



Interpretação de Dados Eletromagnéticos Aerolevantados no Domínio do Tempo (ATDEM) no Greenstone Belt Rio das Velhas

Guilherme Zakarewicz de Aguiar¹, Monica Giannocaro Von Huelsen¹, Alamim Justino de Almeida Junior¹, Luísa Lins¹

¹ Universidade de Brasília (UnB), Instituto de Geociências

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 4 a 6 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

A porção sul do cráton São Francisco abriga o Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. A região, conhecida por ser uma província mineral de extrema importância para a economia do Brasil, compreende o Greenstone Belt Rio das Velhas, sequência Arqueana que possui depósitos com mineralizações de ferro e ouro. Métodos geofísicos aéreos são importantes para o estudo destas mineralizações. O mapeamento e modelagem da condutividade pela profundidade permite observar contrastes deste parâmetro físico, o que pode refletir a presença de minérios. Este trabalho visa mostrar o resultado do processamento e interpretação de dados aeroeletromagnetométricos no domínio do tempo de duas áreas localizadas no Greenstone Belt Rio das Velhas. Identificamos anomalias condutivas, que variam, entre 3 e 9 km de comprimento nas duas áreas, orientadas NE-SW. Foram obtidas imagens de condutividade por profundidade por meio do programa *ImagEM* para melhor análise dos corpos identificados.

Introdução

O método aeroeletromagnético (AEM - *airborne electromagnetics*) é um dos principais métodos geofísicos aplicados na exploração mineral de estruturas metalíferas (Legault, 2015; Koné et al., 2021). O mapeamento da condutividade aparente em subsuperfície permite detectar o contraste de minerais com alta condutividade em relação à rocha encaixante (Silva, 2012). No Brasil, o levantamento de dados eletromagnéticos, como o utilizado nessa pesquisa, serve como um instrumento de planejamento e implementação de políticas públicas que visam o desenvolvimento sustentável da exploração dos recursos minerais. Essa pesquisa foi baseada em dados do sistema eletromagnético no domínio do tempo (ATDEM), em plataforma aerotransportada da Aeroquest, na região do Quadrilátero Ferrífero (QF).

Nesta área, localizada a sul do Cráton São Francisco, no estado de Minas Gerais, estão presentes três unidades. Destacamos a sequência vulcano-sedimentar Arqueana, que inclui o Greenstone Belt de Rio das Velhas (Baltazar & Zucchetti, 2007). Regiões Arqueanas de Greenstone Belts são comumente conhecidas por compreenderem depósitos com mineralizações de Cu, Ni, Fe, Au e Cr

(Condie, 1981). Este trabalho mostra o resultado do processamento e interpretação de dados eletromagnéticos no domínio do tempo aerotransportados de duas áreas (Rio das Velhas - Áreas 1 e 2) localizadas no Greenstone Belt Rio das Velhas, visando identificar estruturas com condutividades aparentes anômalas. Geramos mapas do campo EM secundário em três diferentes profundidades e uma imagem ternária CMY a partir da composição destes mapas. A partir dos dados processados, foi possível gerar diferentes seções da condutividade aparente em função da profundidade. Assim, estabelecemos uma análise semi-quantitativa dos corpos identificados nos mapas.

Localização e Geologia

O Quadrilátero Ferrífero possui uma elevada relevância em termos de levantamentos que visam o estudo qualitativo de seu potencial mineral, uma vez que é uma das principais regiões produtoras de minerais, e.g., minério de ferro (Rosière & Chemale Jr, 2000). O QF possui cinco unidades litoestratigráficas principais (Figura 1): terrenos graníticos-gnáissicos (TTG's) Arqueanos, que incluem intrusões de granitos, pegmatitos e diques máficos; o Supergrupo Rio das Velhas, que constitui uma sequência do tipo Greenstone Belt Arqueano; o Supergrupo Minas, unidade metassedimentar paleoproterozóica; o Grupo Itacolomi e o Supergrupo Espinhaço, ambas unidades mesoproterozóicas metassedimentares (Alkmim & Marshak, 1998).

As unidades foram agrupadas em blocos denominados Nova Lima, Caeté, Santa Bárbara e São Bartolomeu, que retratam ambientes petrogenéticos distintos (Pinto & Silva, 1996). O Greenstone Belt Rio das Velhas é conhecido por hospedar uma série de depósitos de ouro de classe mundial, associada à formação de *BIF's* (*banded iron formation*) (Dardenne & Schobbenhaus, 2001).

O Supergrupo Rio das Velhas inclui em sua base o Grupo Quebra Osso, subdividido em dois grupos - Nova Lima (formado por xistos, filitos, quartzitos e conglomerados) e Maquiné (formado por lentes quartzíticas, filitos quartzosos e conglomerados) (Dorr, 1969). Autores dividem o grupo Quebra Osso em Palmital e Casa Forte, além do grupo Maquiné nas formações Palmital e Casa Forte (Gair, 1962). A Formação Palmital compreende a unidade Rio das Pedras, formada por quartzitos sericíticos e quartzo-sericista xistos.

Foi realizado o levantamento de dados em duas áreas próximas a Belo Horizonte: Área 1 (Nova Lima/Caeté - RDVA1) e Área 2 (Santa Bárbara/Barão dos Cocais - RDVA2), em um total de 3400 km de perfis

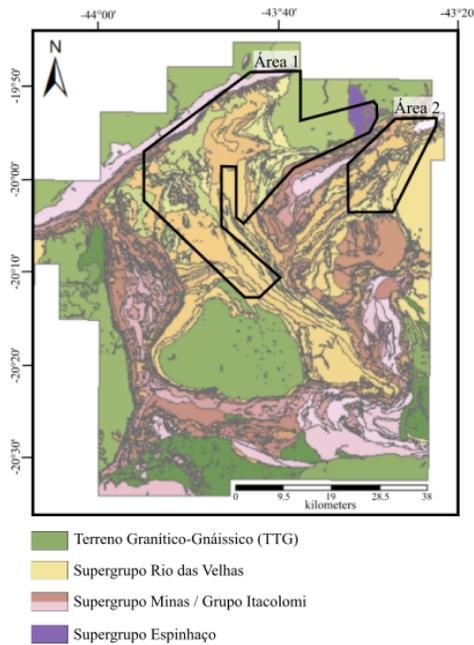


Figura 1 – Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero. Modificado de Dorr (1969).

eletromagnéticos aerolevantados no domínio do tempo.

Materiais e Métodos

Aquisição de Dados

Dentro do programa de Aceleração do crescimento PAc2009/2010, o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) celebrou com a Prospectors aerolevantamento onde recobriu as duas áreas: Rio das Velhas - Área 1 (RDVA1) e Rio das Velhas - Área 2 (RDVA2), totalizando 3400 km de perfis eletromagnéticos aerotransportados no domínio do tempo (Tabela 1). As linhas de voo possuem orientação N45°W e espaçamento de 250 m. A altura de voo da aeronave foi estabelecida como 120 m sobre terrenos acidentados e 90 m para outros locais, admitindo-se variações de 15 m. A velocidade aproximada do helicóptero foi 80 km/h. Foi utilizado um sistema eletromagnético no domínio do tempo da Aeroquest denominado AeroTEM, composto por um sistema de aquisição AeroDAS, uma bobina transmissora e um receptor (CPRM, 2012).

O loop do sistema é rebocado a 60 m abaixo da aeronave, com intervalo entre medidas geofísicas consecutivas de 0,1 segundo. Foram utilizados 17 canais *Off-time* da componente Z (*Zoff 0* a *Zoff 16*).

Processamento

O processamento de dados foi realizado utilizando o programa *Oasis Montaj - Geosoft*. Para a geração de malhas, utilizamos a rotina *Kriging*, técnica estatística que fornece estimativas lineares não-tendenciosas capaz de

Tabela 1 – Dimensões das áreas de levantamento e quilometragem total das linhas de voo realizadas

Área de Levantamento	Área (km)	Linhas de voo (km)
Rio das Velhas - Área 1	661	2.644,55
Rio das Velhas - Área 2	239	755,45
Total	900	3.400

manipular dados com alta variabilidade na densidade de dados (Meyer et al., 2017). Geramos malhas do campo EM secundário com células de 70 m.

O próximo passo foi a filtragem dos dados. Utilizamos em ambas áreas a técnica de filtragem denominada Cosseno Direcional, aplicada aos dados quando há um ruído direcional decorrente da alta concentração de informações ao longo das linhas de voo do levantamento, interferindo na resposta das fontes (Pedrosa Jr et al., 2010; Cordell et al., 1992). Notamos uma grande quantidade de ruídos de alta frequência nos canais mais profundos da Área 1; isso não foi observado na Área 2. Por esse motivo, a técnica de filtragem *Hanning* também foi aplicada nos canais profundos da Área 1, pelo fato de utilizar um filtro passa-banda.

Para melhor visualização dos resultados, geramos uma imagem ternária para cada área, em que os dados de três canais são apresentados juntos na forma de um mapa CMY (*cyan, magenta and yellow*). Utilizamos um canal raso (ciano), um intermediário (magenta) e um profundo (amarelo). Regiões que apresentam respostas do campo EM secundário elevadas nos três canais simultaneamente irão compor a cor preta, enquanto regiões com baixas respostas geram a cor branca. Dessa forma, é possível analisar se os corpos condutores identificados são apenas superficiais, apenas profundos ou se estão tanto em superfície como em profundidade.

Inversão dos Dados

A partir dos dados processados, aplicamos o programa *ImagemEM* - programa de modelagem 2D para dados TDEM, que efetua o cálculo da profundidade (eixo z) dos corpos condutores e gera dados para visualizações em mapas (Travaglia, 2016). Assim, foi possível gerar diferentes CDI's (*conductivity-depth image*), i.e., imagens da condutividade elétrica em função da profundidade (Huelsen et al., 2008). O algoritmo funciona por meio do programa *MATLAB* para o imageamento de dados eletromagnéticos no domínio do tempo.

Resultados e Análise

Área 1

Utilizamos as imagens do campo EM secundário de três canais para verificar a variação em profundidade das estruturas: *Zoff 1* (raso), *Zoff 5* (intermediário) e *Zoff 10* (profundo). O objetivo é identificar estruturas com altos valores do campo EM secundário presentes nos

três canais. Destacamos em linhas brancas os principais corpos condutores, majoritariamente lineares, e dividimos a área de estudo em 4 regiões (Figura 2).

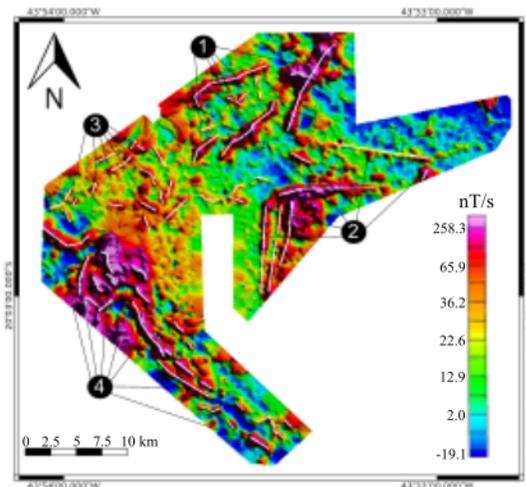


Figura 2 – Mapa do campo EM secundário (nT/s) do canal Zoff 1 da Área 1, com destaque para os corpos condutivos e quatro regiões delimitadas.

A partir da imagem ternária gerada pela junção dos três canais selecionados, é possível avaliar se os corpos destacados são superficiais ou se estendem em profundidade. Regiões com baixas respostas do campo EM secundário nos três canais irão compor a cor branca, enquanto regiões com elevadas respostas irão compor a cor preta. A imagem ternária da Área 1 é apresentada na Figura 3.

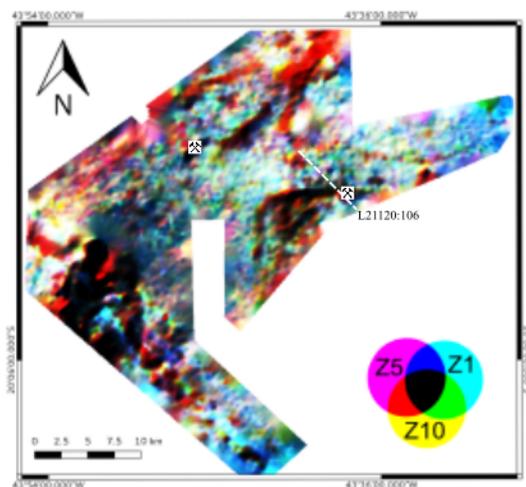


Figura 3 – Imagem ternária CMY gerada pela composição dos três canais (Zoff 1, Zoff 5 e Zoff 10) da Área 1. Em tracejado branco, a linha L21120:106. Note que a localização das mineradoras estão marcadas no mapa.

Ao compararmos o canal raso com o intermediário da região 1, notamos corpos lineares superficiais horizontalizados com altos valores do campo EM secundário (200 nT/s no canal 1 e 50 nT/s no canal 5), com exceção da estrutura localizada à sudeste desta região, que apresenta leve deslocamento para SE. Tal estrutura, com 7,8 km de comprimento, provavelmente possui mergulho NW-SE. Ao se comparar o canal intermediário com o profundo, notamos que grande parte das estruturas desaparecem, com exceção de duas linhas no extremo sul.

Entre os corpos localizados na segunda região da Área 1 (Figura 4), há diversas estruturas condutivas no canal raso que se mantêm no canal intermediário e desaparecem no profundo. Há apenas uma única linha, com 9,5 km de comprimento e direcionamento SW-NE, que permanece no canal 10 (52 a 180 nT/s).

Na região 3, há estruturas presentes na porção sudeste que permanecem em profundidade. Corpos a oeste e sudoeste não aparecem no canal mais profundo. A quarta região apresenta a maior concentração de estruturas rasas nos canais raso e intermediário. Porém, em profundidade, notamos uma menor quantidade de condutores concentrados em torno de uma área no centro da região. Além disso, há corpos localizados no extremo sul que apresentam valores altos do campo EM secundário nos três canais (170 nT/s no canal 1, 60 nT/s no canal 5 e 12 nT/s no canal 10).

Por meio da imagem ternária CMY gerada (Figura 3), foi possível analisar corpos condutores presentes simultaneamente nos três canais discutidos anteriormente, que aparecem com a tonalidade preta. As regiões 1 e 2 apresentam estruturas presentes em todos os canais, com comprimentos que variam de 3 a 9,5 km. A região 3 apresenta corpos que não aparecem nitidamente na imagem CMY. A região 4, por sua vez, apresenta diversos corpos visíveis nos três canais, o que pode indicar um solo condutivo com estruturas anômalas em seu entorno.

Área 2

Os mesmos procedimentos realizados para a análise da Área 1 foram aplicados para a Área 2, com o uso de três imagens do campo secundário para gerar a imagem ternária. As 4 regiões identificadas na Área 2 são exibidas na Figura 5, e a imagem ternária é apresentada na Figura 6.

A região 5 apresenta a maior estrutura observada na Área 2, com mais de 7 km de comprimento, verticalizada e presente tanto em superfície como em profundidade. Esta estrutura está localizada a noroeste e é o único condutor observado em profundidade nesta região (45 nT/s no canal 1, 19 nT/s no canal 5 e 6 nT/s no canal 10). A região 6 apresenta um corpo a norte, com 3,2 km de comprimento, que aparenta mergulhar para sul devido ao deslocamento observado nos canais do campo EM secundário. Já ao sul, há uma estrutura com 3,4 km que permanece com altas respostas no canal profundo.

A região 7 (Figura 7) apresenta condutores rasos orientados SW-NE, alguns também presentes em profundidade. Os comprimentos destes corpos variam

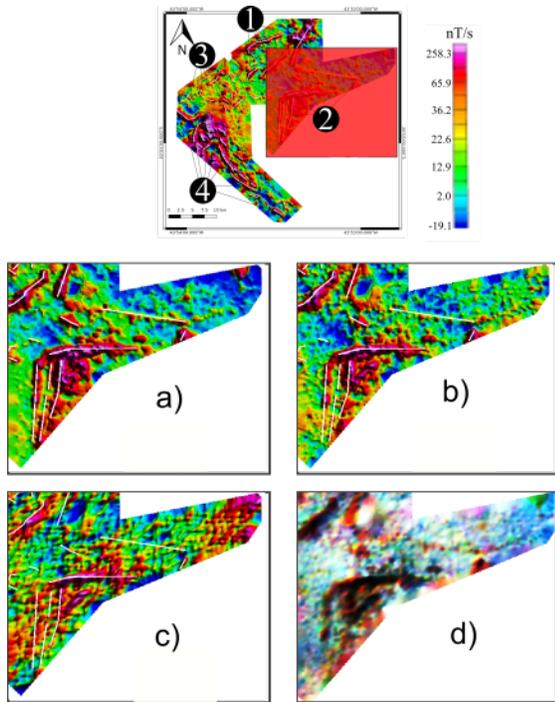


Figura 4 – Mapas do campo EM secundário da Área 1. O quadrado vermelho na primeira imagem destaca a região 2, com zoom que será focado nas imagens (a) Zoff 1, (b) Zoff 5, (c) Zoff 10 e na (d) imagem CMY.

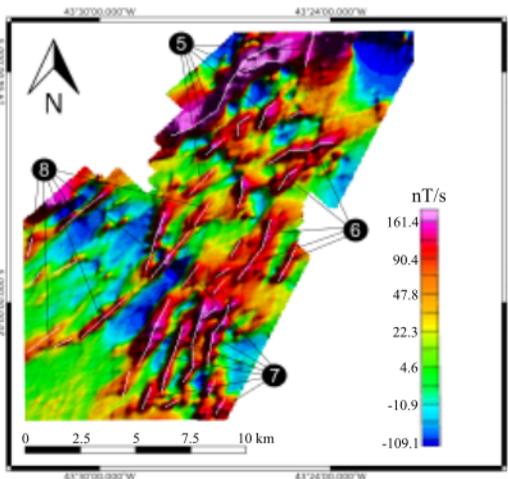


Figura 5 – Mapa do campo EM secundário (nT/s) do canal Zoff 1 da Área 2, com destaque para os corpos condutivos e quatro regiões delimitadas.

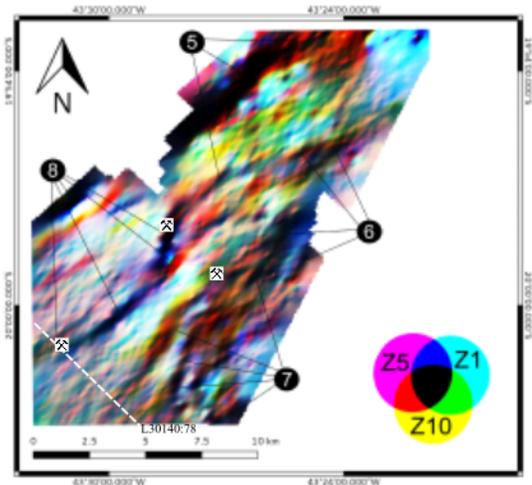


Figura 6 – Imagem ternária CMY gerada pela composição dos três canais (Zoff 1, Zoff 5 e Zoff 10) da Área 2. Em tracejado branco, a linha L30140:78. Note que a localização das mineradoras estão marcadas no mapa.

entre 3,1 e 3,5 km. Por fim, a região 8 possui duas estruturas presentes no canal profundo e na imagem ternária. Uma delas está ao norte (3 km) e outra ao sul (2,8 km).

Analisando a imagem CMY da área 2 (Figura 6), notamos que a estrutura presente na região 5, com 7 km de extensão, é a que mais se destaca. Foi possível notar que os dois corpos presentes na região 8 (3 e 2,8 km) também apresentam tonalidade escura na imagem ternária, o que caracteriza altos valores de condutividade nos três canais analisados. As outras regiões da Área 2 possuem corpos observados na imagem CMY, porém com tonalidades mais fracas do que as mencionadas anteriormente.

CDI's

Escolhemos uma linha de cada área para gerar as imagens de condutividade aparente por profundidade por meio do programa *ImagEM*. Para a escolha das linhas, levamos em consideração a posição de mineradoras de ouro atuantes nas regiões e das anomalias analisadas previamente. Dessa forma, selecionamos as linhas L21120:106 (Área 1 - Figura 3) e L30140:78 (Área 2 - Figura 6). O resultado dos CDI's são apresentados nas Figuras 8 e 9, orientadas de acordo com a direção das linhas de levantamento (SE-NW).

No CDI gerado para a linha referente à Área 1 (Figura 8), é possível notar que a mineradora está acima de um corpo condutivo (condutividade aparente entre 14 e $8,2 \cdot 10^{-10}$ mS/m) que se estende por aproximadamente 250 metros em profundidade e 2 quilômetros de comprimento. O restante do perfil possui os maiores valores de condutividade restritos à porção superficial (até aproximadamente 100 metros de profundidade).

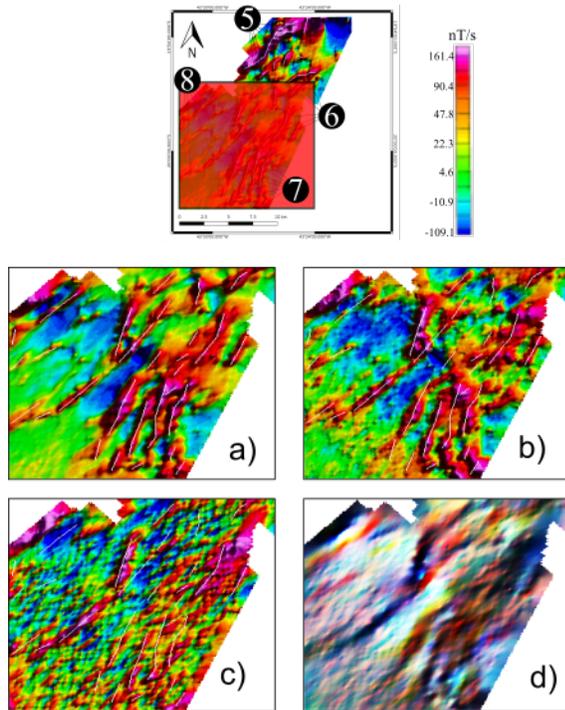


Figura 7 – Mapas do campo EM secundário da Área 2. O quadrado vermelho na primeira imagem destaca as regiões 7 e 8, com zoom que será focado nas imagens (a) Zoff 1, (b) Zoff 5, (c) Zoff 10 e na (d) imagem CMY.

Já para o CDI referente à linha gerada para a Área 2 (Figura 9), identificamos três regiões com corpos que se estendem em maiores profundidades. O primeiro, localizado no ponto 658.000E, possui cerca de 200 metros de profundidade e 1,05 km de comprimento. Os valores de condutividade aparente são entre 13,8 e $8 \cdot 10^{-10}$ mS/m. O segundo corpo identificado se localiza no ponto 657.000E, possui cerca de 187,5 m de profundidade e 1 km de comprimento. Por fim, o terceiro corpo, localizado entre os pontos 655.000E e 654.000E, possui profundidades que variam entre 125 e 190 m. O comprimento é de 1,25 km. Dessa forma, é possível separar os corpos anômalos identificados de solos condutivos presentes na região.

Como as mineradoras estão localizadas acima de corpos de alta condutividade, semelhantes aos outros identificados nas imagens do campo EM secundário, existe a possibilidade de que essas estruturas indiquem fontes minerais passíveis de prospecções. Em futuros estudos, a modelagem de mais perfis servirá para melhor relacionar os corpos condutivos e fontes minerais conhecidas nas regiões.

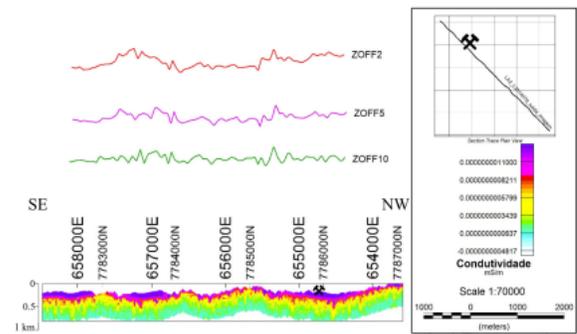


Figura 9 – (a) Perfis de condutividade aparente para cada canal off-time estudado; (b) seção de condutividade aparente por profundidade gerado para a linha L30140:78 (abaixo) referente à Área 2.

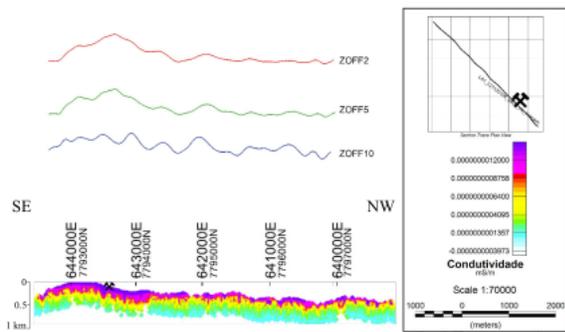


Figura 8 – Perfis de condutividade aparente para cada canal off-time estudado (acima); seção de condutividade aparente por profundidade gerado para a linha L21120:106 (abaixo) referente à Área 1.

Conclusões

As imagens geradas nos permitiu identificar regiões nas duas áreas de estudo em que há anomalias de valores do campo EM secundário. A primeira localização estudada (Rio das Velhas - Área 1) apresenta uma região localizada a sul com diversos corpos condutivos, além de estruturas com orientação SW-NE a norte com 7,8 e 9,5 km de comprimento. Já na segunda área (Rio das Velhas - Área 2), predominam as estruturas com direção SW-NE, com destaque para um corpo ao norte com 7 km de extensão.

A partir dos dados dos campos eletromagnéticos secundários processados, foi possível gerar perfis de condutividade aparente por profundidade (CDI's) para ambas as áreas. Tais perfis facilitam a interpretação das estruturas identificadas nos mapas anteriores para diferenciar corpos anômalos de solos condutivos.

Os resultados do processamento dos dados

magnetométricos e de sedimentos de corrente foram apresentados por Almeida & Von Huelsen (2021), e corroboram com as interpretações apresentadas no presente trabalho. Atualmente, estamos obtendo uma imagem 3D de condutividade por profundidade das áreas para termos mais informações sobre os corpos identificados e melhor relacionar as estruturas analisadas e fontes minerais conhecidas.

Referências

- Alkmim, F. F. & Marshak, S., 1998. Transamazonian orogeny in the Southern Sao Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero, Precambrian Research, vol. 90(1-2): 29–58.
- Almeida, A. & Von Huelsen, M., 2021. Modelagem de dados TDEM e Magnéticos aplicado à mineração na região de Rio das Velhas (MG), 18º Congresso de Iniciação Científica do DF.
- Baltazar, O. & Zucchetti, M., 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits, Ore Geology Reviews, vol. 32(3-4): 471–499.
- Condie, K. C., 1981. Archean greenstone belts, vol. 3, Elsevier.
- Cordell, L. E., Phillips, J. D. & Godson, R. H., 1992. US geological survey potential-field geophysical software version 2.0, Tech. rep., Geological Survey (US).
- CPRM, 2012. Projeto aerogeofísico Rio das Velhas – etapa II Nova Redenção, Prospectores Aerolevantamentos e Sistemas LTDA, Serviço Geológico do Brasil, vol. 1: 156p.
- Dardenne, M. A. & Schobbenhaus, C., 2001. Metalogênese do Brasil, vol. 1, Editora Universidade de Brasília, 393p.
- Dorr, J. V. N., 1969. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil, US Government Printing Office.
- Gair, J. E., 1962. Geology and ore deposits of the Nova Lima and Rio Acima quadrangles, Minas Gerais, Brazil, Tech. rep.
- Huelsen, M. G. V., Moraes, R. A. V. d. & Carvalho, T. S. d., 2008. Imageamento da subsuperfície baseado na condutividade: obtenção de cdis para o sistema geotem, Revista Brasileira de Geofísica, vol. 26(3): 377–385.
- Koné, A. Y. et al., 2021. Geophysical contributions to gold exploration in Western Mali according to airborne electromagnetic data interpretations, Minerals, vol. 11(2): 126.
- Legault, J. M., 2015. Airborne electromagnetic systems—state of the art and future directions, CSEG Recorder, vol. 40(06): 38–49.
- Meyer, B., Chulliat, A. & Saltus, R., 2017. Derivation and error analysis of the earth magnetic anomaly grid at 2 arc min resolution version 3 (EMAG2v3), Geochemistry, Geophysics, Geosystems, vol. 18(12): 4522–4537.
- Pedrosa Jr, N. C., Castro, D. L. d. & Matos, J. P. L. d., 2010. Assinaturas magnéticas e gravimétricas do arcabouço estrutural da bacia Potiguar emersa, NE do Brasil, Revista Brasileira de Geofísica, vol. 28(2): 265–278.
- Pinto, P. & Silva, L., 1996. Contrasting tectono-stratigraphic domains in the Rio das Velhas Greenstone Belt (RVGB), MG, Brazil, Symposium Archean Terranes of the South American Platform. Brasília, SBG: 23–25.
- Rosière, C. A. & Chemale Jr, F., 2000. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero—uma visão geral e discussão, Geonomos, vol. 8(2): 27–43.
- Silva, A. T. M. C., 2012. Resposta eletromagnética e magnética do depósito IOCG (iron oxide copper gold) cristalino, Província Mineral de Carajás, Pará, Brasil, Dissertação de Mestrado (Geofísica Aplicada, Instituto de Geociências) - Universidade de Brasília (UnB), Brasil.
- Travaglia, U., 2016. ImagEM: Programa de Modelagem 2D para dados TDEM, Tese de Doutorado (Geofísica Aplicada, Instituto de Geociências) - Universidade de Brasília (UnB), Brasil.