

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA**

GABRIELLE AMANDA POI

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

CURITIBA

2023

GABRIELLE AMANDA POI

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

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Geologia da Universidade Federal do
Paraná como requisito parcial à obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Dra. Alessandra de Barros e Silva
Bongiolo

Co-orientadores: Dr. Oderson Antônio de Souza
Filho e Dra. Luizemara Soares

Alves Szameitat

CURITIBA

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço a UFPR pelo ensino público, gratuito e de qualidade e ao Programa Bom Aluno por me proporcionar um desenvolvimento acadêmico e pessoal que mudou minha vida, sem o programa eu jamais enxergaria meu potencial e as infinitas possibilidades da vida.

Ao LPGA (Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada) e sua equipe. Ao mestrando Vinicius e ao físico Jeferson de Souza pela parceria nas atividades de campo. A minha orientadora, Dra. Alessandra de Barros e Silva Bongioio que sempre esteve disposta a me ajudar, com muita dedicação. E um agradecimento especial ao Geólogo Rodoilton Stevanato, uma das pessoas mais gentis e geniais que eu já conheci. Obrigada pela paciência em sanar minhas dúvidas e pelos vários ensinamentos em campo e em laboratório.

A CPRM (Serviço Geológico do Brasil), pela disponibilização de dados e recursos para que esse trabalho pudesse ser realizado.

A equipe do ICMBio da Floresta Nacional de Piraí do Sul, pela autorização de estudo na área, alojamento e suporte durante as etapas de campo.

Aos meus coorientadores Dr. Oderson Antônio de Souza Filho e Dra. Luizemara Soares Alves Szameitat pelas discussões que me agregaram muito e me instigavam a buscar mais conhecimento.

Aos meus amigos e familiares: Taiane, Beatriz, Guilherme, Mayara, Flávia, Gabriela, Lívia, Maiara e Carolina. Obrigada por tornaram essa caminhada muito mais prazerosa e feliz e por sempre estarem disponíveis nas vezes que precisei (as quais foram muitas). E ao meu melhor amigo e namorado, Lucas, pela paciência, atenção, amor e zelo, sempre me incentivando, apoiando e me dando forças. Obrigada por viver tão intensamente a vida (e a geologia) ao meu lado.

E principalmente a minha mãe Rosalina e ao meu padrasto Walter, por todo esforço para que eu pudesse me dedicar aos estudos. Vocês são meu grande exemplo de dedicação, sem vocês eu não saberia o valor do trabalho e do amor.

Este trabalho/projeto teve o apoio de: Fundação Araucária PI 08/2020 - PROGRAMA “NEWTON INTERNATIONAL FELLOWSHIP SCHEME” PIN2020141000001 e Newton Fund Impact Scheme 537134315 - Apoiando o Abastecimento Sustentável de Água Subterrânea no Brasil/Supporting Sustainable Groundwater Supply Management in Brazil; Université Grenoble Alpes/LabEx OSUG@2020 (Investissements d’avenir – ANR10 LABX56).

RESUMO

Os levantamentos magnetométricos são amplamente aplicados na investigação de rochas e estruturas subsuperficiais como por exemplo diques, falhas e contatos geológicos. O presente trabalho tem por objetivo comparar os resultados obtidos por levantamentos magnetométricos aéreos e terrestres na Florestas Nacional de Piraí do Sul (FLONA Piraí), localizada no município de Piraí do Sul/PR. Foram utilizados dados de magnetometria aérea disponibilizados pela CPRM e dados de magnetometria terrestres adquiridos durante esse trabalho, ao longo de 14 linhas de levantamento, totalizando 8,07 km. Os dois métodos se mostraram eficientes na identificação dos diques de diabásio não aflorantes bem como determinação de falhas e contatos geológicos existentes na área. O levantamento magnetométrico aéreo foi de extrema importância para uma abordagem inicial e resultou em um campo magnético anômalo com variação de 13,9 a 2487,9nT. Sobre o CMA foram aplicados quatro filtros: ASA, GHT, ISA e ISA-GHT. Os filtros aplicados realçaram a tendência regional de direção NW-SE dos diques na região, e identificaram possíveis falhas e contatos geológicos que posteriormente foram confirmados com os dados de campo e da magnetometria terrestre. Em contrapartida, o levantamento magnetométrico terrestres, além de realçar a anomalia causada pelo dique de diabásio não aflorante, delimitou a geometria dessa intrusão e confirmou a falha presente na região noroeste da área e o contato geológico presente na porção sudeste. Ambos os levantamentos, quando aplicados o filtro ASA, realçaram o dique, a falha e contato geológico, porém com precisões diferentes dada a escala de trabalho de cada um dos métodos. A aquisição dos dados magnetométricos em campo permitiu a observação de alguns aspectos como a variação de solo e de litologia, que coincide com o contato proposto, e a presença de nascentes, todas associadas ao dique identificado pela magnetometria.

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

ABSTRACT

Magnetometer surveys are widely used in the investigation of rocks and subsurface structures such as dikes, faults, and geological contacts. The objective of this work is to compare the results obtained from aerial and ground magnetometer surveys in the Pirai do Sul National Forest (FLONA Pirai), located in the municipality of Pirai do Sul, PR. Data from aerial magnetometry provided by CPRM and data from ground magnetometry acquired during this study were used along 14 lines of survey. Both methods were efficient in identifying non-outcropping diabase dikes, faults, and geological contacts in the area. The aerial magnetometer survey was of utmost importance for an initial approach and resulted in an anomalous magnetic field with a variation of 13.9 to 2487.9 nT. Four filters were applied to the CMA: ASA, GHT, ISA, and ISA-GHT. The applied filters emphasized the NW-SE regional trend of dikes in the region and identified possible faults and geological contacts that were later confirmed with field and ground magnetometry data. On the other hand, the ground magnetometer survey, in addition to highlighting the anomaly caused by the non-outcropping diabase dike, delimited the geometry of this intrusion and confirmed the fault present in the northwest region and the geological contact present in the southeast portion. Both surveys, when applied the ASA filter, emphasized the dike, fault, and geological contact, but with different precision given the working scale of each method. The acquisition of magnetometer data in the field allowed observation of some aspects such as soil and lithology variations, which coincide with the proposed contact, and the presence of springs, all associated with the dike identified by magnetometry.

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

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Localização da área de estudo..... | 1 |
| Figura 2. Mapa Geológico da área de estudo. Modificado de CPRM (2021). | 3 |
| Figura 3. Fluxograma dos levantamentos magnetométricos..... | 5 |
| Figura 4. A) Magnetômetro GSM-19T; B) Magnetômetro MAG ENVI-VLF..... | 6 |
| Figura 5. Componentes estimados do campo magnéticos para a área de estudo. | 8 |
| Figura 6. Campo magnético anômalo da área estudo por levantamento magnetométrico aéreo. | 11 |
| Figura 7. Campo magnético anômalo reduzido ao polo por magnetometria aérea. . | 12 |
| Figura 8. Amplitude do sinal analítico pela magnetometria aérea..... | 13 |
| Figura 9. Gradiente horizontal total pela magnetometria aérea. | 14 |
| Figura 10. Inclinação ou fase do sinal analítico pela magnetometria aérea. | 15 |
| Figura 11. Inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total pela magnetometria aérea. | 16 |
| Figura 12. Mapa de localização das linhas e estações de levantamento da magnetometria terrestre. | 17 |
| Figura 13. Mapa do campo magnético anômalo (CMA) do levantamento magnetométrico terrestre. | 18 |
| Figura 14. Mapa da amplitude do sinal analítico (ASA) do levantamento magnetométrico terrestre. | 19 |
| Figura 15. Localização das nascentes e do dique não aflorante. | 20 |
| Figura 16. Mapa da amplitude do sinal magnético: A) Pela magnetometria aérea. B) Pela magnetometria terrestre. | 22 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Linhas de aquisição de dados magnetométricos terrestres executadas na área de estudo | 17 |
|---|----|

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. REVISÃO TEÓRICA | 2 |
| 2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO | 2 |
| 2.2 MAGNETOMETRIA | 3 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 5 |
| 3.1 LEVANTAMENTOS MAGNETOMÉTRICOS | 5 |
| 3.1.1 AQUISIÇÃO DE DADOS | 5 |
| 3.1.2 PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS | 7 |
| 3.1.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS | 8 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 10 |
| 4.1 MAGNETOMETRIA AÉREA | 10 |
| 4.2 MAGNETOMETRIA TERRESTRE | 16 |
| 4.3 COMPARAÇÃO ENTRE A MAGNETOMETRIA AÉREA E A TERRESTRE | 20 |
| 6. CONCLUSÕES | 23 |
| REFERÊNCIAS | 24 |

1. INTRODUÇÃO

A área de estudo está localizada na Floresta Nacional de Pirai do Sul (FLONA), no município de Pirai do Sul, no estado do Paraná. A área abrange o Corpo Granítico Pirai do Sul, a Unidade Quartzito Serra das Pedras e as intrusões de rochas basálticas (diques) do Arco de Ponta Grossa (Besser *et al.*, 2021). Os diques existentes na área de estudo não são aflorantes, logo, o método geofísico magnetométrico foi escolhido para o mapeamento dessas intrusões neste trabalho. A Figura 1 apresenta o mapa de localização e a delimitação da área de estudo.

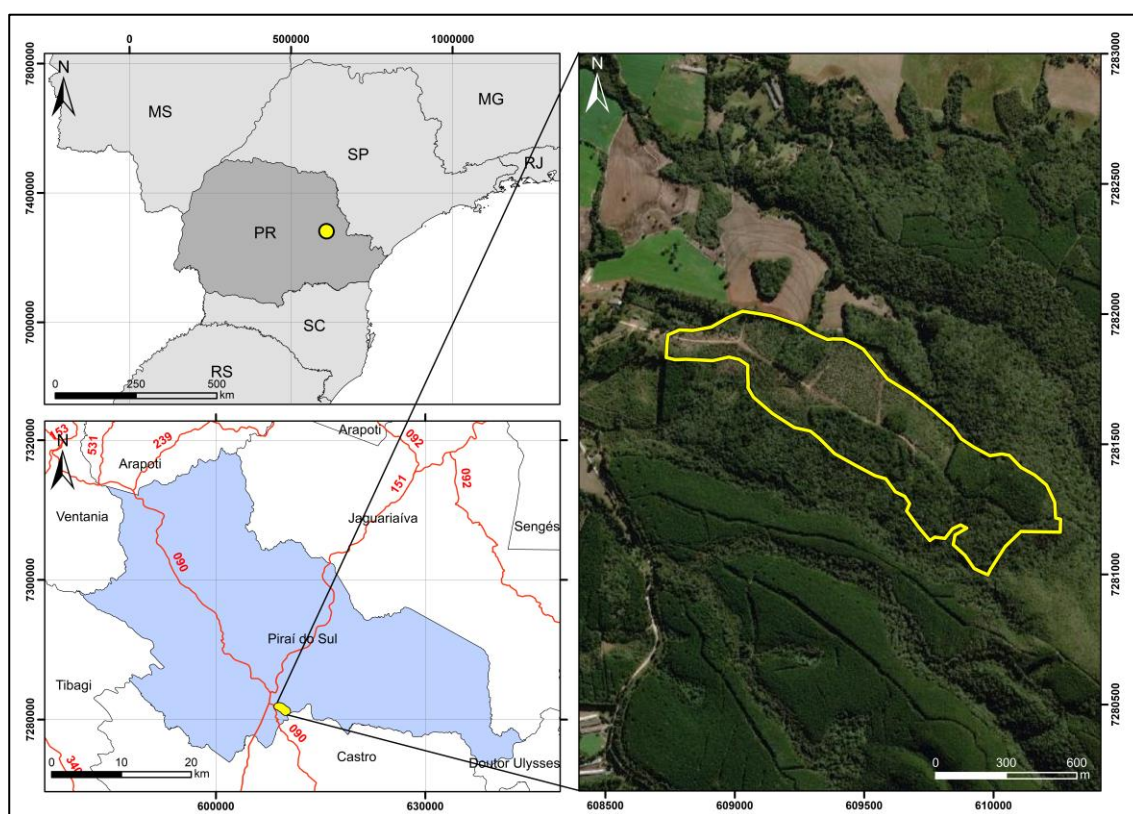


Figura 1. Localização da área de estudo. Fonte: IBGE e Google Earth.

O enxame de diques do Arco de Ponta Grossa tem grande importância na região, pois, além de serem muito espessos e extensos, apresentam uma orientação preferencial NW, que coincide com grandes estruturas da região, e o mapeamento dessas intrusões pode contribuir para o entendimento das estruturas geológicas locais e de alguns reservatórios de água subterrânea, que são por elas influenciados.

Os levantamentos magnetométricos aéreos e terrestres são métodos amplamente aplicados para o mapeamento de corpos intrusivos pois estes comumente apresentam propriedades magnéticas que contrastam com as

encaixantes, além disso, a depender do contraste das propriedades das rochas, podem ser utilizados para o mapeamento de contatos geológicos e de falhas.

Portanto, 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 através da comparação de dados magnetométricos de levantamentos aéreos e terrestres.

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo contempla o Granito Piraí do Sul, o Quartzito Serra das Pedras e as intrusões rasas 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 Super Grupo Açungui, sendo ambos inseridos no contexto do Terreno Apiaí. Já as intrusões rasas do Grupo Serra Geral pertencem ao contexto da Bacia do Paraná, mais especificamente dentro do Supergrupo São Bento (Besser *et al*, 2021).

O Terreno Apiaí é uma parte do Cinturão Ribeira Meridional, limitado ao Sul pela Falha da Lancinha (Faleiros, 2008), e composto por rochas supracrustais de grau metamórfico fraco a médio, definidas como Super Grupo Açungui (Campanha, 2000). 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 na 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 presente como a unidade Granito Piraí do Sul, um corpo composto por 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.

As intrusões rasas presentes da área pertencem ao Grupo Serra Geral, da Bacia do Paraná, inicialmente denominado como Formação Serra Geral, por White

em 1906. Esse grupo corresponde a maior da parte da Província Basáltica Continental Paraná-Etendeka, composta predominantemente por derrames de natureza básica e subordinadamente por efusivas ácidas (Waichel, 2006). A Figura 2 apresenta o mapa geológico da área de estudo.

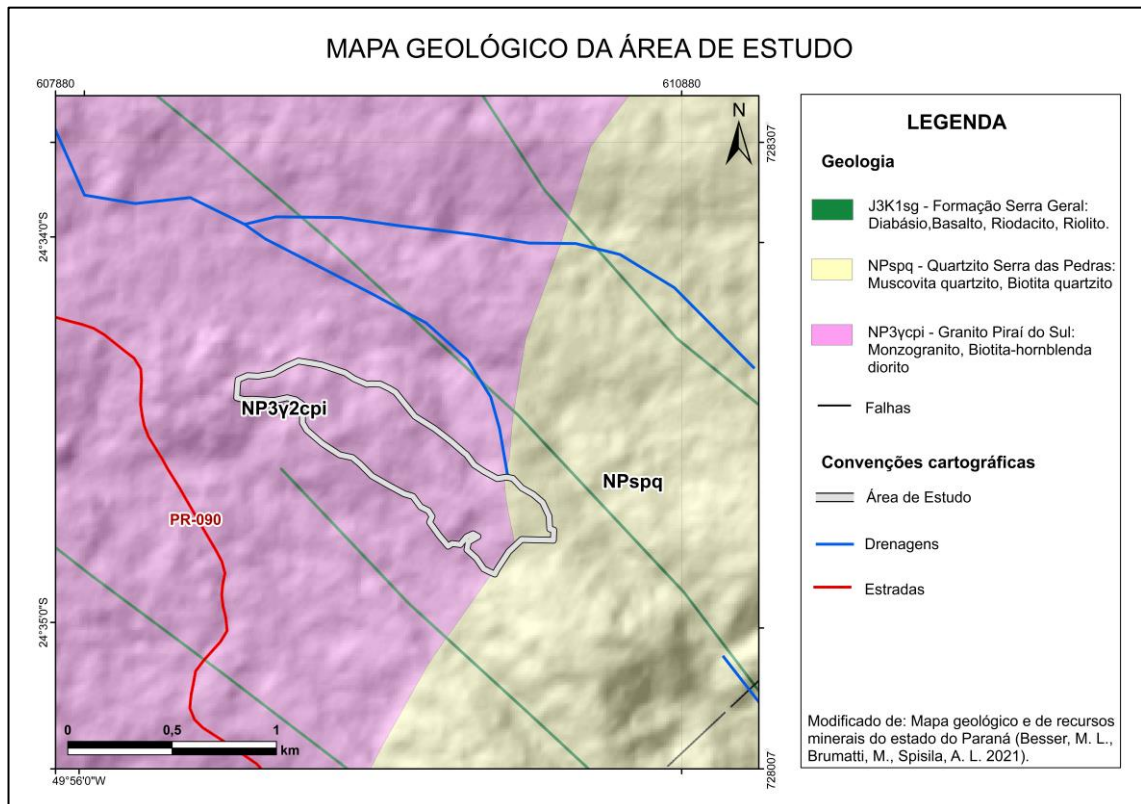


Figura 2. Mapa geológico da área de estudo. Modificado de CPRM (2021).

2.2 MAGNETOMETRIA

A magnetometria é a investigação da geologia subsuperficial a partir do campo magnético terrestre, em função das propriedades magnéticas das rochas (Dentith *et al.*, 2014). Esse método é comumente aplicado na investigação de estruturas geológicas subsuperficiais, como por exemplo diques, falhas e contatos geológicos. Há outras aplicações como na prospecção de jazidas de minerais ferromagnéticos e petróleo, na localização de estruturas metálicas enterradas ou submersas dentre outras diversas finalidades.

A susceptibilidade magnética varia de acordo com os minerais, e a grande maioria das rochas não contém fortes propriedades magnéticas, porém, algumas

apresentam o mínimo de minerais magnéticos que produzem anomalias (Kearey *et al.*, 2009).

As rochas máficas e ultramáficas apresentam em sua composição minerais como a magnetita, ilmenita e pirrotita, os quais são magnéticos e assim produzem anomalias significativas, principalmente quando estão em contextos com rochas sem essa propriedade, produzindo um contraste ainda maior. É o que ocorre na área de estudo, onde os diques estão encaixados em granitos e quartzitos. As anomalias magnéticas são originadas pelo contraste de susceptibilidade magnética 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).

Os levantamentos magnetométricos podem ser aéreos, marinhos ou terrestres e consistem na leitura do campo geomagnético terrestre ao longo de perfis perpendiculares as 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). Já os levantamentos terrestres costumam ser realizados em pequenas áreas, com um espaçamento entre as estações de em média 10 a 100 metros.

A unidade definida pelo sistema CGS para medir o campo magnético é Gauss (G), que corresponde a 10^{-4} T, entretanto o Tesla (T) é uma unidade grande, portanto utiliza-se a subunidade nanotesla (nT) que corresponde a 10^{-9} T (Keary *et al.*, 2009).

O campo magnético da Terra é dinâmico e por isso ele está submetido há diversas variações internas e externas. Há algumas variações que interferem durante os cálculos das anomalias magnéticas como tempestades magnéticas, variações periódicas, dentre outras. A principal delas é a variação diurna que consiste em pequenas oscilações que ocorrem no campo magnético ao longo do dia, sendo mais expressivas próximo ao Equador e mais suaves próximo aos polos. Essa variação deve ser sempre considerada durante as correções e o processamento dos dados sendo possível monitorá-la com o auxílio de um magnetômetro de base.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 LEVANTAMENTOS MAGNETOMÉTRICOS

O levantamento terrestre costuma ser utilizado para detalhamento de uma área (Luiz & Silva 1995), e será 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.

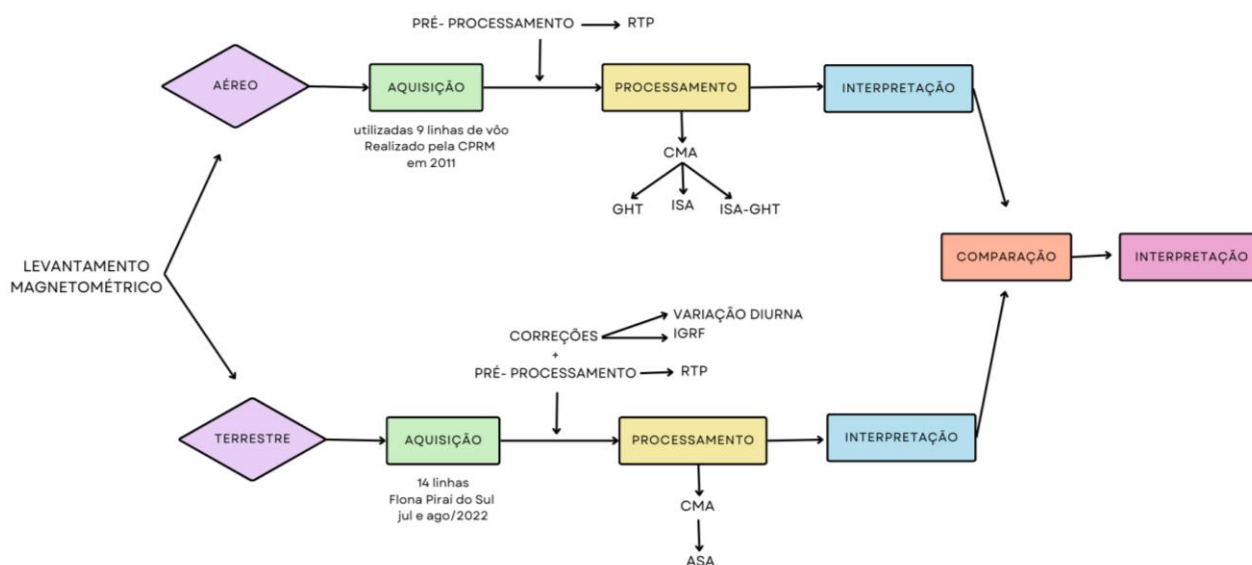


Figura 3. Fluxograma dos levantamentos magnetométricos.

3.1.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

Os dados magnetométricos aéreos utilizados foram obtidos pelo *site* <https://rigeo.cprm.gov.br/> no formato .xyz. Esses dados foram adquiridos e processados como parte das atividades do Projeto Aerogeofísico Paraná - Santa Catarina, executado 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 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.

Na etapa de aquisição de dados magnetométricos terrestres, que ocorreu 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, aliando-o na direção do norte do campo magnético, para adquirir os dados de variações diurnas, e o magnetômetro da fabricante Scintrex, modelo MAG ENVI-VLF, o qual foi utilizado para a aquisição dos dados magnetométricos nas linhas de levantamento dentro da área. A Figura 4 apresenta os magnetômetros utilizados. Além dos magnetômetros, foi utilizado o aplicativo móvel *Avenza Maps*® para georreferenciar cada um dos pontos de leitura.



Figura 4. A) Magnetômetro GSM-19T; **B)** Magnetômetro MAG ENVI-VLF. Fonte: o autor.

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.

Também durante a aquisição de dados magnetométricos terrestres, foram observados afloramentos existentes nas trilhas, presença de blocos de diabásio e variação nas litologias e na cor do solo a fim de comparar essas informações com os dados magnetométricos obtidos.

3.1.2 PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS

A etapa de pré-processamento dos dados consiste nas correções dos dados brutos adquiridos que, para os dados aéreos já constavam nas planilhas fornecidas pela CPRM.

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 explosões solares ou interferência de materiais magnéticos próximos ao levantamento, como por exemplo linhas de alta tensão, portões ou veículos. Depois de retirados os *spikes*, foi calculada uma média simples para cada uma das estações.

A partir dos valores médios de cada uma das estações iniciou-se as correções. A primeira correção realizada foi a correção da variação diurna, a qual é feita em função da variação temporal do campo medido. A segunda correção foi a do IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*), que consiste na remoção do efeito do campo magnético de referência. O campo magnético estimado para a região é de 22560nT, conforme apresentado na Figura 5, disponibilizado pelo *National Centers for Environmental Information* (NOAA). Após essas correções, obteve-se o CMA (campo magnético anômalo) para cada um dos pontos.

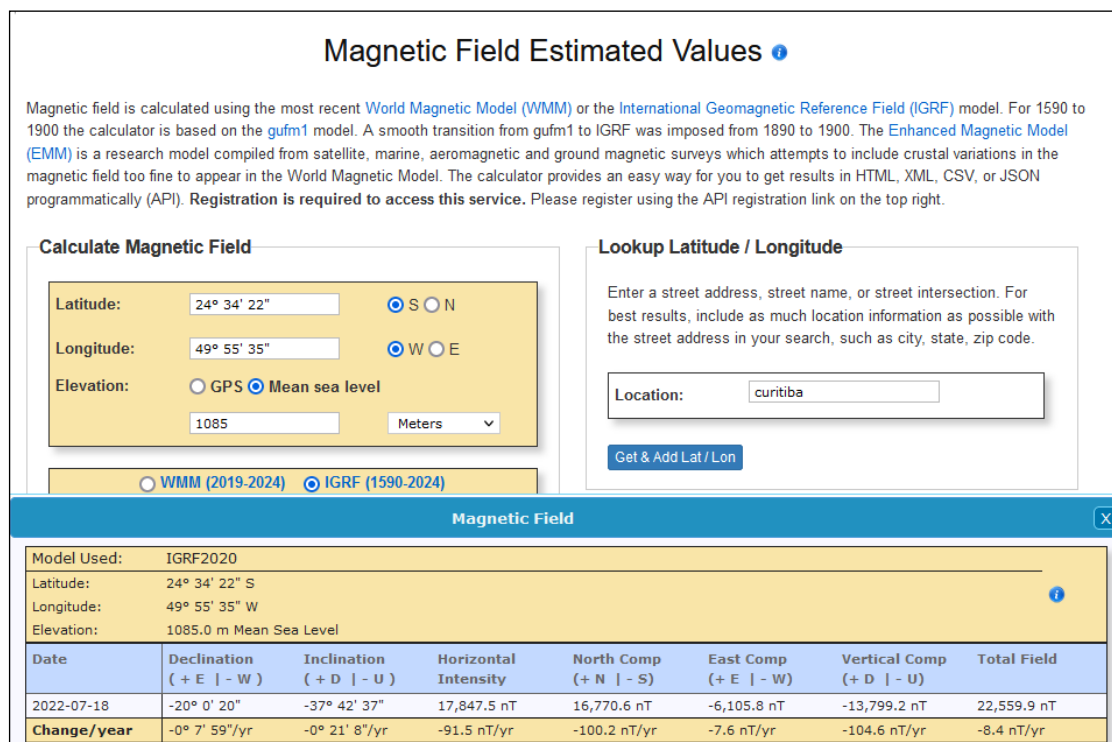


Figura 5. Componentes estimados do campo magnéticos para a área de estudo.
 Fonte: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>

A partir do CMA, foi realizada a redução ao polo (RTP), um pré-processamento que corresponde ao posicionamento diretamente sobre a fonte, a fim de minimizar os efeitos da inclinação magnética. Vale ressaltar, que a redução ao polo também foi aplicada sobre aos dados aéreos, a partir dos dados do campo magnético.

3.1.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS

O processamento iniciou pelos dados magnetométricos aéreos, que foram adquiridos e pré-processados pelo Projeto Aerogeofísico Paraná - Santa Catarina, feito pela CPRM. Em relação aos dados magnetométricos terrestres, o processamento iniciou-se pela interpolação dos dados do CMA, gerando um *grid* através da interpolação bidirecional das células, utilizando o valor de 10 metros.

Foi realizada, tanto nos dados magnetométricos aéreos quanto nos terrestres, a aplicação de filtros para eliminar feições indesejadas ou realçar as de interesse.

No processamento dos dados aéreos foram testados diversos filtros, entretanto os que apresentaram resultados satisfatórios foram: ASA (amplitude do sinal analítico), GHT (gradiente horizontal total), ISA (inclinação ou fase do sinal analítico) e ISA-GHT (inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total). Durante o

processamento dos dados terrestres, o único filtro de realce de anomalias que apresentou um resultado satisfatório foi o ASA (Amplitude do Sinal Analítico).

O ASA (amplitude do sinal analítico) é um filtro baseado no módulo do vetor resultante das derivadas nas 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 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 identificar a localização e definir a profundidade dos sinais magnéticos. Contudo, deve se admitir 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 imaginária 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.

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

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, sendo um vetor originado através de combinações das primeiras derivadas horizontais nas direções x e y, conforme a equação a seguir, em que dT/dx e dT/dy são referentes às derivadas horizontais da anomalia T do campo magnético.

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

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 amplitudes independentemente das profundidades das fontes.

É uma função positiva acima da fonte e negativa fora dela, encontrando zero quando próxima das bordas e é determinada pelo ângulo formado entre os vetores imaginários e real do sinal analítico, é definida pela formula a seguir:

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

Por fim, o ISA-GHT (inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total) e a aplicação do ISA sobre a malha originada a partir do GHT, realçando as estruturas e bordas tanto de fontes rasas quanto de fontes profundas (Ferreira *et al.*, 2013). É definido pela seguinte expressão:

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

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MAGNETOMETRIA AÉREA

A partir dos dados disponibilizados pela CPRM, através do “Projeto Aerogeofísico Paraná - Santa Catarina”, foi gerado o mapa do campo magnético anômalo da área de estudo (Figura 6), que varia de 13,9 a 2487,9nT. O mapa apresenta as anomalias da área de estudo e 4 das 9 linhas de voo utilizadas na interpolação. Como explicado anteriormente, para melhor visualização e comparação dos dados foi realizado um recorte nos mapas aéreos.

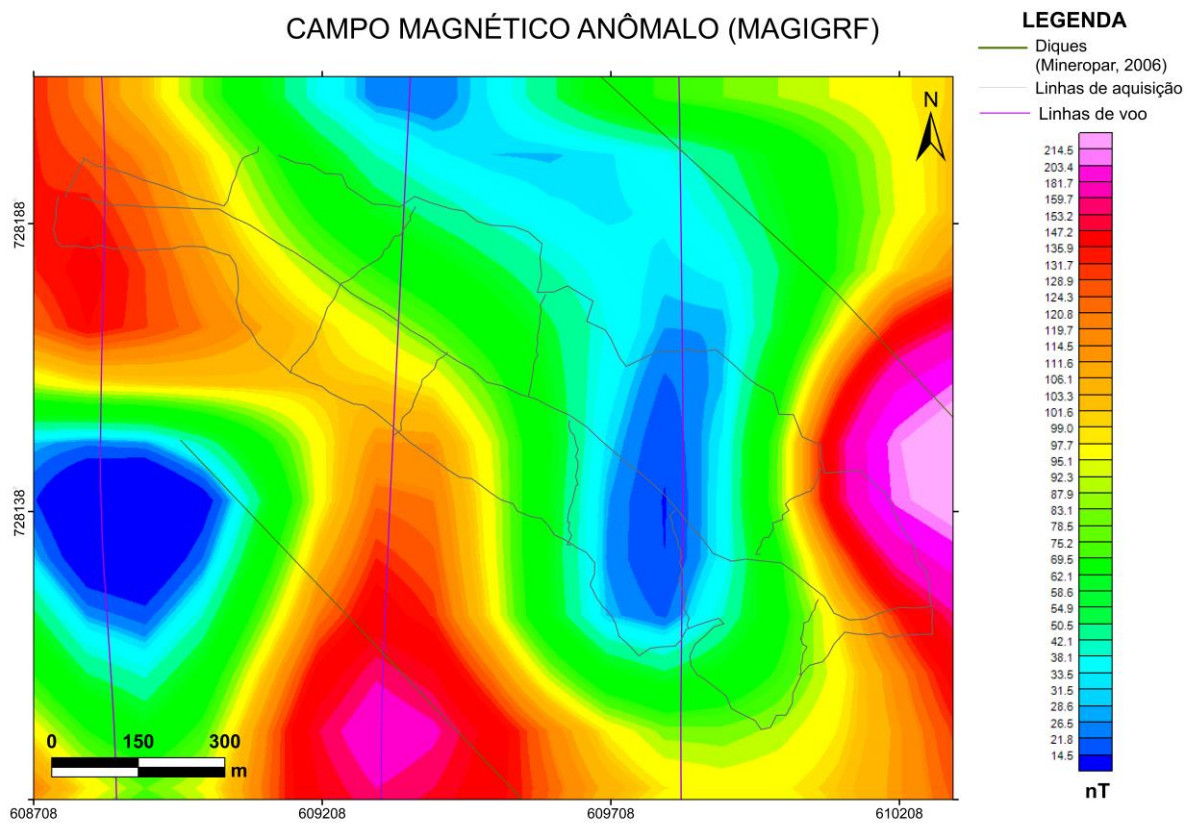


Figura 6. Campo magnético anômalo da área estudo por levantamento magnetométrico aéreo.

Sobre o campo magnético anômalo foi realizada a redução ao polo (RTP), apresentado na Figura 7. 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.

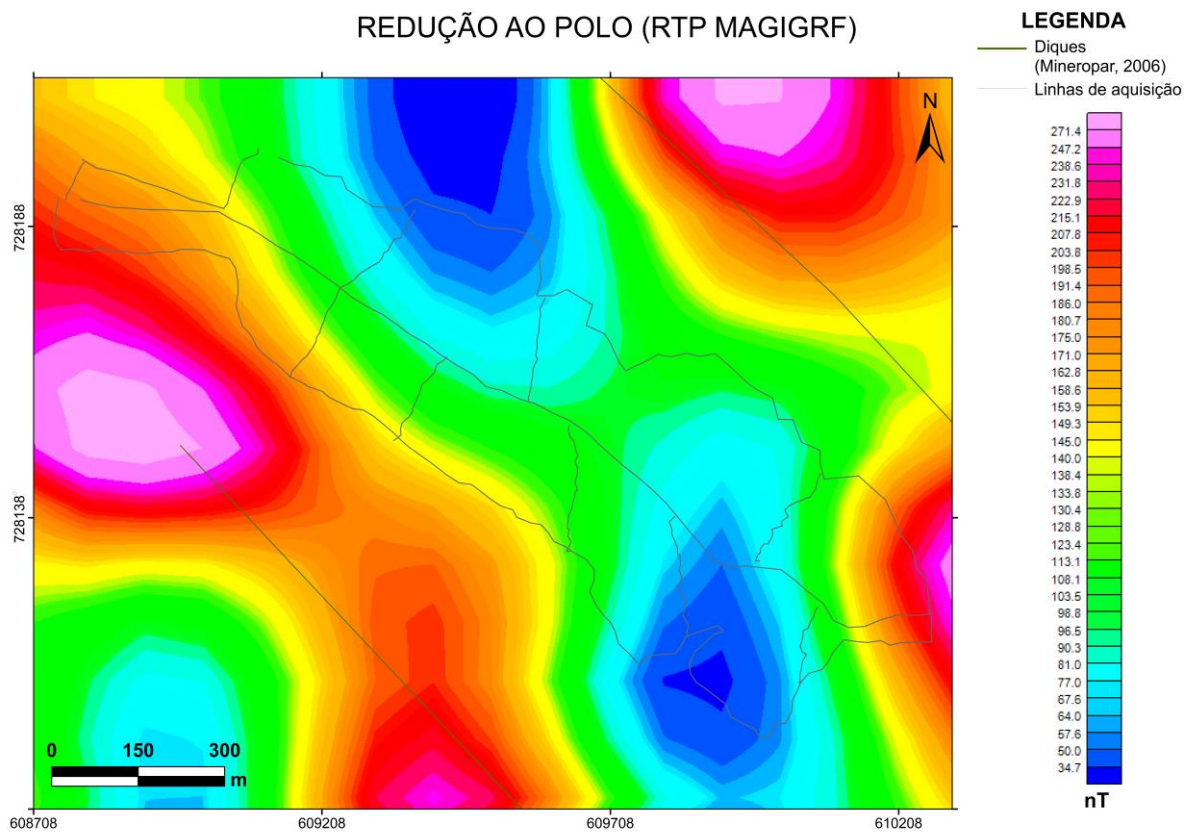


Figura 7. Campo magnético anômalo reduzido ao polo por magnetometria aérea.

A partir o campo magnético anômalo reduzido ao polo, foram realizados processamentos que resultaram na aplicação de quatro filtros principais: 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). O resultado desses processamentos será apresentado a seguir.

A Figura 8 apresenta a aplicação do filtro ASA, na qual as anomalias coincidem parcialmente 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, apenas com esse processamento não é possível saber se as anomalias observadas na imagem são correspondentes ao centro dos corpos ou as bordas. Há uma anomalia na porção sudeste que pode representar um contato geológico, visto que condiz com a geologia regional apresentada pela CPRM (2021), em que há o Granito Piraí do Sul na porção noroeste e o Quartzito Serra das Pedras a sudeste.

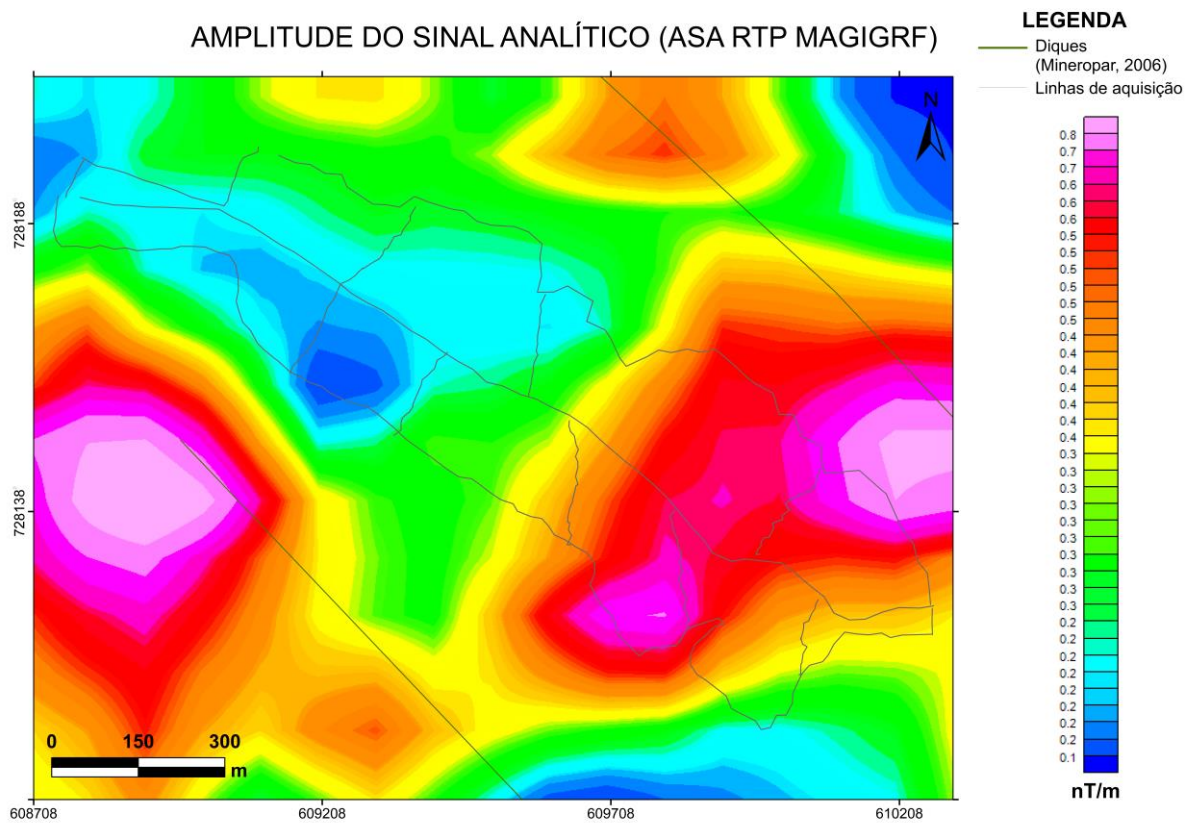
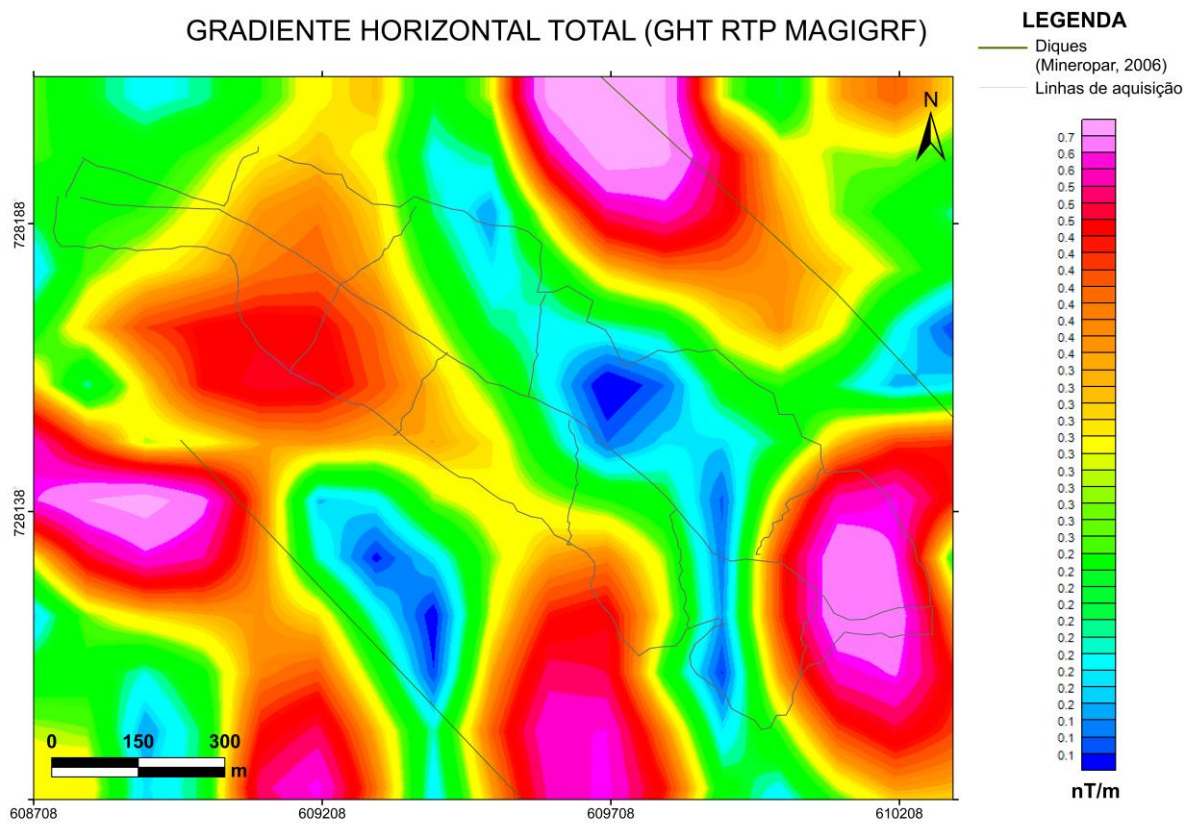


Figura 8. Amplitude do sinal analítico pela magnetometria aérea.

A Figura 9, 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 a as bordas de corpos espessos, sendo compatível com o que foi apresentado pelo ASA e com o dique mapeado nesta região.



A Figura 10 apresenta o ISA, que, no caso da área de estudo, sua interpretação é complementar as informações realçadas pelo GHT, apresentado anteriormente, uma vez que realça o centro das anomalias, independente da profundidade das fontes, enquanto o GHT realçou as bordas dessas mesmas anomalias.

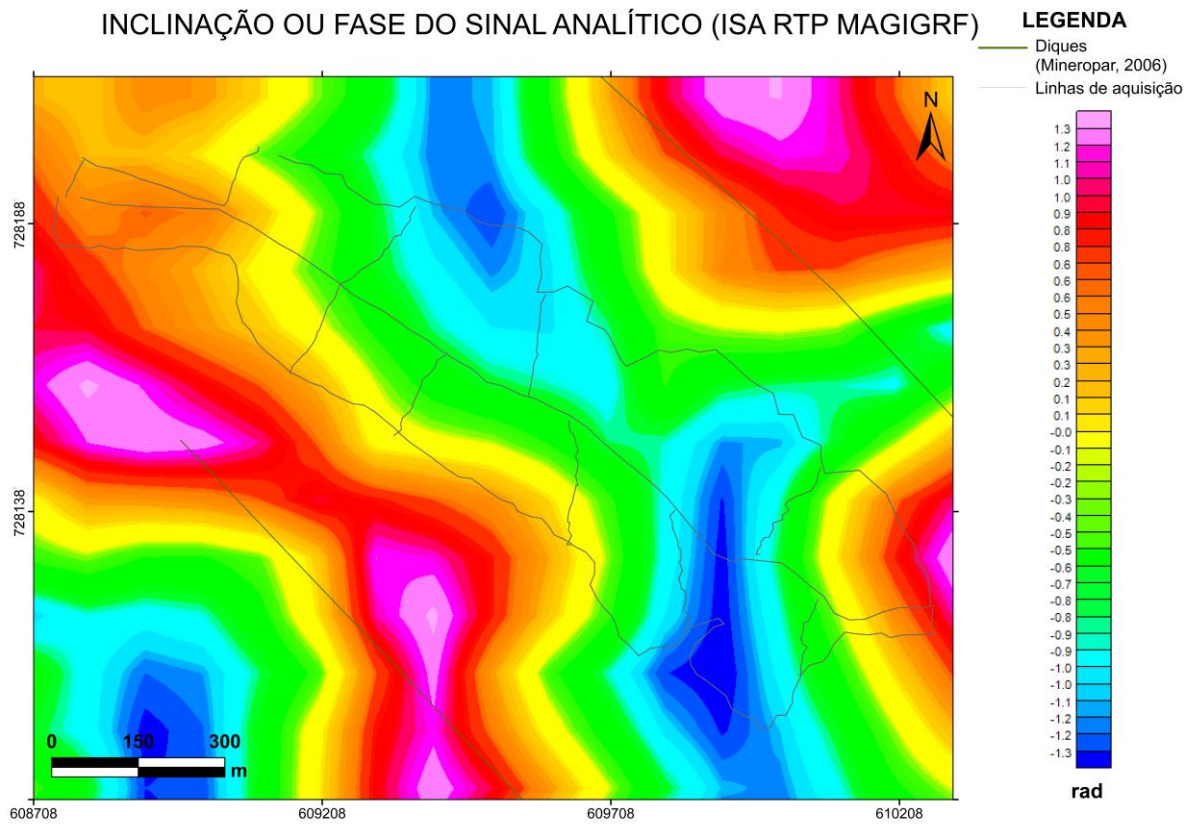


Figura 10. Inclinação ou fase do sinal analítico pela magnetometria aérea.

Por fim, a Figura 11, apresenta o ISA-GHT, que delimita com clareza as bordas dos diques já identificados nas figuras anteriores, mas com mais precisão quanto a geometria desses corpos, diferentemente dos filtros aplicados anteriormente.

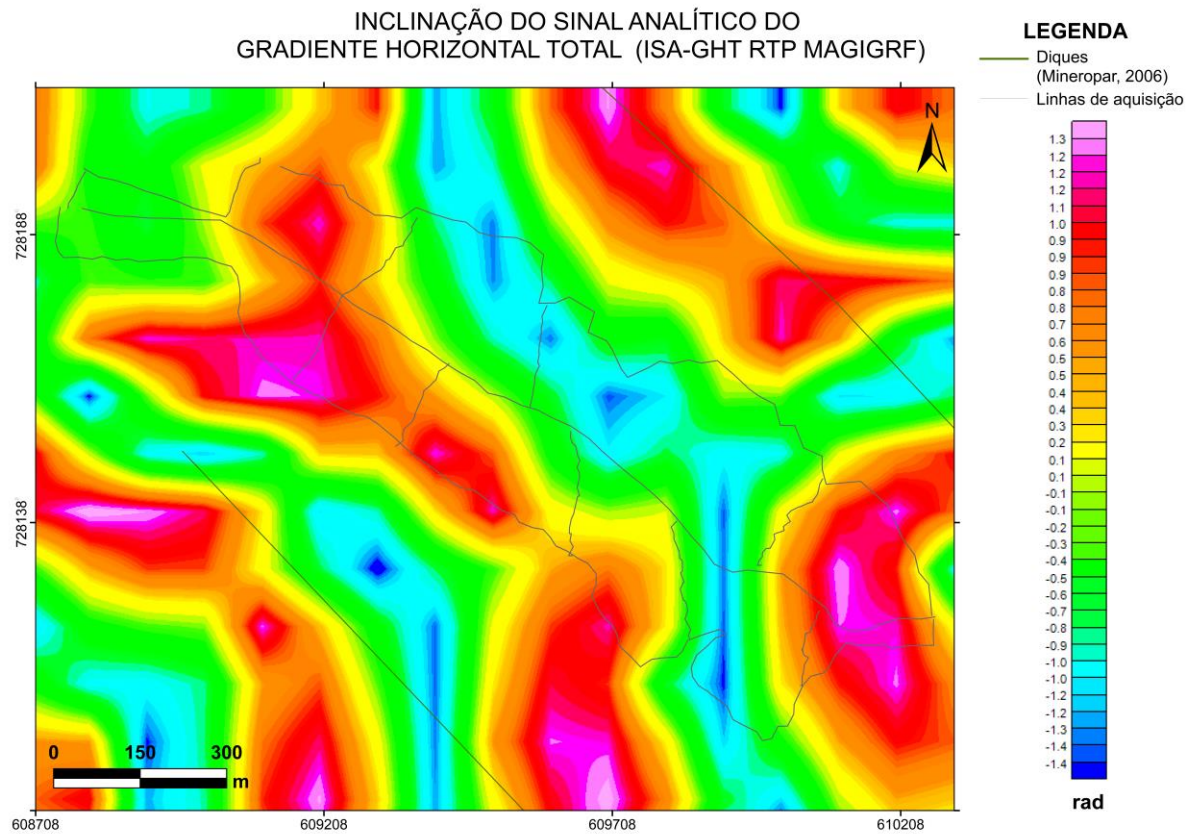


Figura 11. Inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total pela magnetometria aérea.

Conclui-se então que o processamento dos dados magnetométricos aéreos obtidos pela CPRM mostra-se eficaz na determinação dos diques de diabásio presentes na área de estudo. Os quatro filtros utilizados são adequados para a interpretação dos dados geofísicos e determinação dos diques, e pode-se afirmar que são suficientes para a delimitação da geometria dos corpos causadores das anomalias. É importante ressaltar que devido a escala de aquisição dos dados, há uma resolução menor e conseqüentemente um detalhamento melhor, entretanto, esses dados são de extrema importância para orientação de trabalhos mais detalhados, como o de magnetometria terrestre que será apresentado a seguir.

4.2 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 12 apresenta os perfis e estações do levantamento.

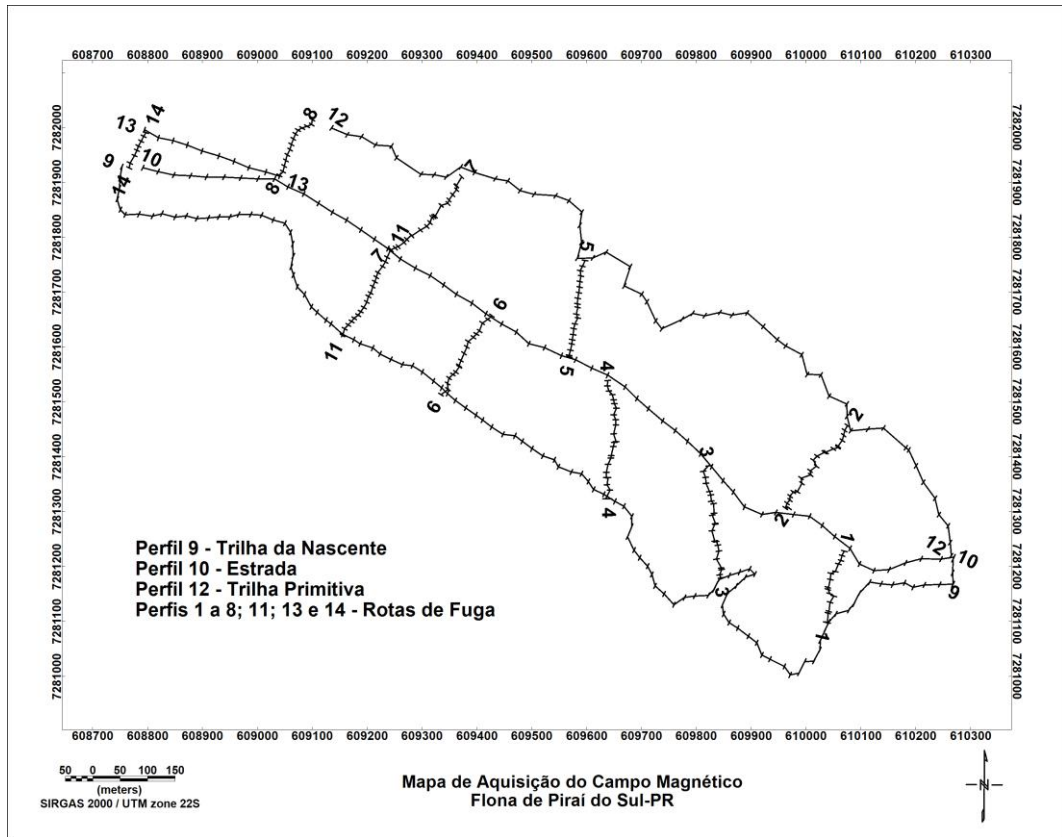


Figura 12. Mapa de localização das linhas e estações de levantamento da magnetometria terrestre.

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, totalizando 2300 metros. As rotas de fuga totalizaram 234 estações separadas a cada 10 metros, o que resultou em um total de 2170 metros. Todo o levantamento resultou em 8070 metros, divididos em 474 estações ao longo de 14 perfis (Tabela 1).

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

| 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 |

O processamento dos dados magnetométricos terrestres, após a remoção do IGRF, resultou em um mapa da interpolação do campo magnético anômalo da área de estudo (Figura 13), que varia entre -1037 a +662nT, evidenciando uma forte magnetização na área de estudo.

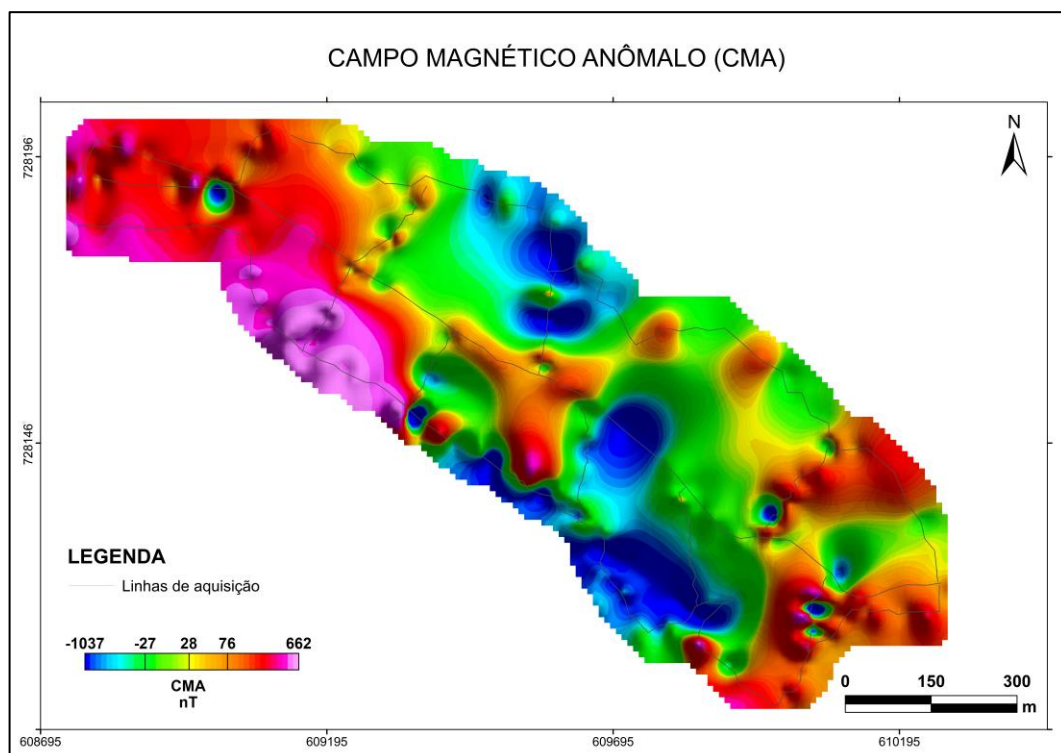


Figura 13. Mapa do campo magnético anômalo (CMA) do levantamento magnetométrico terrestre.

Sobre o CMA, aplicou-se o filtro da amplitude do sinal analítico (ASA), resultando na Figura 14. O valor máximo foi de 66n T/m, validando as altas amplitudes do CMA, apresentadas na Figura 13, e confirmando 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 afirmar que a anomalia citada é um dique de diabásio não aflorante, uma vez que intrusões com essa direção são recorrentes na região, além disso, blocos de diabásio visto em campo ao longo das trilhas de levantamento, corroboram para afirmar a litologia da intrusão. Este dique, 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 na porção sudeste da área de estudo. Essa descontinuidade pode ser interpretada como um contato geológico na direção NE-SW, confirmada em campo, uma vez que há variação no tipo de solo, que é mais argiloso na porção noroeste e torna-se mais arenosa na porção sudeste, sobretudo na Trilha das Nascentes em que há um afloramento de quartzito no extremo sudeste da trilha. A anomalia, somada as evidências de campo confirma o contato geológico entre Granito Piraí do Sul o Quartzito Serra das Pedras citado anteriormente.

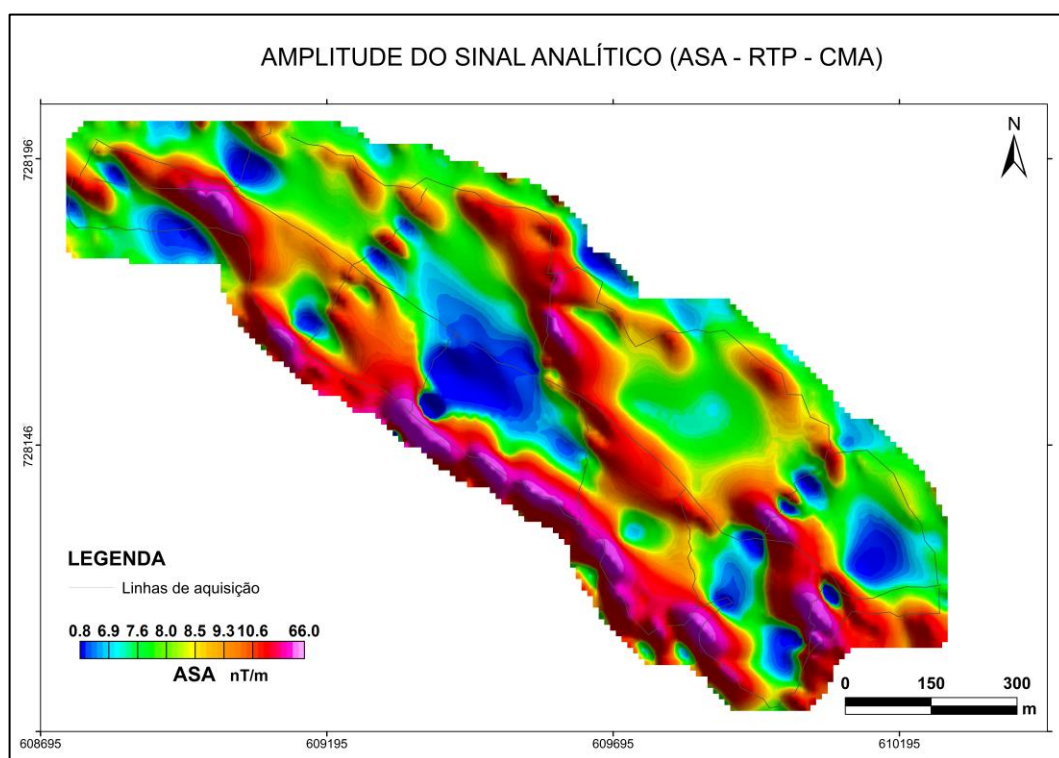


Figura 14. Mapa da amplitude do sinal analítico (ASA) do levantamento magnetométrico terrestre.

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, que apesar de não ser claramente expresso no CMA, foi realçado no ASA e 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 estão associadas ao dique não aflorante (Figura 15).

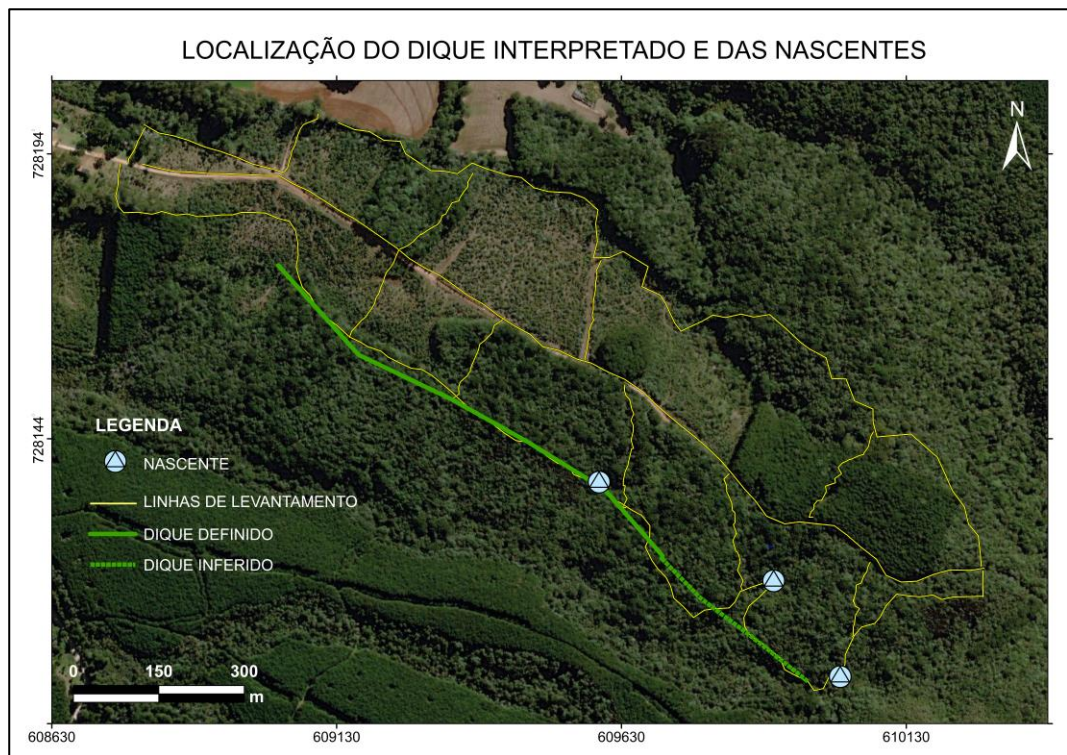


Figura 15. Localização das nascentes e do dique não aflorante.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE A MAGNETOMETRIA AÉREA E A TERRESTRE

Quando comparados os dados adquiridos tanto pela magnetometria aérea (Figura 16A) quanto pela terrestre (Figura 16B), nota-se que ambos os métodos foram eficazes na identificação dos diques de diabásio, sendo mapeado de maneira mais regional na magnetometria aérea e mais detalhado, com uma melhor definição da geometria na magnetometria terrestre.

Em ambos os métodos, quando aplicado o filtro ASA, foi possível determinar uma falha na direção aproximada E-W, ao norte da área, sendo essa estrutura responsável pelo deslocamento que ocorre no dique, o qual que é realçado na magnetometria terrestre.

Na magnetometria aérea, quando aplicado os filtros ASA, GHT e principalmente o ISA, nota-se uma diferença da porção sudeste quando comparadas com a demais áreas. Essa diferença é reforçada na magnetometria terrestre, e coincide com o contato mapeado por Besser *et al.* (2021), sendo um contato geológico na direção NE-SW entre o quartzito Serra das Pedras a noroeste, com o Granito Piraí do Sul a sudeste.

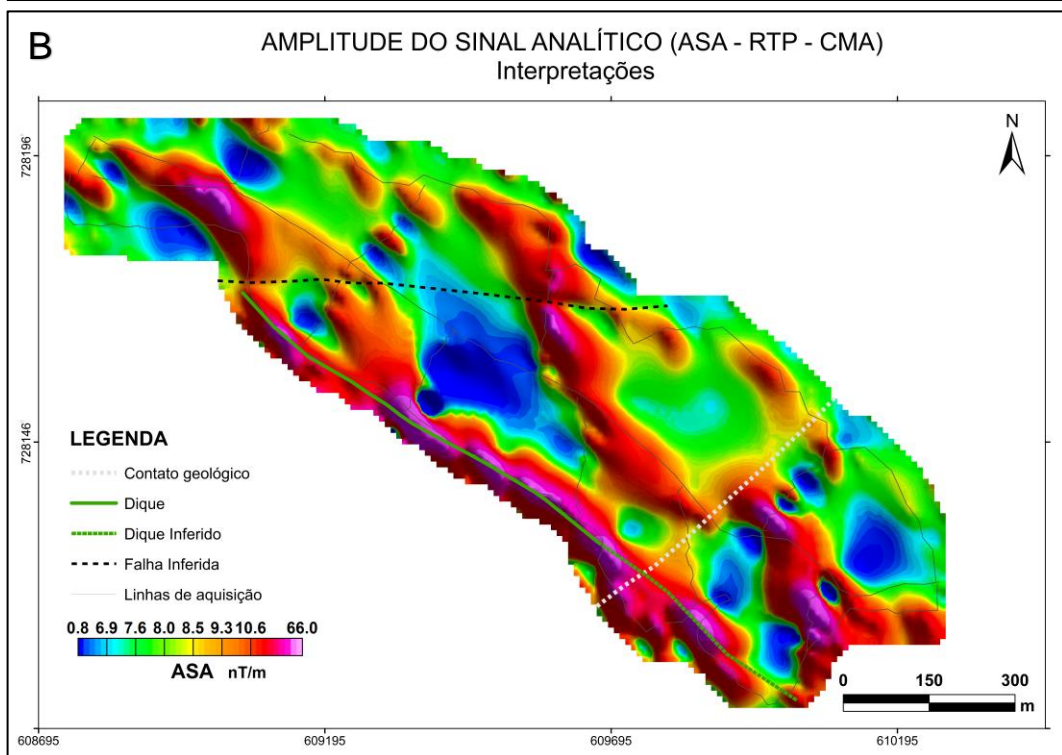
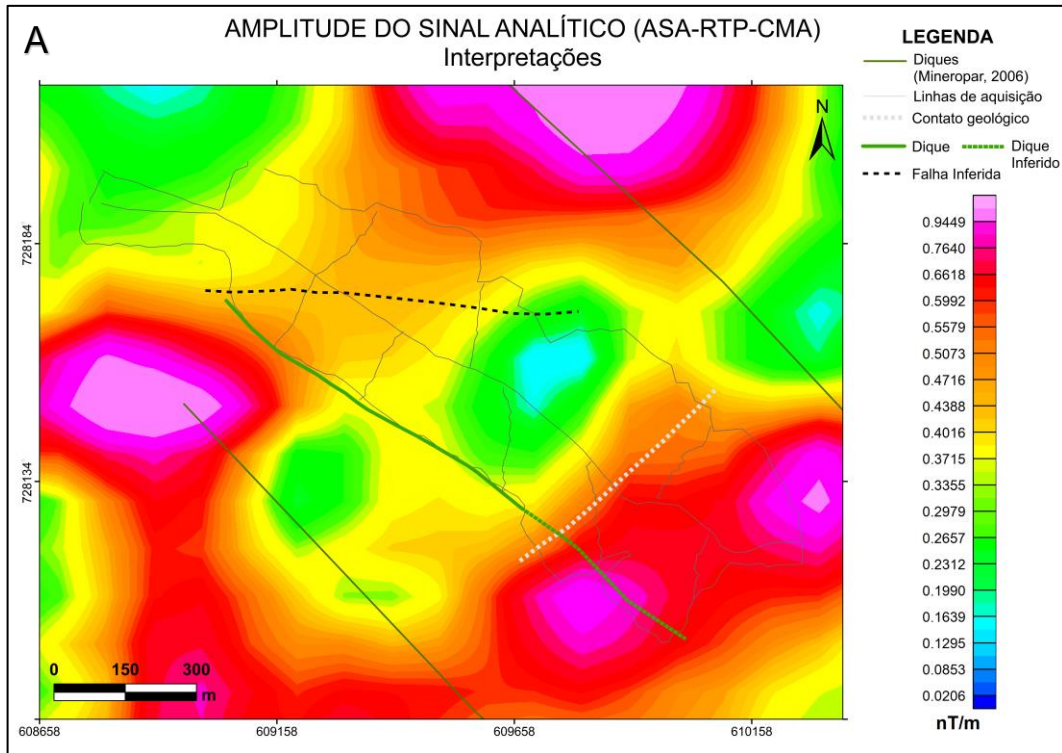


Figura 16. Mapa da amplitude do sinal magnético: A) Pela magnetometria aérea. B) Pela magnetometria terrestre.

6. CONCLUSÕES

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

- Ambos os métodos foram eficazes na determinação do 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.
- O levantamento magnetométrico terrestre é mais detalhado, apresentando maior precisão na localização dos diques e delimitação das estruturas como a falha e o contato geológico.
- Na área de estudo, a formação de nascentes está associada a presença do dique de diabásio não aflorante, identificado pelo método magnético.

REFERÊNCIAS

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.

CPRM, Serviço Geológico do Brasil. 1994 Geofísica em Levantamentos Geológicos no Brasil. Ministério de Minas e Energias, Rio de Janeiro. 171p.

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

CPRM, Serviço Geológico do Brasil. 2021. Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Paraná. CPRM, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22492>. 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., Fruchting, A., Guimarães, G. B., Alves, L. S., Martin, V. M. O., & Ulbrich, H. H. G. J. 2009. Levantamentos Gamaespectrométricos em Granitos Diferenciados. II: O Exemplo do Granito Joaquim Murtinho, Complexo Granítico Cunhaporanga, Paraná. *Geologia USP. Série Científica*, 9(1), 55-72. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2009000100004>

Ferreira F. J. F., Souza J., Bongioiolo 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., Bongioiolo 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.

Guimarães, G. B. 1995. O complexo granítico Cunhaporanga na região de Joaqui 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 Magnetism 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.

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,

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 Cravão de Pedra do Brasil. DNPM. Rio de Janeiro.