Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás – 1ª Etapa – Arco Magmático de Mara Rosa - Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos, Convênio de Cooperação Técnica entre a SGM/MME/CPRM e SIC/SGM/FUNMINERAL/Estado de Goiás, *Relatório Final, 12 vol., Texto e Anexos (mapas), Rio de Janeiro*.

LASA Engenharia e Prospecções S.A., (2005). Projeto Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás – 2ª Etapa – Oeste do Arco Magmático de Mara Rosa - Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos, Convênio de Cooperação Técnica entre a SGM/MME/CPRM e

SIC/SGM/FUNMINERAL/Estado de Goiás, *Relatório Final*, 7 vol., *Texto e Anexos (mapas)*, Rio de Janeiro.

LASA Engenharia e Prospecções S.A./Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda., (2011). Levantamento Aerogeofísico Sudeste do Mato Grosso - Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos, Convênio de Cooperação e Apoio Técnico-Científico entre a CPRM – Serviço Geológico do Brasil e o Estado de Mato Grosso, por meio de sua Secretaria de Estado de Indústria, Comércio, Minas e Energia, *Relatório Final*, 37 vol., *Texto e Anexos (Mapas)*, Rio de Janeiro.

Laux, J. H., Pimentel, M. M., Dantas, E. L., Armstrong, R., & Junges, S. L. (2005). Two Neoproterozoic crustal accretion events in the Brasília belt, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 18(2), 183-198.

Leão-Santos, M., Li, Y., & Moraes, R. (2015). Application of 3D magnetic amplitude inversion to iron oxide-copper-gold deposits at low magnetic latitudes: A case study from Carajás Mineral Province, Brazil. *Geophysics*, 80(2), B13-B22.

Li, X. (2006). Understanding 3D analytic signal amplitude. *Geophysics*, 71(2), L13-L16.

Li, Y., & Oldenburg, D. W. (1996). 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, 61(2), 394-408.

Li, Y., & Oldenburg, D. W. (1998). 3-D inversion of gravity data. *Geophysics*, 63(1), 109-119.

Marques, G. C. (2017). Evolução tectônica e metalogenética no contexto do depósito aurífero de Fazenda Nova, Arco Magmático de Arenópolis, Goiás. *Tese de Doutorado, UnB*.

Marques, G. C., de Oliveira, C. G., Espada, E., & Dantas, E. L. (2019). The Fazenda Nova Gold Deposit, Goiás Magmatic Arc: Late Neoproterozoic Intrusion-Related Auriferous Mineralization Controlled by Intracontinental Strike-Slip Faulting. *Ore Geology Reviews*.

Martinez, C., Li, Y., Krahenbuhl, R., & Braga, M. A. (2012). 3D inversion of airborne gravity gradiometry data in mineral exploration: A case study in the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Geophysics*, 78(1), B1-B11.

Moreira, M. L. O., Moreton, L. C., Araújo, V. A., Lacerda Filho, J. V., & Costa, H. F. (2008). Geologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. *Texto explicativo do Mapa Geológico do estado de Goiás e Distrito Federal*. Convênio MME/CPRM-SIC/FUNMINERAL/GO

- Mota-Araújo, J.G., Pimentel, M. M., & Richard, A. (2002). Idade e significado do sistema de cisalhamento Moiporá-Novo Brasil no Arco Magmático de Goiás: novos dados U-Pb SHIMP e Sm-Nd. *In: Congresso Brasileiro de Geologia, 41, João Pessoa*. p. 486.
- Oldenburg, D. W., & Pratt, D. A. (2007). Geophysical inversion for mineral exploration: a decade of progress in theory and practice. *In Proceedings of exploration* (Vol. 7, No. 5, pp. 61-95).
- Oliveira, C. G., de Queiroz, C. L., & Pimentel, M. M. (2000). The Arenópolis-Mara Rosa Gold-Copper Belt, Neoproterozoic Goiás Magmatic Arc. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(2), 219-221.
- Pili, E., Ricard, Y., Lardeaux, J. M., & Sheppard, S. M. F. (1997). Lithospheric shear zones and mantle-crust connections. *Tectonophysics*, 280(1-2), 15-29.
- Pimentel, M. M., Fuck, R. A. (1986). Geologia da Sequência Vulcano-Sedimentar de Arenópolis (GO). *Revista Brasileira de Geociências*, 16(2), 217-223
- Pimentel, M. M., Heaman, L., & Fuck, R. A. (1991). Zircon and sphene U-Pb geochronology of Upper Proterozoic volcanic-arc rock units from southwestern Goiás, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 4(4), 295-305.
- Pimentel, M. M., Fuck, R. A., Jost, H., Ferreira Filho, C. F., & Araújo, S. D. (2000). The basement of the Brasília fold belt and the Goiás magmatic arc. *Tectonic Evolution of South America*, 31, 195-229.
- Ramos, L. N. R. A. (2010). Dados gamaespectrométricos e magnetométricos aéreos aplicados ao mapeamento geológico e à exploração de ouro na região de Fazenda Nova, porção leste do Arco Magmático de Arenópolis, Goiás. *Dissertação de Mestrado, UnB*
- Rodrigues, J. B., Gioia, S. M. L. C., & Pimentel, M. M. (1999). Geocronologia e geoquímica de ortognaisses da região entre Iporá e Firminópolis: implicações para a evolução do Arco Magmático de Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(2), 207-216.
- Roest, W. R., Verhoef, J., & Pilkington, M. (1992). Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57(1), 116-125.
- Seer, H. J. (1985). Geologia, deformação e mineralização de cobre no complexo vulcano-sedimentar de Bom Jardim de Goiás. *Dissertação de Mestrado, UnB*.
- Soares, J. E., Berrocal, J., Fuck, R. A., Mooney, W. D., & Ventura, D. B. (2006). Seismic characteristics of central Brazil crust and upper mantle: a deep seismic refraction study. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B12).

Storti, F., Holdsworth, R. E., & Salvini, F. (2003). Intraplate strike-slip deformation belts. *Geological Society, London, Special Publications*, 210(1), 1-14.

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics* (Vol. 1). Cambridge university press.

Ventura, D. B. R., Soares, J. E. P., Fuck, R. A., & Caridade, L. D. C. C. (2011). Caracterização sísmica e gravimétrica da litosfera sob a linha de refração sísmica profunda de Porangatu, Província Tocantins, Brasil Central. *Revista Brasileira de Geociências*, 41(1), 130-140.

Walsh, J. J., & Watterson, J. (1988). Analysis of the relationship between displacements and dimensions of faults. *Journal of Structural geology*, 10(3), 239-247.

Woodcock, N. H., & Schubert, C. (1994). Continental strike-slip tectonics. *Continental deformation*, 251-263.

3 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

As zonas de cisalhamento possuem importante papel nas mineralizações de cobre e ouro no Arco Magmático de Arenópolis. As ocorrências e depósitos principais localizam-se nas adjacências desses grandes lineamentos, sendo que as ocorrências de cobre situam-se na borda do lineamento Transbrasiliano e as ocorrências de ouro nas proximidades do lineamento Moiporá-Novo Brasil.

O lineamento Moiporá-Novo Brasil mapeado, liga-se a uma grande descontinuidade gravimétrica de direção N-S na Bacia do Paraná. Essa descontinuidade pode nos indicar uma extensão do comprimento desse lineamento que pode chegar a 450 km. Essa interpretação pode corroborar a ideia de que essa feição alcança grandes profundidades, podendo estar conectada ao manto.

As unidades geológicas que hospedam a maioria dos depósitos e principais ocorrências de cobre e ouro no Arco Magmático de Arenópolis são as sequências metavulcanossedimentares. Na região de estudo há quatro sequências metavulcanossedimentares e todas elas apresentaram anomalias gravimétricas positivas. Com o auxílio da filtragem regional/residual conseguimos relacionar os altos gravimétricos às sequências mapeadas em superfície e verificamos que as anomalias relacionadas às sequências Bom Jardim e Arenópolis-Piranhas estendem-se além das áreas mapeadas e indicam que essas sequências se prolongam por baixo dos sedimentos da Bacia do Paraná.

Embora tenhamos identificado quatro sequências metavulcanossedimentares com assinaturas gravimétricas semelhantes, apenas as sequências localizadas nas bordas das grandes zonas de cisalhamento possuem grande quantidade de ocorrências minerais de cobre e ouro, o que indica a importância das grandes zonas de cisalhamento no processo de mineralização.

Mais localmente observam-se estruturas magnéticas próximas às grandes zonas de cisalhamento, mas que possuem direção divergente destas. Na região de Jaupaci destacam-se os lineamentos de segunda ordem de direção NW-SE que estão relacionados a duas minas de ouro e diversas ocorrências minerais. Nomeamos o lineamento magnético Bom Jardim, na região homônima, que possui direção aproximadamente NW-SE e está localmente relacionado com quatro depósitos de cobre. Essa análise destaca a importância do potencial metalogenético desse lineamento que pode ser estudado na escala de detalhe por prospectores com interesse em cobre. Além

disso, as anomalias gravimétricas relacionadas às sequências Bom Jardim e Jaupaci parecem delimitar as ocorrências e depósitos minerais em suas respectivas áreas.

Com o auxílio da inversão de dados gravimétricos conseguimos modelar as anomalias gravimétricas relacionadas às quatro sequências metavulcanossedimentares presentes na área de estudo. Foi detalhada a geometria dos corpos relacionados às sequências Jaupaci e Bom Jardim de Goiás na intenção de delimitar variações gravimétricas e sugerir modelos de estruturas em profundidade que se ajustam aos dados observados.

Por fim, os corpos magnéticos associados espacialmente às ocorrências de cobre e ouro foram modelados por meio da inversão magnética. Na região de Fazenda Nova modelamos as anomalias relacionadas ao Gabro Boqueirão e parte da sequência Jaupaci. Por meio da direção de magnetização extraída da inversão MVI, sugerimos a existência de uma dobra localizada na sequência Jaupaci e verificamos que a complexidade no formato da anomalia referente ao Gabro Boqueirão pode sugerir estruturas internas ao corpo.

Na região de Bom Jardim modelamos o lineamento homônimo e comparamos com outra anomalia magnética nas proximidades. Foi possível estabelecer características geométricas do lineamento Bom Jardim bem como diferenciá-lo da anomalia magnética adjacente por possuírem direções de magnetização muito discrepantes.

Um dos problemas enfrentados foi a baixa resolução dos dados gravimétricos. Apesar de as anomalias gravimétricas relacionadas às sequências Bom Jardim e Jaupaci parecerem delimitar grande parte das ocorrências de cobre e ouro na região de estudo, para conseguirmos delimitar com precisão tais anomalias e suas variações de densidade, seria interessante a aquisição gravimétrica regular sobre uma área definida que cobrisse toda a extensão dessas formações. Além de maior detalhe no interior dos corpos, a gravimetria poderia fornecer maior precisão na extensão das sequências no interior da Bacia do Paraná.

Na região de estudo observamos que as direções dos lineamentos magnéticos relacionados às ocorrências minerais geralmente são discordantes das direções das zonas de cisalhamento próximas. Outra questão a ser mais bem analisada seria se as direções de magnetização também poderiam fornecer assinaturas geofísicas das mineralizações. Considerando que os vetores de magnetização marcam a direção do campo magnético na época de formação das rochas, o evento de mineralização também

pode coincidir com a idade de magnetização das rochas. Sendo assim, a análise e comparação dos vetores de magnetização em uma ampla gama de lineamentos pode ser um passo introdutório para o estabelecimento de novas assinaturas geofísicas para depósitos minerais.

4 BIBLIOGRAFIA

- Aisengart, T. (2015). Inversão do vetor de magnetização, com e sem o uso de vínculo geológico, nas regiões de Araxá e Tapira, Minas Gerais–Brasil. *In 14th International Congress of The Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil.*
- Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Brito Neves, B. B., & Fuck, R. A. (1981). Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, 17(1-2), 1-29.
- Assumpção, M., & Sacek, V. (2013). Intra-plate seismicity and flexural stresses in central Brazil. *Geophysical Research Letters*, 40(3), 487-491.
- Barbosa, R. D., & Pereira, J. G. (2013). Inversão 3D de dados Magnéticos na Região de Mara Rosa-Goiás, Brasil, utilizando Geosoft VOXI. *In 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 26–29 August 2013* (pp. 520-525). Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society.
- Blakely, R. J. (1996). *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge university press.
- Brito Neves, B. B., & Cordani, U. G. (1991). Tectonic evolution of South America during the late Proterozoic. *Precambrian Research*, 53(1-2), 23-40.
- Cooper, G. R. J., & Cowan, D. R. (2005). Differential reduction to the pole. *Computers & Geosciences*, 31(8), 989-999.
- Cordani, U. G., Pimentel, M. M., De Araújo, C. E. G., Basei, M. A. S., Fuck, R. A., & Girardi, V. A. V. (2013). Was there an Ediacaran Clymene ocean in central South America?. *American Journal of Science*, 313(6), 517-539.
- Cowie, P. A., & Scholz, C. H. (1992). Growth of faults by accumulation of seismic slip. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B7), 11085-11095.
- Cox, S. F. (1999). Deformational controls on the dynamics of fluid flow in mesothermal gold systems. *Geological Society, London, Special Publications*, 155(1), 123-140.
- Curto, J. B., Vidotti, R. M., Fuck, R. A., Blakely, R. J., Alvarenga, C. J., & Dantas, E. L. (2014). The tectonic evolution of the Transbrasiliano Lineament in northern Paraná Basin, Brazil, as inferred from aeromagnetic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3), 1544-1562.

Ellis, R. G., de Wet, B., & Macleod, I. N. (2012). Inversion of magnetic data for remanent and induced sources. *ASEG Extended Abstracts*, 2012(1), 1-4.

Ellis, R., & MacLeod, I. (2013). Constrained voxel inversion using the Cartesian Cut Cell method. *ASEG Extended Abstracts*, 2013(1), 1-4.

Farhi, W., Boudella, A., Saibi, H., & Bounif, M. O. A. (2016). Integration of magnetic, gravity, and well data in imaging subsurface geology in the Ksar Hirane region (Laghouat, Algeria). *Journal of African Earth Sciences*, 124, 63-74.

Fuck, R. A., Dantas, E. L., Vidotti, R. M., Roig, H. L., & Almeida, T. (2013). Deformação Intracontinental em sistemas transcorrentes: o caso do Lineamento Transbrasiliano: Geometria, idade e significado. *XIV Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, Chapada dos Guimarães. XIV Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos. São Paulo: SBG.*

Geosoft (2019). VOXI Earth Modelling [online]: Disponível em <https://www.geosoft.com/products/voxi-earth-modelling/>

Grauch, V. J. S., & Hudson, M. R. (2011). Aeromagnetic anomalies over faulted strata. *The Leading Edge*, 30(11), 1242-1252.

Groves, D. I., Goldfarb, R. J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S. G., & Robert, F. (1998). Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore geology reviews*, 13(1-5), 7-27.

Guimarães, S. B., Moura, M. A., & Dantas, E. L. (2012). Petrology and geochronology of the Bom Jardim de Goiás copper deposit (GO). *Revista Brasileira de Geociências*, 42, 4.

Gunn, P. J. (1997). Quantitative methods for interpreting aeromagnetic data: a subjective review. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17, 105-114.

Holdsworth, R. E., & Pinheiro, R. V. (2000). The anatomy of shallow-crustal transpressional structures: insights from the Archaean Carajás fault zone, Amazon, Brazil. *Journal of Structural Geology*, 22(8), 1105-1123.

Hinze, W. J. (1990). The role of gravity and magnetic methods in engineering and environmental studies. In *Geotechnical and Environmental Geophysics: Volume I: Review and Tutorial* (pp. 75-126). Society of Exploration Geophysicists.

Ingram, D. M., Causon, D. M., & Mingham, C. G. (2003). Developments in Cartesian cut cell methods. *Mathematics and Computers in Simulation*, 61(3-6), 561-572.

Isles, D. J., & Rankin, L. R. (2013). Geological interpretation of aeromagnetic data. *Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration Geophysicists*.

Jost, H., Fuck, R. A., Barbosa, P.A.R., & Pimentel, M. M. (1986). Estudos estruturais sobre o lineamento Messianópolis-Novo Brasil, Goiás. *In: XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia. Boletim n.º 1. Resumos e Breves Comunicações. Goiânia*.

Lacerda Filho, J. V., Santos, D. R. V., Martins, F. R., Souza, J. O., Gollmann, K., Carneiro, J. S. M., Meneghini, P. F. V. B., Hattingh, K., Silva, E. R., Eberhardt, D. B. (2019). Projeto Oeste de Goiás. Levantamento Geológico e Potencial de Novas Fronteiras. *Programa Gestão Estratégica da Geologia, da Mineração e da Transformação Mineral. Executado pela CPRM-Serviço Geológico do Brasil. Superintendência Regional de Goiânia*.

LASA Engenharia e Prospecções S.A., (2004). Projeto Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás – 1ª Etapa – Arco Magmático de Arenópolis – Complexo Anápolis - Itauçu – Sequência Vulcano-Sedimentar de Juscelândia - Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos, Convênio de Cooperação Técnica entre a SGM/MME/CPRM e SIC/SGM/FUNMINERAL/Estado de Goiás, *Relatório Final, 22 vol., Texto e Anexos (mapas), Rio de Janeiro*.

LASA Engenharia e Prospecções S.A., (2004). Projeto Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás – 1ª Etapa – Arco Magmático de Mara Rosa - Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos, Convênio de Cooperação Técnica entre a SGM/MME/CPRM e SIC/SGM/FUNMINERAL/Estado de Goiás, *Relatório Final, 12 vol., Texto e Anexos (mapas), Rio de Janeiro*.

LASA Engenharia e Prospecções S.A., (2005). Projeto Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás – 2ª Etapa – Oeste do Arco Magmático de Mara Rosa - Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos, Convênio de Cooperação Técnica entre a SGM/MME/CPRM e SIC/SGM/FUNMINERAL/Estado de Goiás, *Relatório Final, 7 vol., Texto e Anexos (mapas), Rio de Janeiro*.

LASA Engenharia e Prospecções S.A./Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda., (2011). Levantamento Aerogeofísico Sudeste do Mato Grosso - Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos, Convênio de Cooperação e Apoio Técnico-Científico entre a CPRM – Serviço Geológico do Brasil e o Estado de Mato Grosso, por meio de sua Secretaria de Estado de Indústria, Comércio, Minas e Energia, *Relatório Final, 37 vol., Texto e Anexos (Mapas), Rio de Janeiro*.

- Laux, J. H., Pimentel, M. M., Dantas, E. L., Armstrong, R., & Junges, S. L. (2005). Two Neoproterozoic crustal accretion events in the Brasília belt, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 18(2), 183-198.
- Leão-Santos, M., Li, Y., & Moraes, R. (2015). Application of 3D magnetic amplitude inversion to iron oxide-copper-gold deposits at low magnetic latitudes: A case study from Carajás Mineral Province, Brazil. *Geophysics*, 80(2), B13-B22.
- Li, X. (2006). Understanding 3D analytic signal amplitude. *Geophysics*, 71(2), L13-L16.
- Li, Y., & Oldenburg, D. W. (1996). 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, 61(2), 394-408.
- Li, Y., & Oldenburg, D. W. (1998). 3-D inversion of gravity data. *Geophysics*, 63(1), 109-119.
- Marques, G. C. (2017). Evolução tectônica e metalogenética no contexto do depósito aurífero de Fazenda Nova, Arco Magmático de Arenópolis, Goiás. *Tese de Doutorado, UnB*.
- Marques, G. C., de Oliveira, C. G., Espada, E., & Dantas, E. L. (2019). The Fazenda Nova Gold Deposit, Goiás Magmatic Arc: Late Neoproterozoic Intrusion-Related Auriferous Mineralization Controlled by Intracontinental Strike-Slip Faulting. *Ore Geology Reviews*.
- Martinez, C., Li, Y., Krahenbuhl, R., & Braga, M. A. (2012). 3D inversion of airborne gravity gradiometry data in mineral exploration: A case study in the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Geophysics*, 78(1), B1-B11.
- McEnroe, S. A., Fabian, K., Robinson, P., Gaina, C., & Brown, L. L. (2009). Crustal magnetism, lamellar magnetism and rocks that remember. *Elements*, 5(4), 241-246.
- Moreira, M. L. O., Moreton, L. C., Araújo, V. A., Lacerda Filho, J. V., & Costa, H. F. (2008). Geologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. *Texto explicativo do Mapa Geológico do estado de Goiás e Distrito Federal*. Convênio MME/CPRM-SIC/FUNMINERAL/GO
- Mota-Araújo, J.G., Pimentel, M. M., & Richard, A. (2002). Idade e significado do sistema de cisalhamento Moiporá-Novo Brasil no Arco Magmático de Goiás: novos dados U-Pb SHIMP e Sm-Nd. In: *Congresso Brasileiro de Geologia, 41, João Pessoa*. p. 486.
- Nabighian, M. N. (1972). The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37(3), 507-517.

- Oldenburg, D. W., & Pratt, D. A. (2007). Geophysical inversion for mineral exploration: a decade of progress in theory and practice. *In Proceedings of exploration* (Vol. 7, No. 5, pp. 61-95).
- Oliveira, C. G., de Queiroz, C. L., & Pimentel, M. M. (2000). The Arenópolis-Mara Rosa Gold-Copper Belt, Neoproterozoic Goiás Magmatic Arc. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(2), 219-221.
- Pili, E., Ricard, Y., Lardeaux, J. M., & Sheppard, S. M. F. (1997). Lithospheric shear zones and mantle-crust connections. *Tectonophysics*, 280(1-2), 15-29.
- Pimentel, M. M., & Fuck, R. A. (1986). Geologia da Sequência Vulcano-Sedimentar de Arenópolis (GO). *Revista Brasileira de Geociências*, 16(2), 217-223
- Pimentel, M. M., Heaman, L., & Fuck, R. A. (1991). Zircon and sphene U-Pb geochronology of Upper Proterozoic volcanic-arc rock units from southwestern Goiás, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 4(4), 295-305.
- Pimentel, M. M., Fuck, R. A., Jost, H., Ferreira Filho, C. F., & Araújo, S. D. (2000). The basement of the Brasília fold belt and the Goiás magmatic arc. *Tectonic Evolution of South America*, 31, 195-229.
- Ramos, L. N. R. A. (2010). Dados gamaespectrométricos e magnetométricos aéreos aplicados ao mapeamento geológico e à exploração de ouro na região de Fazenda Nova, porção leste do arco magmático de Arenópolis, Goiás. *Dissertação de Mestrado, UnB*
- Reeves, C. (2005). *Aeromagnetic surveys: principles, practice and interpretation* (Vol. 155). Geosoft.
- Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.
- Rodrigues, J. B., Gioia, S. M. L. C., & Pimentel, M. M. (1999). Geocronologia e geoquímica de ortognaisses da região entre Iporá e Firminópolis: implicações para a evolução do Arco Magmático de Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(2), 207-216.
- Roest, W. R., Verhoef, J., & Pilkington, M. (1992). Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57(1), 116-125.
- Seer, H. J. (1985). Geologia, deformação e mineralização de cobre no complexo vulcano-sedimentar de Bom Jardim de Goiás. *Dissertação de Mestrado, UnB*.
- Soares, J. E., Berrocal, J., Fuck, R. A., Mooney, W. D., & Ventura, D. B. (2006). Seismic characteristics of central Brazil crust and upper mantle: a deep seismic refraction study. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B12).

- Storti, F., Holdsworth, R. E., & Salvini, F. (2003). Intraplate strike-slip deformation belts. *Geological Society, London, Special Publications*, 210(1), 1-14.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics* (Vol. 1). Cambridge university press.
- Tikhonov, A. N. (1943). On the stability of inverse problems. *In Dokl. Akad. Nauk SSSR* (Vol. 39, pp. 195-198).
- Ventura, D. B. R., Soares, J. E. P., Fuck, R. A., & Caridade, L. D. C. C. (2011). Caracterização sísmica e gravimétrica da litosfera sob a linha de refração sísmica profunda de Porangatu, Província Tocantins, Brasil Central. *Revista Brasileira de Geociências*, 41(1), 130-140.
- Walsh, J. J., & Watterson, J. (1988). Analysis of the relationship between displacements and dimensions of faults. *Journal of Structural geology*, 10(3), 239-247.
- Woodcock, N. H., & Schubert, C. (1994). Continental strike-slip tectonics. *Continental deformation*, 251-263.