

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VINICIUS THEOBALDO JORGE

INTERPRETAÇÃO DE ANOMALIAS MAGNÉTICAS DEVIDO A MÚLTIPLOS DIQUES
NÃO AFLORANTES NOS MUNICÍPIOS DE CASTRO E PIRAÍ DO SUL/PR

CURITIBA

2024

VINICIUS THEOBALDO JORGE

INTERPRETAÇÃO DE ANOMALIAS MAGNÉTICAS DEVIDO A MÚLTIPLOS DIQUES
NÃO AFLORANTES NOS MUNICÍPIOS DE CASTRO E PIRAÍ DO SUL/PR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, como requerimento para obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Saulo Pomponet Oliveira
Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Alessandra de Barros e Silva Bongiolo

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Jorge, Vinicius Theobaldo

Interpretação de anomalias magnéticas devido a múltiplos diques não aflorantes nos municípios de Castro e Piraí do Sul/PR / Vinicius Theobaldo Jorge. – Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia.

Orientador: Saulo Pomponet Oliveira

Coorientador: Alessandra de Barros e Silva Bongioio

1. Geofísica. 2. Diques (Geologia). 3. Anomalias magnéticas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Geologia. III. Oliveira, Saulo Pomponet. IV. Bongioio, Alessandra de Barros e Silva. V. Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **VINICIUS THEOBALDO JORGE** intitulada: **INTERPRETAÇÃO DE ANOMALIAS MAGNÉTICAS DEVIDO A MÚLTIPLOS DIQUES NÃO AFLORANTES NOS MUNICÍPIOS DE CASTRO E PIRAI DO SUL/PR**, sob orientação do Prof. Dr. SAULO POMPONET OLIVEIRA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 14 de Maio de 2024.

Assinatura Eletrônica

15/05/2024 11:26:49.0

SAULO POMPONET OLIVEIRA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

15/05/2024 19:30:38.0

JEFERSON DE SOUZA

Avaliador Externo (SECRETARIA DE ESTADO DA EDUCAÇÃO DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

15/05/2024 14:56:24.0

LUÍS GUSTAVO DE CASTRO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Este trabalho é dedicado ao melhor ser humano que conheci, que tive a oportunidade de poder chamá-lo de pai e que deixou um legado imenso para mim.

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Ao meu pai, porque tive o exemplo de uma pessoa batalhadora, mas também conquistadora.

À todos meus familiares e amigos pelo incentivo e apoio incondicional.

Ao meu orientador Saulo Pomponet Oliveira, minha coorientadora Alessandra de Barros e Silva Bongioiolo, ao Rodoilton Stevanato e toda equipe do LPGA, pelo suporte no meu projeto como um todo.

À UFPR, seu corpo docente, direção e administração por todo o apoio ao longo dos meus anos de mestrado.

O presente estudo foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), além de especial agradecimentos a toda equipe do LPGA, pelo incentivo, colaboração e ensinamentos que me permitiram elaborar todo este estudo e pelo apoio da Fundação Araucária PI 08/2020 - PROGRAMA "NEWTON INTERNATIONAL FELLOWSHIP SCHEME" PIN2020141000001 em conjunto com o 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).

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

"A maior recompensa do homem para o trabalho do homem não é o que ele ganha com isso, mas o que ele se torna com isso" (John Ruskin)

RESUMO

A região de Castro e Piraí do Sul, localizada no centro-norte do estado do Paraná, está inserida no contexto geológico do Supergrupo Açungui, do Grupo Itaiacoca, das Suítes Graníticas Três Córregos e Cunhaporanga, do Grupo Castro, dos Granitóides Ediacaranos, do Arco de Ponta Grossa, e de depósitos aluvionares. Dentre as muitas estruturas geológicas que são encontradas nesses locais, destacam-se os diques de diabásio. Eles são importantes para a compreensão dos processos genéticos endógenos que ocorreram no passado, além de serem marcadores valiosos de ambientes tectônicos. Num contexto mais abrangente, diques são estruturas de formato tabular, que podem ser discordantes ou não em relação à estrutura da rocha encaixante e podendo ter diferentes composições, podendo ser aflorantes ou não. Para o estudo e caracterização desses corpos, a geofísica tem papel fundamental uma vez que diferentes formações e condições geológicas geram diferentes propriedades físicas e o contraste destas são claramente detectáveis. Aplicamos métodos de inversão a dados magnetométricos na região de Castro e Piraí do Sul, obtendo dos diques de diabásio, presentes na região de estudo, seus principais parâmetros. Para investigar e mapear estruturas na área alvo, empregamos dados aeromagnéticos do Levantamento Aerogeofísico Paraná-Santa Catarina realizado pelo Serviço Geológico do Brasil. A partir dos dados aeromagnéticos foram gerados mapas do campo magnético anômalo usando interpolação bidirecional com espaçamento amostral de 125 metros, além de um mapa da Amplitude do Sinal Analítico e um Reduzido ao Polo. Por meio desses mapas, selecionamos quatro subáreas com pouca interferência antrópica para realizar o levantamento geofísico terrestre e produzir perfis magnéticos com maior resolução, estes foram empregados para calcular os parâmetros dos diques (principalmente suas profundidades) por meio de um algoritmo de inversão híbrido baseado nos métodos de Monte Carlo e Levenberg-Marquardt. Comparamos essas estimativas com a deconvolução de Euler e investigamos a precisão da inversão assumindo os modelos de diques largos e finos.

Palavras-chaves: Magnetometria. Modelos de diques. Inversão.

ABSTRACT

The region of Castro and Piraí do Sul, located in the central-north part of the Paraná state, is encompassed within the geological context of the Açungui Supergroup, the Itaiacoca Group, the Três Córregos and Cunhaporanga Granite Suites, the Castro Group, the Ediacaran Granitoids, the Ponta Grossa Arch, and alluvial deposits. Among the numerous geological structures found in these areas, diabase dikes stand out. They are crucial for understanding past endogenous genetic processes, in addition to serving as valuable markers of tectonic environments. In a broader context, dikes are tabular-shaped structures, which may or may not be discordant with the host rock structure and can have different compositions, whether they are outcropping or not. Geophysics plays a fundamental role in the study and characterization of these bodies, as different formations and geological conditions generate different physical properties, and their contrasts are clearly detectable. We applied inversion methods to magnetometric data in the region of Castro and Piraí do Sul, obtaining the main parameters of the diabase dikes present in the study area. To investigate and map structures in the target area, we employed aeromagnetic data from the Paraná-Santa Catarina Aerogeophysical Survey carried out by the Geological Survey of Brazil. From the aeromagnetic data, maps of the anomalous magnetic field were generated using bidirectional interpolation with a grid spacing of 125 meters, as well as a map of the Analytic Signal Amplitude and the reduced-to-the-pole anomaly. Based on these maps, we selected four subareas with little anthropic interference to conduct ground geophysical survey and produce magnetic profiles with higher resolution, which were used to calculate the parameters of the dikes (mainly their depths) through a hybrid inversion algorithm based on the Monte Carlo and Levenberg-Marquardt methods. We compared these estimates with Euler deconvolution and investigated the accuracy of the inversion assuming wide and thin dike models.

Keywords: Magnetometry. Dipping dike model. Inversion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Mapa de localização da área e das subáreas de estudo.	4
FIGURA 2 – Mapa geológico da área e subáreas de estudo.	5
FIGURA 3 – Magnetômetro móvel à esquerda e magnetômetro de base à direita. Fonte: http://www.lpga.ufpr.br . Acesso em 26 de maio de 2023.	11
FIGURA 4 – Mapas do TFA e RTP da área de estudo.	11
FIGURA 5 – Mapa magnético da Amplitude do Sinal Analítico englobando a área e as subáreas do estudo, com os diques mapeados.	13
FIGURA 6 – Ilustração do modelo de dique e da decomposição dos campos de magnetização terrestre e resultante (adaptado de MCGRATH; HOOD, 1970).	14
FIGURA 7 – Ilustração nos quais os valores de r_{min} correspondem aos centros dos diques.	17
FIGURA 8 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao dado sintético sem ruído. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.	21
FIGURA 9 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao dado sintético com ruído. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.	22
FIGURA 10 – (a) Comparação entre o perfil sintético sem ruído e o perfil calcu- lado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando o modelo geométrico dos diques.	23
FIGURA 11 – (a) Comparação entre o perfil sintético sem ruído e o perfil calcu- lado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando o modelo geométrico dos diques.	23
FIGURA 12 – (a) Comparação entre o perfil sintético com ruído e o perfil calcu- lado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando o modelo geométrico dos diques.	25
FIGURA 13 – (a) Comparação entre o perfil sintético com ruído e o perfil calcu- lado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando o modelo geométrico dos diques.	26
FIGURA 14 – Mapa de localização do dique na área da Flona. Fonte: Poi et al. (2023).	27

FIGURA 15 – Mapa de localização do perfil de Piraí-Mirim com os diques interpretados e o filtro ASA.	28
FIGURA 16 – (a) Filtro ASA aplicado ao perfil de Piraí-Mirim figura. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.	29
FIGURA 17 – (a) Comparação entre o perfil da subárea de Piraí-Mirim e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.	30
FIGURA 18 – (a) Comparação entre o perfil da subárea de Piraí-Mirim e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.	30
FIGURA 19 – Mapa de localização do primeiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim (PD1) com os diques interpretados e o filtro ASA. O diagrama à direita indica a posição de PD1 em relação ao perfil geral.	32
FIGURA 20 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao primeiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.	33
FIGURA 21 – (a) Comparação entre o primeiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.	34
FIGURA 22 – (a) Comparação entre o primeiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.	34
FIGURA 23 – Mapa de localização do segundo perfil de detalhe de Piraí-Mirim (PD2) com os diques interpretados e o filtro ASA. O diagrama à direita indica a posição de PD2 em relação ao perfil geral.	36
FIGURA 24 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao segundo perfil de detalhe de Piraí-Mirim . (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.	37
FIGURA 25 – (a) Comparação entre o segundo perfil de detalhe de Piraí-Mirim e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.	38

FIGURA 26 – (a) Comparação entre o segundo perfil de detalhe de Piraí-Mirim e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.	38
FIGURA 27 – Mapa de localização do terceiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim (PD3) com os diques interpretados e o filtro ASA. O diagrama à direita indica a posição de PD3 em relação ao perfil geral.	40
FIGURA 28 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao terceiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.	41
FIGURA 29 – (a) Comparação entre o terceiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.	42
FIGURA 30 – (a) Comparação entre o terceiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.	42
FIGURA 31 – Comparação entre os TFA do perfil geral (a) com os perfis de detalhe (b), considerando o modelo de diques finos.	44
FIGURA 32 – Comparação entre as profundidades do perfil geral (a) com os perfis de detalhe (b), considerando o modelo de diques finos.	45
FIGURA 33 – Comparação entre os TFA do perfil geral (a) com os perfis de detalhe (b), considerando o modelo de diques largos.	45
FIGURA 34 – Comparação entre as profundidades do perfil geral (a) com os perfis de detalhe (b), considerando o modelo de diques largos.	46
FIGURA 35 – Mapa de localização do primeiro perfil de Socavão com os diques interpretados e o filtro ASA.	47
FIGURA 36 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao primeiro perfil de Socavão. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.	48
FIGURA 37 – (a) Comparação entre o primeiro perfil de Socavão e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.	49
FIGURA 38 – (a) Comparação entre o primeiro perfil de Socavão e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.	49

FIGURA 39 – Mapa de localização do segundo perfil de Socavão com os diques interpretados e o filtro ASA.	51
FIGURA 40 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao segundo perfil de Socavão. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.	52
FIGURA 41 – (a) Comparação entre o segundo perfil de Socavão e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.	53
FIGURA 42 – (a) Comparação entre o segundo perfil de Socavão e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.	53
FIGURA 43 – Mapa de localização do primeiro perfil de Tronco com os diques interpretados e o filtro ASA.	55
FIGURA 44 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao primeiro perfil de Tronco. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.	56
FIGURA 45 – (a) Comparação entre o primeiro perfil de Tronco e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.	57
FIGURA 46 – (a) Comparação entre o primeiro perfil de Tronco e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.	57
FIGURA 47 – Mapa de localização do segundo perfil de Tronco com os diques interpretados e o filtro ASA.	59
FIGURA 48 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao segundo perfil de Tronco. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.	60
FIGURA 49 – (a) Comparação entre o segundo perfil de Tronco e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.	61
FIGURA 50 – (a) Comparação entre o segundo perfil de Tronco e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.	61

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Parâmetros obtidos pelo modelo de diques finos no experimento sem ruído.	24
TABELA 2 – Parâmetros obtidos pelo modelo de diques largos no experimento sem ruído.	24
TABELA 3 – Parâmetros obtidos pelo modelo de diques finos no experimento com ruído.	25
TABELA 4 – Parâmetros obtidos pelo modelo de diques largos no experimento com ruído.	25
TABELA 5 – Parâmetros obtidos no perfil - Piraí-Mirim via diques finos.	31
TABELA 6 – Parâmetros obtidos no perfil - Piraí-Mirim via diques largos.	31
TABELA 7 – Parâmetros obtidos no primeiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim via diques finos.	35
TABELA 8 – Parâmetros obtidos no primeiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim via diques largos.	35
TABELA 9 – Parâmetros obtidos no segundo perfil de detalhe de Piraí-Mirim via diques finos.	39
TABELA 10 – Parâmetros obtidos no segundo perfil de detalhe de Piraí-Mirim via diques largos.	39
TABELA 11 – Parâmetros obtidos no terceiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim via diques finos.	43
TABELA 12 – Parâmetros obtidos no terceiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim via diques largos.	43
TABELA 13 – Parâmetros obtidos no primeiro perfil de Socavão via diques finos.	50
TABELA 14 – Parâmetros obtidos no primeiro perfil de Socavão via diques largos.	50
TABELA 15 – Parâmetros obtidos no segundo perfil de Socavão via diques finos.	54
TABELA 16 – Parâmetros obtidos no segundo perfil de Socavão via diques largos.	54
TABELA 17 – Parâmetros obtidos no primeiro perfil de Tronco via diques finos.	58
TABELA 18 – Parâmetros obtidos no primeiro perfil de Tronco via diques largos.	58
TABELA 19 – Parâmetros obtidos no segundo perfil de Tronco via diques finos.	62
TABELA 20 – Parâmetros obtidos no segundo perfil de Tronco via diques largos.	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	ÁREA DE ESTUDO	4
2.1	CONTEXTO GEOLÓGICO	5
3	MATERIAIS E MÉTODOS	10
3.1	MAPAS AEROMAGNETOMÉTRICOS	11
3.2	MODELO DE DIQUES MÚLTIPLOS	14
3.3	MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE PROFUNDIDADE	16
3.4	INVERSÃO DOS DADOS	18
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
4.1	PERFIS SINTÉTICOS	21
4.1.1	Modelos sem ruído	23
4.1.2	Modelos com ruído	25
4.2	PERFIS DA ÁREA DE ESTUDO	27
4.2.1	Perfil Flona	27
4.2.2	Perfil Pirá-Mirim	28
4.2.3	Perfil Pirá-Mirim de detalhe	32
4.2.3.1	Primeiro perfil - PD1	32
4.2.3.2	Segundo perfil - PD2	36
4.2.3.3	Terceiro perfil - PD3	40
4.2.4	Comparação entre o perfil geral e os de detalhe de Pirá-Mirim	44
4.2.4.1	Comparação pelo modelo de diques finos	44
4.2.4.2	Comparação pelo modelo de diques largos	45
4.2.5	Perfil Socavão	47
4.2.5.1	Primeiro perfil	47
4.2.5.2	Segundo perfil	51
4.2.6	Perfil Tronco	55
4.2.6.1	Primeiro perfil	55
4.2.6.2	Segundo perfil	59
5	CONCLUSÕES	63
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

Durante o Eocretáceo, a Bacia do Paraná foi coberta por um vulcanismo fissural que resultou em extensas erupções de magmas de composição ácida, intermediária e básica, que fazem parte do grupo Serra Geral, que recobre as formações sedimentares da referida Bacia (MILANI; RAMOS et al., 1998), no qual estão inseridos os diques do Arco de Ponta Grossa, objetos deste estudo.

Os diques são formações geológicas compostas por rochas ígneas de composição basáltica, geralmente formadas por diabásio. Eles são intrusões que se solidificaram em fraturas ou fissuras da crosta terrestre, geralmente cortando outras formações rochosas. Os diques são caracterizados por sua aparência tabular e textura geralmente homogênea, podendo ser aflorantes ou não. Eles são importantes para a compreensão dos processos genéticos endógenos que ocorreram no passado, serem marcadores valiosos de ambientes tectônicos e além disso, são fundamentais para estabelecer relações estratigráficas, analisar deformações na crosta terrestre e aprofundar o conhecimento sobre processos mantélicos e tectônicos (DA COSTA, 2003). Estas estruturas fazem parte do contexto da Bacia intracratônica do Paraná, com uma área aproximada de 1.500.000 km² e uma espessura média em torno de 7.000 m (MILANI; RAMOS et al., 1998).

A ampla distribuição geográfica dos diques ficou evidente ao serem compilados mapas regionais e dados de levantamentos aeromagnéticos. A persistência de anomalias lineares, conhecidas como lineamentos magnéticos, por centenas de quilômetros ou mais, foi interpretada como resultado de grandes corpos tabulares predominantemente verticais com uma magnetização contrastante em relação às rochas encaixantes, com isso é possível realizar uma interpretação qualitativa, onde são identificadas estruturas com um predomínio na direção geral NW-SE.

A propriedade magnética é causada pela presença considerável de minerais magnéticos com alta susceptibilidade na composição da rocha. Para avaliar essas propriedades, é necessário medi-la, pois a mesma será influenciada pela quantidade, tamanho e distribuição dos minerais magnéticos, como magnetita, presentes na rocha. Esse mineral está disperso em uma matriz de minerais paramagnéticos e diamagnéticos, predominantemente representada por silicatos. A magnetização pode ser classificada em dois tipos: induzida, resultante da influência do campo magnético da Terra, e remanente, adquirida ao longo da história geológica do planeta. Nos estudos de prospecção, os valores medidos são resultantes da soma vetorial dessas duas magnetizações (TELFORD et al., 1990; REYNOLDS, 2011).

Ussami et al. (1991) analisou a magnetização de rochas no norte do estado do Paraná e integrou a magnetometria terrestre e aérea para identificar os diques do Arco de Ponta Grossa. Foi desenvolvida uma abordagem para remodelar anomalias magnéticas geradas por diques e neutralizar a influência da direção de magnetização como por exemplo estudado no oeste da Austrália (DE SOUZA et al., 2020).

Cavalcante et al. (2020) desenvolveu um método para conduzir a inversão de dados magnéticos ao longo de perfis que intersectam o enxame de diques do Arco de Ponta Grossa e correlacionou com a existência de poços tubulares profundos, sugerindo que a produtividade dos mesmos são mais eficientes em função da proximidade dos diques. Cavalcante (2024) elaborou um método para identificar e caracterizar os parâmetros de fontes tabulares com anomalias magnéticas dos diques, cuja metodologia foi aplicada em áreas do sudoeste do estado do Paraná em situações em que os diques são aflorantes ou não.

Neste trabalho foi empregado o método magnetométrico, que consiste em medir o campo magnético terrestre para a detecção de rochas e estruturas (DENTITH; MUDGE, 2014), essas medições são realizadas por equipamentos denominados magnetômetros que são usados para medir a intensidade do campo magnético, devido a diferentes características geológicas e minerais presentes nas rochas. (LOWRIE; FICHTNER, 2020).

No caso de corpos intrusivos tabulares, como os diques, a interpretação de mapas magnéticos geralmente é empregada na localização destas estruturas (qualitativa) e determinar a profundidade, mergulho e largura das fontes causadoras (semi-quantitativa). Alguns exemplos de técnicas qualitativas úteis para o estudo de diques são os trabalhos de Ferreira et al. (2013), Castro et al. (2018) e Verduzco et al. (2004), enquanto que para os métodos semi-quantitativos, convém destacar os estudos desenvolvidos por Ram Babu et al. (1986), Beiki e Pedersen (2012), Cooper (2015) e de Souza et al. (2024). Métodos de interpretação de dados magnéticos são extensivamente utilizados no mapeamento geológico, oferecendo inferências de profundidade para a elaboração de modelos mais detalhados através da inversão dos dados.

O presente trabalho é fruto de ensaios geofísicos e da modelagem computacional realizados nas áreas dos municípios de Castro e Piraí do Sul, ambos no estado do Paraná, os quais contaram com a aquisição de dados e posterior processamento e interpretação. A aplicação da inversão visou determinar a ocorrência de diques de diabásio e seus principais parâmetros. Com isso esta pesquisa faz parte de um elenco maior de atividades vinculadas ao projeto *Supporting Sustainable Groundwater Supply Management in Brazil* financiado pelo *Newton Fund Impact Scheme* e desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) com apoio da Universidade Federal do Paraná (UFPR) através do Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA) e com

a Universidade de São Paulo (USP). O método aplicado consiste em um esquema de inversão de perfis magnéticos, assumindo que o campo anômalo é gerado por um conjunto de diques.

Neste contexto, o objetivo principal deste estudo é desenvolver um método para inversão de dados magnéticos terrestres em subáreas selecionadas situadas nos municípios de Castro e Piraí do Sul/PR, além de aprimorar e contribuir com os métodos existentes.

Os objetivos específicos deste estudo foram os seguintes:

- Aplicar filtros de realce de anomalias aos dados aeromagnéticos da área de estudo, e realizar levantamentos magnéticos terrestres nas subáreas selecionadas;
- Aplicar algoritmos de inversão a perfis terrestres obtidos nas subáreas e
- Estudar e comparar os modelos de dique fino e dique largo, elencando vantagens e desvantagens de cada modelo e comparar as estimativas de profundidade dos resultados obtidos com métodos de estimativa de profundidade.

A principal contribuição do presente trabalho, do ponto de vista teórico, é confrontar os métodos para inversão de perfis magnéticos que utilizam o modelo de diques finos com aqueles que utilizam modelos de diques largos, além de adotar uma estratégia híbrida de inversão (ou seja, combinar métodos globais com métodos locais), que é amplamente utilizada na inversão de dados sísmicos e de resistividade (SEN; STOFFA, 2013) mas pouco difundida na inversão de dados potenciais.

2 ÁREA DE ESTUDO

Toda a aquisição de dados se deu nos municípios de Castro e Piraí do Sul, que se localizam na região centro oriental do estado do Paraná a aproximadamente 160 km de Curitiba via BR 277, depois trafegando pela BR 376 até Ponta Grossa e por fim PR 151 para acessar as subáreas de estudo. A área de estudo abrange cerca de 3 480,15 km² e foram selecionadas quatro subáreas denominadas Piraí-Mirim, Flona, Socavão e Tronco que compreendem 17,53 km², 85,12 km², 108,75 km² e 67,58 km², respectivamente, que foram selecionadas tomando por base a pouca interferência antrópica nesses locais e a facilidade de acesso. A localização da área e suas subáreas estão delimitadas por polígonos na cor preta, todas estas visualizadas na Figura 1.

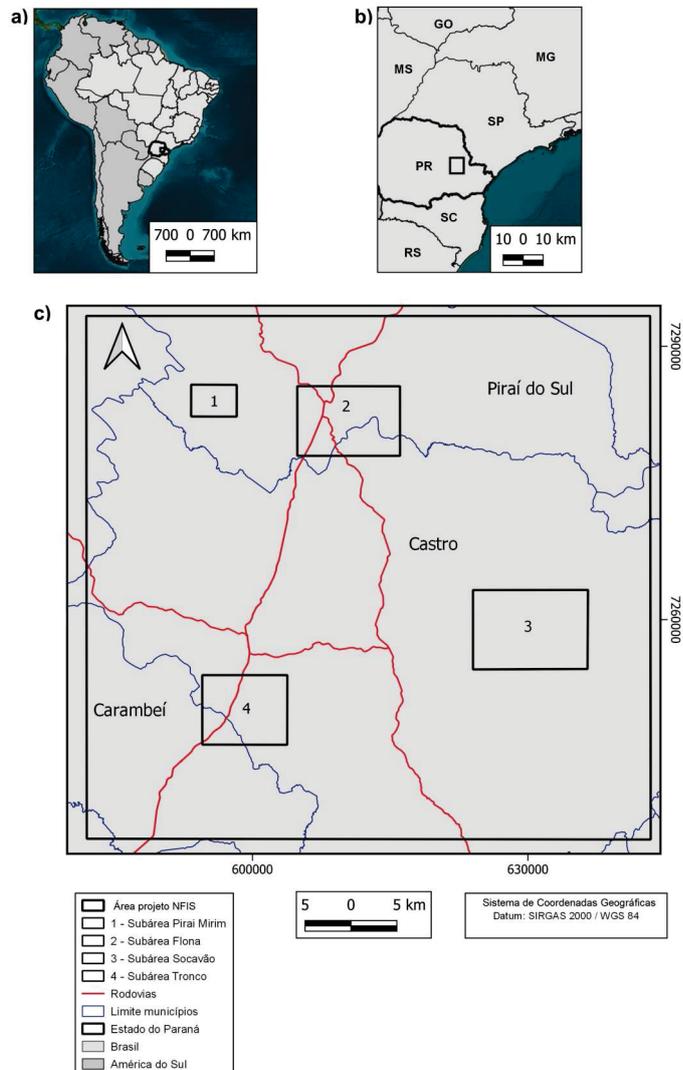


FIGURA 1 – Mapa de localização da área e das subáreas de estudo.

2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO

O contexto geológico referente a área de estudo deste trabalho foi extraído do Mapa Geológico atualizado segundo Besser et al. (2021), abrangendo um polígono localizado na porção centro norte do estado do Paraná, Figura 2, que engloba as 4 subáreas do referente estudo.

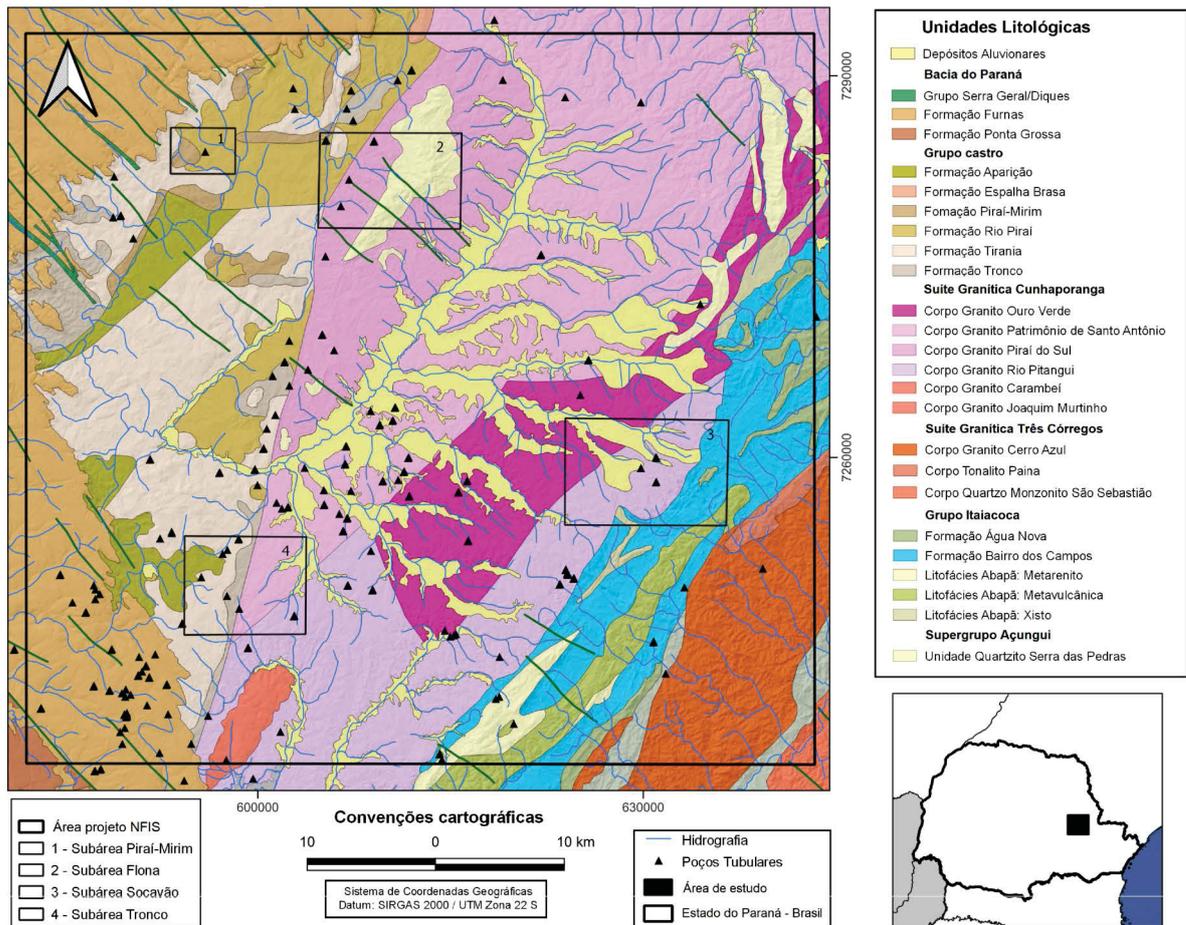


FIGURA 2 – Mapa geológico da área e subáreas de estudo.

Em termos regionais, a área engloba rochas do Supergrupo Açungui, do Grupo Itaiacoca, das Suítes Graníticas Três Córregos e Cunhaporanga, do Grupo Castro, dos Granitoides Ediacaranos, da Bacia do Paraná e dos depósitos aluvionares.

O Supergrupo Açungui (FIORI et al., 1987) é representado apenas pela Unidade Quartzito Serra das Pedras do período Toniano, formado basicamente por quartzo com muscovita e biotita subordinados, limitado a leste por rochas da suíte granítica Cunhaporanga e a Oeste pelas rochas do Grupo Castro (GUIMARÃES, 2000).

O Grupo Itaiacoca (SOUZA, 1990) é constituído pelas Formações Água-Nova e Bairro dos Campos do período Toniano e a Formação Abapã que é dividida na Litofácies xisto composta por sericita xisto, muscovita xisto, metarcóseo, clorita-sericita xisto e filito, na Litofácies metavulcânica onde se encontram metatraquitos com sanidina e podendo apresentar textura variolítica ou maciça, além de rochas metavulcanoclásticas intercaladas e na Litofácies metarenito em que predominam metarenitos e metarenitos feldspáticos, todas estas do Período Ediacarano. Rodrigues et al. (2011) considera a Formação Abapã e suas unidades como sendo o topo do Grupo Itaiacoca. A Formação Água-Nova tem em sua composição filitos e metarritmitos, com intercalações de metacalcários, metarenitos e metabasitos. A Formação Bairro dos Campos é composta por metacalcários dolomíticos, localmente com estromatólitos colunares, intercalações de metamarga, calcifilito, filito carbonático e metarenito. De acordo com Reis Neto (1994), o Grupo Itaiacoca passou por 4 fases metamórficas: a primeira caracterizada por um metamorfismo regional onde se atingiu a fácies xisto verde, formando principalmente os metadolomitos. A segunda fase caracterizada por um metamorfismo hidrotermal onde houve transformação dos metadolomitos em talco xistos. A terceira fase caracterizada pelo metamorfismo termal I, onde há o contato intrusivo do Complexo Granítico Cunhaporanga na borda NW do Grupo Itaiacoca, formando mármore brancos, todas estas durante o Ciclo Brasileiro. Na última fase tem-se o metamorfismo termal II no Cretáceo, onde os contatos com diques de diabásio formaram mármore brancos.

Na Suíte Granítica Três Córregos (GIMENEZ FILHO, 1993) fazem parte o corpo Granito Cerro Azul, o corpo Tonalito Paina e o corpo Quartzo Monzonito São Sebastião do período Toniano. O corpo Granito Cerro Azul pode ser caracterizado como um quartzo monzonito, monzogranito, granodiorito e sienogranito do tipo I, porfirítico e fanerítico com granulação média a muito grossa, podendo ser calcioalcalino de alto K, o corpo Quartzo Monzonito São Sebastião é um hornblenda-biotita de cor cinza, leucocrático de granulação grossa e insere-se nesse contexto. O corpo Tonalito Paina é um hornblenda-biotita de cor cinza escuro, leucocrático, inequigranular médio. A Suíte Granítica Três Córregos apresenta um formato alongado com direção preferencial NE-SW, podendo ser classificada como tardi a pós-tectônica, sendo que considera-se que a Suíte formou-se nos estágios finais do orógeno responsável pelo dobramento e metamorfismo do Supergrupo Açungui, limitada por zonas de cisalhamento dúcteis com sucessão escalonada e que isolaram o Grupo Itaiacoca (SOUZA, 1990).

A Suíte Granítica Cunhaporanga (GUIMARÃES, 2000) engloba o corpo Granito Ouro Verde, o Granito Patrimônio de Santo Antônio, o Granito Piraí do Sul, o Granito Rio Pitangui também do mesmo período, além de alguns granitoides Ediacaranos representados pelo Granito Carambeí e o Granito Joaquim Murtinho. O Granito Ouro Verde é um granito do tipo I, apresenta granulação média a grossa, sendo calcialcalino de alto K. O Granito Patrimônio de Santo Antônio é um sienogranito variando a

monzogranito porfirítico do tipo I, calcialcalino de alto K. O Granito Piraí do Sul é um monzogranito, localmente podendo ser um diorito, de cor cinza com sua granulação variando de inequigranular a equigranular média. O Granito Rio Pitangui é um granodiorito, localmente podendo ser um monzogranito porfirítico. Os granitoides Ediacaranos são representados pelo Granito Carambeí que é um biotita álcali-feldspato granito, localmente sendo um sienogranito, de cor avermelhada, hololeucocrático equigranular e pelo Granito Joaquim Murquinho que é um hematita álcali-feldspato granito e subordinadamente sienito, de cor marrom avermelhada, hololeucocrático equigranular fino. Segundo Guimarães (2000), em termos regionais, a Suíte Granítica Cunhaporanga insere-se em um contexto de amalgamação de diversos terrenos ao final do Ciclo Brasileiro entre o Neoproterozoico ao Eopaleozoico, que culminaram na formação do supercontinente Gondwana abrangendo uma grande diversidade composicional, textural e estrutural de rochas graníticas. Prazeres Filho (2000) classifica a Suíte Granítica Cunhaporanga como do tipo I, com forte tendência calcioalcalina e composta por rochas calcioalcalinas de alto K, metaluminosas a fracamente peraluminosas.

O Grupo Castro (MARINI et al., 1967) é representado pelas Formações Rio Piraí, Piraí-Mirim, Tirania, Aparição, Espalha Brasa e Tronco, sendo todas elas do período Cambriano. A Formação Rio Piraí é composta por siltito de cor avermelhada, laminado, com camadas milimétricas de arenito intercaladas, além da presença de muscovita detrítica, a Formação Piraí-Mirim é composta por conglomerados vulcanoclásticos, com seixos de rochas vulcânicas do Grupo Castro, a Formação Tirania possui riolitos e rochas piroclásticas associadas a um vulcanismo ácido, a Formação Aparição é composta por tufo finos intercalados com níveis de arenito apresentando retrabalhamento fluvial, a Formação Espalha Brasa apresenta conglomerados provenientes de leques aluviais, com seixos de granito porfirítico, quartzito e mica xisto e por último a Formação Tronco é composta por basaltos amigdaloidais, com matriz afanítica a muito fina, associada a um vulcanismo máfico. Prazeres Filho (2000) considera a origem do Grupo Castro associada a uma tectônica de colapso de um cinturão orogênico no final do Ciclo Brasileiro e transicionando para um novo regime extensional entre 510 Ma – 490 Ma. Moro (1993) reconheceu quatro associações no Grupo Castro, a primeira considerada vulcânica intermediária-ácida, a segunda como sedimentar inferior, a terceira sendo sedimentar superior e a última, uma associação vulcânica ácida. As unidades vulcânicas são constituídas por riolitos, andesitos e rochas piroclásticas diversas, já as rochas sedimentares são essencialmente clásticas, imaturas, de deposição continental como conglomerados, arcóseos, siltitos e lamitos e é classificada como bacia do tipo vulcano-sedimentar.

No contexto da Bacia do Paraná temos a Formação Ponta Grossa e a Formação Furnas, que se inserem na supersequência Paraná de idade Devoniana, como também as rochas do Grupo Serra Geral, de idade Jurássica-Cretácea (MILANI, 1997) principal litologia estudada nesse trabalho.

A Formação Furnas sobrepõe de forma discordante unidades de diferentes composições e idades, variando de rochas magmáticas e metamórficas Pré-Cambrianas, até rochas Silurianas. Predominam nessa formação, subarcóseos e árcoseos de granulometria média a grossa caulíníticos, texturalmente imaturos, arenitos conglomeráticos e conglomerados quartzosos. Encontram-se também, arenitos de granulometria fina, interdigitados com argilitos, siltitos e folhelhos, verifica-se estratificações cruzadas planares/acanaladas, cruzadas cavalgantes e hummockys que são correspondentes a um ambiente transicional, com depósitos de deltas de rios entrelaçados e litorâneos (ASSINE et al., 1994). A Formação Ponta Grossa é composta por folhelhos e siltitos ferruginosos, de cor cinza a cinza-esverdeados, subordinadamente amarelados e avermelhados, com intercalações de arenitos finos a muito finos, preferencialmente ferruginosos, cinza esverdeados, esbranquiçados e/ou amarelados. Folhelhos e siltitos são físseis, muito fraturados e micáceos, com estratificação plano-paralela milimétrica a centimétrica até métrica verificada nos siltitos, ocorrem também arenitos finos a muito finos, bem selecionados, grãos de quartzo subangulosos a angulosos, com baixa esfericidade, argilosos e micáceos, além de muscovitas com estratificação plano-paralela. Em determinados locais podem ser encontrados microfósseis como trilobitas, braquiópodos e tentaculites e microfósseis como acritarcas e quitinozoários (MILANI, 1997).

Já os diques máficos são correlatos ao Grupo Serra Geral de idade Jurássica-Cretácea, normalmente com espessuras centimétricas até métricas e orientação preferencial N40-60W, estes são compostos por diabásios equigranulares finos a médios ou, em menores proporções, dioritos e quartzo monzodioritos (MARINI et al., 1967). Milani et al. (2007) descrevem os diques básicos mesozoicos, sendo que estes apresentam direção principal em torno de N50-60W e suas extensões podem chegar a vários quilômetros. São compostos predominantemente por diabásios, dioritos pórfiros e quartzo dioritos, se inserindo no contexto do Arco de Ponta Grossa. Durante o mesmo período de tempo, soleiras e diques de diabásio, sendo estes últimos conhecidos como Enxame de Diques do Arco de Ponta Grossa, intrudiram as rochas neopaleozóicas da bacia do Paraná, especialmente aquelas das formações Rio Bonito e Irati, e em menor medida do Grupo Itararé, além das rochas do embasamento cristalino. Este enxame de diques é a característica geológica mais proeminente dos alinhamentos estruturais, que se orientam predominantemente entre N50W e N60W, com extensões variando de alguns metros a várias dezenas de quilômetros, tendo sido formados entre 129 e 131 milhões de anos atrás. Simultaneamente ao magmatismo básico, ocorreu

um período de magmatismo alcalino na área. A Província Alcalina do Arco de Ponta Grossa inclui numerosos corpos intrusivos (plugs, stocks), totalizando cerca de quinze intrusões simples ou complexas (MILANI et al., 2007). Além do mais os diques na Bacia do Paraná têm origem vulcânica. Durante períodos de intensa atividade vulcânica, o magma subiu das profundezas da Terra e se infiltrou nas camadas sedimentares existentes na bacia. Quando o magma esfriou e solidificou, formou diques de basalto, uma rocha ígnea vulcânica escura e de textura fina. O basalto é rico em minerais ferromagnesianos, como a olivina e a augita. São distribuídos por toda a extensão da Bacia, que abrange principalmente o sul do Brasil, mas também se estende para o Paraguai e a Argentina. Eles cortam através das camadas sedimentares, criando relevos lineares e elevações na paisagem e têm uma influência significativa na geologia da região. Eles afetam a topografia local, criando características geológicas distintas. A atividade vulcânica que deu origem aos diques na Bacia do Paraná ocorreu durante o período Cretáceo, entre aproximadamente 135 e 65 milhões de anos atrás (MILANI et al., 2007).

Por fim, são verificados os depósitos aluvionares que incluem sedimentos areno-argilosos inconsolidados, finos a médios, com cores variadas, restos de matéria orgânica e presença de seixos, areias finas a grossas, com níveis de cascalhos, lentes de material silto-argiloso, relacionados a planícies de inundação, margens, barras de canal e canais fluviais atuais, localmente podem conter matacões (BRITO MAPA et al., 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos objetivos propostos, o trabalho foi dividido em três fases sendo elas:

- I) Delimitação da área de estudo e das subáreas para detalhamento;
- II) Análise, processamento e interpretação dos dados aeromagnéticos e aquisição de dados magnéticos terrestres;
- III) Implementação de algoritmos para estimativas de profundidade, e elaboração e discussão dos resultados.

Na primeira fase, dados aeromagnetométricos pertencentes ao Projeto Aero-geofísico levantamento Paraná – Santa Catarina realizado pela CPRM (2011), foram empregados na definição da área de estudo.

A segunda fase compreendeu o processamento dos dados aeromagnéticos com a aplicação do filtro de Redução ao Polo (RTP) (BARANOV; NAUDY, 1964) e da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) (NABIGHIAN, 1972) com aplicação da convolução simétrica 7x7 (**Oasis Montaj**®), sobre os dados do Campo Magnético Anômalo (Total Magnetic Field - TFA). Quanto à aquisição dos dados magnéticos terrestres, foram realizados os seguintes perfis nas subáreas:

- 14 perfis na Flona com extensão total de 8.140 metros;
- 1 perfil geral em Piraí-Mirim com extensão total de 5.250 metros, dos quais 3070 metros foram detalhados em 3 perfis com espaçamento de 10 metros;
- 2 perfis em Socavão com extensão total de 5.190 metros e
- 2 perfis em Tronco com extensão total de 2.040 metros.

Para a aquisição dos dados foi utilizado um magnetômetro base, para a realização da correção do campo magnético e um magnetômetro móvel, para a realização do perfil terrestre vistos na Figura 3. Depois da coleta dos dados primários, é efetuado um pré-processamento que inclui a correção da variação diurna e a remoção do campo geomagnético, identificado pelo *International Geomagnetic Reference Field (IGRF)*. Após essa etapa, é obtido o valor do Campo Magnético Anômalo ou *Total Field Anomaly (TFA)*. Ainda, nesta fase foi aplicado o filtro de realce de anomalias ASA, também aos dados terrestres para realçar feições estruturais (diques).



FIGURA 3 – Magnetômetro móvel à esquerda e magnetômetro de base à direita. Fonte: <http://www.lpga.ufpr.br>. Acesso em 26 de maio de 2023.

Na última fase foi realizada a interpretação de dados por meio de métodos simplificados de estimativa de parâmetros (THOMPSON, 1982; COOPER, 2015) e métodos inversos (MCGRATH; HOOD, 1970) baseados nos modelos de diques finos e largos. Subsequentemente, estimativas de profundidades geradas pelos modelos desenvolvidos neste trabalho foram comparadas e validadas por técnicas consagradas na literatura.

3.1 MAPAS AEROMAGNETOMÉTRICOS

Para a análise qualitativa da área de estudo e seleção dos perfis nas subáreas foram elaborados os mapas de TFA, RTP e ASA mostrados nas Figuras 4 e 5. Os perfis são apresentados posteriormente, junto com os resultados.

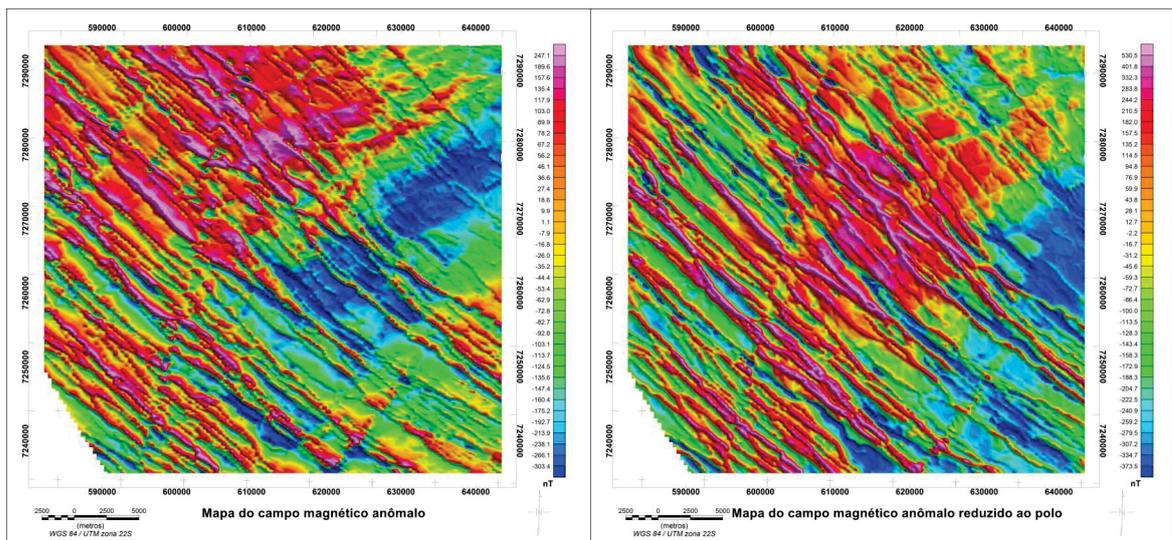


FIGURA 4 – Mapas do TFA e RTP da área de estudo.

Os dados aeromagnetométricos pertencentes ao Projeto Aerogeofísico levantamento Paraná – Santa Catarina, realizado pela CPRM (2011), já são disponibilizados com a correção "International Geomagnetic Reference Field" (IGRF) e foram processados no formato texto (.xyz) criando arquivos de banco de dados (.gdb) compatíveis com o software específico de processamento. Os dados foram interpolados em uma grade regular de 125m de tamanho de célula (1/4 do espaçamento das linhas de voo do levantamento), sendo utilizada a interpolação pelo método Bi-direcional.

A partir da visualização dos mapas aeromagnéticos, foi verificada uma estruturação NW-SE bem marcante. Para uma melhor interpretação dos dados, inicialmente foi utilizada a técnica RTP (BARANOV; NAUDY, 1964) para posicionar as anomalias magnéticas sobre as fontes. Idealmente, a anomalia reduzida ao polo não depende da inclinação nem da declinação magnética local, que durante a aquisição de dados apresenta um ângulo diferente de 90° .

Posteriormente foi aplicado o filtro de realce ASA que visa isolar a resposta magnética de corpos ou áreas magnetizadas, por meio da centralização dos dipolos magnéticos. Isso resulta em uma anomalia que estará localizada aproximadamente sobre o corpo magnético, o que facilita interpretações geológicas. Sobre o ASA foi aplicada a convolução 7x7, esta tem como objetivo suavizar a alta frequência das anomalias. Existem vários métodos para suavizar, mas neste trabalho foi usado o método dos mínimos quadrados (SEEQUENT, 2023).

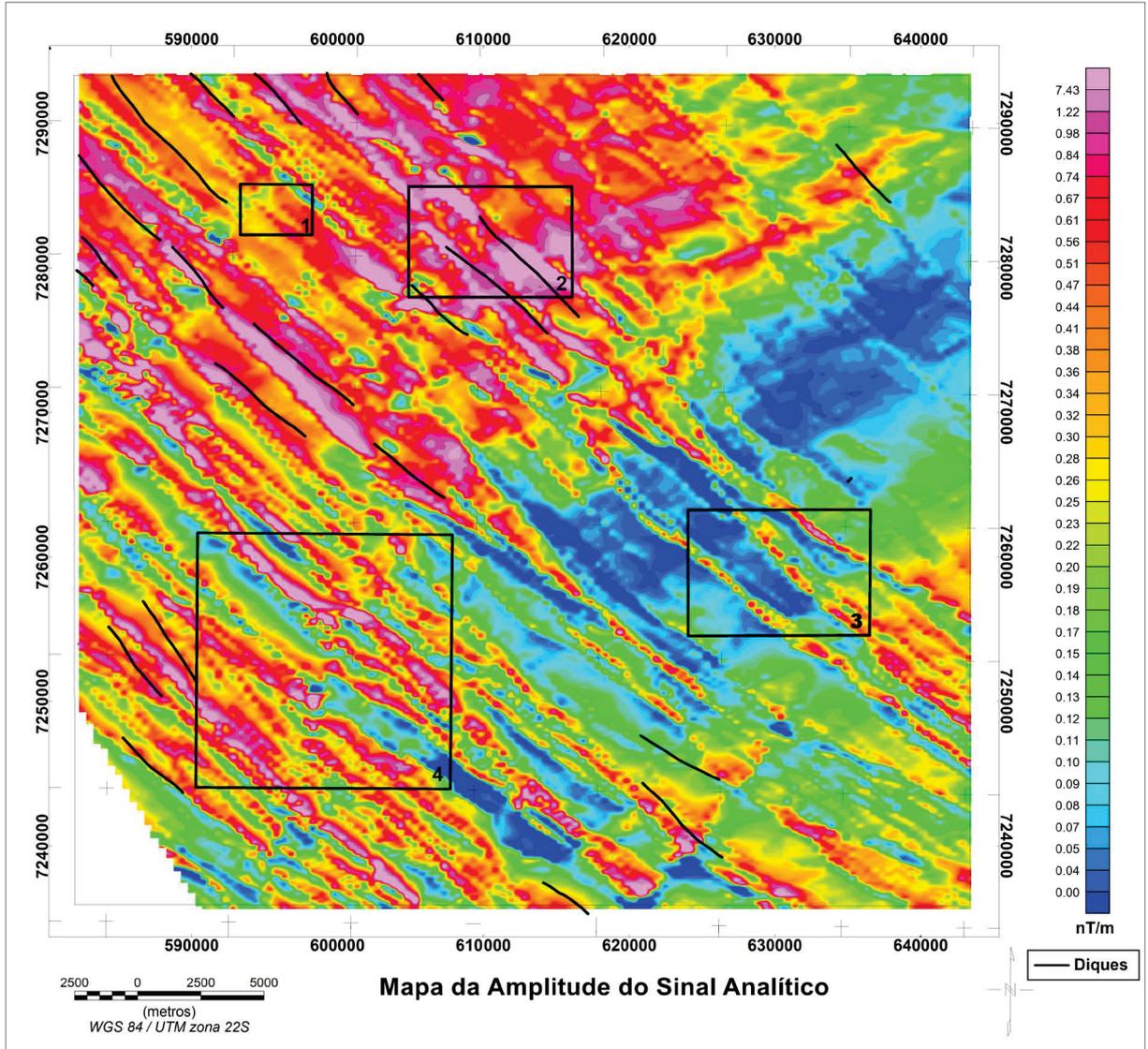


FIGURA 5 – Mapa magnético da Amplitude do Sinal Analítico englobando a área e as subáreas do estudo, com os diques mapeados.

3.2 MODELO DE DIQUES MÚLTIPLOS

Consideramos um modelo de dique com comprimento e profundidade infinitos, relativamente à Figura 6. Os eixos coordenados foram posicionados com a origem no centro do dique, sendo que o eixo y coincide com a direção (*strike*) do dique, enquanto que o eixo x , perpendicular ao dique, corresponde à direção do perfil e o eixo z corresponde à profundidade.

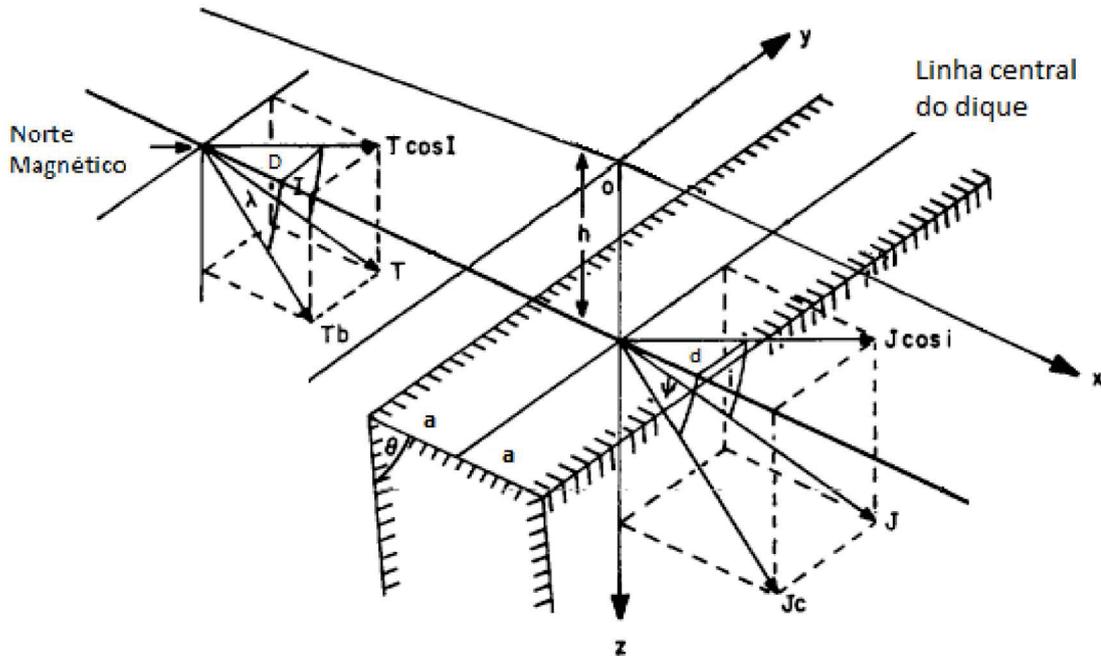


FIGURA 6 – Ilustração do modelo de dique e da decomposição dos campos de magnetização terrestre e resultante (adaptado de MCGRATH; HOOD, 1970).

A intensidade da anomalia magnética para o modelo de diques largos pode ser descrita pela seguinte equação (MCGRATH; HOOD, 1970):

$$\Delta T(x) = A \left[\sin(\alpha) \left(\tan^{-1} \frac{x+a}{h} - \tan^{-1} \frac{x-a}{h} \right) - \cos(\alpha) \frac{1}{2} \ln \frac{(x+a)^2 + h^2}{(x-a)^2 + h^2} \right], \quad (3.1)$$

sendo que os parâmetros são dados a seguir:

- A : Amplitude da anomalia magnética;
- a : Meia largura do dique;
- h : Profundidade do topo do dique;
- α : Ângulo de mergulho efetivo.

A amplitude e o ângulo de mergulho efetivo por sua vez dependem de outros parâmetros que não são descritos aqui. Os detalhes são apresentados por Hood (1964).

Para o caso de uma anomalia gerada por n diques, tomamos uma equação da forma

$$\Delta T(x) = \left(\sum_{i=1}^n \Delta T_i(x) \right) + C, \quad (3.2)$$

em que o primeiro termo corresponde a uma superposição de anomalias na forma 3.1:

$$\begin{aligned} \Delta T_i(x) = & A_i \left[\text{sen}(\alpha_i) \left(\tan^{-1} \frac{x - \bar{x}_i + a_i}{h_i} - \tan^{-1} \frac{x - \bar{x}_i - a_i}{h_i} \right) \right. \\ & \left. - \frac{\cos(\alpha_i)}{2} \ln \frac{(x - \bar{x}_i + a_i)^2 + h_i^2}{(x - \bar{x}_i - a_i)^2 + h_i^2} \right], \end{aligned} \quad (3.3)$$

e o parâmetro C é o nível de base do campo regional (RAJU, 2003). As anomalias múltiplas da forma 3.3 se diferenciam da anomalia do modelo de um único dique, equação 3.1, pela inclusão do centro da anomalia de cada dique individual, \bar{x}_i .

A expressão geral para anomalias magnéticas ao longo de um perfil considerando o modelo de diques finos é escrito da seguinte forma (REFORD, 1964):

$$\Delta T_i(x) = A_i(2a_i) \left[\text{sen}(\alpha_i) \frac{h_i}{(x - \bar{x}_i)^2 + h_i^2} - \cos(\alpha_i) \frac{(x - \bar{x}_i)}{(x - \bar{x}_i)^2 + h_i^2} \right], \quad (3.4)$$

Segundo Ku e Sharp (1983), o algoritmo de inversão não consegue discriminar a amplitude (A_i) da largura ($2a_i$). Por isso, eles são tratados como um único parâmetro, ou seja, a amplitude incorpora a largura no modelo de diques finos.

3.3 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE PROFUNDIDADE

No que diz respeito a interpretação de dados magnéticos e a obtenção da estimativa de profundidade dos diques, tomamos por base a Deconvolução de Euler. As diversas estruturas são reconhecidas levando em conta a sua anomalia magnética e esse parâmetro é conhecido como índice estrutural. Considerando o campo magnético total regional constante C somado à anomalia de fonte pontual tem-se:

$$T(x) = \Delta T(x) + C, \quad (3.5)$$

Sendo assim, considerando um perfil ao longo do eixo x e assumindo que a anomalia é homogênea de grau N ou seja, $T(tx, tz) = t^N T(x, z)$, temos:

$$x_0 \frac{\partial T}{\partial x} + z_0 \frac{\partial T}{\partial z} + NC = x \frac{\partial T}{\partial x} + NT, \quad (3.6)$$

em que N se trata do índice estrutural e tomamos o mesmo valendo 1, parâmetro utilizado para diques. A equação 3.6 é resolvida para x_0 , z_0 e C , no sentido de quadrados mínimos, nos pontos de uma janela móvel que percorre os dados. Mais detalhes podem ser encontrados em Thompson (1982).

Cooper (2015), tomando dados aeromagnéticos, utilizou o filtro da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) para determinar tanto a localização quanto a profundidade de diques finos, que é dada pela equação abaixo.

$$ASA = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial z}\right)^2}. \quad (3.7)$$

A distância r da fonte causadora da anomalia magnética até um ponto de observação pode ser deduzida pela expressão:

$$r = \frac{N \Delta T}{ASA}, \quad (3.8)$$

onde ΔT é o campo potencial, N o índice estrutural, que é 1 por ser uma anomalia gerada por diques. Cooper (2015) mostra que para diques finos,

$$r = \frac{ASA_0}{ASA}, \quad (3.9)$$

sendo que ASA_0 , amplitude do sinal analítico de ordem zero, é definida por:

$$ASA_0 = \sqrt{H(\Delta T)^2 + \Delta T^2}, \quad (3.10)$$

e H é a transformada de Hilbert.

Os valores de x para os quais $r = r(x)$ é mínimo correspondem aos centros dos diques, sendo que r coincide com a profundidade (COOPER, 2015), ilustrado pela Figura 7. Assim, pode-se estimar as profundidades dos diques por meio dos mínimos locais da função dada pela equação 3.9, ou seja:

$$h^r = r = \frac{ASA_0}{ASA}, \quad (3.11)$$

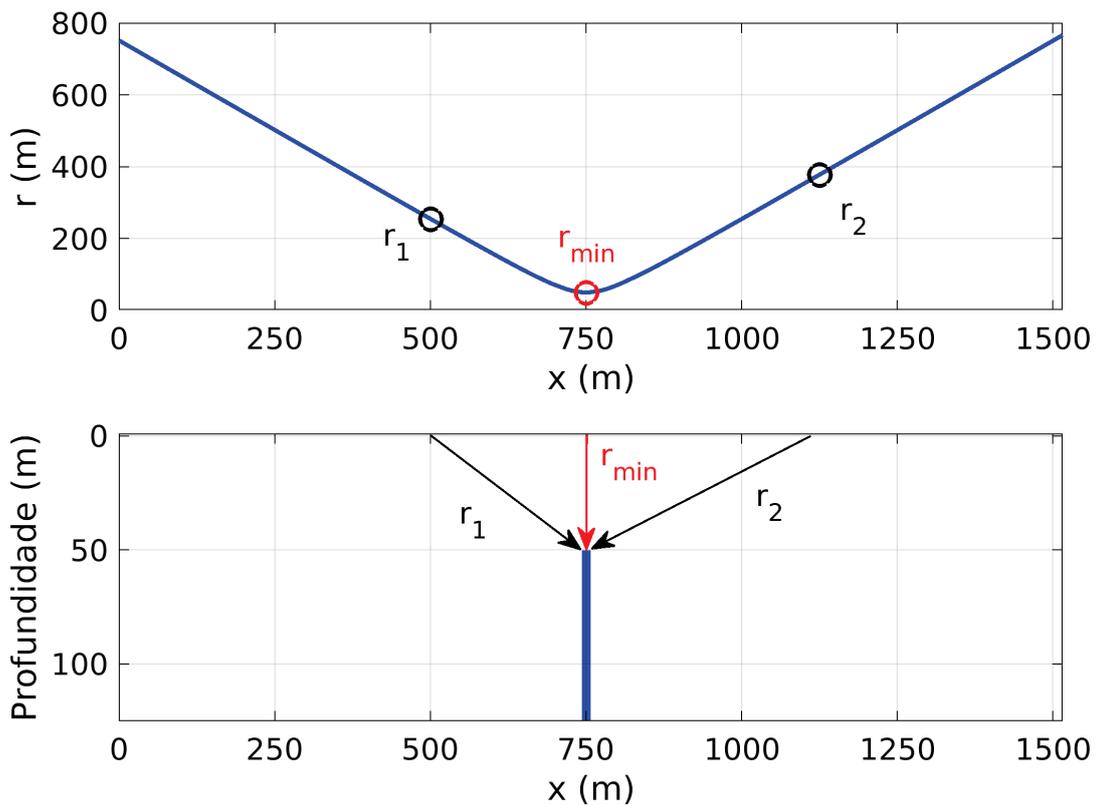


FIGURA 7 – Ilustração nos quais os valores de r_{min} correspondem aos centros dos diques.

3.4 INVERSÃO DOS DADOS

Seja $\mathbf{d}^{obs} = [d_1^{obs}, \dots, d_m^{obs}]$ um vetor contendo as medidas da anomalia magnética ao longo de um perfil nas posições $x = x_1, x_2, \dots, x_m$. Dado um vetor com os parâmetros que determinam o modelo 3.2,

$$\mathbf{p} = [A_1, a_1, h_1, \alpha_1, \bar{x}_1, \dots, A_n, a_n, h_n, \alpha_n, \bar{x}_n, M, C].$$

pode-se calcular o vetor $\mathbf{d}(\mathbf{p}) = [\Delta T(x_1), \dots, \Delta T(x_m)]$ correspondente ao modelo 3.2 nas mesmas posições do perfil adquirido em campo.

Para a obtenção dos parâmetros dos diques foi utilizado um método inverso híbrido, ou seja, um método que realiza uma busca global e uma busca local, para encontrar o vetor de parâmetros \mathbf{p} tal que o erro quadrático

$$e = \sum_{j=1}^m |d_j^{obs} - d_j(\mathbf{p})|^2 \quad (3.12)$$

seja o menor possível. Sen e Stoffa (2013) apresentam diversos métodos globais, locais e híbridos utilizados em geofísica. Para a busca global, utilizamos o método de Monte Carlo (MC), que consiste em gerar aleatoriamente um grande número de amostras de parâmetros e selecionar a amostra com o menor valor do erro e (Eq. 3.12).

Os parâmetros são gerados aleatoriamente com distribuição uniforme nos seguintes intervalos de busca:

1. No intervalo entre 0 e 100 m, para as meias-larguras a_1, \dots, a_n ;
2. No intervalo entre 0.01 e $1.5h_i^f$, sendo h_i^f a estimativa de profundidade do i -ésimo dique de acordo com a equação 3.11, para as profundidades h_1, \dots, h_n ;
3. No intervalo entre -180° e 180° , para os ângulos efetivos $\alpha_1, \dots, \alpha_n$;
4. No intervalo entre dois mínimos consecutivos do ASA, para os centros $\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n$.

A função `findpeaks` do **Matlab**[®] permitiu selecionar os máximos e mínimos do ASA. Nos resultados serão apresentados os perfis do ASA, evidenciando os máximos e mínimos obtidos por essa função. Nos pontos de máximo ocorrem as estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11 (COOPER, 2015).

As amplitudes e o nível de base foram escolhidos pelo método de mínimos quadrados baseado em McGrath e Hood (1973). Vamos reescrever a equação 3.2 da seguinte forma:

$$\Delta T(x) = \left(\sum_{i=1}^n A_i f_i(x) \right) + C, \quad (3.13)$$

em que

$$f_i(x) = \text{sen}(\alpha_i) \left(\tan^{-1} \frac{x - \bar{x}_i + a_i}{h_i} - \tan^{-1} \frac{x - \bar{x}_i - a_i}{h_i} \right) - \frac{\cos(\alpha_i)}{2} \ln \frac{(x - \bar{x}_i + a)^2 + h_i^2}{(x - \bar{x}_i - a)^2 + h_i^2}, \quad (3.14)$$

Buscamos os parâmetros A_1, \dots, A_n, C que nos retorne a anomalia ΔT mais próxima do dado observado \mathbf{d}^{obs} . Para isso resolvemos o sistema linear

$$\begin{cases} A_1 f_1(x_1) + A_2 f_2(x_1) + \dots + A_n f_n(x_1) + C = d_1^{\text{obs}} \\ \vdots \\ A_1 f_1(x_m) + A_2 f_2(x_m) + \dots + A_n f_n(x_m) + C = d_m^{\text{obs}} \end{cases} \quad (3.15)$$

que em termos de matrizes é dado da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} f_1(x_1) & f_2(x_1) & \dots & f_n(x_1) & 1 \\ f_1(x_2) & f_2(x_2) & \dots & f_n(x_2) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ f_1(x_m) & f_2(x_m) & \dots & f_n(x_m) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^{\text{obs}} \\ d_2^{\text{obs}} \\ \vdots \\ d_m^{\text{obs}} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

que é uma equação da forma $Ax = \mathbf{b}$. A solução dessa equação por quadrados mínimos por sua vez corresponde a solução do sistema normal $A^T Ax = A^T \mathbf{b}$, que pode ser estabilizado pela regularização de Tikhonov (BOOS, 2022). Esta regularização é útil quando o dado observado é afetado por ruído.

Para a busca local, foi selecionado o método de Levenberg-Marquardt (LM), que busca o conjunto de parâmetros que minimiza o erro e nas vizinhanças de uma solução inicial $\mathbf{p}^{(0)}$. O método LM atualiza iterativamente o vetor de parâmetros $\mathbf{p}^{(k)}$ pela fórmula $\mathbf{p}^{(k+1)} = \mathbf{p}^{(k)} + \delta \mathbf{p}^{(k)}$, sendo que o incremento $\delta \mathbf{p}^{(k)}$ é obtido pela solução do seguinte sistema linear:

$$[J^T J + \lambda I] \delta \mathbf{p}^{(k)} = J^T \delta F^{(k)}, \quad \delta F^{(k)} = \mathbf{d}^{\text{obs}} - \mathbf{d}(\mathbf{p}^{(k)}), \quad (3.17)$$

seguindo a implementação de Boos et al. (2024). A matriz jacobiana J pode ser calculada analiticamente a partir das derivadas da anomalia total (Eq. 3.1) com respeito aos parâmetros ($\partial \Delta T / \partial h_i$, $\partial \Delta T / \partial a_i$, etc). Tais fórmulas estão disponíveis na seção 4.2 de Raju (2003).

Finalmente, a estratégia híbrida consiste em refinar cada realização do método MC executando algumas iterações do método LM (ou seja, cada vetor de parâmetros gerado pelo MC faz o papel do vetor inicial $\mathbf{p}^{(0)}$ do LM). Ao final da execução do método MC, executa-se mais uma vez o LM com um número mais elevado de iterações.

A inversão foi implementada e executada utilizando o aplicativo **Matlab**[®]. Foram utilizadas 500 mil iterações no método MC, enquanto que método LM foram utilizadas 5 iterações no passo híbrido e 10 mil iterações no passo final.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados que foram divididos em perfis sintéticos e os perfis magnéticos terrestres para as quatro subáreas, lembrando que os dados aeromagnéticos foram utilizados para selecionar os locais onde foram realizadas as aquisições dos dados terrestres e posteriormente as inversões.

4.1 PERFIS SINTÉTICOS

A aplicação da inversão foi realizada inicialmente em dados sintéticos para diques finos e largos com o objetivo de interpretar as anomalias magnéticas originadas por dois corpos bidimensionais (diques). Buscou-se calcular alguns parâmetros dos diques, abrangendo a amplitude, a profundidade, a meia-largura, a localização e o ângulo de mergulho. Com isso, o principal objetivo foi determinar os parâmetros do modelo que melhor se adequem às observações em duas diferentes situações, levando em conta a presença ou não de ruído. O dado sintético foi gerado a partir de um modelo de dois diques proposto por Balkaya e Kaftan (2021).

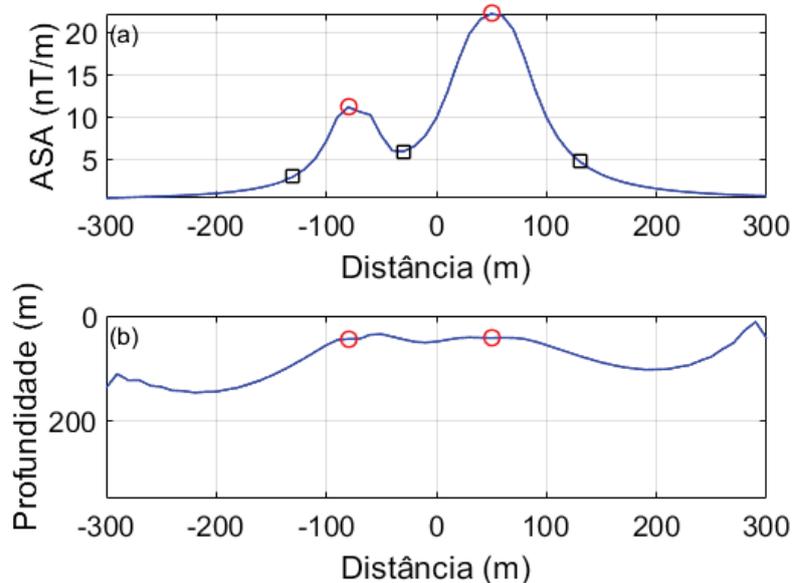


FIGURA 8 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao dado sintético sem ruído. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.

As Figuras 8 e 9 apresentam o ASA para os perfis sintéticos evidenciando que ambos os modelos indicam a presença de 2 diques delimitados pelos máximos (círculos) e mínimos (quadrados) do ASA. Cada par de mínimos constitui o intervalo de busca para o centro de cada dique, os pontos de mínimos 1 e 2 constituem o intervalo de busca do centro do primeiro dique, enquanto os pontos 2 e 3 constituem o intervalo de busca para o segundo dique. As profundidades estimadas pela equação 3.11 (COOPER, 2015), que definem os intervalos de busca das profundidades de cada dique, correspondem aos círculos nas figuras (b).

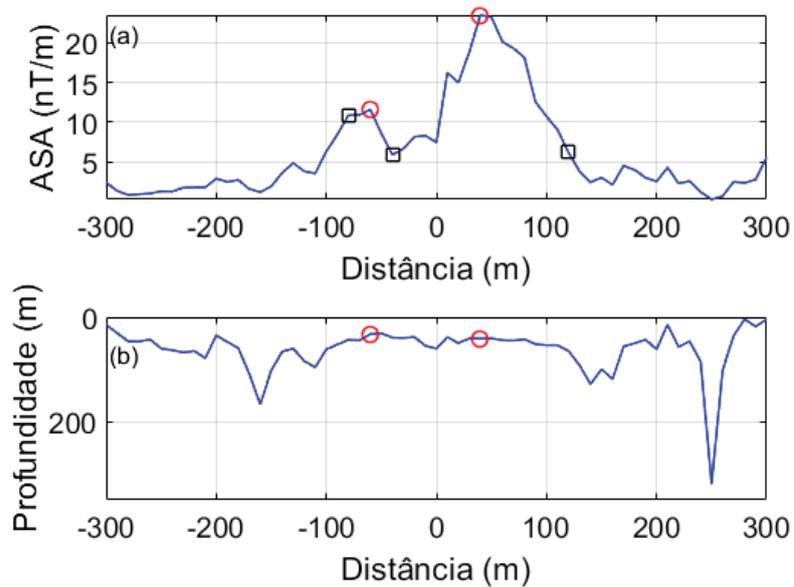


FIGURA 9 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao dado sintético com ruído. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.

4.1.1 Modelos sem ruído

Para o primeiro experimento foi considerada a anomalia sem a presença de nenhum ruído. As Figuras 10 e 11 comparam o dado sintético com o dado calculado pelos modelos de diques finos e largos, respectivamente.

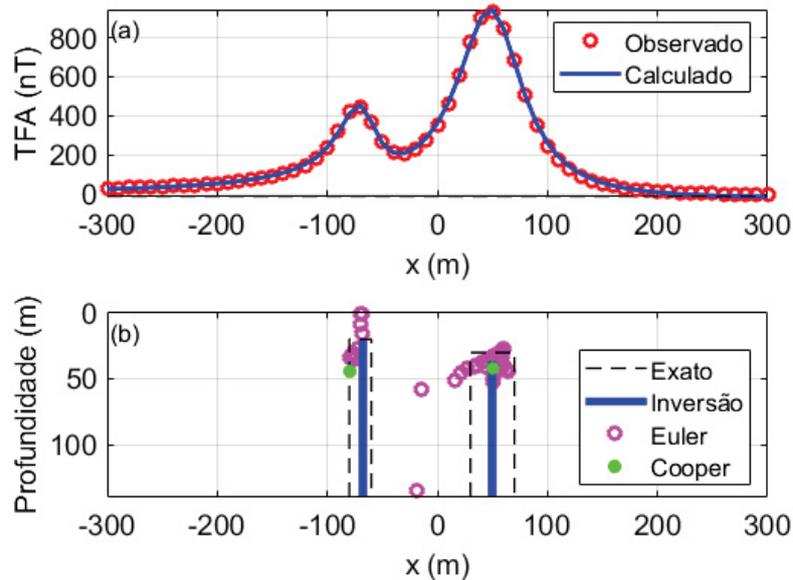


FIGURA 10 – (a) Comparação entre o perfil sintético sem ruído e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando o modelo geométrico dos diques.

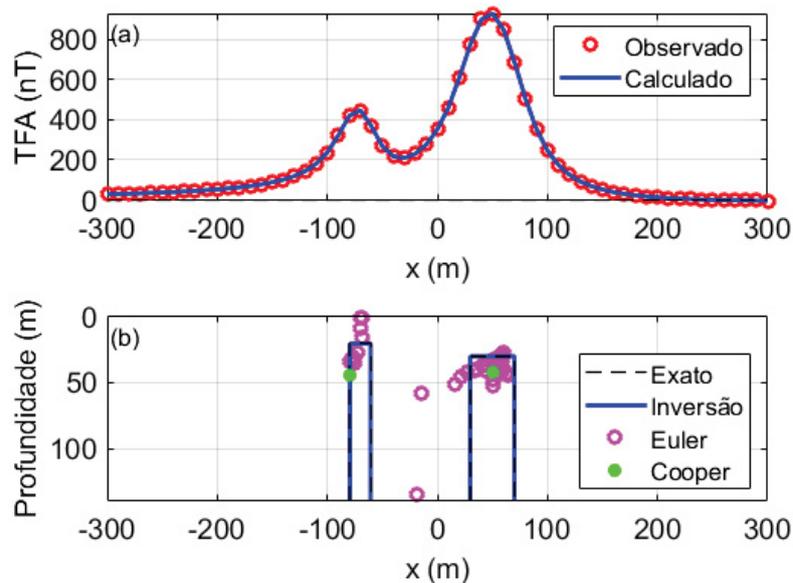


FIGURA 11 – (a) Comparação entre o perfil sintético sem ruído e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando o modelo geométrico dos diques.

Destaca-se que, para a análise dos modelos sem ruído, os perfis obtidos são quase idênticos em ambos os modelos, entretanto o melhor resultado foi obtido pelo

modelo de diques largos visto que o erro RMS foi de **0.17 nT** se comparado com o modelo de diques finos em que foi obtido um erro RMS de **7.72 nT**. Com relação as profundidades, visualmente o modelo de diques largos foi o que mais se aproximou do modelo exato. Constata-se que a deconvolução de Euler também apresentou bons resultados se comparada com a inversão.

Dique 1	α (graus)	h (m)	$A(2a)$ (nT.m)	\bar{x} (m)
Exato	74	20	8000	-70
MC-LM	65.75	20.97	7961.07	-67.72
Dique 2	α (graus)	h (m)	$A(2a)$ (nT.m)	\bar{x} (m)
Exato	84	30	32000	50
MC-LM	84.22	36.55	35761.06	49.64

TABELA 1 – Parâmetros obtidos pelo modelo de diques finos no experimento sem ruído.

Dique 1	α (graus)	h (m)	A (nT)	\bar{x} (m)	a (m)
Exato	74	20	400	-70	10
MC-LM	74.07	20.30	433.73	-70.01	9.28
Dique 2	α (graus)	h (m)	A (nT)	\bar{x} (m)	a (m)
Exato	84	30	800	50	20
MC-LM	84.06	29.93	795.71	49.97	20.08

TABELA 2 – Parâmetros obtidos pelo modelo de diques largos no experimento sem ruído.

4.1.2 Modelos com ruído

Para o segundo experimento foi considerada a anomalia com a presença de ruído, sendo este de **30 nT** (BALKAYA; KAFTAN, 2021). As Figuras 12 e 13 compararam o dado sintético com o dado calculado pelos modelos de diques finos e largos, respectivamente.

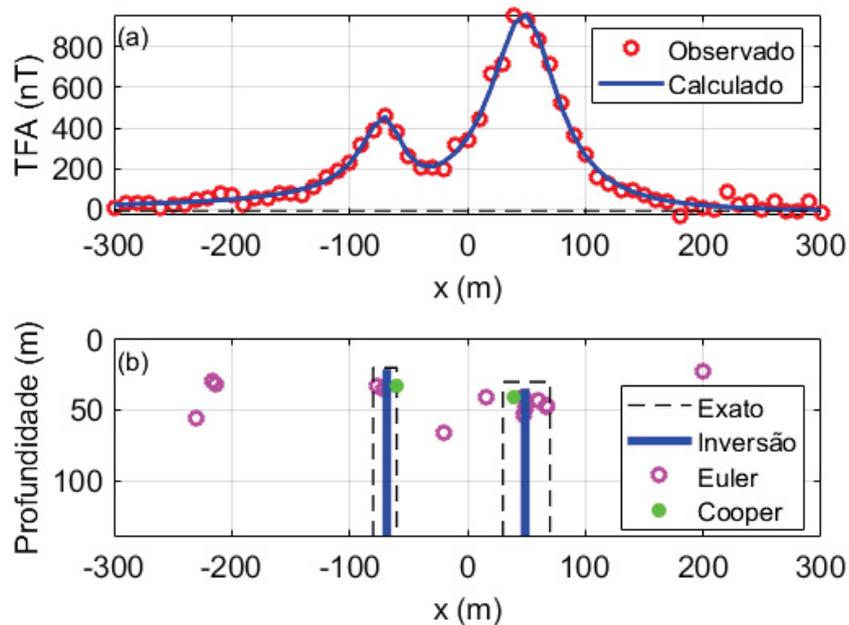


FIGURA 12 – (a) Comparação entre o perfil sintético com ruído e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando o modelo geométrico dos diques.

Dique 1	α (graus)	h (m)	$A(2a)$ (nT.m)	\bar{x} (m)
Exato	74	20	8000	-70
MC-LM	71.28	21.25	8064.39	-68.41
Dique 2	α (graus)	h (m)	$A(2a)$ (nT.m)	\bar{x} (m)
Exato	84	30	32000	50
MC-LM	86.03	34.98	34241.17	49.03

TABELA 3 – Parâmetros obtidos pelo modelo de diques finos no experimento com ruído.

Dique 1	α (graus)	h (m)	A (nT)	\bar{x} (m)	a (m)
Exato	74	20	400	-70	10
MC-LM	73.23	15.44	212.79	-69.18	16.71
Dique 2	α (graus)	h (m)	A (nT)	\bar{x} (m)	a (m)
Exato	84	30	800	50	20
MC-LM	84.79	31.19	883.20	49.64	18.61

TABELA 4 – Parâmetros obtidos pelo modelo de diques largos no experimento com ruído.

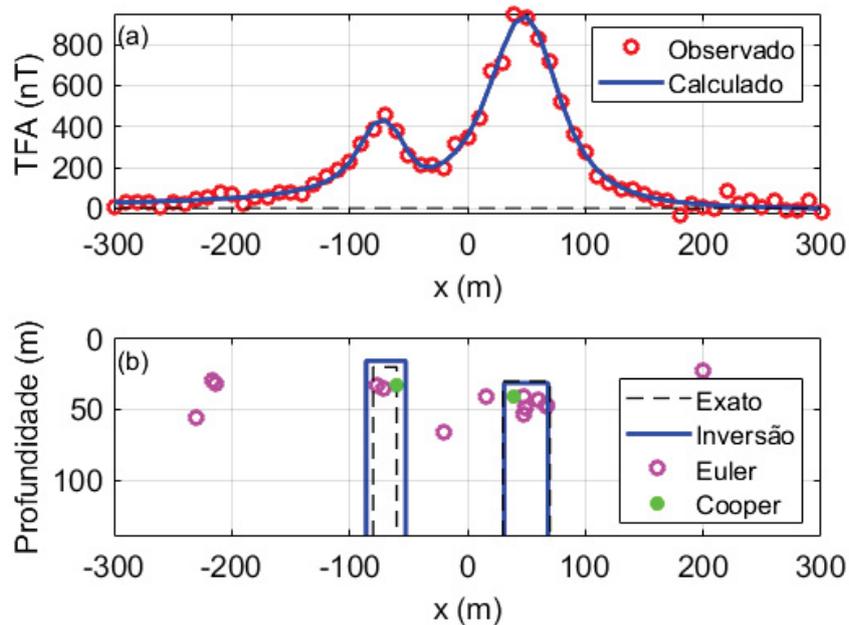


FIGURA 13 – (a) Comparação entre o perfil sintético com ruído e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando o modelo geométrico dos diques.

Destaca-se que, para a análise dos modelos com ruído, a anomalia gerada pelo modelo de diques largos foi a que mais se aproximou dos dados inseridos, visto que seu erro RMS foi de **24.56 nT** se comparado com a anomalia do modelo de diques finos em que foi obtido um erro RMS de **25.41 nT**. Os valores dos erros RMS observados nos modelos se comparam com o RMS do ruído, que é de **25.13 nT**. Esse valor significa a diferença do erro entre o dado com ruído e o dado sem ruído. Com relação aos parâmetros, o modelo de diques largos foi o que mais se aproximou do modelo exato.

Se comparada a deconvolução de Euler no dado sem ruído em relação ao com ruído, percebe-se que os pontos de cor magenta se encontram aglomerados e com poucos outliers, além disso a inversão é melhor que Euler em ambos os casos, o que normalmente acontece também nos dados reais, que serão apresentados nas seções subsequentes. Comparando a deconvolução de Euler com a inversão, constata-se que as soluções do Euler (pontos de cor magenta) se encontram dispersas sendo que algumas soluções estão afastadas dos diques, mostrando que a inversão nos modelos sem ruído foram mais eficazes para localizar as profundidades dos diques. Comparando as Figuras 11 e 13 sem e com ruído respectivamente, é nítida a percepção que a deconvolução de Euler não posiciona as soluções sobre as fontes nos dados com ruído. Este fato pode ser explicado pelo método Euler ser mais sensível ao ruído por utilizar as derivadas do campo. Já a inversão proposta neste trabalho, a qual usa o TFA como dado de entrada, posiciona as anomalias corretamente sobre as fontes.

4.2 PERFIS DA ÁREA DE ESTUDO

Os resultados da inversão para os perfis das subáreas considerando o modelo de diques finos e largos, indicado na Figura 5, mostram:

- 1) Mapa de localização com os diques interpretados e o filtro ASA obtido a partir dos dados do TFA adquiridos em campo;
- 2) Perfil magnético da Amplitude do Sinal Analítico e as estimativas de profundidade geradas no Matlab (a partir dos dados do TFA adquiridos em campo);
- 3) A comparação entre as anomalias oriundas dos dados observados e as anomalias calculadas com os modelos de diques finos e largos;
- 4) Uma tabela com os parâmetros obtidos da inversão;
- 5) O erro RMS (Root mean square) entre a anomalia observada e calculada para ambos os modelos e o tempo de processamento em segundos.

4.2.1 Perfil Flona

Durante a coleta dos dados magnetométricos terrestres na subárea da Flona (Figura 2), esta ocorreu em uma malha não uniforme, seguindo a estrada principal, a trilha da nascente, a trilha primitiva e as rotas de fuga dentro da subárea. De maneira deliberada, a coleta não atravessou perpendicularmente nenhum dique, ocorrendo apenas de forma paralela em um local específico, conforme ilustrado na Figura 14 (POI et al., 2023). Devido a essa abordagem específica, a inversão não foi realizada.



FIGURA 14 – Mapa de localização do dique na área da Flona. Fonte: Poi et al. (2023).

4.2.2 Perfil Piraí-Mirim

Para o perfil da área de Piraí-Mirim o dado foi adquirido em julho de 2022, totalizando 5.250 metros em pontos espaçados a cada 30 metros. A Figura 15 apresenta o perfil visto em mapa, além do resultado aplicando o filtro ASA e os diques interpretados que totalizaram 18, condizendo com os resultados apresentados nas tabelas a seguir.

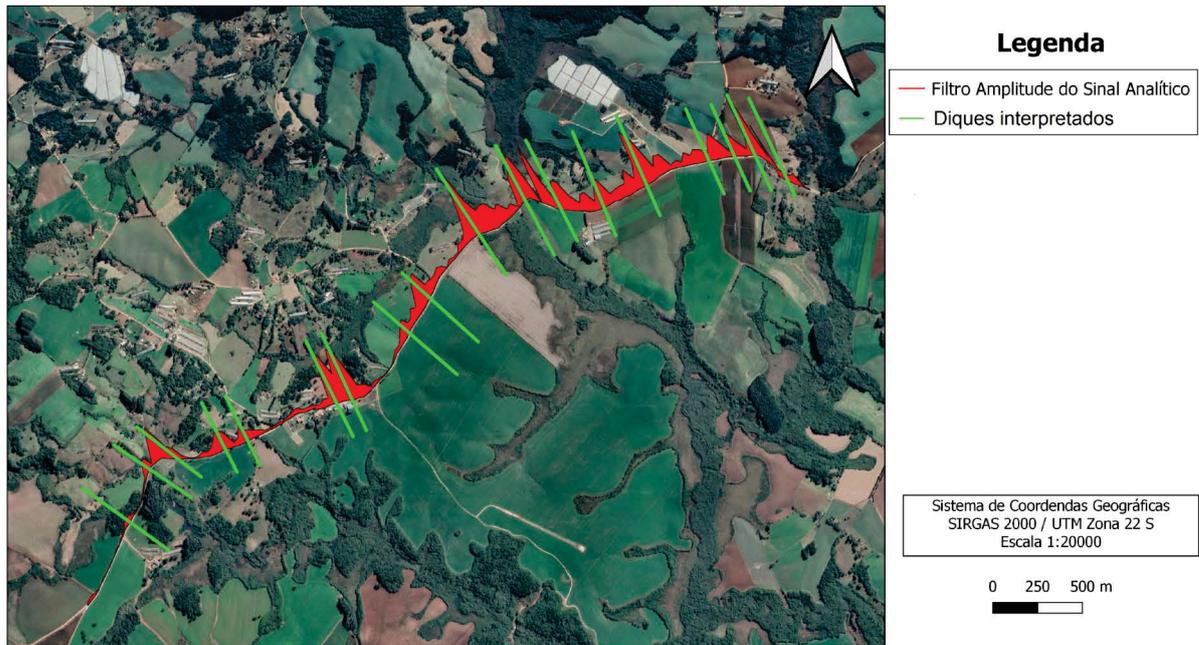


FIGURA 15 – Mapa de localização do perfil de Piraí-Mirim com os diques interpretados e o filtro ASA.

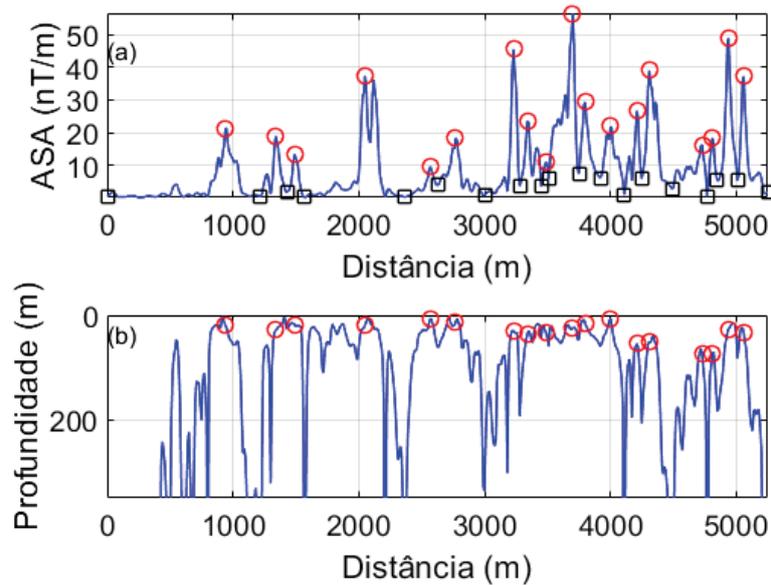


FIGURA 16 – (a) Filtro ASA aplicado ao perfil de Pirai-Mirim figura. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.

A Figura 16a apresenta os resultados da aplicação do filtro ASA para o perfil modelado, indicando a possibilidade da presença de 18 diques delimitados pelos máximos (círculos) e mínimos (quadrados). As profundidades estimadas pela equação 3.11 (COOPER, 2015) correspondem aos círculos na Figura 16b.

As Figuras 17 e 18 comparam o dado observado com o dado calculado pelos modelos de diques finos e largos, respectivamente.

Destaca-se que, para o perfil de Pirai-Mirim, as anomalias correspondentes ao modelo de diques largos foram melhores por uma pequena diferença no erro em relação aos dados observados em campo, visto que seu erro RMS foi de **175.15** nT se comparado com o modelo de diques finos em que foi obtido um erro RMS de **191.92** nT. Considerando que o perfil varia entre - 500 nT a 1500 nT nas subfiguras 17 e 18 (superiores), este erro pode ser considerado baixo, na ordem de 9% entre os valores máximos e mínimos do TFA. Comparando a deconvolução de Euler com a inversão, constata-se que a mesma deixou de identificar alguns diques, mostrando que a inversão nos modelos foi mais eficaz para localizá-los. Outro fator importante para se analisar são os parâmetros referentes às Tabelas 5 e 6, principalmente nas profundidades, que de forma geral vão desde 0 metros (aflorantes) até 139 metros (profundas), assim como as larguras dos diques que variam de 8 metros até 102 metros, mostrando grande variabilidade em suas profundidades e larguras. O tempo de processamento pelo modelo de diques finos foi de 1533.92 segundos, já pelo modelo de diques largos foi de 3937.31 segundos.

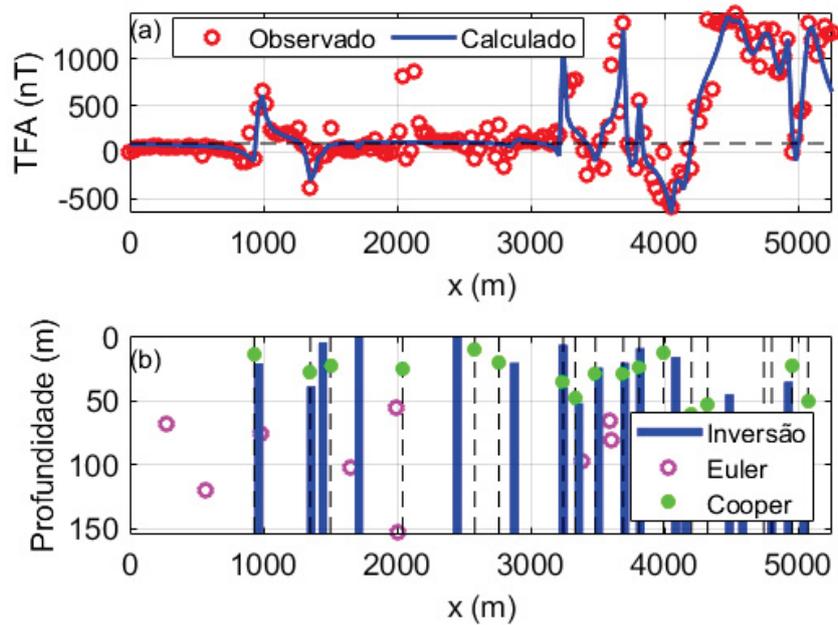


FIGURA 17 – (a) Comparação entre o perfil da subárea de Piraí-Mirim e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.

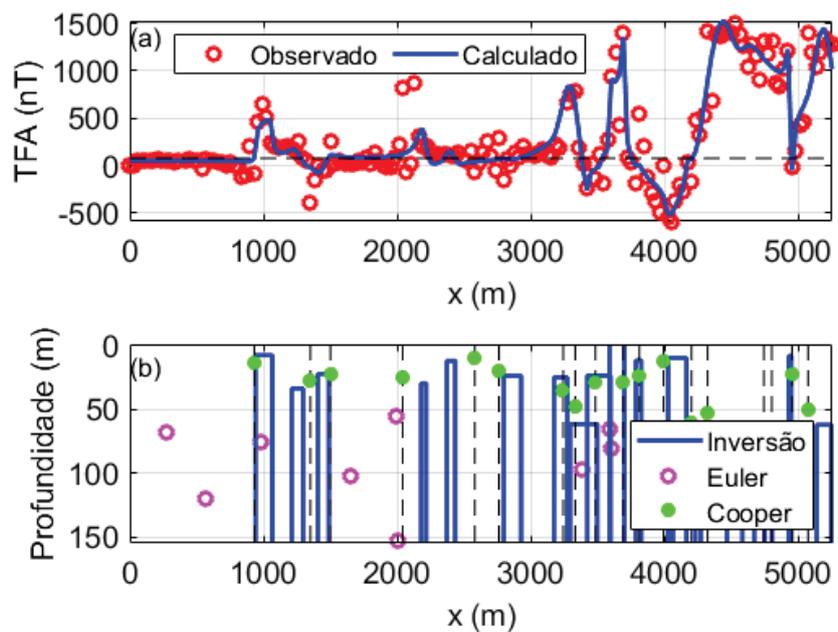


FIGURA 18 – (a) Comparação entre o perfil da subárea de Piraí-Mirim e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.

Dique	α (graus)	h (m)	$A(2a)$ (nT.m)	\bar{x} (m)
1	146.85	20.49	17498.90	962.82
2	-80.85	38.52	18012.99	1355.58
3	-68.72	4.21	528.30	1443.58
4	-159.69	0.30	185.79	1713.03
5	-89.65	0.03	2510.32	2447.79
6	-177.63	20.12	1682.90	2875.31
7	138.61	6.00	8777.28	3239.31
8	35.34	51.85	3716.00	3356.93
9	-135.56	23.86	9770.34	3503.86
10	44.65	20.04	29080.09	3699.46
11	89.12	8.60	9348.85	3816.92
12	157.00	15.79	11421.74	4081.23
13	-130.75	95.02	112919.18	4156.38
14	27.14	45.01	14782.85	4482.63
15	33.86	94.79	91999.00	4582.71
16	55.65	139.30	246383.08	4797.70
17	65.18	35.00	55850.04	4923.66
18	154.63	87.34	187297.24	5037.83

TABELA 5 – Parâmetros obtidos no perfil - Piraí-Mirim via diques finos.

Dique	α (graus)	h (m)	A (nT)	\bar{x} (m)	a (m)
1	101.83	7.63	139.41	1002.94	62.99
2	42.04	33.61	77.83	1253.21	42.10
3	-154.22	22.22	73.34	1447.05	40.73
4	48.86	29.61	332.88	2197.29	19.19
5	63.49	11.99	58.30	2402.01	31.24
6	-32.94	23.81	9.27	2860.78	64.05
7	-179.24	24.94	55.42	3220.54	50.09
8	23.19	61.48	761.29	3392.49	102.09
9	143.58	23.55	537.53	3507.31	87.20
10	133.71	-1.12	334.70	3641.84	54.89
11	131.96	11.68	35.93	3803.51	20.46
12	-143.00	9.73	127.04	4093.20	68.72
13	106.13	70.09	15.72	4143.39	84.21
14	129.19	85.41	887.86	4366.02	98.12
15	122.67	127.44	988.88	4623.93	44.15
16	139.78	115.10	363.68	4772.47	27.21
17	-17.94	7.91	706.04	4936.04	8.73
18	84.64	62.16	777.50	5189.68	79.08

TABELA 6 – Parâmetros obtidos no perfil - Piraí-Mirim via diques largos.

4.2.3 Perfil Pirai-Mirim de detalhe

Durante a primeira etapa de campo foi percebido que devido ao espaçamento do perfil, que foi de 30 metros, algumas estruturas podem não terem sido detectadas. Com isso, uma segunda etapa de campo foi realizada em julho de 2023 e 3 perfis de detalhe foram adquiridos com um espaçamento de 10 metros.

4.2.3.1 Primeiro perfil - PD1

O primeiro perfil de detalhe da área de Pirai-Mirim teve uma extensão de 500 metros. A Figura 19 apresenta o perfil visto em mapa, além do resultado aplicando o filtro ASA e os diques interpretados que totalizaram 2, condizendo com os resultados apresentados nas tabelas abaixo.

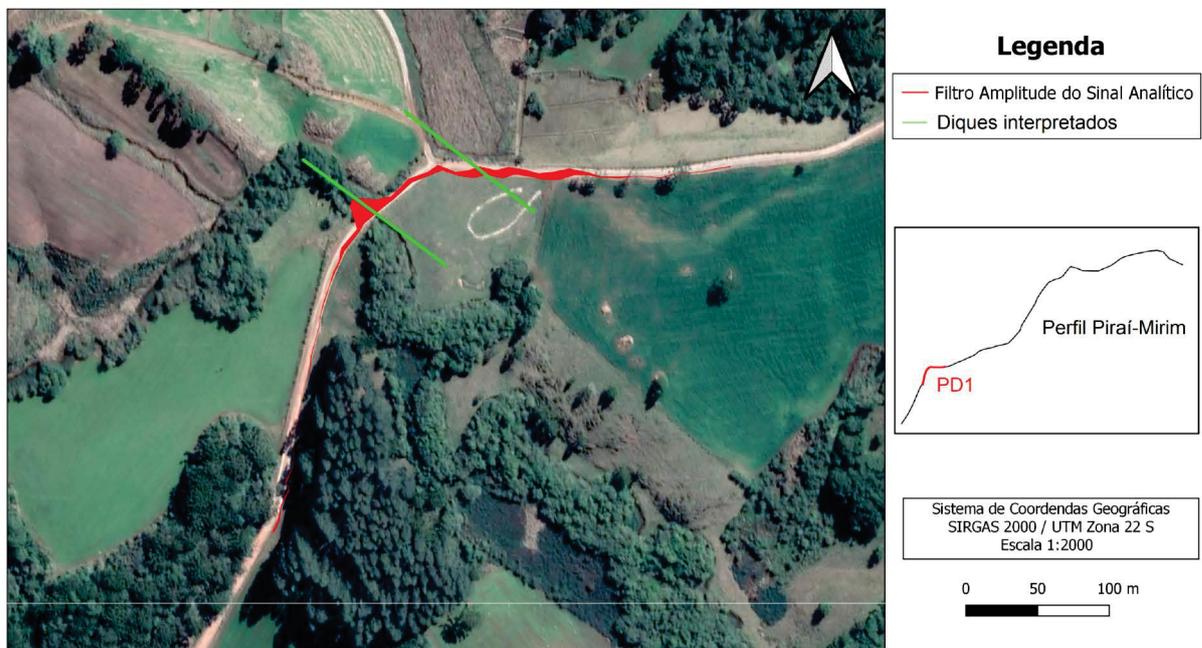


FIGURA 19 – Mapa de localização do primeiro perfil de detalhe de Pirai-Mirim (PD1) com os diques interpretados e o filtro ASA. O diagrama à direita indica a posição de PD1 em relação ao perfil geral.

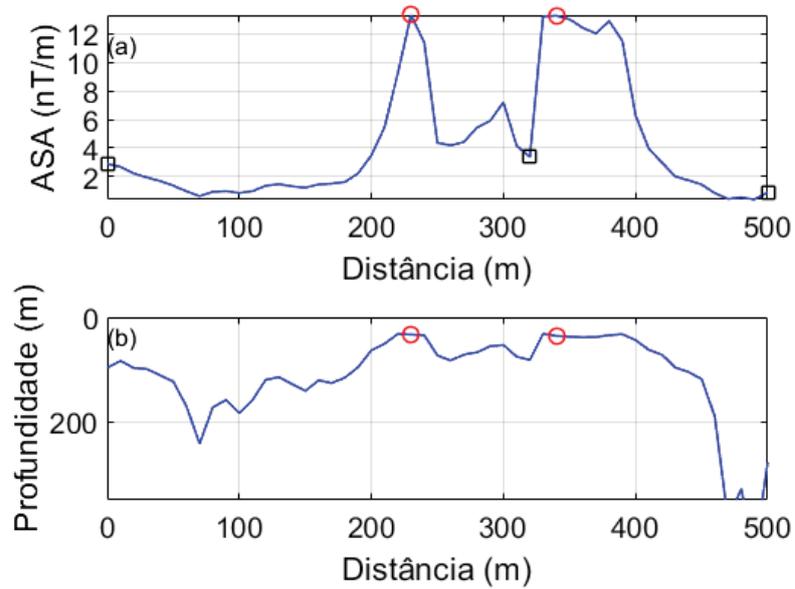


FIGURA 20 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao primeiro perfil de detalhe de Pirai-Mirim. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.

A Figura 20a apresenta o ASA para o perfil modelado evidenciando que na área se tem a indicação da presença de 2 diques delimitados pelos máximos (círculos) e mínimos (quadrados) do ASA. As profundidades estimadas pela equação 3.11 (COOPER, 2015) correspondem aos círculos na Figura 20b.

As Figuras 21 e 22 comparam o dado observado com o dado calculado pelos modelos de diques finos e largos, respectivamente.

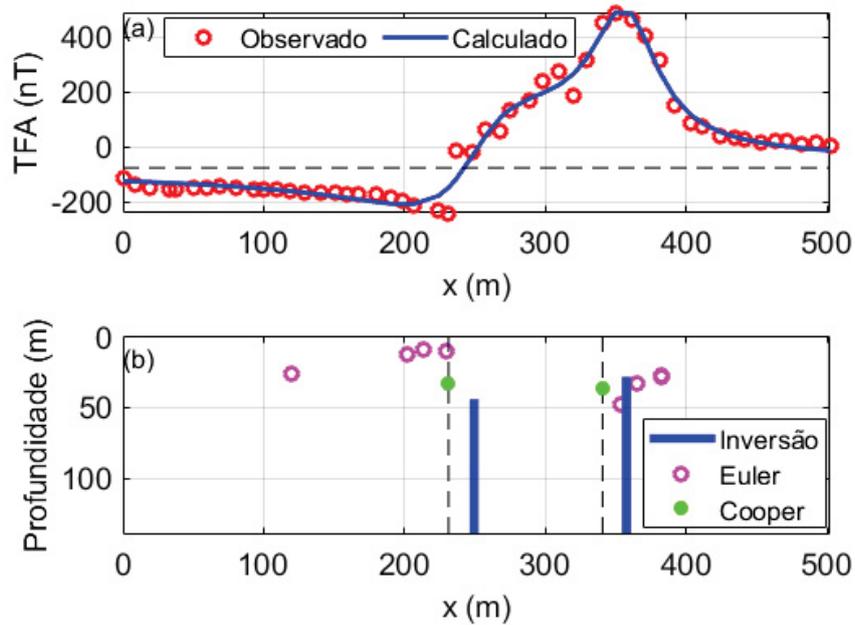


FIGURA 21 – (a) Comparação entre o primeiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.

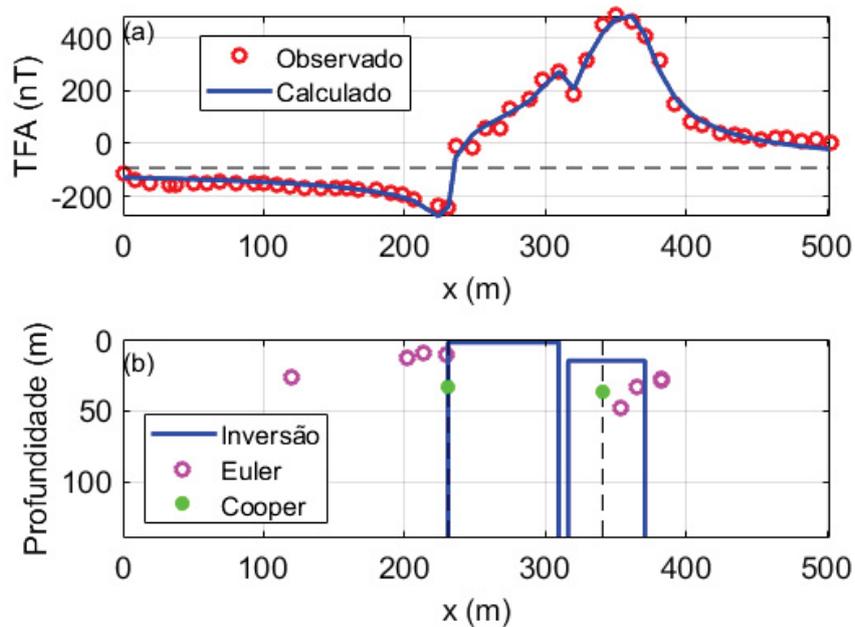


FIGURA 22 – (a) Comparação entre o primeiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.

Dique	α (graus)	h (m)	$A(2a)$ (nT.m)	\bar{x} (m)
1	178.14	44.14	14344.14	249.33
2	83.72	28.31	13208.23	357.44

TABELA 7 – Parâmetros obtidos no primeiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim via diques finos.

Dique	α (graus)	h (m)	A (nT)	\bar{x} (m)	a (m)
1	125.23	1.15	102.71	270.07	39.22
2	121.70	14.10	245.19	343.25	27.27

TABELA 8 – Parâmetros obtidos no primeiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim via diques largos.

Destaca-se que, para o primeiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim, a anomalia de diques largos foi a que mais se aproximou dos dados inseridos, visto que seu erro RMS foi de **20.09** nT se comparado com o modelo de diques finos em que foi obtido um erro RMS de **31.10** nT, ainda assim o erro pode ser considerado baixo, visto que o perfil varia entre - 200 nT a 600 nT nas figuras 21 e 22, que se dá na ordem de 5% entre os valores máximos e mínimos do TFA. Comparando a deconvolução de Euler com a inversão, constata-se que os pontos se encontram dispersos e relativamente afastados dos diques (segundo a localização estimada pelo ASA), mostrando que a inversão nos modelos foi mais eficaz para localizar as profundidades dos diques. Outro fator importante para se analisar são os parâmetros referentes às Tabelas 7 e 8, principalmente nas profundidades, que no modelo de diques finos se apresentam maiores, enquanto que no modelo de diques largos são mais rasos assim como as larguras dos diques que variam de 27 metros até 39 metros. O tempo de processamento para o modelo de diques finos foi de 137.74 segundos, já para o modelo de diques largos foi de 235.85 segundos.

4.2.3.2 Segundo perfil - PD2

O segundo perfil de detalhe da área de Piraí-Mirim totalizou 1050 metros. A Figura 23 apresenta o perfil visto em mapa, além do resultado aplicando o filtro ASA e os diques interpretados que totalizaram 4, condizendo com os resultados apresentados nas tabelas abaixo.

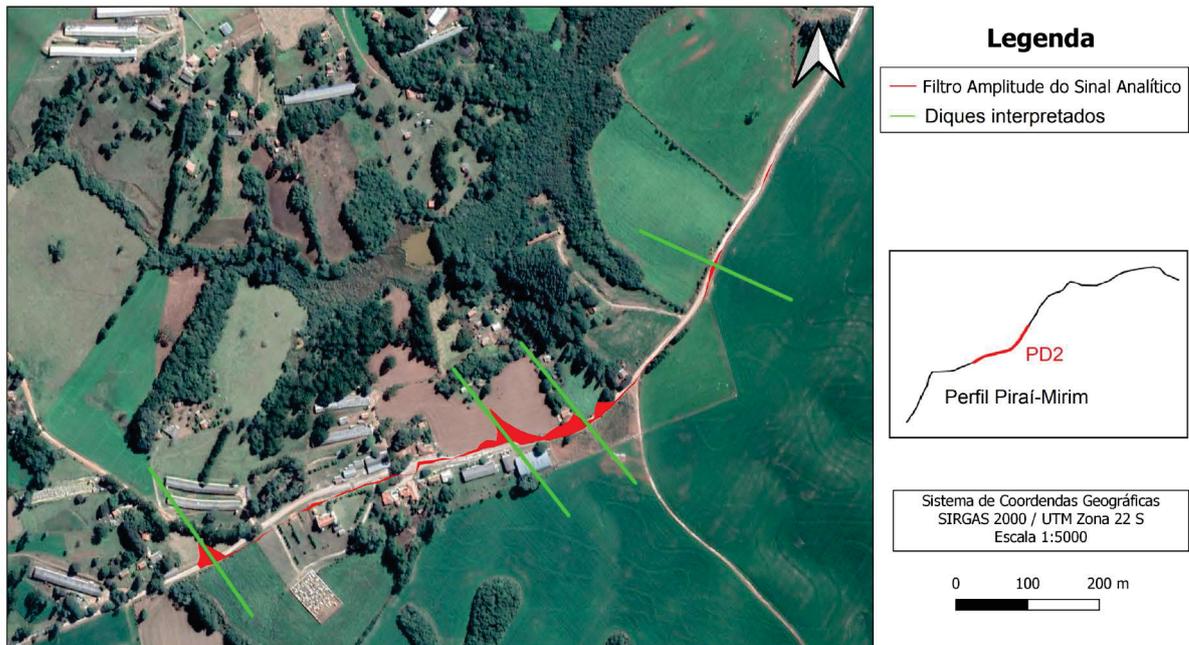


FIGURA 23 – Mapa de localização do segundo perfil de detalhe de Piraí-Mirim (PD2) com os diques interpretados e o filtro ASA. O diagrama à direita indica a posição de PD2 em relação ao perfil geral.

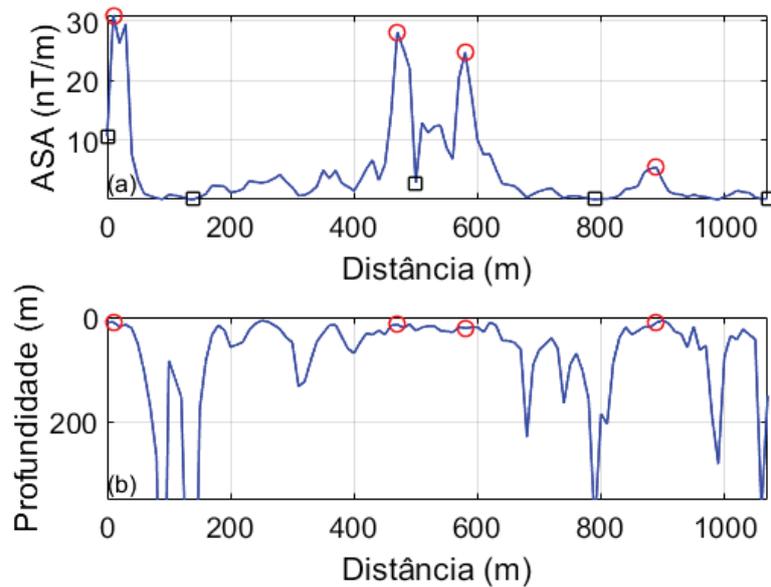


FIGURA 24 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao segundo perfil de detalhe de Pirai-Mirim . (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.

A Figura 24a apresenta o ASA para o perfil modelado evidenciando que na área se tem a indicação da presença de 4 diques delimitados pelos máximos (círculos) e mínimos (quadrados) do ASA. As profundidades estimadas pela equação 3.11 (COOPER, 2015) correspondem aos círculos na Figura 24b.

As Figuras 25 e 26 comparam o dado observado com o dado calculado pelos modelos de diques finos e largos, respectivamente.

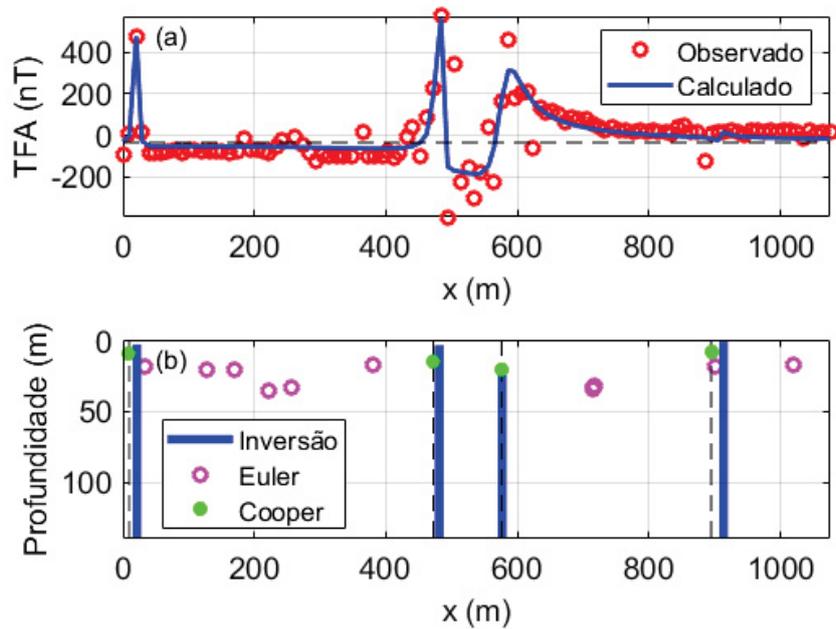


FIGURA 25 – (a) Comparação entre o segundo perfil de detalhe de Pirai-Mirim e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.

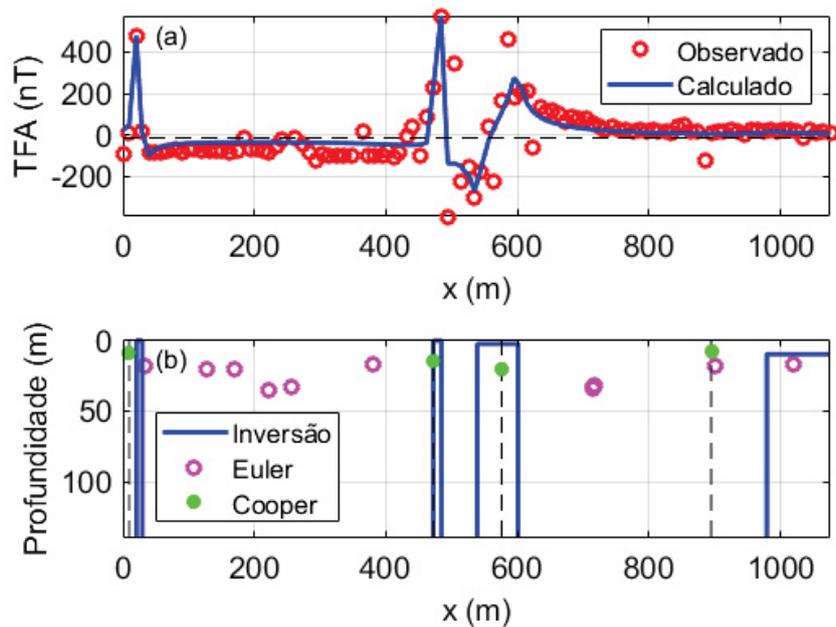


FIGURA 26 – (a) Comparação entre o segundo perfil de detalhe de Pirai-Mirim e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.

Dique	α (graus)	h (m)	$A(2a)$ (nT.m)	\bar{x} (m)
1	79.73	2.35	1359.11	21.41
2	73.24	2.97	5070.85	481.04
3	151.57	21.39	10651.56	576.45
4	173.94	0.47	141.50	913.18

TABELA 9 – Parâmetros obtidos no segundo perfil de detalhe de Piráí-Mirim via diques finos.

Dique	α (graus)	h (m)	A (nT)	\bar{x} (m)	a (m)
1	45.12	0.00	172.71	25.05	4.46
2	80.03	0.04	257.15	478.22	6.22
3	162.88	2.41	102.48	569.60	31.06
4	47.38	9.51	5.40	1052.80	74.02

TABELA 10 – Parâmetros obtidos no segundo perfil de detalhe de Piráí-Mirim via diques largos.

Destaca-se que, para o segundo perfil de detalhe de Piráí-Mirim, o modelo de diques finos foi o que mais se aproximou dos dados inseridos, visto que seu erro RMS foi de **75.49** nT se comparado com o modelo de diques largos em que foi obtido um erro RMS de **78.38** nT. Considerando que o perfil varia entre - 200 nT a 400 nT nas figuras 25 e 26, o erro foi na ordem de 14%, um pouco mais elevado, entre os valores máximos e mínimos do TFA. A deconvolução de Euler não detectou a presença de dois diques, sendo assim a inversão nos modelos foi mais satisfatória para localizar as profundidades dos diques. É analisado também que os parâmetros referentes às Tabelas 9 e 10, principalmente nas profundidades, são rasas, tanto para os modelos de diques finos e largos, assim como as larguras dos diques que variam de 4 metros até 74 metros, mostrando grande variabilidade em suas profundidades e larguras. Nesse perfil em especial foi percebido um dique aflorante durante a aquisição de dados, que corresponde ao dique 1 na tabela de diques largos. O tempo de processamento para o modelo de diques finos foi de 237.85 segundos, para o modelo de diques largos foi de 586.60 segundos.

4.2.3.3 Terceiro perfil - PD3

O terceiro perfil de detalhe da área totalizou 1520 metros em pontos espaçados a cada 10 metros. A Figura 27 apresenta o perfil visto em mapa, além do resultado aplicando o filtro ASA e os diques interpretados que totalizaram 8, condizendo com os resultados apresentados nas tabelas abaixo.

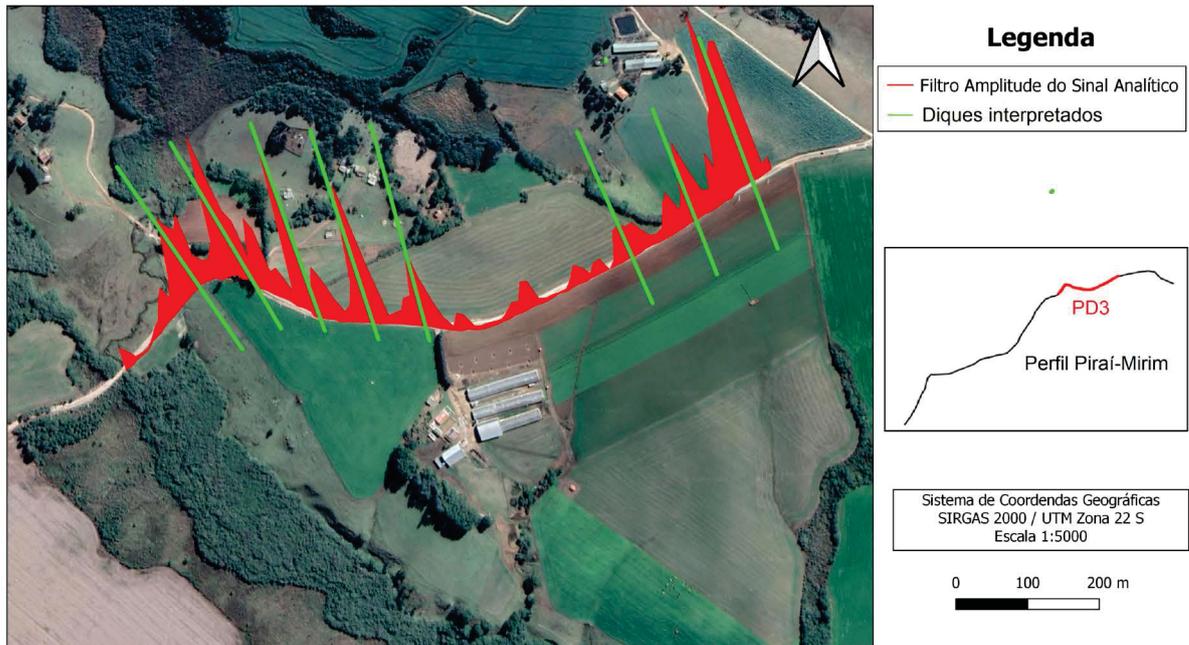


FIGURA 27 – Mapa de localização do terceiro perfil de detalhe de Pirai-Mirim (PD3) com os diques interpretados e o filtro ASA. O diagrama à direita indica a posição de PD3 em relação ao perfil geral.

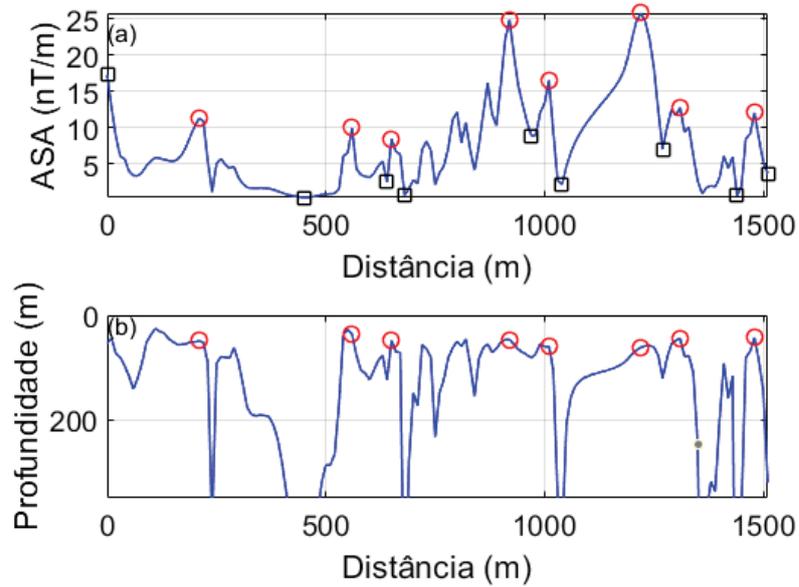


FIGURA 28 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao terceiro perfil de detalhe de Pirai-Mirim. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.

A Figura 28a apresenta o ASA para o perfil modelado evidenciando que na área se tem a indicação da presença de 8 diques delimitados pelos máximos (círculos) e mínimos (quadrados) do ASA. As profundidades estimadas pela equação 3.11 (COOPER, 2015) correspondem aos círculos na Figura 28b.

As Figuras 29 e 30 comparam o dado observado com o dado calculado pelos modelos de diques finos e largos, respectivamente.

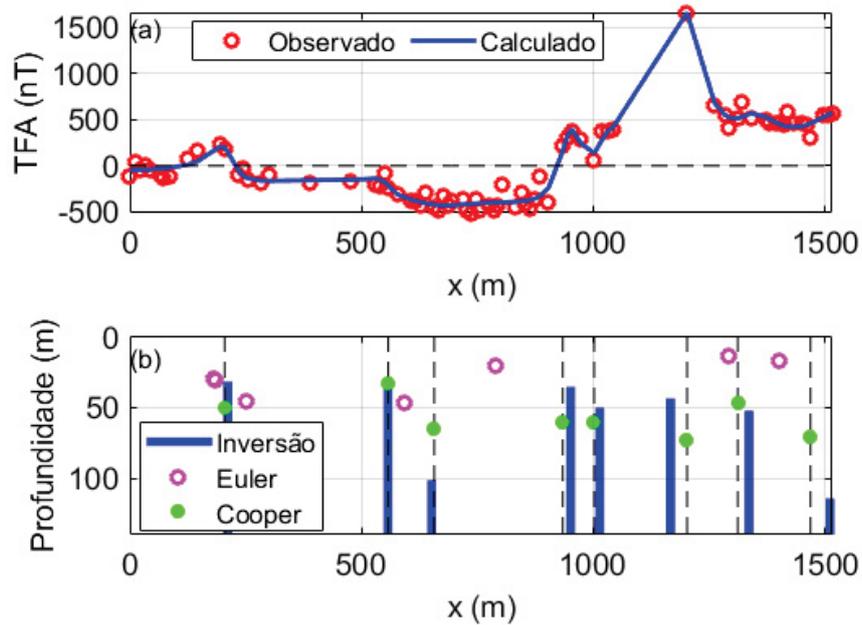


FIGURA 29 – (a) Comparação entre o terceiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.

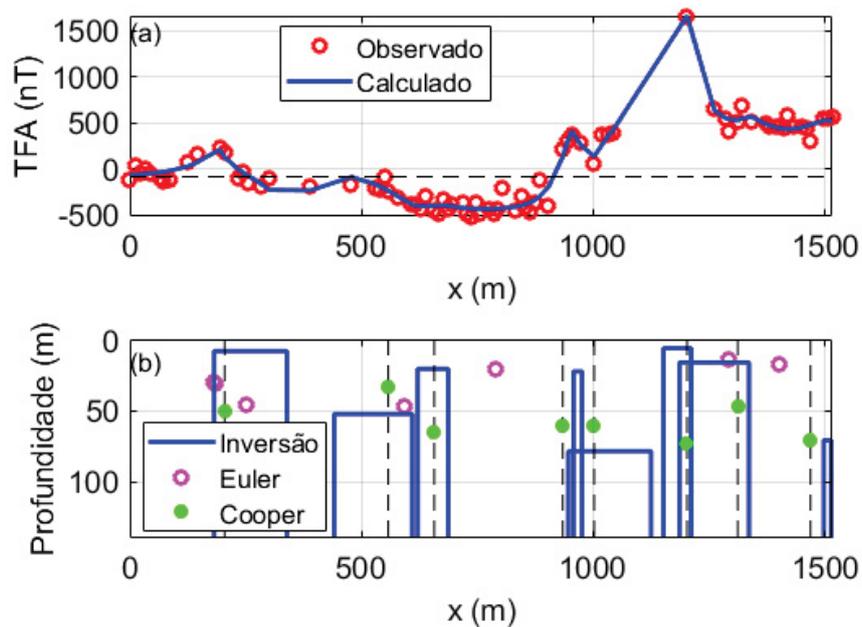


FIGURA 30 – (a) Comparação entre o terceiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.

Dique	α (graus)	h (m)	$A(2a)$ (nT.m)	\bar{x} (m)
1	47.25	31.63	11545.69	211.72
2	17.38	30.75	4321.42	556.84
3	-64.07	101.43	16368.30	651.24
4	100.24	35.27	32858.24	951.23
5	167.41	50.05	37795.31	1014.07
6	113.08	43.48	93452.81	1166.48
7	135.47	52.24	16199.51	1335.79
8	144.47	114.37	54724.17	1510.45

TABELA 11 – Parâmetros obtidos no terceiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim via diques finos.

Dique	α (graus)	h (m)	A (nT)	\bar{x} (m)	a (m)
1	6.16	7.30	132.53	260.54	78.37
2	38.92	51.95	157.27	524.85	84.16
3	134.49	19.92	28.39	654.17	32.90
4	33.96	21.82	845.40	966.59	9.24
5	135.54	78.35	748.68	1035.43	89.32
6	149.40	5.31	501.75	1181.34	29.77
7	-158.83	15.45	88.79	1260.82	75.05
8	99.03	70.54	1374.66	1505.15	7.92

TABELA 12 – Parâmetros obtidos no terceiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim via diques largos.

Destaca-se que, para o terceiro perfil de detalhe de Piraí-Mirim, o modelo de diques finos foi o que mais se aproximou dos dados inseridos, visto que seu erro RMS foi de **72.64** nT se comparado com o modelo de diques largos em que foi obtido um erro RMS de **76.33** nT. Este perfil varia entre - 500 nT a 1500 nT nas figuras 29 e 30, este erro pode ser considerado baixo, na ordem de 3% entre os valores máximos e mínimos do TFA. Comparando a deconvolução de Euler com a inversão, constata-se que os pontos se encontram dispersos e em profundidades mais rasas se comparadas com a inversão, mostrando que a inversão nos modelos foi mais eficaz para localizar as profundidades dos diques. Se percebe também que os parâmetros referentes às Tabelas 11 e 12, principalmente nas profundidades, que variam de 5 metros (rasas) até 114 metros (profundas), assim como as larguras dos diques que variam de 7 metros até 89 metros, mostrando grande variabilidade em suas profundidades e larguras. O tempo de processamento para o modelo de diques finos foi de 350.95 segundos, para o modelo de diques largos o tempo de processamento foi de 879.98 segundos.

4.2.4 Comparação entre o perfil geral e os de detalhe de Piraí-Mirim

Uma vez obtidos os perfis modelados de detalhe, se decidiu comparar os mesmos com o perfil geral de Piraí-Mirim com o intuito de verificar se durante a obtenção dos dados algum dique deixou de ser mapeado, devido a espessura ser menor que o espaçamento.

4.2.4.1 Comparação pelo modelo de diques finos

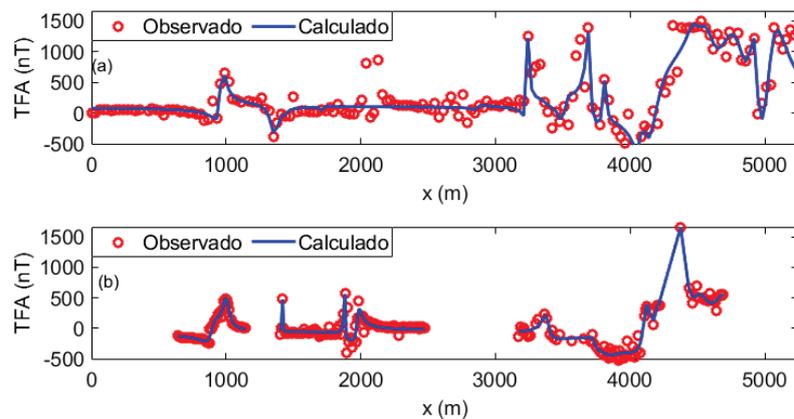


FIGURA 31 – Comparação entre os TFA do perfil geral (a) com os perfis de detalhe (b), considerando o modelo de diques finos.

Ao verificar a Figura 31a que apresenta o perfil geral de Piraí-Mirim, com a Figura 31b, que mostra os perfis de detalhe, percebe-se que houve uma acurácia melhor nos perfis de detalhe em relação ao geral, possivelmente ocasionado pela maior quantidade de medidas obtidas em campo. Vale destacar que:

- No PD1 os dados coletados resultaram em um campo calculado mais acurado, enquanto que no perfil geral, o dado calculado não correspondeu ao dado observado.
- No PD2 devido a uma maior quantidade de medidas, possivelmente foram percebidos dois diques, enquanto que no geral é possível observar apenas um.
- No PD3 o dado calculado se mostra mais ajustado do que no perfil geral, aumentando a confiança correta identificação de suas localizações.

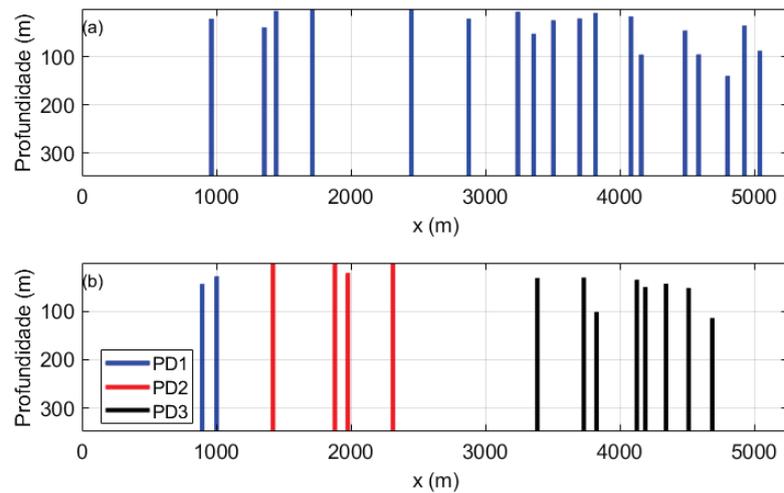


FIGURA 32 – Comparação entre as profundidades do perfil geral (a) com os perfis de detalhe (b), considerando o modelo de diques finos.

Ao comparar a Figura 32a, que apresenta o perfil geral de Pirai-Mirim, com a Figura 32b, que mostra os perfis de detalhe, percebe-se que não houve uma correlação entre os perfis de detalhe com o geral visto que no PD1 dois diques não foram detectados, no PD2 possivelmente devido ao espaçamento, na faixa de 2000 metros, apareceram duas novas estruturas, assim como no PD3 na faixa de 4000 metros, em que novos diques foram identificados.

4.2.4.2 Comparação pelo modelo de diques largos

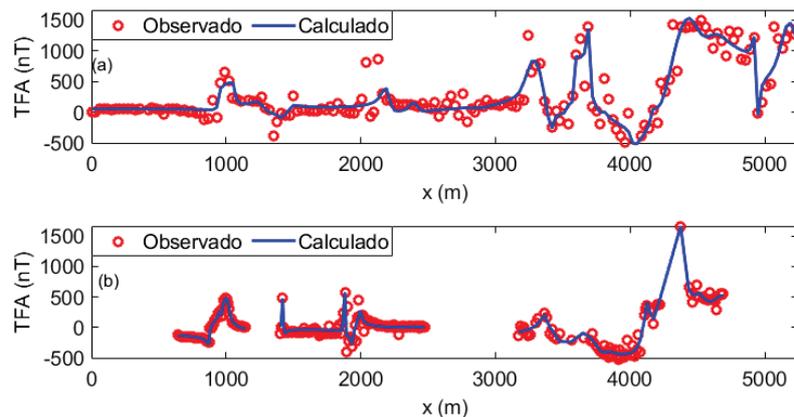


FIGURA 33 – Comparação entre os TFA do perfil geral (a) com os perfis de detalhe (b), considerando o modelo de diques largos.

Ao verificar a Figura 33a que apresenta o perfil geral de Pirai-Mirim, com a Figura 33b, que mostra os perfis de detalhe, percebe-se que houve uma acurácia melhor nos perfis de detalhe em relação ao geral, possivelmente ocasionado pela maior quantidade de medidas obtidas em campo.

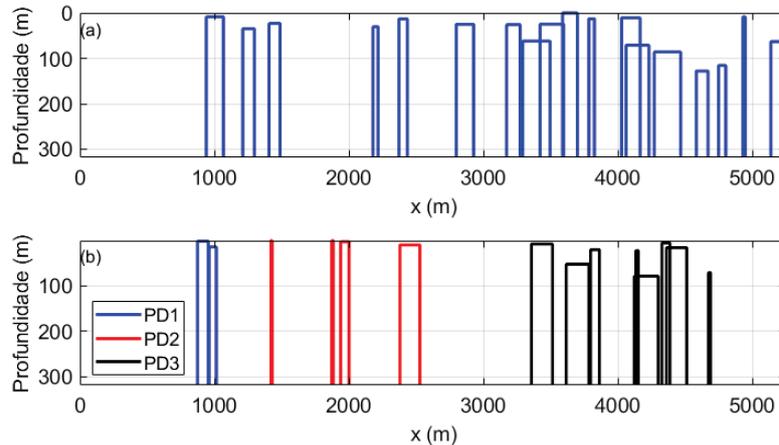


FIGURA 34 – Comparação entre as profundidades do perfil geral (a) com os perfis de detalhe (b), considerando o modelo de diques largos.

Em geral os resultados verificados no modelo de diques largos (Figuras 33 e 34) são semelhantes aos do modelo de diques finos (Figuras 31 e 32), logo as discussões realizadas na subseção se amplificam quando consideramos diques largos. Vale destacar que no PD2 do modelo de diques largos, os dois diques relacionados à anomalia central observada (2000 metros), foram identificados como diques finos, consonante com a Figura 32.

4.2.5 Perfil Socavão

4.2.5.1 Primeiro perfil

O primeiro perfil da área de Socavão totalizou 2700 metros em pontos espaçados a cada 30 metros. A Figura 35 apresenta o perfil visto em mapa além do resultado aplicando o filtro ASA e os diques interpretados que totalizaram 12, condizendo com os resultados apresentados nas tabelas abaixo.

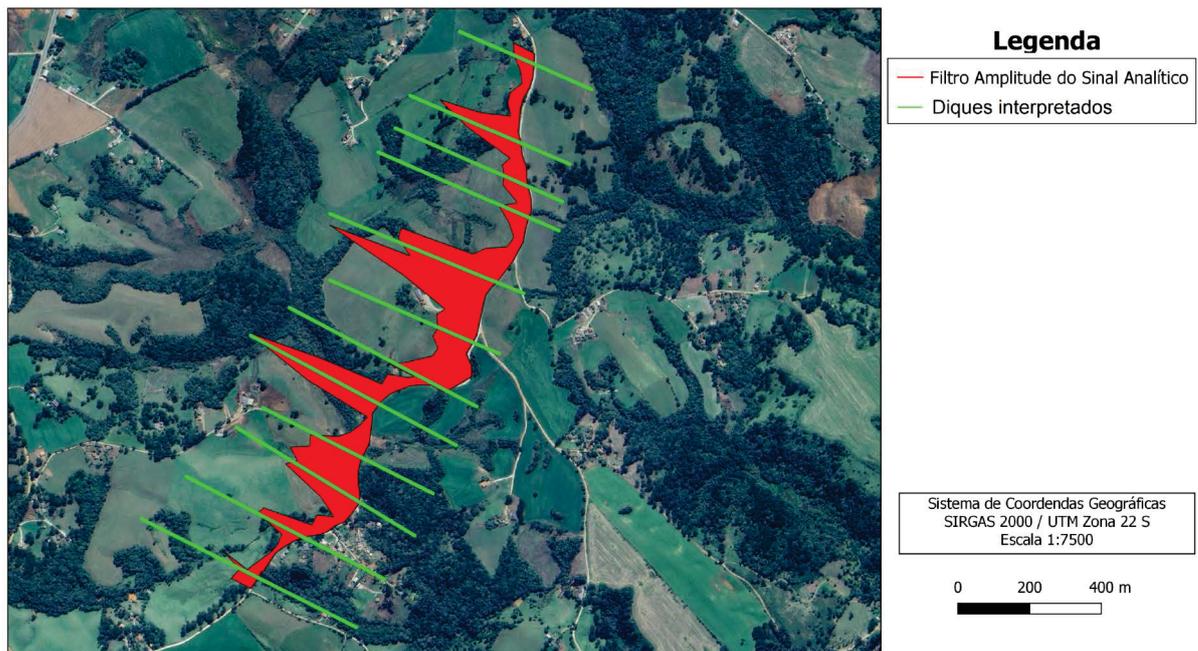


FIGURA 35 – Mapa de localização do primeiro perfil de Socavão com os diques interpretados e o filtro ASA.

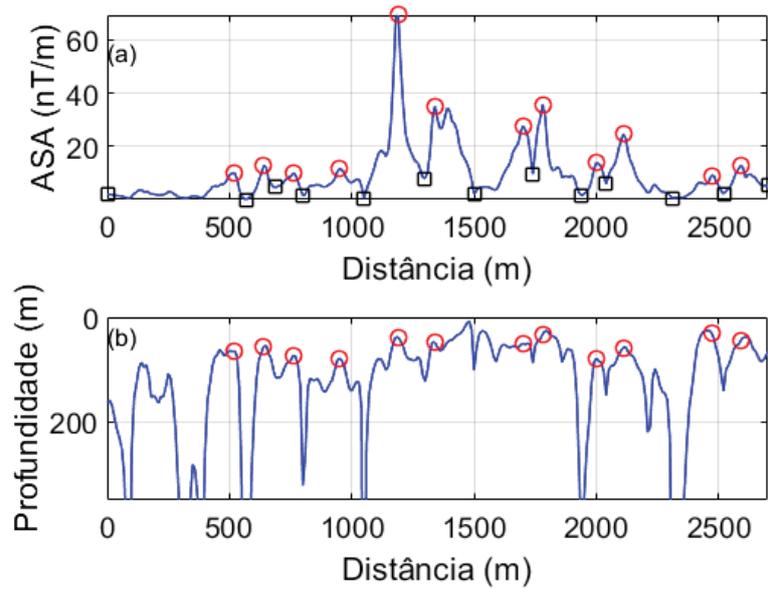


FIGURA 36 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao primeiro perfil de Socavão. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.

A Figura 36a apresenta o ASA para o perfil modelado evidenciando que na área se tem a indicação da presença de 12 diques delimitados pelos máximos (círculos) e mínimos (quadrados) do ASA. As profundidades estimadas pela equação 3.11 (COOPER, 2015) correspondem aos círculos na Figura 36b.

As Figuras 37 e 38 comparam o dado observado com o dado calculado pelos modelos de diques finos e largos, respectivamente.

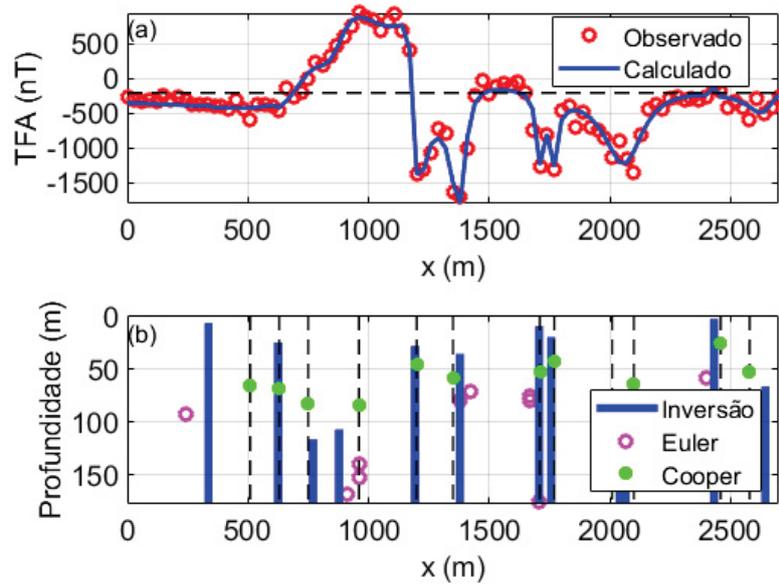


FIGURA 37 – (a) Comparação entre o primeiro perfil de Socavão e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.

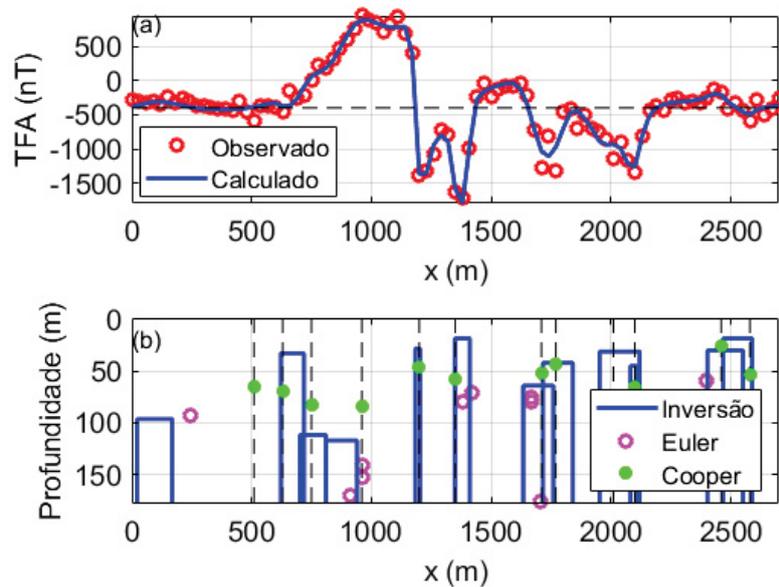


FIGURA 38 – (a) Comparação entre o primeiro perfil de Socavão e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.

Dique	α (graus)	h (m)	$A(2a)$ (nT.m)	\bar{x} (m)
1	12.14	6.29	195.94	336.61
2	-42.96	24.73	2218.89	625.55
3	102.17	116.66	107889.74	769.84
4	-182.54	107.10	134795.38	877.93
5	-29.72	28.20	60959.90	1192.75
6	-109.28	35.61	59544.20	1378.96
7	-105.80	9.35	11665.66	1706.60
8	-76.42	19.72	25779.89	1757.20
9	-32.37	88.13	15551.62	2041.26
10	-107.65	100.60	100201.86	2065.94
11	72.34	2.50	460.66	2432.25
12	-121.77	66.67	25159.61	2645.13

TABELA 13 – Parâmetros obtidos no primeiro perfil de Socavão via diques finos.

Dique	α (graus)	h (m)	A (nT)	\bar{x} (m)	a (m)
1	105.36	96.35	123.36	94.72	73.23
2	-82.89	32.89	171.64	670.46	47.93
3	68.50	111.47	1087.88	755.75	53.99
4	161.66	116.88	1466.50	875.46	64.67
5	-29.46	28.35	3254.71	1192.79	9.92
6	-105.39	18.63	760.45	1379.53	31.07
7	-6.24	64.18	731.63	1696.73	63.09
8	-194.74	42.25	441.47	1778.20	62.73
9	-146.51	31.25	231.23	2036.10	83.57
10	-82.73	45.10	1771.71	2093.98	12.20
11	89.12	30.04	53.53	2476.75	74.29
12	-61.30	18.65	78.18	2528.78	60.47

TABELA 14 – Parâmetros obtidos no primeiro perfil de Socavão via diques largos.

Destaca-se que, para o primeiro perfil de Socavão, o modelo de diques largos foi o que mais se aproximou dos dados inseridos, visto que seu erro RMS foi de **101.34** nT se comparado com o modelo de diques finos em que foi obtido um erro RMS de **106.48** nT. Este perfil varia entre - 500 nT a 1500 nT nas figuras 37 e 38 (superiores), sendo assim este erro pode ser considerado baixo, na ordem de 6% entre os valores máximos e mínimos do TFA. Comparando a deconvolução de Euler com a inversão, constata-se que alguns pontos se encontram dispersos e de certa forma algumas profundidades não foram localizadas, mostrando que a inversão nos modelos melhor localizou as profundidades dos diques. Outro fator importante para se analisar são os parâmetros referentes às Tabelas 13 e 14, principalmente nas profundidades, que variam de 2 metros (rasas) até 116 metros (profundas), assim como as larguras dos diques que variam de 9 metros até 83 metros, mostrando grande variabilidade em suas profundidades e larguras. O tempo de processamento para o modelo de diques finos

foi de 563.19 segundos, para o modelo de diques largos o tempo de processamento foi de 1627.91 segundos.

4.2.5.2 Segundo perfil

O segundo perfil da área de Socavão o dado foi adquirido em julho de 2022, totalizando 600 metros em pontos espaçados a cada 30 metros. A Figura 39 apresenta o perfil visto em mapa, além do resultado aplicando o filtro ASA e os diques interpretados que totalizou apenas 1, condizendo com os resultados apresentados nas tabelas abaixo.



FIGURA 39 – Mapa de localização do segundo perfil de Socavão com os diques interpretados e o filtro ASA.

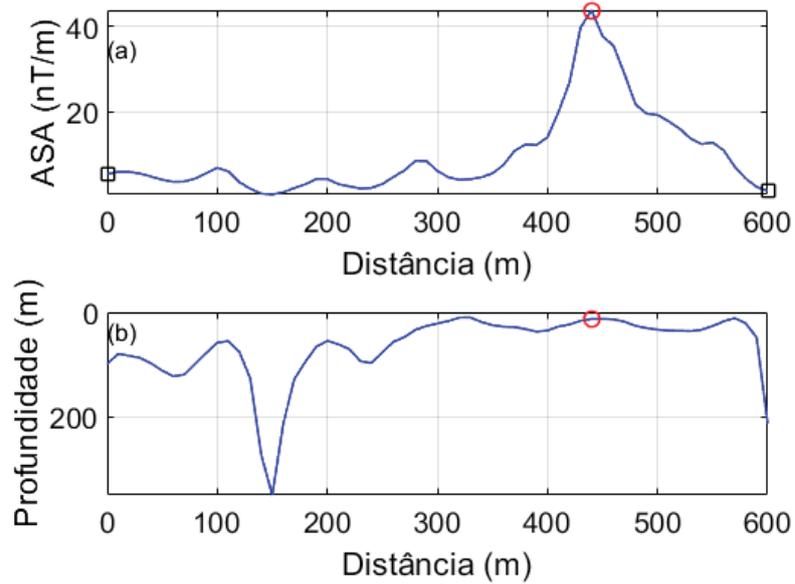


FIGURA 40 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao segundo perfil de Socavão. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.

A Figura 40a apresenta o ASA para o perfil modelado evidenciando que na área se tem a indicação da presença de apenas 1 dique delimitado pelos máximos (círculos) e mínimos (quadrados) do ASA. As profundidades estimadas pela equação 3.11 (COOPER, 2015) correspondem aos círculos na Figura 40b.

As Figuras 41 e 42 comparam o dado observado com o dado calculado pelos modelos de diques finos e largos, respectivamente.

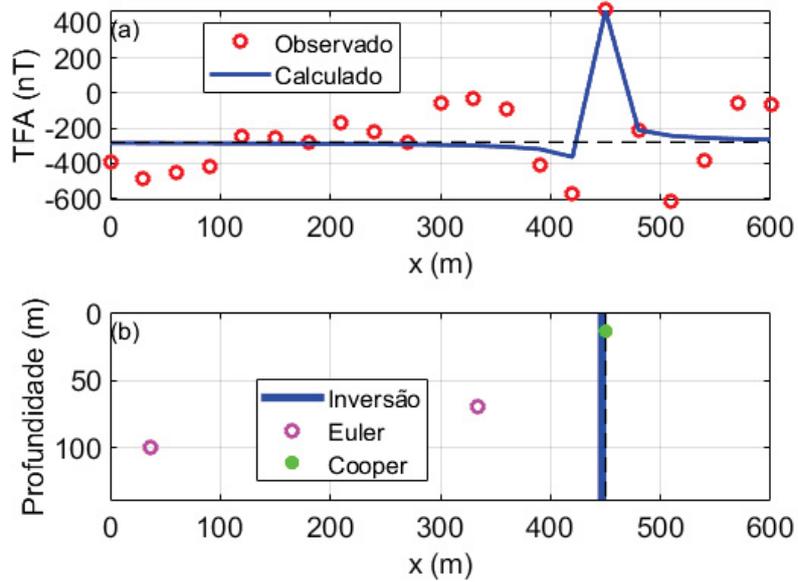


FIGURA 41 – (a) Comparação entre o segundo perfil de Socavão e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.

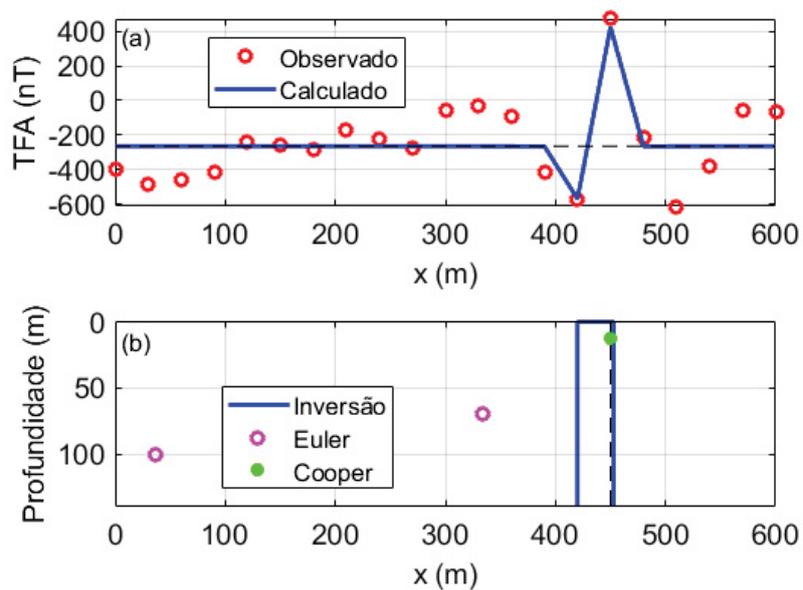


FIGURA 42 – (a) Comparação entre o segundo perfil de Socavão e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.

Dique	α (graus)	h (m)	$A(2a)$ (nT.m)	\bar{x} (m)
1	-171.46	-0.00	2287.60	-279.90

TABELA 15 – Parâmetros obtidos no segundo perfil de Socavão via diques finos.

Dique	α (graus)	h (m)	A (nT)	\bar{x} (m)	a (m)
1	90.06	-0.38	209.31	436.45	16.41

TABELA 16 – Parâmetros obtidos no segundo perfil de Socavão via diques largos.

Destaca-se que, para o segundo perfil de Socavão, o modelo de diques largos foi o que mais se aproximou dos dados inseridos, visto que seu erro RMS foi de **155.29** nT se comparado com o modelo de diques finos em que foi obtido um erro RMS de **165.72** nT. Considerando que o perfil varia entre - 500 nT a 500 nT nas figuras 41 e 42, este erro está na ordem de 16% entre os valores máximos e mínimos do TFA. Comparando a deconvolução de Euler com a inversão, constata-se que não houve a correta localização das profundidades mostrando que a inversão nos modelos foi mais eficaz para localizar as profundidades dos diques. Outro fator importante para se analisar são os parâmetros referentes às Tabelas 15 e 16, principalmente na profundidade, que fica em torno de 0 metros (aflorante), assim como a largura do dique que é em torno de 16 metros, evidenciando que a inversão foi capaz de localizar um dique aflorante. O tempo de processamento para o modelo de diques finos foi de 71.26 segundos, já no modelo de diques largos o tempo de processamento foi de 100.90 segundos.

4.2.6 Perfil Tronco

4.2.6.1 Primeiro perfil

Para o primeiro perfil da área de Tronco o dado foi adquirido em julho de 2022, totalizando 1050 metros em pontos espaçados a cada 30 metros. A Figura 43 apresenta o perfil visto em mapa, além do resultado aplicando o filtro ASA e os diques interpretados que totalizaram 2, condizendo com os resultados apresentados nas tabelas abaixo.



FIGURA 43 – Mapa de localização do primeiro perfil de Tronco com os diques interpretados e o filtro ASA.

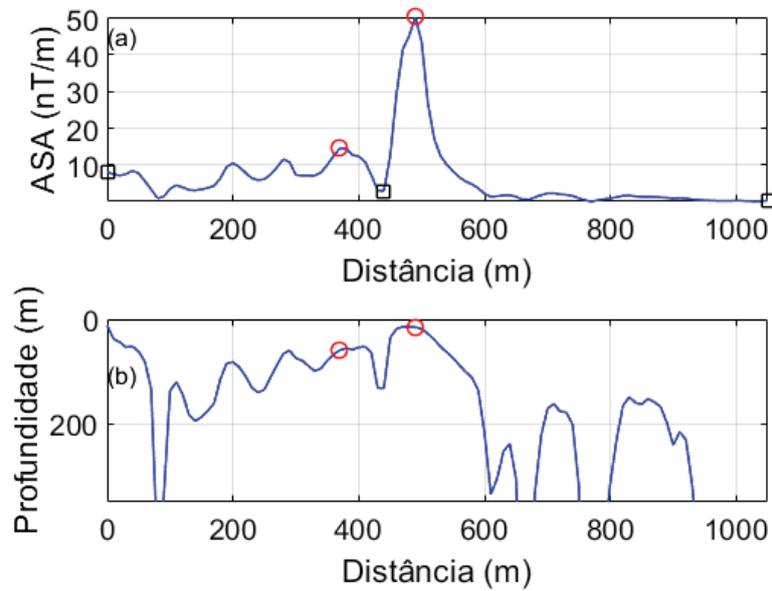


FIGURA 44 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao primeiro perfil de Tronco. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.

A Figura 44a apresenta o ASA para o perfil modelado evidenciando que na área se tem a indicação da presença de 2 diques delimitados pelos máximos (círculos) e mínimos (quadrados) do ASA. As profundidades estimadas pela equação 3.11 (COOPER, 2015) correspondem aos círculos na Figura 44b.

As Figuras 45 e 46 comparam o dado observado com o dado calculado pelos modelos de diques finos e largos, respectivamente.

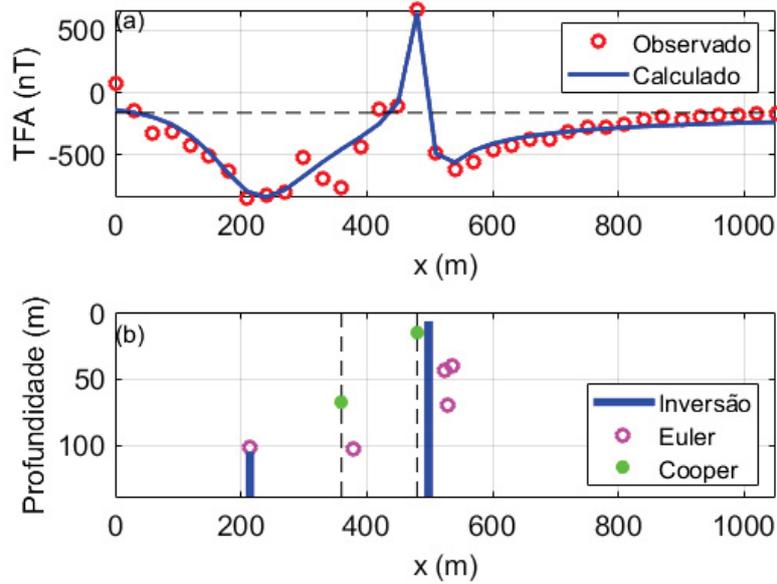


FIGURA 45 – (a) Comparação entre o primeiro perfil de Tronco e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.

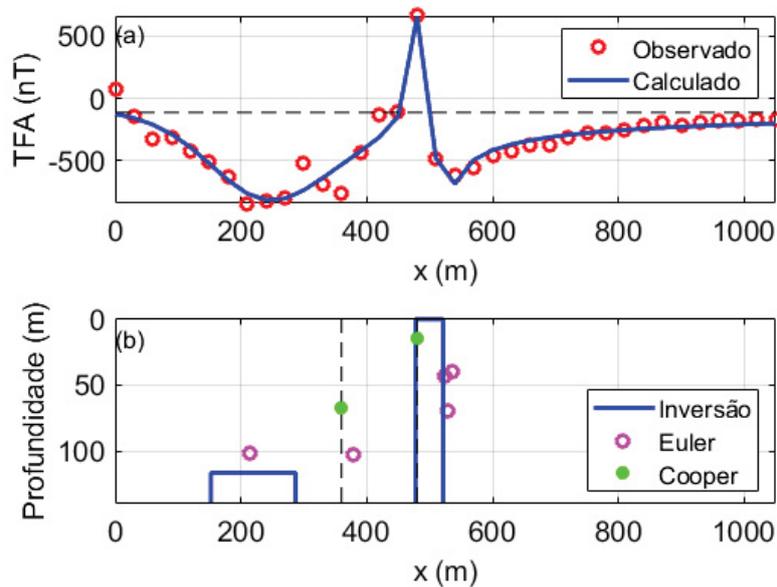


FIGURA 46 – (a) Comparação entre o primeiro perfil de Tronco e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.

Dique	α (graus)	h (m)	$A(2a)$ (nT.m)	\bar{x} (m)
1	-64.51	105.10	81025.43	214.26
2	59.23	5.86	25829.13	498.21

TABELA 17 – Parâmetros obtidos no primeiro perfil de Tronco via diques finos.

Dique	α (graus)	h (m)	A (nT)	\bar{x} (m)	a (m)
1	-65.94	116.47	755.93	219.60	67.28
2	10.75	0.01	304.43	499.61	21.92

TABELA 18 – Parâmetros obtidos no primeiro perfil de Tronco via diques largos.

Destaca-se que, para o primeiro perfil de Tronco, o modelo de diques largos foi o que mais se aproximou dos dados inseridos, visto que seu erro RMS foi de **79.91** nT se comparado com o modelo de diques finos em que foi obtido um erro RMS de **90.16** nT. Constatando que o perfil varia entre - 500 nT a 500 nT nas figuras 45 e 46, este erro pode ser considerado baixo, na ordem de 7% entre os valores máximos e mínimos do TFA. Comparando a deconvolução de Euler com a inversão, constata-se que os pontos se encontram dispersos mostrando que a inversão nos modelos foi mais eficaz para localizar as profundidades dos diques. Outro fator importante para se analisar são os parâmetros referentes às Tabelas 17 e 18, principalmente na profundidade, que fica em torno de 0.01 metros (aflorante) e 116 metros (profundo), assim como as larguras do diques que variam entre 21 e 67 metros, mostrando grande variabilidade em suas profundidades e larguras. O tempo de processamento para o modelo de diques finos foi de 104.34 segundo, já no modelo de diques largos foi de 180.63 segundos.

4.2.6.2 Segundo perfil

Para o segundo perfil da área de Tronco o dado foi adquirido em julho de 2022, totalizando 1890 metros em pontos espaçados a cada 30 metros. A Figura 47 apresenta o perfil visto em mapa, além do resultado aplicando o filtro ASA e os diques interpretados que totalizaram 9, condizendo com os resultados apresentados nas tabelas abaixo.

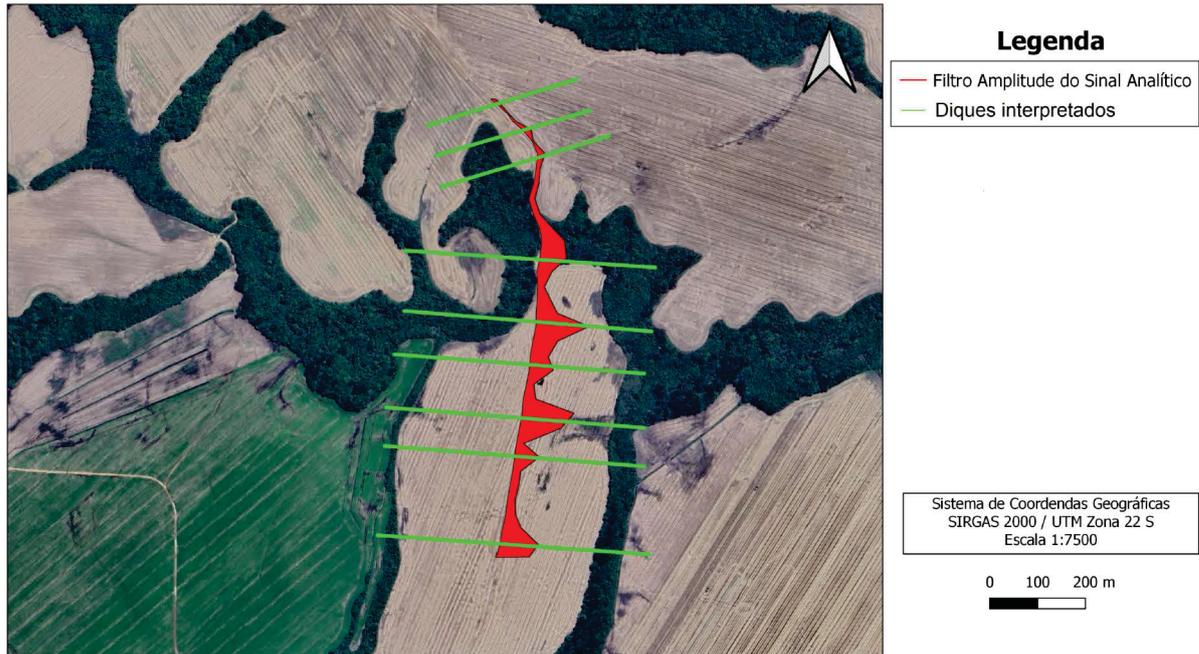


FIGURA 47 – Mapa de localização do segundo perfil de Tronco com os diques interpretados e o filtro ASA.

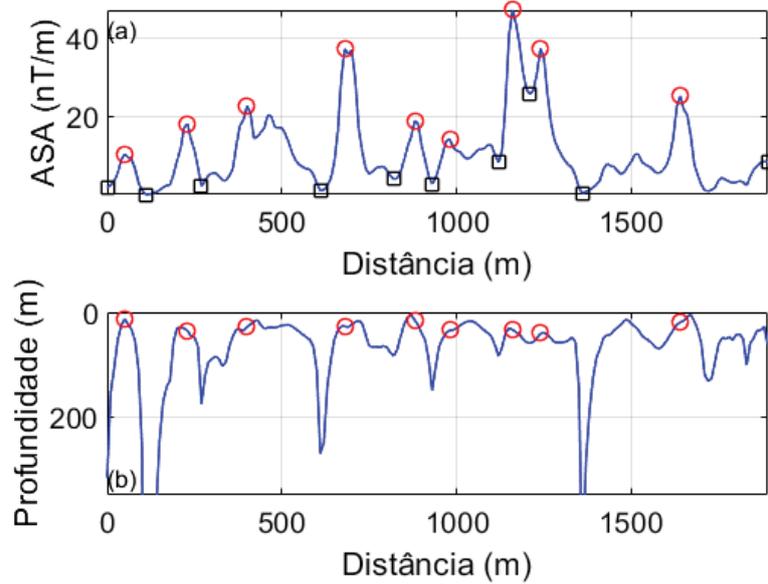


FIGURA 48 – (a) Perfil do filtro ASA aplicado ao segundo perfil de Tronco. (b) Estimativas de profundidade de acordo com a equação 3.11.

A Figura 48a apresenta o ASA para o perfil modelado evidenciando que na área se tem a indicação da presença de 9 diques delimitado pelos máximos (círculos) e mínimos (quadrados) do ASA. As profundidades estimadas pela equação 3.11 (COOPER, 2015) correspondem aos círculos na Figura 48b.

As Figuras 49 e 50 comparam o dado observado com o dado calculado pelos modelos de diques finos e largos, respectivamente.

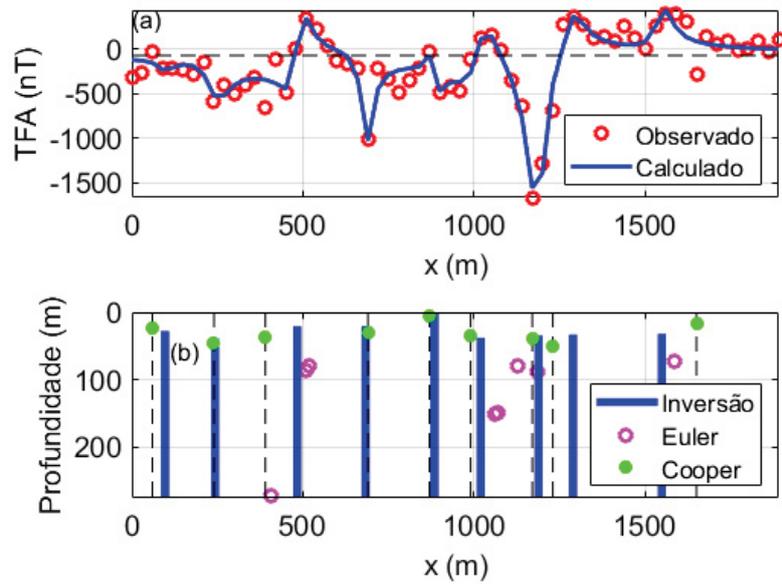


FIGURA 49 – (a) Comparação entre o segundo perfil de Tronco e o perfil calculado assumindo diques finos (Eq. 3.4). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.

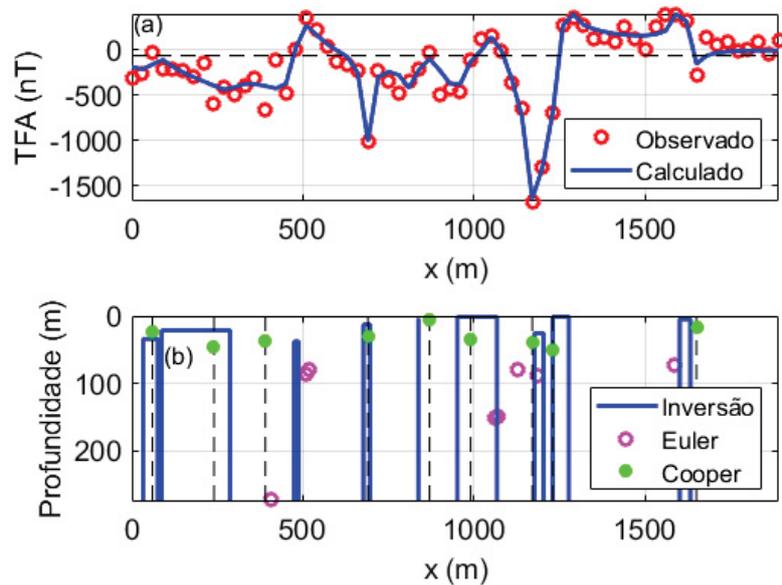


FIGURA 50 – (a) Comparação entre o segundo perfil de Tronco e o perfil calculado assumindo diques largos (Eq. 3.3). (b) Modelo obtido por meio do algoritmo de inversão, com as linhas tracejadas representando as localizações dos diques estimadas pelo ASA.

Dique	α (graus)	h (m)	$A(2a)$ (nT.m)	\bar{x} (m)
1	-80.71	27.18	3315.50	97.13
2	-62.00	38.05	15420.34	243.48
3	159.52	20.21	17671.42	483.39
4	-72.70	19.46	19160.71	682.74
5	12.83	0.82	2911.03	884.30
6	141.51	37.05	23993.54	1019.85
7	-107.65	34.02	63139.24	1188.55
8	-110.90	32.29	13501.34	1289.02
9	111.42	31.30	13834.12	1548.94

TABELA 19 – Parâmetros obtidos no segundo perfil de Tronco via diques finos.

Dique	α (graus)	h (m)	A (nT)	\bar{x} (m)	a (m)
1	-140.82	33.22	129.92	54.40	21.21
2	-39.93	20.41	77.53	187.44	99.75
3	161.14	36.97	2092.15	480.27	6.20
4	-86.45	11.63	652.62	686.44	9.83
5	-129.80	2.29	56467.31	837.25	0.08
6	163.47	0.46	158.53	1009.30	57.76
7	-119.64	24.45	2071.70	1189.94	13.06
8	179.35	-0.11	128.83	1253.39	23.22
9	30.47	3.92	265.65	1616.54	15.56

TABELA 20 – Parâmetros obtidos no segundo perfil de Tronco via diques largos.

Destaca-se que, para o segundo perfil de Tronco, o modelo de diques largos foi o que mais se aproximou dos dados inseridos, visto que seu erro RMS foi de **106.84** nT se comparado com o modelo de diques finos em que foi obtido um erro RMS de **124.08** nT. Considerando que o perfil varia entre 0 nT a - 1500 nT nas figuras 49 e 50, este erro pode ser considerado baixo, na ordem de 7% entre os valores máximos e mínimos do TFA. Comparando a deconvolução de Euler com a inversão, constata-se que algumas profundidades não foram localizadas mostrando que a inversão nos modelos foi mais eficaz para localizar as profundidades dos diques. Outro fator importante para se analisar são os parâmetros referentes às Tabelas 19 e 20, principalmente na profundidade, que fica em torno de 0.46 metros (aflorante) e 38 metros (profundo), assim como as larguras dos diques que variam entre 0.08 e 99 metros, mostrando grande variabilidade em suas profundidades e larguras, além da localização de 3 diques aflorantes. O tempo de processamento para o modelo de diques finos foi de 366.86 segundos, para o modelo de diques largos o tempo de processamento foi de 918.13 segundos.

5 CONCLUSÕES

Serão sumarizadas a seguir as principais conclusões deste estudo.

A interpretação qualitativa permitiu identificar grandes estruturas com o auxílio dos mapas aeromagnéticos.

Através dessas delimitações foi possível delimitar e mapear os diques não-aflorantes através da análise dos mapas magnéticos terrestres com a aplicação do filtro ASA.

A partir desses resultados foi possível comparar os dados com os obtidos por meio da inversão nos perfis das subáreas de Piraí-Mirim, Socavão e Tronco, onde verificamos que o modelo de diques múltiplos com o campo regional é capaz de gerar as anomalias que se ajustam acuradamente aos dados adquiridos em campo.

A aproximação do perfil de Piraí-Mirim foi melhorada quando o espaçamento entre as estações foi reduzida para 10 metros, visto que mais diques foram detectados.

Entre os resultados obtidos nas inversões e apresentados nas tabelas de parâmetros, convém destacar os valores obtidos para as profundidades. Esses sugerem que os diques nas áreas analisadas são, em sua grande maioria, não-aflorantes. Entretanto, foram encontrados 3 diques aflorantes em campo o que corroboram com os perfis.

Os diques variam suas profundidades desde 0 (aflorantes) até aproximadamente 250 metros (profundos), além de suas espessuras variarem de 1 metro até 97 metros, que são coerentes com os valores encontrados na literatura (e.g., USSAMI et al., 1991).

Além do mais, os modelos foram capazes de caracterizar as estruturas analisadas e prever uma estimativa de profundidade evidenciados nas figuras dos modelos invertidos, em comparação com a deconvolução de Euler. Sendo assim, a inversão como um todo, foi capaz de apresentar de forma mais fidedigna a profundidade dos diques.

Foi percebido durante a realização das inversões que houve uma diferença pouco significativa entre os resultados obtidos com o modelo de diques finos e com o modelo de diques largos, portanto o modelo de diques finos se mostrou mais atrativo por conta do custo computacional mais baixo.

Em novos estudos a inversão pode ser realizada tomando o modelos de diques finos como ponto inicial para o modelo de diques largos, facilitando a entrada de valores, em oposição ao método de Cooper (2015). Sugere-se a utilização do ruído do dado durante a aquisição dos perfis, para auxiliar nas inversões, evitar a superposição de diques nos modelos invertidos e finalmente detalhar dos perfis durante a aquisição de dados nas áreas de Socavão e Tronco.

REFERÊNCIAS

- ASSINE, M. L.; SOARES, P. C.; MILANI, E. Sequências tectono-sedimentares mesopaleozóicas da Bacia do Paraná, Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 2, p. 77–89, 1994. Citado 1 vez na página 8.
- BALKAYA, Ç.; KAFTAN, I. Inverse modelling via differential search algorithm for interpreting magnetic anomalies caused by 2D dyke-shaped bodies. **Journal of Earth System Science**, v. 130, p. 1–23, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 21, 25.
- BARANOV, V.; NAUDY, H. Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. **Geophysics**, v. 29, n. 1, p. 67–79, 1964. Citado 2 vezes nas páginas 10, 12.
- BEIKI, M.; PEDERSEN, L. B. Estimating magnetic dike parameters using a non-linear constrained inversion technique: an example from the Särna area, west central Sweden. **Geophysical Prospecting**, v. 60, n. 3, p. 526–538, 2012. Citado 1 vez na página 2.
- BESSER, M. L.; BRUMATTI, M.; SPISILA, A. L. Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Paraná. CPRM, 2021. Citado 1 vez na página 5.
- BOOS, E. **Avanços em técnicas iterativas para problemas inversos lineares e não lineares com aplicação na reconstrução de condutividade térmica**. 2022. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Citado 1 vez na página 19.
- BOOS, E.; GONÇALVES, D. S.; BAZÁN, F. S. Levenberg-Marquardt method with singular scaling and applications. **Applied Mathematics and Computation**, v. 474, p. 128688, 2024. Citado 1 vez na página 19.
- BRITO MAPA, F.; MARQUES, I. P.; TURRA, B. B.; PALMEIRA, L. C. M.; PERROTTA, M. M.; CAMPOS, F. F.; DE ANDRADE, J. J. C.; SEVERINO, R. R.; DE LIMA, R. A. P.; CATABELLOTTA, F. P. Mapa geológico e de recursos minerais da Bacia de Castro. CPRM, 2019. Citado 1 vez na página 9.
- CASTRO, F. R.; OLIVEIRA, S. P.; DE SOUZA, J.; FERREIRA, F. J. F. Combining tilt derivative filters: new approaches to enhance magnetic anomalies. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 36, n. 3, p. 1–9, 2018. Citado 1 vez na página 2.

CAVALCANTE, F. L. **Técnicas especializadas para o estudo de lineamentos magnéticos associados a enxame de diques e de anomalias lineares em coberturas basálticas**. 2024. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Citado 1 vez na página 2.

CAVALCANTE, F. L.; MENDONÇA, C. A.; OFTERDINGER, U. S.; DE SOUZA FILHO, O. A. Well productivity in the Ponta Grossa dike Swarm, Brazil: An integrated study with magnetic data inversion and clustering analysis of model solutions. **Journal of Hydrology**, v. 588, p. 125079, 2020. Citado 1 vez na página 2.

COOPER, G. R. J. Using the analytic signal amplitude to determine the location and depth of thin dikes from magnetic data. **Geophysics**, v. 80, n. 1, J1–J6, 2015. Citado 16 vezes nas páginas 2, 11, 16–18, 22, 29, 33, 37, 41, 48, 52, 56, 60, 64.

CPRM, C. D. P. E. R. M. Projeto Aerogeofísico Paraná-Santa Catarina, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 10, 12.

DA COSTA, P. C. C. **Petrologia, geoquímica e geocronologia dos diques máficos da região de Crixás-Goiás, porção centro-oeste do Estado de Goiás**. 2003. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Citado 1 vez na página 1.

DE SOUZA, J.; OLIVEIRA, S. P.; SZAMEITAT, L. S. A.; DE SOUZA FILHO, O. A.; FERREIRA, F. J. F. Fourier domain vertical derivative of the nonpotential squared analytical signal of dike and step magnetic anomalies: A case of serendipity. **Geophysics**, v. 89, n. 2, G1–G12, 2024. Citado 1 vez na página 2.

DE SOUZA, J.; POMPONET OLIVEIRA, S.; FERREIRA, F. J. F. Using parity decomposition for interpreting magnetic anomalies from dikes having arbitrary dip angles, induced and remanent magnetization. **Geophysics**, v. 85, n. 3, J51–J58, 2020. Citado 1 vez na página 2.

DENTITH, M.; MUDGE, S. T. **Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. Citado 1 vez na página 2.

FERREIRA, F. J. F.; DE SOUZA, J.; BONGIOLO, A. B. S.; CASTRO, L. G. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. **Geophysics**, v. 78, n. 3, J33–J41, 2013. Citado 1 vez na página 2.

FIORI, A.; REIS NETO, J.; MONASTIER, M.; CAMARGO, E.; FUMAGALLI, C.; SALAMUNI, E.; LIMA, J.; MORO, R.; KOPS, P. Aspectos estruturais e estratigráficos do Grupo Açungui e Formação Itaiacoca no estado do Paraná. **Curitiba, UFPR/MINEROPAR. 191p**, 1987. Citado 1 vez na página 5.

GIMENEZ FILHO, A. **Evolução do Complexo Granítico Três Córregos a noroeste de Apiaí-SP**. 1993. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Citado 1 vez na página 6.

GUIMARÃES, G. B. **As rochas granitóides do Complexo Granítico Cunhaporanga, Paraná: aspectos geológicos, geofísicos, geoquímicos e mineralógicos**. 2000. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Citado 3 vezes nas páginas 5–7.

HOOD, P. The Königsberger ratio and the dipping-dyke equation. **Geophysical Prospecting**, v. 12, n. 4, p. 440–456, 1964. Citado 1 vez na página 15.

KU, C. C.; SHARP, J. A. Werner deconvolution for automated magnetic interpretation and its refinement using Marquardt's inverse modeling. **Geophysics**, v. 48, n. 6, p. 754–774, 1983. Citado 1 vez na página 15.

LOWRIE, W.; FICHTNER, A. **Fundamentals of Geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2020. Citado 1 vez na página 2.

MARINI, O.; FUCK, R.; TREIN, E. Intrusivas básicas jurássico-cretácicas do primeiro planalto do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 23-25, p. 307–324, 1967. Citado 2 vezes nas páginas 7, 8.

MCGRATH, P. H.; HOOD, P. J. The dipping dike case: A computer curve-matching method of magnetic interpretation. **Geophysics**, v. 35, n. 5, p. 831–848, 1970. Citado 2 vezes nas páginas 11, 14.

MCGRATH, P. H.; HOOD, P. J. An automatic least-squares multimodel method for magnetic interpretation. **Geophysics**, v. 38, n. 2, p. 349–358, 1973. Citado 1 vez na página 18.

MILANI, E. J.; RAMOS, V. A. et al. Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 4, p. 473–484, 1998. Citado 2 vez na página 1.

MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. 1997. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Citado 2 vez na página 8.

MILANI, E. J.; RANGEL, H. D.; BUENO, G. V.; STICA, J. M.; WINTER, W. R.; CAIXETA, J. M.; NETO, O. P. et al. Bacias sedimentares brasileiras: cartas estratigráficas. **Boletim de Geociencias da PETROBRAS**, v. 15, n. 2, p. 183–205, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 8, 9.

MORO, R. P. X. **A Bacia Ordoviciana do Grupo Castro-PR**. 1993. Diss. (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Citado 1 vez na página 7.

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, n. 3, p. 507–517, 1972. Citado 1 vez na página 10.

POI, G. A.; BONGIOLO, A. B. S.; SZAMEITAT, L. S. A.; STEVANATO, R.; DE SOUZA FILHO, O. A.; JORGE, V. T. Comparação de dados magnetométricos aéreos e terrestres para o mapeamento geofísico estrutural na Floresta Nacional De Piraí Do Sul/PR. **Boletim Paranaense De Geociências**, 2023. No prelo. Citado 1 vez na página 27.

PRAZERES FILHO, H. J. dos. **Litogeoquímica, geocronologia (U-Pb) e geologia isotópica dos Complexos Graníticos Cunhaporanga e Três Córregos, estado do Paraná**. 2000. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Citado 2 vez na página 7.

RAJU, D. C. V. LIMAT: a computer program for least-squares inversion of magnetic anomalies over long tabular bodies. **Computers & Geosciences**, v. 29, n. 1, p. 91–98, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 15, 19.

RAM BABU, H. V.; VIJAYAKUMAR, V.; ATCHUTA RAO, D. A simple method for the analysis of magnetic anomalies over dike-like bodies. **Geophysics**, v. 51, n. 5, p. 1119–1126, 1986. Citado 1 vez na página 2.

REFORD, M. S. Magnetic anomalies over thin sheets. **Geophysics**, v. 29, n. 4, p. 532–536, 1964. Citado 1 vez na página 15.

REIS NETO, J. M. **Faixa Itaiacoca: registro de uma colisão entre dois blocos continentais no Neoproterozóico**. 1994. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Citado 1 vez na página 6.

REYNOLDS, J. M. **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2011. Citado 1 vez na página 1.

RODRIGUES, S. W. O.; CALTABELOTI, F. P.; ALMEIDA, V. V.; BRUMATTI, M.; ARCHANJO, C. J.; DE HOLLANDA, M. H. B. M.; SALAZAR, C. A.; LIU, D. Petrografia, Geoquímica e Geocronologia dos Granitos Patrimônio Santo Antônio e São Domingos (Suíte Cunhaporanga), Paraná, Sudeste do Brasil. **Geologia USP. Série Científica**, v. 11, n. 3, p. 03–21, 2011. Citado 1 vez na página 6.

SEEQUENT. **Filtros de convolução simétrica 7x7 e 9x9**. Christchurch: Oasis Montaj, 2023. Citado 1 vez na página 12.

SEN, M. K.; STOFFA, P. L. **Global Optimization Methods in Geophysical Inversion**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 3, 18.

SOUZA, A. P. **Mapa Geológico na escala 1: 50.000 e esboço da evolução tectônica e sedimentar do Grupo Itaiacoca, nas folhas Barra do Chapéu e Ouro Verde-SP/PR**. 1990. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Citado 2 vezes na página 6.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. Citado 1 vez na página 1.

THOMPSON, D. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. **Geophysics**, v. 47, n. 1, p. 31–37, 1982. Citado 2 vezes nas páginas 11, 16.

USSAMI, N.; KOLISNYK, A.; RAPOSO, M. I. B.; FERREIRA, F. J. F.; MOLINA, E. C.; ERNESTO, M. Detectabilidade magnética de diques do Arco de Ponta Grossa: um estudo integrado de magnetometria terrestre/aérea e magnetismo de rocha. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 21, n. 4, p. 317–27, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 2, 63.

VERDUZCO, B.; FAIRHEAD, J. D.; GREEN, C. M.; MACKENZIE, C. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. **The Leading Edge**, v. 23, n. 2, p. 116–119, 2004. Citado 1 vez na página 2.