



Síntese do Atlas Aerogeofísico do Estado do Tocantins com ênfase nos mapas da 1° DV-CMA e Composição Ternária RGB (K-eTh-eU) e Modelagens MVI.

Adolfo Barbosa da Silva¹, Felipe da Mota Alves¹, Alexandre Lisboa Lago¹, Antônio Augusto Soares Frasca¹, Marco Antônio Couto Junior², Marcelo Ferreira da Silva¹, Pedro Sérgio Estevam Ribeiro¹.

¹Serviço Geológico do Brasil - CPRM, ²Vale S.A.

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 04 a 06 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

Este resumo se dedica a apresentar uma síntese do Atlas Aerogeofísico do Estado do Tocantins (AATO), um produto institucional publicado pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM e cuja finalidade consiste em fomentar a utilização de dados aerogeofísicos e apoiar a pesquisa geofísica e geológica no âmbito estadual. O AATO foi concebido a partir da compilação dos aerolevantamentos magnetométricos e gamaespectrométricos de alta resolução adquiridos sobre o estado. Dentre os produtos apresentados no AATO, este estudo dedicou-se a enfatizar algumas das principais correlações entre as unidades geológicas e estruturas cartografadas no estado e as assinaturas aerogeofísicas vistas no mapa de 1° Derivada Vertical do Campo Magnético Anômalo (1°DV-CMA) e no mapa de Composição Ternária RGB (K-eTh-eU) das concentrações dos radioelementos. Além dessas correlações, são apresentadas as modelagens de Inversão do Vetor Magnetização (*Magnetization Vector Inversion-MVI*) das anomalias magnéticas associadas ao depósito polimetálico de Palmeirópolis. Neste último caso, os resultados revelaram feições em subsuperfície e forneceram informações adicionais sobre os corpos mineralizados.

Introdução

Com o intuito de contribuir para o aprimoramento do conhecimento geológico e a descoberta de recursos minerais no Brasil, o governo federal, por meio do Serviço Geológico do Brasil-CPRM, realizou ao longo das duas últimas décadas importantes investimentos na aquisição de dados aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria). Neste período foi recoberta uma área de cerca de 3.726.364 km² (ou 92% do embasamento cristalino) do território brasileiro por aerolevantamentos de alta resolução. Visando incrementar a divulgação do conhecimento e a disponibilização dos dados aerogeofísicos à comunidade técnico-científica, ao setor mineral e à sociedade em geral, o SGB-CPRM tem publicado uma série de Atlas Aerogeofísicos Estaduais. Nesses Atlas, os dados aerogeofísicos são integrados e correlacionados com a geologia de acordo com os limites das unidades federativas do Brasil. Esta compartimentação objetiva facilitar a gestão e emprego dos dados de acordo com as

preferências e prioridades de cada gestor estadual e/ou privado, e segundo as características geológicas e potencialidades minerais locais.

Este trabalho se dedica a apresentar uma síntese do Atlas Aerogeofísico do Estado do Tocantins (AATO) recentemente publicado pelo SGB. O AATO consiste em um produto institucional com oitenta e sete páginas nas quais são apresentados os seguintes tópicos: os aspectos geográficos, geológicos e de recursos minerais do Estado do Tocantins; os dados aerogeofísicos coletados sobre o território tocantinense; uma breve descrição dos métodos aerogeofísicos, bem como as etapas de processamento dos dados; os mapas temáticos utilizados na interpretação de dados; as principais correlações dos dados aerogeofísicos com as unidades geológicas cartografadas no Estado do Tocantins e; três estudos de casos nos quais as assinaturas aerogeofísicas de dois depósitos minerais conhecidos (Polimetálico de Palmeirópolis e Urânio de Alecrim/Campos Belos) e da Estrutura de Impacto Serra da Cangalha são analisadas em maiores detalhes. Neste resumo expandido, enquanto os quatro primeiros tópicos são brevemente apresentados, nos enfatizamos os dois últimos ao apresentar algumas das principais correlações supracitadas que foram observadas nos mapas da 1° Derivada Vertical do Campo Magnético Anômalo (1°DV-CMA) e na Composição Ternária RGB (K-eTh-eU) dos radioelementos. Ademais, entre os três estudos de casos analisados no AATO, apenas as assinaturas aerogeofísicas do depósito Polimetálico de Palmeirópolis são apresentadas aqui. As demais assinaturas aerogeofísicas, bem como outras informações não abordadas poderão ser consultadas no citado atlas cujo arquivo PDF está disponibilizado no sítio do Repositório Institucional do SGB-CPRM (Silva & Alves, 2021).

Geologia

O estado do Tocantins ocupa uma área de aproximadamente 277.423,630 km² na região Norte do Brasil. A geologia do território tocantinense tem sido objeto de diversos estudos, os quais têm contribuído para a construção de um modelo da evolução geotectônica do estado. O território tocantinense está localizado no limite de três Províncias Estruturais Brasileiras (Fig. 1a) (Almeida et al., 1981) e, para propósitos deste trabalho, a geologia deste território foi agrupada nos seguintes compartimentos geotectônicos (Fig. 1a): Embasamento Arqueano – Paleoproterozoico (terrenos TTGs, greenstone belts, complexos granítico-gnáissicos-migmatíticos, sequências metavulcanossedimentares, etc); Bacias Rifts Paleoproterozoicas (metassedimentares e metavulcanossedimentares representativas de ambientes extensionais); Intrusões Alcalinas e Graníticas Paleo – Mesoproterozoicas (suítes intrusivas alojadas em

rochas metassedimentares do compartimento anterior); Remanescente de crosta oceânica Mesoproterozoica (representado Complexo de Palmeirópolis - CP); Orógenos Neoproterozoicos (intrusões sin a tardi orogênicas, complexos ofiolíticos, unidades metassedimentares de plataforma continental, ortognaisses de arcos magmáticos, etc); Bacias Neoproterozoicas (sequências de rochas clásticas, carbonáticas e bioquímicas típicas

de ambiente de antepaís e margem continental); Bacias intracratônicas Fanerozoicas (rochas siliciclásticas e carbonáticas das quais algumas são intrudidas por diques/soleiras de diabásio ou são recobertas por camadas de basaltos); Coberturas Superficiais Cenozoicas (crostas detrítico laterítico e depósitos aluviais recentes).

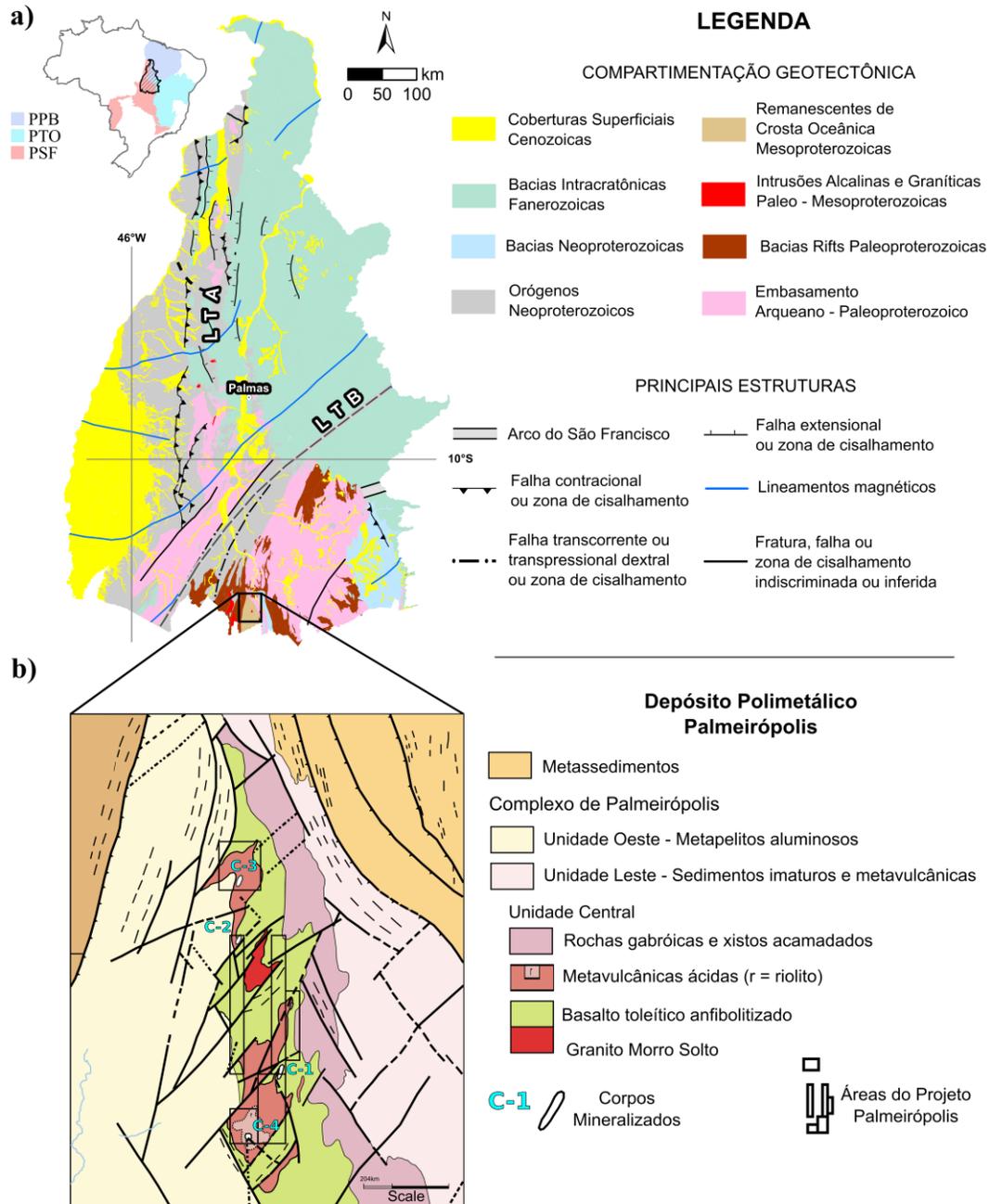


Figura 1: a) Mapa simplificado da compartimentação geotectônica do Estado do Tocantins. PPB – Província Parnaíba. PTO – Província Tocantins. PSF – Província São Francisco. LTB – Lineamento Transbrasiliiano. LTA – Lineamento Tocantins – Araguaia. b) Detalhe da geologia da região do depósito polimetálico de Palmeirópolis.

As principais feições que marcam o cenário estrutural do estado são os lineamentos com direção NE – SW e N – S relacionados ao Sistema de Lineamentos Transbrasiliano (LTB) e ao Sistema de Lineamentos Tocantins - Araguaia (LTA), respectivamente. Diques máficos de direção N – S e extensões tão grandes quanto 500 km também têm sido considerados como feições importantes no quadro estrutural regional (Cruz & Gorayeb, 2020). Falhas, fraturas e estruturas sigmoidais também podem ser destacadas no quadro estrutural do território tocantinense.

Em termos de recursos minerais, embora a ocorrência de depósitos de minerais metálicos de grande porte ainda são desconhecidas no estado, pesquisas recentes têm refinado o modelo geotectônico da região, permitindo assim a construção de cenários metalogenéticos promissores. Neste sentido, as rochas situadas na porção sul e oeste do estado são as mais promissoras. Um exemplo são os depósitos de sulfeto maciço (Zn, Pb e Cu) associados ao CP (Wosniak et al., 2020). Neste complexo, três corpos mineralizados (C1, C2 e C3) ocorrem em zonas de contato de anfibólio com rochas vulcânicas, e um quarto corpo mineralizado (C4) ocorre em uma forma anelar, com ocorrência predominante em sulfetos disseminados hospedados em rochas riolíticas (Fig. 1b) (Wosniak et al., 2020).

Metodologia

Os dados aerogeofísicos adquiridos sobre o Estado do Tocantins são oriundos de seis projetos aerogeofísicos que foram executados por empresas contratadas durante os anos de 2005 e 2016 (Fig. 2). Os dados foram adquiridos em linhas de voo espaçadas em 500 m (direção N – S) e altura média de voo de 100 m. A direção das linhas de controle (E - W) é comum a todos os aerolevantamentos, mas os espaçamentos delas foram de 4 km para Projeto Aerogeofísico Bacia do Parnaíba, e de 10 km para os demais projetos aerogeofísicos.

Os dados magnetométricos foram adquiridos através de um magnetômetro com sensor vapor de césio (arranjo do tipo *stinger*) e medições sendo realizadas a cada 0.1s. Já os dados gamaespectrométricos foram adquiridos por meio de um gamaespectrômetro com detectores de cristais de iodeto de sódio (NaI) que executa medidas a cada 1.0s. Durante a etapa de pré-processamento, foram realizadas as seguintes correções sobre os dados magnetométricos: compensação magnética, paralaxe, remoção da variação diurna, remoção do IGRF, nivelamento e micro nivelamento. Já para os dados gamaespectrométricos, as correções foram: tempo morto, remoção de *background* (aeronave, cósmico e radônio), altura, Efeito Compton e conversão para concentrações elementares. Na etapa de pós-processamento realizada pelos autores do AATO, o *software Oasis Montaj* versão 9.8.1 foi utilizado para produzir as malhas do Campo Magnético Anômalo (CMA) e das concentrações de K, eTh e eU. Essas malhas foram obtidas a partir da interpolação dos dados pelo método *Bi-Directional* com tamanho de célula de 125 m. A junção das malhas derivadas dos diferentes projetos aerogeofísicos foi realizada através da ferramenta

GridKnit integrada ao citado *software*. A partir dessas malhas, outros produtos, tais como a 1°DV-CMA e a Composição Ternária em RGB (K-eTh-eU) foram produzidas. Nesta composição, a malha do K foi colocada na cor vermelha (*Red*), a malha do eTh na cor verde (*Green*) e a malha do eU na cor azul (*Blue*). Os produtos então foram organizados em mapas, como apresentados na Figura 3b.

Além do processamento tradicional, os dados magnetométricos da região do depósito polimetálico de Palmeirópolis foram modelados por meio da técnica de Inversão do Vetor de Magnetização (*Magnetic Vector Inversion – MVI*) (MacLoad & Ellis, 2013). Esta técnica permite recuperar a distribuição das orientações dos vetores de magnetização dos corpos magnéticos, bem como a susceptibilidade magnética dos corpos. Os resultados da modelagem *MVI* foram integrados com as informações de furo de sondagem e com dados eletromagnéticos no domínio do tempo (sistema *Versatile Transient Electromagnetic – VTEM*). Neste último caso, as anomalias condutivas associadas aos corpos mineralizados foram modeladas como placas condutoras. Maiores detalhes sobre a aquisição, processamento e parâmetros da modelagem dos dados *VTEM* podem ser encontrados nas páginas 53 a 54 do AATO.

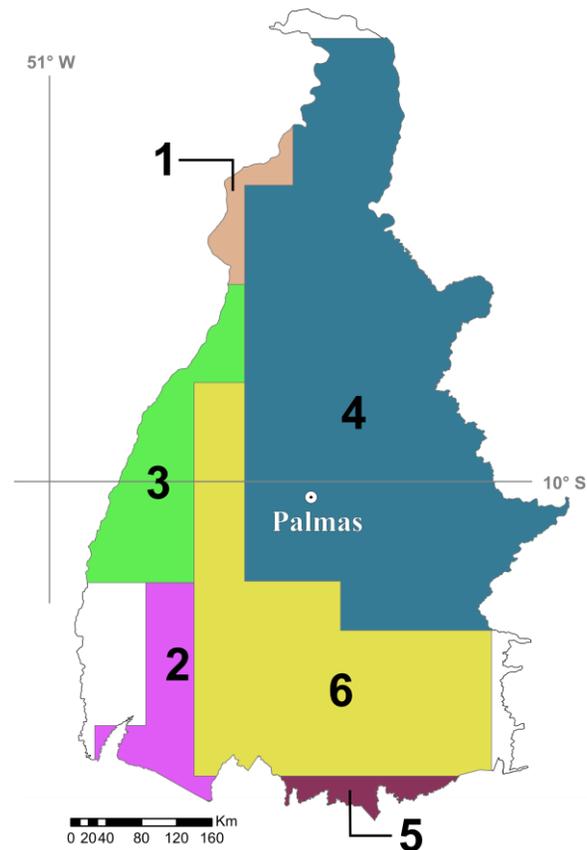


Figura 2: Projetos aerogeofísicos executados sobre o Estado do Tocantins. 1 – Rio Maria; 2 – Rio Formoso; 3 – Conceição do Araguaia; 4 – Bacia do Parnaíba; 5 – Complemento do Tocantins; 6 – Tocantins.

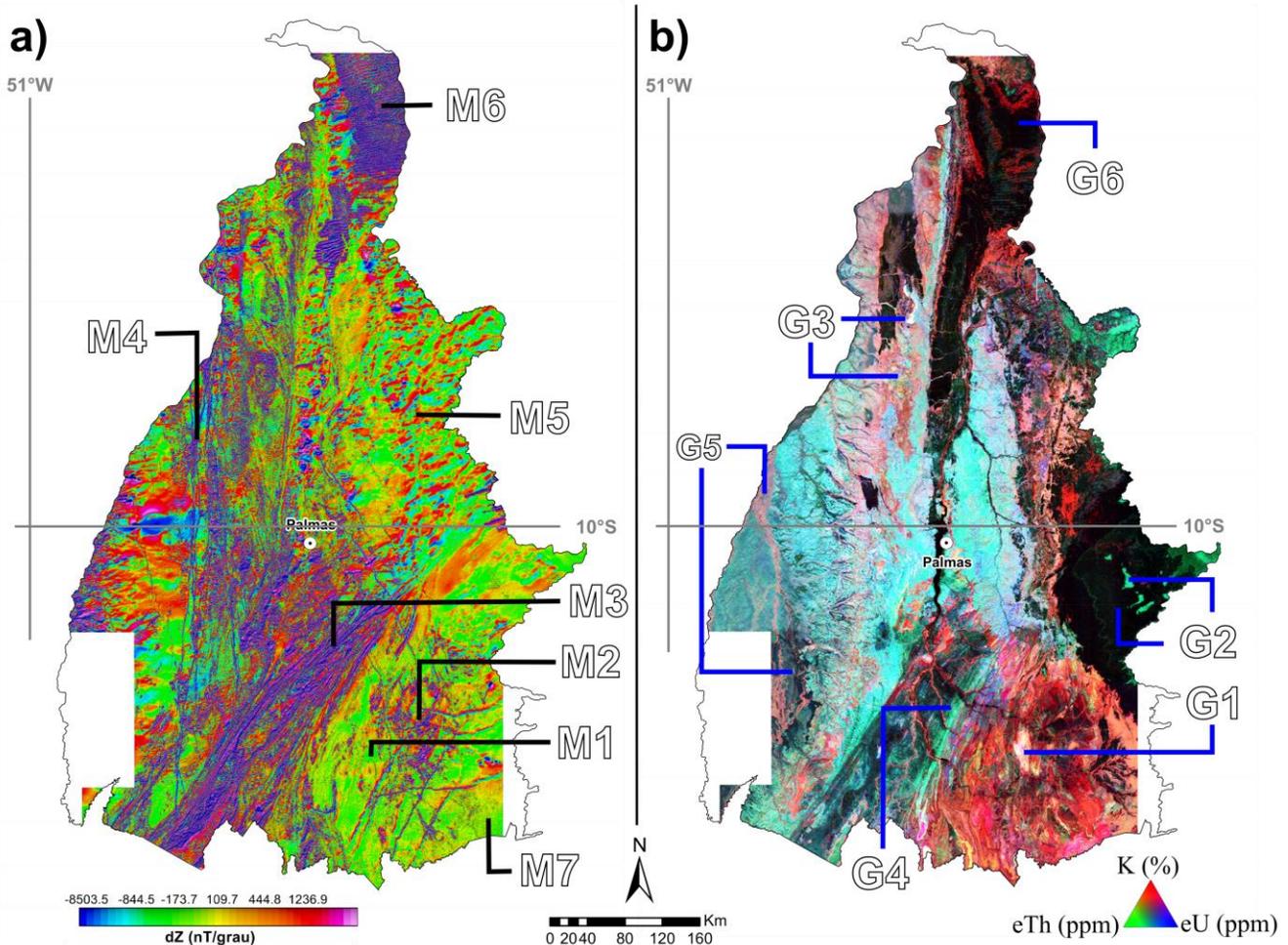


Figura 3: Mapas aerogeofísicos. a) Mapa da 1°DV-CMA do Estado do Tocantins. b) Mapa da composição ternária RGB do Estado do Tocantins. M1 – M7 e G1 – G6 correspondem respectivamente às áreas com as assinaturas magnetométricas e radiométricas descritas no texto.

Resultados e Discussões

No AATO, os resultados e discussões são apresentados nas seções em que as principais unidades geológicas são correlacionadas com os dados de magnetometria e gamaespectrometria aérea. Tais correlações visam sugerir ao leitor uma provável fonte para as assinaturas aerogeofísicas observadas nos mapas temáticos. Contudo, somente estudos direcionados a estudar tais possíveis fontes podem confirmar, ou não, a associação entre elas e as assinaturas aerogeofísicas descritas neste texto. Além dessas seções, o AATO apresenta como os dados magnetométricos foram úteis em auxiliar na delimitação dos corpos mineralizado que ocorrem no CP (Fig. 4).

Dentre as correlações que podem ser feitas entre o mapa da 1°DV-CMA (Fig. 3a) e aquele da Fig. 1a podemos citar: a maior parte dos terrenos granítico/gnáissicos/migmatíticos que afloram no sudeste do Tocantins se correlaciona com baixos magnéticos (baixos valores no mapa da 1°DV-CMA representados pela área M1 da Fig. 3a). Tal fato pode estar relacionado à destruição da magnetita pelos processos metamórficos

que afetou tais terrenos ou à baixa quantidade natural desse mineral na rocha em si (Airo, 2002); As respostas magnéticas de grande amplitude (altos valores no mapa da 1°DV-CMA, área M2) que ocorrem no interior ou circundando tais terrenos podem estar associadas ao conteúdo de minerais ferrimagnéticos presentes em unidades metavulcanossedimentares, greenstone belts ou em suítes intrusivas máfica – ultramáficas.

Das várias anomalias magnéticas lineares vistas no mapa da Fig. 3a, dois principais grupos se destacam: um com direção preferencial NE – SW (área M3) e outro N – S (área M4). O primeiro pode ser correlacionado ao LTB e o segundo com LTA. A fonte das anomalias magnéticas do primeiro grupo deve-se a diversos fatores, desde a justaposição de litologias com diferentes conteúdos de magnetita, como também a presença de minerais ferrimagnéticos acumulados nas calhas das falhas. Para o segundo grupo, as anomalias magnéticas podem ser geradas tanto pela justaposição de unidades em zonas de empurrão ou falha, como também por grandes diques máficos e/ou por remanescentes de crosta oceânica (ofiolitos). Na Figura 3 (área M5), as

anomalias de baixa amplitude magnética observada sobre o domínio das rochas sedimentares provavelmente devem estar relacionadas ao baixo conteúdo de magnetita, visto que tais rochas comumente são formadas por sedimentos siliciclásticos e/ou carbonáticos deficientes em magnetitas (Grant, 1985). Contudo, no extremo norte do Estado, as anomalias magnéticas de alta intensidade (altos valores no mapa da 1°DV-CMA, área M6) observados na região da Bacia do Parnaíba provavelmente devem-se ao conteúdo de minerais magnéticos presentes em diabásios e/ou basaltos da Formação Mosquito (Mocitaiba et al., 2017).

Com relação aos dados de gamaespectrometria aérea, o AATO apresenta um conjunto de mapas a partir dos quais foi possível correlacionar diversas respostas gamaespectrométricas com as unidades geológicas mais representativas. A tarefa de inferir uma fonte para as assinaturas radiométricas é difícil, pois, embora tais assinaturas forneçam pistas sobre o padrão de distribuição dos radioelementos na unidade geológica, essa distribuição pode ser alterada por outros processos, como variações composicionais, intemperismo e alteração hidrotermal (Reinhardt & Hermann, 2018; Shives et al., 2000; Wilford & Minty, 2007). Por exemplo: os tons escuros observados sobre as rochas intrusivas máficas – ultramáficas ou sobre os basaltos/diabásios (área G6 na Fig. 3b) provavelmente deve-se à baixa concentração natural de K, eTh e eU nessas rochas. Baixas concentrações destes elementos também podem estar associadas aos solos quartzosos presentes na região da Serra Geral do Tocantins (áreas em G2, Fig. 3b), uma vez que esta região também é vista em tonalidades escuras. Contudo, os relevos residuais são destacados nas cores verde e ciano, evidenciando assim que o intemperismo pode ter favorecido a concentração de eTh e eU e o lixiviamento do K (Taylor et al., 2002; Mello et al, 2021).

Outro exemplo são os domos TTG que compõem o domínio do embasamento (áreas G3, Fig. 4). Os domos situados mais ao norte apresentam coloração avermelhada, indicando enriquecimento relativo de K, enquanto aqueles mais a sul apresentam uma coloração amarelada, indicando deficiência em eU. Contudo, uma vez que esses domos têm idades semelhantes, é possível que as diferenças nas concentrações de K, eTh e eU seja devido a fatores composicionais.

Além dos fatores composicionais, as concentrações dos radioelementos também podem ser destacadas por processos de alteração hidrotermal, de modo que áreas ricas em K, eTh e eU possam ser identificadas em mapas regionais (área G1, Fig. 3b). Ademais, a justaposição de unidades com diferentes características composicionais, bem como o preenchimento de calhas de falhas com minerais portadores de K, eTh e eU, podem ser uma explicação plausível para os lineamentos gamaespectrométricos observados quase que coincidentemente com os lineamentos magnéticos associados ao LTB.

Vale a pena registrar ainda as respostas radiométricas que podem ser vistas ao longo dos grandes canais de drenagens, principalmente ao longo dos Rios Tocantins e Araguaia e seus afluentes. Tais respostas

podem ser derivadas de depósitos aluviais (Bierwirth, 1996). Neste caso, a coloração do mapa da Fig. 3b (área G5) pode nos dar pistas sobre tais depósitos. Por exemplo: uma coloração branca sugere que tais depósitos são ricos nos três elementos e, desta forma, pode-se inferir que os depósitos são recentes ou que a fonte deles está próxima do local de deposição (Pickup & Marks, 2000; Wilford & Minty, 2007). Por outro lado, uma cor escura sugere que tais depósitos são pobres em K, eTh e eU, de modo que pôde-se inferir que eles podem ser formados essencialmente por minerais de quartzo, por exemplo.

Além das correlações citadas neste resumo expandido, outras podem ser consultadas nas páginas 33 a 35 (magnetometria) e 51 a 52 (gamaespectrometria) do AATO.

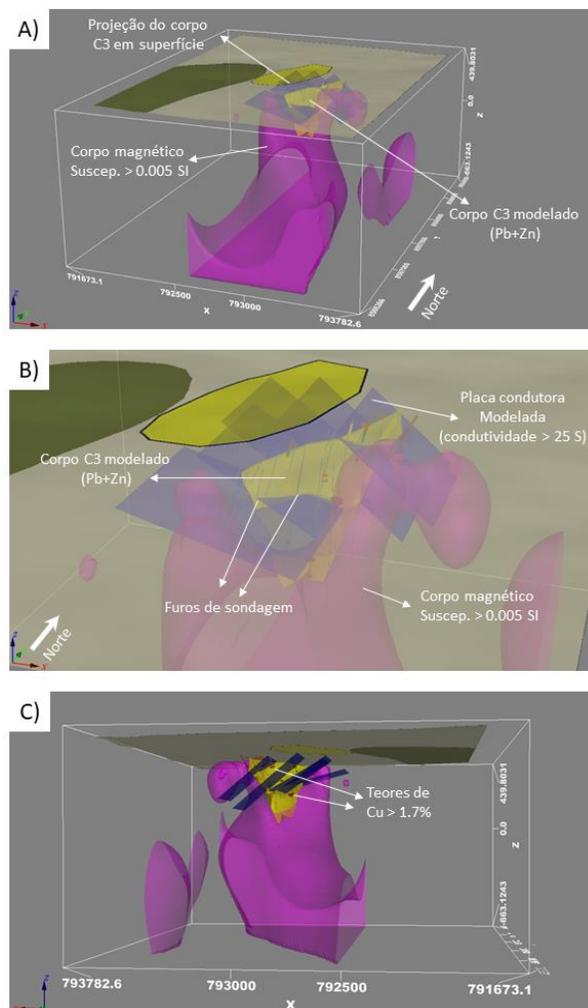


Figura 4: Visualização 3D do resultado da integração das modelagens MVI (corpos em magenta) e VTEM (placas em azul) com os dados de furo de sondagens (cilindros verticais) para o corpo mineralizado C3 do CP. a) Vista geral para NW. b) Detalhe para vista NW. c) Detalhe para vista SW.

A Fig. 4 mostra o resultado da integração da modelagem MVI com as modelagens VTEM e furos de sondagens do

CP. Durante as modelagens, foi observado que os corpos magnéticos modelados com susceptibilidade magnética > 0,005 SI indicam a presença de corpos mais rasos nas porções NE e S do corpo mineralizado de Pb + Zn, com direção de mergulho coincidentes com os condutores indicados pela modelagem *VTEM* (Fig. 4). Estes resultados indicam que pode haver enriquecimento de pirrotita nas porções citadas dos corpos ao longo do *trend* condutivo. Os resultados das modelagens para os outros corpos mineralizados podem ser consultados nas páginas 55 a 60 do AATO.

Conclusões

Este resumo teve por objetivo apresentar uma síntese do Atlas Aerogeofísico do Estado do Tocantins, um relatório institucional recentemente publicado pelo Serviço Geológico do Brasil. Nesta síntese, foi apresentado que algumas das unidades geológicas cartografadas no Estado do Tocantins, bem como algumas das principais feições estruturais, podem ser correlacionadas com respostas aerogeofísicas. Adicionalmente, as análises e modelagens de dados magnetométricos podem ser úteis em revelar feições relacionadas a depósitos minerais em subsuperfície, como por exemplo, o possível enriquecimento de pirrotita em um dos corpos mineralizados do depósito de Palmeirópolis. Esperamos que o presente resumo expandido possa suscitar o interesse da comunidade das ciências da Terra e de outros profissionais a consultarem o Atlas Aerogeofísicos do Estado do Tocantins.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica do Serviço Geológico do Brasil (DISEGE /SGB) pelo fornecimento dos dados aerogeofísicos que foram utilizados no presente trabalho.

Referências

- Airo, M.L., 2002, Aeromagnetic and Aeroradiometric Response to Hydrothermal Alteration, *Surveys in Geophysics*, 23: 273 – 302. DOI:10.1023/A:1015556614694.
- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. 1981. Brazilian Structural Provinces: Na introduction, *Earth – Science Reviews*, 17: 1 – 29. DOI: 10.1016/0012-8252(81)90003-9.
- Bierwirth, P., 1996, Investigation of airborne gamma – ray images as a rapid mapping tool for soil and land degradation – Wagga Wagga NSW, Australian Geological Survey Organization, vol. 22, 71 p.
- Cruz D.J.N., Gorayeb P.S.S. 2020. Geology and petrology of the mafic dike swarms of the Araguaia Belt: Evidence for distinct events of intracontinental magmatism in central – northern Brazil and correlation with large igneous provinces, *Journal of South American Earth Sciences*, v. 100: 102563. DOI: 10.1016/j.jsames.2020.102563.
- Grant F.S., 1985, Aeromagnetic, geology and ore environment, I. Magnetite in igneous, sedimentary and metamorphic rocks: an overview, *Geoexploration*, 23: 303 – 333. DOI: 10.1016/0016-7142(85)90001-8.
- MacLeod, I.N., Ellis, R.G., 2013. Magnetization Vector Inversion, a simple approach to the challenge of varying direction of rock magnetization. 23TH International Geophysical Conference and Exhibition, August 11 - 14, Melbourne, Austrália.
- Mello D.C. et al. 2021. Applied gamma – ray spectrometry for evaluating tropical soil processes and attributes, *Geoderma*, v. 381: 114736. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114736
- Mocitaiba, L. S. R.; Castro, D. L.; Oliveira, D. C. 2017. Cartografia geofísica regional do magmatismo mesocenozoico na bacia do Parnaíba. *Geologia USP, Série Científica*, 17 (2): 169 -1 92. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v17-455.
- Pickup G., Marks A. 2000. Identifying large – scale erosion and deposition process from airborne gamma radiometrics and digital elevation models in a weathered landscape, *Earth Surface Process and Landforms*, 25: 535 – 557. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(200005)25:5<535::AID-ESP91>3.0.CO;2-N
- Reinhardt, N. B.; Herrmann L. Gamma – ray spectrometry as versatile tool in soil Science: A critical review, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 182 (1): 9 - 27. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/JPLN.201700447>.
- Shives, R. B. K.; Charbonneau, B. W.; Ford, K. L. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry – Recognition of alteration related to mineralization. *Geophysics*, v. 65, n. 6, p. 2001 - 2011, 2000. DOI: 10.1190/1.1444884.
- Taylor M.J., Smettem K., Pracillo G., Verboom W. 2002. Relationships between soil properties and high resolution radiometrics, central eastern Wheatbelt, Western Australia, *Exploration Geophysics*, 33: 95 – 102. DOI: 10.1071/EG02095.
- Wilford J., Minty B. 2007. The use of airborne gamma-ray imagery for mapping soils and understanding landscape processes, Ch. 16, In: Legacherie P., McBratney A.B., Voltz M. (eds), *Developments in Soil Science*, 31: 207 – 218. DOI: 10.1016/S0166-2481(06)31016-1.
- WOSNIAK, R. et al. Relatório de Ravaiação do Patrimônio Mineral – Área Polimetálicos de Palmeirópolis, Estado de Tocantins. Brasília: CPRM, 2020. ISBN 978-65- 5664-053-2. (Informe de Recursos Minerais. Série Oportunidades Minerais. Exame Atualizado de Projeto, 26). Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/21519>. Acesso em: 22 nov. 2021.
- Silva, A.B., Alves, F.M. 2021. Atlas Aerogeofísico do Estado do Tocantins. Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Goiânia, p. 87. ISBN: 978 – 65 – 5664 – 191 – 1. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22566>. Acesso em: 07 mar. 2022.