CORRELAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS E GEOQUÍMICOS NA EXPLORAÇÃO DE VANÁDIO NO ALVO SÃO JOSÉ, *SILL* DO RIO JACARÉ, MARACÁS – BA.

Mariana Tavares Amancio da Silva, Roberto Rios Passos Filho, Maximilian Fries e Carlson de Matos Maia Leite.

Copyright 2024, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 08 a 10 de outubro de 2024. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do X 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

Atualmente, a Largo *Inc.* é uma das produtoras primárias de vanádio de menor custo no mundo, e no Brasil com a Mina de Campbell, é a única mina de exploração de vanádio da América Latina. Localizada em Maracás no estado da Bahia a região é reconhecida pelo seu potencial mineral e situa-se geologicamente no *Sill* do Rio Jacaré, um corpo alongado N-S de 70 km de extensão, com uma variação de 400 m a 1,5 km de largura. Delimitado a leste pelo granito-gnaisse Pé de Serra e a oeste pelo Cinturão Orogênico Contendas-Mirante, trata-se de uma soleira máfica-ultramáfica, hospedeira de Magnetitito Vanadífero. Considerando a importância deste *commodity* no cenário mundial, especificamente na indústria (melhora as propriedades de ligas metálicas, reduzindo o peso final e aumentando sua resistência à tração), o objetivo deste estudo consiste em estabelecer correlações entre dados diretos (geológicos e geoquímicos de solo) e geofísicos (magnetométricos) dentro da área de pesquisa mineral da empresa. Como resultados, a integração dos mapas das anomalias magnetométricas, filtros e técnicas de realce, com as informações das anomalias geoquímicas identificadas, permitiu a delineação e detecção de padrões e geometrias correlacionáveis aos corpos de interesse. Esses produtos preliminares possibilitam otimizar a utilização dos dados exploratórios disponíveis, proporcionando uma melhor compreensão do potencial mineral da região do denominado alvo São José.

Introdução

A intrusão máfica-ultramáfica do *Sill* do Rio Jacaré (SRJ) ocorre no município de Maracás (Bahia), a cerca de 350Km da capital baiana, na unidade geotectônica Cinturão Contenda Mirantes (CCM) do Cráton do São Francisco (Almeida, 1987). O CCM é constituído por sequências metavulcanossedimentares, deformadas e intrudidas por granitóides, durante a orogênese riaciana-orosiriana (2,0-1,8 Ga) que amalgamou o embasamento do cráton na Bahia (Marinho & Sabaté, 1982; Marinho, 1991; Marinho, 1994; Barbosa et al, 2002). Durante esta orogenia foram amalgamados blocos litosféricos continentais compostos por rochas de idades arqueana-paleoproterozoicas, denominados de Bloco Jequié (BJ) a leste e Bloco Gavião (BG) a oeste (Barbosa & Sabaté, 2004; Barbosa et al., 2012). Segundo Leite & Marinho (2012) o *sill* foi intrudido entre o BJ e o BG no Neoarqueano, com posterior metamorfismo na fácies anfibolito, durante a orogenia riaciana-orosiriana. Brito (2000) empilha a estratigrafia do SRJ de acordo com a diferenciação magmática ultramáfica máfica, que cristalizou os seguintes litotipos: Metapiroxenito, Metamagnetitito, Magnetita metapiroxenito, Magnetita-metagabro, Metanortosito e Metagabro. Estas litologias constituem corpos alongados de direção N10E a N20E com mergulhos entre 50° e 70°. Sua descoberta e os projetos exploratórios iniciais se devem à CBPM em 1980, durante o mapeamento geológico regional nas regiões de Contendas e Mirante. As campanhas de sondagens levaram à descoberta da ocorrência de magnetita rica em vanádio no SRJ (Galvão et al., 1981; Brito, 1984). Em 2014, iniciou-se a produção desse minério na Cava Campbell pertencente à VMSA. Dados publicados pela Largo *Inc.* (2021), mostram reservas estimadas em 231,3 mil t de V_20_5. Na América Latina, a Largo *Inc*. é a única empresa que produz pentóxido de vanádio (V_2O_5, extraído da magnetita-titanifera-vanadífera). O elemento químico vanádio desempenha um papel crucial na indústria, destacando-se principalmente na formulação de ligas metálicas para a redução da massa e melhoria da capacidade de suportar tensões. Adicionalmente, esse metal é usado como agente catalisador em várias operações industriais e apresenta importantes usos na indústria nuclear. O trabalho tem como objetivo delinear as correlações existentes nas geometrias das anomalias magnetométricas e de geoquímica de solo dos elementos V e Ti, correlacionáveis aos dados de mapeamento geológico-estrutural.

Metodologia

A sistemática utilizada busca correlacionar dados indiretos (aerogeofísicos) com diretos (geológicos e geoquímica de solo dos teores de V e Ti) utilizando o método lógico-sistemático de Guy (1966). Os dados e o mapa com as anomalias aeromagnetométricas foram processados na plataforma Oasis Montaj utilizando a interpolação *Bi-directional gridding* (krigagem bi-directional) e a respectiva geração de malha (*grid*) com células de 125 metros. Os dados aeromagnetométricos são oriundos do Projeto Aerogeofísico Ruy Barbosa / Vitória da Conquista (2006) da Companhia Bahiana de Pesquisa Mineral (CBPM) e foram disponibilizados pela VMSA em um banco de dados no formato XYZ. As linhas de voo possuem direção leste-oeste e espaçamento de 500m. A primeira etapa consistiu em selecionar as linhas de voo, gerar e validar a base de dados, seguida por organização da mesma na área de estudo (Figura 1).

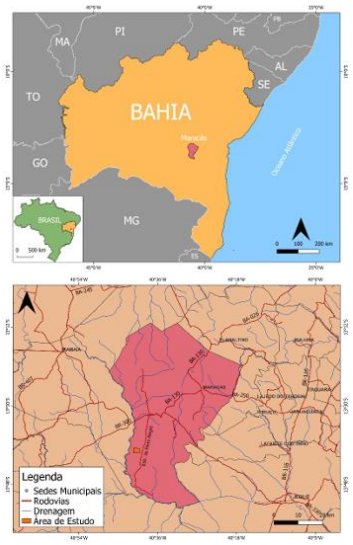

Figura 1: Mapa de situação e localização da área de estudo (IBGE, 2018).

Foi seguida a metodologia sugerida por Verduzco (2004) e exemplificada por Lahti (2010) para o processamento, buscando a interpretação dos dados para mapeamento e modelagem geológica tridimensional das anomalias. Primeiramente, aplicou-se aos dados aeromagnetométricos o filtro *Low Pass* visto que foram identificados *spikes* anômalos (altas frequências associadas a ruídos) no banco de dados, visando atenuar as altas frequências. Em seguida, foi feita a interpolação Bi-directional line gridding e gerado o Mapa TMI - Anomalias Magnéticas de Campo Anômalo Total. A partir destes valores obtidos foram aplicados os seguintes filtros, respectivamente: RTP - *Reduction to Pole*, UpW- *Upward Continuation*, 1DV – *First Vertical Derivative* e TDR - *Tilt Derivative*. Após a geração dos mapas geofísicos e respectivas anomalias obseervadas, foi feita a interpretação comparativamente aos alvos, rochas identificadas em subsuperfície e aos padrões de geoquímica de solo que estes litotipos apresentam para os elementos V (ppm) e Ti (%).

Esses dados geoquímicos são oriundos da campanha de amostragem de solo feita pela LVMSA em 2023. Possui uma malha de amostragem de 50X200m. As malhas (*grid*) resultantes desses dados foram geradas por meio do método mínima curvatura, analisados pelo método ICP14B no laboratório da SGS Geosol e processados na rotina *Target* da plataforma Oasis Montaj. Os elementos V e Ti foram selecionados devido a mineralização de titano-magnetita vanadífera encontrada no *Sill* do Rio Jacaré. Alguns exemplos da aplicação de interpretação geológico-geofísica e literatura adicional são descritos em Tavares et al. (2021) e em Mendes et al. (2022). Esta abordagem adotada possibilitou investigar os padrões de comprimento, direção, morfologia, relação de corte, relevo e sobreposição das fontes causativas das anomalias geofísicas.

Resultados

Preliminarmente, para os dados geofísicos (indiretos) foi gerado o Mapa das Anomalias Magnéticas de Campo Anômalo Total (TMI) seguido da aplicação dos filtros supracitados. Obteve-se desta forma, os seguintes mapas: i) TMI - *Campo Magnético Anômalo Total;* ii) TMI-RTP - *Reduction to Pole*; iii) RTP – UpW 100 - *Upward Continuation* (100 metros) e iv) RTP – UpW - 1DV – *First Vertical Derivative* conforme a Figura 2.

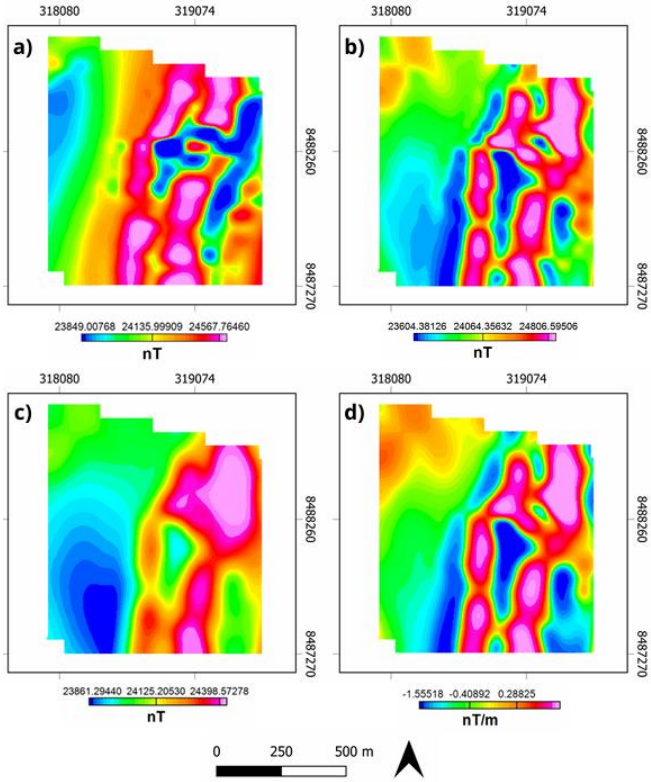

Figura 2: Mapas das anomalias aeromagnetométricas, sendo em **a)** TMI - Campo magnético anômalo total; **b)** TMI - RTP- Campo magnético anômalo total reduzido ao polo; **c)** TMI – RTP - UpW 100 - Mapa de continuação ascendente de 100m dos valores TMI reduzidos ao polo e **d)** RTP- UpW - 1DV - 1° Derivada Vertical a partir do mapa RTP – UpW.

Posteriormente, para as interpretações foram extraídos os lineamentos geofísicos a partir das anomalias observadas no mapa de 1ª Derivada Vertical (RTP- UpW - 1DV) em nano Tesla/metro (nT/m), a fim de delimitar as anomalias apresentadas e suas descontinuidades, visto que esse filtro realça as bordas dos corpos rochosos auxiliando no entendimento do arcabouço estrutural da área (Figura 3). Estas anomalias observadas variam de altos magnéticos de 2,6 nT/m até valores próximos a -1,6 nT/m. As rochas hospedeiras da titanomagnetita-vanadífera exibem valores magnéticos significantes e seus corpos se apresentam associados a regiões bordejadas com medidas negativas. As anomalias não se

estendem uniformemente no *trend* N-S, apresentando certas individualizações que são pontuais ou observadas ao longo das anomalias adjacentes caracterizando uma irregularidade. Esse foi o critério utilizado para examinar as descontinuidades, que, por vezes, seccionam toda a área e possuem um *trend* NW-SE. Devido a sua característica de realce de eixos anômalos, foi aplicado, adicionalmente para realce, o filtro Inclinação do Sinal Analítico (TRD) a partir dos valores da Continuação Ascendente – 100m Reduzida ao Polo (TMI – RTP - UpW). Este produto possibilitou a comparação e a correlação com estruturas regionais previamente mapeadas e, também, com os halos das anomalias geoquímicas locais. Este mapa auxilia no delineamento do *trend* principal das anomalias, tanto positivas quanto negativas. Os valores (em radianos - rad), variam de 1.35 a -1.5. As anomalias positivas e negativas seguem a direção NE-SW, similar ao *trend* regional de N20E. As descontinuidades observadas no mapa são caracterizadas pela interrupção ou por vezes deslocamento das anomalias em ambos os extremos (positivos e negativos), com direção NW-SE majoritariamente, e um exemplar NE-SW quase horizontalizado.

Quanto aos dados diretos de geoquímica de solo, o mapa de dispersão geoquímica do elemento vanádio varia de 30 ppm a valores acima de 1825 ppm com uma anomalia a oeste de aproximadamente 1.5km de comprimento e um *trend* NE-SW similar ao *trend* regional de N20E (Figura 03). É visível outra anomalia elipsoidal com aproximadamente 270m de eixo menor (leste-oeste) e 400m de eixo maior (Norte-sul) chegando a valores acima de 2650pmm. A dispersão geoquímica do Titânio apresenta comportamentos similares ao comportamento do Vanádio, possuindo um alongamento no *trend* NNE-SSW e com descontinuidades mais acentuadas no *trend* NW-SE. Neste alvo em questão, na anomalia a oeste, as amostras de solo chegaram a apresentar valores acima de 0.55% de Ti, com o halo anômalo ligeiramente menor que o do Vanádio. A anomalia situada a leste apresenta valores maiores que a representante oeste, chegando a possuir resultados acima de 0.6% de Ti. Quando comparada à anomalia de vanádio, a anomalia de titânio apresenta-se mais alongada, porém mais estreita. Diferenças pontuais no *trend* da dispersão geoquímica e geração de *hot-spot* das anomalias quando comparado o titânio e o vanádio podem ter sido causados pela presença, e posteriormente, intemperização do mineral ilmenita no *Sill* do Rio Jacaré e na diferença da mobilidade secundária dos elementos.

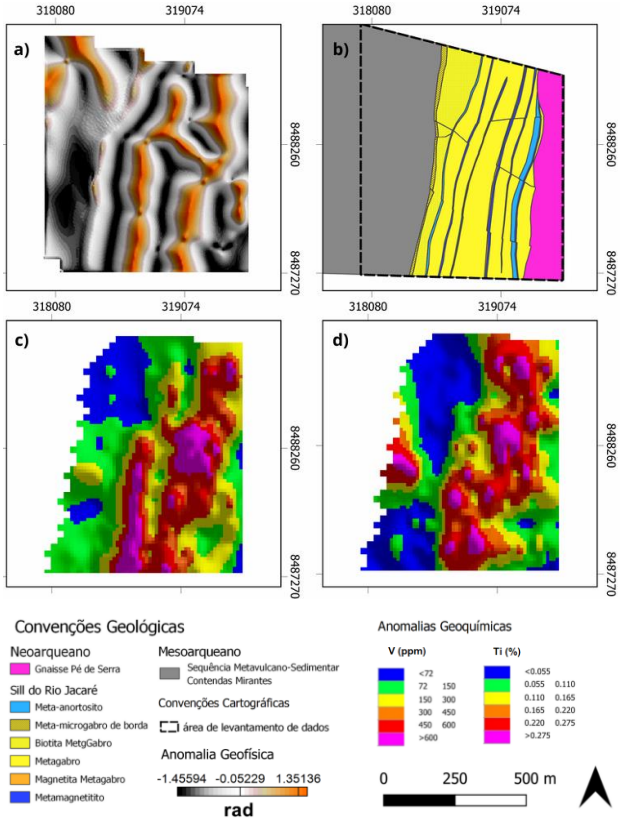

Figura 3: Integração dos dados diretos de geoquímica com a aerogeofísicas na região de estudo. Em **a)** Mapa da Inclinação do Sinal Analítico (TDR); **b)** Mapa Geológico do alvo São José; **c)** Mapa de anomalia geoquímica de V em ppm e **d)** Mapa de anomalia geoquímica de Ti em %.

Discussão e Conclusões

A partir dos resultados, análises preliminares e da integração/interpretação dos mapas gerados (mapas lito-geofísicos), observa-se que as anomalias geoquímicas e geofísicas seguem os valores regionais de padrão NE-SW, delimitando corpos alongados de direção N-S. No mapa das anomalias de 1° derivada vertical (RTP-UpW-1DV) identificou-se uma variação dos dados, onde nas porções mais a oeste, os valores exibem hábito gradacional e suavizado, marcando o contato do *Sill* do Rio Jacaré com os xistos da Formação Mirante, destacando a diferença de resposta magnética que a intercalação do conjunto das rochas máficas-ultramáficas apresentam em comparação com as adjacentes. Além das litologias do *Sill* do Rio Jacaré, Formação Mirante do Cinturão Contendas Mirante e Granito Gnáissico Pé de Serra, foram identificados veios de quartzo e diques pegmatíticos que truncam as litologias anteriormente citadas. Complementarmente, no mapa dos valores submetidos a Inclinação do Sinal Analítico (RTP-UpW-TDR) quando comparados as anomalias geoquímicas de V e Ti, é evidente que estas encontram-se delimitadas pelo centro das respostas geofísicas positivas. Dessa

forma, os produtos gerados e suas interpretações apresentam uma relação direta entre as mineralizações associadas a Fe-Ti-V Magnetita (presente nos gabros e piroxenitos do SRJ) e as respostas anômalas de magnetometria. Esses resultados contribuem para uma melhor compreensão geológica do SRJ, fornecendo informações valiosas para futuras interpretações regionais das anomalias magnéticas, auxiliando ainda mais na definição destes corpos associados (espessuras, continuidades e direções), determinação das campanhas de sondagem e amostragem de solo futuras. Contém, adicionalmente, importantes subsídios no suporte e direcionamento para determinação de novos *targets* em possíveis novas áreas mineralizadas a partir de um melhor aproveitamento dos dados exploratórios já existentes.

Agradecimentos

Agradecemos à Largo Vanádio de Maracás S.A. pela disponibilização dos dados e por todo os recursos direcionados para a confecção do trabalho.

Referências

Almeida, F. F. M. (1987). O Cráton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, 7(4), 349-364.

Barbosa, J. S. F., & Sabaté, P. (2002). Geological features and the Paleoproterozoic collision of four Archean crustal segments of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil: a synthesis. Anais Da Academia Brasileira de Ciências, 74(2), 343–359.

Barbosa, J. S. F., & Sabaté, P. (2004). Archean and Paleoproterozoic crust of the São Francisco craton, Bahia, Brazil: geodynamic features. Precambrian Research, 133(1-2), 1-27.

Barbosa, J.S.F.; Cruz, S.C.P.; Souza, J.S. (2012). Terrenos Metamórficos do Embasamento. In: Barbosa J.S.F. et al. (Eds.), Geologia da Bahia – Pesquisa e Atualização (v.1, p. 101-201). Salvador: UFBA-CBPM.

Brito, R.S.C. (1984). Geologia do Sill Estratificado do Rio Jacaré. XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia Rio de Janeiro, v. 11. Rio de Janeiro: SBG.

Brito, R. S. C. (2000). Geologia e Petrologia do Sill Máfico-Ultramáfico do Rio Jacaré - Bahia e Estudo das Mineralizações de Fe-Ti-V e Platinóides Associados. Tese (Doutorado). Brasília: Instituto de Geociências, UnB.

Galvão, C. F. (1981). Projeto Rio Jacaré. Convênio CPRM-CBPM. (Relatório Final), Salvador, CBPM.

Guy H. 1966. Quelques príncipe set quelques experieuces sur la methodologie de laphoto interpretation. In: International Symposium on Photo-interpretation, 2, 21-41.

Lahti, Ilkka, and Tuomo Karinen. "Tilt derivative multiscale edges of magnetic data." The Leading Edge 29.1 (2010): 24-29.

Leite, C. M. M., & Marinho, M. M. (2012). Serra de Jacobina e Contendas-Mirante. Geologia da Bahia Pesquisa e Atualização. Salvador: CBPM-Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, 397-441.

Marinho, M.M. (1991). La Séquence Volcano-Sedimentaire de Contendas-Mirante et la bordure Occidentale du bloc Jequié (Cráton do São Franscisco, Brésel): Um exemple de transition archeén-proterozoique. Tese (Doutorado). Clermont- Ferrand: Université Clermont Ferrand.

Marinho, M. M. (1994). Geologia e potencialidade para mineral da borda nordeste da Faixa Contendas-Mirante e do Sill do Rio Jacaré, Bahia (No. 55 SER).

Mendes T.A.A., Antonio C.S.O., Almeida M.E., Caxito F.A., Novo T.A. 2022. The structural framework of the north-central Guiana Shield: a fossil fold and-thrust belt in northeastern Roraima state, Brazil. Journal of the Geological Survey of Brazil, 1, 1-1.

Sabaté, P., and M. M. Marinho. "Chemical affinities of low grade metamorphic formations of the Contendas-Mirante proterozoic complex (Bahia, Brazil)." Revista brasileira de geociências 12.1-3 (1982): 392-402.

Tavares F.M., Oliveira J.K.M., Lima R.B. 2021. Áreas de relevante interesse mineral - Província mineral de Carajás, PA: Controles críticos das mineralizações de cobre e ouro do lineamento do 59 cinzento. Informe de Recursos Minerais, Série Províncias Minerais do Brasil,

n. 33. Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Belém, CPRM, p.156.

Verduzco, B., J. D. Fairhead, C. M. Green, and C. Mackenzie, 2004, New insights into magnetic derivatives for structural mapping. The Leading Edge, 23, 2, 116–119.