

COMPARAÇÃO DE DADOS MAGNETOMÉTRICOS AÉREOS E TERRESTRES PARA O MAPEAMENTO GEOFÍSICO ESTRUTURAL NA FLORESTA NACIONAL DE PIRAÍ DO SUL/PR

GABRIELLE AMANDA POI¹, ALLESSANDRA DE BARROS E SILVA BONGIOLO¹, LUIZEMARA SOARES ALVES SZAMEITAT², RODOILTON STEVANATO¹, ODERSON ANTONIO DE SOUZA FILHO³, VINICIUS THEOBALDO JORGE¹

1 - Universidade Federal do Paraná- UFPR, Setor de Ciências da Terra, Departamento de Geologia, Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada. Avenida Coronel Francisco H. dos Santos, 100 – Jardim das Américas, Curitiba – PR, 81530-900. E-mail: gabipoi98@gmail.com; alebongio@ufpr.br; rodoilton@ufpr.br; vinicius.tj@gmail.com

2 - Universidade do Estado do Rio de Janeiro- UERJ, Faculdade de Geologia, TEKTOS Geotectonics Research Group and GeoAtlantico Institute. R. São Francisco Xavier, 524 – Rio de Janeiro – RJ, 20550-900. E-mail: luizemara@gmail.com;

3 - Serviço geológico do Brasil – SGB/CPRM. E-mail: oderson.souza@sgb.gov.br

Resumo - Os levantamentos magnetométricos são amplamente aplicados na investigação de feições geológicas, como diques, falhas e contatos geológicos. O presente trabalho tem por objetivo comparar dados magnetométricos obtidos em levantamentos terrestres, na Floresta Nacional de Piraí do Sul (FLONA), com dados aéreos disponíveis em literatura. Os dados de magnetometria terrestre foram adquiridos durante esse trabalho, ao longo de 14 linhas. Os dois levantamentos se mostraram eficientes para o reconhecimento de diques não aflorantes, bem como para indicar a presença de falhas e contatos geológicos. O levantamento magnetométrico aéreo foi importante para uma abordagem inicial e resultou em um campo magnético anômalo (CMA) com variação de -29,2 a 370,3 nT. A partir do CMA foi realizada a redução ao polo (RTP) e então aplicados outros quatro filtros: amplitude do sinal analítico (ASA), gradiente horizontal total (GHT), inclinação do sinal analítico (ISA) e inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA-GHT). Como resultado, os dados filtrados exibem a tendência regional de direção NW-SE dos diques na região, possíveis falhas e contatos geológicos que posteriormente foram confirmados com os dados de campo. Apesar das diferentes escalas de trabalho de ambos os dados, a interpretação de anomalias magnéticas dos dois levantamentos utilizados representa o mesmo contexto geológico, entretanto com detalhamento e resolução diferentes. Adicionalmente, durante a campanha de magnetometria terrestre, a observação das variações de solo e de litologia foram essenciais para confirmar a indicação feita do contato entre as unidades de rochas graníticas e quartzíticas na porção sudoeste da área e identificação de nascentes na área de estudo.

Palavras chave: magnetometria aérea; magnetometria terrestre; mapeamento geofísico estrutural; Piraí do Sul.

Abstract - Magnetometric surveys are widely applied for investigating geological features, such as dikes, faults and geological contacts. The present work aims to compare magnetic data from terrestrial magnetometric surveys with available airborne data in the area of the Piraí do Sul National Forest (FLONA). The terrestrial magnetic data was acquired over 14 lines. The two surveys proved to be efficient in recognizing non-outcropping dikes, as well as for indicating faults and geological contacts. The aerial magnetometric survey was relevant for the initial analysis and resulted in an anomalous magnetic field (CMA) ranging from -29.2 to 370.3 nT. The reduction to the pole (RTP) was performed from CMA data, and four other filters were applied: the amplitude of the analytical signal (AS), the total horizontal gradient (THDR), the tilt derivative (TDR) and the tilt derivative of total horizontal gradient (TAHG). As a result, the filtered data shown the regional NW-SE trend of the dykes in the region, possible faults and geological contacts that were later confirmed by the field investigation. Although different accuracies, given the diverse scales, the interpretation of magnetic anomalies from both surveys matched the same geological context. In addition, during the terrestrial data acquisition, recognizing soil and rock lithology variations were decisive for confirming the geophysical interpretation of the proposed geological contact southwestwards, between granitic and quartzitic units.

Keywords: aerial magnetometry; ground magnetometry; structural geophysical mapping; Piraí do Sul.

1. INTRODUÇÃO

O enxame de diques do Arco de Ponta Grossa tem grande importância na região pois, além de serem muito extensos, esses apresentam uma orientação preferencial NW, que coincide com grandes estruturas regionais, e o mapeamento dessas intrusões pode contribuir para o entendimento da geologia local e subsidiariamente o entendimento dos eventuais reservatórios de água subterrânea, que possam estar associados. Os diques existentes na área de estudo não são aflorantes, devido à cobertura de solo derivado da intensa ação de intemperismo presente no local. Diante deste cenário, o método geofísico magnetométrico foi escolhido para auxiliar no mapeamento geológico.

Os levantamentos magnetométricos aéreos e terrestres são baseados em um método amplamente aplicado para o mapeamento de corpos intrusivos pois estes comumente apresentam propriedades magnéticas como a diferença da susceptibilidade que contrastam com as encaixantes, além disso, podem ser utilizados para o mapeamento de falhas, fraturas e contatos geológicos. Os levantamentos aéreos são mais rápidos e com custos relativamente menores para grandes áreas, porém, os levantamentos terrestres apresentam maior detalhamento, tornando possível vincular as anomalias às suas fontes com maior precisão.

O objetivo principal da pesquisa é o mapeamento geofísico estrutural, com foco nos diques do arco de Ponta Grossa, da Floresta

Nacional de Piraí do Sul por meio da comparação entre dados de levantamentos magnetométricos aéreos e terrestres.

O mapeamento de diques através da interpretação de dados obtidos por magnetometria é um método comumente utilizado para analisar o enxame de diques do Arco de Ponta Grossa e obter informações, que quando associadas a outras fontes de dados, explicam e descrevem os eventos tectônicos e os derrames que ocorreram por toda a região contemplada pelo Arco de Ponta Grossa. Em 1982, Ferreira determinou, a partir de dados aeromagnéticos, que os diques máficos do Arco de Ponta Grossa apresentam orientação preferencial NW, mas podem ocorrer nas direções NE-SW e E-W. Ferreira *et al.* (1989) estimaram a extensão crustal relacionada ao Alinhamento de Guapiara através da modelagem de dados aeromagnetométricos e espessuras calculadas. Portela Filho *et al.* (2005) comprovaram a eficácia da utilização de processamento de dados aeromagnéticos para o delineamento do arcabouço magnético-estrutural e para a estimativa de profundidades dos diques na região central do Arco de Ponta Grossa e integraram esses dados com os dados hidrogeoquímicos da região para realizar uma compartimentação magnética-estrutural do Sistema Aquífero Serra Geral. Além dos estudos citados, outras pesquisas foram realizadas na região, com diversas finalidades, utilizando dados magnetométricos aéreos e terrestres para a identificação e descrição dos diques do Arco de Ponta Grossa, reforçando a propagação consolidada e eficácia do método.

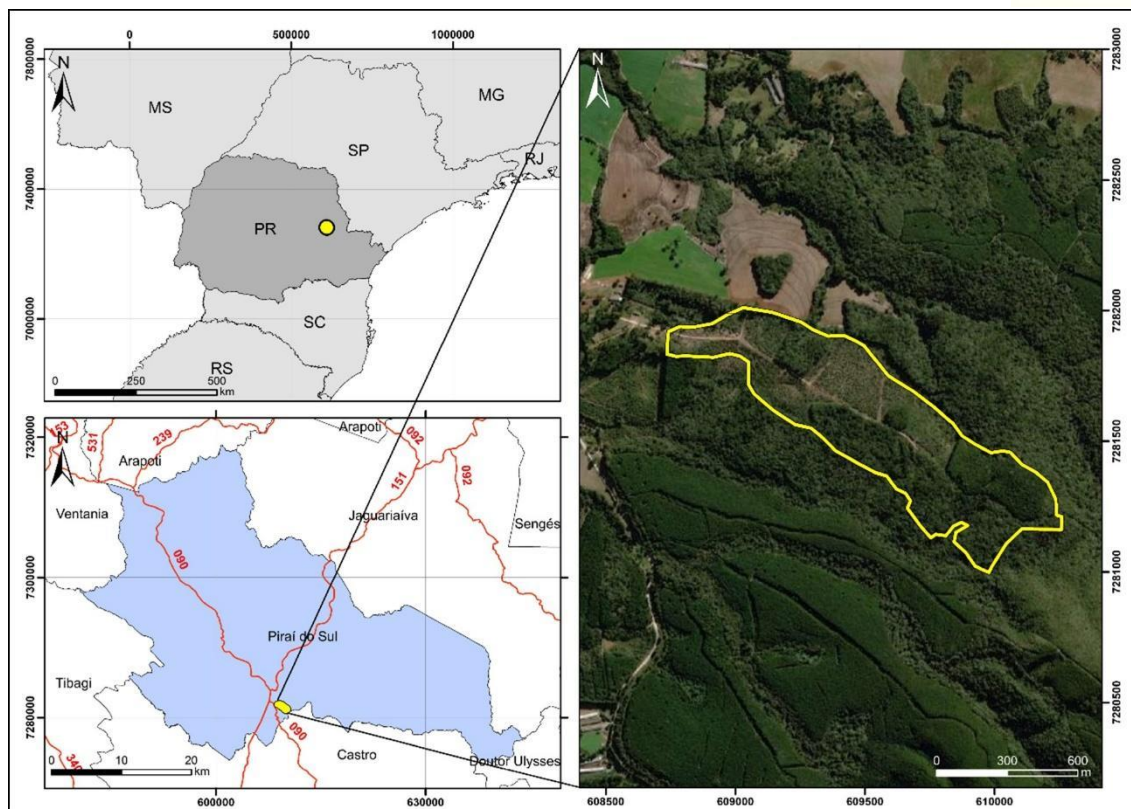


Figura 1. Localização da área de estudo. Fonte: IBGE e Google Earth.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na Floresta Nacional de Piraí do Sul (FLONA), no município de Piraí do Sul, região leste do estado do Paraná. A Figura 1 apresenta o mapa de localização e a delimitação da área de estudo. O acesso à FLONA pode ser realizado pela rodovia PR-151, seguindo no km-262 por um trecho não pavimentado de aproximadamente 1 km até a estrada do Cerne no km 152, onde está localizada a recepção da FLONA.

Atualmente, a FLONA é administrada pelo ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, desde 2007, sendo uma unidade de conservação importante para a conectividade de áreas de vegetação remanescente na região central do Paraná. A área é destinada à preservação ambiental e a atividades educativas socioambientais, recebendo a comunidade local, estudantes e pesquisadores de diversas áreas.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente, a FLONA possui 152 hectares e pertence ao

bioma da Mata Atlântica, com 102 hectares, de flora remanescente da Floresta de Araucária (Floresta Ombrófila Mista). Está inserida na bacia hidrográfica do Rio Tibagi, especificamente na microbacia do Rio Piraí. As drenagens da área são cursos de água com pouca espessura, menores que 2 metros, apresentando algumas nascentes, das quais, duas são frequentemente utilizadas para abastecimento da sede da FLONA e da comunidade local (PREFEITURA MUNICIPAL DE PIRAÍ DO SUL, 2006).

De acordo com Potter *et al* (2002), a classificação de Köppen para a região é o tipo climático da região é Cfb, subtropical úmido, com verões brandos e ocorrência de geadas durante o inverno, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano e o relevo do município é característico dos Campos Gerais, com sucessão de baixas colinas suavizadas e largas planícies aluviais de relevo plano.

3. REVISÃO TEÓRICA

3.1 Contexto Geológico

A área de estudo contempla o Granito Piraí do Sul, o Quartzito Serra das Pedras e as intrusões do Grupo Serra Geral (Figura 2). O Granito Piraí do Sul é parte da Suíte Granítica Cunhaporanga e a unidade Quartzito Serra das Pedras pertence ao Grupo Açungui, sendo ambos inseridos no contexto do Terreno Apiaí. As intrusões de diabásio do Grupo Serra Geral pertencem ao contexto da Bacia do Paraná, mais especificamente dentro do Supergrupo São Bento (Besser *et al* 2021) e inicialmente denominada Formação Serra Geral, por White em 1906.

O Terreno Apiaí é uma parte do Cinturão Ribeira Meridional, (Faleiros 2008), e composto por rochas supracrustais de grau metamórfico baixo a médio, definidas como Grupo Açungui. A porção norte é composta por dois complexos granitóides de composição cálcio- alcalina de grandes dimensões: Cunhaporanga e Três Córregos. Esses dois complexos estão dispostos em uma direção NE-SW, paralelamente, separados pela Faixa Itaiacoca, uma sequência metavulcano-sedimentar (Prazeres Filho 2000). O Complexo Granítico Cunhaporanga é composto por vários tipos de granitóides, principalmente de composições cálcio-

alcalinas. Na área de estudo, ele está representado pela unidade Granito Piraí do Sul, compreendendo monzogranito e biotita-hornblenda diorito (Guimarães, 1995). Esse complexo apresenta megaenclaves em escala mapeável, como o Quartzito Serra das Pedras, presente na área de estudo, e é composto por muscovita quartzito e biotita quartzito, sendo correlato ao Grupo Itaiacoca.

O Grupo Serra Geral da Bacia do Paraná corresponde a maior parte da Província Basáltica Continental Paraná-Etendeka, composta predominantemente por derrames de natureza básica e subordinadamente por efusivas ácidas (Waichel 2006).

Os diques identificados estão inseridos no contexto tectônico da flexura crustal denominada Arco de Ponta Grossa. O enxame de diques é parte de uma intrincada rede de intrusões verticais de direção NW presente no sul-sudeste do Brasil (Pessano et al., 2014), que intrude as rochas pré-existentes desde a linha de costa até ao menos a região central da Bacia do Paraná (e.g., Ferreira et al. 1981). Esta atividade magmática está associada ao processo tectônico juro-cretáceo de abertura do Oceano Atlântico (e.g., Szatmari e Milani 2016). A Figura 2 apresenta o mapa geológico da área de estudo.

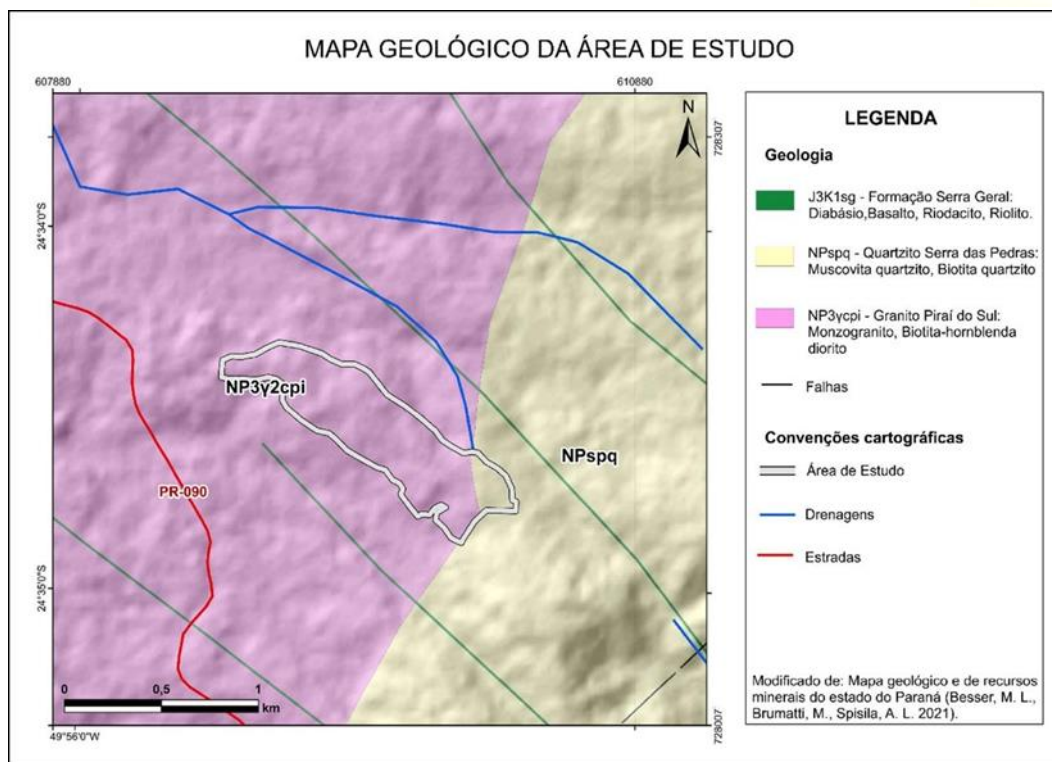


Figura 2. Mapa Geológico da área de estudo. Modificado de CPRM (2021)

3.2 Magnetometria

O método magnetométrico estuda a variação do campo magnético terrestre. Em função das propriedades magnéticas das rochas, o método é comumente aplicado na investigação de estruturas geológicas subsuperficiais, como diques, falhas e contatos geológicos, ou objetos não-naturais enterrados (Dentith *et al.* 2014). As áreas de aplicação são, por exemplo, a prospecção de jazidas de minerais, caracterização magmática de bacias sedimentares para fins de exploração de hidrocarbonetos, a localização de estruturas e objetos metálicos enterrados ou submersos (estudo ambiental, geotécnico ou forense; e.g. Bongiolo *et al.* 2022).

A propriedade física da susceptibilidade magnética varia de acordo com os minerais constituintes da rocha e o teor de minerais magnéticos presentes. As rochas basálticas, por exemplo, tendem a se destacar no embasamento granítico, pois possuem maior teor de minerais mais suscetíveis à magnetização. A maior parte das rochas graníticas do embasamento não contém propriedades magnéticas elevadas. Todavia, dependendo do contexto geológico em que

certos granitoides estão inseridos, algumas variedades apresentam teores suficientes de minerais magnéticos para produzir anomalias, (Kearey *et al.* 2009).

As rochas máficas e ultramáficas apresentam em sua composição minerais magnéticos (e.g., magnetita abundante e ilmenita e pirrotita subordinados), e assim produzem anomalias significativas. As anomalias magnéticas são originadas pelo contraste de magnetização que ocorre entre as rochas que apresentam características diferentes, podendo variar de acordo com a profundidade, a forma e a orientação dos minerais no momento da cristalização do magma e o campo magnético (Lowrie 2007). As anomalias de unidades altamente magnetizadas serão tão maiores em amplitude quanto menor for a magnetização das litologias encaixantes. É o que ocorre na área de estudo, onde os diques estão encaixados em granitos e quartzitos.

Os levantamentos magnetométricos podem ser aéreos, marinhos ou terrestres e consistem na leitura do campo geomagnético terrestre ao longo de perfis perpendiculares às rochas e estruturas de interesse. O levantamento aeromagnético é um dos mais utilizados, por ser um levantamento rápido e relativamente

barato, uma vez que cobre grandes áreas em um curto tempo. Este levantamento geralmente é realizado com um sensor rebocado em um suporte (*bird*) ou fixado em um cabo na cauda da aeronave (Keary *et al.* 2009). Atualmente existem tecnologias de aquisição que são aero portados por drones.

A relativa facilidade de aquisição e grande cobertura do aerolevante geofísico faz com que seja o tipo de dado mais usado na indústria. No entanto, o espaçamento dos dados gera problemas de processamento e na análise de anomalias, devido à grande diversidade no espaçamento dos pontos: distância muito pequena ao longo das linhas, e relativamente grande entre linhas. Essa diferença pode resultar na não-detecção de corpos magnetizados que estejam entre esses espaços. Por isso, a aquisição terrestre ou por drones são preferíveis para pequenas áreas, pois abrangem um intervalo maior de frequências de ondas (menor distância fonte-receptor), e permite maior liberdade na escolha do espaçamento dos pontos e posição

das linhas. Isto possibilita a cobertura de corpos magnetizados que não estejam contemplados pela resolução dos aerolevantes convencionais, exceto quando são adquiridos por drones.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Levantamentos Magnetométricos

O levantamento terrestre costuma ser utilizado para detalhamento de uma área (Luiz & Silva 1995), e foi utilizado neste trabalho associado ao levantamento aéreo, o qual geralmente abrange áreas maiores, mas com menor resolução.

Assim como os demais métodos geofísicos, a magnetometria consiste em três etapas principais: 1) Aquisição; 2) Processamento e 3) Interpretação. A Figura 3 ilustra as atividades realizadas para obtenção dos resultados desse estudo.

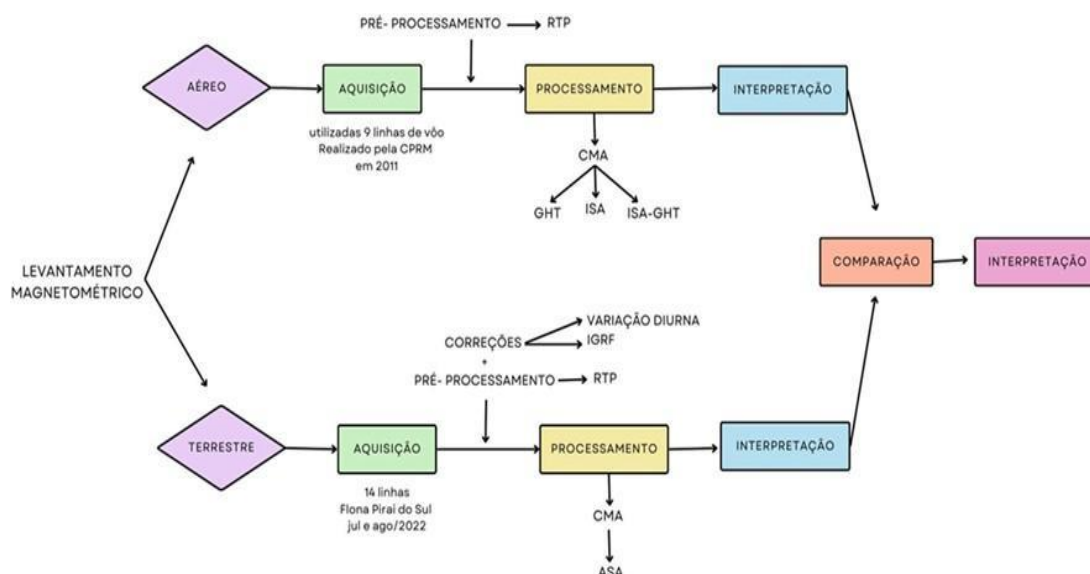


Figura 3. Fluxograma dos levantamentos magnetométricos.

4.2 Aquisição de Dados

Os dados magnetométricos aéreos utilizados foram obtidos pelo site <https://geosgb.sgb.gov.br/geosgb/downloads.htm> no formato xyz. Esses dados foram adquiridos e processados como parte das atividades do Projeto Aerogeofísico Paraná - Santa Catarina, contratados pelo Serviço

Geológico do Brasil (CPRM), que abrangeu a porção leste dos estados de Santa Catarina e Paraná e a porção sudeste do estado de São Paulo. A campanha de aquisição dos dados ocorreu entre os anos de 2009 e 2011, com 462 linhas de voo na direção N-S e espaçamento de 500 m, e 54 linhas de controle na direção E-W com espaçamento de 10 km, e altura média de voo de 100 metros (CPRM, 2011).

A partir dos dados xyz de 9 linhas de voo, foi feita a interpolação dos dados magnéticos pelo método bidirecional com espaçamento de célula de 125 metros, correspondente a $\frac{1}{4}$ do espaçamento das linhas de voo, gerando o mapa do campo magnético anômalo (CMA). Para melhor visualização dos dados nos mapas aéreos interpolados, em comparação com os dados terrestres, optou-se por fazer um recorte no mapa onde aparecem somente 4 linhas de voo.

Já a aquisição de dados magnetométricos terrestres foi realizada em duas etapas de campo, nos dias 18 a 22 de julho e 23 a 24 de agosto de 2022. Foram utilizados dois equipamentos: o magnetômetro da fabricante GEM-Systems, modelo GSM-19T como magnetômetro de base fixa, aliando-o na direção norte do campo magnético, para registrar variações diurnas do campo; e o magnetômetro da fabricante Scintrex, modelo ENVIMAG, o qual foi utilizado para a aquisição dos dados magnetométricos ao longo das linhas de levantamento. A Figura 4 apresenta os magnetômetros utilizados. Além dos magnetômetros, foi utilizado o aplicativo móvel *Avenza Maps*® para georreferenciar cada um dos pontos de medida.

De acordo com a geologia regional, e conforme as trilhas e estradas disponíveis na área de estudo, foram realizados levantamentos com espaçamentos de 10, 20 e 30 metros, ao longo de 14 linhas. Em cada estação, foram realizadas e registradas em média três leituras, a depender da proximidade dos valores medidos em cada uma delas, sempre buscando a repetibilidade. O registro em cada ponto representa a média de três leituras.

Durante o levantamento magnetométrico terrestre, foram observados afloramentos existentes nas trilhas, presença de blocos de diabásio e variação na cor do solo, a fim de comparar essas informações com os dados magnetométricos obtidos.

4.3 Pré-Processamento dos Dados

A etapa de pré-processamento dos dados consiste nas correções dos dados brutos adquiridos. Para os dados aéreos não houve

necessidade, pois já constavam nos arquivos xyz fornecidos pelo SGB.

Em relação aos dados terrestres, no início dessa etapa foi feita a preparação do banco de dados que consistiu na organização e correção dos dados de campo. A organização destes dados de campo ocorreu com auxílio dos *softwares Excel 365*® e *Oasis Montaj 2022.1*®. Inicialmente foi realizada a eliminação dos *spikes*, que são os valores destoantes dos demais, causados por variações de alta frequência do campo ou interferência de materiais magnéticos próximos ao levantamento, como por exemplo linhas de alta tensão, portões ou veículos, ou movimentações bruscas do sensor durante a aquisição. A seguir, foi calculada uma média simples para cada uma das estações.

A partir dos dados de campo organizados, a segunda correção realizada foi a variação diurna, que é uma variação temporal no campo medido devido a perturbações elétricas na ionosfera e atividades solares. A terceira correção foi a remoção do efeito regional do campo magnético de referência (IGRF, *International Geomagnetic Reference Field*, Alken *et al.*, 2021). O valor da intensidade do campo geomagnético estimado para a região é de 22.560nT, disponibilizado pelo *National Centers for Environmental Information* (NCEI/NOAA

<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml>). Após essas correções, obteve-se o campo magnético anômalo (CMA) para cada um dos pontos.

A partir do CMA, foi realizada a redução ao polo (RTP), que corresponde ao posicionamento das anomalias diretamente sobre a fonte, a fim de minimizar os efeitos da inclinação magnética e, portanto, do caráter dipolar do campo magnético. Vale ressaltar que a redução ao polo também foi aplicada sobre aos dados aéreos, após a redução do IGRF. Para o RTP, foram utilizados valores de declinação e inclinação do campo geomagnético de 20°0'20" e -37° 42'37" para os dados terrestres, e de -18,46° e -33,78 para os dados aéreos.

4.4 Processamento dos Dados

Os dados aerolevantados foram interpolados em malha regular de 125 x 125 metros. Os dados magnetométricos terrestres, foram inicialmente interpolados com a técnica bidirecional, utilizando o valor de células de 10 x10 metros.

No processamento dos dados foram testados diversos filtros para supressão ou realce de feições de interesse. Os que apresentaram resultados satisfatórios foram: amplitude do sinal analítico (ASA); gradiente horizontal total (GHT); inclinação ou fase do sinal analítico (ISA); inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA-GHT). O filtro ASA foi mais adequado para a área de estudo.

O ASA é um filtro baseado no modulo do vetor resultante das derivadas das direções x, y e z do campo magnético, sendo uma função simétrica em formato de sino, com o valor máximo localizado sobre o topo de cada contato e a largura proporcional a profundidade do corpo (Nabighian 1972). Os picos de ASA são teoricamente simétricos, ocorrendo diretamente no centro dos corpos que são estreitos e nas bordas dos corpos com maior largura (Gunn 1972). Portanto, essa função pode ser utilizada para localizar e definir a profundidade dos sinais magnéticos. Contudo, deve-se assumir que o campo magnético é medido ao longo do eixo x, retificado paralelamente ao eixo y e a uma altura constante z de uma fonte 2D para que o ASA seja completamente independente da magnetização (Li 2006).

O valor absoluto da função ASA é expresso por um vetor adição das componentes reais nas direções x e y e da componente imaginaria na direção z, de acordo com a equação a seguir, em que T é a anomalia do campo potencial, dT/dz é a primeira derivada vertical, dT/dx e dT/dy são as primeiras derivadas horizontais respectivamente nas direções x e y.

$$ASA(x,y) = [(dT/dx)^2 + (dT/dy)^2 + (dT/dz)^2]^{1/2},$$

Unidade = nT/m;(1)

O GHT (gradiente horizontal total) consiste no módulo do vetor resultante das combinações das derivadas nas direções x e y. O cálculo do GHT é um processo que contempla a transformação de fase e um realce de altas frequências, sendo esta transformação de fase resultante nos picos das anomalias sobre as bordas de corpos espessos (Milligan & Gunn 1997). Portanto, o GHT é amplamente utilizado para realçar as bordas dos corpos e estruturas que causam anomalias. É um vetor originado através de combinações das primeiras derivadas horizontais nas direções x e y, conforme a equação a seguir (2), onde dT/dx e dT/dy são referentes às derivadas horizontais da anomalia T do campo magnético.

$$GHT(x,y) = [(dT/dx)^2 + (dT/dy)^2]^{1/2} \text{ Unidade} = \text{nT/m}; (2)$$

O ISA (inclinação ou fase do sinal analítico) é o arco tangente do quociente entre o gradiente vertical e o gradiente horizontal total (Miller e Singh 1994). É utilizado no realce da fonte e da extensão lateral de estruturas, equalizando as fontes independentemente de suas profundidades. É uma função positiva acima da fonte e negativa fora da fonte, encontrando zero quando próxima das bordas e é determinada pelo ângulo formado entre os vetores imaginários e real do sinal analítico. A função ISA é definida pela formula a seguir (3).

$$ISA = (dT/dz)/[(dT/dx)^2 + (dT/dy)^2]^{1/2} \text{ Unidade} = \text{radiano (rad)}; (3)$$

Por fim, o ISA-GHT (inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total) é obtido pela aplicação do filtro ISA sobre a malha originada a partir do filtro GHT, realçando as estruturas e bordas tanto de fontes rasas quanto de fontes profundas (Ferreira *et al.* 2010, 2013). O filtro ISA-GHT é descrito pela expressão 4.

$$ISA-GHT = (dTHDR/dz)/[(dTHDR/dx)^2 + (dTHDR/dy)^2]^{1/2}. \text{ Unidade} = \text{radiano}; (4)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Magnetometria Aérea

A partir dos dados disponibilizados pela CPRM, através do “Projeto Aerogeofísico Paraná - Santa Catarina”, foi gerado o mapa de interpolação do campo magnético anômalo da área de estudo (Figura 5). Nesta área, o campo anômalo detectado variou de -29,2 a 370,3 nT. O mapa apresenta as anomalias na área de estudo e 4 das 9 linhas de voo utilizadas na interpolação.

Sobre o campo magnético anômalo foi realizada a redução ao polo (RTP), apresentado na Figura 6. Essa correção definiu uma concordância entre os diques mapeados pela MINEROPAR em 2006, com as anomalias, com direção NW-SE, identificadas pela magnetometria aérea na área de estudo.

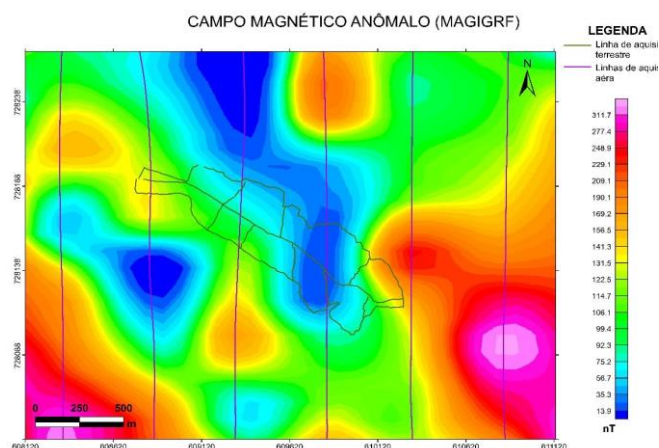


Figura 5. Campo magnético anômalo da área de estudo originado do aerolevantamento magnetométrico. Linhas de voo em roxo, orientação N-S e linhas verdes referem-se ao trajeto de aquisição magnetométrica terrestre coincidente com as trilhas do parque.

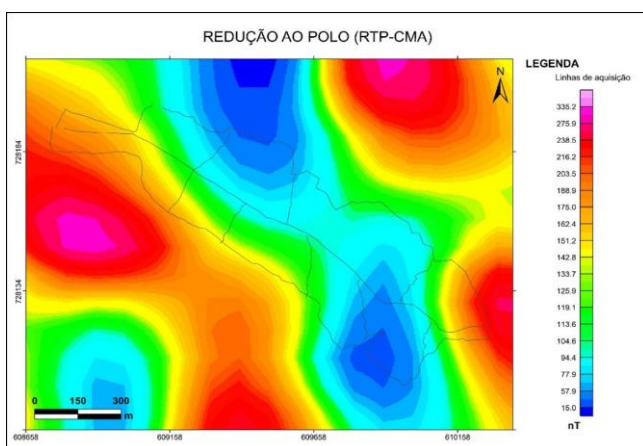


Figura 6. Campo magnético anômalo reduzido ao polo na área de estudo, originado da magnetometria aérea.

A partir o campo magnético anômalo reduzido ao polo, foram realizados mapas oriundos dos quatro filtros aplicados: ASA, GHT, ISA e ISA-GHT. A Figura 7 apresenta a aplicação do filtro ASA, na qual as anomalias coincidem com os diques mapeados pela MINEROPAR (2006). Entretanto, sabendo que os picos da amplitude do sinal analítico são simétricos e podem ocorrer tanto no centro de corpos estreitos quanto nas bordas dos corpos largos, esse processamento não é suficiente para afirmar que as anomalias observadas na imagem são correspondentes ao centro dos corpos ou às bordas. A anomalia observada na porção sudeste pode representar um contato geológico, visto que condiz com a geologia apresentada pela CPRM (2021), em que há o Granito Piraí do Sul na porção noroeste e o Quartzito Serra das Pedras a sudeste.

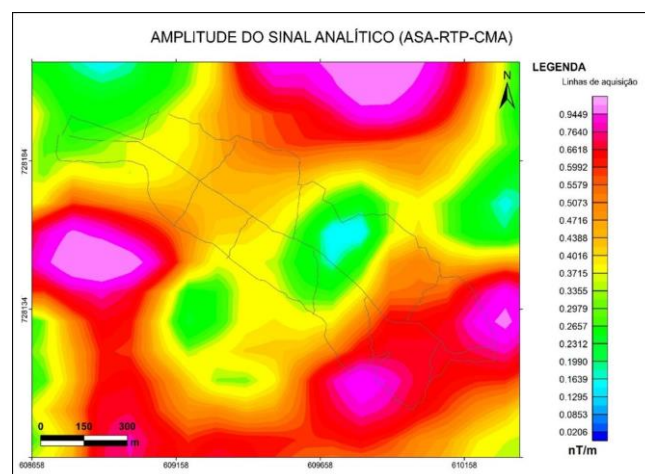


Figura 7. Amplitude do sinal analítico gerado por dados de magnetometria aérea.

A Figura 8, correspondente ao GHT, apresenta três anomalias predominantes com direção NW-SE, que coincidem com as apresentadas nas figuras anteriores. As duas anomalias, na porção sudoeste, são referentes as bordas de um único dique, uma vez que essa filtragem tende a realçar as bordas de corpos espessos, sendo compatível com o que foi apresentado pelo ASA e com o dique mapeado nesta região.

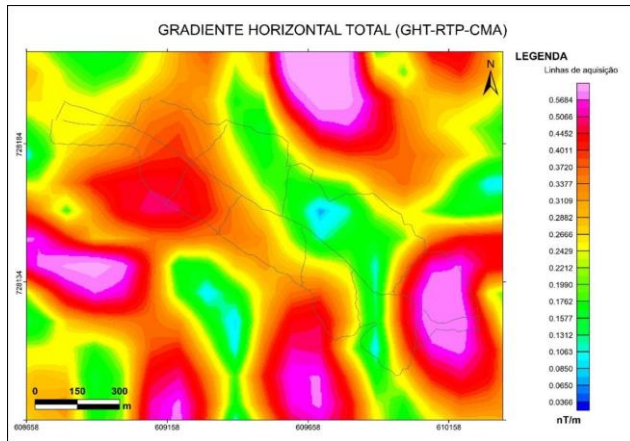


Figura 8. Gradiente horizontal total derivado magnetometria aérea.

A Figura 9 apresenta o mapa de dados do filtro ISA. Nesta área de estudo, a interpretação do ISA é complementar às informações destacadas no mapa GHT (Figura 9), uma vez que realça o centro das anomalias, independente da profundidade das fontes, enquanto o GHT realçou as bordas dessas mesmas anomalias.

Por fim, a Figura 10, apresenta o ISA-GHT, que delimita com clareza as bordas dos diques identificados pelos filtros anteriores, mas com aparente maior precisão quanto à geometria desses corpos.

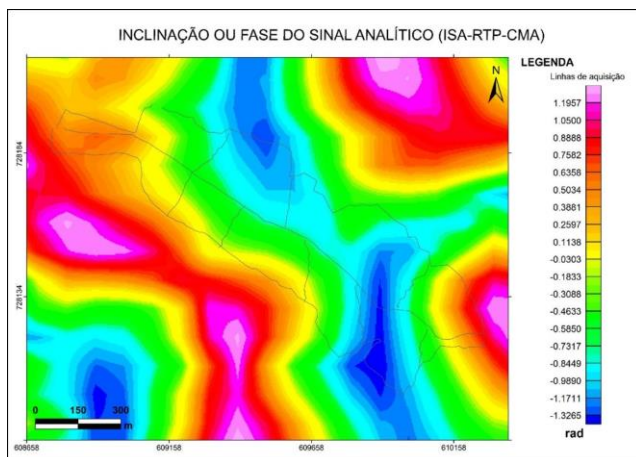


Figura 9. Inclinação ou fase do sinal analítico originado da magnetometria aérea.

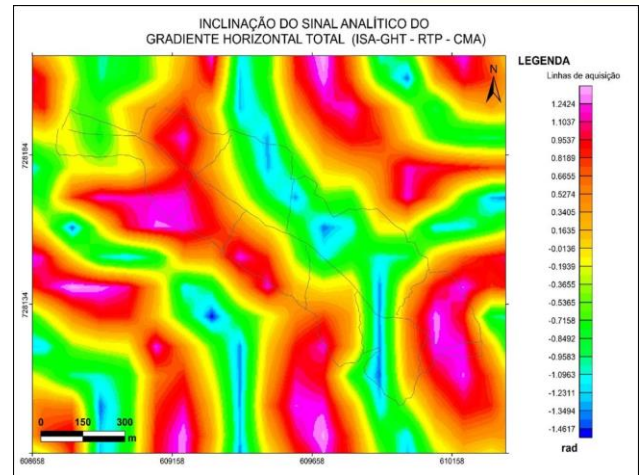


Figura 10. Inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total derivado da magnetometria aérea.

Os quatro filtros utilizados são adequados para a interpretação geofísica e determinação dos diques, e se mostraram efetivos para a delimitação da posição dos corpos causadores das anomalias. É importante ressaltar que, devido a escala de aquisição dos dados, há uma resolução menor, entretanto, esses dados são de extrema importância para orientação de trabalhos mais detalhados, como o de magnetometria terrestre.

5.2 Magnetometria Terrestre

A aquisição dos dados magnetométricos terrestres ocorreu em uma malha não regular ao longo da estrada principal, trilha da nascente, trilha primitiva e das nove rotas de fuga dentro da área da FLONA. A Figura 11 apresenta os perfis e estações do levantamento.

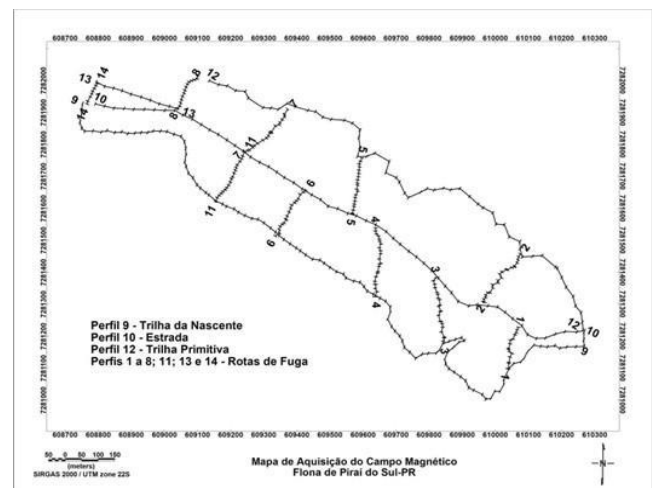


Figura 11. Mapa de localização das linhas e estações de levantamento magnetométrico terrestre.

Ao longo da estrada principal foram realizadas leituras em 57 estações, totalizando 1680 metros e na trilha primitiva foram adquiridas 67 estações, totalizando 1920 metros de perfis, sendo ambos os levantamentos com um espaçamento de 30 metros entre cada estação. Na trilha da nascente foram obtidas 116 estações separadas a cada 20 metros, e contabilizou 2300 metros. As rotas de fuga totalizaram 234 estações separadas a cada 10 metros, ao todo foram 2170 metros. Todo o levantamento resultou em 8070 metros, divididos em 474 estações ao longo de 14 perfis (Tabela 1).

LINHA	ESPAÇAMENTO	Nº DE ESTAÇÕES	TOTAL (m)
Trilha da Nascente	20 m	116	2300
Trilha Primitiva	30 m	67	1920
Estrada Principal		57	1680
Rotas de Fuga	10 m	234	2170
		474	8070

Tabela 1. Linhas de aquisição de dados magnetométricos terrestres executadas na área de estudo.

O processamento dos dados magnetométricos terrestres, após a remoção do IGRF, resultou em um mapa do CMA, que varia entre -1037 a +662nT, evidenciando uma forte magnetização na área de estudo (Figura 12).

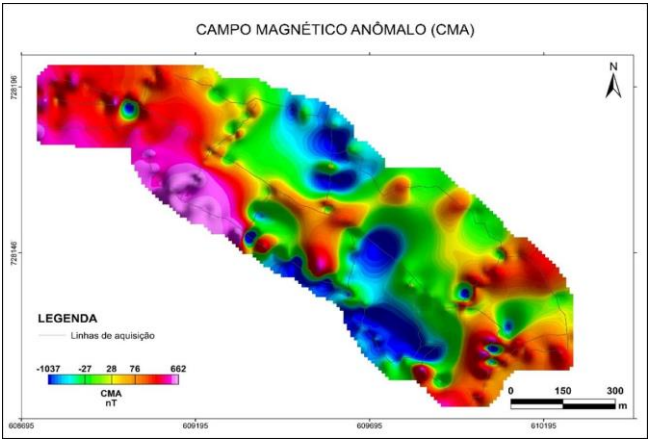


Figura 12. Mapa do campo magnético anômalo (CMA) do levantamento magnetométrico terrestre.

Sobre o CMA, aplicou-se o filtro ASA (Figura 13). As anomalias do filtro ASA (valor máximo de 66 nT/m) corroboram as altas amplitudes do

CMA e confirmam a presença de rocha magnética na área de estudo, sendo identificada uma anomalia na direção NW-SE que se estende ao longo da área. É possível sugerir que a anomalia citada é um dique de diabásio não aflorante, ou recoberto por solo, uma vez que intrusões nessa direção são recorrentes na região, além disso, foram avistados blocos de diabásio ao longo das trilhas de levantamento, corroborando para essa rocha ígnea. Esta anomalia, apresenta um deslocamento na porção NE da área do levantamento, o qual é evidência de uma falha na direção aproximada E-W. Há uma descontinuidade identificada no mapa geofísico ASA, na porção sudeste da área de estudo. Essa descontinuidade é resposta de um contato geológico na direção NE-SW, confirmada em campo, entre o Granito Piraí do Sul a noroeste (solo argiloso) e o Quartzito Serra das Pedras na porção sudeste (solo mais arenoso claro), sobretudo no extremo sudeste da Trilha das Nascentes em que há um afloramento de quartzito.

Medições de susceptibilidade magnética confirmam maiores valores para diabásio e solo derivados, valores intermediários a baixos para Granito Piraí do Sul e extremamente baixos para quartzitos.

- Diques máficos (diabásio/diorito): rocha > 20 SI, solo com fragmento de rocha muito ou pouco alterada: 4 a 8 SI
- Grupo Castro: Brecha de riolito: rocha: 0,53 a 0,39; Riolito: 0,12 a 0,41; solo argiloso branco/ignimbrito: 0,9 a 1,1SI
- Granitos Cunhaporanga e Piraí do Sul: rocha 0,4 a 5,63, variações magnéticas no Socavão de 15 a 20 SI, solo marrom claro a laranja 0,4 a 2,35 SI
- Quartzito: rocha e solo esbranquiçado < 0,08 SI, ferruginosa: < 0,05

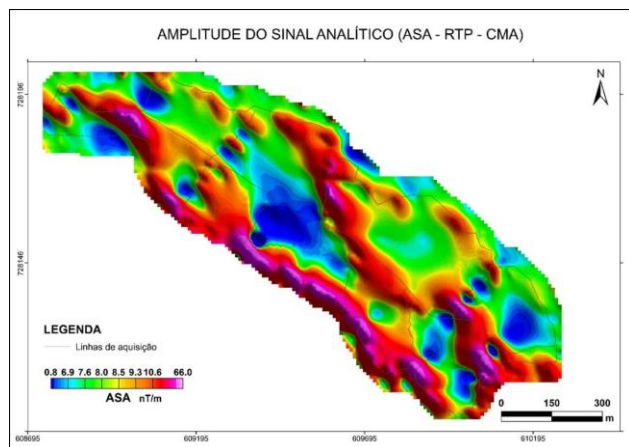


Figura 13. Mapa da amplitude do sinal analítico (ASA) do levantamento magnetométrico terrestre.

Com base na magnetometria terrestre, foi possível delimitar com mais certeza a geometria e localização do dique não aflorante presente na área de estudo e definir o contato geológico na direção NE-SW, este contato, apesar de não ser claramente expresso no mapa CMA, foi realçado no mapa do filtro ASA, e é compatível com as mudanças litológicas vistas em campo.

Quando comparada a geometria e localização desse dique com a posição das nascentes presentes na área, detecta-se uma correlação entre o dique existente e a posição das nascentes, uma vez que todas as nascentes identificadas dentro da FLONA podem estar associadas ao dique não aflorante (Figura 14).

6. COMPARAÇÃO ENTRE A MAGNETOMETRIA AÉREA E A TERRESTRE

Quando comparados os dados adquiridos tanto pela magnetometria aérea (Figura 15A) quanto pela terrestre (Figura 15B), nota-se que ambos os métodos foram eficazes na identificação da presença de diques de diabásio na área de estudo, sendo mapeado de maneira mais regional na magnetometria aérea e mais detalhado, com maior precisão na definição da geometria, na magnetometria terrestre.

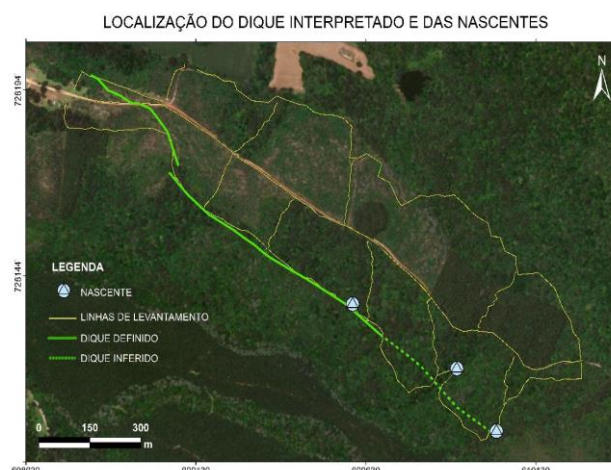


Figura 14. Localização das nascentes e do dique não aflorante.

Através da magnetometria terrestre, quando aplicado o filtro ASA, foi possível identificar a geometria do dique de diabásio identificado e uma falha na direção aproximada E-W, ao norte da área, sendo essa estrutura responsável pelo deslocamento que ocorre no dique citado. Quando aplicado o mesmo filtro nos dados da magnetometria aérea, é possível identificar o dique, porém com um grande deslocamento, de aproximadamente 250 metros, e com pouca definição da geometria, o que acontece também com a falha, que pode ser inferida, porém com pouca precisão e grande deslocamento.

Na magnetometria aérea, os produtos resultantes dos filtros GHT e ISA evidenciam estruturas com direções NW-SW, as quais não foram contempladas pelo levantamento terrestre. Na aplicação do filtro ASA, é possível identificar um deslocamento do dique na porção sudeste que pode ser uma estrutura rúptil ou um contato geológico, sendo a segunda opção mais coerente com os dados observados pela magnetometria aérea e as observações de campo.

Na magnetometria aérea, quando aplicado o filtro ASA, foi possível interpretar um contato geológico na porção sudeste, que coincide com as mudanças pedológicas observadas em campo, uma vez que nessa porção da área de estudo o solo passa a ser menos argiloso e mais arenoso e com cores mais claras. Essa coincide com o contato geológico na direção NE-SW entre o quartzito Serra das Pedras a noroeste, com o Granito Piraí do Sul a sudeste mapeado por Besser et al. (2021).

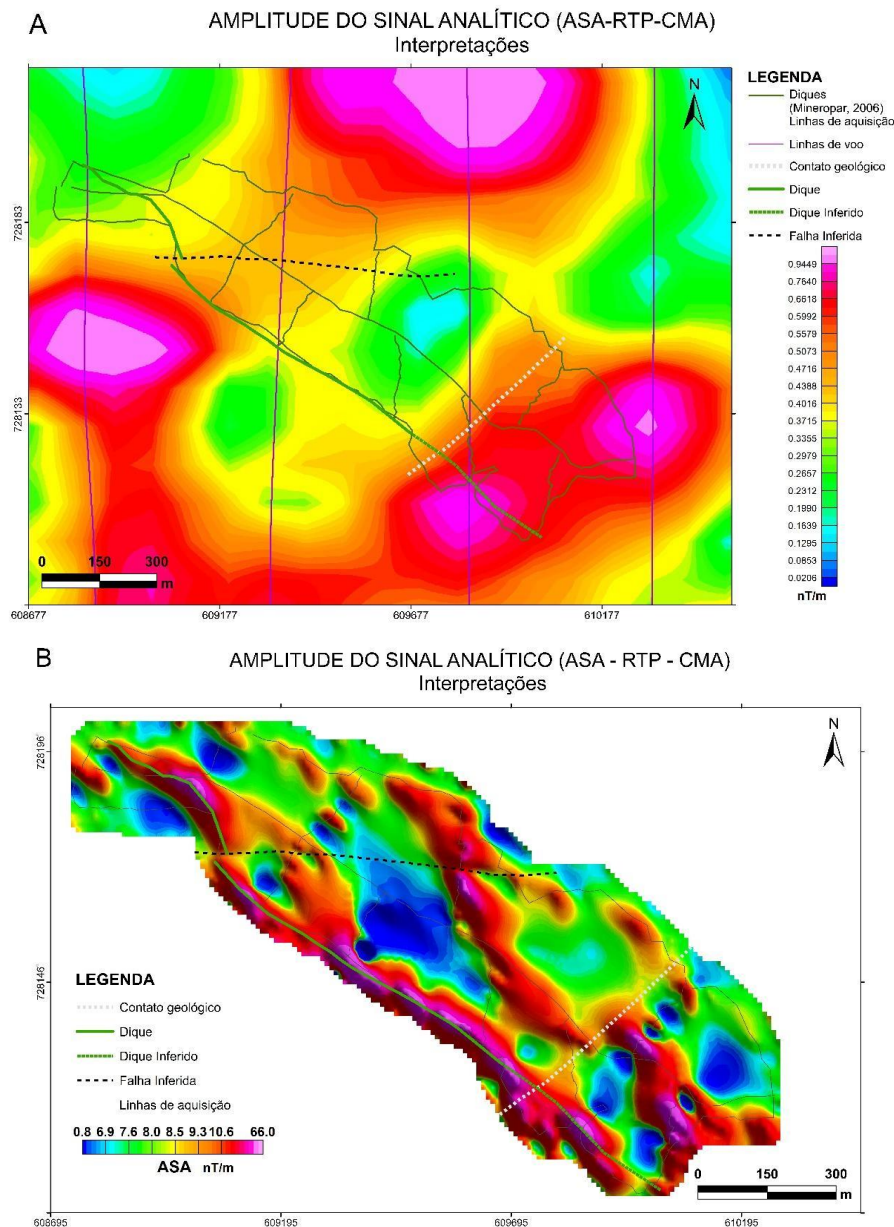


Figura 15. Mapa da amplitude do sinal magnético derivado da: A) magnetometria aérea. B) magnetometria terrestre.

7. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados e discutidos anteriormente, conclui-se que:

- Ambos os tipos de dados magnetométricos (aéreos e terrestres) sugerem que existe um dique de diabásio não aflorante na área de estudo.
- O levantamento magnetométrico aéreo confirma a tendência NW-SE dos diques, sendo uma metodologia ideal para abordagens iniciais uma vez que seus dados estão disponibilizados gratuitamente e

coincidem com os dados de maior detalhe, porém com deslocamento e menor definição das geometrias.

- O levantamento magnetométrico terrestre é mais detalhado, apresentando maior precisão na localização dos diques e delimitação de falhas.
- O contato geológico é melhor representado na magnetometria aérea, por ser uma estrutura mais abrangente, porém, é confirmado com a magnetometria terrestre.
- Na área de estudo, a formação de nascentes pode estar condicionada a presença do dique de diabásio não aflorante identificado pelo

método magnético, uma vez que todas as nascentes identificadas em campo se apresentam associadas ao dique.

Agradecimentos

A UFPR (Universidade Federal do Paraná) pelo ensino público, gratuito e de qualidade. Ao LPGA (Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada) e sua equipe. Ao SGB (Serviço Geológico do Brasil) pelo apoio logístico e técnico. Este trabalho é parte integrante do projeto Apoiando o Abastecimento Sustentável de Água Subterrânea no Brasil/Supporting Sustainable Groundwater Supply Management in Brazil (PIN2020141000001), financiados pela Fundação Araucária e Programa Newton International Fellowship Scheme (537134315). A equipe do ICMBio da Floresta Nacional de Piraí do Sul.

8. REFERÊNCIAS

Alken, P., Thébault, E., Beggan, C.D. et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. *Earth Planets Space* 73, 49 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>

BESSER M.L., BRUMATTI M., SPISILA A.L. 2021. Relatório do Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Paraná. CPRM, Rio de Janeiro.

BONGIOLO, A. B. S., SZAMEITAT, L. S. A., STEVANATO, R., CANATA, R. E., PEREIRA, H. G., & ANTONELLI, F. 2022. Geophysical surveying for the detection of ferrous-based objects: possibilities for depth estimative combining analytic signal and vertical integral of the anomalous magnetic field. *Brazilian Journal of Geophysics*, n. 40(1), p.43-52.

CPRM, Serviço Geológico do Brasil. 2011. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectométricos. Lasa Prospecções S.A. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/11241>. Acessado em 05 de julho de 2022.

DENTITH M., MUDGE S. 2014. Gravity and magnetic methods. In: *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press. p. 85–192.

KEARY P., BROOKS M., HILL I. 2009. *Geofísica de Exploração*. São Paulo, Oficina de textos, 429p.
FALEIROS M.F. 2008. *Evolução de Terrenos tectono-metamórficos da Serrania do Ribeira e Planalto Alto Turvo (SP, PR)*. Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências, São Paulo. Doi: 10.11606/T.44.2008.tde-02092008-113513.

FERREIRA, F. J. F. 1982. Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa. São Paulo, Universidade de São Paulo.

FERREIRA, F.J.F., MONMA, R., CAMPANHA, G.A.C., GALLI, Y.L., 1989. An estimate of the degree of crustal extension and thinning associated with the Guapiara Lineament based on aeromagnetic modelling. *IG-USP, Série Científica*, 20:69-70

FERREIRA F. J. F., SOUZA J., BONGIOLO A.B.S., CASTRO L.G., ROMEIRO M.A.T. 2010. Realce de anomalias magnéticas do gradiente horizontal total usando a inclinação do sinal analítico. Parte I - Aplicação a dados sintéticos. In: *IV Simpósio Brasileiro de Geofísica. Brasília, Resumos expandidos*, 1 CD-ROM.

FERREIRA F. J. F.; SOUZA J., BONGIOLO A.B.S., CASTRO L.G. 2013. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using tilt angle. *Geophysics*, vol. 78, issue 3, pp. J33-J41.

FERREIRA, F. J. F., MORAES, R. A. V., FERRARI, M. P., VIANNA, R. B. 1981. Contribuição ao estudo do Alinhamento Estrutural de Guapiara. *Simpósio Regional de Geologia*, n. 3, p. 226-240.

GUIMARÃES G. B. 1995. O complexo granítico Cunhaporanga na região de Joaquim Murtinho, Piraí do Sul (PR): Caracterização faciológica das rochas granitóides. Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências, São Paulo. Doi:10.11606/T.44.2000.tde-29102015-111937

GUNN P. J. 1972. Linear Transformations of Gravity and Magnetics Fields. *Geophysical Prospecting*, n. 23. p 300-312

LI X. 2006. Understanding 3D analytic signal amplitude. *Geophysics* vol. 71, nº 2 p. L13-L16.

LOWRIE W. 2007. *Fundamentals of geophysics*. Cambridge University Press. Cambridge.

LUIZ J. G., SILVA L.M.C. 1995. *Geofísica de*

Prospecção. Belém, Cejup, 311p.

MILLER H.G., SINGH V. 1994. Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32: 213-217.

MILLIGAN, P.R., GUNN, P.J. 1997. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, n. 17(2), p. 63-75.

MINEROPAR – Serviço Geológico do Paraná. 2006. Mapa Geológico do Paraná. Governo do Estado do Paraná.

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*, n. 37, p. 507-517.

PESSANO, P. C., GANADE, C. E., TUPINAMBÁ, M., TEIXEIRA, W. 2021. Updated map of the mafic dike swarms of Brazil based on airborne geophysical data. *Journal of South American Earth Sciences*, n. 107, 103076.

PRAZERES FILHO H. J. 2000. Litogeoquímica, geocronologia (U-Pb) e geologia isotópica dos complexos graníticos Cunhaporranha e Três Corregos, Estado do Paraná. Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências, São Paulo.

Doi:10.11606/D.44.2000.tde-28092015-155909.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PIRAÍ DO SUL. 2006. Plano Diretor de Piraí do Sul.

POTTER, R. O., CARVALHO, A. P., FASOLO, P. J., BOGNOLA, I. A., BHERING, S. B., MARTORANO, L. G. 2002. Caracterização dos Solos do Município de Piraí do Sul, PR. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento* 12. EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Rio de Janeiro.

SZATMARI, P.; MILANI, E. J. 2016. Tectonic control of the oil-rich large igneous-carbonate-salt province of the South Atlantic rift. *Marine and Petroleum Geology*, n. 77, p. 567-596.

WAICHEL B.L. 2006. Estruturação de derrames e interações lava-sedimento na porção central da província basáltica continental do Paraná. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

WHITE I.C. 1906. Relatório Final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil. DNPM. Rio de Janeiro.

Submetido em 11/09/2023

Aceito em 01/04/2024

Editado por Pedro Afonso Krinski Moreira (PET-
GEOLOGIA/UFPR)