Geofísica aplicada a prospecção de Lítio no Brasil: Interpretação de dados aerogeofísicos da Subprovíncia Pegmatítica de Solonópole, Ceará.

Frederico Ricardo Ferreira Rodrigues de Oliveira e Sousa, Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM.

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

Este estudo apresenta uma análise dos dados aerogeofísicos referentes a Subprovíncia Pegmatítica de Solonópole, no Ceará, Brasil. Foram criados mapas temáticos de gamaespectrometria e magnetometria, empregando diversas técnicas de processamento e realce de dados. Os resultados revelaram assinaturas geofísicas que coincidem com as ocorrências de pegmatitos LCT em Solonópole, e também evidenciaram a necessidade de refinamento da cartografia geológica do granito Banabuiú.

Introdução

Os pegmatitos LCT (Lítio, Césio, Tântalo) são rochas ígneas ricas em elementos incompatíveis e voláteis (Li, Cs, Ta, Rb, Be, Sn, Ba, P, F e U), geralmente encontradas como diques, bolsões ou lentes próximas a granitos peraluminosos do tipo S. Estas rochas têm grande interesse econômico devido à presença de minerais que contêm lítio, césio, tântalo e outros elementos raros. O lítio é essencial para baterias de íon-lítio, usadas em eletrônicos portáteis, veículos elétricos e armazenamento de energia renovável. O césio é utilizado em tecnologias de comunicação e relógios atômicos, enquanto o tântalo é crucial em componentes eletrônicos de alta performance, como capacitores e semicondutores. O nióbio, extraído da columbita, é vital para ligas e componentes eletrônicos, especialmente superligas, devido à sua resistência à corrosão e oxidação.

A formação desses pegmatitos pode ser explicada pela cristalização fracionada contínua de um magma granítico, que concentra elementos voláteis e incompatíveis à medida que o magma esfria (ČERNÝ, 1982a, b). Outra hipótese petrogenética bastante difundida sugere que pegmatitos LCT também podem se formar a partir da fusão parcial de rochas metassedimentares ricas nesses elementos (SIMMONS; WEBBER, 2008).

No Subprovíncia Pegmatítica de Solonópole (SPS), o contexto geológico local comporta ambas as hipóteses de formação dos pegmatitos LCT. A região é caracterizada pelo corpo Banabuiú, um granito peraluminoso a duas micas com granada. Diversos pegmatitos LCT foram catalogados na área, correlacionando-se espacialmente com este granito e encaixados na foliação e fraturas de rochas metassedimentares migmatizadas do Complexo Acopiara (PALHETA, 2017; PINÉO et al., 2020).

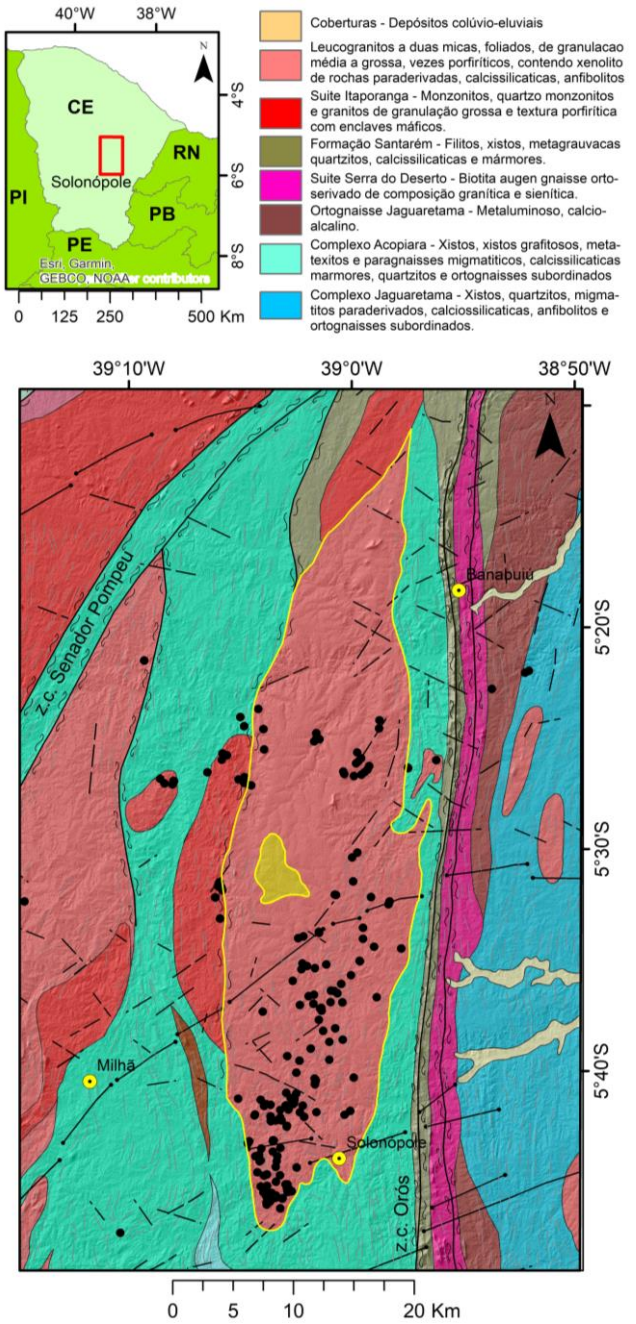

Figura 1 - A) Localização da Subprovíncia Pegmatítica de Solonópole, no estado do Ceará, Brasil; B) Detalhe do mapa geológico do estado do Ceará (PINÉO et al., 2020) mostrando a relação espacial entre os pegmatitos LCT catalogados na SPS (pontos pretos) e o corpo Banabuiú, um leucogranito a duas micas e com granada.

Metodologia/ Problema Investigado

Os dados aerogeofísicos foram utilizados neste trabalho para a interpretação do contexto geológico da região e das principais ocorrências de pegmatitos LCT catalogadas na SPS. Fazem parte do banco de dados do SGB/CPRM e referem-se aos projetos PB/RN/PE/CE (2010) e Centro-Sudoeste do Ceará (2010). Esses voos foram executados com espaçamento de 0,5 km entre linhas de voo N-S, e 10 km entre linhas de controle E-W, respectivamente, com altura média de voo de 100 metros sobre o solo. A bordo de todas as aeronaves estavam acoplados espectrômetros gama da Exploranium, modelo GR-820, com 256 canais. Cada sistema de detecção voltado para o solo consiste em três conjuntos de cristais NaI(Tl), totalizando um volume de 2.560 polegadas cúbicas. O magnetômetro utilizado contém um sensor de vapor de césio do tipo *stinger,* acoplado à cauda da aeronave. O campo total na área de estudo tem uma intensidade aproximada de 25.000 nT, com inclinação e declinação magnéticas estimadas em -22,3° e -25,5°, respectivamente. Para monitorar a variação diurna do campo geomagnético foi utilizado um magnetômetro Overhauser GSM-19, com resolução de 0,01 nT. Para gerar os mapas geofísicos, o método de interpolação bidirecional foi utilizado nesses dados, com célula de 1/4 do espaçamento entre as linhas de voo (125 × 125 m).

Resultados

Foram gerados os mapas de concentração de potássio (K), equivalente urânio (eU) e equivalente tório (eTh) para a área de estudos (Figura 2). Em seguida, a partir da combinação desses 3 mapas, foram gerados: *i)* mapa de composição ternária RGB (Figura 3); *ii)* mapa do Parâmetro F (GNOJEK; PRICHYTAL, 1985), onde F é uma medida de proporcionalidade entre K e eU em relação ao Th (F= K *x* eU/eTh), e serve para se detectar, de maneira qualitativa, regiões propensas ao acúmulo relevante de K e U, como ocorre em granitos e pegmatitos, por exemplo (Figura 4).

A partir do grid de Anomalia Magnética AM (Figura 5.A) foram gerados: *i)* mapa de gradiente total GT (ou amplitude do sinal analítico – ASA (NABIGHIAN, 1972; ROEST et al., 1992) (Figura 5.B) que é obtido pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos três gradientes ortogonais, derivados do campo magnético nas direções x, y, z; *ii)* mapa da inclinação do sinal analítico (ISA) (MILLER; SINGH,1994) (Figura 5.C), que é um método de realce que tem como atributo equalizar as amplitudes para um mesmo patamar de referência, posicionando as anomalias sobre os centros das fontes magnéticas, independentemente de sua profundidade (FERREIRA et al., 2010). A Figura 6 enfatiza o mapa da derivada de primeira ordem na direção z (ou gradiente vertical).

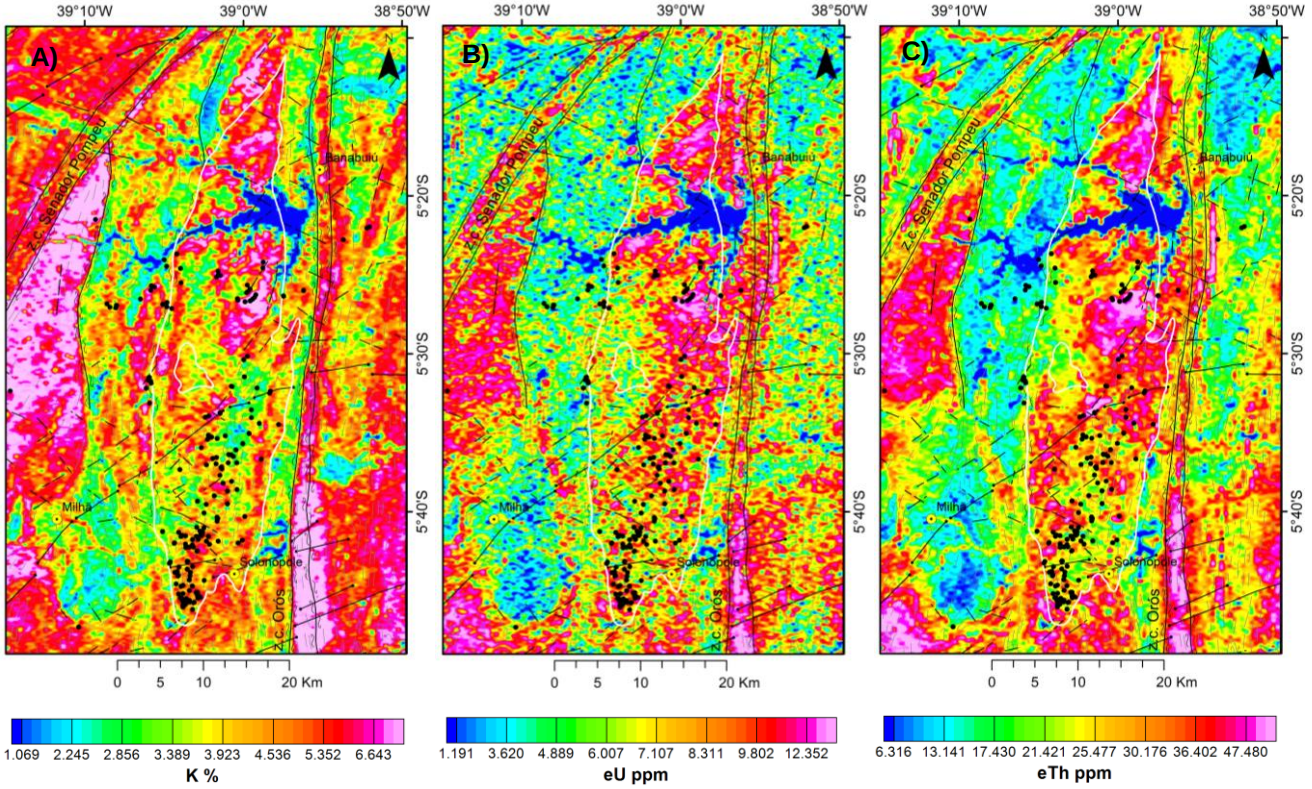

Figura 2 – Mapas gamaespectrométricos de concentração de A) Potássio (em %); B) equivalente Urânio (eU, em ppm); C) equivalente Tório (eTh, em ppm), com destaque para o contorno do granito Banabuiú (linha branca) (Palheta, 2017; Pinéo et al., 2020) e a localização dos pegmatitos LCT catalogados na SPS. Observam-se variações na assinatura geofísica ao longo de toda a região cartografada como granito Banabuiú, em um padrão sugestivo tanto de variações de fácies graníticas como até mesmo da presença de litologias distintas nessa área. Os pontos pretos (pegmatitos LCT catalogados) apresentam maior correlação com as anomalias de K e U.

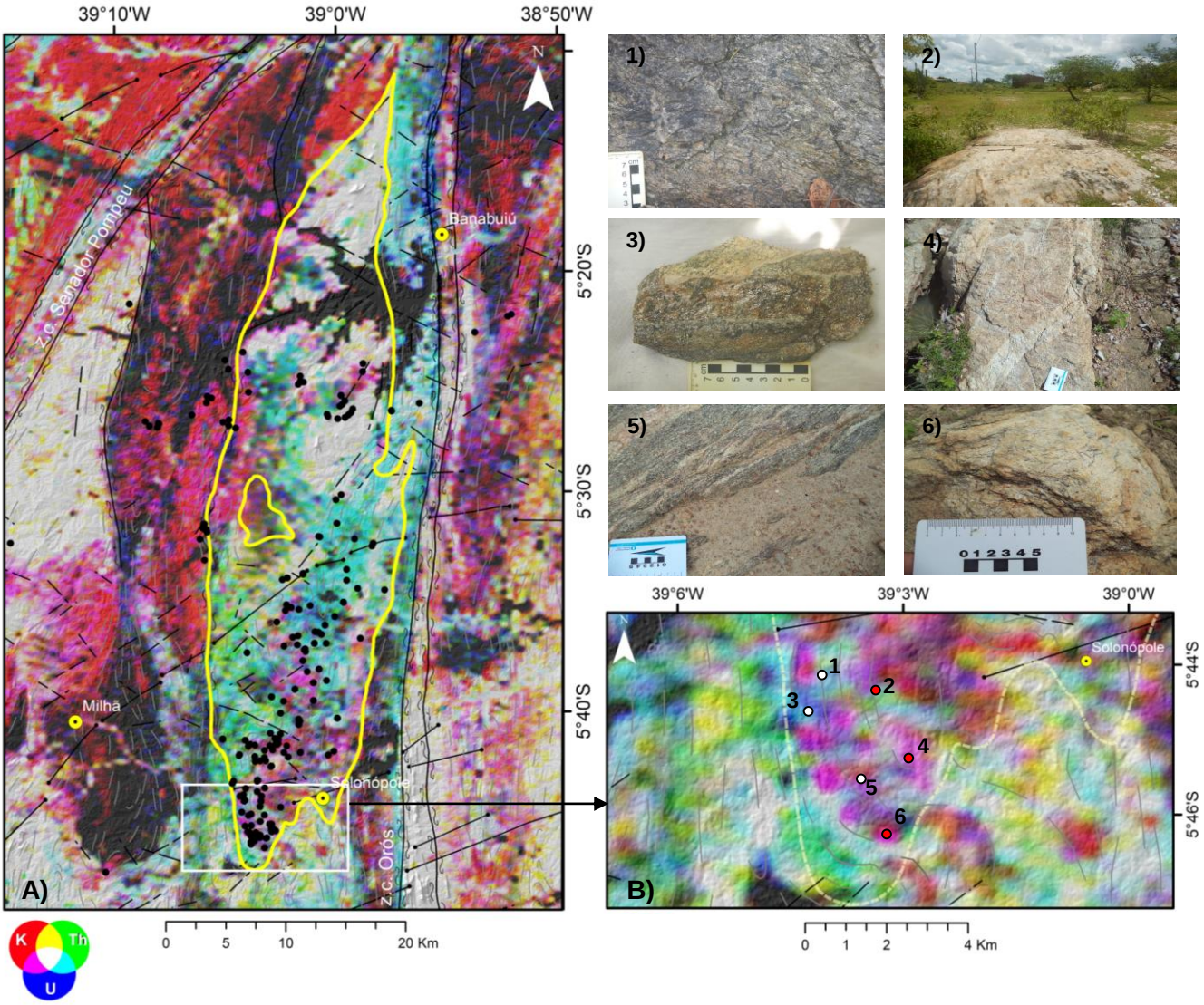

Figura 3 – A) Mapa de composição ternária RGB (K, eU, eTh) da SPS, com destaque para o corpo Banabuiú (linha amarela), o qual apresenta variações bem caracterizadas nas concentrações de K, Th e U em sua extensão; 1, 2, 3 ,4. 5 e 6) Fotos de afloramentos. Na porção norte, próxima ao açude de Banabuiú, predomina uma região de alto K, Th e U (cor branca); No centro predominam maiores valores de Th em relação a K e U (cor verde), mas também se nota uma pequena região escura (baixos K, Th e U), logo ao lado de uma pequena porção alongada onde predomina o potássio, a oeste (em vermelho); Na porção sul, região onde se concentram os pegmatitos LCT (em destaque na figura 2.B) observa-se manchas de cor magenta, que indicam uma maior concentração de K e U e um empobrecimento de Th.

Discussão e Conclusões

Os mapas aerogeofísicos produzidos indicam o conjunto de diferentes assinaturas geofísicas, bem caracterizadas e correlacionáveis as principais estruturas geológicas e unidades litoestratigráficas da SSP. O embasamento paleoproterozoico, representado pelos xistos, gnaisses migmatizados, diatexitos e metatexitos do Complexo Acopiara, apresenta uma maior concentração relativa de Th (cor verde - Figura 3). Granitos porfiríticos da Suíte Itaporanga (*e.g.* plútons Quixadá e Rio Quixeramobim, Suíte Piquet Carneiro) apresentam maior concentração de potássio (Figuras 2.A e 3) e um relevo magnético bem caracterizado (Figuras 5 e 6). Tanto as principais zonas de cisalhamento quanto a presença de corpos tabulares de basaltos/diabásios do enxame de diques Rio Ceará Mirim são evidenciados por um padrão de lineamentos magnéticos de alta amplitude (Figuras 5 e 6). Rochas como granitos peraluminosos derivados de fusão parcial de rochas do embasamento, como os corpos Nenelândia e Banabuiú, apresentam uma assinatura geral de altos K, Th e U, o que os confere uma cor branca no mapa RGB.

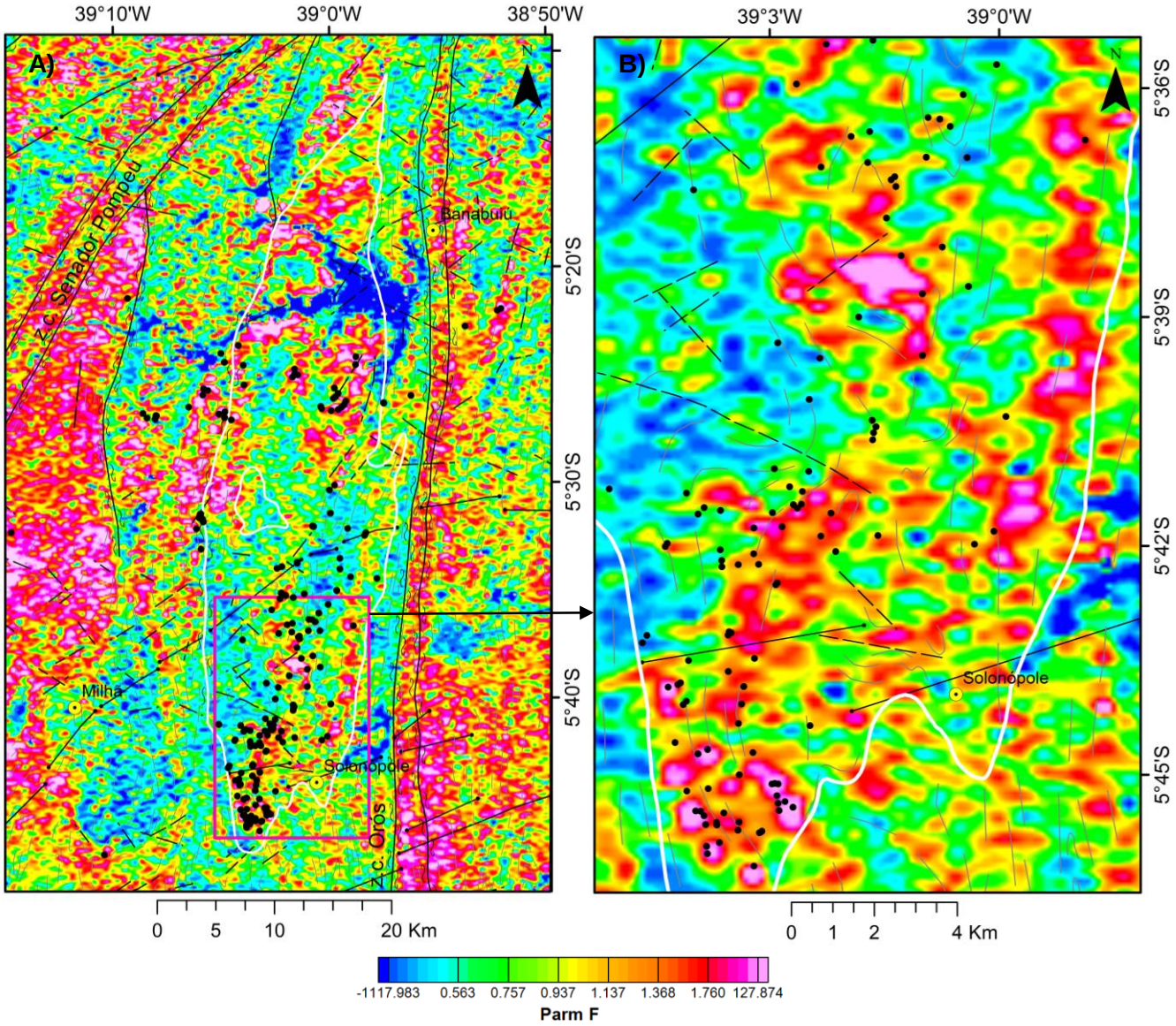

Figura 4 – A) Mapa do Parâmetro F da Subprovíncia Pegmatítica de Solonópole (F = K. eU/eTh) com destaque para o granito Banabuiú (linha branca) e o alto grau de correlação espacial entre as anomalias geofísicas e a localização dos pegmatitos LCT catalogados (pontos pretos. B) em detalhe, é possível observar com maior clareza as anomalias geofísicas de parâmetro F da porção sul do corpo Banabuiú.

No entanto, os dados aerogeofísicos indicam diversas assinaturas geofísicas distintas ao longo dos limites cartografados do granito Banabuiú, exibindo um padrão heterogêneo em domínios geofísicos bem definidos. *A priori* isso pode ser indicativo da presença de: *a)* diferentes fácies graníticas; *b)* afloramentos de diferentes tipos de rochas dentro do limite proposto para o granito.

Verificou-se em campo que as áreas brancas no mapa RGB (Figura 1) estão associadas a afloramentos de um leucogranito a duas micas com granada, apresentando foliação desenvolvida. As áreas verdes no mapa RGB, predominantes na parte central do corpo Banabuiú, correspondem a afloramentos de gnaisses paraderivados migmatizados e metatexitos, com foliação muito bem desenvolvida e ângulos de mergulho médio a alto, por vezes dobrados, apresentando zonas de fusão parcial com leucossoma de composição quartzo-feldspática

A porção sul do granito Banabuiú exibe uma assinatura geofísica distinta das demais, com anomalias de altos valores de K e U, resultando em uma coloração magenta no mapa RGB e destacando-se também no mapa de Parâmetro F. Essa região possui um relevo magnético contrastante com o padrão do restante do granito. Algumas dessas anomalias foram verificadas em campo e correspondem de fato a afloramentos de pegmatitos.

Portanto, os mapas permitiram uma análise qualitativa da correlação entre essas anomalias geofísicas e a localização dos pegmatitos LCT catalogados na Subprovíncia Pegmatítica de Solonópole, revelando uma assinatura geofísica bem definida para essas rochas.

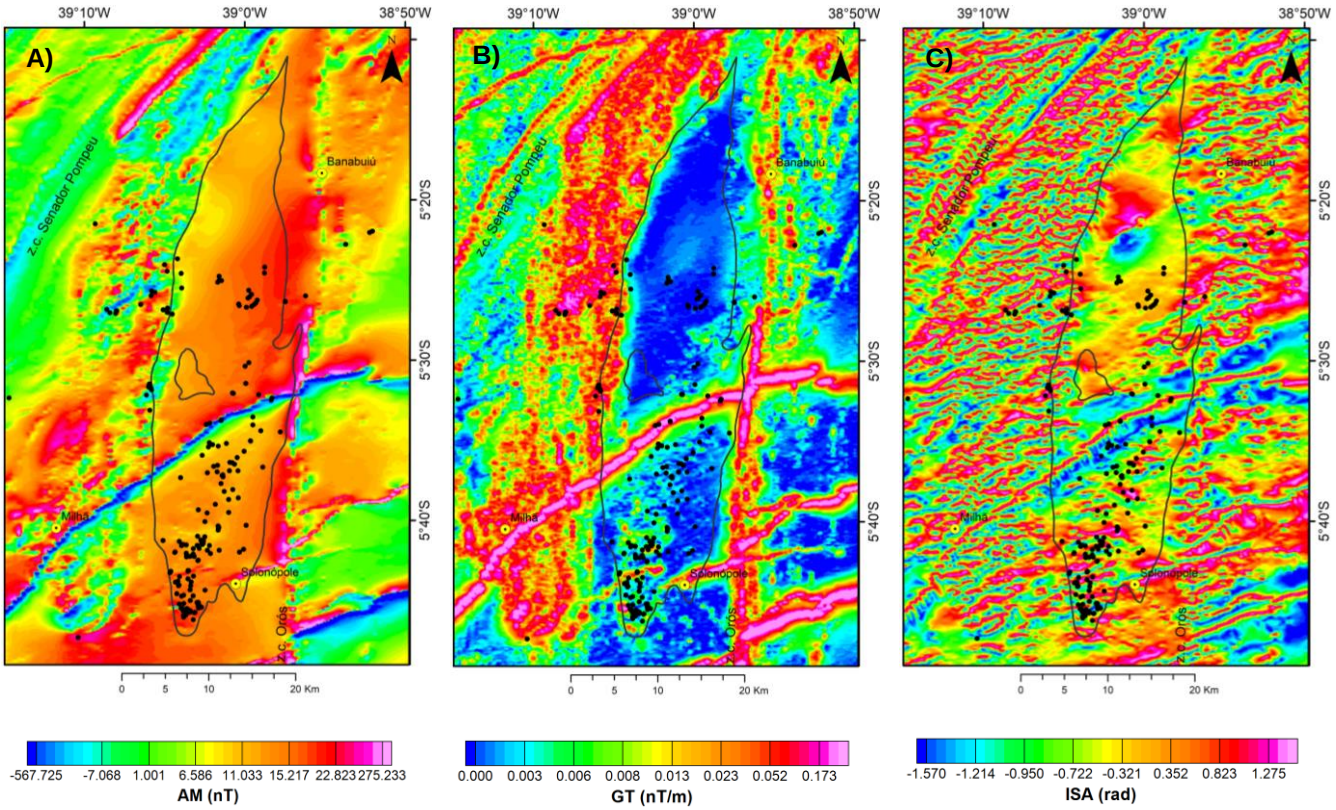

Figura 5 – A) Mapa de anomalias magnéticas (AM) (ou campo magnético anômalo - CMA) representando as variações na intensidade do campo magnético causadas pelas rochas e coberturas da SSP. Neste mapa a região do granito Banabuiú (linha preta) apresenta uma resposta homogênea ao longo de praticamente toda sua extensão, sem contraste marcante com o embasamento; B) Mapa do gradiente total (GT) (ou amplitude do sinal analítico - ASA) realça uma mudança no padrão magnético na parte sul do corpo Banabuiú, correlacionável com a posição dos pegmatitos LCT catalogados na SSP (pontos pretos); C) Mapa da inclinação do sinal analítico (ISA) realça uma heterogeneidade na assinatura magnética nas porções norte e sul do granito Banabuiú, e indicando maior correlação entre os pegmatitos e o sinal de alta frequência da porção sul. Em A B e C é possível perceber as assinaturas das zonas de cisalhamento Orós (trend N-S) e Senador Pompeu (trend NE-SW). Também fica evidente nos mapas de magnetometria que a área é intersectada por diversos lineamentos magnéticos de alta intensidade/amplitude (trend NE-SW), os quais estão relacionados ao enxame de diques Rio Ceará Mirim.

É importante enfatizar que alguns granitos podem apresentar anomalias de parâmetro F equivalentes aos pegmatitos, cabendo uma diferenciação qualitativa em termos do tamanho das anomalias, uma vez que pegmatitos são corpos menores que 1km em média. Observou-se em campo que esses pegmatitos são bolsões e lentes geralmente concordantes com a foliação dos xistos, gnaisses e metatexitos presentes na área.

Os resultados apresentados neste estudo sugerem que o limite cartografado do granito Banabuiú precisa ser revisado. Tal revisão é especialmente relevante considerando o potencial geoeconômico da Subprovíncia Pegmatítica de Solonópole (SSP). Esse tipo de inferência é natural, pois a cartografia geológica é um processo contínuo de aprimoramento, e análises como esta fornecem suporte para novos projetos e avanços na compreensão do contexto geológico da região.

Em termos de assinatura gamaespectrométrica, é possí-vel concluir que pegmatitos da SSP tendem a ter alta concentração de K e U, devido ao K-Feldspato e a presença de uranio nas albitas. Para a SSP, um dos melhores mapas para representar os pegmatitos foi o Parâmetro F (onde F= K.eU/eTh), justamente por considerar a relação de proporcionalidade em relação ao elemento tório. A presença de uma região de "relevo magnético" contrastante, correlacionável aos pegmatitos da porção sul do granito Banabuiú é um resultado que precisa ser melhor investigado com outros métodos geofísicos. Devido à disposição dessa região anômala, suas dimensões e continuidade, existe a chance de haver ali um corpo rochoso em subsuperfície. No entanto a magnetometria parece não ser o método mais indicado para detecção de contrastes nesse tipo de rocha, uma vez que minerais como quartzo, feldspato e plagioclásio, abundantes tanto em granitos peraluminosos quanto em pegmatitos, são conhecidamente diamagnéticos.

Os pegmatitos LCT são economicamente valiosos devido à presença de minerais raros como lítio, césio e tântalo, essenciais para indústrias tecnológicas. A exploração desses recursos pode contribuir significativamente para a economia, especialmente em setores como eletrônicos, veículos elétricos e comunicação. A continuidade das pesquisas geológicas e geofísicas, combinadas com estratégias de exploração sustentável, é crucial para maximizar os benefícios econômicos e minimizar os impactos ambientais, promovendo um desenvolvimento equilibrado e responsável.

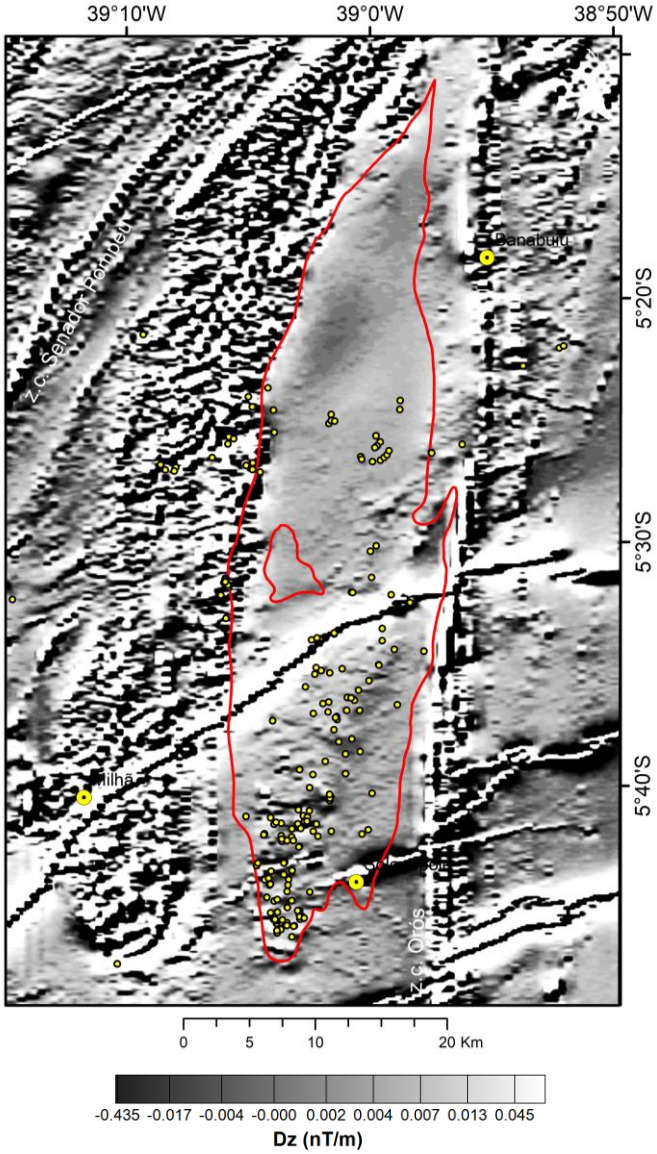

Figura 6 - Mapa da primeira derivada vertical (Dz) do campo magnético, com destaque para o contorno do granito Banabuiú (vermelho) e a posição dos pegmatitos LCT (pontos amarelos). Este mapa exibe uma resposta homogênea tanto para o embasamento quanto para o granito. No entanto, é possível observar uma região de "relevo magnético" contrastante, correlacionável aos pegmatitos da porção sul do granito.

Agradecimentos

O autor agradece ao Serviço Geológico do Brasil pela infraestrutura e apoio institucional indispensáveis a realização deste estudo.

Referências

ČERNÝ, P., 1982a. Petrogenesis of Granitic Pegmatites. In: Granitic pegmatites in science and industry. Winnipeg, Mac. Short Course, Handbook, 8: 405–461.

ČERNÝ, P., 1982b. Anatomy and classification of granitic pegmatites. In: Granitic pegmatites in science and industry. Winnipeg, Mac. Short Course, Handbook, 8, 1–39.

FERREIRA F. J. F.; SOUZA, J.; BONGIOLO A. B. S.; CASTRO, L. G.; ROMEIRO, M. A. T. Realce do gradiente horizontal total de anomalias magnéticas usando a inclinação do sinal analítico. Parte I – Aplicação a dados sintéticos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA,4., 2010, Brasília. Anais [...]. Brasília: SBGf, 2010. 1 CD-ROM.

GNOJEK, I.; PRICHYSTAL, A. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia). Geoexploration, v.23, p. 491-502, 1985.

MILLER, H. G.; SINGH, V. Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. J. Appl.Geophys., v. 32, n. 2-3, p. 213–217, 1994.

NABIGHIAN, M. N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. Geophysics, v. 37, p. 507-517, 1972

PALHETA, E. S. M. Mapa geológico folha SB.24-V-D-VI-Senador Pompeu. Fortaleza: CPRM, 2017. 1 mapa, color. Escala 1:100.000. (Programa Geologia do Brasil – PGB).

PINÉO, T. R. G.; PALHETA, E. S. M.; COSTA, F. G.; VASCONCELOS, A. M.; GOMES, I. P.; GOMES, F. E. M.; BESSA, M. D. M. R.; LIMA, A. F.; HOLANDA, J. L. R.; FREIRE, D. P. Projeto geologia e recursos minerais do Estado do Ceará: mapa geológico do estado do Ceará. Fortaleza: CPRM, 2020. 1 mapa, color. Escala 1:500.000.

ROEST W. R.; VERHOEF, J.; PILKINGTON M. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. Geophysics, v. 57, p. 116-125, 1992.

SIMMONS W., WEBBER K. 2008. Pegmatite genesis: state of the art. European Journal of Mineralogy, 20, 421-438.