

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

FELIPE LISBONA CAVALCANTE

Inversão 2D de dados magnetométricos com modelo prismático:

Aplicação em enxames de diques

São Paulo

2019

FELIPE LISBONA CAVALCANTE

Inversão 2D de dados magnetométricos com modelo prismático:

Aplicação em enxames de diques

Versão Corrigida.

O original encontra-se disponível na Unidade.

Dissertação apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Área de concentração: Geofísica

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendonça

São Paulo

2019

Nome: Cavalcante, Felipe Lisbona

Título: Inversão 2D de dados magnetométricos com modelo prismático: Aplicação em enxames de diques.

Dissertação apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____
Instituição _____
Julgamento _____

Prof. Dr. _____
Instituição _____
Julgamento _____

Prof. Dr. _____
Instituição _____
Julgamento _____

Dedicatória

A meu pai, grande guerreiro, que fez todo o possível para que seus filhos tivessem a educação que a vida lhe privou. Que o senhor tenha encontrado conforto, pois sua falta é grande em todos os momentos de minha vida. Gostaria que estivesse aqui na conclusão de mais essa etapa de minha vida.

A minha mãe, exemplo de mulher, de carinho, de respeito e educação com o próximo. Os dias enfrentando transporte de péssima qualidade, enchentes e todas as demais dificuldades foram fundamentais para que eu chegasse até este momento.

A meu irmão, trabalhador e companheiro, ao qual tenho o prazer de poder chamar de amigo. Embora seja mais novo, na vida sempre me foi um exemplo de dedicação, coragem e independência.

A minha esposa, incansável e maravilhosa, que sempre me apoiou e que por vezes acreditou em mim mais do que eu mesmo. Você foi determinante no rumo de minha vida. Eu precisaria de algumas vidas para retribuir tudo o que você fez por mim.

A meu filho, garoto maravilhoso e cheio de potencial. Tudo o que faço é para que você tenha um futuro melhor e possa se tornar uma boa pessoa. Espero que essa conquista lhe sirva de exemplo, pois se sua determinação for inabalável você poderá chegar aonde quiser.

A meu amigo Carlos, segundo irmão que a vida me deu, que tanto me ajudou e incentivou. Por vezes a vida nos apresenta pessoas ruins, mas em gratos momentos, nos apresenta pessoas maravilhosas. Você e sua família estão entre esses gratos momentos.

Aos demais familiares e amigos, que das mais diversas formas colaboraram para que eu chegasse a este momento.

Agradecimentos

Agradeço a meu orientador Prof. Dr. Carlos Alberto Mendonça, por todo o apoio, paciência e ensinamentos sem os quais esse trabalho não seria possível.

Agradeço à CPRM, em especial aos Doutores Oderson Souza Filho e Luiz Gustavo, pela disposição e colaboração, fornecendo os dados e orientações necessárias ao trabalho.

Agradeço aos professores do departamento de Geofísica do IAG, pelo conhecimento fornecido essencial à minha formação.

RESUMO

CAVALCANTE, Felipe Lisboa. **Inversão 2D de dados magnetométricos com modelo prismático: Aplicação em enxames de diques.** 2018. N f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

Este trabalho apresenta um método de inversão de perfis de dados magnetométricos em enxames de diques, utilizando os módulos de um programa desenvolvido no contexto do Mestrado. Os enxames de diques produzem padrões complexos de anomalia, dependendo da densidade de diques ao longo do perfil avaliado, das propriedades magnéticas de cada unidade e da existência de fontes mais rasas e profundas. Poucas técnicas se mostram eficazes em inverter dados em tal cenário, seja para recuperar parâmetros confiáveis para cada dique ou valores médios em casos mais complexos. O método inclui uma abordagem de inversão por etapas para modelos compostos por múltiplos prismas finos, identificados interativamente de acordo com a qualidade do ajuste aos dados. Na abordagem proposta, a intensidade do campo vetorial anômalo é inicialmente invertida para fornecer parâmetros geométricos (posição ao longo do perfil e profundidade do topo) e o produto da intensidade de magnetização pela espessura para as unidades do modelo. O modelo obtido é usado para inverter os dados de anomalia de campo total para se obter a inclinação de magnetização para cada prisma do modelo. Para perfis com poucos prismas (diques), essa abordagem revela-se eficaz na recuperação dos parâmetros verdadeiros para cada unidades do modelo. Para perfis com maior densidade de prismas, apenas valores médios de diferentes populações de diques podem ser recuperados. Isso é obtido aplicando uma abordagem por análise de grupo usando o algoritmo k-means, para soluções alternativas obtidas na inversão de dados. O método é testado com dados sintéticos gerados por configurações simples e complexas de prismas e interferências. Uma vez testado com simulações numéricas, o método é aplicado a um perfil do Enxame de Diques do Arco de Ponta Grossa. A análise de cluster de soluções alternativas identificou pelo menos três gerações para os diques neste perfil, de acordo com os parâmetros médios dos grupos. Os valores obtidos com a análise de grupos também foram utilizados para calcular a expansão crustal ao longo do perfil, chegando a valores entre 12 e 23%. Além disso, resultados

de inversão foram analisados com poços da base de dados do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS) para avaliar a produtividade de poços com respeito à sua proximidade a unidades específicas de diques. Este estudo mostra que poços mais produtivos estão situados próximos de uma classe de diques mais rasos, conforme identificado pela análise k-means. Para poços perfurados em zona de influência dessa classe de diques em rochas cristalinas de alto grau metamórfico (tufo, meta-tufo), a produtividade é cerca de 14,5 vezes maior do que aqueles perfurados nas encaixantes. Para poços em zona de influência dessa classe de diques em rochas cristalinas de baixo grau metamórfico, a produtividade é cerca de 4,3 maior do que nas encaixantes. Um modelo conceitual para exploração de águas subterrâneas é apresentado levando-se em consideração a distribuição de diques mais rasos na região estudada.

Palavras-chave: Inversão. Magnetometria. Modelos tabulares, Prismas Finos, Análise de Grupos, Aeromagnético, Enxame de Diques, Arco de Ponta Grossa.

ABSTRACT

CAVALCANTE, Felipe Lisboa. **2D inversion of magnetometric data with prismatic model: Application in dyke swarm**. 2018. N f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

This work presents a method of inversion of magnetometric data profiles in dyke swarms, using the modules of a program developed in the context of the Master. Dyke swarms produce complex patterns of anomalies, depending on the density of dikes along the evaluated profile, the magnetic properties of each unit and the existence of shallower and deeper sources. Few techniques prove effective in inverting data in such a scenario, either to retrieve reliable parameters for each dyke or average values in more complex cases. The method includes a stepwise inversion approach for multi-prism models that are interactively identified according to the quality of fit to the data. In the proposed approach, the intensity of the anomalous vector field is initially inverted to provide geometric parameters (position along the profile and depth of the top) and the product of the magnetization intensity by the thickness for the model units. The obtained model is used to invert the total field anomaly data to obtain the magnetization inclination for each prism of the model. For profiles with few prisms (dykes), this approach proves to be effective in recovering the true parameters for each model unit. For profiles with a higher density of prisms, only mean values of different dyke populations can be recovered. This is achieved by applying a group analysis approach using the k-means algorithm, for alternative solutions obtained in the inversion of data. The method is tested with synthetic data generated by simple and complex configurations of prisms and interferences. Once tested with numerical simulations, the method is applied to a profile of the Dike Swarm of the Ponta Grossa Arch. The cluster analysis of alternative solutions identified at least three generations for the dikes in this profile, according to the average parameters of the groups. The mean values obtained with the cluster analysis were also used to calculate the crustal expansion along the profile, reaching values between 12 and 23%. In addition, inversion results were analyzed with wells from the Groundwater Information System (SIAGAS) database to evaluate the productivity of wells with respect to their proximity to specific dyke units. This study shows that more productive wells are located near a

class of shallower dikes, as identified by the k-means analysis. For wells drilled in a zone of influence of this class of dykes in crystalline rocks of high metamorphic degree (tufts, meta-tufts), the productivity is about 14.5 times greater than those drilled in the hosting rocks. For wells in the zone of influence of this class of dykes in crystalline rocks of low metamorphic degree, the productivity is about 4.3 higher than the ones in the hosting rocks. A conceptual model for groundwater exploration is presented considering the distribution of shallow dikes in the studied region.

Keywords: Inversion. Magnetometric. Tabular Models. Thin Prisms. Cluster Analysis. Aeromagnetic. Dyke Swarm. Ponta Grossa Arch.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Processamento de dados utilizando o GEOSOFT.....	25
Figura 2.2: Parâmetros de um prisma fino 2D, seção transversal no plano X-Z.....	26
Figura 2.3: Modelo de prisma 2D em planta.....	27
Figura 2.4: Problema direto e inverso segundo modelo de prismas finos.....	28
Figura 2.5: Definição dos limites para o parâmetro x_0	32
Figura 2.6: Invariância da intensidade do campo vetorial anômalo.....	33
Figura 2.7: Fluxograma da inversão por etapas do PyDYKE.....	34
Figura 2.8: Definição do número de grupos (k).	37
Figura 3.1: Comparação entre modelo prismático espesso e fino a altitude de 100 m.	41
Figura 3.2: Resultado da inversão do modelo 1 com o programa PyDYKE.....	43
Figura 3.3: Resultado da inversão do modelo 2 com o programa PyDYKE.....	45
Figura 3.4: Soluções obtidas com o módulo de inversão do PyDYKE para dados sintéticos calculados a partir do modelo 3.....	48
Figura 3.5: Definição do número de grupos (k) para o modelo verdadeiro 3.....	48
Figura 3.6: Definição do número de grupos (k) para os modelos obtidos pela inversão dos dados sintéticos gerados pelo modelo 3.....	49
Figura 3.7: Análise k-means para o modelo 3 para os parâmetros Me e z_0	50
Figura 3.8: Análise k-means para o modelo 3 para os parâmetros Me e inc	50
Figura 3.9: Soluções obtidas com o módulo de inversão do PYDYKE para dados sintéticos calculados a partir do modelo 4.....	52
Figura 3.10: Definição do número de grupos (k) para o modelo verdadeiro 4.....	53
Figura 3.11: Definição do número de grupos (k) para os modelos obtidos pela inversão dos dados sintéticos gerados pelo modelo 4.....	54
Figura 3.12: Análise k-means para o modelo 4 para os parâmetros Me e z_0	55
Figura 3.13: Análise k-means para o modelo 4 para os parâmetros Me e inc	55
Figura 3.14: Composição de fontes 3D representadas por cubos.....	57
Figura 3.15: Resultado da inversão do modelo 5 com o programa PyDYKE.....	58
Figura 3.16: Configuração do modelo de placa.....	59
Figura 3.17: Resultado da inversão do modelo 5 com o programa PyDYKE.....	60
Figura 4.1: Arco de Ponta Grossa. Adaptado de RAPOSO e ERNESTO (1995).	62
Figura 4.2: Escala de tempo geológico. Adaptada de WALKER et al. (2012).....	64
Figura 4.3: Distribuição de poços com capacidade específica não-nula sobre mapa de anomalia magnética de campo total (ACT).....	65
Figura 4.4: Geologia para a janela de estudos.....	66
Figura 4.5: Seleção de poços para cálculo de capacidade específica média.....	67
Figura 4.6: Campos magnéticos para o perfil A-A'.....	68
Figura 4.7: Soluções obtidas com o módulo de inversão do PyDYKE para dados reais do perfil A-A'.....	69
Figura 4.8: Definição do número de grupos (k) para o perfil A-A'.....	70
Figura 4.9: Análise k-means para o perfil A-A' para os parâmetros Me e z_0	70
Figura 4.10: Análise k-means para o perfil A-A' para os parâmetros Me e inc	71
Figura 4.11: Projeção de poços ao longo do perfil A-A' e valores de capacidade específica (Q_s) em $m^3.h^{-1}.m^{-1}$	74

Figura 4.12: Comparação entre a profundidade do topo das fontes inferidas por inversão e a capacidade específica (Q_s).....	76
Figura 4.13: Continuidade de diques segundo análise de grupos, com base nos lineamentos da Amplitude do Sinal Analítico.....	77
Figura 4.14: Extrapolação dos resultados do PyDYKE para o grupo 1 com base nos lineamentos magnéticos presente na ASA.....	78
Figura 4.15: Comparação de Q_s sobre diques e encaixantes.....	79
Figura 4.16: Continuidade dos diques do grupo 1 e núcleos populacionais na janela de dados	80
Figura 4.17: Geologia local e diques do grupo 1	81
Figura 5.1: Modelos conceituais de diques e produtividade	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Variação dos parâmetros para os modelos das simulações numéricas.	42
Tabela 3-2: Parâmetros do modelo 1	42
Tabela 3-3: Parâmetros (Me , inc , $x0$, $z0$) fornecidos pelo módulo de inversão do PyDYKE para o modelo 1	43
Tabela 3-4: Parâmetros do modelo 2	44
Tabela 3-5: Parâmetros (Me , inc , $x0$, $z0$) fornecidos pelo módulo de inversão do PyDYKE para o modelo 2	46
Tabela 3-6: Parâmetros das gerações do modelo 3	47
Tabela 3-7: Valores dos funcionais e R^2 para as quatro melhores soluções da inversão do modelo 3	47
Tabela 3-8: Parâmetros (Me , $z0$, inc) fornecidos pelo módulo de cluster analysis do PYDYKE para o modelo 3	51
Tabela 3-9: Parâmetros das gerações do modelo 4	51
Tabela 3-10: Valores dos funcionais e R^2 para as quatro melhores soluções da inversão do modelo 4	52
Tabela 3-11: Parâmetros (Me , $z0$, inc) fornecidos pelo módulo de cluster analysis do PYDYKE para o modelo 4	56
Tabela 3-12: Parâmetros dos prismas do modelo 5	56
Tabela 3-13: Parâmetros dos prismas do modelo 6	59
Tabela 4-1: Valores de ajuste obtidos na inversão do perfil A-A'	68
Tabela 4-2: Parâmetros médios para as gerações de diques obtidos com a inversão do perfil A-A'	72
Tabela 4-3: Valores para cálculo da expansão crustal ao longo do perfil A-A'	73
Tabela 4-4: Valores de expansão crustal calculados com base no modelo obtido pela inversão do perfil A-A' com o PyDYKE	74

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
CAPÍTULO 1 - MAGNETOMETRIA APLICADA AO ESTUDO DE DIQUES	18
1.1 Técnicas utilizadas	18
1.2 Estudos de caso	20
CAPÍTULO 2 - METODOLOGIA.....	23
2.1 Anomalia de Campo Total.....	23
2.2 Processamento de Dados Aeromagnéticos	24
2.3 Problema Direto	25
2.4 Problema Inverso	29
2.5 Inversão por Etapas	32
2.6 Cluster Analysis	35
2.6.1 Número de Grupos	36
2.7 Produtividade de Poços	37
CAPÍTULO 3 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA	39
3.1 Validade da representação por prismas finos	39
3.2 Simulação para modelos com baixa densidade de prismas.....	41
3.2.1 Modelo 1	42
3.2.2 Modelo 2.....	44
3.3 Simulação para modelos com alta densidade de prismas	46
3.3.1 Modelo 3.....	46
3.3.2 Modelo 4	51
3.4 Influência de fontes 3D.....	56
3.4.1 Modelo 5.....	56
3.4.2 Modelo 6.....	58
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS PARA DADOS REAIS	61
4.1 Enxame de Diques do Arco de Ponta Grossa (EDAPG).....	61
4.2 Base de dados aeromagnéticos	64
4.3 Base de dados de poços.....	65
4.4 Contexto geológico e hidrogeológico do perfil A-A'	66
4.5 Inversão de Dados do Perfil A-A'	67
4.6 Análise de Grupo das soluções do perfil A-A'	69
4.7 Análise dos resultados: Implicações geológicas	71
4.8 Análise dos resultados: implicações hidrogeológicas.....	74

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....	82
Referências.....	85
Anexo I.....	90

INTRODUÇÃO

Enxame de diques são estruturas crustais normalmente identificadas por anomalias magnéticas que se estendem com marcante continuidade por centenas de quilômetros ou mais. As unidades são compostas por rochas máficas (diabásios, andesitos) com geometria tabular, formadas quando do transporte e armazenagem de magmas pelas rochas encaixantes (CHAVES, 2001). Magmas com composição máfica tendem a apresentar menor viscosidade, favorecendo o desenvolvimento de diques. Zonas de cisalhamento transcorrente podem gerar falhas e fraturas que, quando preenchidas por magma, produzem enxames de diques (ROCHA et al., 2014). Mais comumente, a geração de enxames está associada a fenômenos distensivos na crosta continental, representativos de estágios preliminares de rifteamento. Nas proximidades da fonte magmática, o alojamento dos diques ocorre de forma vertical, mas à medida que o magma atinge distâncias maiores que as dimensões laterais da fonte magmática, a alocação de diques tende a ter direção predominantemente lateral que, em alguns casos, pode percorrer distâncias maiores que 2000 km (ERNST e BARAGAR, 1992).

Um problema comum na interpretação de dados de magnetometria para enxame de diques decorre da complexidade das anomalias, resultante da multiplicidade de diques justapostos. Para agravar o problema, dependendo da polaridade da magnetização de cada dique, a sobreposição das anomalias pode gerar interferências destrutivas e/ou construtivas que dificultam a determinação do número de diques com base nas anomalias observadas. Diques mais profundos podem ser mais difíceis de se detectar, uma vez que produzem um efeito magnético menor do que aqueles gerados por corpos mais rasos ou com maior magnetização. Como consequência, as estimativas de profundidade e de magnetização para cada unidade que compõe o enxame tendem a ser ambíguas, se não para todas as unidades, pelo menos para aquelas mais profundas, sem manifestação explícita no campo resultante. Apesar da importância do tema em estudos de geologia regional e de províncias ígneas e, mais recentemente de hidrogeologia (DICKSON et al., 2014), não existe técnica quantitativa que se aplique especificamente à inversão de dados magnéticos para enxames de diques ou que permita explorar particularidades decorrentes da bidimensionalidade que o problema apresenta. Um aspecto importante para fontes bidimensionais é que a

intensidade do campo vetorial anômalo é invariante com a direção de magnetização. Essa propriedade permite a adoção de procedimentos de inversão por etapas (TUMA, 2006; LIU et al., 2015) nas quais a determinação de parâmetros geométricos e de magnetização são obtidos em etapas distintas. Esse procedimento diminui o número de incógnitas em cada etapa e, com isso, a ambiguidade na identificação dos parâmetros.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um método para inversão de anomalias magnéticas bidimensionais (2D) produzidas por enxames de diques. Para atingir esse objetivo, construiu-se o programa PyDYKE em linguagem Python que implementa o modelo de prismas finos e equações presentes em KU e SHARP (1983). Esse programa será disponibilizado de forma ainda a ser decidida (publicação, link para download ou incorporação por outra ferramenta de maior abrangência). O programa PyDYKE é composto por três módulos, um de problema direto, um de problema inverso e um de análise de grupos. No desenvolvimento do método aqui proposto, utilizou-se do módulo de problema direto para modelar anomalias magnéticas bidimensionais com diferentes níveis de complexidade. As anomalias geradas por diferentes modelos foram utilizadas para alimentar o módulo de inversão durante simulações numéricas. O módulo de inversão foi utilizado para inverter dados sintéticos e um perfil retirado de dados aeromagnéticos do Enxame de Diques do Arco de Ponta Grossa (EDAPG). Esse módulo incorpora procedimentos de inversão por etapas que facilitam a identificação de um número mínimo de prismas. Nesse módulo, o PyDYKE possibilita a inclusão de novos prismas de forma recursiva para ajustar a anomalia magnética e incorpora estratégias de busca aleatória que fornecem soluções alternativas. O módulo de análise de grupos, implementado com a técnica *k-means* (JAIN, 2010), foi responsável pela análise das soluções alternativas obtidas durante as inversões, permitindo avaliar a ambiguidade delas e identificar “populações de diques” com características em comum (gerações). Normalmente os diques em um enxame são gerados em episódios magmáticos distintos, fazendo com que características de propriedades físicas ou de geometria (espessura e profundidade) sejam assinaturas de cada geração. A análise *k-means*, além de ser instrumento para a análise de ambiguidade, pode capturar tais propriedades e, com isso, melhorar a interpretação dos dados magnéticos.

Esta Dissertação está organizada em cinco capítulos que descrevem diferentes etapas do trabalho. O Capítulo 1 apresenta uma revisão das técnicas de interpretação mais utilizadas no estudo de diques e enxame de diques com discussão de estudos de caso mais representativos. O Capítulo 2 apresenta a metodologia proposta, composta por um procedimento de inversão seguido pela análise de grupo das soluções encontradas. Esse capítulo também aborda as etapas de processamento de dados, modelagem e cálculo de produtividade de poços. O Capítulo 3 apresenta testes com os programas, utilizando modelos com complexidade crescente de forma a se determinar potencialidades e limitações da abordagem proposta. O Capítulo 4 apresenta a aplicação em dados reais e discussão dos resultados em termos de contribuições para estudos de geologia regional e de prospecção de recursos hídricos subterrâneos. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho.

CAPÍTULO 1 - MAGNETOMETRIA APLICADA AO ESTUDO DE DIQUES

Diferentes técnicas e aproximações são utilizadas no estudo de diques utilizando magnetometria terrestre ou aerotransportada. Em geral, aplica-se conceitos bem fundamentados nas propriedades dos campos potenciais, já com uma longa história de desenvolvimento teórico (BLAKELY, 1996). Por brevidade, optamos por pontuar abordagens mais discutidas na literatura, em especial no que diz respeito à detecção de diques e modos de ocorrência em diferentes contextos.

1.1 Técnicas utilizadas

Para o estudo de enxame de diques é comum incorporar a abordagem por transformações lineares implementadas pelas transformadas de Fourier (BLAKELY, 1996), por exemplo com aplicação de filtros de continuação (usualmente continuação para cima para atenuar ruídos de alta frequência), filtros direcionais (para suprimir ou realçar lineamentos), filtros com derivadas (para acentuar fontes rasas ou atenuar campos com expressão regional), de redução ao polo (para melhor posicionar os campos sobre as fontes). Em geral os produtos de processamento são implementados por softwares comerciais – GEOSOFT (REEVES, 2005) ou de pesquisa acadêmica – POTENSOFT (ARISOY e DIKMEN, 2011), Fatiando a Terra (UIEDA, OLIVEIRA JR. e BARBOSA, 2013) entre outros. Os produtos de processamento assim obtidos auxiliam a interpretação qualitativa dos dados, delineando a continuidade do enxame e relação com a geologia regional (LOURO e MANTOVANI, 2012; UIEDA, OLIVEIRA JR e BARBOSA, 2014; DOGRU, PAMUCKU e PAMUCKU, 2016).

Na categoria de métodos automáticos de interpretação destaca-se o método da Deconvolução de Euler (THOMPSON, 1982) que fornece informações quantitativas sobre a localização horizontal e vertical das fontes. Entretanto, por se valer de fontes simples (linha magnética, esfera, contato), a deconvolução de Euler tende a apresentar resultados insatisfatórios quando ocorre fontes adjacentes (campos interferentes) ou dados com ruído (BARBOSA e SILVA, 2005). A análise da decomposição de valores singulares truncados diminui o número de soluções alternativas. Essa abordagem foi aplicada em área com enxame de diques em Åsele, Suécia com intuito de obter informações sobre direção (*strike*), ângulo de mergulho e estimativas de localização e de índice estrutural das fontes (BEIKI, 2013). A partir do

tensor do gradiente de dados magnéticos, pode-se calcular a intensidade normalizada da fonte magnética (NSS-*normalized source strength*), permitindo-se calcular a Deconvolução de Euler da NSS. Esse procedimento estima, ao mesmo tempo, os parâmetros de localização e de índice estrutural mesmo em casos de magnetização remanecente (BEIKI et al., 2012). Uma extensão da Deconvolução de Euler para estruturas 2D, considera a rotação de funções homogêneas, a fim de determinar o contraste de susceptibilidade e o mergulho para contatos e diques finos (HUANG et al., 1995). Quando aplicado ao modelo de diques finos, essa abordagem determina o ângulo de mergulho e o produto entre contraste de susceptibilidade e espessura. Testes com essa abordagem foram feitos utilizando perfis sobre o Grande Dique do Zimbábue e na Zona Teisseyre-Tornquist na Polônia (MASHAYANDEBVU et al., 2001).

A técnica da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) (NABIGHIAN, 1972) permite determinar a posição das fontes magnéticas, pois apresenta valores de máximo acima das fontes. Outra contribuição da ASA é delinear de forma aproximada os limites das fontes, o que é útil em caso de fontes interferentes. COOPER (2015) utilizou a ASA para estimar posição, direção de magnetização e produto $k-t$ (susceptibilidade pela espessura do dique) na região Cradle of Humankind, África do Sul. Nessa região a ocorrência de água subterrânea é compartimentalizada por um enxame de diques e a aplicação da ASA tradicional (ordem 0) ou de sua derivada (ASA de ordem 1) permitiu estimar a localização e profundidades dos diques. Uma extensão do método de razão entre amplitudes é utilizada para diferenciar entre estruturas sub-aflorantes (próximas da superfície) do tipo degrau ou dique (HSU, COPPENS e SHYU, 1998). Os autores aplicaram essa abordagem no nordeste da Tailândia e atribuíram aos resultados um dique a 500 m de profundidade interceptado por falha, inferida a partir do prolongamento da falha de Kanchiao. Apesar da praticidade da aplicação de técnicas baseadas na ASA, múltiplos erros têm sido cometidos e por vezes sido negligenciados pela comunidade (LI, 2006). Um dos exemplos citados é que para fontes 3D a ASA seria independente da direção de magnetização, o que não é verdadeiro já que nessa condição a ASA depende da direção de magnetização e da componente de medida.

A técnica *Tilt Angle* (TA) é definido como o arco tangente da razão entre a primeira derivada vertical e a amplitude do gradiente horizontal do campo potencial (MILLER e SINGH, 1994). Essa grandeza possui valores positivos sobre as fontes, valor zero

sobre as bordas (corpos verticais) e valores negativos nos demais pontos de medida para anomalia de campo total produzida por corpos com magnetização vertical no polo (RTP *anomaly*). O TA pode ser utilizado para obter a localização, profundidade e ângulo de mergulho de diques. Em geral o TA responde de forma similar a fontes profundas ou rasas pois normaliza duas grandezas igualmente condicionadas pela amplitude da anomalia. Entretanto, por utilizar derivadas horizontal e vertical, a técnica do TA torna-se mais sensível a presença de ruído nos dados. Alternativas a esse problema consistem na aplicação de filtros que modificam a fase do conteúdo espectral da anomalia (HIDALGO-GATO e BARBOSA, 2015) ou técnica baseada na variância normalizada da anisotropia NAV-Edge (ZHANG et al., 2014). Ao introduzir as expressões do gradiente horizontal e vertical do campo reduzido ao polo sobre contatos verticais na equação do TA obtém-se a expressão para a técnica de *Tilt-Depth* (SALEM et al., 2007). Outra possibilidade é diferenciar a razão entre os gradientes vertical e horizontal do campo magnético ao longo de um contato magnético vertical (dique por exemplo) chegando-se a técnica *Contact-Depth* (COOPER, 2017).

1.2 Estudos de caso

Outra forma de se identificar as aplicações de dados aeromagnéticos no estudo de enxame de diques pode se valer de estudos de casos, nos quais problemas específicos são abordados. DICKSON et al. (2014), por exemplo, utilizaram dados aeromagnéticos, imagens aéreas e medidas de condutividade hidráulica em campo para construir modelos de fluxo de água subterrânea para a região de Lagan Valley na Irlanda do Norte. Os valores de condutividade hidráulica para diques e rochas encaixantes foram incorporados em procedimento de *upscaling* levando em consideração a distribuição de diques inferida pela magnetometria. O modelo assim obtido foi posteriormente validado com dados de poço e modelagem numérica de fluxo. Naquele estudo, os diques funcionam como barreira ao fluxo de água, e condicionam o regime de fluxo em todo o aquífero porque estão localizados em meio a arenitos com alta condutividade hidráulica.

CASTRO, FERREIRA E ANGULO (2008) propuseram um modelo gravimétrico-magnético para o Gráben de Paranaguá no Paraná. Para tanto, realizaram levantamentos geofísicos regionais terrestres de gravimetria e magnetometria, com

modelagem conjunta 2-D. A espessura da cobertura sedimentar foi fixada com base em dados geofísicos e de poço, mas o topo dos diques concebido como ocorrendo na interface sedimento-embasamento. Essa abordagem implicitamente assume que, em áreas com exposição do embasamento cristalino, todos os diques seriam aflorantes. A incorporação desse tipo de vínculo resultou um modelo com cerca de 19 diques por quilometro, densidade de ocorrência não observada em áreas com afloramento. Um modelo mais plausível poderia ser obtido considerando prismas mais profundos, sugerindo que no EDAPG existam diques não aflorantes.

A espessura de diques é outro parâmetro que merece atenção pois parece variar substancialmente, mesmo em um mesmo contexto geológico. SMYTHE (1994), utilizando dados aerotransportados e terrestres, identificou diques ultra espessos (*ultrawide dykes*) no norte da Grã-Bretanha. Suas modelagens indicaram que diques *onshore* aflorantes e já identificados nos mapas geológicos podem atingir mais de 1 km de espessura. MINAKOV et al. (2018) realizaram uma análise integrada de anomalias magnéticas, sísmica multicanal e sísmica *wide-angle* no norte do mar de Barents e correlacionaram com diques *onshore*. A geometria dos diques foi interpretada com base em regimes de paleo-estresse, geometria essa capaz de ser prevista por simulações numéricas considerando um padrão de faixas de cisalhamento plásticas dilatantes.

O trabalho de USSAMI et al. (1991) analisa a detectabilidade magnética de diques do EDAPG a partir de aerolevantamentos. Para tanto um perfil magnetométrico terrestre foi realizado em Fartura – SP, onde os diques afloram, e os dados foram continuados para cima entre altitudes variáveis, em especial à de 450 m similar aos dados aéreos então disponíveis. Verificou-se que as anomalias referentes aos diques aflorantes eram fortemente atenuadas a 100 m de altitude e que a 450 m somente anomalias referentes a grupos de diques ou a diques de forte magnetização persistiam. Também se considerou a possibilidade de falhas gerarem sinais medidos em aerolevantamento, concluindo-se que as mesmas precisavam ter rejeito de falha da ordem de 500 m, algo que não se observa na região. Há de se considerar que, nos dias de hoje, os aerolevantamentos possuem novas especificações que permitem melhorar a resolução das anomalias, como por exemplo altitude de voo de 100 m ou mesmo menor, dependendo do tipo de aeronave. Por sua vez, melhorar a resolução das anomalias permite que mais estruturas sejam identificadas.

CAPÍTULO 2 - METODOLOGIA

Nesse Capítulo, são apresentados os fundamentos teóricos do método, iniciando-se por uma breve consideração sobre o significado do termo “anomalia de campo total” visando utilizar uma terminologia consistente com as demais seções. Em seguida, é apresentado o processamento de dados necessário para se obter as grandezas utilizadas na inversão de dados. Existem por sua vez, seções referentes ao problema direto, problema inverso e análise de grupos, tal qual foram implementadas no programa PyDYKE desenvolvido e utilizado ao longo do Mestrado. Na seção de problema direto, é descrito como se calcula a resposta magnética para um modelo de prismas finos. Na seção de problema inverso, descreve-se como um conjunto de parâmetros que representam um modelo geofísico pode ser obtido a partir dos dados magnetométricos, assim como são apresentados os vínculos geológicos e de consistência. A seção de Análise de Grupo mostra como as soluções obtidas são analisadas no que diz respeito à ambiguidade associada à determinação dos parâmetros e como identificar similaridades entre grupos de prismas que compõem as soluções. Por fim, existe uma breve seção dedicada à produtividade de poços, indicando como obter a grandeza a ser utilizada nas análises subsequentes.

2.1 Anomalia de Campo Total

Levantamentos magnetométricos aerotransportados utilizam sensores que medem a intensidade do Campo Geomagnético. Esta grandeza, subtraída da intensidade do campo magnético regional, normalmente representado pelo *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF), fornece o que se denomina anomalia de campo total (BLAKELY, 1996). Sendo $|\mathbf{B}|$ a intensidade do campo geomagnético medido e $|\mathbf{F}|$ a intensidade do campo magnético regional, a anomalia de campo total (*total field anomaly*) é, então, definida como

$$T = |\mathbf{B}| - |\mathbf{F}|, \quad (1).$$

Para a intensidade de campos anômalos T muito menores que o a intensidade do campo regional, F , a anomalia de campo total é tal que

$$T = \mathbf{T} \cdot \frac{\mathbf{F}}{|\mathbf{F}|}, \quad (2)$$

ou seja, a projeção escalar do campo anômalo T na direção do campo F . Definindo o vetor unitário $t = F/|F|$, podemos denominar a anomalia de campo total (ACT), T_t , sendo o termo em subscripto referente à direção do campo magnético regional.

2.2 Processamento de Dados Aeromagnéticos

Uma vez que o método proposto se utiliza de ACT e da intensidade do campo vetorial anômalo (ICVA), essa subseção mostra como essa última grandeza é obtida a partir do mapa de anomalia de campo total. Os dados aeromagnéticos (a serem descritos na seção 4.2) foram interpolados em malha 50 x 50 m utilizando o método da mínima curvatura (BRIGGS, 1974) implementado no programa GEOSOFT. Para uma janela na base de dados foram calculadas os componentes T_x , T_y e T_z do campo para calcular a ICVA.

O cálculo de componentes do campo a partir da ACT foi realizado com o filtro de conversão entre componentes do campo, disponível no módulo MAGMAP (*Conversion between field components*). O MAGMAP opera no domínio da frequência (MONTAJ, 2015) fazendo com que as mudanças de componente sejam associadas a filtros, que multiplicam a transformada da anomalia, $\mathcal{F}(T_t)$, fornecendo as transformadas $\mathcal{F}(T_x)$, $\mathcal{F}(T_y)$ e $\mathcal{F}(T_z)$ conforme as seguintes expressões:

$$\mathcal{F}(T_x) = \mathcal{F}(T_t) \cdot \frac{i.u}{i(\alpha.u+\beta v)+\gamma\sqrt{u^2+v^2}} \quad (3),$$

$$\mathcal{F}(T_y) = \mathcal{F}(T_t) \cdot \frac{i.v}{i(\alpha.u+\beta v)+\gamma\sqrt{u^2+v^2}} \quad (4),$$

$$\mathcal{F}(T_z) = \mathcal{F}(T_t) \cdot \frac{\sqrt{u^2+v^2}}{i(\alpha.u+\beta v)+\gamma\sqrt{u^2+v^2}} \quad (5),$$

sendo i , u , v , α , β e γ respectivamente: a unidade imaginária, número de onda na direção X, número de onda na direção Y, cossenos direcionais relativos à direção do Campo Geomagnético. Obtidos os componentes no domínio do espaço (aplicando a transformada inversa de Fourier), obtém-se a ICVA ($|T|$) por operação entre grids (recurso do Grid Math) segundo

$$|T| = \sqrt{T_x^2 + T_y^2 + T_z^2} \quad (6).$$

Retiramos um perfil A-A' das janelas de ACT e ICVA para alimentar o módulo de inversão do PyDYKE. A Figura 2.1 apresenta as etapas do processamento de dados descritas.

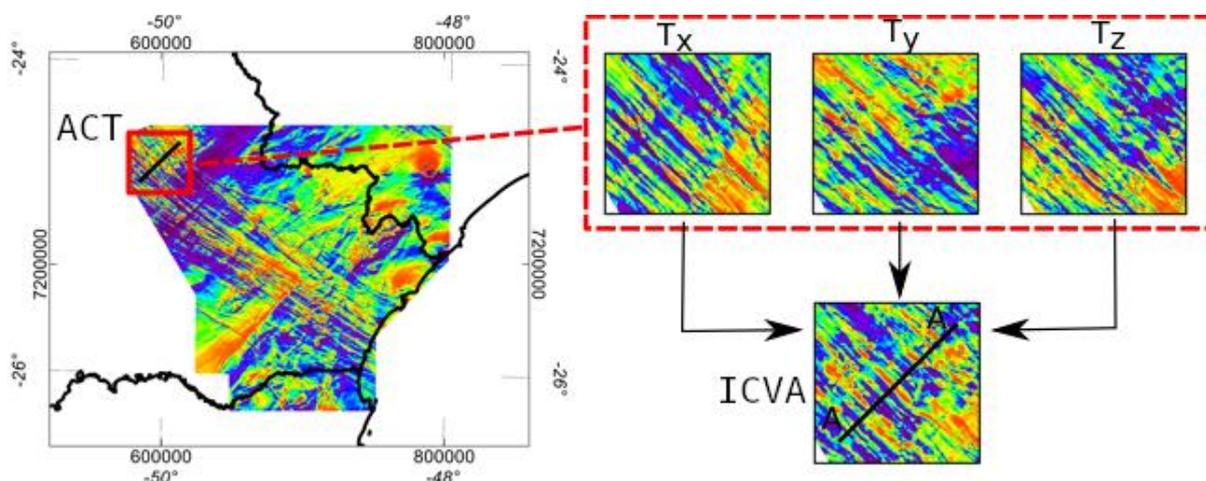


Figura 2.1: Processamento de dados utilizando o GEOSOFT. Interpolação da anomalia de campo total (ACT), escolha de janela de dados (polígono em vermelho), obtenção das componentes T_x , T_y e T_z da anomalia magnética para cálculo da intensidade do campo vetorial anômalo (ICVA). Perfil A-A' (linha em negrito) utilizado para alimentar o módulo de inversão do PyDYKE.

2.3 Problema Direto

Consideremos uma fonte magnética representada por uma aproximação de prisma fino 2D com arestas verticais, inclinação da magnetização total inc (graus) e produto Me , entre a intensidade de magnetização M ($A.m^{-1}$) e espessura e (m), conforme representado na Figura 2.2. Se a inclinação inc coincidir com a inclinação do campo geomagnético local, representa-se o caso em que a magnetização é do tipo induzida, ademais tem-se o caso em que a magnetização apresenta remanência. No caso de magnetização reversa o ângulo inc corresponde à direção oposta de t . Para rochas com magnetização viscosa a direção de magnetização total também se alinha com o campo geomagnético local.

Por ser uma grandeza vetorial, o campo magnético anômalo tem componentes $T_x(x, \mathbf{q})$ e $T_z(x, \mathbf{q})$, o vetor $\mathbf{q} = [Me, inc, x_0, z_0]$ contendo parâmetros dados por KU e SHARP (1983)

$$T_x(x, \mathbf{q}) = -\frac{\mu_0}{4\pi} 2e \frac{M_x z_0 + M_z (x - x_0)}{(x - x_0)^2 + z_0^2}, \quad (7)$$

e

$$T_z(x, \mathbf{q}) = \frac{\mu_0}{4\pi} 2e \frac{M_z z_0 - M_x(x-x_0)}{(x-x_0)^2 + z_0^2}, \quad (8)$$

sendo z_0 a profundidade do topo (m) e x_0 a posição do prisma (m) no perfil. M_x e M_z são os componentes do vetor de magnetização (ou polarização magnética) nas direções x e z . Em termos de inc e da intensidade da magnetização total (M), os componentes são dados por:

$$M_x = M \cos(inc), \quad (9)$$

$$M_z = M \sin(inc), \quad (10).$$

A magnetização definida por esses componentes representa a magnetização total cuja direção é desconhecida e incorpora as contribuições das magnetizações induzida e remanescente.

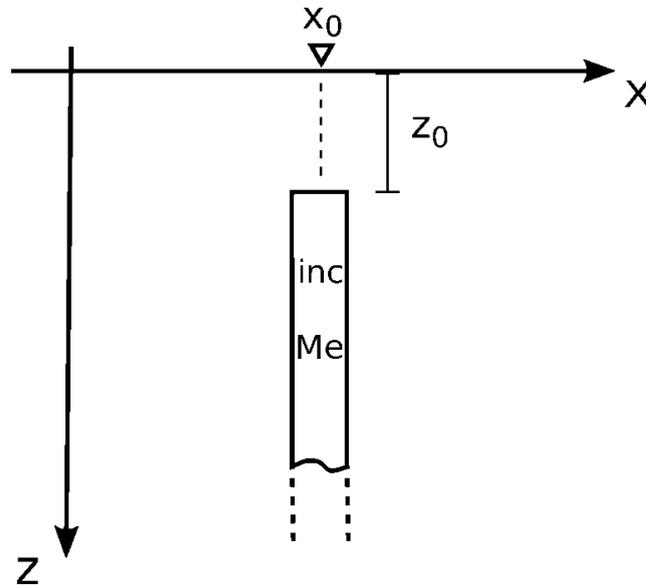


Figura 2.2: Parâmetros de um prisma fino 2D, seção transversal no plano X-Z (profundidade), x_0 posição do centro do prisma ao longo do perfil, z_0 profundidade do topo, Me produto entre a intensidade de magnetização e a espessura, inc inclinação da magnetização.

Das equações (7) e (8) obtemos a ACT segundo

$$T_t(x, \mathbf{q}) = T_x(x, \mathbf{q}) \cos(I) \sin(\alpha) + T_z(x, \mathbf{q}) \sin(I), \quad (11)$$

sendo α o ângulo entre a orientação (*strike*) do prisma e o Norte Magnético, e I a inclinação do campo geomagnético Figura 2.3.

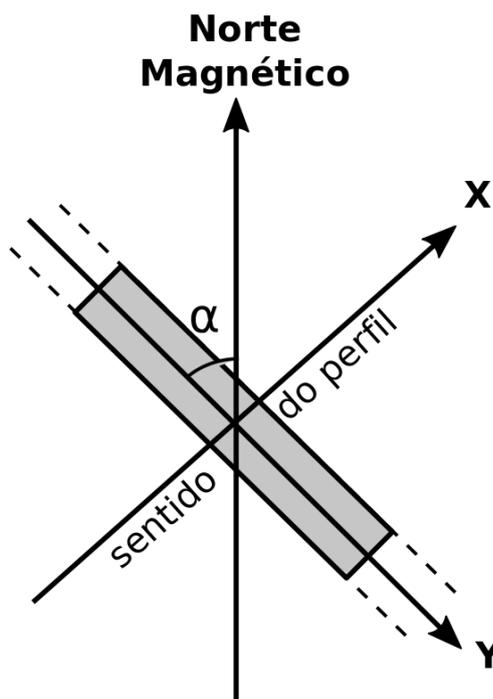


Figura 2.3: Modelo de prisma 2D em planta. α ângulo entre o strike do prisma e o Norte Magnético.

A partir de (7) e (8) obtêm-se a ICVA, $|T(x, \mathbf{q})|$, dado por

$$|T(x, \mathbf{q})| = (T_x(x, \mathbf{q})^2 + T_z(x, \mathbf{q})^2)^{1/2}, \quad (12)$$

e a inclinação da ACT por

$$\theta(x, \mathbf{q}) = \tan^{-1} \left(\frac{T_z(x, \mathbf{q})}{T_x(x, \mathbf{q})} \right), \quad (13).$$

A Figura 2.4.a mostra como $T_t(x, \mathbf{q})$ e $|T(x, \mathbf{q})|$ podem ser gerados a partir de um modelo de prismas finos que considera as variáveis descritas.

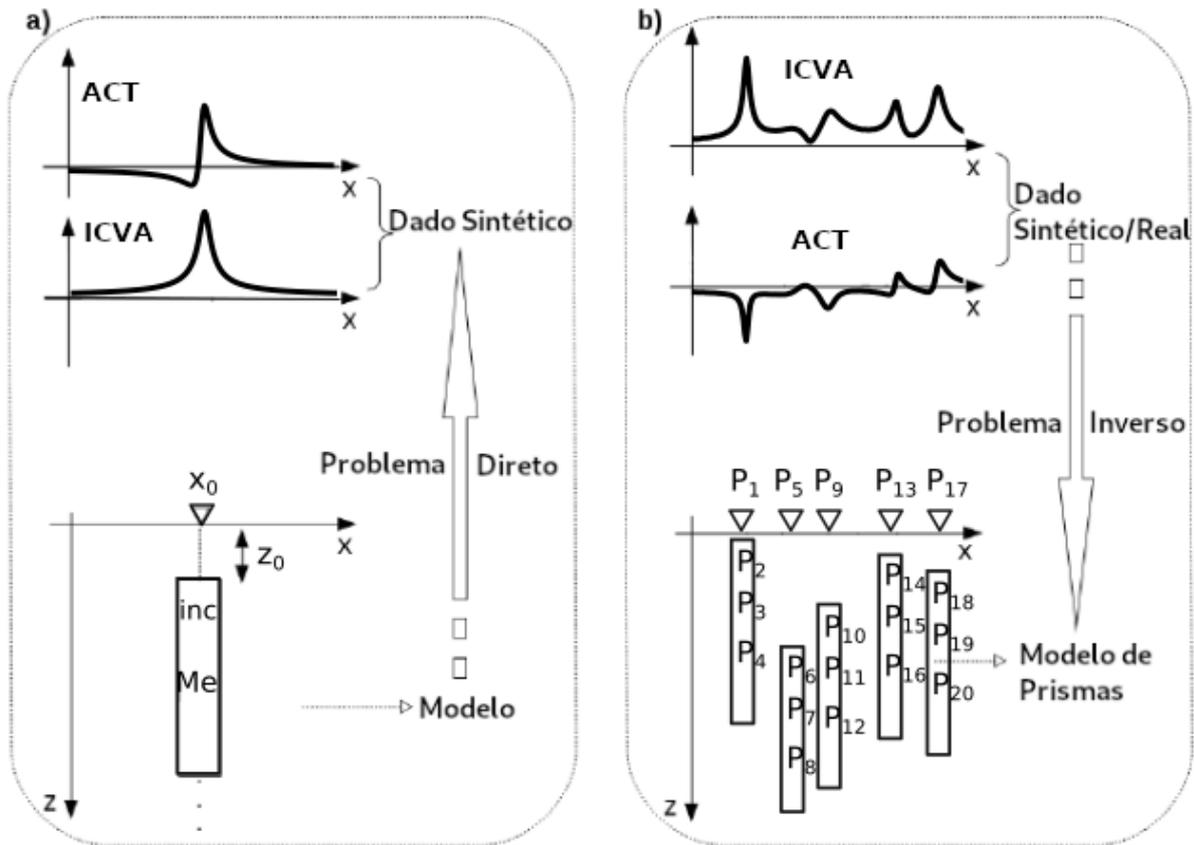


Figura 2.4: Problema direto e inverso segundo modelo de prismas finos. a) Problema direto. Modelo de prisma vertical semi-infinito para a representação de dique, posição no perfil (x_0), profundidade do topo (z_0), inclinação da magnetização (inc) e produto Me entre a intensidade de magnetização (M) e espessura do prisma (e). A solução do problema direto produz a anomalia de campo total (ACT) e a intensidade do campo vetorial anômalo (ICVA). b) Problema inverso. Determinação do vetor de parâmetros (q_n) com valores x_0 , z_0 , inc e Me para cada prisma. A figura ilustra como os parâmetros de cada prisma são organizados em quadrupletes no vetor p .

Uma vez que cada prisma é representado pelo vetor q que contém os quatro parâmetros de cada prisma, o vetor N -dimensional p contém os parâmetros do modelo com n prismas, $p = [q_1, q_2, \dots, q_n]$. A componente da ACT na direção X , referente à somatória das contribuições individuais, dadas pela equação (7), para n prismas ao longo dos pontos de medida é então dada por

$$F_x(x, p) = \sum_{i=1}^n T_x(x, p_i), \quad (14).$$

De forma análoga à componente da ACT na direção Z , referente à somatória das contribuições individuais, dadas pela equação (8), para n prismas ao longo dos pontos de medida é

$$F_z(x, p) = \sum_{i=1}^n T_z(x, p_i), \quad (15).$$

Portanto, a ACT para um conjunto de prismas, analogamente à equação (11), fica

$$F_t(x, p) = F_x(x, p) \cos(I) \sin(\alpha) + F_z(x, p) \sin(I), \quad (16),$$

enquanto a ICVA, tal qual (12), é dada por

$$|F(x, \mathbf{p})| = (F_x(x, \mathbf{p})^2 + F_z(x, \mathbf{p})^2)^{1/2}, \quad (17).$$

2.4 Problema Inverso

A inversão de dados tem como objetivo definir um conjunto de parâmetros que descreve um modelo geofísico compatível com os dados observados. A condição de aceitabilidade é que tal modelo permita o ajuste ao conjunto de dados medidos e que os vínculos geológicos e físicos sejam satisfeitos. A metodologia apresentada aqui é baseada na inversão por etapas, com pontos em comum a trabalhos como TUMA (2006); LIU *et al.* (2015). Embora com diferenças de implementação e objetivos, a inversão por etapas incorpora uma fase em que uma grandeza invariante com a direção de magnetização é invertida preliminarmente à inversão da anomalia magnética. Esse procedimento parece efetivo em interpretar anomalias geradas por fontes com forte magnetização remanecente, cuja direção é desconhecida na maioria dos casos. Para a interpretação de enxame de diques, um grande número de variáveis (100 ou mais) é necessário na construção dos modelos, o que aumenta a demanda computacional e potencialmente problemas de convergência no ajuste aos dados.

A Figura 2.4.b ilustra, por exemplo, como um modelo simples de prisma vertical pode ser utilizado para gerar uma representação mais complexa. Nessa representação, um enxame de diques é representado por n prismas, assim, o número de variáveis desconhecidas é dado por $N = 4n$. O conjunto de parâmetros desconhecidos $\tilde{\mathbf{p}}$ pode ser determinado minimizando dois funcionais. O primeiro, utilizado na primeira das duas etapas de inversão (seção 2.5), é dado pela somatória da norma Euclidiana do resíduo ao longo das posições do perfil

$$Q(\mathbf{p}) = \sum_{x=x_i}^{x_f} || |T^o(x)| - |F(x, \mathbf{p})| ||^2, \quad (18),$$

sendo $|T^o(x)|$ a ICVA observada, $|F(x, \mathbf{p})|$ a ICVA calculada para o conjunto de parâmetros desconhecidos \mathbf{p} e x_i e x_f as posições inicial e final do perfil. A minimização desse funcional determina um modelo $\hat{\mathbf{p}}$, de tal forma que $Q(\hat{\mathbf{p}}) \leq \varepsilon$, com ε a ser definido nos critérios de aceitabilidade da solução. O segundo funcional, utilizado na segunda etapa da inversão, de forma análoga ao primeiro é dado por

$$U(\hat{\mathbf{p}} + \Delta\mathbf{p}) = \sum_{x=x_i}^{x_f} || T_t^o(x) - F_t(x, \hat{\mathbf{p}} + \Delta\mathbf{p}) ||^2, \quad (19),$$

sendo $T_t^o(x)$ a ACT observada e $F_t(x, \hat{\mathbf{p}} + \Delta\mathbf{p})$ a ACT calculada para o modelo perturbado $\hat{\mathbf{p}} + \Delta\mathbf{p}$. A minimização do funcional **(19)** determina o modelo $\tilde{\mathbf{p}}$, solução do problema inverso, de tal forma que $U(\tilde{\mathbf{p}}) \leq \varepsilon_2$ com ε_2 também definido nos critérios de aceitabilidade da solução.

A minimização dos funcionais é um problema não linear nos parâmetros (MICHALEWICZ e SCHOENAUER, 1996) e com grande quantidade de dimensões ($N = 4n$). Na literatura estão propostos diversos algoritmos afim de minimizar a função objeto tal como definida pelos funcionais **(18)** e **(19)**. Alguns exemplos são os métodos baseados em gradiente (`fmin_l_bgs_b` (fbgs) - algoritmo Quasi-Newton de memória limitada implementado pelo pacote Scipy (ENTHOUGHT, 2018)), em recombinação genética (AG - algoritmo genético (HAUPT e HAUPT, 2004), inteligência de enxames (PSO - *Particle Swarm Optimization* (TRELEA, 2003)) e baseado em evolução de população estocástica (DE - *Differential Evolution* (STORN e PRICE, 1997)). Nesse trabalho foram feitos testes com os algoritmos de minimização PSO, AG, DE e fbgs implementados em bibliotecas do Python. O PYDYKE tem implementado como opções de algoritmo de minimização fbgs e DE.

Na aplicação do método proposto em dados reais, serão utilizados dados aeromagnéticos do EDAPG (seção 4.1 e seção 4.2), portanto, os vínculos geológicos precisam ser compatíveis com o observado na região. Iniciando-se como produto Me , infelizmente não é prática comum a estudos de campo realizar medidas de M para diques. Uma forma de contornar esse problema é estimar valores limites para essa grandeza com base em estimativas de valores de intensidade de magnetização total M_{tot} . Para tanto, primeiramente utilizamos a susceptibilidade magnética (κ) para calcular a intensidade de magnetização induzida (M_i) segundo

$$M_i = \frac{|\mathbf{F}| \cdot \kappa}{\mu_0}, \quad (20)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo e $|\mathbf{F}| = 28986$ nT, o valor previsto por NOAA (2018) para EDAPG em 2006 (data do aerolevanteamento utilizado, seção 4.2). Os valores que κ pode assumir são baseados nas aferições de RAPOSO e ERNESTO (1995) para o EDAPG

$$8,71 \times 10^{-3} \leq \kappa \leq 5,64 \times 10^{-2} \text{ (SI)},$$

Considerando o caso de magnetização viscosa, onde a da intensidade de magnetização remanente (M_r) é paralela e possui mesmo sentido que M_i , é possível utilizar o fator de Koenigsberger (Q) (BLAKELY, 1996) para obter-se estimativas de M_{tot} . Uma vez que Q pode ser calculado como

$$Q = \frac{M_r}{M_i}, \quad (21),$$

M_{tot} pode ser obtido segundo

$$M_{tot} = M_i + Q \cdot M_r, \quad (22).$$

A magnitude de M_r frente a M_i é considerada com base nos limites

$$0 \leq Q \leq 4,$$

que abrange 87,5 % das amostras de diques do EDAPG consideradas pelo trabalho de USSAMI *et al.* (1991). Os valores de espessura e por sua vez, são considerados nos limites

$$25 \leq e \leq 100 \text{ (m)},$$

onde o limite inferior corresponde a metade do valor utilizado para o tamanho da célula de interpolação dos dados aeromagnéticos e, o limite superior é igual à altitude de voo da aeronave tendo sido avaliado na seção 3.1. Dessa forma, os limites inferiores e superiores para o produto Me são dados por

$$\min(e) \cdot \min(M_{tot}) \leq Me \leq \max(e) \cdot \max(M_{tot}).$$

O parâmetro inc tem seus limites baseados no valor da inclinação do campo geomagnético calculado no NOAA (2018) para EDAPG em 2006 e, resultando em

$$I = -58,39 \text{ (}^\circ\text{)}.$$

Logo, os limites para a inclinação da magnetização obedecem ao intervalo

$$I \leq inc \leq -I.$$

Vínculos de consistência também são considerados de forma a se evitar situações geologicamente incorretas. Para evitar que as fontes sejam colocadas acima da superfície, parâmetro z_0 considera a altitude de voo (F_h). Isso é necessário, já que o

eixo Z do modelo é orientado para baixo e tem seu zero na posição do avião. Assim, os limites para z_0 são dados por

$$F_h \leq z_0 \leq 1000 \text{ (m)},$$

tendo o limite superior sido definido empiricamente. Por fim, o parâmetro x_0 é definido interativamente pelo usuário do PyDYKE, realizando-se picagens na curva de ICVA. Como cada pico é gerado por no mínimo uma fonte, permite-se inicialmente um único prisma para cada intervalo definido, impedindo assim o recobrimento de prismas. A contagem dos picos define o número mínimo inicial de prismas com o qual se espera obter o ajuste aos dados Figura 2.5.

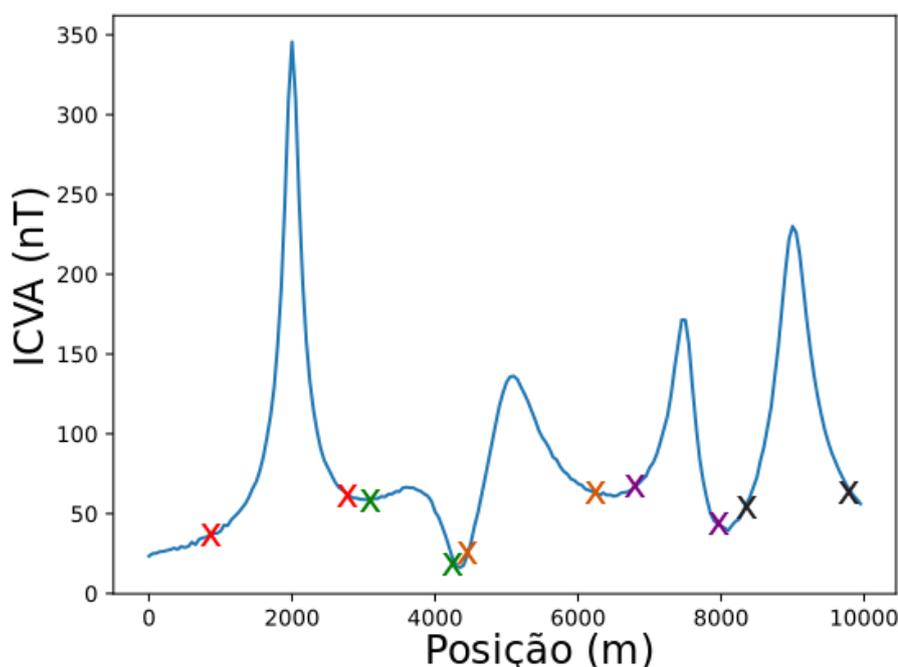


Figura 2.5: Definição dos limites para o parâmetro x_0 . Pares de x (definidos pelas cores) são inseridos graficamente e definem os limites nos quais os parâmetros x_0 para os prismas serão procurados. O número de pares a serem marcados é definido pelo número de prismas do modelo inicial baseado na contagem dos picos da ICVA. Dependendo do ajuste obtido ao final da inversão, novos prismas podem ser incluídos onde os dados não forem ajustados.

2.5 Inversão por Etapas

Conforme observado por LIU *et al.* (2015), a intensidade do campo vetorial anômalo, ICVA, inclui apenas valores positivos e é invariante com a inclinação da magnetização (*inc*). A Figura 2.6 apresenta um exemplo dessa constatação, onde dois modelos de prismas finos variam apenas na *inc*, mostrando a invariância da ICVA, enquanto a anomalia de campo total, ACT, varia de acordo com o modelo.

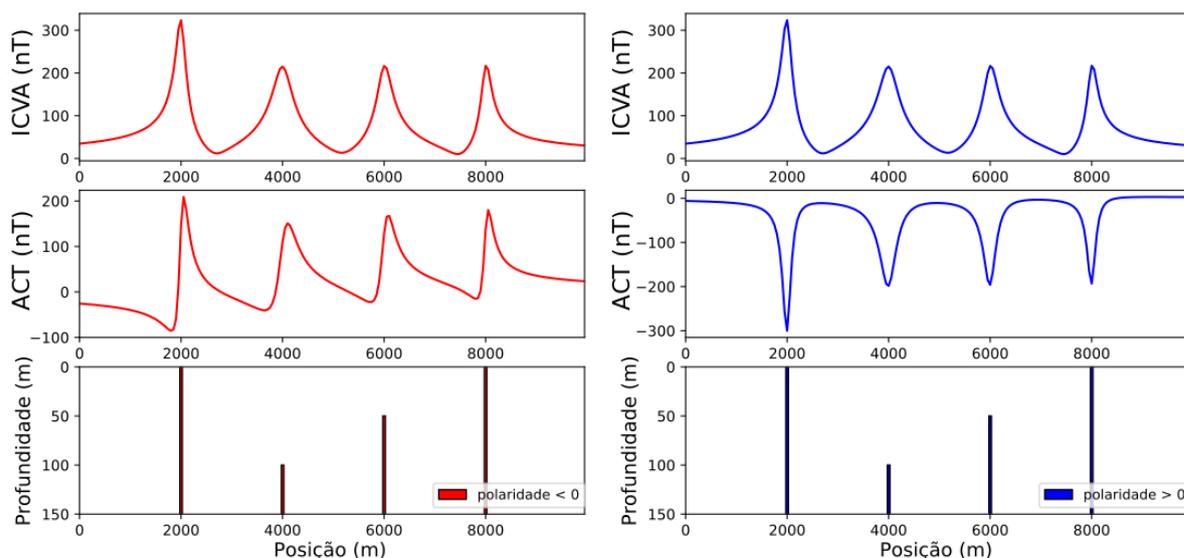


Figura 2.6: Invariância da intensidade do campo vetorial anômalo. Esquerda: Modelo de prismas com polaridade magnetização (*inc*) **normal**. Direita: Modelo com valores de x_0 , z_0 e Me idênticos ao modelo da esquerda, mas com polaridade (*inc*) **reversa**.

A abordagem da inversão por etapas baseia-se na invariância da intensidade do campo vetorial anômalo com a direção da magnetização. Essa propriedade permite que a intensidade do campo seja inicialmente invertida para que se obtenha os parâmetros geométricos dos prismas (posição e profundidade) e respectivas intensidades de magnetização. A anomalia magnética é em seguida invertida mantendo o modelo anterior, mas incorporando a inclinação da magnetização como incógnita para cada unidade prismática do modelo.

A Figura 2.7 apresenta um fluxograma do módulo de inversão em duas etapas do PyDYKE. Durante a Etapa-1, o programa faz a leitura dos dados e permite que o usuário defina interativamente um número preliminar de prismas e estabelecer limites inferiores e superiores para a posição dos prismas x_0 Figura 2.5. Os demais parâmetros z_0 , Me e *inc* são definidos por vínculos de consistência (positividade, por exemplo) ou derivados de informações geológicas tal como anteriormente comentado.

Definidos os vínculos, o programa gera um modelo aleatório para ser utilizado como semente para o procedimento de minimização. Nessa etapa, a solução obtida refere-se ao ajuste da ICVA e é avaliada segundo o funcional $Q(\hat{\mathbf{p}})$ (18). Se esse valor for menor que um valor (ε) pré-estabelecido para a qualidade do ajuste, segue-se para a Etapa-2, caso contrário, gera-se novo modelo aleatório que dá entrada do processo de minimização da Etapa-1.

Na Etapa-2, todos os parâmetros são “congelados” aos valores encontrados na Etapa-1, exceto inc que mantém os limites superiores e inferiores originais (seção 2.4). Isso permite o ajuste da ACT, sem que o ajuste de ICVA seja completamente perdido. Dessa forma, um modelo aleatório dentro dos novos limites (modelo perturbado $\hat{\mathbf{p}} + \Delta\mathbf{p}$), é utilizado para alimentar a rotina de minimização da Etapa-2 a fim de ajustar a ACT. A solução, cuja norma Euclidiana do resíduo de ajuste aos dados $U(\hat{\mathbf{p}})$ (19) seja inferior ao valor (ε_2) definido previamente para a Etapa-2, pode ter dois destinos diferentes. Um, ela é considerada como possível solução do problema, dois, passa pelo módulo de refinamento, onde se acrescentam mais prismas em trechos selecionados pelo usuário. Essa rotina de refinamento trabalha com a solução $\hat{\mathbf{p}}$ da Etapa-2, utilizando-a como um novo modelo perturbado que alimenta a Etapa-1, onde apenas os novos prismas possuem limites tais quais no início da inversão (seção 2.4). No caso do parâmetro x_0 para os novos prismas, as posições dos prismas vizinhos ou limites do perfil são utilizadas como limites que impedem o recobrimento de prismas ou colocação fora do perfil. Além dos critérios que envolvem os valores de ε e ε_2 obtidos pelo processo de inversão, uma solução para ser considerada, deve obter valores de R^2 (NAGELKERKE, 1991) o mais próximo de 1 e visualmente ajustar os dados (curvas de ICVA e ACT).

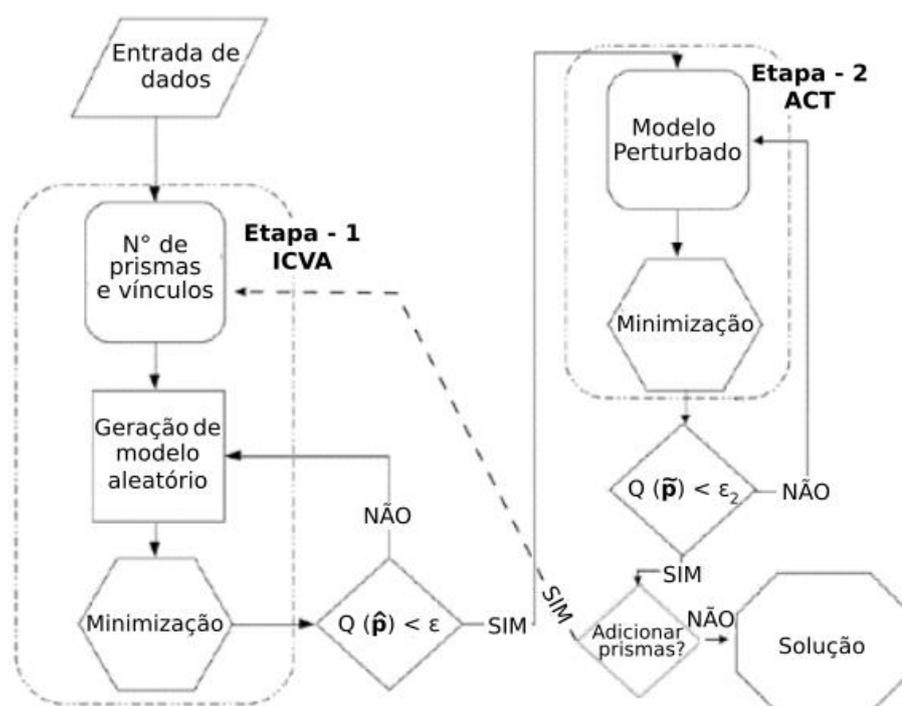


Figura 2.7: Fluxograma da inversão por etapas do PyDYKE.

2.6 Cluster Analysis

Segundo KAUFMAN e ROUSSEEUW (2005) “*Cluster analysis* é a arte de encontrar grupos nos dados.” Essa afirmação sintetiza a idéia básica do método, ou seja: de posse de algum tipo de dado, estabelecer grupos cujos elementos tenham relação de similaridade ao ponto de justificar a subdivisão da base dados em grupos.

Muito embora a premissa da análise de grupo seja simples, encontrar um algoritmo capaz de definir grupos nos dados nem sempre o é. Ao longo dos anos, vários algoritmos tem sido propostos e reformulados à medida que o poder computacional avança e que novas ideias surgem. Dentre as opções de algoritmos é preciso escolher aqueles que são direcionados ao tipo de dados com o qual se trabalha. Neste trabalho, o módulo de *cluster analysis* é alimentado por prismas, mais precisamente, por parâmetros de interesse de cada prisma que compõe as soluções obtidas por inversão. Portanto podemos organizar esses parâmetros em uma matriz, onde as linhas representam os objetos (prismas) e as colunas os parâmetros de cada prisma. Uma matriz do tipo objeto–por–parâmetros, onde as entidades das linhas são diferentes das colunas, pode ser denominada como *two-mode* (Tucker¹, 1964 apud KAUFMAN e ROUSSEEUW, 2005, p. 4). Sendo do tipo *two-mode*, a similaridade pode ser avaliada através da norma Euclidiana. Nesse trabalho excluiu-se o parâmetro x_0 da análise de grupos, uma vez que as gerações do EDAPG não aparentam guardar correlação com a distribuição das unidades que o compõe. Defini-se então a matriz A ($n \times 3$), do tipo *two-mode* tal que

$$A = \begin{bmatrix} Me_1 & inc_1 & z_{0_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Me_n & inc_n & z_{0_n} \end{bmatrix}, \quad (23),$$

onde o vetor a_j , com $j = 1:n$, representa a j -ésima linha da matriz A com os parâmetros do j -ésimo prisma do modelo a ser agrupado.

O módulo de *cluster analysis* do PYDYKE, utiliza a técnica *k-means* (JAIN, 2010) implementada na módulo scikit-learn (PEDREGOSA *et al.*, 2011) de aprendizado de

¹ Tucker, L R. **The extension of factor analysis to three-dimensional matrices.** In Contributions to Mathematical Psychology, 1964. New York, Edited by N. Frederiksen and H. Gulliksen, Holt, Rinehart and Winston.

máquina (*machine learning*) do Python. A técnica *k-means* primeiramente define um conjunto (C) de grupos (*clusters*) tal que:

$$C = \{c_i, i = 1, \dots, k\}, \quad (24),$$

onde c_i são os centroides L -dimensionais, no caso $L = 3$, de cada cluster definidos inicialmente de forma aleatória.

Considerando a matriz A , a técnica *k-means* calcula a distância euclidiana ($D_{j,i}$) entre as linhas de A e os elementos de C conforme:

$$D_{j,i} = \|\mathbf{a}_j - c_i\|^2, \quad 1 \leq j \leq n; 1 \leq i \leq k, \quad (25).$$

Com base nos valores mínimos de d_j , o vetor que representa a j -ésima linha da matriz D , $n \times k$, cada prisma \mathbf{a}_j é associado ao *cluster* de centroide c_i mais próximo a si. Nesse estágio, cada centroide c_i , possui um número H variável de prismas associados a si, denominado pelo vetor genérico \mathbf{u} , tal que $\mathbf{u} = [\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_H]$. A partir da média dos parâmetros dos H prismas associados a cada grupo, os centroides c_i correspondentes, podem ser atualizados conforme a equação a seguir:

$$c_i = \frac{1}{H} \sum_{\eta=1}^H \mathbf{u}_\eta, \quad (26).$$

As Equações (25) e (26) são recalculadas ciclicamente, até que a variação na posição dos centroides de c_i seja inferior ao estabelecido pela implementação do algoritmo *k-means*. O ajuste obtido pelo *k-means* para o modelo de prismas é, então, avaliado pela grandeza $V(D)$ dada por

$$V(D) = \sum_{j=1}^n \min(d_j), \quad (27).$$

2.6.1 Número de Grupos

Um ponto importante na utilização da técnica *k-means* é a definição no número k de grupos (FRALEY e RAFTERY, 1998). Uma abordagem consiste em plotar a grandeza $V(D)$, após encontrar os centroides c_i , $i = 1:k$, para diversos valores de k (TIBSHIRANI, WHALTER e HASTIE, 2001). A Figura 2.8 mostra um exemplo de plotagem de k em função dos valores $V(D)$. Nesse teste, o modelo verdadeiro possui 60 prismas escolhidos aleatoriamente a partir de três centroides. É possível notar que a aproximação da derivada da equação (27) por diferenças finitas em função de k , tende a se estabilizar em um patamar para um número $k \geq 3$. Esse critério será

adotado para definir o número de grupos a partir do qual a grandeza da equação (27) não experimenta decréscimo significativo. A aproximação da derivada é calculada para ajudar na identificação da inflexão na curva, que marca o início do patamar em questão, e que nem sempre é evidente na plotagem de $V(\mathbf{D})$ por k . Conceitualmente isso significa escolher o menor valor de k , que dentro de uma margem aceitável para $V(\mathbf{D})$, identifica o número de centroides a partir dos quais os grupos se distribuem.

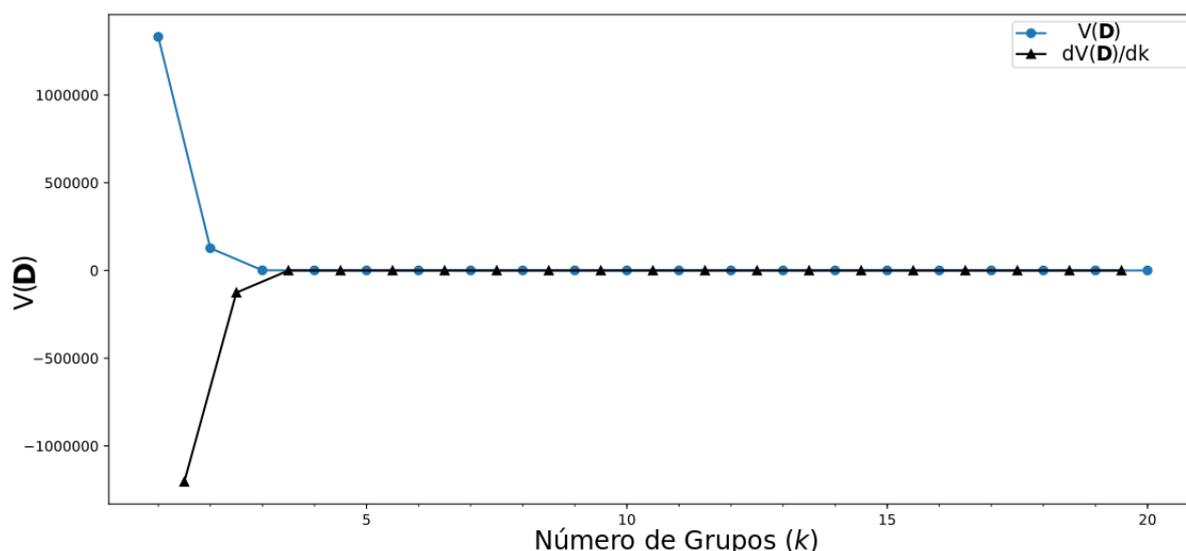


Figura 2.8: Definição do número de grupos (k). Linha azul: $V(\mathbf{D})$, equação (27), para modelo verdadeiro em função de k . Linha preta: aproximação da derivada de $V(\mathbf{D})$ em relação a k .

2.7 Produtividade de Poços

Uma vez que a base de dados a ser utilizada (seção 4.3) possui tabulada a capacidade específica (Q_s) expressa em $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ e a vazão (V_z) em $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, faz-se necessário avaliar qual grandeza é mais adequada para uma análise comparativa da produtividade dos poços. O parâmetro Q_s , neste trabalho categorizado tal qual DINIZ et al. (2014), é adequado como critério de seleção pois expressa a produtividade do poço em função de seu rebaixamento quando o teste de bombeamento é realizado. Conforme salientado por pessoal da CPRM, em poços mais profundos o volume de água estagnado dentro do poço pode falsear a avaliação de sua produtividade, sobrestimando o cálculo da vazão. Essa distorção é atenuada quando se calcula a capacidade específica dada por

$$Q_s = \frac{V_z}{(n_e - n_d)} \quad (28).$$

sendo n_e o nível estático do poço e n_d o nível do poço bombeado (nível dinâmico). Logo, ao longo deste trabalho será utilizada a capacidade específica para avaliar os poços dentro da janela de estudo.

CAPÍTULO 3 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Este Capítulo apresenta testes de simulação numérica para analisar eficácia e limitações do programa PYDYKE. Mais especificamente, os módulos de inversão (implementado com busca local e global) e de análise de grupo (implementado com o algoritmo *k-means*) são avaliados quanto à proximidade das soluções aos modelos verdadeiros. Os testes de simulação numérica procuram representar situações geológicas plausíveis para enxames de diques, do EDAPG em particular, e buscam viabilizar a aplicação do programa em dados reais. Os dados sintéticos utilizados, foram gerados pelo módulo de problema direto e contaminados com ruído aleatório, baseado em distribuição normal média nula e desvio padrão de 1 nT.

O capítulo está dividido em quatro seções que avaliam questões chaves para a utilização do programa. A primeira seção desenvolve a validação do modelo de prismas finos utilizados nas inversões, uma vez que diques são estruturas volumétricas finitas e são aproximados pelo modelo de KU e SHARP (1983). A segunda seção, avalia o comportamento do módulo de inversão do PyDYKE frente a modelos com densidade de prismas, baixa ou suficiente, para que todas as unidades apresentem expressão magnética detectável. Na terceira seção, avalia-se o módulo de inversão do programa frente a modelos com alta densidade de prismas, que foram desenvolvidos a partir de um número de grupos definidos. Nesse caso, os padrões interferentes fazem com que algumas unidades fiquem sem expressão magnética detectável e, portanto, colocam a prova a capacidade do módulo de análise de grupos em recuperar os parâmetros médios. A última seção avalia a distorção de fontes 3D, que não são aproximadas pelo modelo de prismas finos, em inversões de perfis próximos ou sobre elas.

3.1 Validade da representação por prismas finos

O modelo de prismas finos não discrimina a intensidade de magnetização, M , da espessura do prisma, e . Tal como mostram as equações (7) e (8), a ACT é condicionada pelo produto Me . Para que o modelo assuma características realistas, primeiramente a questão dos valores de magnetização e espessura é abordada. O objetivo desse teste é avaliar sob quais condições a resposta de um dique, com espessura e intensidade de magnetização definidas pode ser representado por um

prisma fino. O primeiro passo nesse processo consiste em identificar na literatura valores de espessura e intensidade de magnetização para diques do EDAPG. Para tanto, foram utilizados dados de RAPOSO e ERNESTO (1995) para obter valores médios de susceptibilidade magnética, $\kappa = 3,43 \times 10^{-2} \pm 1,39 \times 10^{-2}$ (SI), para diques aflorantes em Sapopema, Telêmaco Borba e Curitiba. Considerando magnetização apenas do tipo induzido e campo geomagnético F em 2006 para a região $F = 25986$ nT (NOAA, 2018), a intensidade da magnetização induzida (M_i) é estimada segundo a equação (20) resultando em $M_i \cong 0,68$ A.m⁻¹. Com o propósito de incluir magnetização remanescente (M_r), foi utilizado o fator de Koenigsberger (Q), equação (21), considerando magnetização viscosa. Para $Q = 2$ por exemplo, a M_r é $2M_i$, fazendo com que a intensidade de magnetização total (M_{tot}) para os diques amostrados no Estado do Paraná seja $M_{tot} = 2,04$ Am⁻¹ (equação 22).

Para diques com M_{tot} de 2,04 Am⁻¹, calculou-se as anomalias magnéticas utilizando o modelo de prisma fino de KU e SHARP (1983), implementado no módulo de problema direto do PyDYKE. Para prismas 3D, com dimensões finitas, utilizou-se o modelo de PLOUFF (1976) implementado pelo programa Potensoft (menu “3D-modeling”), originalmente em MENDONÇA e MEGUID (2008), cujas funções “one_prism” e “multi_prism” foram convertidas para Python no desenvolvimento do trabalho de Mestrado aqui abordado. No trabalho de RAPOSO e ERNESTO (1995), cerca de 85 % dos diques medidos nas regiões de Telêmaco Borba, Sapopema e Curitiba, possuem espessuras entre 10 e 100 m. Para o cálculo com o modelo de prismas finos, foi considerado uma espessura de 75 m, resultando em produto $Me = 153$ A. Os diques espessos foram calculados utilizando espessuras de $t = 25, 50, 75$ e 100 m com magnetizações de $M' = M_{tot}/e$. Para diques espessos as respostas correspondem, então, a corpos com o mesmo produto $Me = 153$ A. Os campos foram calculados na altura de 100 m sobre a superfície do solo (levantamento aerotransportado).

Os resultados na Figura 3.1 mostram que, para o mesmo produto Me , e altitude de voo (F_h) de 100 m, um prisma espesso pode ser razoavelmente representado por um modelo de prismas finos até a proporção 1:1 entre e e F_h . O erro máximo relativo à amplitude máxima da ICVA, é de aproximadamente 12%.

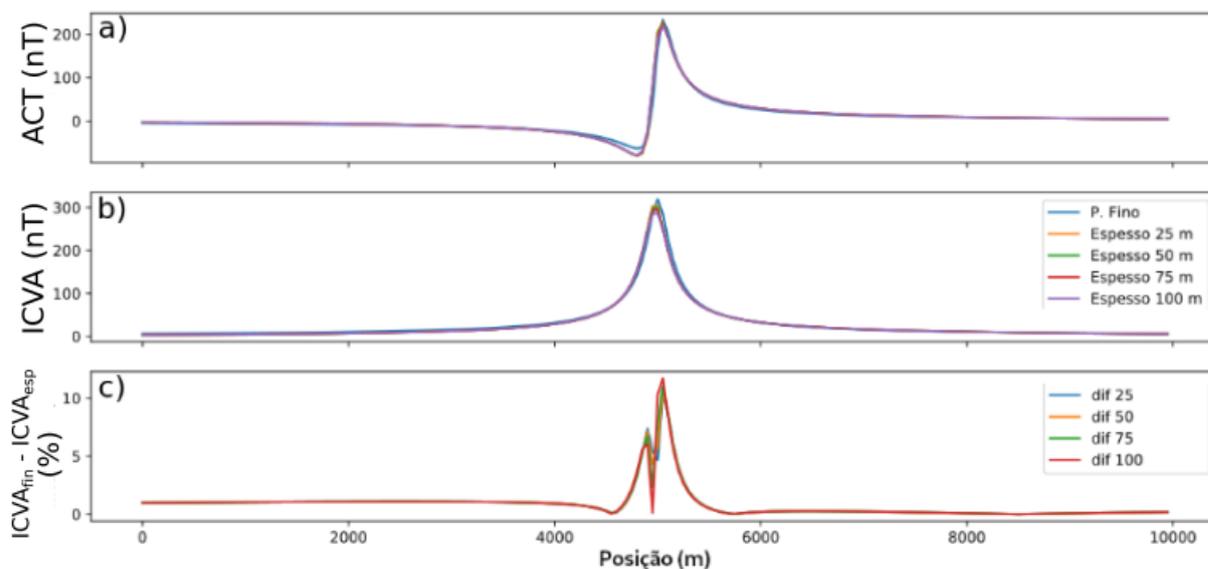


Figura 3.1: Comparação entre modelo prismático espesso e fino a altitude de 100 m. a) Anomalia de campo total para prisma fino com produto $Me = 153$ A, aflorante, posicionado em 5000 m, inclinação da magnetização -58° e para prismas espessos com espessuras 25, 50, 75 e 100 m e magnetização $M' = Me/e$, aflorantes, com base a 10 km e inclinação da magnetização -58° b) Intensidade do campo vetorial anômalo para os modelos da subfigura "a". c) Diferença entre a intensidade do campo vetorial anômalo do prisma fino e dos prismas espessos em porcentagem relativa a amplitude máxima.

3.2 Simulação para modelos com baixa densidade de prismas

Baseado nos valores de inclinação de $-58,39^\circ$ e declinação de $-14,91^\circ$ do campo geomagnético local em 2006 (NOAA, 2018), definiu-se os limites para a inclinação da magnetização (inc) e o valor da declinação magnética dos modelos a serem construídos. Nas simulações numéricas, inc varia entre polaridade normal e reversa, para inclinação de -58° . A declinação magnética de $-14,91^\circ$ é utilizada para orientar os modelos com relação ao Norte Magnético. Sendo α (Figura 2.3) medido anti-horário, seu valor pode ser dado pela soma da declinação magnética com o ângulo anti-horário que o *strike* de um prisma faz com o Norte Geográfico. Para todos os modelos α foi de $45,09^\circ$, valor similar ao observado para diques no local de estudo (seção 4.1). A profundidade do topo dos prismas (z_0), varia desde aflorantes ($z_0 = 0$) até a profundidade de 1 km. A posição (x_0) do centro do prisma é definida aleatoriamente dentro dos limites do perfil. A Tabela 3-1 mostra os limites para cada parâmetro dentro das simulações realizadas neste trabalho. Todos os dados sintéticos gerados pelo módulo de problema direto, foram contaminados com ruído aleatório, baseado em distribuição normal centrada em zero e desvio padrão de 1 nT. Os valores limites para os critérios de aceitabilidade das soluções foram empiricamente definidos e são apresentados um a um ao longo das simulações. A picagem para definição dos

limites inferiores e superiores do parâmetro x_0 para cada prisma no processo de inversão é demarcada nas ICVA das soluções desta seção.

Tabela 3-1: Variação dos parâmetros para os modelos das simulações numéricas. Me considera $0 \leq Q \leq 4$. Min , Max = valores mínimos e máximos dos parâmetros, M = magnetização, e = espessura, Me = produto entre magnetização e espessura, inc = inclinação da magnetização, z_0 = profundidade do topo, x_0 = posição ao longo do perfil, podendo assumir valores até x_f (equivalente a extensão máxima do perfil).

	M (A.m ⁻¹)	e (m)	Me (A)	inc (°)	z_0 (m)	x_0 (m)
Min	0,68	25	17	-58	0	0
Max	3,4	100	340	58	1000	x_f

3.2.1 Modelo 1

O modelo 1 conta com seis prismas distribuídos de forma aleatória em um perfil de 10 km de extensão (densidade média de 0,6 prismas.km⁻¹). Os demais parâmetros foram modelados conforme a Tabela 3-2. Visamos aqui, avaliar a convergência do programa para uma única geração de diques com parâmetros magnéticos (Me e inc) idênticos. Esse modelo representa um cenário geológico com unidades oriundas de mesmo episódio magmático. A uniformidade de Me indicando dimensões e intensidade de magnetização comuns, e a uniformidade de inc , um mesmo intervalo de polaridade normal do campo geomagnético. Os critérios de aceitabilidade foram $\varepsilon < 7$ na Etapa-1, $\varepsilon_2 < 55$ na Etapa-2 e $R^2 \geq 0,9$.

Tabela 3-2: Parâmetros do modelo 1. P1 à P6 = numeração dos prismas. As colunas contém os respectivos valores de produto Mt , profundidade do topo e inclinação da magnetização.

	Me (A)	z_0 (m)	inc (°)
P1	159	390	-58
P2	159	50	-58
P3	159	150	-58
P4	159	140	-58
P5	159	60	-58
P6	159	400	-58

A Figura 3.2 apresenta o resultado da inversão para o modelo 1 (Etapa-1 $Q(\hat{\mathbf{p}}) = 6,7$ e Etapa-2 $U(\hat{\mathbf{p}}) = 52,7$) e os limites inferiores e superiores para cada prisma. Esse resultado representa a melhor solução obtida dentro dos critérios de aceitabilidade, em um universo de 100 soluções oriundas de 100 modelos iniciais aleatórios. Nessa figura, é possível observar o ajuste obtido com o algoritmo de minimização fbgs e os respectivos valores de R^2 . A solução recupera as principais feições de ACT e ICVA e,

a disposição dos prismas resultantes da inversão é similar à disposição do modelo verdadeiro. Os parâmetros obtidos na inversão são apresentados na Tabela 3-3, juntamente com seus desvios padrão (σ) para cada um deles. Os desvios padrão são calculados com base nas 10 melhores soluções do universo de 100 soluções já citado. Observa-se na tabela em questão, que a maioria dos parâmetros é compatível com o modelo verdadeiro considerando-se de 1 a 2 σ . Exceção é o valor de Me para o prisma de número 2, em que a compatibilidade pode ser obtida com 3 σ .

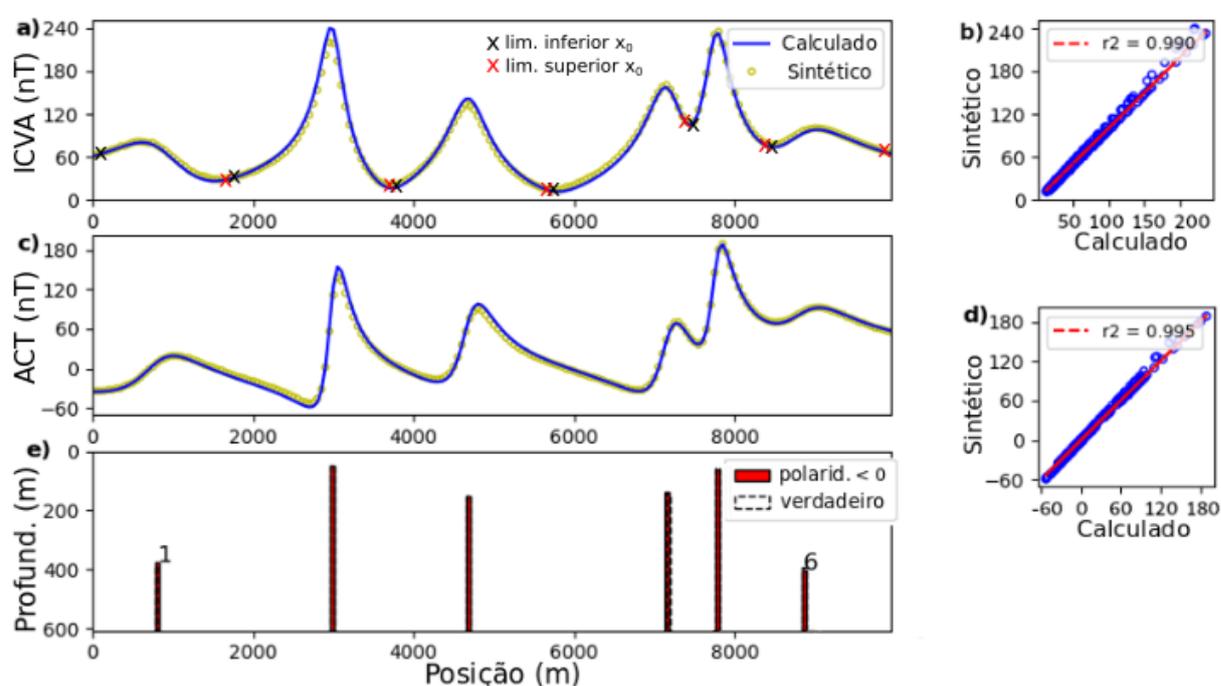


Figura 3.2: Resultado da inversão do modelo 1 com o programa PyDYKE. **a)** Dados sintéticos (círculos), campo ajustado (linha cheia) para a intensidade do campo vetorial anômalo (ICVA) e limites inferiores (x preto) e superiores (x vermelho) para o parâmetro x_0 de cada prisma; **b)** Parâmetro R^2 para o ajuste da ICVA; **c)** Dados sintéticos (círculos) e campo ajustado (linha cheia) para a anomalia de campo total (ACT); **d)** Parâmetro R^2 para o ajuste da ACT. **e)** Modelo obtido na inversão e polaridade da magnetização (normal em vermelho), modelo verdadeiro (tracejado).

Tabela 3-3: Parâmetros (Me , inc , x_0 , z_0) fornecidos pelo módulo de inversão do PyDYKE para o modelo 1. Parâmetros correspondentes aos prismas P1 a P6. Parâmetros para o modelo verdadeiro tais como na Tabela 3-2.

	Me (A)	inc ($^\circ$)	x_0 (m)	z_0 (m)
P1	158.3 ± 50.3	-61.3 ± 3.8	797.9 ± 4.8	374.7 ± 6.3
P2	176.7 ± 6.5	-59.4 ± 3.0	2986.9 ± 0.3	49.2 ± 0.2
P3	174.7 ± 11.1	-56.7 ± 2.7	4679.0 ± 1.1	149.3 ± 0.5
P4	158.9 ± 4.5	-56.4 ± 1.3	7161.3 ± 0.8	139.3 ± 0.7
P5	159.7 ± 1.7	-58.5 ± 1.2	7762.6 ± 0.7	60.2 ± 1.0
P6	162.7 ± 4.0	-56.0 ± 3.9	8859.4 ± 6.3	404.2 ± 11.8

3.2.2 Modelo 2

O modelo 2 contém 6 prismas dispostos aleatoriamente, porém conta com prismas com magnetização normal e reversa. Esse modelo representa um cenário geológico onde intrusões oriundas de mesma fonte (indicadas pelo mesmo valor de $Me = 159$ A), foram colocadas em diferentes instantes do tempo geológico, registrando reversões do campo geomagnético ($inc = -58^\circ$ e $inc = 58^\circ$). Esse modelo portanto, representa duas gerações de diques. A Tabela 3-4 contém os parâmetros do modelo 2. A densidade média do modelo é de 0,6 prismas.km⁻¹. Os critérios de aceitabilidade foram $\varepsilon < 6$ na Etapa-1, $\varepsilon_2 < 7$ na Etapa-2 e $R^2 \geq 0,9$.

Tabela 3-4: Parâmetros do modelo 2. P1 à P6 = numeração dos prismas. As colunas contém os respectivos valores de produto Me , profundidade do topo e inclinação da magnetização.

	Me (A)	z_0 (m)	inc ($^\circ$)
P1	159	290	58
P2	159	300	58
P3	159	50	58
P4	159	60	-58
P5	159	150	-58
P6	159	140	-58

O resultado da inversão para o modelo 2 é apresentado na Figura 3.3 (Etapa-1 $Q(\hat{\mathbf{p}}) = 5,3$ e Etapa-2 $U(\hat{\mathbf{p}}) = 6,9$). Nessa figura, é possível observar o ajuste obtido com o algoritmo de minimização DE e os respectivos valores de R^2 . Observa-se que as principais feições da ACT e ICVA são recuperadas e que considerando três casas decimais, os respectivos R^2 são iguais a 1. A distribuição dos prismas obtidos pelo procedimento de inversão é similar à disposição do modelo verdadeiro. Destaca-se que mesmo em situações como a representada pelos prismas 3 e 4, onde a proximidade de fontes com polaridades opostas cria um padrão mais complexo na anomalia de campo total, o algoritmo consegue obter ajuste satisfatório.

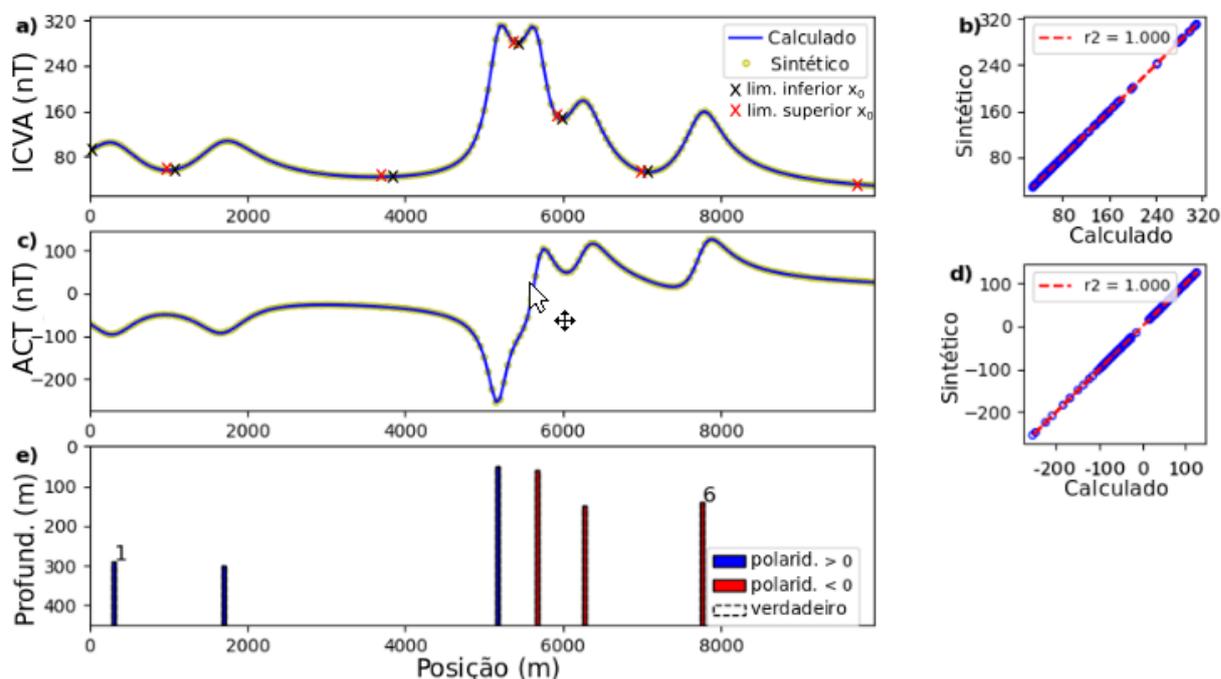


Figura 3.3: Resultado da inversão do modelo 2 com o programa PyDYKE. **a)** Dados sintéticos (círculos), campo ajustado (linha cheia) para a intensidade do campo vetorial anômalo (ICVA) e limites inferiores (x preto) e superiores (x vermelho) para o parâmetro x_0 de cada prisma; **b)** Parâmetro R^2 para o ajuste da ICVA; **c)** Dados sintéticos (círculos) e campo ajustado (linha cheia) para a anomalia de campo total (ACT); **d)** Parâmetro R^2 para o ajuste da ACT. **e)** Modelo obtido na inversão e polaridade da magnetização (normal em vermelho, reversa em azul), modelo verdadeiro (tracejado).

Os parâmetros obtidos na inversão do modelo 2 podem ser observados na Tabela 3-5. Nota-se que os parâmetros obtidos na inversão de dados apresentam distribuição bem estreita, quando considerados os desvios padrão, exceto o parâmetro Me para os prismas P5 e P6. A margem de incerteza na distribuição de Me é de cerca de 7,7% do valor verdadeiro para P5 e de 16,6% para P6. Esse fato é ilustrativo pois mostra que quando isolados (casos de P1 e P2), a margem de incerteza na estimativa dos parâmetros pode ser estreita, mesmo para diques mais profundos. A maior incerteza para os prismas P5 e P6 decorre da localização desses em uma parte do perfil com maior densidade de fontes. Quanto à qualidade da solução apresentada na Figura 3.3, a Tabela 3-5 indica que os parâmetros obtidos são compatíveis com os verdadeiros dentro de 1σ . Para parâmetros com desvio padrão igual a zero, os parâmetros obtidos podem ser comparados aos valores presentes na Tabela 3-4 e na disposição dos prismas da Figura 3.3.e. Assim, o que se conclui dessa análise é que os parâmetros se aproximam dos valores verdadeiros, validando o PyDYKE neste cenário.

Tabela 3-5: Parâmetros (Me , inc , x_0 , z_0) fornecidos pelo módulo de inversão do PyDYKE para o modelo 2. Parâmetros correspondentes aos prismas P1 a P6. Parâmetros para o modelo verdadeiro tais como na Tabela 3-4.

	Me (A)	inc ($^\circ$)	x_0 (m)	z_0 (m)
P1	159.3 ± 0.4	58.2 ± 0.3	300.2 ± 0.0	289.0 ± 0.0
P2	159.9 ± 0.6	58.4 ± 0.9	1692.2 ± 0.0	300.8 ± 0.0
P3	159.2 ± 2.1	58.3 ± 3.1	5174.7 ± 0.0	49.6 ± 0.0
P4	159.4 ± 4.0	-58.3 ± 4.2	5672.3 ± 0.2	59.8 ± 0.0
P5	159.2 ± 12.2	-58.4 ± 1.2	6269.6 ± 0.2	150.0 ± 0.0
P6	159.6 ± 26.4	-58.4 ± 1.8	7761.5 ± 0.0	140.4 ± 0.0

3.3 Simulação para modelos com alta densidade de prismas

Para perfis com maior densidade de prismas (> 1 prisma.km⁻¹), agrava-se o problema da interferência de anomalias, o que dificulta a identificação de um número mínimo de prismas do modelo. Outro problema, é que diques mais profundos, ou com menor produto Me , tendem a passar despercebidos. Para os modelos de alta densidade, já que não se recuperam todas as fontes, são apresentadas as quatro melhores soluções segundo os critérios de aceitabilidade. Essas soluções fazem parte de um universo de 400 soluções, obtidas a partir de 400 modelos iniciais aleatórios. Essas quatro soluções então alimentam o módulo de *cluster analysis* do PyDYKE, no intuito de recuperar os centroides de cada geração existente e perceptível. A picagem para definição dos limites inferiores e superiores do parâmetro x_0 para cada prisma no processo de inversão não é apresentada nesta seção, visto que a grande quantidade de prismas tornaria as figura inelegíveis. Alternativamente, apresentamos os valores da picagem para cada modelo de alta densidade no Anexo 1.

3.3.1 Modelo 3

O modelo 3 é formado por 40 prismas distribuídos em posições aleatórias x_0 ao longo de um perfil de 30 km de extensão. Portanto, esse modelo conta com uma densidade média de 1,3 prismas.km⁻¹. Os prismas do modelo foram gerados a partir de distribuições gaussianas para dois centroides, cujos valores centrais (Me , z_0 , inc) e o percentual de afastamento são mostrados na Tabela 3-6. Esse modelo representa um cenário geológico onde existem duas gerações de diques. Cada geração teria sido colocada em diferentes instantes geológicos (definidos pelas polaridades da magnetização normal e reversa) e seria fruto de fontes diferentes. O produto Me

diferente representa variação de composição, enquanto os dois níveis médios do topo dos prismas representa diferentes pressões, estresse tectônico e aporte de magma.

Tabela 3-6: Parâmetros das gerações do modelo 3. $G1$ a $G3$ = gerações do modelo, Me = produto entre magnetização e espessura, z_0 = profundidade do topo, inc = inclinação da magnetização

	Me (A)	z_0 (m)	inc ($^\circ$)
G1	$159 \pm 1 \%$	$50 \pm 1 \%$	$58 \pm 5 \%$
G2	$265 \pm 1\%$	$200 \pm 1 \%$	$-58 \pm 5 \%$

Os critérios de aceitabilidade para as inversões do modelo 3 foram definidos empiricamente em execuções prévias do programa (Etapa-1 $\varepsilon < 290$, Etapa-2 $\varepsilon_2 < 640$ e ao final da inversão $R^2 \geq 0,9$). A Tabela 3-7 contém os valores de $Q(\hat{\mathbf{p}})$ (equação 18) e $U(\tilde{\mathbf{p}})$ (equação 19) para as quatro soluções obtidas.

Tabela 3-7: Valores dos funcionais e R^2 para as quatro melhores soluções da inversão do modelo 3. As soluções são marcadas de $inv1$ à $inv4$.

	$Q(\hat{\mathbf{p}})$ (Etapa-1)	$U(\tilde{\mathbf{p}})$ (Etapa-2)	R^2 (ACT;ICVA)
inv1	289	613	0,96 ; 0,95
inv2	287	608	0,96 ; 0,95
inv3	286	638	0,95 ; 0,95
inv4	289	615	0,96 ; 0,95

As quatro melhores soluções ($inv1$ à $inv4$) obtidas para a inversão do modelo 3 são mostradas na Figura 3.4. As soluções são compostas por modelos de 33 prismas (132 parâmetros), enquanto o modelo verdadeiro possui 40 prismas (160 parâmetros). Os padrões interferentes, gerados no modelo sintético, impedem que algumas unidades sem expressão perceptível, sejam recuperadas mesmo utilizando o refinamento por adição de prismas. Ainda assim, as soluções recuperam as principais feições da ACT, ICVA e possuem representatividade similar, tal qual verificado pelas distribuições de prismas e nas respectivas curvas das inversões de 1 a 4.

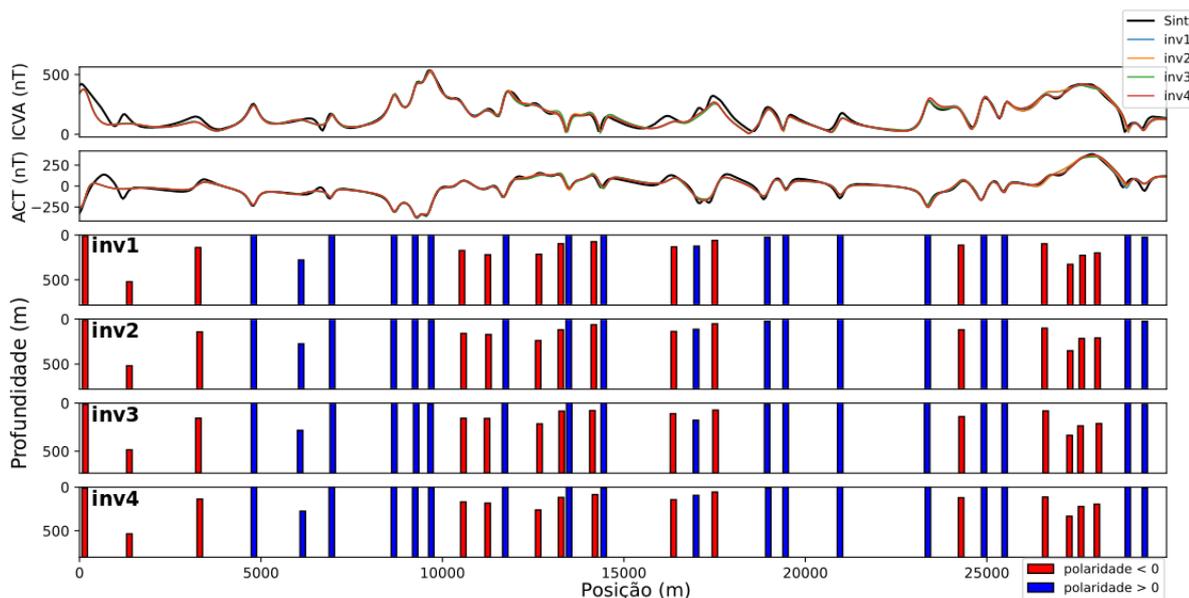


Figura 3.4: Soluções obtidas com o módulo de inversão do PyDYKE para dados sintéticos calculados a partir do modelo 3. No topo, o sinal referente ao modelo verdadeiro é sobreposto aos ajustes obtidos para quatro inversões (inv1, inv2, inv3 e inv4). A disposição de prismas obtidos para cada inversão é apresentada nas subfiguras, inv1 à inv4.

O valor de ajuste dado pela equação (27) e sua derivada em função do número de grupos (k) para o modelo verdadeiro, tal qual na seção 2.6.1, é mostrado na Figura 3.5. A partir dela, pode-se concluir que a análise k -means identifica dois grupos de prismas.

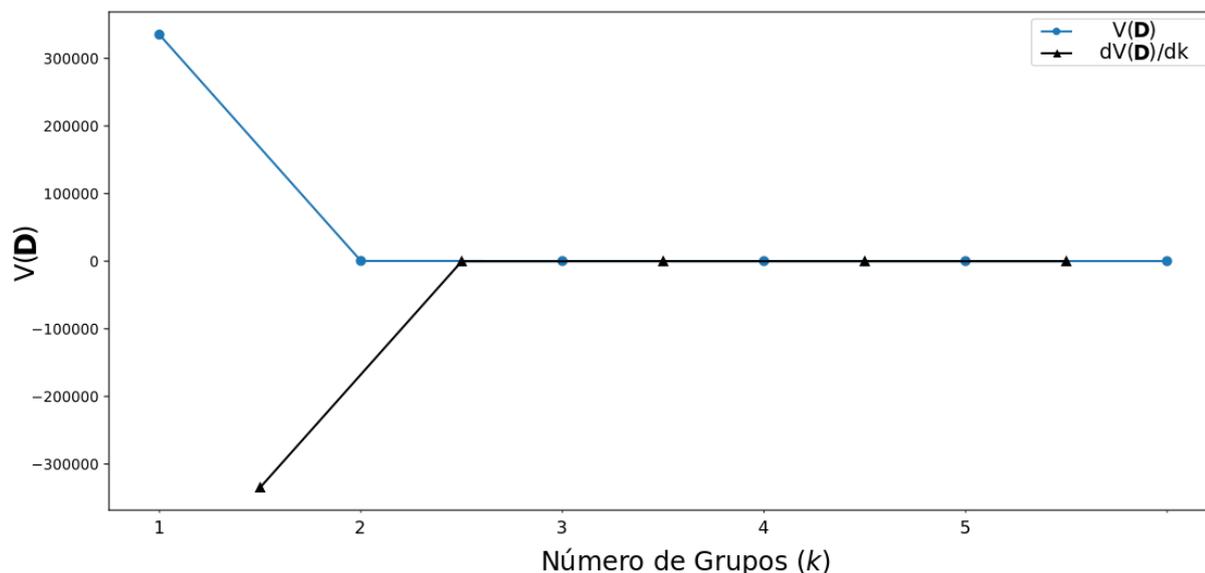


Figura 3.5: Definição do número de grupos (k) para o modelo verdadeiro 3. Linha azul: $V(\mathbf{D})$, equação (27), para modelo verdadeiro em função de k . Linha preta: derivada de $V(\mathbf{D})$ em relação a k .

O mesmo procedimento foi realizado com as soluções (inv1 a inv4) obtidas para o modelo 3 é mostrado na Figura 3.6. Conforme se pode observar, a definição do patamar no caso das inversões não é tão marcante como para o modelo verdadeiro,

mas a maior variação da derivada ocorre antes de $k = 2$. Uma vez que o número de grupos para definir o patamar ficaria entre 2 e 4, opta-se pelo menor valor.

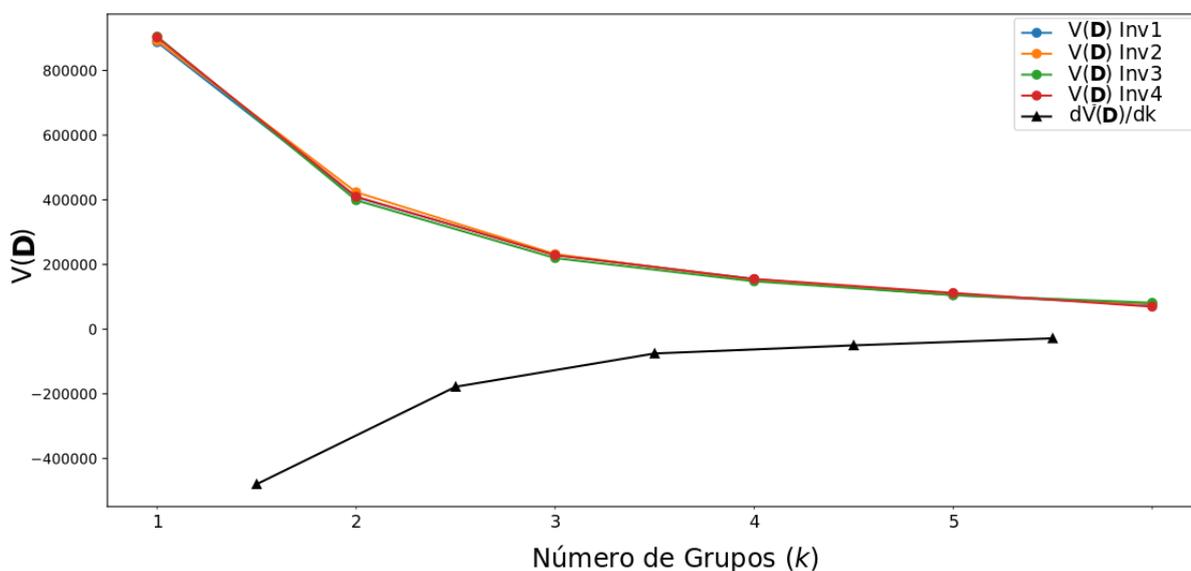


Figura 3.6: Definição do número de grupos (k) para os modelos obtidos pela inversão dos dados sintéticos gerados pelo modelo 3. Linhas coloridas: $V(\mathbf{D})$, equação (27), para soluções inv1 à inv4 em função de k . Linha preta: derivada de $V(\mathbf{D})$ em relação a k para inv1.

Aplicando-se o módulo de *cluster analysis* para $k = 2$ nas soluções para o modelo 3, obtém-se a Figura 3.7, onde os centroides para os dois grupos são plotados para z_0 em função de Me . Os centroides referentes ao modelo verdadeiro, assim como para cada solução obtida na de inversão de dados, são diferenciados em símbolos e cores. As barras coloridas são referentes a dispersão dos parâmetros com base nas quatro soluções encontradas. Já a Figura 3.8 mostra os centroides para *inc* em função de Me , assim como as dispersões dos parâmetros das unidades na forma de barras coloridas. Percebe-se a definição de dois grupos, onde para ambos, os centroides inferem valores aproximados não muito distantes dos centroides do modelo verdadeiro.

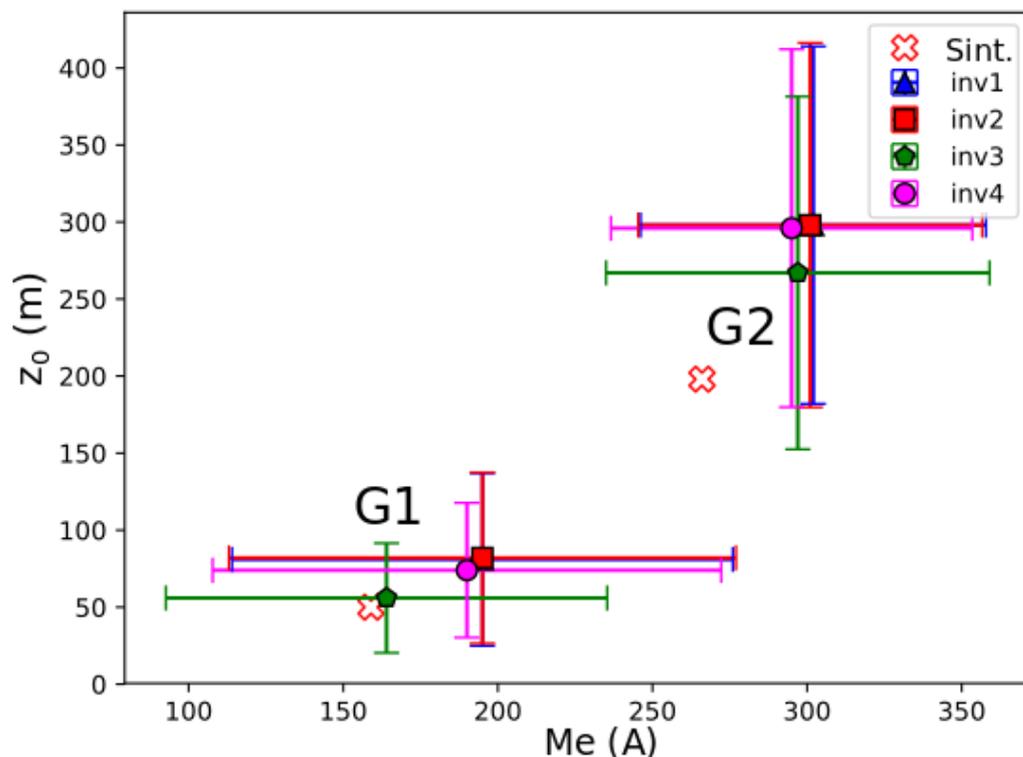


Figura 3.7: Análise *k-means* para o modelo 3 para os parâmetros Me e z_0 ; centroides do modelo verdadeiro (x vermelho vazado) e correspondente às soluções alternativas (inv1 a inv4) obtidas com a inversão dos dados sintéticos Barras coloridas representam a dispersão de unidades de cada solução, considerando os elementos do respectivo grupo. Grupos marcados (G1 e G2).

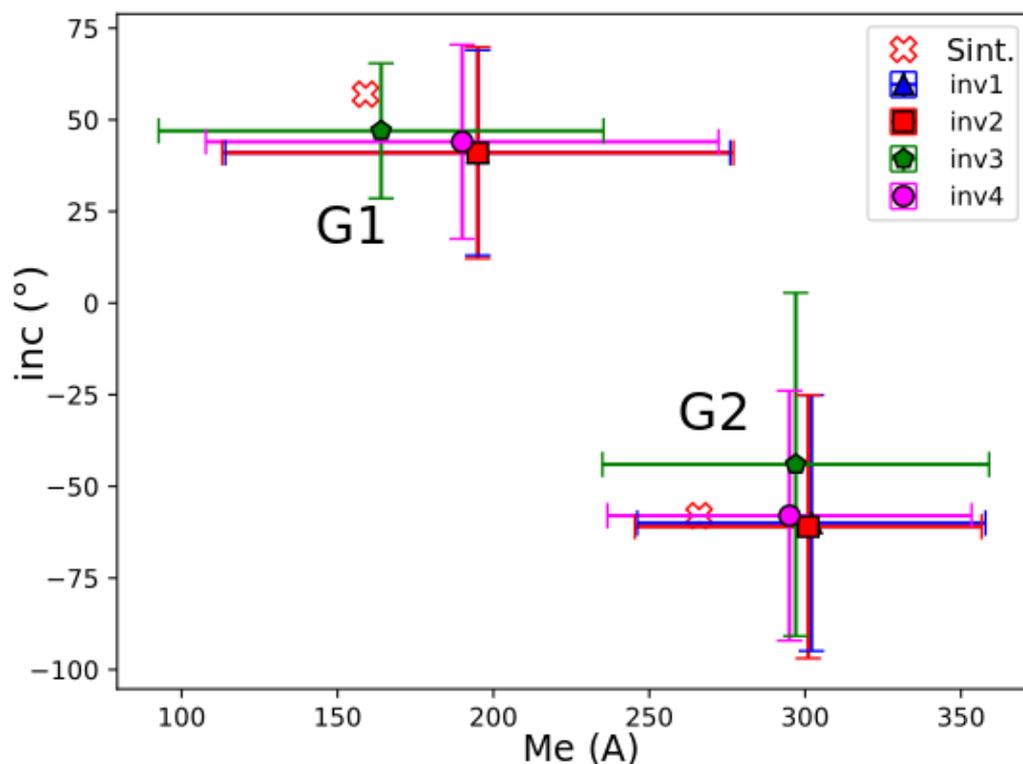


Figura 3.8: Análise *k-means* para o modelo 3 para os parâmetros Me e inc ; centroides do modelo verdadeiro (x vermelho vazado) e correspondente às soluções alternativas (inv1 a inv4) obtidas com a

inversão dos dados sintéticos. Barras coloridas representam a dispersão de unidades de cada solução, considerando os elementos do respectivo grupo. Grupos marcados (G1 e G2).

A Tabela 3-8 contém os valores referentes a média dos centroides obtidos para o modelo 3 e o desvio padrão associado a eles.

Tabela 3-8: Parâmetros (Me , z_0 , inc) fornecidos pelo módulo de cluster analysis do PYDYKE para o modelo 3. Parâmetros correspondentes às gerações G1 e G2. Parâmetros para o modelo verdadeiro tais como na Tabela 3-6.

	Me (A)	z_0 (m)	inc ($^\circ$)
G1	$186,0 \pm 14,9$	$73,3 \pm 12,0$	$43,3 \pm 2,9$
G2	$298,8 \pm 3,3$	$289,8 \pm 15,2$	$-55,8 \pm 7,9$

3.3.2 Modelo 4

O próximo modelo a ser considerado, modelo 4, conta um total de 60 prismas, distribuídos em distâncias x_0 aleatórias ao longo de um perfil de 50 km de extensão. Essa distribuição implica em uma densidade média de $1,2$ prismas.km⁻¹. Os prismas do modelo foram gerados a partir de distribuições gaussianas para três centroides, cujos valores centrais (Me , z_0 , inc) e o percentual de afastamento são mostrados na Tabela 3-9. Esse modelo representa um cenário geológico onde existem três gerações de diques. Nesse caso, as polaridades da magnetização normal e reversa definem pelo menos dois diferentes instantes geológicos, os diferentes valores de Me representam variação composicional e os três diferentes níveis médios do topo dos prismas representam diferentes aportes de magmas, diferentes estresses tectônicos e pressões.

Tabela 3-9: Parâmetros das gerações do modelo 4. G1 a G3 = gerações do modelo, Me = produto entre magnetização e espessura, z_0 = profundidade do topo, inc = inclinação da magnetização.

	Me (A)	z_0 (m)	inc ($^\circ$)
G1	$153 \pm 1\%$	$50 \pm 1\%$	$-58 \pm 5\%$
G2	$203 \pm 1\%$	$150 \pm 1\%$	$58 \pm 5\%$
G3	$153 \pm 1\%$	$400 \pm 1\%$	$-58 \pm 5\%$

Os critérios de aceitabilidade para as soluções foram Etapa-1 $\varepsilon < 310$, Etapa-2 $\varepsilon_2 < 630$ e ao final da inversão $R^2 \geq 0,9$. Os valores de $Q(\hat{\mathbf{p}})$ (equação 18) e $U(\hat{\mathbf{p}})$ (equação 19) para as quatro soluções obtidas são apresentados na Tabela 3-10.

Tabela 3-10: Valores dos funcionais e R^2 para as quatro melhores soluções da inversão do modelo 4. As soluções são marcadas de inv1 à inv4.

	$Q(\hat{\mathbf{p}})$ (Etapa-1)	$U(\hat{\mathbf{p}})$ (Etapa-2)	R^2 (ACT;ICVA)
inv1	305	621	0,96 ; 0,92
inv2	306	627	0,96 ; 0,92
inv3	309	629	0,95 ; 0,90
inv4	307	625	0,95 ; 0,91

Na Figura 3.9, apresentamos as quatro soluções (inv1 à inv4) obtidas pelo módulo de inversão do PyDYKE para o modelo 4. As soluções são compostas por modelos de 51 prismas cada (204 parâmetros), embora o modelo verdadeiro seja composto por 60 prismas (240 parâmetros). De forma mais grave que no teste anterior (modelo 3), os padrões interferentes acabam por deixar algumas unidades sem expressão na ICVA. O ajuste das soluções aos dados sintéticos, recupera as principais feições da anomalia de campo total e a intensidade do campo vetorial anômalo. Percebe-se que as curvas de ACT e ICVA obtidas são similares entre si, assim como as distribuições de prismas nas diferentes soluções.

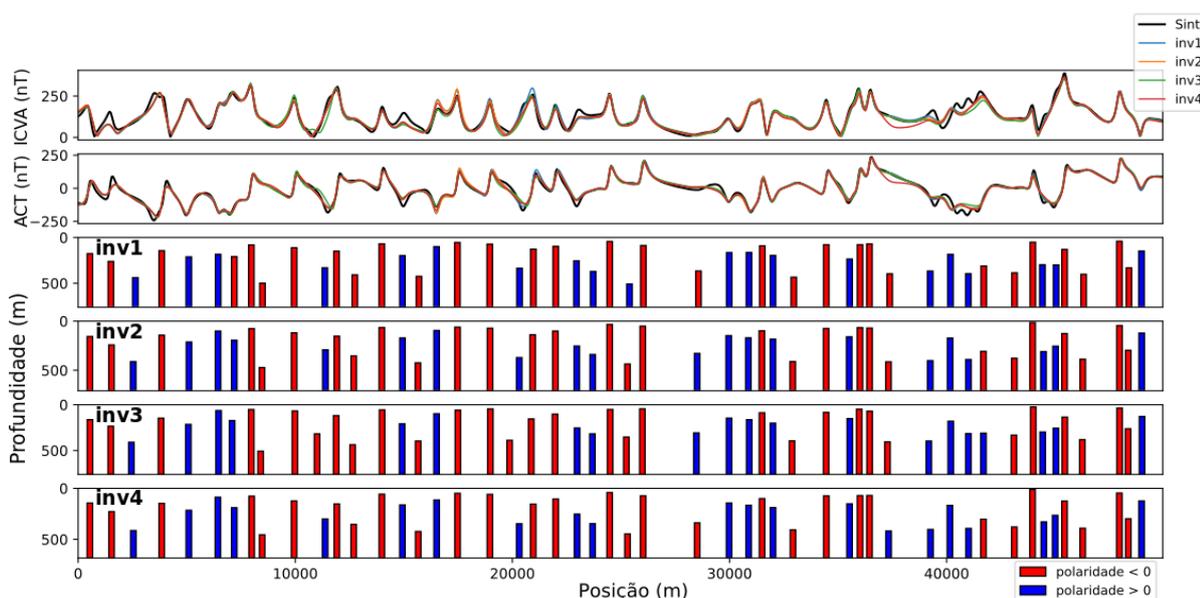


Figura 3.9: Soluções obtidas com o módulo de inversão do PYDYKE para dados sintéticos calculados a partir do modelo 4. No topo, o sinal referente ao modelo verdadeiro é sobreposto aos ajustes obtidos para quatro inversões (inv1, inv2, inv3 e inv4). A disposição de prismas obtidos para cada inversão é apresentada nas subfiguras, inv1 à inv4.

As quatro soluções encontradas foram utilizadas na análise *k-means* para identificar o número de grupos presentes na distribuição de prismas e avaliar a dispersão das estimativas para cada parâmetro. A Figura 3.10 mostra o resultado da análise do valor de k para o modelo 4. É possível notar que tanto o ajuste quanto a sua derivada

tendem a um patamar para $k \geq 3$. Como adotamos o valor inferior por padrão, concluímos que o módulo de *cluster analysis* possui a capacidade de recuperação de três gerações para o modelo 4.

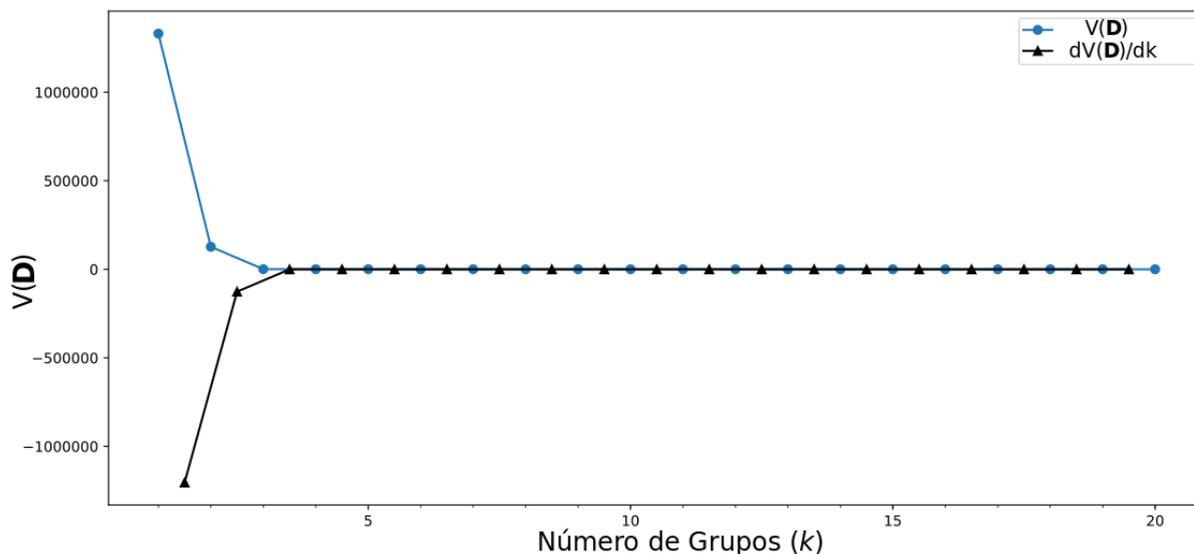


Figura 3.10: Definição do número de grupos (k) para o modelo verdadeiro 4. Linha azul: $V(\mathbf{D})$, equação (27), para modelo verdadeiro em função de k . Linha preta: derivada de $V(\mathbf{D})$ em relação a k .

Em se tratando das soluções do procedimento de inversão, realizamos a mesma abordagem para determinar o valor de k . A Figura 3.11 mostra a análise da definição de k para as soluções do modelo 4. Uma vez que os parâmetros obtidos para as unidades que compõem as soluções são mais dispersos, a determinação do início de um patamar se torna menos evidente e mais interpretativa. Nesse cenário, o uso da derivada da grandeza dada pela equação (27) em função de k se mostra mais eficaz, uma vez que por ela, vê-se que a derivada tende a um patamar para $k \geq 3$. Dessa forma, acreditamos que as soluções alternativas para o modelo 4, permitem reconhecer o número verdadeiro de grupos no modelo ($k = 3$). Cabe analisar se, sob essa premissa, os valores médios dos centroides podem ser recuperados, considerando que um número menor de prismas foi utilizado na inversão.

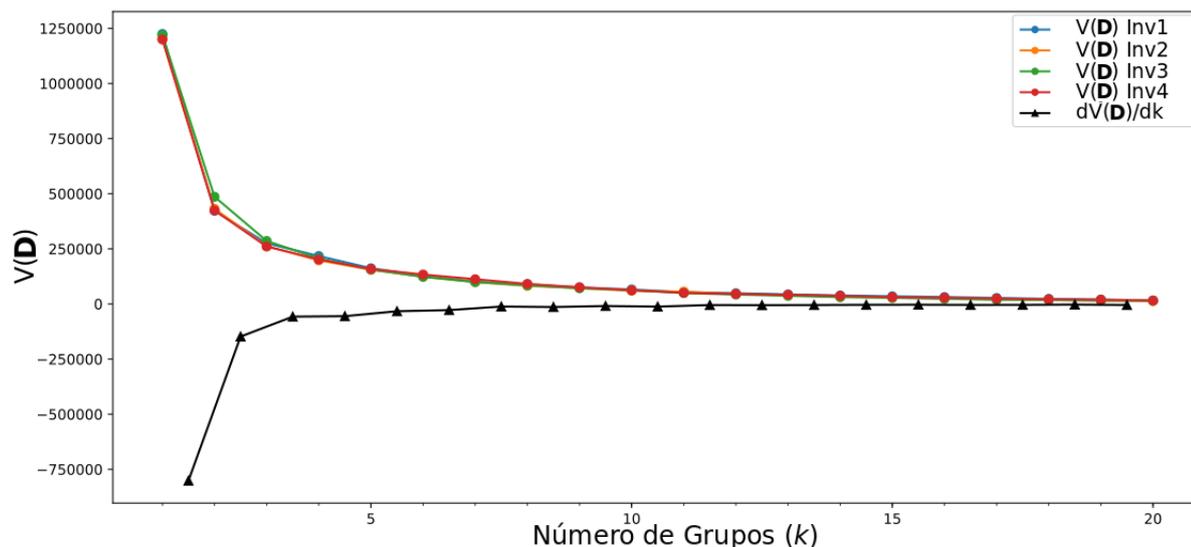


Figura 3.11: Definição do número de grupos (k) para os modelos obtidos pela inversão dos dados sintéticos gerados pelo modelo 4. Linhas coloridas: $V(\mathbf{D})$, equação (27), para soluções inv1 à inv4 em função de k . Linha preta: derivada de $V(\mathbf{D})$ em relação a k para inv1.

O resultado do módulo de *cluster analysis* para o modelo 4, é mostrado na Figura 3.12 para os parâmetros Me e z_0 . Foram consideradas quatro soluções obtidas por inversão, cujos valores de R^2 são próximos até a primeira casa decimal. Os centroides obtidos a partir das quatro soluções alternativas praticamente recuperam os centroides do modelo verdadeiro. A Figura 3.13 mostra esse resultado para Me e inc . Nesse caso, nota-se ao menos três aglomerados distintos, dificultando a identificação dos grupos com base no parâmetro inc . Acreditamos que o modelo avaliado apresenta um nível maior de dificuldade, uma vez que das três gerações, duas possuem valores de inc e de Me coincidentes, conforme a Tabela 3-9. Além disso, estudos da sensibilidade de parâmetros (não incluídos neste trabalho) mostram que inc é o parâmetro menos sensível dentre os quatro invertidos.

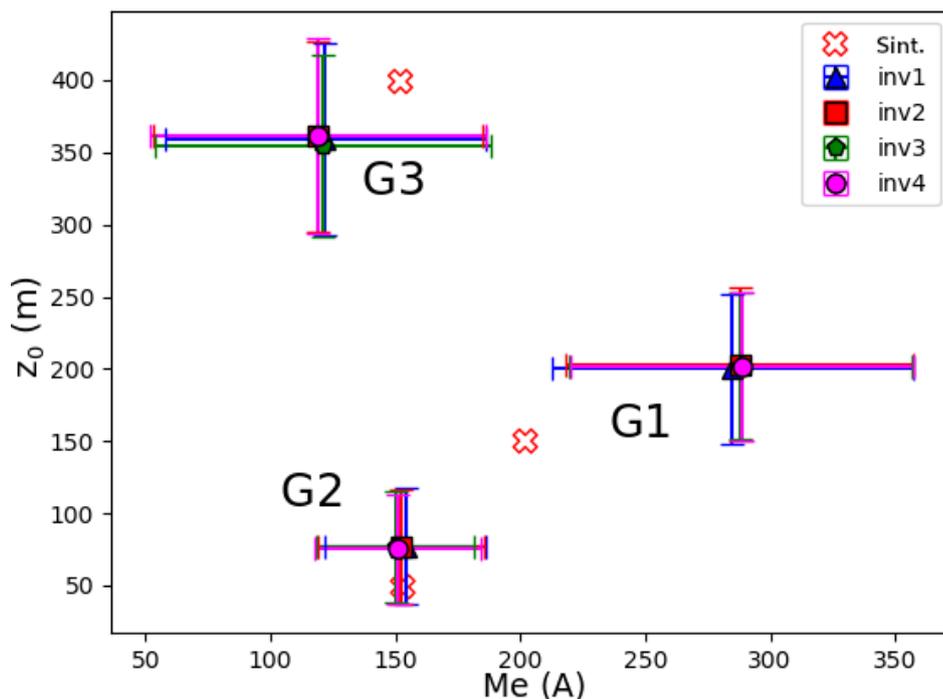


Figura 3.12: Análise *k*-means para o modelo 4 para os parâmetros Me e z_0 ; centroides do modelo verdadeiro (x vermelho vazado) e correspondente às soluções alternativas (inv1 a inv4) obtidas com a inversão dos dados sintéticos. Barras coloridas representam a dispersão de unidades de cada solução, considerando os elementos do respectivo grupo. Grupos marcados (G1 a G3).

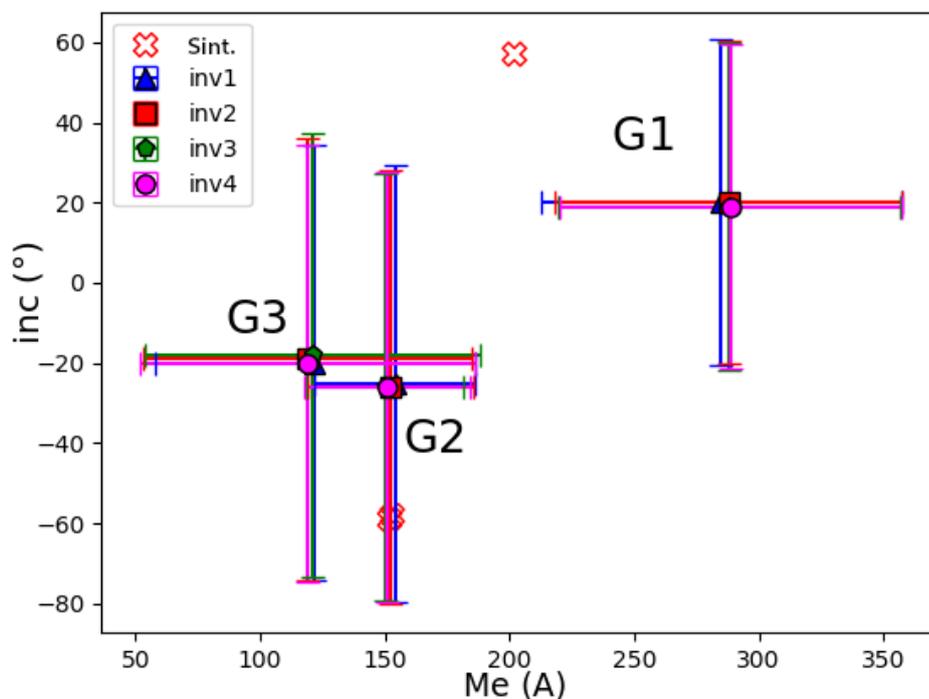


Figura 3.13: Análise *k*-means para o modelo 4 para os parâmetros Me e inc ; centroides do modelo verdadeiro (x vermelho vazado) e correspondente às soluções alternativas (inv1 a inv4) obtidas com a inversão dos dados sintéticos. Barras coloridas representam a dispersão de unidades cada solução, considerando os elementos do respectivo grupo. Grupos marcados (G1 a G3).

A Tabela 3-11 apresenta os valores médios para as três gerações, juntamente com os desvios padrões. Os valores permitem identificar três grupos distintos, cujas estimativas a partir de dados aeromagnéticos são realistas e podem ser úteis no estudo de diferentes gerações de diques. Entretanto, os valores de *inc* não são bem recuperados, sendo melhor considerar que se recupera a polaridade da inclinação da magnetização,

Tabela 3-11: Parâmetros (*Me*, z_0 , *inc*) fornecidos pelo módulo de cluster analysis do PYDYKE para o modelo 4. Parâmetros correspondentes às gerações G1 a G3. Parâmetros para o modelo verdadeiro tais como na Tabela 3-9.

	<i>Me</i> (A)	z_0 (m)	<i>inc</i> (°)
G1	287,5 ± 1,7	201,8 ± 1,3	19,5 ± 0,6
G2	151,8 ± 1,7	76,5 ± 1,0	-25,8 ± 0,5
G3	120,1 ± 1,5	358,8 ± 3,3	-9,5 ± 1,3

3.4 Influência de fontes 3D

Uma vez que o PYDYKE se utiliza do modelo de prismas finos para explorar a bidimensionalidade apresentada por enxames de diques, faz-se necessário avaliar a influência de fontes 3D na vizinhança ou interceptadas pelo perfil de dados. Para tanto, os modelos aqui apresentados estudam o comportamento do programa frente a inclusão de fontes 3D em perfis contendo majoritariamente fontes 2D. A definição dos limites inferiores e superiores do parâmetro x_0 para cada prisma no processo de inversão se encontram no Anexo I.

3.4.1 Modelo 5

No caso do modelo 5, gerou-se um arranjo aleatório com 60 prismas em um perfil de 50 km (1,2 prisma.km⁻¹) e três gerações (G1 a G3) cujos parâmetros médios e respectivas variações se encontram na Tabela 3-12.

Tabela 3-12: Parâmetros dos prismas do modelo 5. G1 a G3 = gerações; *Me* = produto entre a magnetização e espessura; z_0 = profundidade do topo; *inc* = inclinação da magnetização. Porcentagens indicam o quanto o modelo aleatório pode variar para cada parâmetro de acordo com a geração.

	<i>Me</i> (A)	z_0 (m)	<i>inc</i> (°)
G1	152 ± 2%	150 ± 1%	-58 ± 5%
G2	204 ± 2%	250 ± 1%	58 ± 5%
G3	152 ± 2%	500 ± 1%	-58 ± 5%

Às componentes T_x e T_z do arranjo de prismas, somou-se as componentes T_x e T_z referentes a dois cubos utilizados para simular fontes 3D. Calculou-se então, a anomalia de campo total e a intensidade do campo vetorial anômalo referentes à composição das fontes 2D e 3D. A Figura 3.14.a mostra o posicionamento dos dois cubos com aresta de 1 km, $M = 2,71 \text{ A.m}^{-1}$ e profundidade do topo a 200 m. Um cubo está colocado a 2 km de distância perpendicular à posição 10 km do perfil, enquanto o outro é interceptado na posição 35 km do perfil. A Figura 3.14.b mostra ACT e ICVA ao longo do perfil referente aos dois cubos. O cubo interceptado possui sinal com amplitude mais pronunciada que o gerado pelo cubo deslocado lateralmente.

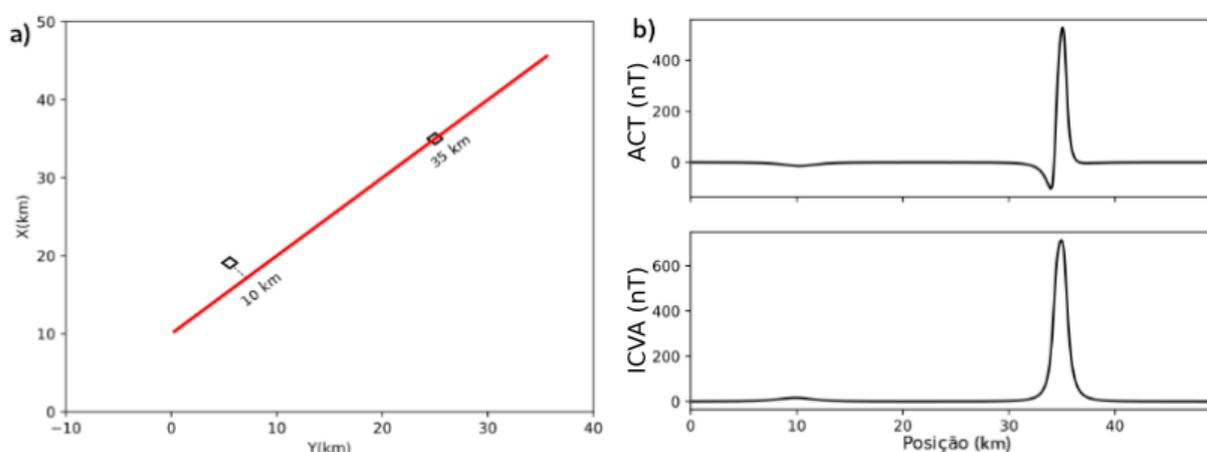


Figura 3.14: Composição de fontes 3D representadas por cubos. a) Posicionamento de cubos com aresta de 1 km, em relação ao perfil (linha vermelha). b) Anomalia de campo total e intensidade do campo anômalo referentes aos cubos.

O modelo resultante da somatória das contribuições 3D e 2D (modelo 5) foi invertido e o resultado é mostrado na Figura 3.15 (Etapa-1 $Q(\hat{\mathbf{p}}) = 1524$, Etapa-2 $U(\hat{\mathbf{p}}) = 1568$). Nota-se que nas posições 10 e 35 km, o arranjo de prismas inferido não ajusta os dados. Em 10 km, o cubo afetou as anomalias pré-existentes referentes aos prismas finos do modelo verdadeiro ali posicionados (tracejados Figura 3.15.e), impedindo o ajuste aos dados. Já em 35 km o cubo interceptado gerou uma anomalia cujo ajuste não foi possível nem mesmo de forma aproximada. Portanto, fontes 3D relacionadas a “corpos maciços” podem ser uma das causas de não ajuste aos dados. No restante do perfil observa-se resultados característicos para perfis de alta densidade, onde recupera-se parte das fontes já que algumas não possuem expressão magnética detectável.

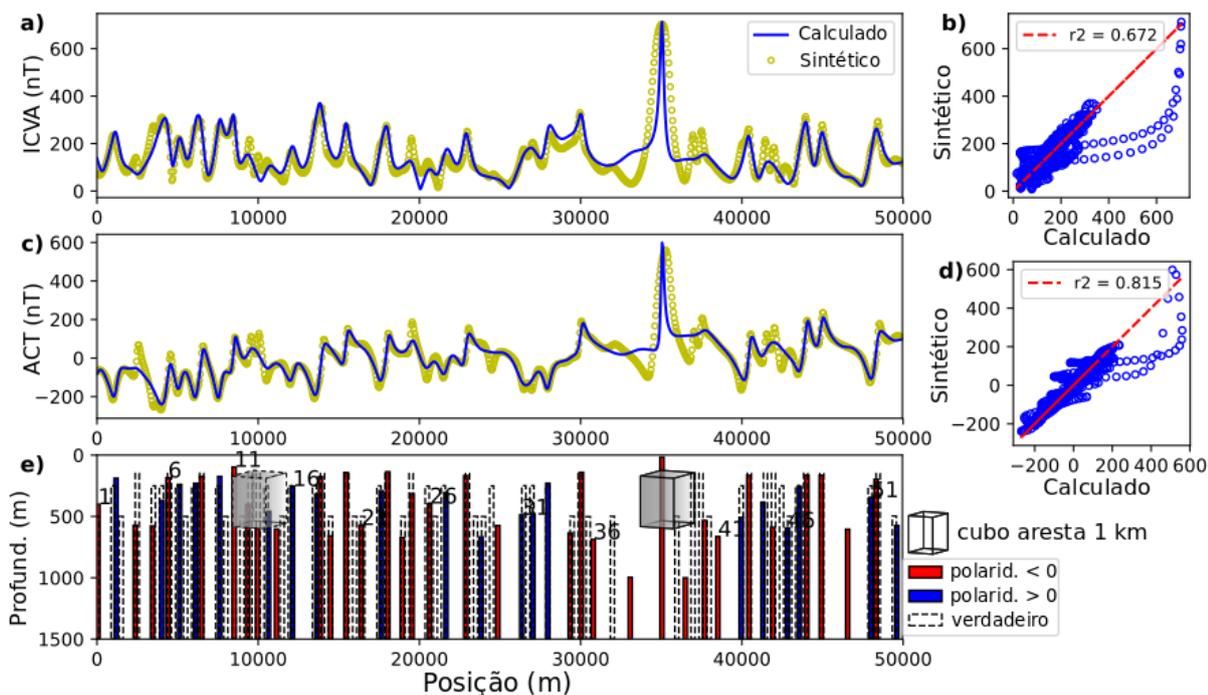


Figura 3.15: Resultado da inversão do modelo 5 com o programa PyDYKE. **a)** Dados sintéticos (círculos) e campo ajustado (linha cheia) para a intensidade do campo vetorial anômalo (ICVA); **b)** Parâmetro R^2 para o ajuste da ICVA; **c)** Dados sintéticos (círculos) e campo ajustado (linha cheia) para a anomalia de campo total (ACT); **d)** Parâmetro R^2 para o ajuste da ACT. **e)** Modelo obtido na inversão e polaridade da magnetização (normal em vermelho), modelo verdadeiro (tracejado) e posicionamento dos cubos de aresta 1 km em relação ao perfil (cubo tracejado 2 km deslocado lateralmente; cubo linha cheia interceptado pelo perfil).

3.4.2 Modelo 6

O modelo 6, último de nossa simulação numérica, uma placa horizontal com extensão de 10 por 10 km, topo a 200 m de profundidade e espessura de 100 m, $M = 2,71 \text{ A.m}^{-1}$, é interceptada por um perfil de 50 km de extensão na posição de 25 km. O objetivo desse modelo é analisar a influência de fontes do tipo soleira (sill). A Figura 3.16.a mostra a visão em planta da placa e do perfil, enquanto a Figura 3.16.b apresenta a ACT e ICVA referentes à fonte. Nota-se que a anomalia e seu módulo tem a forma de patamar com *spikes* em seus limites.

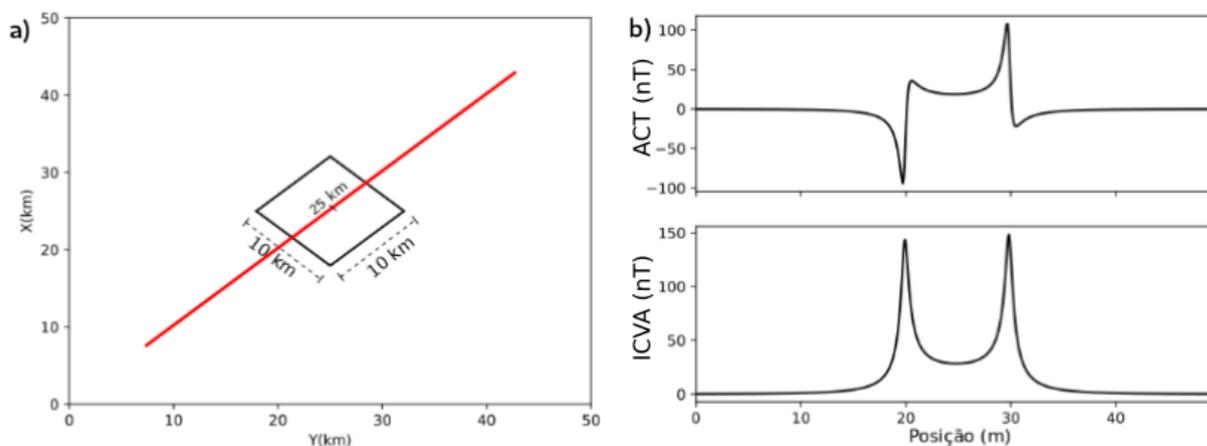


Figura 3.16: Configuração do modelo de placa. a) Disposição da placa em relação ao perfil (linha vermelha). b) ACT e ICVA referentes à placa.

Ao modelo de placa somou-se um modelo com densidade de $1,2 \text{ prisma.km}^{-1}$ contendo 60 prismas dispostos aleatoriamente cujos parâmetros médios para três gerações se encontram na Tabela 3-13. Dessa maneira obteve-se a ACT e ICVA referentes a composição do modelo 2D mais o 3D. O resultado da inversão desse modelo é mostrado na Figura 3.17 (Etapa-1 $Q(\hat{\mathbf{p}}) = 523$, Etapa-2 $U(\hat{\mathbf{p}}) = 1220$). Observa-se que a somatória das fontes 2D com a fonte 3D (placa) tem nível médio para a ICVA da ordem de 150 nT, exceto entre 20 e 30 km onde o nível médio é em torno de 350 nT e que pode-se considerar como um patamar contendo *spikes* relacionados aos prismas. Essa região visualmente possui o pior ajuste do perfil, muito embora o posicionamento e profundidade dos prismas seja inferido com qualidade similar à do restante do perfil. Em comparação ao modelo 5, o modelo 6 parece ser mais fácil de realizar correções, ou seja, o padrão de patamar poderia em tese ser removido. De toda forma, quando se trata de dados reais, a remoção de tais patamares muitas vezes não é algo trivial. De modo geral, a solução obtida por inversão tem as características das soluções para modelos de alta densidade, onde devido aos processos de interferência, algumas fontes não possuem expressão magnética perceptível e por isso não são recuperadas.

Tabela 3-13: Parâmetros dos prismas do modelo 6. $G1$ a $G3$ = gerações; Me = produto entre a magnetização e espessura; z_0 = profundidade do topo; inc = inclinação da magnetização. Porcentagens indicam o quanto o modelo aleatório pode variar para cada parâmetro de acordo com a geração

	Me (A)	z_0 (m)	inc ($^\circ$)
G1	$152 \pm 2\%$	$150 \pm 1.5\%$	$-58 \pm 15\%$
G2	$204 \pm 2\%$	$250 \pm 1.5\%$	$58 \pm 15\%$
G3	$152 \pm 2\%$	$500 \pm 1\%$	$-58 \pm 15\%$

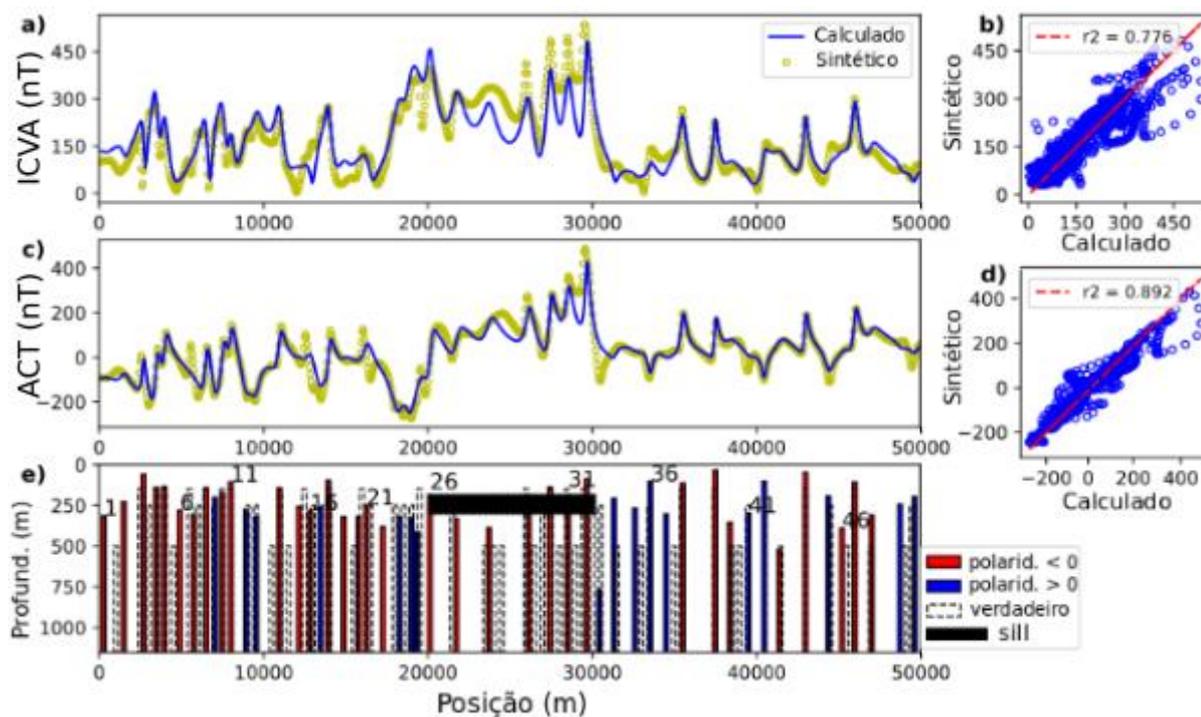


Figura 3.17: Resultado da inversão do modelo 5 com o programa PyDYKE. **a)** Dados sintéticos (círculos) e campo ajustado (linha cheia) para a intensidade do campo vetorial anômalo (ICVA); **b)** Parâmetro R^2 para o ajuste da ICVA; **c)** Dados sintéticos (círculos) e campo ajustado (linha cheia) para a anomalia de campo total (ACT); **d)** Parâmetro R^2 para o ajuste da ACT. **e)** Modelo obtido na inversão e polaridade da magnetização (normal em vermelho), modelo verdadeiro (tracejado) e posicionamento da placa representante do sill (retângulo preto).

O que se conclui a respeito da influência de fontes 3D é que as mesmas podem ser responsáveis pelo não ajuste dos dados no processo de inversão com prismas finos. Fontes do tipo soleira sugerem que a remoção de um patamar possa lidar com as mesmas melhorando a convergência de modelos baseados em prismas finos. Já fontes “maciças” (passíveis de serem representadas por cubos, esferas) podem apresentar amplitudes anômalas a se depender das dimensões da fonte e serem mais complicadas de terem sua influência removida.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS PARA DADOS REAIS

Neste capítulo mostramos os resultados obtidos com o PyDYKE para um perfil de dados retirado do Projeto Paraná-Santa Catarina (1095) da CPRM que intercepta o EDAPG no estado do Paraná. Apresentamos um breve resumo sobre a geologia do EDAPG, com foco na descrição de diques e de suas propriedades magnéticas. O projeto Paraná-Santa Catarina e alguns detalhes sobre a aquisição de dados magnetométricos são apresentados em uma seção própria. Como o programa PyDYKE trabalha com perfis de ACT e ICVA, incluímos uma seção que descreve o processamento de dados utilizando o programa Geosoft - Oasis Montaj e critérios considerados na escolha do perfil a ser invertido com o procedimento proposto.

Uma seção é dedicada a descrever a base de dados de poços que, é utilizada para investigar possíveis relações entre os resultados da inversão do perfil sobre o EDAPG e a hidrologia da região. Nela, também é apresentada a grandeza (capacidade específica) utilizada nesse procedimento e a forma como são selecionados os poços na área de interesse. Os contextos hidrológicos e geológicos na área de estudo, e como impactam os valores de capacidade específica, são abordados na sequência.

As últimas quatro seções mostram os resultados para a inversão do perfil sobre o EDAPG. As soluções obtidas pela inversão dos dados reais alimentam a análise de grupos (*k-means*), que então, as categoriza em termos de gerações de diques. As implicações das diferentes gerações inferidas pelas soluções são então exploradas primeiramente em termos de geologia, comparando os resultados com a literatura e levantando possibilidades. Por fim, em termos de hidrologia, avaliando o impacto de diques na produtividade de poços para a janela de estudo.

4.1 Enxame de Diques do Arco de Ponta Grossa (EDAPG)

O Arco de Ponta Grossa (APG), na região sudeste do Brasil, é palco de um enxame de diques associado à Província Ígnea Paraná-Etendeka (PIPE), uma grande província magmática, com derrames basálticos de volume maior que 600.000 km³ (FRANK, GOMES e FORMOSO, 2009). Tal como mostra a Figura 4.1, o APG apresenta soerguimento NW que se adentra pela Bacia do Paraná, expondo sedimentos mais antigos em seus flancos. Seu limite ao Norte é dado pelo alinhamento Guapiara e, ao Sul, pelo alinhamento Rio Piquiri (FERREIRA, 1982). O

APG é de origem paleozóica, com indícios de atividade ao menos desde o Devoniano, atingindo sua configuração atual entre o Jurássico e Cretáceo (ALMEIDA, 1986). Fraturas e falhas de distensão de alto ângulo, transversais às estruturas NE do embasamento, permitiram a colocação do magma e formação do enxame. Os diques se estendem desde a região costeira e adentram a Bacia do Paraná, cortando rochas do embasamento cristalino Pré-Cambriano, rochas sedimentares Paleozoicas e Mesozoicas e em alguns casos os derrames basálticos do Serra Geral (PICCIRILLO *et al.*, 1990).

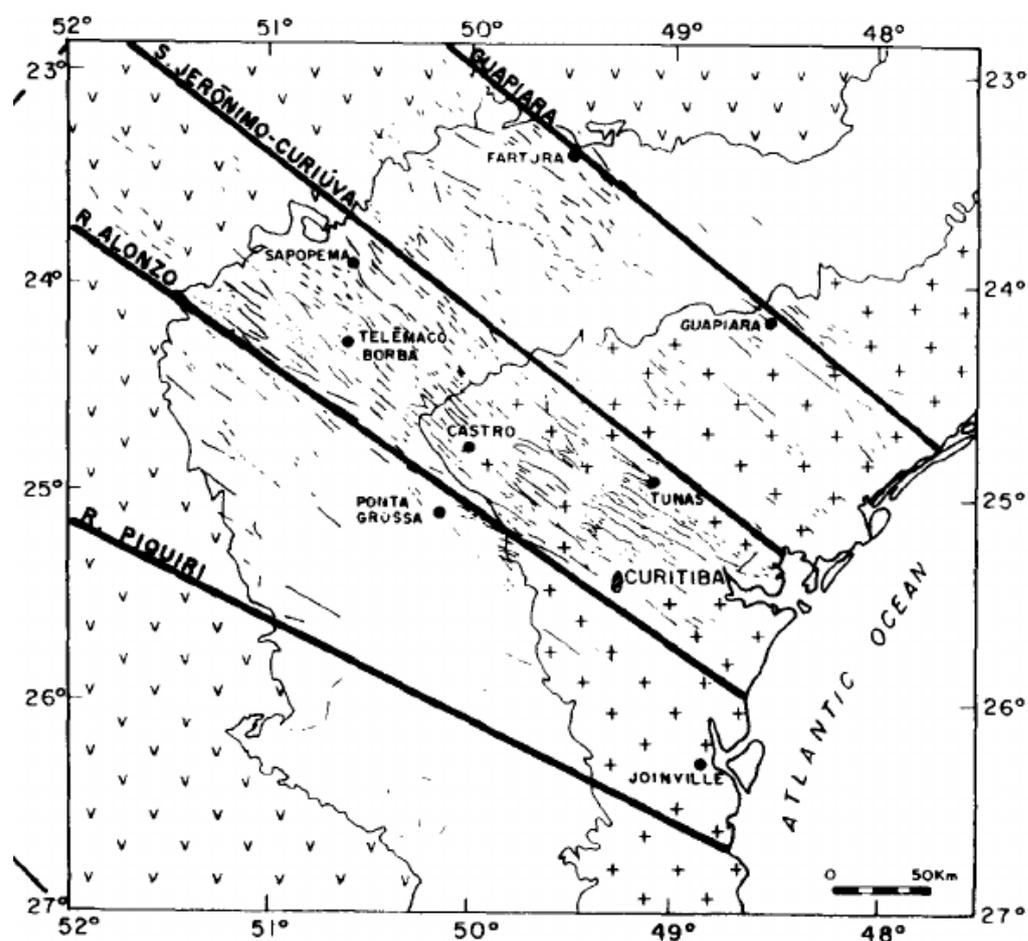


Figura 4.1: Arco de Ponta Grossa. Adaptado de RAPOSO e ERNESTO (1995).

Os diques do EDAPG chegam a ter extensão de dezenas de quilômetros e espessura de até centenas de metros, sendo em sua maioria subparalelos ao eixo do arco. A densidade de diques ao longo do APG varia entre 1,5 diques.km⁻¹ e 4 diques.km⁻¹, sendo boa parte deles determinados por dados aeromagnéticos ou por técnicas de sensoriamento remoto (RAPOSO, 1995).

Análises geoquímicas de unidades do EDAPG indicam que cerca de 87% dos diques possuem composição básica, semelhante aos derrames ATi-N (grupo de rochas da sub-província Norte da Bacia do Paraná com teor de $\text{TiO}_2 > 2\%$) e BTi-S (grupo de rochas da sub-província Sul da Bacia do Paraná com teor de $\text{TiO}_2 \leq 2\%$) da Formação Serra Geral; o restante (13%) com composição intermediária ou ácida, essa última do tipo Chapecó (MARQUES e ERNESTO, 2004). Datações $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ indicam intrusões entre $133,9 \pm 0,2$ e $133,4 \pm 0,2$ Ma (ALMEIDA *et al.*, 2018), que compreendem período com muitas reversões do Campo Geomagnético (Figura 4.2). De um modo geral as datações expressam corpos aflorantes, o que pode definir uma faixa não muito representativa para corpos com expressão geofísica no substrato.

Análises estruturais e paleomagnéticas sugerem ao menos nove episódios intrusivos para diques do EDAPG (RAPOSO, 1995). A intrusão dos diques resultou em uma expansão crustal de cerca de 3%, equivalente a 3 km (PINESE, 1989). Desvios nas direções paleomagnéticas de diques do APG amostrados, sugerem que eles são mais jovens que os derrames do Norte da PIPE (RENNE *et al.*, 1996), podendo indicar mudanças de centros de alimentação de magma ao longo do enxame apesar da continuidade dos diques abaixo da capa basáltica. Estudos locais de anisotropia de susceptibilidade magnética amostraram 95 diques do APG e reconheceram fluxo horizontal em 58 % deles, tendo também encontrado unidades com fluxo verticalizado (RAPOSO e ERNESTO, 1995). Em geral, fluxos sub-horizontais são interpretados como deslocamento lateral de magma a partir de fontes alimentadoras, enquanto fluxo verticalizado indica proximidade, estando os centros de alimentação em níveis mais profundos (ERNST e BARAGAR, 1992).

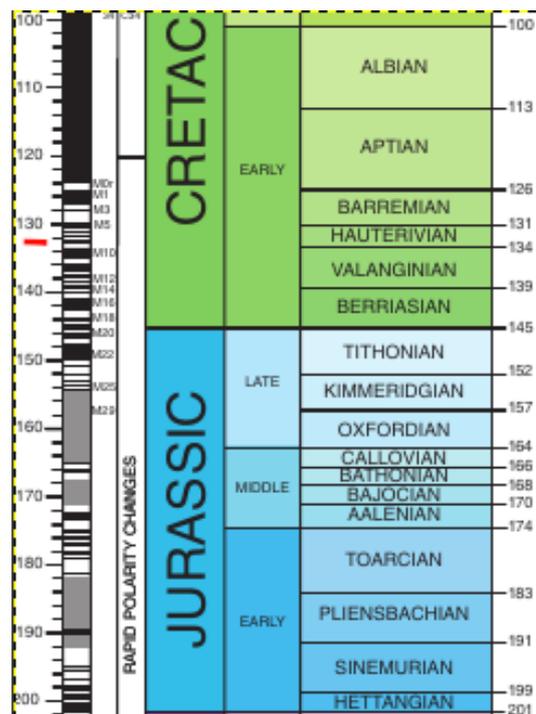


Figura 4.2: Escala de tempo geológico. Adaptada de WALKER et al. (2012). Linha vermelha indicando os limites de idade para o EDAPG tal qual RENNE et al. (1996).

4.2 Base de dados aeromagnéticos

O projeto aerogeofísico 1095 Paraná - Santa Catarina cobre a porção costeira do sul do Brasil, desde o sul do estado de São Paulo até o sul de Santa Catarina. Em particular, recobre a parte do EDAPG que ocorre no embasamento cristalino, no Estado do Paraná. O projeto Paraná-Santa Catarina foi contratado pelo Serviço Geológico Brasileiro (CPRM) no ano de 2006, como parte do Programa Geologia do Brasil (PGB) que visou aprimorar o conhecimento geológico e hidrogeológico do território brasileiro.

Esse projeto abrangeu uma área de 65.562 km², totalizando 140.397,98 km de linhas de voo com perfis de alta resolução. As linhas de voo e controle foram espaçadas de 500 e 10.000 m, com direções N-S e E-W respectivamente. A altitude de voo foi de 100 m relativa à superfície do terreno. Foram utilizadas três aeronaves, duas Piper Navajo modelo PA31 e uma REIMS 406 modelo CARAVAN II, cujas velocidades aproximadas de voo foram respectivamente 284 km.h⁻¹, 276 km.h⁻¹ e 269 km.h⁻¹. As aeronaves foram equipadas com magnetômetros de vapor de césio modelo Scintrex CS-3 com resolução de 0,001 nT montados na cauda (tipo *stinger*). As leituras foram tomadas a cada 0,1 s, o que equivale a medidas a cada 7,5 ~ 7,8 m dependendo da

velocidade da aeronave. Os dados em formato XYZ, juntamente com relatório sobre o projeto, podem ser obtidos no site geosgb.cprm.gov.br/downloads.

Uma janela de dados centrada a NW do EDAPG, com feições lineares marcantes, foi extraída da base de dados e processada no GEOSOFT conforme seção 2.2.

4.3 Base de dados de poços

A base de dados de poços utilizada neste trabalho faz parte do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS) disponibilizada pela CPRM na forma de arquivo em formato .gdb, passível de ser visualizada com programas do tipo GIS. O arquivo .gdb pertence ao projeto “Mapa Hidrogeológico do Paraná” (SOUZA e FRANZINI, 2015), mais recentemente atualizado pela CPRM no projeto “Carta das Águas Subterrâneas do Paraná” que inclui a base de dados do projeto anterior. Os dados em formato GIS foram processados com o programa Qgis na versão 3.2.3-Bonn, de código aberto (*Open Source*), passível de download em http://www.qgis.org/pt_BR/site/.

Dos poços do SIAGAS situados na área de estudo (25) selecionamos poços com capacidade específica (Q_s) maior que zero (23). A Figura 4.3 mostra a janela de estudo após a seleção de poços produtivos, no caso considerados como sendo aqueles com capacidade específica não-nula.

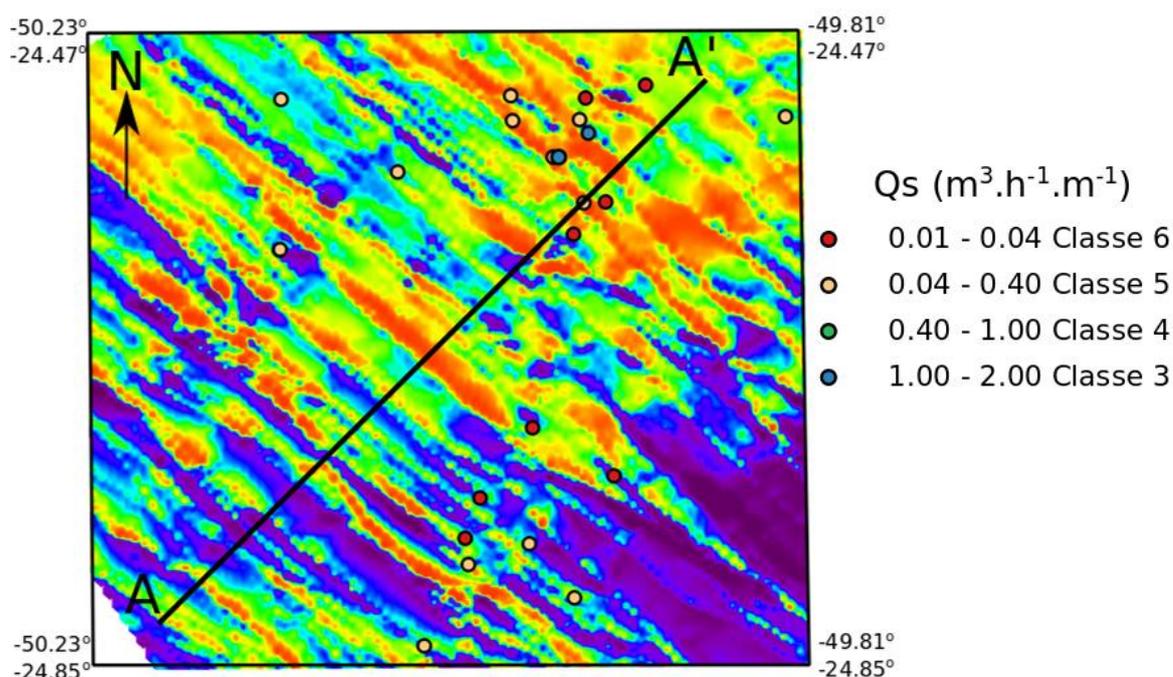


Figura 4.3: Distribuição de poços com capacidade específica não-nula sobre mapa de anomalia magnética de campo total (ACT). Capacidade específica (Q_s) segundo classificação de 0.01 a 2 $m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$. A distribuição de classes de 3 a 6 tal como usada pela CPRM (DINIZ et al., 2014).

4.4 Contexto geológico e hidrogeológico do perfil A-A'

A aplicação do PYDYKE em dados reais se deu através da retirada de um perfil A-A', que intercepta parte dos enxames do EDAPG. A região é formada por terreno cristalino com alguma cobertura sedimentar, tendo sido escolhida por apresentar fontes com características predominantemente 2D e, conforme observado na Figura 4.3, possui cobertura de poços com dados hidrológicos registrados. Diques podem afetar significativamente o fluxo da água subterrânea em diferentes cenários geológicos. Quando hospedado em rochas mais permeáveis (arenitos, por exemplo), podem compartimentalizar aquíferos (ROSA FILHO *et al.*, 2003) ou mesmo conectar/redirecionar o fluxo subterrâneo de diferentes falhas e fraturas ao longo do strike de diques que as interceptem (BABIKER e GUDMUNDSSON, 2004). Em condições de campo, é comumente observado fraturamento dos diques em forma de juntas colunares perpendiculares às suas bordas. Isso ocorre por conta da contração em função do resfriamento (EVERDINGEN, 1995) e acarreta aumento da permeabilidade relativa. Logo, nos casos em que a permeabilidade relativa dos diques seja maior que a da rocha encaixante, eles poderiam funcionar como facilitadores de fluxo de água e ter papel importante na configuração de aquífero em rocha cristalina do tipo fissural (ou fraturado). A Figura 4.4 mostra a geologia de superfície para a janela de estudos, posicionamento do perfil e poços.

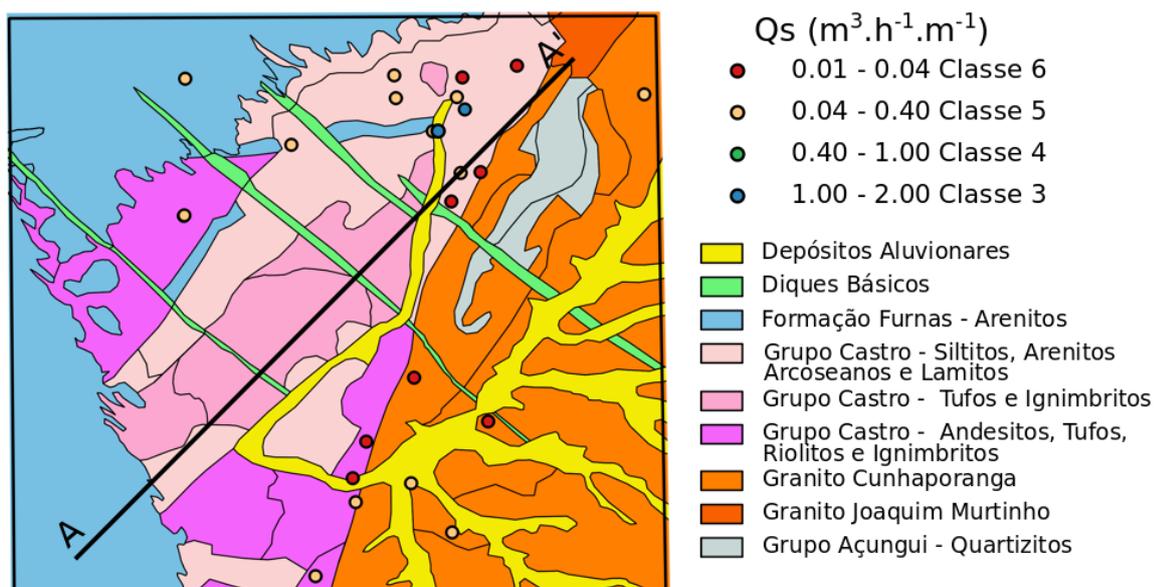


Figura 4.4: Geologia para a janela de estudos. Poços com capacidade específica Q_s classificados segundo DINIZ *et al.* (2014). Principais litologias para a região segundo arquivo .gdb fornecido pela CPRM.

Um ponto muito importante quando se avalia a produtividade de poços é analisar a influência da geologia local, visto que dentre outros fatores, a existência de litologias com porosidade do tipo granular (sedimentos e metassedimentos, por exemplo) pode ser fundamental. A Figura 4.5 mostra que os poços situados em rochas cristalinas de alto grau metamórfico (CA), compostas por andesitos, tufos, riolitos e ignimbritos, são mais produtivos que os poços situados em rochas cristalinas de baixo grau metamórfico (CB) na parte sudeste da área. Nas meta-vulcânicas do grupo CA a capacidade específica média (12 poços) é de $0,35 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$. Para o grupo CB, o valor médio (8 poços) é cinco vezes menor: $0,07 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$.

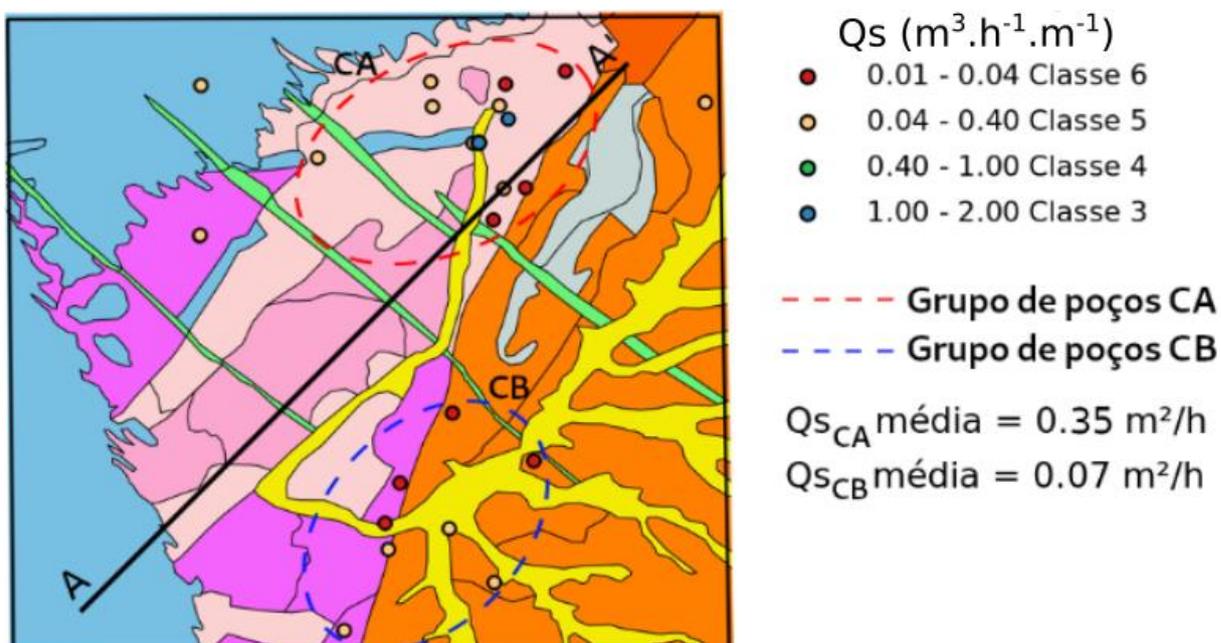


Figura 4.5: Seleção de poços para cálculo de capacidade específica média. Grupo de poços CA (tracejado vermelho) cristalino de alto grau metamórfico, capacidade específica média ($Q_{s_{CA}}$) de $0,35 \pm 0,51 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$. Grupo de poços CB (tracejado azul) cristalino baixo grau metamórfico, específica média ($Q_{s_{CB}}$) de $0,07 \pm 0,06 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$.

4.5 Inversão de Dados do Perfil A-A'

A Figura 4.6 mostra os campos magnéticos ao longo do perfil A-A'. Ao se analisar os quase 49 km do perfil A-A' e realizar a contagem dos picos da ICVA, observa-se que se está em uma situação similar aos modelos sintéticos de alta densidade abordados no capítulo de simulação numérica. Trata-se de um padrão de anomalia de campo total bastante complexo, com diversas nuances de amplitude e comprimento de onda. Logo, por conta dos padrões interferentes gerados pelas fontes e consequente ambiguidade, não se espera obter uma solução única, mas sim soluções alternativas similares que permitam estimar parâmetros médios segundo a análise de grupos.

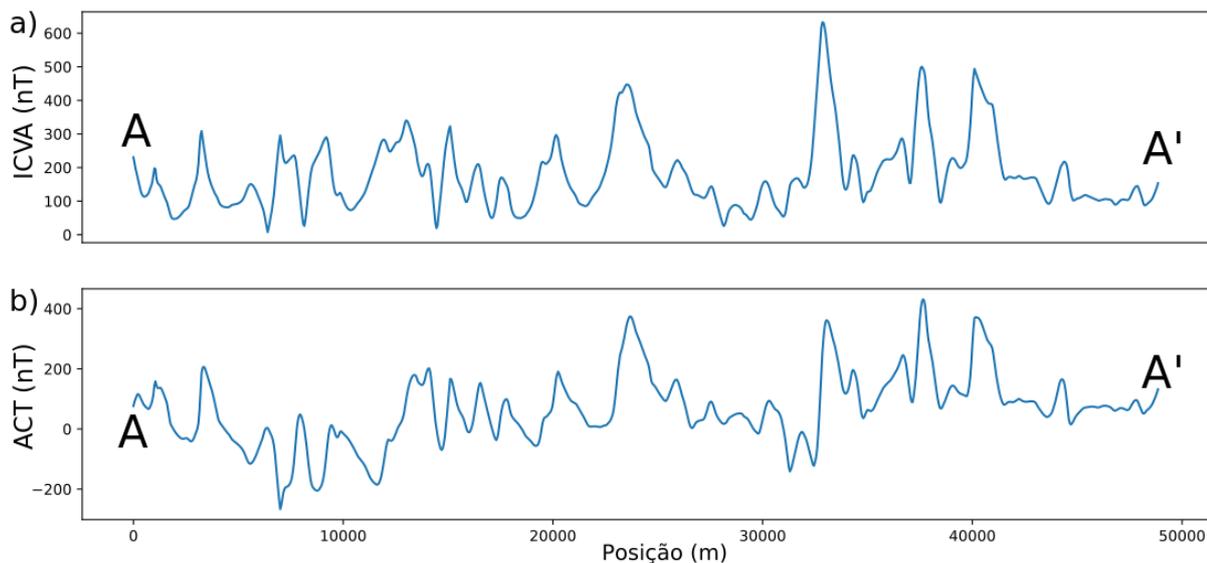


Figura 4.6: Campos magnéticos para o perfil A-A'. a) Intensidade do campo vetorial anômalo; b) Anomalia de campo total.

São apresentadas quatro soluções alternativas, obtidas executando o programa PYDYKE quatro vezes. Cada execução do programa avaliou um mínimo de 100 modelos iniciais aleatórios (já que alguns geram soluções reprovadas nos critérios de aceitabilidade e novos modelos iniciais aleatórios são gerados), que alimentaram o algoritmo de minimização. Os valores de ε , ε_2 e R^2 , que fazem parte do critério de aceitabilidade, foram definidos de forma empírica em execuções prévias do programa (Etapa-1 $\varepsilon < 800$, Etapa-2 $\varepsilon_2 < 1200$ e ao final da inversão $R^2 > 0,7$). O algoritmo de minimização DE não conseguiu recuperar as principais feições da ACT e da ICVA, levando cerca de 3 horas para fornecer um resultado, ao passo que com fbugs as soluções foram obtidas em uma média de 3,8 minutos, recuperando as principais feições do dados real. O refinamento por inclusão de novos prismas não melhorou o ajuste, mantendo-se então as soluções originalmente obtidas.

Os valores de $Q(\hat{\mathbf{p}})$ e $U(\hat{\mathbf{p}})$ para as Etapas 1, 2 e R^2 das soluções obtidas na inversão do perfil A-A', são apresentados na tabela Tabela 4-1. Os limites para o parâmetro x_0 de cada prisma definidos por picagem da curva de ICVA se encontram no Anexo I.

Tabela 4-1: Valores de ajuste obtidos na inversão do perfil A-A'.

	$Q(\hat{\mathbf{p}})$ (Etapa-1)	$U(\hat{\mathbf{p}})$ (Etapa-2)	R^2 (ACT;ICVA)
inv1	787	1118	0,92 ; 0,79
inv2	798	1181	0,91 ; 0,77
inv3	795	1195	0,91 ; 0,77
inv4	799	1130	0,91 ; 0,78

As soluções obtidas na inversão do perfil A-A' são apresentadas na Figura 4.7. Todas soluções contem 51 prismas (204 parâmetros) e recuperam as principais feições da ACT e ICVA. Nota-se a presença de prismas com polaridades normais e reversas em geral concordantes nas quatro soluções. Observa-se grupos de diques rasos e mais profundos, bem como um grupo em profundidade intermediária. Ao analisar as quatro soluções (inv1 a inv4) observa-se alguns prismas aparecem da mesma forma em todos os casos. Outros porém, principalmente em trechos com maior adensamento de prismas, os parâmetros de profundidade e polarização (normal ou reverso) variam. A conformação geral das soluções, no entanto, parece similar. Observa-se níveis de profundidade maiores ao centro e níveis mais rasos próximos a 8 e 40 km. Nos dez quilômetros iniciais e finais do perfil, existem grupamentos com densidade em torno de $1,7 \sim 1,9$ prismas.km⁻¹, enquanto, nas partes mais centralizadas, a densidade é de cerca de $0,9$ prismas.km⁻¹. A densidade média de fontes para o perfil é de $1,0$ prisma.km⁻¹.

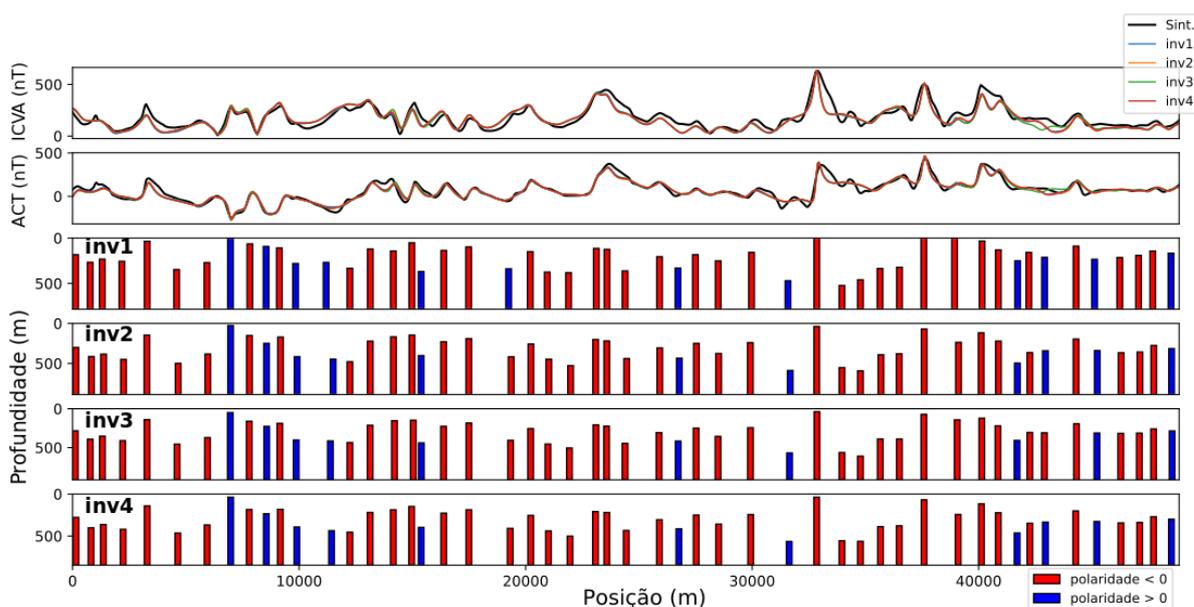


Figura 4.7: Soluções obtidas com o módulo de inversão do PyDYKE para dados reais do perfil A-A'. No topo, o sinal referente ao perfil A-A' é sobreposto aos ajustes obtidos para quatro inversões (inv1, inv2, inv3 e inv4). A disposição de prismas obtidos para cada inversão é apresentada nas subfiguras, inv1 à inv4.

4.6 Análise de Grupo das soluções do perfil A-A'

A definição do parâmetro k para a inversão do perfil A-A' se dá pela análise da Figura 4.8. Nela é possível observar que a derivada da grandeza $V(\mathbf{D})$, equação (27), em função de k tende a se estabilizar em um patamar para $k \geq 3$. Esse gráfico mostra,

portanto, que com um número de centroides igual a 3 (três grupos), pode-se aproximar todos os parâmetros dos modelos obtidos com a inversão de dados.

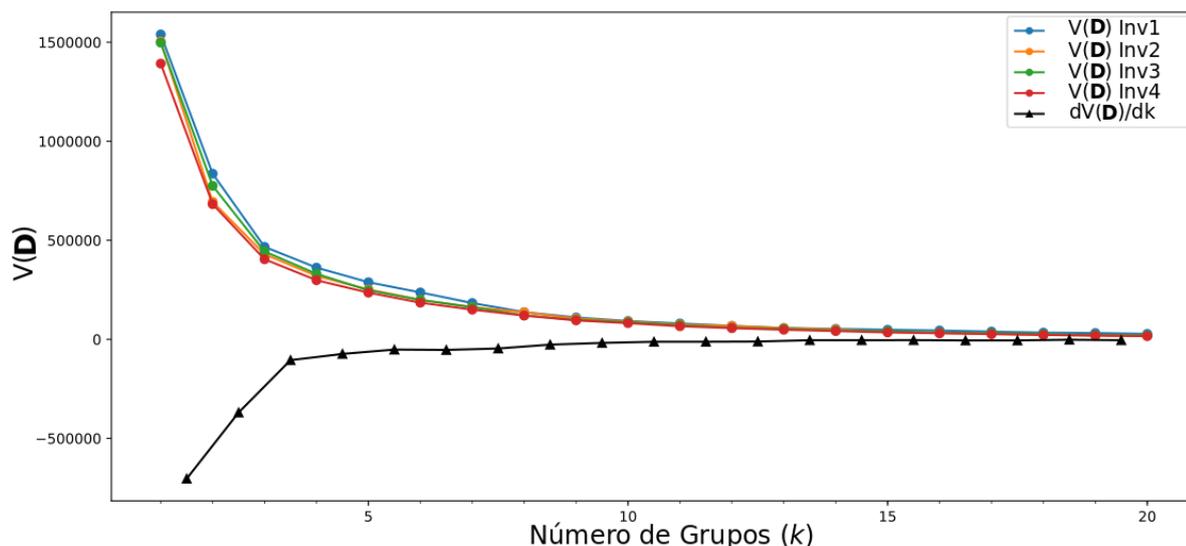


Figura 4.8: Definição do número de grupos (k) para o perfil A-A'. Linhas coloridas: $V(\mathbf{D})$, equação (27), para modelo verdadeiro em função de k . Linha preta: derivada de $V(\mathbf{D})$ em relação a k .

Os resultados do módulo de *cluster analysis* do PyDYKE para o perfil A-A' é mostrado a seguir. A Figura 4.9 mostra os centroides projetados no plano $Me \times z_0$ dos parâmetros. Já a Figura 4.10, mostra os centroides dos grupos projetados no plano $Me \times inc$.

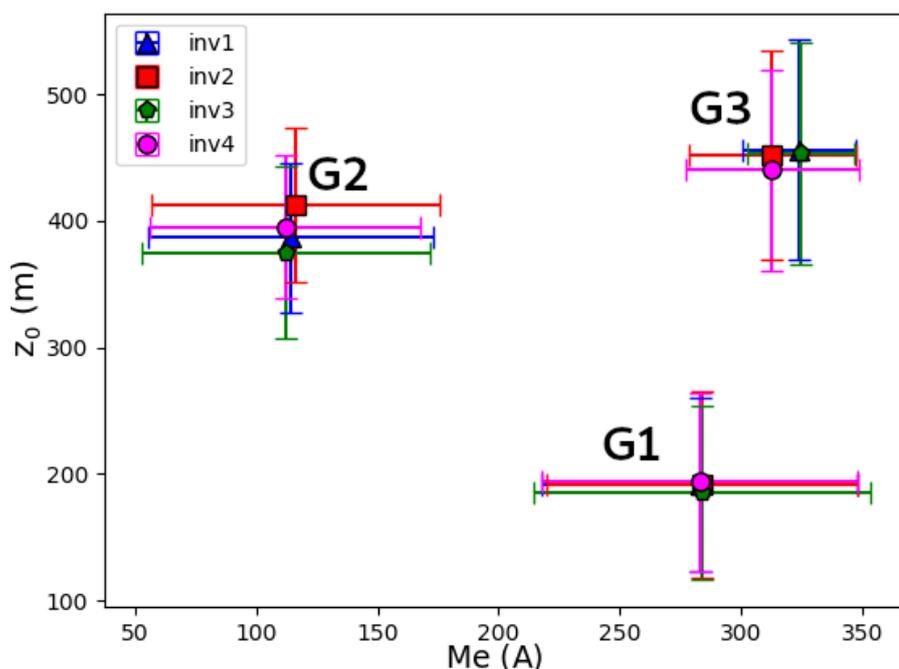


Figura 4.9: Análise *k*-means para o perfil A-A' para os parâmetros Me e z_0 ; centroides correspondentes às soluções alternativas (inv1 a inv4) obtidas com a inversão dos dados reais. Barras de erro calculadas a partir dos valores máximos e mínimos de cada solução, considerando os elementos do respectivo grupo. Grupos marcados (G1 a G3).

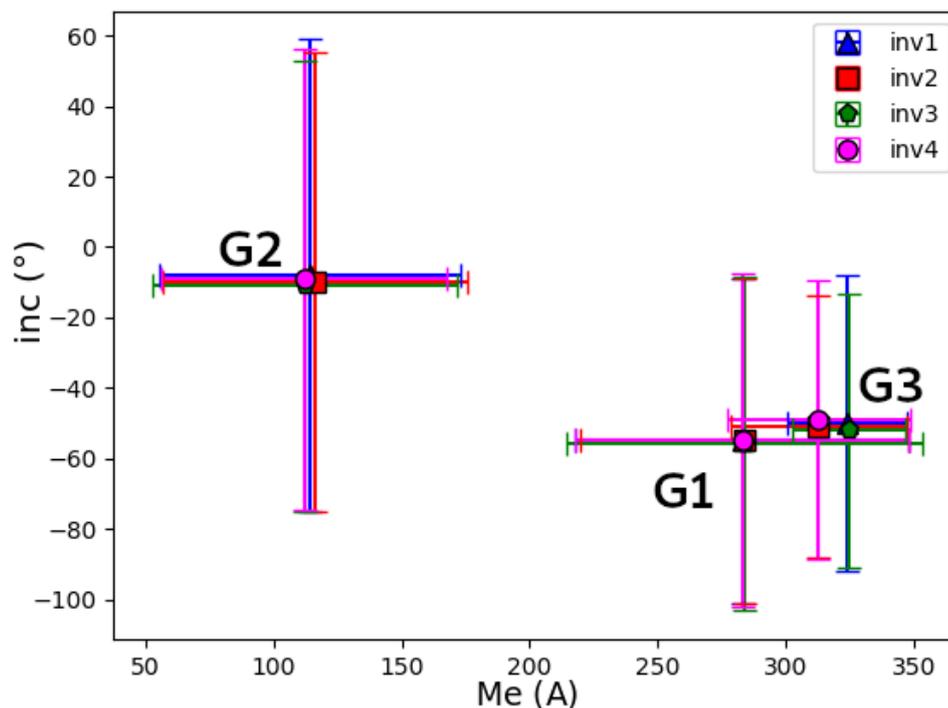


Figura 4.10: Análise *k-means* para o perfil A-A' para os parâmetros *Me* e *inc*; centroides correspondentes às soluções alternativas (*inv1* a *inv4*) obtidas com a inversão dos dados reais. Barras de erro calculadas a partir dos valores máximos e mínimos de cada solução, considerando os elementos do respectivo grupo. Grupos marcados (G1 a G3).

4.7 Análise dos resultados: Implicações geológicas

Com base nesses resultados, podemos inferir que a inversão do perfil A-A', que praticamente representa uma transecta ao EDAPG, identifica três grupos de diques cujos parâmetros médios são apresentados na Tabela 4-2. Por se tratar de grupos com diferenças expressivas em seus parâmetros constitutivos (profundidade do topo, magnetização-espessura e inclinação da magnetização), pode-se assumir como razoável que tais grupos possam representar diferentes episódios de alocação de diques. Nesse sentido, pelo menos três episódios distintos seriam identificados pelos dados aeromagnéticos. Esse resultado é consistente com RAPOSO (1995) que, em geologia de campo, identifica pelo menos nove gerações incluindo aí, entretanto, diques com orientação NW. Porém, na região de Telêmaco – Borba (uma das estudadas no trabalho citado e a mais próxima à nossa janela de estudo), verificam-se apenas três gerações. Essas três gerações são demarcadas por dois grupamentos com polaridade normal e um com polaridade reversa. Foram utilizadas as médias das intensidades de magnetizações remanescentes características de cada sítio para realizar os agrupamentos. Os resultados da análise *k-means* entretanto, infere as polaridades da inclinação da magnetização com base na magnetização total. Isso

pode estar relacionado ao fato do centroide do grupo $G2$ ter a inclinação da magnetização que se aproxima de zero, ao invés de apresentar polaridade reversa. Além disso, a baixa sensibilidade de inc , conforme comentado na seção 3.3, e a possibilidade de a inversão estar avaliando fontes não aflorantes e, portanto, diferentes das avaliadas por RAPOSO (1995), são questões que também poderiam estar relacionadas à diferença observada.

Tabela 4-2: Parâmetros médios para as gerações de diques obtidos com a inversão do perfil A-A'.

	Me (A)	z_0 (m)	$inc(^{\circ})$
$G1$	$283,5 \pm 0,6$	$190,8 \pm 3,9$	$-54,3 \pm 1,5$
$G2$	$113,5 \pm 1,9$	$392,5 \pm 15,9$	$-9,5 \pm 1,3$
$G3$	$318,8 \pm 6,7$	$450,3 \pm 7,0$	$-50,5 \pm 1,3$

Com base nos centroides (valores médios para os parâmetros de cada grupo) da Tabela 4-2, pode-se realizar algumas inferências. O grupo $G1$, por possuir uma profundidade média menor que os demais, em tese tem mais chances de conter unidades aflorantes e portanto, passíveis de serem amostradas ou mesmo de sofrer efeitos de intemperismo.

Outra análise possível, seria considerar que ao longo da colocação das gerações de diques, o estresse na crosta teria valores médios similares. Isso implicaria que fraturas e falhas onde os diques se aloariam, teriam espessuras similares. Essa premissa se baseia no fato de que, 70 % dos diques amostrados no APG pelo trabalho de RAPOSO e ERNESTO (1995) possuem espessura entre 25 e 100 m, sendo a média desses de 59 m e o desvio padrão de 27 m, valores comparativamente pequenos em relação aos mais de 48 quilômetros de extensão do perfil A-A'. Considerando então espessuras similares para todas as gerações, as razões entre Me de grupos distintos poderiam indicar variação na intensidade de magnetização. As razões de Me entre $G1$, $G2$ e $G3$ são: $G3/G1 = 1,1$, $G1/G2 = 2,5$ e $G3/G2 = 2,8$. Sob tal premissa, as magnetizações para os grupos $G1$ a $G3$ poderiam ser organizadas como $M_3 > M_1 > M_2$ ou mesmo como $M_3 \approx M_1 > M_2$. Os grupos $G3$ e $G1$ correspondem a 80% das fontes obtidas pela inversão do perfil A-A'. Em tese, maiores magnetizações referem-se a maior quantidade de minerais máficos, sendo então possível inferir que essas fontes ($G3$ e $G1$) referem-se a diques mais básicos. O grupo $G2$ corresponde a 20% das fontes obtidas pela inversão. Sendo as unidades de $G2$ menos magnéticas, pode-se inferir uma menor quantidade de minerais máficos, referindo-se então a diques

mais ácidos. Conforme já citado, o trabalho de MARQUES e ERNESTO (2004) com base em amostragens de diques aflorantes, indica que 87% dos diques do EDAPG possuem composição básica, enquanto 13 % possuem composições intermediárias e ácidas. Uma vez que rochas máficas tendem a ser mais fortemente intemperizadas que rochas félsicas, seria possível inferir que a susceptibilidade das gerações ao intemperismo obedeceria a ordem $G3 > G1 > G2$ ou mesmo $G3 \approx G1 > G2$.

Considerando-se o arranjo de magnetizações $M_3 \approx M_1 > M_2$ e Q entre 1 e 3 para o caso de magnetização viscosa, com valores médios de intensidade de magnetização previstos para o EDAPG ($0,68 \text{ A.m}^{-1}$), podem ser calculados valores estimados para a expansão crustal (exp_c) em porcentagem. A Tabela 4-3 organiza os dados, onde as proporções entre as intensidades de magnetização para $G3$, $G1$ e $G2$ são aproximadas para 1:1:1/3, e mostra os valores totais de espessura para os diques. Os valores máximo e mínimo inferidos para a expansão crustal ao longo do perfil de 22,8 e 12,0 %, assim como a porcentagem por geração de diques é mostrada na Tabela 4-4. Esses valores são compatíveis com os trabalhos de FERREIRA *et al.* (1989) que calcula uma expansão crustal mínima de 18 % para a região do Alinhamento Guapiara e de PORTELA FILHO (2003), cuja expansão crustal média calculada para a região do Alinhamento do Rio Alonzo foi de 12%.

Tabela 4-3: Valores para cálculo da expansão crustal ao longo do perfil A-A'. Grupos inferidos pela análise de grupos (G1 a G3), produto entre a intensidade de magnetização e espessura (Me), número de unidades para cada grupo (n_unid), somatório de Me para cada grupo ($\sum Me$), somatório de espessuras inferidas por grupo baseado no fator de Koenigsberger entre 1 e 3 para intensidade de magnetização média do EDAPG dada por $0,68 \text{ A.m}^{-1}$ ($\sum e$), espessura total do conjunto de diques inferidos com base nos valores de Q (Total). Comprimento do perfil A-A' entre o primeiro e último dique é de 48361 m.

Grupo	Me (A)	n_unid	$\sum Me$ (A)	$\sum e$ (Q = 1) (m);	$\sum e$ (Q = 2) (m)	$\sum e$ (Q = 3) (m)
G1	283,5	23	6521	4658	3260	2415
G2	113,5	10	1135	2270	1621	1261
G3	318,8	18	5738	4099	2869	2125
			Total (m)	11026	7751	5801

Tabela 4-4: Valores de expansão crustal calculados com base no modelo obtido pela inversão do perfil A-A' com o PyDYKE. Expansão crustal por grupos (exp_{G1} a exp_{G3}), expansão crustal total (exp_c) para o perfil A-A' com comprimento de 48361 m entre o primeiro e último diques.

exp_{G1} (%)	9,6	6,7	5,0
exp_{G2} (%)	4,7	3,3	2,6
exp_{G3} (%)	8,5	5,9	4,4
exp_c (%)	22,8	16,0	12,0

4.8 Análise dos resultados: implicações hidrogeológicas

Para analisar os resultados da inversão com a produtividade de poços para a captação de água subterrâneas, os poços disponíveis foram plotados sobre o perfil A-A'. As posições dos poços foram projetadas perpendicularmente ao perfil, uma vez que os poços não recobrem a área de forma regular, conforme já mostrado na Figura 4.3. Quando necessário, os poços tiveram seu posicionamento sobre o perfil corrigido, de forma que suas projeções se mantivessem sobre anomalias que fossem continuidade das anomalias de onde foram originalmente alocados.

A Figura 4.11, mostra a distribuição de prismas conforme sua classificação em grupos e os valores de capacidade específica para os poços projetados sobre o perfil A-A'. Essa figura mostra resultados para a solução inv1, mas, em termos de classificação em grupos, fornece resultado equivalente às demais soluções (inv2, inv3 e inv4).

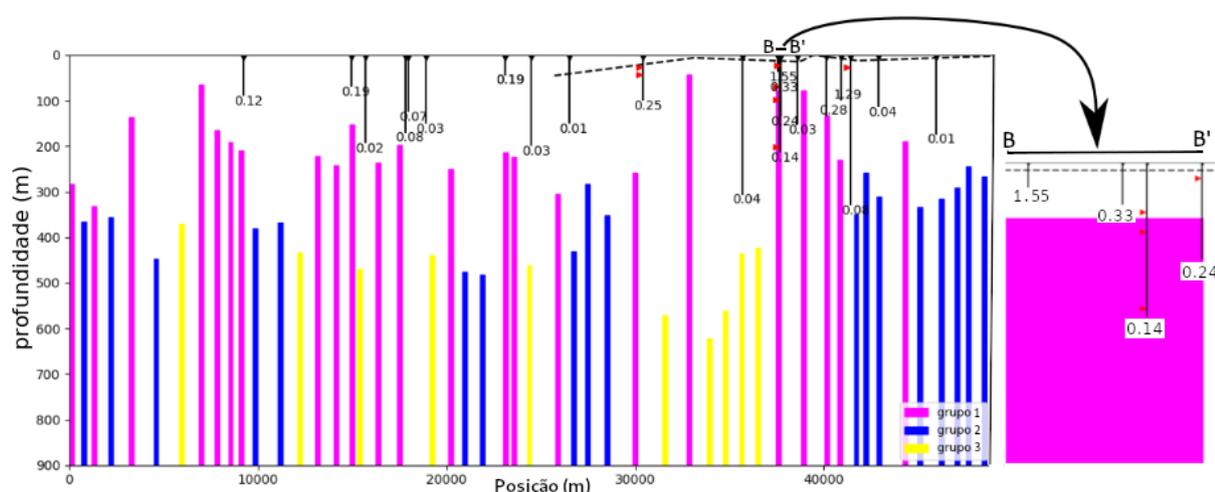


Figura 4.11: Projeção de poços ao longo do perfil A-A' e valores de capacidade específica (Q_s) em $m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$. Prismas classificados segundo a análise k-means da solução inv1: G1 (magenta), G2 (azul), G3 (amarelo). Profundidade do manto de alteração (linha tracejada) e pontos de entrada d'água (triângulos vermelhos) segundo a base de dados do SIAGAS. Profundidade dos poços e dos diques representadas na mesma escala.

Analisando os dados de poços em conjunto com a distribuição de prismas, observa-se que os poços mais produtivos se associam às unidades do grupo 1. Também pode-se inferir que os poços menos produtivos estão associados às unidades do grupo 2. Já o grupo 3, parece estar associado a poços com valores de Q_s intermediários entre os grupos 1 e 2. Na mesma figura é possível visualizar a espessura do manto de alteração em tracejado, com base nas informações que alguns poços possuem na base de dados. Nesse caso, o manto de alteração não parece ter uma relação imediata com a produtividade dos poços. As entradas de água são demarcadas por triângulos vermelhos para poços que possuíam essa informação. Observa-se na subfigura (B-B') da Figura 4.11, que existem entradas d'água em níveis compatíveis com diques inferidos pelo grupo 1. O conjunto de informações sugere que os diques possam estar agindo como condutores de fluxo de água subterrânea no caso dessa região de terreno cristalino. Hipóteses comentadas no subcapítulo 4.4, de que diques possam ser mais fraturados que seu entorno ou estarem redirecionando o fluxo relacionado a faturamento/falhamento presente na encaixante, parecem se aplicar na análise desse perfil.

Uma análise dos valores de Q_s em função da profundidade do topo das fontes inferidas pela inversão é apresentada na Figura 4.12. Esta figura sugere que a capacidade específica é inversamente proporcional à profundidade do topo das fontes, sendo essa constatação mais facilmente observada na figura Figura 4.12.b uma vez que a normalização dos valores na escala decibel normaliza os valores presentes na figura Figura 4.12.a.

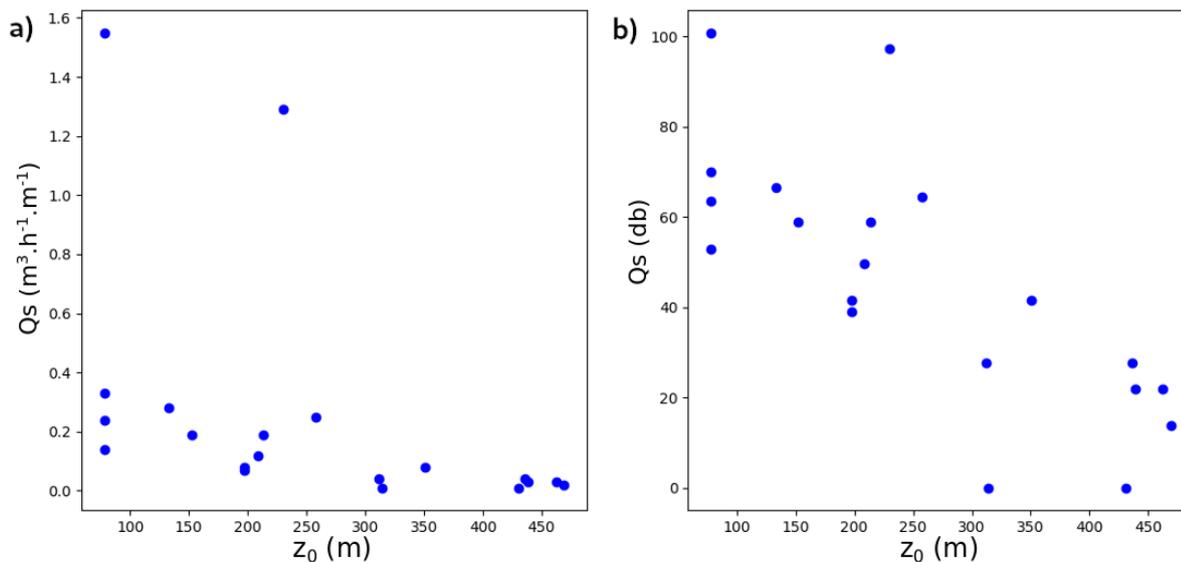


Figura 4.12: Comparação entre a profundidade do topo das fontes inferidas por inversão e a capacidade específica (Q_s). a) $Z_0 \times Q_s$ com escala linear. b) $Z_0 \times Q_s$ com escala decibel.

Com intuito de extrapolar a continuidade dos diques (e com isso inferir áreas favoráveis para a perfuração de poços, georeferenciamos a posição do centro dos prismas do grupo 1 e plotamos sobre a janela de interesse. Por se tratar de uma região de terreno cristalino, que hospeda diques com grande extensão longitudinal, acreditamos que os resultados obtidos possam ser extrapolados. Como critério de extrapolação, utilizamos a Amplitude do Sinal Analítico (ASA), uma vez que essa grandeza é muito efetiva na determinação da continuidade de fontes 2D e delimitação de estruturas (NABIGHIAN, 1972). Primeiramente, verifica-se que, embora a ASA seja uma informação independente, não utilizada no PyDYKE, a disposição de prismas resultante da inversão apresenta boa correlação de posicionamento com o mapa de ASA. Fontes do grupo 1 estão associadas às anomalias com maiores valores da ASA no mapa. Fontes do grupo 3 estão associadas a anomalias de valores intermediários, enquanto o grupo 2 se associa aos menores valores da ASA.

Uma prática comum nas geociências, tem sido utilizar a Amplitude do Sinal Analítico para delimitar fontes. Porém, utiliza-se os valores de alto da ASA para essa função, considerando-se os baixos como representativos de ausência de fontes. Tal abordagem, não é a mais adequada para região de estudo, pois diques do grupo 2 estão em baixos da ASA que normalmente seriam considerados sem fontes desse tipo. Nossos resultados sugerem que nessas regiões, tanto a ACT quanto a ICVA e ASA, podem ser explicados por fontes com profundidades e produtos Me tal qual apresentado no grupo 2.

A Figura 4.13.a apresenta uma extrapolação dos resultados projetando os prismas da Figura 4.11 na janela de estudos. A distribuição de prismas foi utilizada para definir a espessura das faixas de extrapolação. A Figura 4.13.b traz em destaque as faixas associadas aos diques do grupo 1, uma vez que esse grupo apresenta relação espacial com poços mais produtivos.

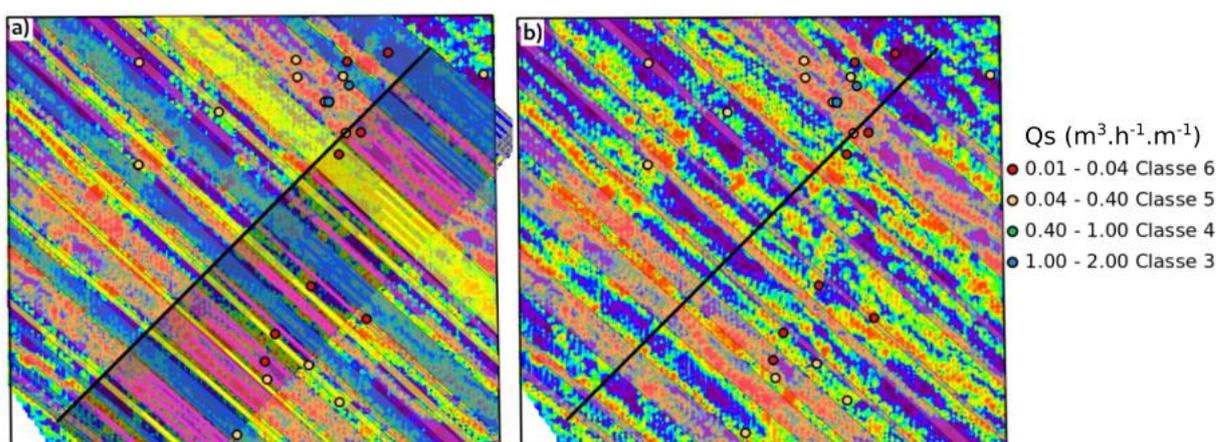


Figura 4.13: Continuidade de diques segundo análise de grupos, com base nos lineamentos da Amplitude do Sinal Analítico. a) Diques do grupo 1 (magenta), grupo 2 (azul) e grupo 3 (amarelo). b) Destaque para diques do grupo 1, associados a poços com maior capacidade específica.

As faixas são uma primeira aproximação para zonas mais promissoras, visto que os diques poderiam conter apófises sem expressão magnética identificável nos dados aeromagnéticos, mas que poderiam contribuir para maiores valores de capacidade específica. Porém, na Figura 4.13.b as faixas associadas aos lineamentos do grupo 1 contém baixos no mapa de ASA que, para pontos ao longo do perfil, são associados a diques do grupo 2 (sem poços produtivos). Desse modo, uma extrapolação mais conservadora dos resultados se limitaria a seguir os lineamentos magnéticos associados ao grupo 1 conforme a Figura 4.14. Nesse tipo de extrapolação é possível observar que os poços de classe 6 (menores valores de Q_s) não ocorrem ao longo desses lineamentos.

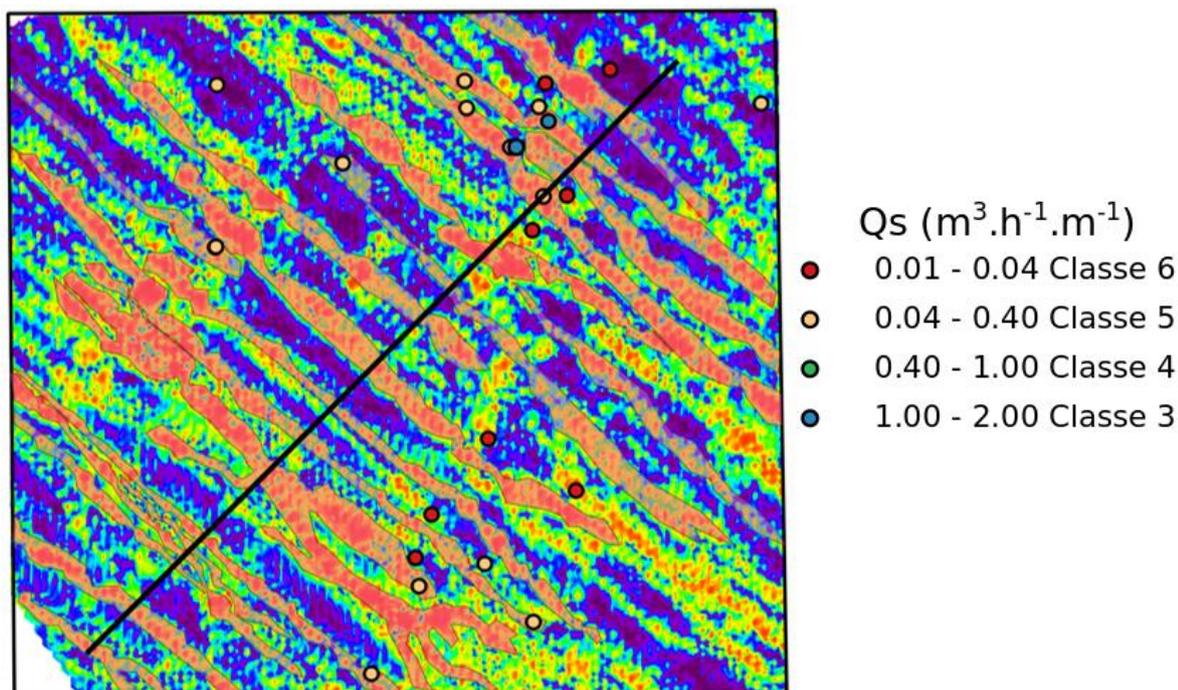


Figura 4.14: Extrapolação dos resultados do PyDYKE para o grupo 1 com base nos lineamentos magnéticos presente na ASA.

Conforme visto na Figura 4.5, os poços no cristalino de alto grau metamórfico (CA) são mais produtivos do que os poços no cristalino de baixo grau metamórfico (CB). Porém, para investigar se os diques afetam a produtividade, a Figura 4.15 compara os valores de capacidade específica sobre os dois grupos de rochas encaixantes e sobre os diques do grupo 1. O que se percebe dessa análise é que poços sobre as extrapolações baseadas nos lineamentos da ASA (diques), são mais produtivos do que nas rochas encaixantes. Para CA, poços sobre os diques são 14,5 vezes mais produtivos do que nas encaixantes, já para CB, os poços sobre diques são 4,3 vezes mais produtivos do que nas encaixantes. Esses resultados corroboram com a hipótese de maior condutividade hidráulica em locais com diques do grupo 1.

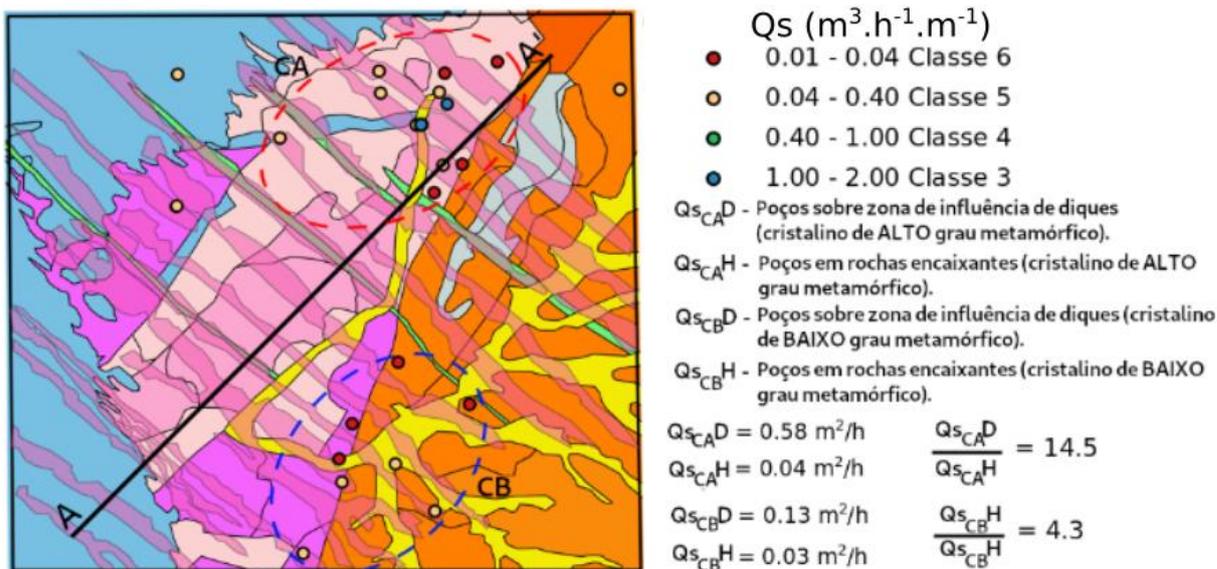


Figura 4.15: Comparação de Qs sobre diques e encaixantes. **Círculos coloridos** = poços classificados por capacidade específica; **tracejado vermelho** = seleção de poços no cristalino de alto grau metamórfico (CA); **tracejado azul** = seleção de poços no cristalino de baixo grau metamórfico (CB); **reta** = perfil A-A'; **lineamentos magentas** = extrapolação com base nos lineamentos da ASA de fontes do grupo 1 (magenta) inferidas pela inversão com PyDYKE. Q_{s,CA}D e Q_{s,CA}H são respectivos aos valores de capacidade específica média sobre diques e encaixantes para poços do grupo CA, enquanto Q_{s,CB}D e Q_{s,CB}H se referem aos poços do grupo CB.

A Figura 4.16 mostra a ocorrência de diques do grupo 1 no entorno das cidades de Castro (Sul da janela) e Piraí do Sul (Nordeste da janela), existentes em nossa janela e que poderiam ser beneficiadas. Levando-se em conta o modelo de extrapolação de faixas (Figura 4.16.a), a área destacada representa cerca de 20 % da área de estudo, visto que a janela possui área aproximada de 1836 km² enquanto as faixas magentas selecionadas aproximadamente 382 km². As faixas incluem dez poços, dois com Qs classe 3, seis com Qs classe 5 e dois poços de classe 6. Para o modelo de extrapolação do grupo 1 segundo lineamentos magnéticos da Figura 4.16.b, as áreas demarcadas representam 15 % da área de estudo, visto que a área extrapolada é de aproximadamente 282 km². Essas áreas incluem 8 poços, dois com Qs classe 3 e seis poços de classe 5. Com base em DINIZ *et al.* (2014), poços de classe 3 possuem produtividade moderada capaz de abastecer pequenas comunidades e irrigar áreas restritas, poços de classe 5 possuem produtividade de baixa a muito baixa dificilmente mantendo o fornecimento constante, enquanto poços de classe 6 são considerados não aquíferos com fornecimentos insignificantes.

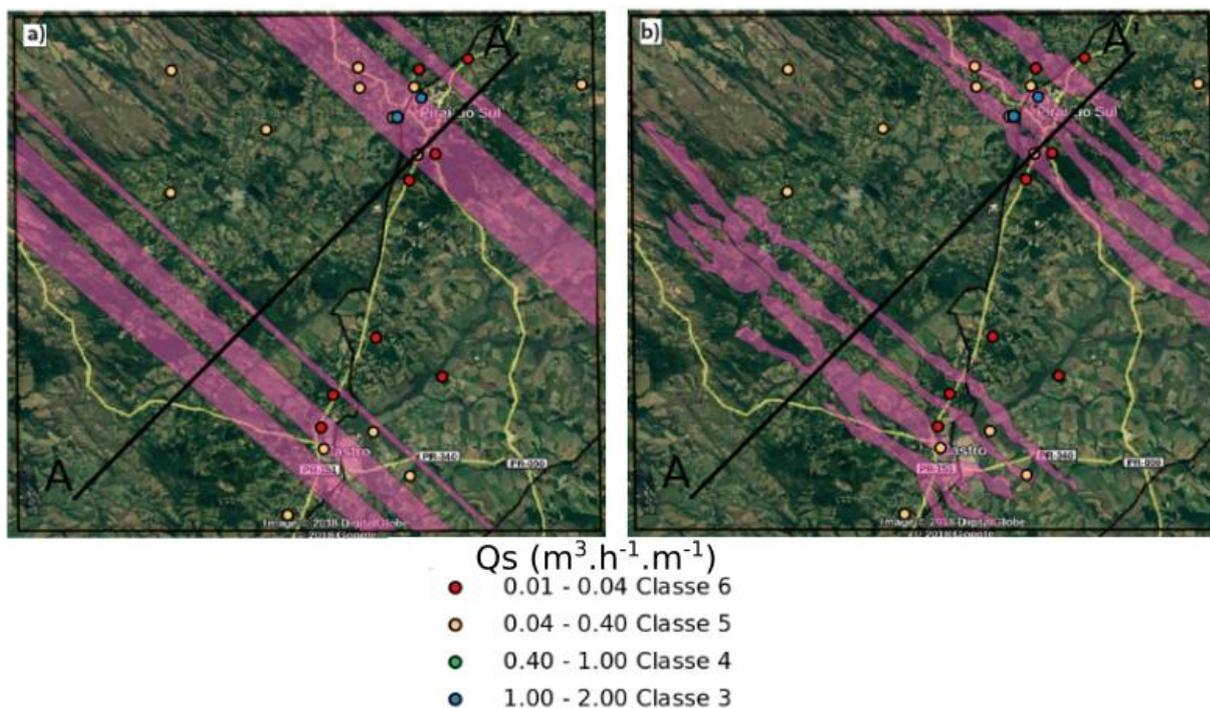


Figura 4.16: Continuidade dos diques do grupo 1 e núcleos populacionais na janela de dados. a) Extrapolação ao longo da direção transversal ao perfil A-A'; b) Extrapolação com base nos lineamentos magnéticos no mapa da amplitude do sinal analítico (ASA).

A Figura 4.17 mostra a extrapolação do grupo 1 com base na geologia local e núcleos populacionais de maior destaque. Primeiramente, observa-se que os poços mais produtivos estão situados sobre as áreas em que a continuidade dos diques foi inferida. Destaque para um poço classe 3 que contém o maior valor de Q_s ($1,55 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) na janela de dados. Este poço em especial, está localizado em uma das regiões de extrapolação do grupo 1 e em termos de geologia, sobre depósitos aluvionares. Um segundo poço destacado, está fora da extrapolação do grupo 1, mas sobre depósitos aluvionares; este poço de classe 6 possui um dos menores valores de Q_s ($0,02 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) na janela de dados. Depósitos aluvionares tendem a ser entendidos como alvos promissores para a locação de poços, porém os poços destacados indicam que nem sempre essa linha de raciocínio se confirma. Considera-se, então, como critério para seleção de áreas propícias ou a estudos complementares, regiões com diques inferidos para o grupo 1 e coincidentes com depósitos aluvionares. Na Figura 4.17, estão também, demarcados locais onde os depósitos aluvionares sobrepõem-se aos diques do grupo 1. Ressalta-se que poços de classe 3 não são os ideais para o abastecimento de povoados maiores (DINIZ et al., 2014). Na base de dados disponível não há associação de que diques rasos e aluviões possam configurar poços de classe 1 e 2, considerados ideais.

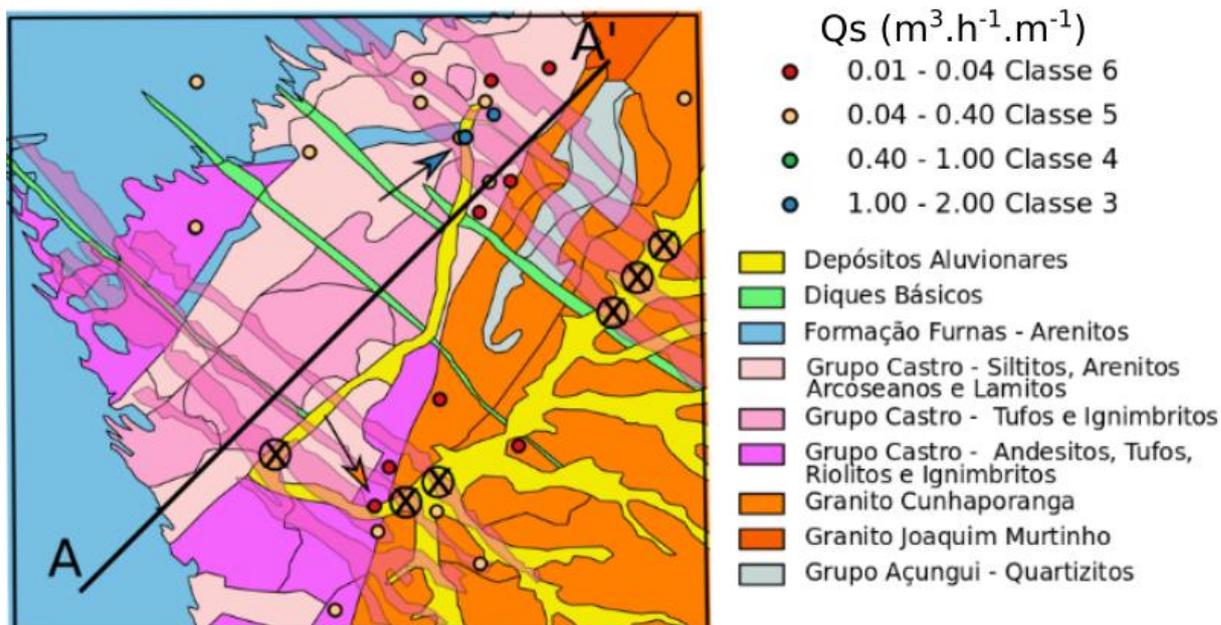


Figura 4.17: Geologia local e diques do grupo 1; continuidade inferida a partir dos lineamentos magnéticos no mapa da ASA (amplitude do sinal analítico). Destaque para poços próximos das cidades de Castro e Pirai do Sul; poço classe 3 (seta azul), poço de classe 6 (seta laranja). Áreas promissoras para locação de poços (círculos preenchidos com x) com base na proximidade de núcleos populacionais, continuidade dos diques do grupo 1 e geologia de superfície.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Os testes de simulação numérica ao qual o programa PYDYKE foi submetido, apontam que o mesmo apresenta potencial para a aplicação na inversão de dados magnetométricos referentes a enxame de diques. Os resultados obtidos nas inversões realizadas são robustos, uma vez que se obtém soluções similares partindo-se de modelos iniciais aleatórios. Quando a densidade de fontes é baixa, os testes mostram que é possível obter valores compatíveis (em geral dentro de 1 a 2 σ) com os valores verdadeiros. Já quando a densidade de fontes é alta, pode-se inferir um número mínimo de grupos com estimativas realistas para os parâmetros médios de cada uma delas. A geração de dados sintéticos a partir de modelos que contem com mais de três grupos mostra-se bastante complicada, uma vez que não há garantias de que todas as gerações tenham expressão magnética perceptível. Dessa forma, é incoerente submeter o módulo de inversão a testes com mais do que três gerações na versão atual do programa.

Considerando apenas um perfil em uma única janela de dados do APG, o programa PYDYKE, desenvolvido ao longo do Mestrado, inferiu três gerações de diques na região de estudo a partir dos dados aeromagnéticos de forma coerente com estudos anteriores. Soma-se à estimativa dessas gerações, a capacidade de inferir valores realistas para o produto entre a magnetização e a espessura dos diques, para o posicionamento ao longo do perfil, para a profundidade do topo das fontes e polaridade da inclinação da magnetização. Os resultados apresentados são concordantes com informações independentes fornecidas pela Amplitude do Sinal Analítico, o que se mostra como um ponto positivo no que diz respeito à robustez das soluções. A associação de “grupos de diques” com “gerações de diques” pode indicar episódios magmáticos distintos com implicações tectônicas. Duas gerações possuem inclinações de magnetização similares e uma, valor transitório podendo indicar reversões. Destaca-se a presença de fontes mais rasas em direção às bordas do perfil e mais profundas ao centro. Dentre os três grupos inferidos, dois deles apresentam magnetização cerca de três vezes maior do que o outro grupo, podendo ser referente diferenças composicionais. É possível inferir uma expansão crustal entre 12 e 23 % em relação ao perfil na colocação dos diques.

Os resultados para o perfil retirado do Enxame de Diques do Arco de Ponta Grossa, estabelecem uma relação entre as gerações de diques inferidas e a produtividade dos poços da região. Tais resultados permitem extrapolações para áreas de interesse para estudos de detalhe com intenção de local poços. Essas extrapolações nos levam a crer que a presença de diques associada a depósitos aluvionares, pode ser um passo relevante nos estudos de locação de poços na região. Em nossa interpretação, seria possível evoluir o estudo, visando chegar a um guia prospectivo para regiões intrudidas por diques. Uma vez que segundo a literatura, diques podem agir como barreiras/redirecionadores ou facilitadores de fluxo, na região avaliada, os diques podem se encaixar em ambas as opções dada a variação de geologia. A Figura 5.1 mostra quatro modelos conceituais que poderiam explicar a maior produtividade próximo a diques. A falta de descrição litológica na base de poços utilizada, compromete a investigação para definir se algum dos modelos conceituais explica o que é observado nos resultados obtidos no trabalho.

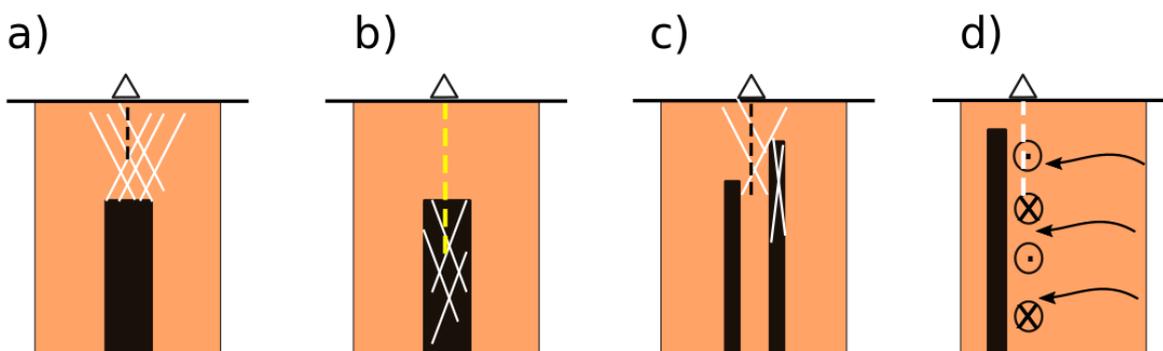


Figura 5.1: Modelos conceituais de diques e produtividade. a) Um poço (triângulo com linha tracejada) intercepta uma zona com falhamento/faturamento (linhas brancas) relacionada à colocação dos diques. b) Um poço intercepta um dique, cuja permeabilidade relativa em função do faturamento é maior do que da rocha encaixante. c) Um poço intercepta uma zona mista, com falhas/fraturamentos na encaixante e diques fraturados e impermeáveis gerando compartimentalização e conectividade do fluxo de água. d) O poço intercepta uma zona mais permeável e alterada pela colocação do dique ao longo de seu strike. Essa zona age como um caminho preferencial paralelo ao strike, aumentando a conectividade de fraturas primárias e a capacidade de armazenamento de água subterrânea.

Acreditamos que tanto para terrenos cristalinos como sedimentares intrudidos por diques, uma boa inferência a respeito dos parâmetros associados a diques, pode contribuir para otimizar os recursos na locação de poços ou mesmo para o refinamento de modelos de fluxo de água subterrânea. Estudos mais avançados deveriam além de incluir considerações sobre os diques, incluir o efeito dessas estruturas nas rochas encaixantes, que dependendo da litologia e condições locais pode alterar significativamente no fluxo subterrâneo e conseqüentemente na produtividade de

aqüíferos. Realça-se a importância da junção de estudos geofísicos aliados a estudos geológicos nas mais diversas áreas. A locação de poços é apenas um exemplo, de como em tese os custos poderiam ser reduzidos pelo trabalho conjunto dessas duas áreas do conhecimento.

Tendo o programa PYDYKE respondido adequadamente aos testes aos quais foi submetido, esperamos compilar uma versão que possa ser disponibilizada à comunidade de forma gratuita. Dessa forma, interessados poderiam aprimorá-lo ou mesmo aproveitar ideias para desenvolver soluções mais práticas para problemas geofísicos relacionados.

Referências²

- ALMEIDA, F. F. M. D. **Distribuição Regional e Relações Tectônicas do Magmatismo Pós-Paleozóico no Brasil**. Revista Brasileira de Geociências, 1986. V. 16 (4), p. 325-349.
- ALMEIDA, V. V. et al. **Contemporaneous alkaline and tholeiitic magmatism in the Ponta Grossa Arch, Paraná-Etendeka Magmatic Province: Constraints from U-Pb zircon/baddeleyite and ⁴⁰Ar/³⁹Ar phlogopite dating of the José Fernandes Gabbro and mafic dykes**. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2018. 55-65.
- ARISOY, M. Ö.; DIKMEN, Ü. **Potensoft: MATLAB-based software for potential field processing, modeling and mapping**. Computers & Geosciences, 2011. V. 37, p. 935-942.
- BABIKER, M.; GUDMUNDSSON, A. **The effects of dykes and faults on groundwater flow in an arid land: the Red Sea Hills, Sudan**. Journal of Hydrology, 2004. 256-273.
- BARBOSA, V. C. F.; SILVA, J. B. C. **Deconvolução de Euler: passado, presente e futuro - um tutorial**. Revista Brasileira de Geofísica, 2005. V. 23(3), p. 243-250.
- BEIKI, M. **TSVD analysis of Euler deconvolution to improve estimating magnetic source parameters: An example from the Åsele area, Sweden**. Journal of Applied Geophysics, 2013. 82-91.
- BEIKI, M. et al. **Estimating source location using normalized magnetic source strength calculated from magnetic gradient tensor data**. Geophysics, 2012. j23-j37.
- BLAKELY, R. J. **Potential theory in gravity and magnetic applications**. Revisited Edition. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 1996.
- BRIGGS, I. C. **Machine Contouring using minimum curvature**. Geophysics, 1974. 39(1), 39-48.
- CASTRO, L. G. D.; FERREIRA, F. J. F.; ANGULO, R. J. **Modelo Gravimétrico-Magnético do Gráben de Paranaguá-PR, Brasil**. Revista Brasileira de Geofísica, 2008. 26(3) 273-292.
- CHAVES, A. D. O. **Enxames de diques máficos do setor sul do Cráton do São Francisco (MG, Brasil)**. Tese de Doutorado, IGC - USP, São Paulo. 2001.
- CHAVES, A. D. O.; NEVES, J. M. C. **Radiometric ages, aeromagnetic expression, and general geology of mafic dykes from southeastern Brazil and implications for African-South American correlations**. Journal of South American Earth Sciences, 2005. V. 19(3), p. 387-397.

² De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6023)

COOPER, G. R. J. **Using the analytic signal amplitude to determine the location and depth of thin dikes from magnetic data.** *Geophysics*, 2015. j-j6.

COOPER, G. R. J. **Applying the tilt-depth and contact-depth methods to the magnetic anomalies of thin dykes.** *Geophysical Prospecting*, 2017. 316-323.

DICKSON, N. E. M. et al. **Coupling ground and airborne geophysical data with upscaling techniques for regional groundwater modeling of heterogeneous aquifers:** Case study of a sedimentary aquifer intruded by volcanic dykes in Northern Ireland. *Water Resources Research*, 2014. V. 50(10), p. 984-8001.

DINIZ, A. O. et al. **Manual de cartografia hidrogeológica.** CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 2014. 119 p. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/MHB/Manual_de_Cartografia_Hidrogeologica.pdf>.

DOGRU, F.; PAMUCKU, O.; PAMUCKU, C. **Determination of Mine Location by Using Edge Detection Methods:** A Case Study of Sivas-Divrigi. *Science PG Earth Science*, 2016. 56-61.

ENTHOUGHT. **scipy.optimize.fmin_l_bfgs_b.** SciPy.org, 2018. Disponível em: <http://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.fmin_l_bfgs_b.html>. Acesso em: 24 jul. 2018.

ERNST, R. E.; BARAGAR, W. R. A. **Evidence from magnetic fabric for the flow pattern of magma in the Mackenzie giant radiating dyke swarm.** *Nature*, 1992. V. 356(6369), p. 511.

EVERDINGEN, D. A. V. **Fracture characteristics of Sheeted Dyke Complex, Trodo ophiolite, Cyprus:** Implications for permeability of oceanic crust. *Journal of Geophysical Research*, 1995. 100, 957-972.

FERREIRA, F. J. F. **Integração de dados aeromagnéticos e geológicos:** Configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da USP, São Paulo, 1982.

FERREIRA, F. J. F. et al. **An estimate of the degree of crustal extension and thinning associated with the Guapiara lineament based on aeromagnetic modelling.** *Boletim IG - USP Série Científica*, 1989. 70-96.

FRALEY, C.; RAFTERY, A. E. **How many clusters? Which clustering method? Answer via model-based cluster analysis.** *The computer journal*, 1998. 41, n. 8, 578-588.

FRANK, H. T.; GOMES, M. E. B.; FORMOSO, M. L. L. **Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America.** *Pesquisa em Geociências*, 2009. 49-57.

HAUPT, R. L. L.; HAUPT, S. E. **Practical Genetic Algorithms.** Second Edition. ed. Wiley Interscience, 2004.

HIDALGO-GATO, M.; BARBOSA, V. C. F. **Edge detection of potential-field sources using scale-space monogenic signal:** Fundamental principles. *Geophysics*, 2015. J27-J36.

- HSU, S.-K.; COPPENS, D.; SHYU, C.-T. **Depth to magnetic source using the generalized analytic signal**. *Geophysics*, 1998. 1947-1957.
- HUANG, D. et al. **Combined study of Euler's homogeneity equation for gravity and magnetic field**. 57th EAGE conference, Glasgow, UK, 1995. 144.
- JAIN, A. K. **Data clustering: 50 years beyond K-means**. *Pattern Recognition Letters*, 2010. V. 31(8), p. 651-666
- KAUFMAN, L.; ROUSSEEUW, P. J. **Finding Groups in Data: An introduction to Cluster Analysis**. 2nd Edition. ed. Wiley Interscience, 2005.
- KU, C. C.; SHARP, J. A. **Werner deconvolution for automated magnetic interpretation and its refinement using Marquardt's inverse modeling**. *Geophysics*, 1983. V. 48(6), p. 754-774.
- LI, X. **Understanding 3D analytic signal amplitude**. *Geophysics*, 2006. L13-L16.
- LIU, S. et al. **2D sequential inversion of total magnitude and total magnetic anomaly data affected by remanent magnetization**. *Geophysics*, 2015. V. 80(3), p. K1-K12.
- LOURO, V. H. A.; MANTOVANI, M. S. M. **3D inversion and modeling of magnetic and gravimetric data characterizing the geophysical anomaly source in Pratinha I in th southeast of Brazil**. *Journal of Applied Geophysics*, 2012. 110-120.
- MARQUES, L. S.; ERNESTO, M. **O magmatismo basáltico na Bacia do Paraná**. In: GEOLOGIA DO CONTINENTE SUL-AMERICANO: EVOLUÇÃO DA OBRA DE Almeida, Fernando Flávio Marques de; Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C. D. R.; Brito Neves, B. B. (eds.). São Paulo: Beca Produções Culturais Ltda., 2004. Cap. XV, p. 245-263.
- MASHAYANDEBVU, M. F. et al. **Magnetic souce parameters of two-dimensional structures using extended Euler deconvolution**. *Geophysics*, 2001. 814-823.
- MENDONÇA, C. A.; MEGUID, A. M. A. **Programs to compute magnetization to density ratio and the magnetization inclination from 3-D gravity and magnetic anomalies**. *Computers & Geosciences*, 2008. V. 34, p. 603–610.
- MICHALEWICZ, Z.; SCHOENAUER, M. **Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems**. *Evolutionary computation*, 1996. V. 4(1), p. 1-32.
- MILLER, H. G.; SINGH, V. **Potential field tilt - a new concept for location of potential field sources**. *Journal of Applied Geophysics*, 1994. 213-217.
- MINAKOV, A. et al. **Dyke emplacement and crustal structure within a continental large igneous province, northern Barents Sea**. Geological Society, London, Special Publications, 2018. 460(1) 371-395.
- MONTAJ, O. Geosoft Oasis Montaj. **MAGMAP Filtering How-To Guide**, 2015. Disponível em: <http://updates.geosoft.com/downloads/files/how-to-guides/Applying_Filters_and_Inverse_FFT_in_MAGMAP.pdf>. Acesso em: 04 set. 2018.

NABIGHIAN, M. N. **The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation.** Geophysics, 1972. V. 37(3), p. 507-517.

NAGELKERKE, N. J. D. **A note on general definition of the coefficient of determination.** Biometrika, 1991. 78(3), 691-692.

NOAA. Magnetic Field Calculators. **NOAA - National Center for Environmental Information**, 2018. Disponível em: <<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm>>. Acesso em: 20 jan. 2018.

PEDREGOSA, F. et al. **Scikit-learn: Machine Learning in Python.** Journal of Machine Learning Research, 2011. (12), 2825-2830

PICCIRILLO, E. M. et al. **Lower Cretaceous tholeiitic dyke swarm from the Ponta Grossa Arch (southeast Brazil): Petrology, Sr-Nd isotopes and genetic relationships with the Paraná flood volcanics.** Chemical Geology, December 1990. (89) 19-48.

PINESE, J. P. P. **Caracterização Petrológica e Geoquímica dos Diques do Arco de Ponta Grossa.** Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Londrina, 1989.

PLOUFF, D. **Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic.** Geophysics, 1976. V. 41, p. 727-741.

PORTELA FILHO, C. V. **Condicionamento estrutural-magnético do sistema Aquífero Serra Geral na região central do Arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná) e sua conectividade com o sistema Aquífero Guarani.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003. 122.

RAPOSO, M. I. B. **Episódios intrusivos no Arco de Ponta Grossa, determinados através de um estudo paleomagnético.** Revista Brasileira de Geociências, 1995. V. 25(1), p. 03-19.

RAPOSO, M. I. B.; ERNESTO, M. **Anisotropy of magnetic susceptibility in the Ponta Grossa dyke swarm (Brazil) and its relationship with magma flow direction.** Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1995. V. 87(3), p. 183-196.

REEVES, C. **Aeromagnetic surveys: principles, practice and interpretation.** Geosoft, 2005. Vol. 155.

RENNE, P. R. et al. **Age of Ponta Grossa dike swarm (Brazil), and implications to Paraná flood volcanism.** Earth and Planetary Science Letters, 1996. (144), 199-211.

ROCHA, L. G. D. M. et al. **Geophysical characterization of the Azimuth 125 lineament with aeromagnetic data: Contribution to the geology of central Brazil.** Precambrian Research, 2014. V. 249, p. 273-287.

ROSA FILHO, E. F. D. et al. **Sistema Aquífero Guarani - Considerações preliminares sobre a influência do Arco de Ponta Grossa no fluxo das águas subterrâneas.** Revista Águas Subterrâneas, 2003.

SALEM, A. et al. **Tilt-depth method**: A simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives. *The Leading Edge*, 2007. 26(12).

SMYTHE, D. K. **Geophysical evidence for ultrawide dykes of the late Carboniferous quartz-dolerite swarm of northern Britain**. *Geophysics*, 1994. (119) 20-30.

STORN, R.; PRICE, K. **Differential Evolution** - A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 1997. 341-359.

THOMPSON, D. T. **EULDPH**: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 1982. 47(1), 31-37.

TIBSHIRANI, R.; WHALTER, G.; HASTIE, T. **Estimating the number of clusters in data set via the gap statistic**. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 2001. 63, n. 2, 411-423.

TRELEA, I. C. **The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection**. *Information processing letters*, 2003. V. 85(6), p. 317-325.

TUCKER, L. R. **The extention of factor analysis to three-dimensional matrices**. *Contributions to Mathematical Psychology*, New York, 1964.

TUMA, S. L. **Inversão por etapas de anomalias magnéticas bi-dimensionais**. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, São Paulo, Abril 2006.

UIEDA, L.; OLIVEIRA JR, V. C.; BARBOSA, V. C. F. **Geophysical tutorial**: Euler deconvolution of potential-field data. *The Leading Edge*, 2014. 448-450.

UIEDA, L.; OLIVEIRA JR., V. C.; BARBOSA, V. C. F. **Modeling the Earth with Fatiando a Terra**. In: WALT, S. V. D.; MILLMAN, J.; HUFF, K. *Proceedings of the 12th Python in Science Conference*, 2013. p. 96-103.

USSAMI, N. et al. **Detectabilidade magnética de diques do Arco de Ponta Grossa**: Um estudo integrado de magnetometria terrestre/aérea e magnetismo de rocha. *Revista Brasileira de Geociências*, 1991. 317-327.

WALKER, J. D. et al. **Geological Time Scale**. *The Geological Society of America*, 2012.

ZHANG, H. L. et al. **NAV-Edge**: Edge detection of potential-field sources using normalized anisotropy variance. *Geophysics*, 2014. J43-J53.

² De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6023)

Anexo I

Neste anexo são apresentados os valores da picagem utilizada para definir os limites do parâmetro x_0 de cada prisma utilizado na inversão dos modelos de alta densidade.

Tabela A-I.1: Limites para o parâmetro x_0 definidos por picagem para às inversões do modelo 3.

PRISMAS	LIMITE INFERIOR X_0 (m)	LIMITE SUPERIOR X_0 (m)
P1	4	595
P2	1062	1373
P3	2774	3365
P4	4516	5077
P5	5481	6633
P6	6788	7099
P7	8531	8811
P8	8998	9402
P9	9464	9807
P10	10087	10771
P11	10927	11425
P12	11643	12079
P13	12296	12732
P14	12919	13292
P15	13479	13759
P16	13883	14226
P17	14444	15346
P18	15564	16622
P19	16684	17182
P20	17338	17867
P21	18738	19236
P22	19454	20543
P23	20636	22628
P24	23251	23624
P25	23842	24309
P26	24807	25180
P27	25491	25833
P28	26114	26798
P29	26985	27358
P30	27421	27701
P31	27763	28728
P32	28883	29226
P33	29350	29910

Tabela A-I.2: Limites para o parâmetro x_0 definidos por picagem para às inversões do modelo 4.

PRISMAS	LIMITE INFERIOR X_0 (m)	LIMITE SUPERIOR X_0 (m)
P1	7	630
P2	785	1771
P3	1927	3692
P4	3744	4211
P5	4418	5923
P6	6079	6702

P7	6754	7429
P8	7532	8155
P9	8311	8934
P10	9089	10698
P11	10854	11633
P12	11736	12203
P13	12255	13397
P14	13657	14383
P15	14539	15369
P16	15525	15992
P17	16096	16875
P18	17030	17913
P19	18068	19625
P20	19729	20715
P21	20767	21286
P22	21494	22376
P23	22584	23362
P24	23518	24037
P25	24141	24919
P26	25023	25698
P27	25802	28033
P28	28137	29227
P29	29486	30213
P30	30473	31199
P31	31251	31666
P32	31718	32393
P33	32601	33587
P34	33794	35092
P35	35299	35715
P36	35767	36182
P37	36286	36805
P38	36960	38206
P39	38465	39711
P40	39970	40645
P41	40749	41216
P42	41320	42721
P43	42877	43500
P44	43604	44123
P45	44226	44745
P46	44797	45212
P47	45264	45835
P48	45887	47340
P49	47652	48119
P50	48275	48794
P51	48897	49832

Tabela A-I.3: Limites para o parâmetro x_0 definidos por picagem para às inversões do modelo 5.

PRISMAS	LIMITE INFERIOR X_0 (m)	LIMITE SUPERIOR X_0 (m)
P1	7	162
P2	214	1823
P3	1927	2602
P4	2757	3692

P5	3795	4159
P6	4211	4574
P7	4730	5560
P8	5716	6235
P9	6287	6806
P10	6910	7999
P11	8103	8934
P12	9037	9660
P13	9764	10179
P14	10387	10802
P15	10906	11425
P16	11581	12671
P17	12826	13709
P18	13812	14176
P19	14331	14850
P20	14902	15733
P21	15888	16926
P22	16978	17705
P23	17809	18483
P24	18639	19054
P25	19262	19989
P26	20144	21182
P27	21182	22168
P28	22272	23258
P29	23362	24244
P30	24348	25438
P31	25490	26684
P32	26788	27514
P33	27618	28708
P34	28864	29590
P35	29694	30213
P36	30265	31251
P37	31355	33068
P38	33171	36286
P39	36493	37168
P40	37272	37739
P41	37843	39140
P42	39296	40230
P43	40282	40801
P44	40905	41683
P45	41787	42306
P46	42410	43188
P47	43240	43759
P48	43863	44486
P49	44590	45472
P50	45732	47289
P51	47392	48171
P52	48223	48949
P53	49209	49935

Tabela A-I.4: Limites para o parâmetro x_0 definidos por picagem para às inversões do modelo 6.

PRISMAS	LIMITE INFERIOR X_0 (m)	LIMITE SUPERIOR X_0 (m)
P1	7	1200
P2	1304	2550
P3	2706	3225
P4	3276	3692
P5	3795	4626
P6	4782	5560
P7	5664	6131
P8	6235	6598
P9	6806	7221
P10	7273	7636
P11	7792	8311
P12	8415	9193
P13	9297	10491
P14	10491	11944
P15	12048	12671
P16	12722	13190
P17	13241	13709
P18	13812	14539
P19	14695	15525
P20	15629	16148
P21	16200	16823
P22	16926	18172
P23	18276	18691
P24	18795	19210
P25	19314	19573
P26	19781	21234
P27	21338	22532
P28	22687	25283
P29	25438	26632
P30	26891	27878
P31	27981	29071
P32	29227	30265
P33	30421	30888
P34	31044	32289
P35	32445	33068
P36	33171	34261
P37	34313	35144
P38	35196	36649
P39	36753	37998
P40	38154	39192
P41	39348	40022
P42	40126	40801
P43	41060	42306
P44	42410	43967
P45	44019	44953
P46	45109	45524
P47	45680	46510
P48	46666	48378
P49	48534	49261
P50	49416	49935

Tabela A-I.5: Limites para o parâmetro x_0 definidos por picagem para às inversões do perfil A-A'.

PRISMAS	LIMITE INFERIOR X_0 (m)	LIMITE SUPERIOR X_0 (m)
P1	7	413
P2	514	1123
P3	1174	1834
P4	1935	2697
P5	2748	4270
P6	4372	5133
P7	5184	6351
P8	6504	7163
P9	7265	8026
P10	8128	8788
P11	8889	9549
P12	9651	10310
P13	10463	12138
P14	12239	12645
P15	12696	13661
P16	13762	14320
P17	14473	15285
P18	15386	15792
P19	15894	16909
P20	17061	18330
P21	18483	19751
P22	19853	20716
P23	20767	21528
P24	21630	22340
P25	22391	23305
P26	23355	24167
P27	24269	25233
P28	25335	26604
P29	26655	27111
P30	27213	28025
P31	28228	29345
P32	29446	30918
P33	31020	31883
P34	31984	33862
P35	33964	34674
P36	34776	35182
P37	35283	36096
P38	36146	36958
P39	37111	38380
P40	38481	39395
P41	39446	40664
P42	40664	41476
P43	41577	41984
P44	42085	42440
P45	42542	43506
P46	43659	44775
P47	44826	45943
P48	45993	46755
P49	46856	47415
P50	47465	48075
P51	48176	48887

