

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FABRÍCIO RODRIGUES CASTRO

MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE DADOS MAGNÉTICOS:
DESENVOLVIMENTO, IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E APLICAÇÃO EM
DADOS SINTÉTICOS E REAIS DO ARCO DE PONTA GROSSA, CENTRO-SUL DO
BRASIL

CURITIBA – PR

MARÇO/2019

FABRÍCIO RODRIGUES CASTRO

MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE DADOS MAGNÉTICOS:
DESENVOLVIMENTO, IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E APLICAÇÃO EM
DADOS SINTÉTICOS E REAIS DO ARCO DE PONTA GROSSA, CENTRO-SUL DO
BRASIL

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre, Curso de Pós-Graduação em Geologia, Área de Concentração Geologia Exploratória, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador:

Prof. Dr. Saulo Pomponet Oliveira.

Co-Orientadores:

Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira.

Prof. Dr. Jeferson de Souza.

CURITIBA – PR

MARÇO/2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

C355m

Castro, Fabrício Rodrigues

Métodos de processamento de dados magnéticos: desenvolvimento, implementação computacional e aplicação em dados sintéticos e reais de Ponta Grossa, Centro-Sul do Brasil [recurso eletrônico] / Fabrício Rodrigues Castro, 2019.

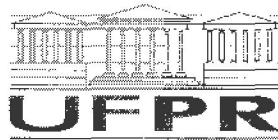
Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Saulo Pomponet Oliveira

Coorientadores: Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira; Prof. Dr. Jeferson de Souza

1. Geologia – processamento de dados. 2. Arco de Ponta Grossa – PR – processamento de dados. I. Universidade Federal do Paraná. II. Oliveira, Saulo Pomponet. III. Ferreira, Francisco José Fonseca. IV. Souza, Jeferson de. V. Título CDD 551.2854

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOLOGIA -
40001016028P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **FABRÍCIO RODRIGUES CASTRO** intitulada: **MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE DADOS MAGNÉTICOS: DESENVOLVIMENTO, IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E APLICAÇÃO EM DADOS SINTÉTICOS E REAIS DO ARCO DE PONTA GROSSA, CENTRO-SUL DO BRASIL**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

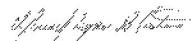
A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Março de 2019.



SAULO POMPONET OLIVEIRA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)




DAVID LOPES DE CASTRO

Avaliador Externo (UFRN)



ALESSANDRA DE BARROS E SILVA BONGIOLO

Avaliador Externo (UFPR)



GIULIANO SANT'ANNA MAROTTA

Avaliador Externo (UNB)

RESUMO

As ferramentas computacionais de processamento de dados geofísicos podem ser agrupadas em duas classes. Enquanto que a primeira classe é composta por aplicativos proprietários, munidos de inúmeras ferramentas de processamento em um ambiente com interface gráfica (*GUI*), a segunda é composta pelos *scripts* de domínio público, que realizam funções específicas no modo de linha de comando. Com o objetivo de unir os pontos positivos das duas linhas previamente citadas, foi desenvolvido um programa de código aberto, denominado Grav Mag Suite, que agrupa diversas ferramentas de processamento de dados de campos potenciais, sobretudo métodos semiquantitativos. O Grav Mag Suite foi desenvolvido em ambiente *MATLAB*, que possui ferramentas que dão suporte tanto à criação de interfaces gráficas, quanto ao processamento de dados de campos potenciais. As ferramentas de processamento foram implementadas com base nas teorias dispostas em artigos científicos e na adaptação de *scripts* disponibilizados pela comunidade científica, além de novos filtros qualitativos propostos neste trabalho. Os métodos implementados foram testados em dados sintéticos e reais do Arco de Ponta Grossa, para fins de validação dos códigos-fonte. Os novos filtros qualitativos propostos combinam dois filtros de realce tradicionais ISA e IGHT através da soma e subtração de ambos e delimitam as fontes causadoras através picos e platos. Os resultados da aplicação dos métodos qualitativos e semiquantitativos aos dados aeromagnéticos forneceram novas informações a respeito da área de estudo.

Palavras-chave: Métodos semiquantitativos. Arco de Ponta Grossa. Dados aeromagnéticos.

ABSTRACT

Geophysical data computational processing tools may be ranked into two classes. While the first class is composed by proprietary software with numerous processing tools in a graphical user interface (GUI) environment, the second one consists of public domain scripts, which perform specific tasks in command line mode. In order to put together the main advantages of both types, an open source GUI software named Grav Mag Suite which groups several processing tools for potential field data was developed, specially semiquantitative methods. The software development was carried out in MATLAB environment, which provides a set of tools for both developing graphical user interfaces and processing potential field data. Semiquantitative magnetic methods were implemented based on theories provided by scientific researches and adapting scripts provided by the scientific community, in addition to new qualitative filters proposed in this work. The implemented methods were validated on synthetic data as well as on aeromagnetic data from the Ponta Grossa arch. The new proposed qualitative filters combine two traditional enhancement filters TDR and TDX through its sum and subtraction and delimit the causative sources by sharp peaks and plateaus. The results of the application of qualitative and semiquantitative methods over the real dataset provided new information of the study area.

Keywords: Semiquantitative methods. Ponta Grossa arch. Aeromagnetic data.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.1 – Figura esquemática do tema da pesquisa	13
Figura 1.5.1 – Localização da área de estudo	17
Figura 1.5.2 – Mapa geológico simplificado do Arco de Ponta Grossa com indicação da área de estudo (modificado de Ruberti et al., 2005 e Gomes et al., 2018)	18
Figura 1.5.3 – Mapa geológico da área de estudo listando os principais litotipos e estruturas. Q (Depósitos quaternários), PCi (Permiano Carbonífero - Sub-Grupo Itararé), NPy (Neoproterozóico - Granitos pós-tectônico), NPEOy (Neoproterozóico - Conglomerados polimíticos, grauvacas e meta-arcóseo), MPxg (Mesoproterozóico - Micaxistos), MPx (Mesoproterozóico - Xistos), MPs (Mesoproterozóico - Filitos), MPr (Mesoproterozóico - Meta-arenitos), MPq (Mesoproterozóico - Quartzito), MPm (Mesoproterozóico - Mármore), MPf (Mesoproterozóico - Meta-ritmitos), MPcb (Mesoproterozóico - Meta-conglomerados e metabrechas), MPc (Mesoproterozóico - Calcissilicatos com filito ou xisto associado) e MPb (Mesoproterozóico - Meta-vulcânicas máficas) (modificado de Machado Junior, 2000)	18
Figura 1.5.4 – Localização do Projeto Aerogeofísico Paraná-Santa Catarina e da área de estudo	20
Figura 1.5.5 – Dado aeromagnético referente à área de estudo. a) Disposição espacial dos dados aeromagnéticos não interpolados. b) Dado aeromagnético interpolado	20
Figura 1.5.6 – Campo magnético anômalo reduzido ao polo	21
Figura 1.5.7 – Comparação entre perfis do campo magnético anômalo normal e reduzido ao polo da área de estudo	22
Figura 1.5.8 – Exemplo da criação de um objeto. a) Código em linguagem <i>MATLAB SCRIPT</i> . b) Resultado gráfico do código em a)	24
Figura 1.5.9 – Exemplo da adição de um botão a uma janela. a) Código em linguagem <i>MATLAB SCRIPT</i> . b) Resultado gráfico do código em a)	24
Figura 1.5.10 – Exemplo da criação de novos componentes gráficos e da edição de seus atributos. a) Código em linguagem <i>MATLAB SCRIPT</i> . b) Interface gráfica gerada pelo código em a) antes da execução da função associada ao botão. c) Interface gráfica após a execução da função associada ao botão	25
Figura 1.6.1 – Amplitude do sinal analítico causado por dois prismas com profundidades de topo distintas para diferentes campos de indução magnética. a) CMA no polo ($I=90^\circ$, $D=0^\circ$). b) CMA em Curitiba ($I=-35.5^\circ$, $D=-18^\circ$). c) ASA referente ao CMA no polo. d) ASA referente ao CMA em Curitiba. e) Perfil extraído da Figura 1.6.1c. f) Perfil extraído da Figura 1.6.1d	27
Figura 1.6.2 – Gradiente horizontal total causado por dois prismas com profundidades de topo distintas. a) GHT em planta. b) GHT em perfil	28
Figura 1.6.3 – Inclinação da amplitude do sinal analítico causado por dois prismas com profundidades de topo distintas. a) ISA em planta. b) ISA em perfil	29
Figura 1.6.4 – Inclinação do gradiente horizontal total causado por dois prismas com profundidades de topo distintas. a) IGHT em planta. b) IGHT em perfil	30

Figura 1.6.5 – <i>Theta Map</i> causado por dois prismas com profundidades de topo distintas. a) <i>Theta Map</i> em planta. b) <i>Theta Map</i> em perfil	31
Figura 1.6.6 – Gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico causado por dois prismas com profundidades de topo distintas. a) GHT_ISA em planta. b) GHT_ISA em perfil	32
Figura 1.6.7 – Inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total causado por dois prismas com profundidades de topo distintas. a) ISA_GHT em planta. b) ISA_GHT em perfil	33
Figura 2.2.1 – Representação tridimensional do modelo de corpos prismáticos	48
Figura 2.2.2 – Campo magnético anômalo sintético. a) CMA com distribuição linear de cor. b) CMA com distribuição de cor por equalização de histograma	48
Figura 2.2.3 – Estimativas de profundidade calculadas pelo método da <i>source distance</i>	49
Figura 2.2.4 – Estimativas de profundidade calculadas pelo método <i>Tilt-Depth</i>	50
Figura 2.2.5 – Estimativas de profundidade calculadas pela transformada <i>Signum</i>	51
Figura 2.2.6 – Estimativas de profundidade calculadas pelo método da deconvolução de Euler para um índice estrutural igual a 1	52
Figura 2.2.7 – Estimativas de profundidade calculadas pelo método da deconvolução de Euler para um índice estrutural igual a 0	52
Figura 2.2.8 – Filtros de realce aplicados ao CMA reduzido ao polo da área de estudo. a) ASA. b) GHT. c) ISA. d) IGHT. e) GHT_ISA. f) ISA_GHT. g) ISA+IGHT. h) ISA-IGHT	53
Figura 2.2.9 – ISA-IGHT aplicado ao CMA reduzido ao polo da área de estudo com indicação das estruturas de interesse	54
Figura 2.2.10 – Estruturas lineares da área de estudo. a) Arcabouço estrutural elaborado por Machado Junior (2000) com base em mapeamento geológico. b) Arcabouço estrutural elaborado a partir da análise de dados aeromagnéticos	55
Figura A.1 – Estrutura dos diretórios do Grav Mag Suite	69
Figura A.2 – Interface principal do Grav Mag Suite com destaque para os principais componentes gráficos	69
Figura A.3 – Funcionalidades presente no menu <i>File</i>	70
Figura A.4 – Interface gráfica referente a opção <i>Data Statistics</i>	71
Figura A.5 – Interface gráfica referente a opção <i>Export Map</i>	72
Figura A.6 – Funcionalidades presentes no menu <i>Profile</i>	72
Figura A.7 – Interface gráfica referente à opção <i>Profile Analysis</i>	73
Figura A.8 – Interface gráfica referente à opção <i>Extract Profile from a Grid</i> . a) Interface principal de extração de perfis. b) Exemplo de perfil extraído	74
Figura A.9 – Interface gráfica referente à opção <i>Add Noise to Profile</i>	75
Figura A.10 – Opções presentes no menu <i>Grid</i>	76

Figura A.11 – Interface gráfica referente à opção <i>Inverse Interpolation</i>	76
Figura A.12 – Interface gráfica referente à opção <i>Gap Filling</i>	76
Figura A.13 – Interfaces gráficas referentes a métodos de interpolação padrões do MATLAB. a) Interface que interpola por meio da função <i>griddata</i> . b) Interface que interpola por meio da função <i>scatteredInterpolant</i>	77
Figura A.14 – Métodos de interpolação disponíveis no Grav Mag Suite. a) Dado interpolado com a técnica <i>inverse interpolation</i> . b) Dado interpolado com a técnica <i>gap filling</i> . c) Dado interpolado com a função <i>griddata</i> do MATLAB e interpolador bilinear. d) Dado interpolado com a função <i>griddata</i> do MATLAB e interpolador bicúbico. e) Dado interpolado com a função <i>griddata</i> do MATLAB e interpolador vizinho mais próximo. f) Dado interpolado com a função <i>griddata</i> do MATLAB e interpolador vizinho natural. g) Dado interpolado com a função <i>scatteredInterpolant</i> do MATLAB e interpolador bilinear. h) Dado interpolado com a função <i>scatteredInterpolant</i> do MATLAB e interpolador vizinho mais próximo. i) Dado interpolado com a função <i>scatteredInterpolant</i> do MATLAB e interpolador vizinho natural	78
Figura A.15 – Interface gráfica referente à opção <i>Regrid Data</i>	79
Figura A.16 – Interface gráfica referente à opção <i>Window Grid</i> . a) Interface gráfica principal com indicação de uma janela poligonal. b) Resultado da aplicação da janela poligonal ao dado carregado	79
Figura A.17 – Contorno de um dado interpolado. a) Interface gráfica referente à opção <i>Grid Outline</i> . b) Dado de entrada. c) Contorno do dado de entrada	80
Figura A.18 – Preenchimento de um dado interpolado com pontos sem informação. a) Interface gráfica referente à opção <i>Fill NaN Values</i> . b) Dummy/NaN substituídos por zeros. c) Dummy/NaN interpolados	80
Figura A.19 – Superfície de tendência. a) Interface gráfica referente à opção <i>Trend Removal</i> . b) Dado de entrada. c) Superfície de tendência de primeira ordem. d) Dado sem a superfície de tendência	81
Figura A.20 – Adição de ruído em dado interpolado. a) Interface gráfica referente à opção <i>Add Gaussian Noise</i> . b) Dado de entrada sem ruído gaussiano. c) Dado de entrada com ruído gaussiano de magnitude igual a 10 nT	81
Figura A.21 – Opções presentes no menu <i>Field Transformations</i>	82
Figura A.22 – Derivada para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção <i>Derivative Filter</i> . b) Derivada na direção x. c) Derivada na direção y. d) Derivada na direção z	83
Figura A.23 – Derivada direcional para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção <i>Directional Derivative</i> . b) Campo magnético anômalo da área de estudo reduzido ao polo. c) Derivada na direção 45°	83
Figura A.24 – Operador generalizado da derivada para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção <i>Generalized Derivative Operator</i> . b) Campo magnético anômalo da área de estudo reduzido ao polo. c) Mapa resultante da aplicação do operador com inclinação de 20° e azimute de 45°	84
Figura A.25 – Continuação do campo para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção <i>Upward Continuation</i> . b) Campo magnético anômalo reduzido ao polo. c)	

Continuação ascendente para uma altura de 400 metros. d) Continuação descendente para uma altura de 200 metros utilizando o algoritmo melhorado (Cooper, 2004)	84
Figura A.26 – Cosseno direcional para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção <i>Directional Cosine Filter</i> . b) Campo magnético anômalo da área de estudo reduzido ao polo. c) Dado filtrado por um cosseno direcional de ordem 2, que rejeita anomalias com azimute igual a 45°. d) Dado filtrado por um cosseno direcional de ordem 2, que passa anomalias com azimute igual a 45°	85
Figura A.27 – Redução ao polo para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção <i>Reduction to the pole (Classical Approach)</i> . b) Interface gráfica referente à opção <i>Reduction to the pole (Pseudo-Inclination Approach)</i> . c) Dado de entrada. c) Dado reduzido ao polo com o operador clássico ($I=-35^\circ$, $D=-19^\circ$). d) Dado reduzido ao polo com o operador que possui correção de amplitude ($I=-35^\circ$, $D=-19^\circ$, $I_a=-55^\circ$)	86
Figura A.28 – Redução ao equador para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção <i>Reduction to Magnetic Equator</i> . b) Dado de entrada. c) Dado reduzido ao equador magnético	86
Figura A.29 – Filtro da integral vertical para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção <i>Vertical Integration</i> . b) Campo magnético anômalo da área de estudo reduzido ao polo. c) Filtro da integral vertical aplicado ao dado em (b)	87
Figura A.30 – Transformada de Hilbert para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção <i>Hilbert Transform</i> . b) Campo magnético anômalo da área de estudo reduzido ao polo. c) Componente x da transformada de Hilbert do dado em (b). d) Componente y da transformada de Hilbert do dado em (b)	87
Figura A.31 – Filtro de difusão anisotrópica para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção <i>Anisotropic Diffusion Filter</i> . b) Dado de entrada. c) Filtro aplicado ao dado em (b)	88
Figura A.32 – Filtro convolucional 3x3 para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção <i>3x3 Convolutional Filters</i> . b) Interface gráfica secundária referente aos parâmetros da matriz 3x3 que compõem o filtro c) Campo magnético anômalo da área de estudo reduzido ao polo. d) Filtro da derivada com direção 45° aplicado ao dado em (c)	88
Figura A.33 – Filtro butterworth para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção <i>Butterworth Filter</i> . b) Campo magnético anômalo da área de estudo reduzido ao polo. c) Filtro passa baixa aplicado ao dado em (b)	89
Figura A.34 – Opção presente no menu <i>Enhancement Filters</i>	90
Figura A.35 – Interface gráfica referente aos filtros de realce tradicionais para dados interpolados	90
Figura A.36 – Filtros de realce tradicionais para dados interpolados. a) CMA da área de estudo. b) CMA reduzido ao polo. c) ASA aplicado ao dado em (b). d) GHT aplicado ao dado em (b). e) ISA aplicado ao dado em (b). f) IGHT aplicado ao dado em (b). g) <i>Theta Map</i> aplicado ao dado em (b). h) GHT_ISA aplicado ao dado em (b). i) ISA_GHT aplicado ao dado em (b)	91
Figura A.37 – Combinações de filtros clássicos de derivada tilt. a) Interface gráfica que gera os filtros combinados. b) ISA+IGHT. c) ISA+IGHT	92
Figura A.38 – Opções presentes no menu <i>Semiquantitative Methods</i>	92

Figura A.39 – <i>Source distance</i> para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção <i>Source Distance</i> . b) Estimativas de profundidades representadas na forma de mapa de superfície. c) Estimativas de profundidade representadas na forma de soluções pontuais	93
Figura A.40 – <i>Tilt-depth</i> para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção <i>Tilt-Depth</i> . b) Campo magnético anômalo da área de estudo reduzido ao polo. c) Estimativas de profundidade pelo método <i>Tilt-depth</i>	94
Figura A.41 – Transformada Signum para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção <i>Signum Transform</i> . b) Estimativa de profundidade das fontes. c) Estimativa das larguras das fontes	95
Figura A.42 – Interface gráfica referente a opção <i>2D Standard Euler Deconvolution</i> com perfis magnético e topográfico extraídos da área de estudo e soluções de Euler calculadas para uma janela de 10 pontos e índice estrutural igual a 1	96
Figura A.43 – Interface gráfica referente a opção <i>Classical Euler Deconvolution [Moving Window]</i>	96
Figura A.44 – Deconvolução de Euler com escaneamento restrito da janela. a) Pontos vermelhos compõem a máscara restritiva e indicam a posição do centro das janelas utilizadas na estimativa das soluções de Euler. b) Soluções de Euler para uma janela de 10x10 pontos e índice estrutural 1	97
Figura A.45 – Interface gráfica referente a opção <i>Plot Euler Solutions</i> com as soluções de Euler da área de estudo	97
Figura A.46 – Separação das soluções de Euler por classes de profundidade guiadas por histogramas. a) Interface gráfica referente à opção <i>Separate Euler Solutions in Depth Classes</i> . b) Soluções de Euler limitadas pela classe 1. c) Soluções de Euler limitadas pela classe 2	98
Figura A.47 – Separação das soluções de Euler limitadas por polígonos. a) Interface gráfica referente à opção <i>Separate Euler Solutions by Polygon Mask</i> com indicação dos polígonos (linha magenta). b) Soluções de Euler limitadas pelos polígonos (visão em perspectiva). c) Soluções de Euler limitadas pelos polígonos (visão em planta)	99
Figura A.48 – Opções presentes no menu <i>Modeling</i>	100
Figura A.49 – Anomalia de campo potencial gerado por corpos prismáticos. a) Interface gráfica referente à opção <i>Gravity and Magnetic anomaly of Prismatic Body</i> . b) Modelo gerado (visão em perspectiva). c) Modelo gerado (visão em planta)	100
Figura A.50 – Anomalia gravimétrica gerada por corpo esférico. a) Interface da opção <i>Spherical Body Forward Modeling</i> referente ao modelo bidimensional. b) Interface da opção <i>Spherical Body Forward Modeling</i> referente ao modelo tridimensional	101
Figura A.51 – Interface gráfica referente à opção <i>Dike-Like Body Forward Modeling</i>	102
Figura A.52 – Interface gráfica referente à opção <i>2D Contact Model Forward Modeling</i>	102
Figura A.53 – Interface gráfica referente à opção <i>Forward Modeling of Irregular Cross-Section Body</i>	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.5.1 – Especificações técnicas do dado aeromagnético (Fonte: CPRM, 2011)	19
Tabela 1.5.2 – Especificações técnicas dos equipamentos utilizados no aerolevanteamento (Fonte: CPRM, 2011)	19
Tabela 1.5.3 – Conceitos básicos de orientação a objetos	23
Tabela 1.6.1 – Técnicas qualitativas e semiquantitativas implementadas no Grav Mag Suite	26
Tabela 2.2.1 – Parâmetros espaciais e físicos do exemplo sintético	49

ABREVIATÖES

Estão dispostas abaixo as abreviações dos filtros de realce presentes no decorrer deste texto, tanto em português, quanto em inglês.

ASA – Amplitude do Sinal Analítico / ASA – Analitic Signal Amplitude.

GHT – Gradiente Horizontal Total / THDR – Total Horizontal Derivative.

ISA – Inclinação do Sinal Analítico / TDR – Tilt Derivative.

IGHT – Inclinação do Gradiente Horizontal Total / TDX – Horizontal Tilt Derivative.

GHT_ISA – Gradiente Horizontal Total da Inclinação do Sinal Analítico / THDR_TDR – Total Horizontal Derivative of Tilt Derivative.

ISA_GHT – Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total / TAHG – Tilt Angle of Horizontal Gradient.

RTP – Redução ao Polo / RTP – Reduction to the Pole.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	TEMA DA PESQUISA	13
1.2	ESTRUTURA DO DISSERTAÇÃO	14
1.3	ESTADO DA ARTE	14
1.4	OBJETIVOS	16
1.5	MATERIAIS	16
1.5.1	ÁREA DE ESTUDO	16
1.5.2	DADOS AEROMAGNÉTICOS	19
1.5.3	MATLAB	22
1.6	MÉTODOS	25
1.6.1	TÉCNICAS QUALITATIVAS	26
1.6.2	TÉCNICAS SEMIQUANTITATIVAS	33
2	RESULTADOS	38
2.1	ARTIGOS	38
2.2	RESULTADOS COMPLEMENTARES	48
2.2.1	VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS SEMIQUANTITATIVOS	48
2.2.2	ARCABOUÇO ESTRUTURAL	53
2.3	RESUMO EXPANDIDO	56
3	DISCUSSÕES	63
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
	REFERÊNCIAS	65
	ANEXOS	69
A.1	ESTRUTURA DO PROGRAMA	69
A.2	FUNÇÕES DESENVOLVIDAS POR TERCEIROS	103

1. INTRODUÇÃO

1.1. TEMA DA PESQUISA

Dados geofísicos têm sido cada vez mais utilizados como ferramenta auxiliar de estudos geológicos. Enquanto que um mapeamento geológico é predominantemente realizado na superfície, por exemplo através da análise de afloramentos e de amostras de rochas, os dados geofísicos dão acesso a informações de subsuperfície por meio de medidas indiretas derivadas das propriedades físicas do meio. Dentre os diversos métodos geofísicos, destacam-se os métodos potenciais, que se popularizaram com o uso de aeronaves no processo de aquisição dos dados. Dessa maneira, grandes áreas passaram a ser facilmente amostradas em curtos espaços de tempo.

Com o uso crescente de dados aéreos de campos potenciais, diversas técnicas para o tratamento destes dados têm sido propostas. Estas técnicas podem ser categorizadas como sendo qualitativas, semiquantitativas e quantitativas. A primeira categoria se refere aos filtros de realce de características específicas das fontes causadoras, e que na maioria das vezes tem como base as derivadas nas direções paralelas aos três eixos ortogonais x, y e z. A segunda categoria agrupa as técnicas capazes de calcular parâmetros espaciais e físicos das fontes causadoras, como a profundidade de topo, contraste de susceptibilidade magnética e densidade entre um dado corpo e o material que o circunda, dentre outros. A última categoria se refere às técnicas de modelagem direta e inversa, que calculam tanto a forma, quanto a distribuição espacial da propriedade física associada a partir do dado amostrado.

O tema deste trabalho foi o desenvolvimento e implementação computacional de técnicas de processamento de dados de campos potenciais (Figura 1.1.1). As técnicas de processamento desenvolvidas e/ou implementadas pertencem às três categorias previamente citadas e foram agrupadas em um programa com interfaces gráficas capazes de acessar as ferramentas de processamento através de menus e componentes gráficos.

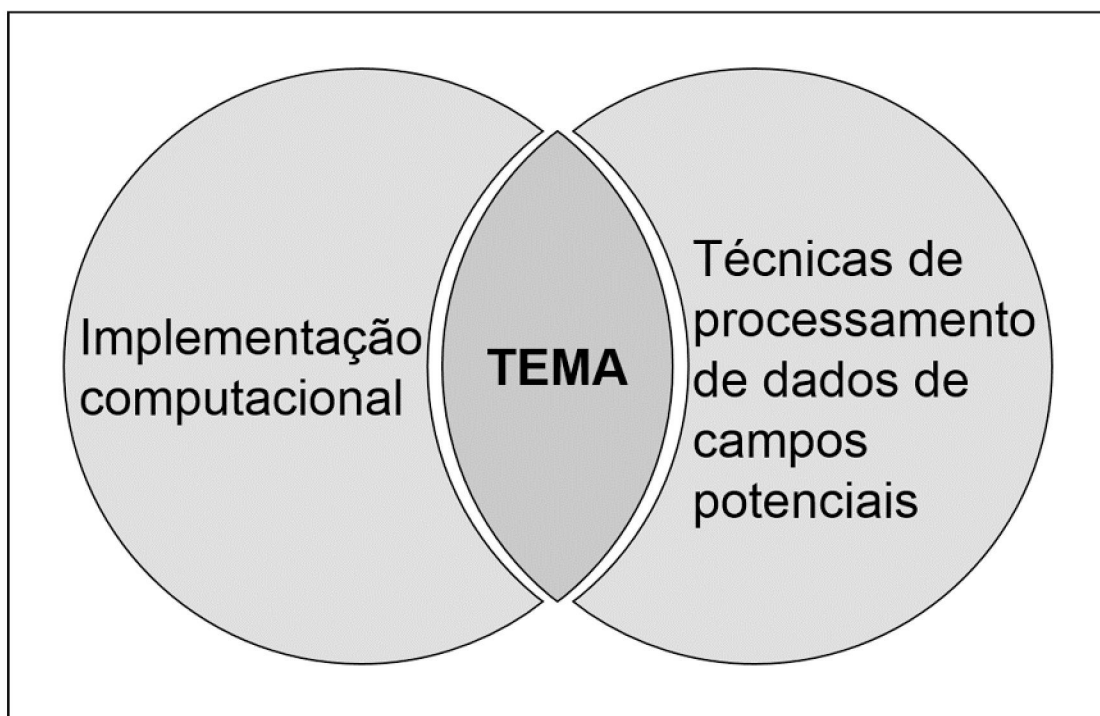


Figura 1.1.1 – Figura esquemática do tema da pesquisa.

1.2. ESTRUTURA DO DISSERTAÇÃO

Este trabalho está dividido em quatro capítulos que descrevem a teoria, metodologia e resultados. A maioria das figuras apresentadas nestes capítulos foi gerada no programa desenvolvido na dissertação, que é detalhado nos anexos.

O capítulo referente à INTRODUÇÃO possui seções e subseções que descrevem o tema da pesquisa, o estado da arte, os objetivos a serem alcançados, assim como os materiais e métodos utilizados no decorrer do trabalho.

O capítulo dos RESULTADOS lista os trabalhos apresentados e publicados, assim como resultados complementares referentes à validação das técnicas implementadas sobre dados sintéticos e reais.

Os capítulos DISCUSSÃO e CONSIDERAÇÕES FINAIS apresenta a discussão e a conclusão dos resultados da pesquisa. O capítulo REFERÊNCIAS lista todos os trabalhos que serviram de base para a elaboração da pesquisa.

1.3. ESTADO DA ARTE

A vasta heterogeneidade das feições anômalas que existem em dados de campos potenciais exige um tratamento que depende da escala em que se deseja trabalhar. Dessa maneira, feições associadas a corpos profundos podem não ser significativas em estudos locais, em escalas de semidetalhe/detalhe, assim como altas frequências podem ser descartadas em interpretações de contextos regionais. Logo, o mais indicado quando se trata de campos potenciais, é trabalhar com bandas específicas de frequência, processo que se atinge por meio da atenuação de conteúdos espectrais indesejados. Esta etapa inicial de processamento, que depende da escala em que se deseja trabalhar, resume-se na separação do campo em componentes regionais e residuais e é obtida por meio da aplicação de filtros passa baixa e passa alta (Dentith & Mudge, 2014).

Definido o intervalo de frequência a ser trabalhado, as próximas etapas de processamento dedicam-se ao realce das feições de interesse. Neste contexto, diversos filtros ou técnicas de realce foram desenvolvidas (Baranov 1957; Baranov & Naudy 1964; Nabighian 1972, 1974; Roest et al. 1992; Cordell & Grauch 1982; Grauch & Cordell 1987; Verduzco et al. 2004; Ferreira et al., 2013). Estas técnicas atenuam ou destacam certas bandas de frequência, com o objetivo de tornar os mapas magnéticos mais fáceis de interpretar.

A maioria das técnicas acima indicadas parte de derivadas do campo anômalo nas direções ortogonais x , y e z e dependendo da ordem da derivada, estes filtros podem apresentar diferentes níveis de intensidade de realce. Um bom exemplo de técnica qualitativa de primeira ordem (usam derivadas de primeira ordem) é a amplitude do sinal analítico (Nabighian 1972, 1974; Roest et al. 1992), obtida através da raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas horizontais e vertical do campo anômalo. A aplicação deste filtro produz um mapa que realça o centro das fontes.

Outro exemplo de técnica qualitativa é a inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total ou TAHG (Ferreira et al., 2013). Este filtro equaliza o sinal do gradiente horizontal total (GHT) ao aplicar a tangente inversa da razão entre a derivada vertical do GHT pela raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas horizontais do GHT. O produto resultante da aplicação deste filtro é um mapa que demarca as bordas dos corpos com máximos, além da equalização da tangente inversa demarcar corpos rasos e profundos com sinais de igual magnitude.

As técnicas de realce, cuja função resume-se em destacar as características espaciais horizontais das fontes causadoras, são denominadas técnicas qualitativas. Porém, há mais variáveis atreladas às fontes causadoras, que são de interesse geológico e econômico, como profundidade de topo, ângulo de mergulho, extensão em profundidade e contraste da

propriedade física. Neste contexto, com o objetivo de estimar estes parâmetros, desenvolveu-se outro ramo das técnicas de realce, denominado técnicas semiquantitativas, cuja base pode ser tanto o campo anômalo, quanto combinações de suas derivadas (Thompson, 1982; Reid et al., 1990; Salem et al. 2007, 2008; Fairhead et al. 2008; Cooper 2014a, b, 2015; Ma & Du 2012; Ma & Li 2012; Ma et al. 2014; Souza & Ferreira 2012, 2013, 2015; Oliveira et al., 2017).

Como demonstrado por Salem (2007), é possível extrair informações do produto resultante da Derivada *Tilt* (TDR), de Miller & Singh (1994), para obter as profundidades das fontes. Foi demonstrado, para o modelo de contato, que a distância entre as isolinhas 0° e $+45^\circ$ e 0° e -45° do TDR fornece as profundidades dos topos das fontes. Trabalhos posteriores analisaram os resultados desta técnica para anomalias causadas por corpos com diversas geometrias (Salem et al. 2008, Fairhead et al. 2008).

Cooper (2014a) apresentou uma técnica capaz de estimar a profundidade de corpos com formas próximas a de diques verticais e com mergulhos variados, com base na razão entre amplitudes do sinal analítico de ordens distintas. Em trabalho posterior, esta técnica, que se restringia a corpos que se aproximam de diques, foi expandida para outros tipos de fontes (Cooper, 2014b).

Souza & Ferreira (2012, 2013, 2015) desenvolveram uma técnica de cunho qualitativo e semiquantitativo, denominada Transformada *Signum*. Esta técnica, do ponto de vista qualitativo, delinea as bordas dos corpos e pode ser aplicada a anomalias derivadas de qualquer fonte, tanto para perfis quanto para dados em planta. Entretanto, para proceder estimativas semiquantitativas da largura e da profundidade do topo das fontes, os autores empregaram o modelo de dique vertical.

O cenário atual, referente ao desenvolvimento de ferramentas de processamento de dados de campos potenciais, apresenta duas linhas bem distintas. Uma delas restringe-se aos pacotes comerciais e multifuncionais, enquanto que a outra engloba os algoritmos de código aberto divulgados concomitantemente à publicação de pesquisas científicas e que executam funções específicas. Na maioria das vezes estas ferramentas são executadas apenas no modo de linha de comando, o que dificulta sua utilização, principalmente para usuários não familiarizados com programação.

Os pacotes comerciais apresentam, como ponto positivo, ambientes com interfaces gráficas de usuário (GUIs), que facilitam o uso das ferramentas presentes nos mesmos. Entretanto, estes pacotes não são disponibilizados gratuitamente e geralmente são fornecidos na forma de arquivos executáveis, o que impossibilita o acesso e adaptação dos códigos-fonte. Em contrapartida, os algoritmos de código aberto, apesar de frequentemente não possuírem uma interface gráfica que intermedia o acesso dos usuários às suas funções e de serem executados no modo de linha de comando, permitem o acesso aos seus códigos de modo a garantir que o usuário tenha conhecimento das etapas executadas, além de viabilizar eventuais adaptações e melhorias.

Ultimamente, muitas das ferramentas onde os algoritmos de código aberto são desenvolvidos passaram a ter suporte à construção de interfaces gráficas, como por exemplo o ambiente MATLAB e a linguagem de programação Python. Dentre estas ferramentas optou-se, pela utilização do MATLAB para a realização deste trabalho, uma vez que, embora ambas as ferramentas possuam acervos similares de funcionalidades, os códigos feitos em MATLAB exigem apenas que o ambiente MATLAB esteja instalado, enquanto que os mesmos códigos desenvolvidos em Python exigem que o usuário instale diversas bibliotecas.

A área referente à implementação computacional de ferramentas de processamento de dados geofísicos, embora seja dominada pelos scripts executados em linha de comando, apresenta alguns exemplos que possuem interface gráfica de usuário, como os programas ELRIS2D, Potensoft e GamField. O pacote ELRIS2D (Akca, 2016) é dedicado à inversão de dados de eletrorresistividade e polarização induzida, enquanto Potensoft (Arisoy & Dikmen,

2011) e GamField (Pignatelli et al., 2011; 2018) são dedicados ao processamento de dados de campos potenciais. O Potensoft é um pacote de processamento focado na aplicação de filtros qualitativos e na modelagem direta de corpos prismáticos, enquanto que o GamField possui ferramentas que auxiliam na modelagem de estruturas mais complexas através da subdivisão das mesmas em pequenos prismas.

1.4. OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa resume-se em desenvolver um programa, denominado Grav Mag Suite e composto por ferramentas capazes de calcular parâmetros espaciais e físicos das fontes causadoras de campos potenciais anômalos. Estes programas foram desenvolvidos em código aberto na linguagem *MATLAB SCRIPT* e possuem interface gráfica. O usuário encontrará um ambiente integrado no qual, além de diversas técnicas semiquantitativas recentemente propostas na literatura, seja possível também realizar etapas usuais de processamento e modelagem de dados potenciais. Neste sentido, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar e implementar técnicas semiquantitativas;
- Adicionar ferramentas extras que auxiliam nas etapas de pré-processamento e realce;
- Agrupar as rotinas implementadas no ambiente de interface gráfica;
- Validar as técnicas implementadas com base em dados gerados por modelos sintéticos;
- Analisar as principais estruturas da área de estudo por meio da aplicação das técnicas qualitativas e semiquantitativas implementadas;
- Disponibilizar o pacote de rotinas em plataformas colaborativas.

1.5. MATERIAIS

1.5.1. ÁREA DE ESTUDO

- Localização

A área de estudo está situada na porção sul do estado de São Paulo. O polígono da área é delimitado pelas seguintes coordenadas geodésicas: 48°19'44.4" W e 47°59'24" W e 24°15'57.6" S e 24°0'3.6" S, com área de aproximadamente 1200 km² (Fig. 1.5.1).

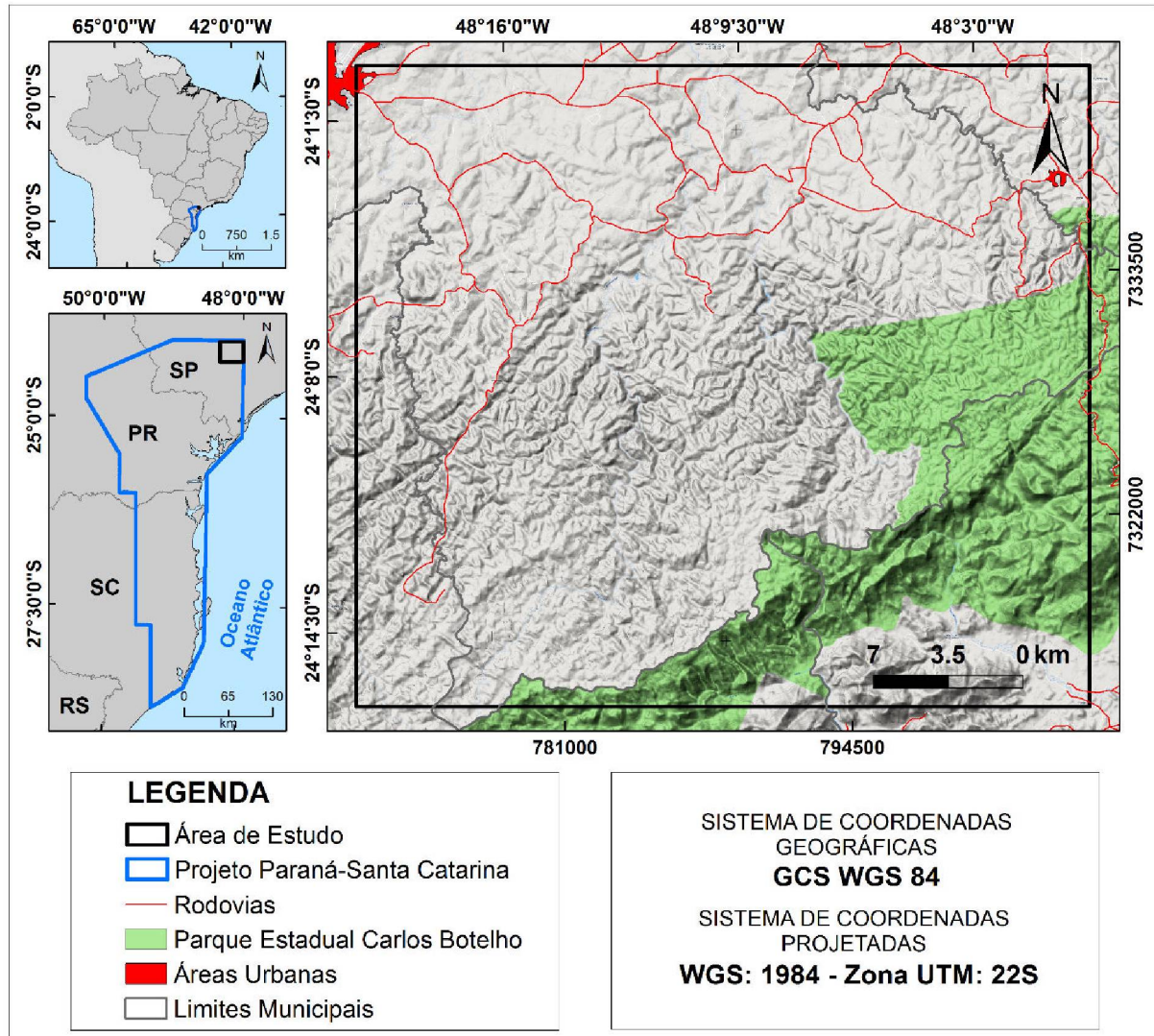


Figura 1.5.1 – Localização da área de estudo.

- Contexto Geológico

O Arco de Ponta Grossa (PGA) é uma estrutura tectônica soerguida com eixo principal mergulhando para o interior da Bacia do Paraná em uma direção NW (Ferreira, 1982). Ele é composto por quatro lineamentos com extensões aproximadas de 600 km e larguras variando de 20 a 100 km. Estes lineamentos estão aproximadamente alinhados com o eixo do arco e tiveram um papel importante na evolução tectônica da Bacia do Paraná. (Algarte, 1972; Vieira, 1973; Ferreira et al., 1981, 1984; Ferreira, 1982; Almeida, 1983, 1986) (Figura 1.5.2).

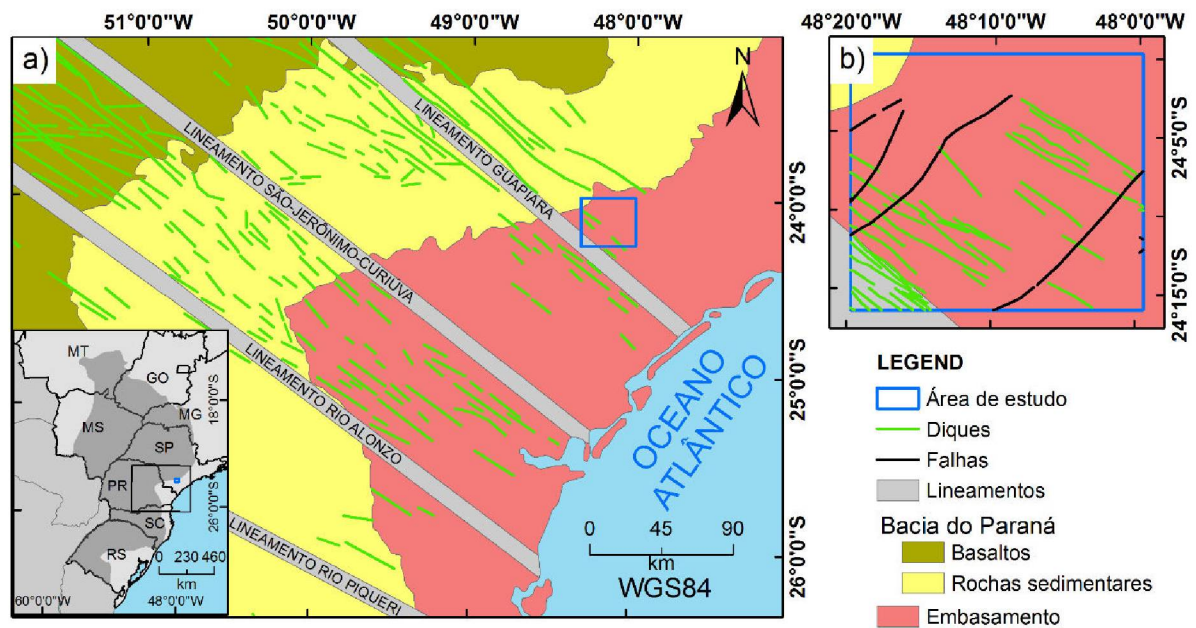


Figura 1.5.2 – Mapa geológico simplificado do Arco de Ponta Grossa com indicação da área de estudo (modificado de Ruberti et al., 2005 e Gomes et al., 2018).

A área de estudo compreende parte do lineamento Guapiara, que define o limite nordeste do arco de Ponta Grossa (Ferreira, 1982). Esta feição é marcada por um enxame de diques de diabásio eocretáceos dispostos em direção NW-SE e caracteriza uma sutura crustal relacionada à reativação do arco de Ponta Grossa, causado por um diastrofismo ocorrido no mesozoico (Ferreira et al., 1981). Esta estrutura foi interpretada por Ferreira & Algarte (1979) como relacionada a derrames basálticos, com vulcanismo alcalino e ultrabásico alcalino condicionado pelo lineamento Guapiara. A Figura 1.5.3 apresenta o mapa geológico da área de estudo com indicação dos diques de diabásio (em verde) de acordo com Machado Junior (2000).

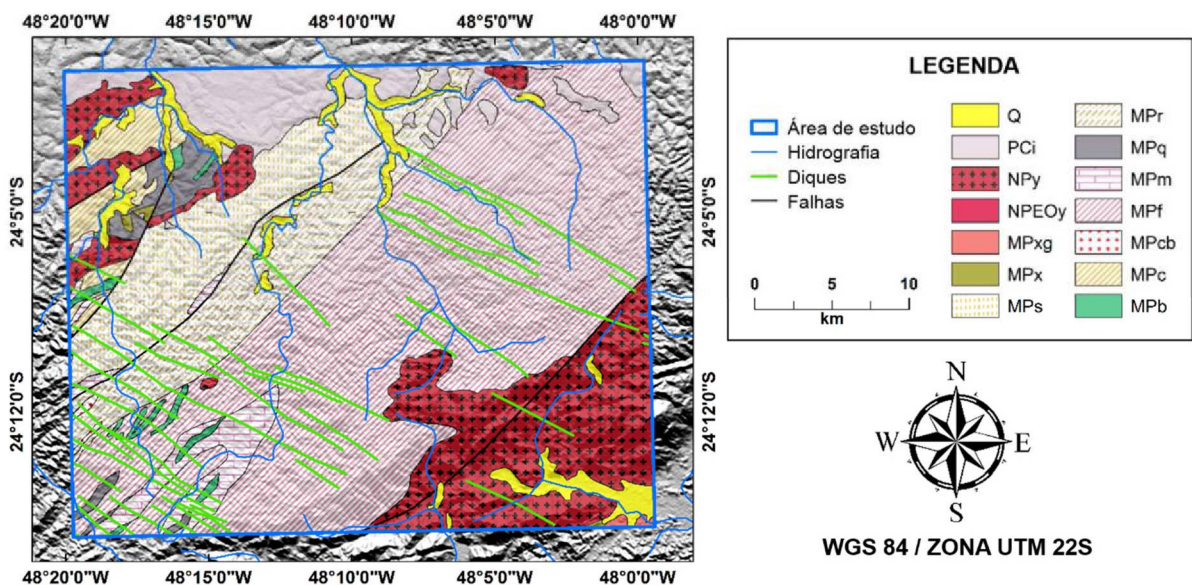


Figura 1.5.3 – Mapa geológico da área de estudo listando os principais litotipos e estruturas. Q (Depósitos quaternários), PCi (Permiano Carbonífero - Sub-Grupo Itararé), NPy (Neoproterozóico - Granitos pós-tectônico), NPEOy (Neoproterozóico - Conglomerados

polimíticos, grauvas e meta-arcóseo), MPxg (Mesoproterozóico - Micaxistos), MPx (Mesoproterozóico - Xistos), MPs (Mesoproterozóico - Filitos), MPr (Mesoproterozóico - Metaarenitos), MPq (Mesoproterozóico - Quartzito), MPm (Mesoproterozóico - Mármore), MPf (Mesoproterozóico - Meta-ritmitos), MPcb (Mesoproterozóico - Meta-conglomerados e metabrechas), MPc (Mesoproterozóico - Calcissilicatos com filito ou xisto associado) e MPb (Mesoproterozóico - Meta-vulcânicas máficas) (modificado de Machado Junior, 2000).

1.5.2. DADOS AEROMAGNÉTICOS

As ferramentas desenvolvidas nesta pesquisa serão aplicadas a um banco de dados aeromagnéticos fornecido pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) pertencente ao Projeto Paraná-Santa Catarina (CPRM, 2011). As especificações técnicas referentes ao banco de dados e aos equipamentos utilizados na aquisição do mesmo são mostradas nas Tabelas 1.5.1 e 1.5.2, respectivamente.

Tabela 1.5.1 – Especificações técnicas do dado aeromagnético. (Fonte: CPRM, 2011)

Projeto	Paraná-Santa Catarina
Ano	2011
Método	Magnetometria
Espaçamento entre as linhas de voo	500 m
Espaçamento entre as linhas de controle	10 km
Direção das linhas de voo	N-S
Direção das linhas de controle	E-W
Altura média de voo	100 m
Intervalo entre as aferições	0.1 s

Tabela 1.5.2 – Especificações técnicas dos equipamentos utilizados no aerolevanteamento. (Fonte: CPRM, 2011)

Prefixo da aeronave	PR-FAG	PT-WOT	PR-LDS
Modelo da aeronave	Caravan II	PA31	
Fabricante da aeronave	REIMS 406	Piper Navajo	
Magnetômetro	Scintrex CS-3		
Sistema de navegação	FASDAS		
GPS	Trimble AgGPS 132 DGPS "Realtime"		
Câmera de vídeo	Panasonic WV-484		
Radar altímetro	KING 405	Collins ALT-50	
Barômetro	Fugro/Enviro		
Magnetômetro terrestre	GEM Systems GSM-19		
Sistema de aquisição	FASDAS		

Os limites do Projeto Paraná-Santa Catarina e da área de estudo estão representadas na Figura 1.5.4.

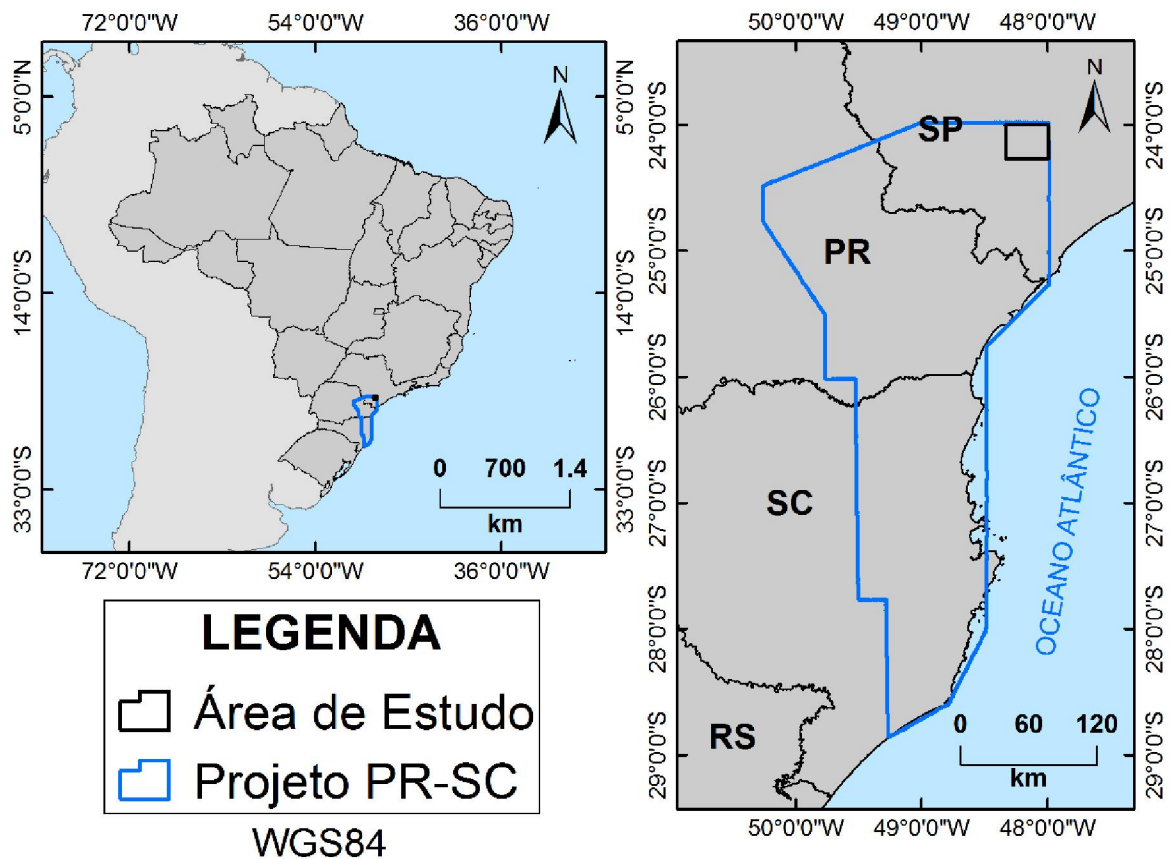


Figura 1.5.4 – Localização do Projeto Aerogeofísico Paraná-Santa Catarina e da área de estudo.

O polígono da área de estudo foi utilizado para recortar o banco de dados do projeto Paraná-Santa Catarina. Os dados recortados foram interpolados numa malha regular com tamanho da célula igual a 1/4 do espaçamento entre as linhas de voo (Li & Goetze, 1999), ou seja, 125x125 metros (Figura 1.5.5).

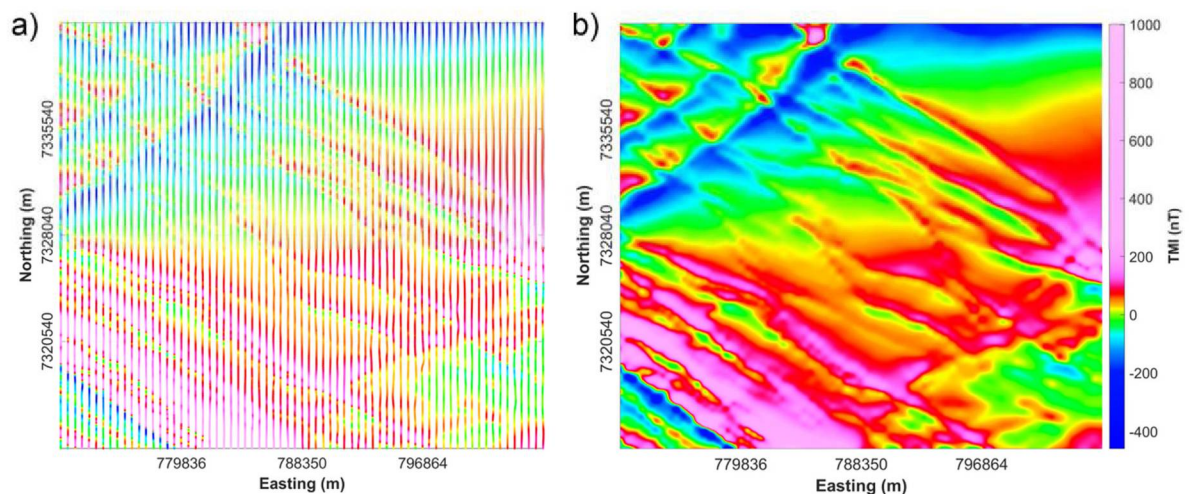


Figura 1.5.5 – Dado aeromagnético referente à área de estudo. a) Disposição espacial dos dados aeromagnéticos sem interpolar. b) Dado aeromagnético interpolado.

O dado aeromagnético foi interpolado através de um método denominado interpolação inversa (Guo et al. 2012). Este método se aplica a casos onde há dados com zonas de baixa

amostragem, intercalada por zonas de amostragem elevada. A aplicação deste método de interpolação reduz os efeitos causados pela baixa amostragem na direção perpendicular às linhas de voo, comumente verificado em dados aeromagnéticos.

Visto que a maioria das técnicas de processamento assume um campo de indução magnética com magnetização vertical, o dado aeromagnético foi reduzido ao polo utilizando o método proposto por MacLeod et al. (1993). Neste método foi introduzido um parâmetro de estabilização para dados localizados em baixas latitudes magnéticas, denominado pseudo-inclinação, uma vez que o filtro de redução ao polo nos domínios do tempo e da frequência é instável em baixas latitudes (Li, 2008).

O método de redução ao polo utilizado constitui-se de um filtro que, aplicado ao dado no domínio da frequência, produz a devida correção. O dado reduzido ao polo é obtido por meio da multiplicação das anomalias no domínio da frequência pelo filtro, seguido da aplicação da transformada inversa de Fourier para retornar ao domínio do espaço. A equação, em coordenadas polares, que caracteriza o filtro de redução ao polo é mostrada a seguir (Eq. 1.5.1).

$$R(\theta) = \frac{(\sin(I) - i \cos(I) \cos(D - \theta))^2}{(\sin^2(I_a) + \cos^2(I_a) \cos^2(D - \theta))(\sin^2(I) + \cos^2(I) \cos^2(D - \theta))}, \quad (1.5.1)$$

onde $\theta = \text{atan}(k_y/k_x)$ representa o azimute, k_x e k_y denotam os números de onda nas direções x e y , respectivamente, I e D representam a inclinação e declinação magnética e I_a representa a inclinação de correção de amplitude ou pseudo-inclinação.

Para a redução ao polo utilizaram-se valores de -35 e -19 graus para a inclinação e declinação magnética, respectivamente. Estes valores foram obtidos inserindo a data média e as coordenadas do centro do levantamento no site da NOAA. O valor escolhido para a pseudo-inclinação foi -55 graus, que equivale ao complemento da inclinação magnética (MacLeod et al., 1993). O dado reduzido ao polo é mostrado na Figura 1.5.6.

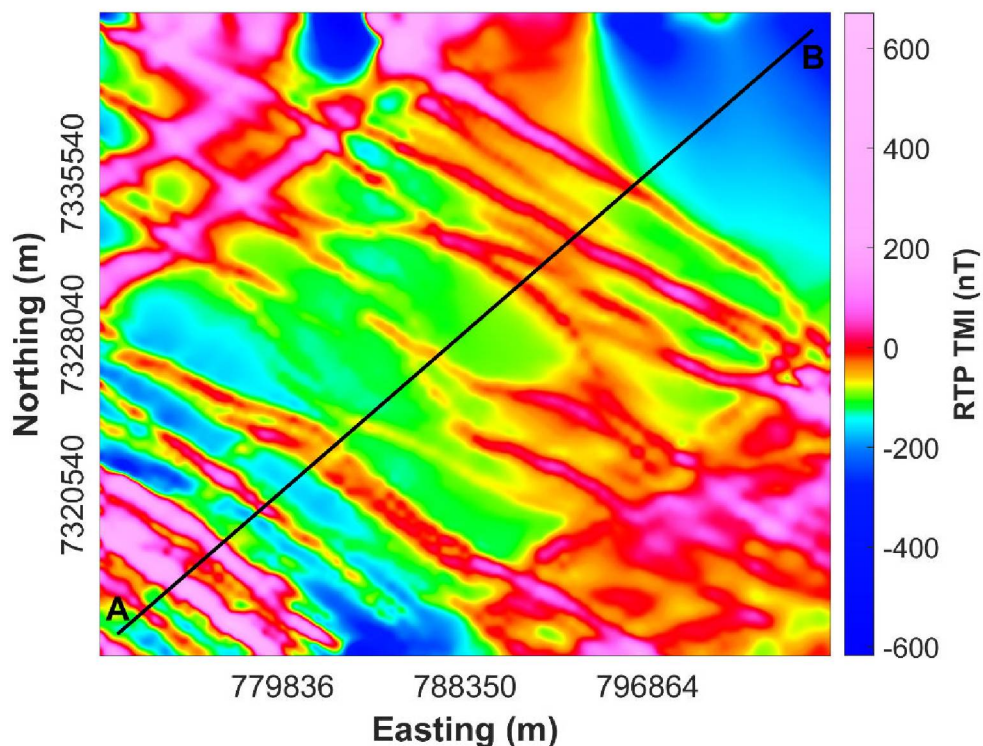


Figura 1.5.6 – Campo magnético anômalo reduzido ao polo.

O filtro de redução ao polo aplicado ao dado da Figura 1.5.5b não contabiliza efeitos associados à magnetização remanescente. Dessa maneira, se os corpos possuírem magnetização remanescente dominante sobre a magnetização induzida, a aplicação deste filtro pode produzir resultados não satisfatórios, com anomalias ainda apresentando um caráter dipolar. Para testar se a área de estudo apresenta esse problema, foram comparados perfis antes e depois da aplicação do filtro de redução ao polo e, se o gradiente máximo do perfil reduzido coincidir com o pico do perfil não reduzido, conclui-se que as anomalias não apresentam magnetização remanescente dominante sobre a induzida (Figura 1.5.7).

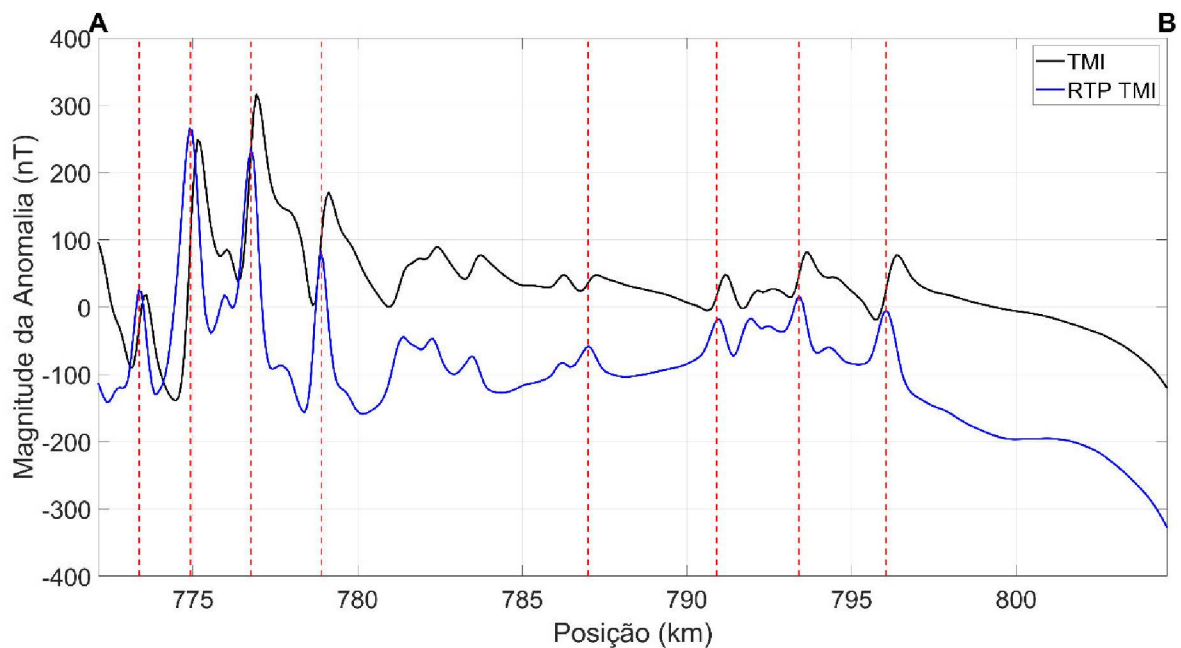


Figura 1.5.7 – Comparação entre perfis do campo magnético anômalo normal (TMI) e reduzido ao polo (RTP TMI) da área de estudo.

Os perfis da Figura 1.5.7 mostram que a redução ao polo do campo magnético anômalo da área de estudo, com os valores de inclinação e declinação iguais a -35 e -19 graus, foi suficiente para remover o caráter dipolar das anomalias.

O dado aeromagnético, representado na Figura 1.5.6, foi utilizado como dado de entrada para a aplicação dos métodos qualitativos e semiquantitativos implementados. As informações extraídas dos produtos gerados pela aplicação das técnicas foram utilizadas no estudo de algumas das anomalias presentes neste dado.

1.5.3. MATLAB

O *MATLAB*, acrônimo do termo *Matrix Laboratory*, é um sistema interativo desenvolvido pela empresa *Mathworks*®, que integra um conjunto de funcionalidades voltadas para métodos numéricos, construção de gráficos e desenvolvimento de interfaces gráficas de usuário. Desde sua data de criação, no fim dos anos 70, o *MATLAB* apresenta constantes atualizações e novas funcionalidades continuam a serem implementadas, de modo que a versão r2018a apresenta funções suficientes para o desenvolvimento de um programa de código aberto para o processamento de dados de campos potenciais.

A linguagem de programação usada no *MATLAB* é uma linguagem multiparadigma e interpretada, denominada *MATLAB SCRIPT*. O fato de o *MATLAB SCRIPT* ser uma linguagem interpretada força os programas desenvolvidos em ambiente *MATLAB* dependerem da execução, em primeiro plano, do mesmo. Esta característica faz com que os

programas desenvolvidos com linguagens interpretadas apresentem tempos de processamento maiores que os verificados em programas desenvolvidos em linguagens compiladas, como *C* e *Fortran*. Entretanto, o tratamento matricial do *MATLAB SCRIPT* permite que diversos problemas numéricos sejam resolvidos em pequenas frações de tempo, o que compensa parte do déficit de eficiência inerente das linguagens interpretadas, e torna o *MATLAB*, dentre outros fatores, um dos melhores candidatos ao desenvolvimento de ferramentas de cunho científico.

A linguagem de programação *MATLAB SCRIPT* tem suporte à orientação a objetos, que, dentre outras características, possibilita a construção de interfaces gráficas de usuário. Antes de discorrer sobre como o programa foi desenvolvido, é necessário definir alguns conceitos básicos de orientação à objetos (Tabela 1.5.3).

Tabela 1.5.3 – Conceitos básicos de orientação a objetos.

Classe	Estrutura constituída por códigos que definem o comportamento e o estado de um objeto.
Atributo	É a característica ou estado de um objeto.
Método	É a função que um objeto executa.
Objeto	Exemplar de uma classe.
Instanciamento	Processo de criação de um objeto.

Dessa maneira, o desenvolvimento de uma interface gráfica ocorre por meio da criação de objetos gráficos (janelas, botões, tabelas, textos, caixas de entrada, gráficos, dentre outros). Os códigos fontes destes componentes gráficos são agrupados em estruturas denominadas classes, que armazenam todas as características (atributos) e funções (métodos) que estes componentes podem possuir e executar. Ao criar um objeto é possível acessar os códigos da sua classe de origem e modificar suas características visuais e semânticas por meio da manipulação dos valores dos atributos e da execução de métodos.

A criação de objetos é realizada por meio da chamada do nome da classe seguido ou não de parênteses. Os parênteses têm a função de agrupar os atributos da classe instanciada que se deseja editar, porém, se no momento da criação do objeto o programador optar por não editar nenhum atributo, os parênteses não são necessários. A edição dos atributos é realizada por meio de dois campos, sendo o primeiro uma *string*, que indica o nome do atributo a ser editado e o segundo podendo ser um valor do tipo inteiro, ponto flutuante, lógico e ou até mesmo do tipo *string*, que altera o estado do atributo em edição.

A criação de uma janela é o primeiro passo para o desenvolvimento de uma interface gráfica de usuário, uma vez que ela tem como principal função agrupar outros componentes gráficos. A Figura 1.5.8 ilustra o código fonte de uma função em linguagem *MATLAB SCRIPT*, que cria uma janela.

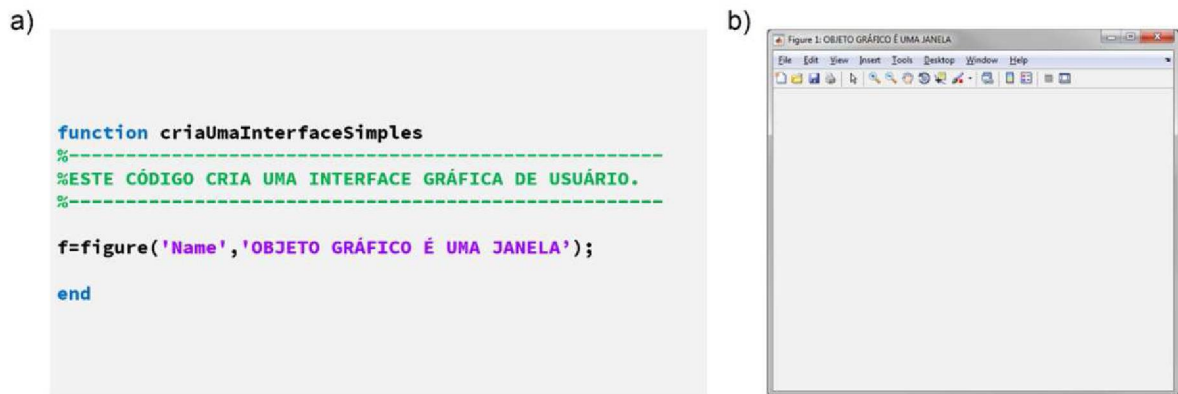


Figura 1.5.8 – Exemplo da criação de um objeto. a) Código em linguagem *MATLAB SCRIPT*. b) Resultado gráfico do código em a).

A alteração dos atributos de uma classe instanciada pode ser feita no momento da criação do objeto ou posterior ao instanciamento. No caso representado na figura 1.5.8 a criação de uma janela é realizada por meio do instanciamento da classe *figure()*, seguido da edição do atributo 'Name', que altera o nome da figura para a *string* 'OBJETO GRÁFICO É UMA JANELA'.

A adição de novos componentes gráficos a janela criada ocorre pela relação *parent/children*. Para indicar que um botão deve ser adicionado a uma janela é preciso informar, no instanciamento da classe que gera o botão, o nome da variável associada ao objeto gráfico da janela, como primeiro atributo. Na linguagem *MATLAB SCRIPT*, a criação de um botão é realizada por meio da classe *uicontrol*, responsável, também, pela criação de outros objetos gráficos. No exemplo da Figura 1.5.8 a adição de um botão a janela se dá pelo seguinte código: *btn = uicontrol(f, 'Style', 'pushbutton')*. Dessa maneira, a variável *f* funciona como *parent* do objeto referente ao botão, enquanto que a variável *btn* funciona como *children* do objeto referente à janela (Figura 1.5.9).

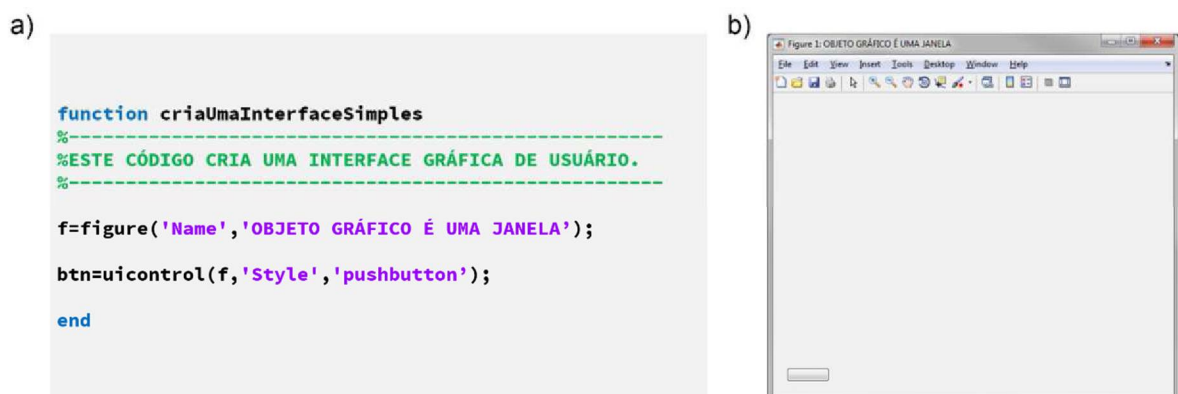


Figura 1.5.9 – Exemplo da adição de um botão a uma janela. a) Código em linguagem *MATLAB SCRIPT*. b) Resultado gráfico do código em a).

Nota-se que com apenas a indicação do *parent* e do atributo 'Style', o botão criado não apresenta utilidade, sendo necessário acessar mais atributos da classe *uicontrol* de modo a editar características como o texto do corpo do botão, a localização do mesmo na janela e a função que é disparada quando o usuário clica sobre o mesmo. A edição posterior dos atributos se dá por meio dos métodos acessores *get()* e *set()*. O método *get()* acessa o valor

atual de um atributo, enquanto que o método `set()` modifica o valor ou o estado atual de um atributo (Figura 1.5.10).

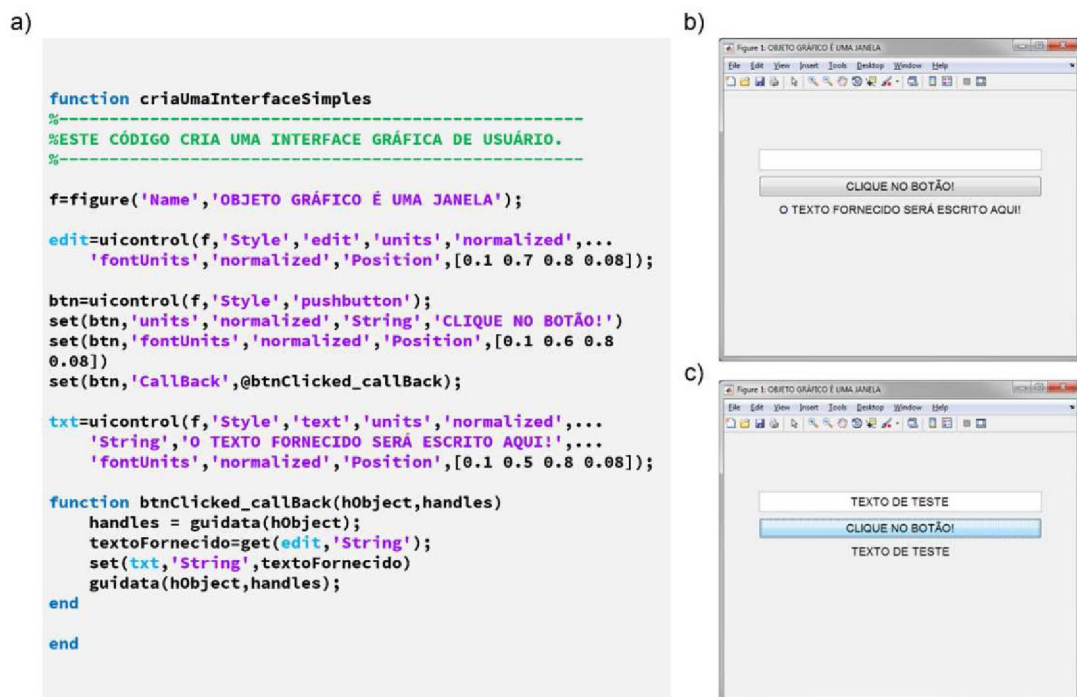


Figura 1.5.10 – Exemplo da criação de novos componentes gráficos e da edição de seus atributos. a) Código em linguagem *MATLAB SCRIPT*. b) Interface gráfica gerada pelo código em a) antes da execução da função associada ao botão. c) Interface gráfica após a execução da função associada ao botão.

Com o código referente a Figura 1.4.10 a interface gráfica gerada apresenta novos componentes gráficos com aparência editada e funcionalidade. Os componentes gráficos apresentam-se centralizados na janela e possuem fonte e tamanho maiores. Além do botão, a janela possui um componente de entrada de dados e um componente de texto. A função que gera a interface possui uma função interna, que é executada quando o botão é clicado. Funções desta natureza são denominadas *'callbacks'*. Este tipo de função pode apresentar variáveis de entrada que fazem referência ao objeto gráfico associado (*hObject*) e as informações que o mesmo carrega (*handles*). Na Figura 1.4.10 a função que é disparada ao clicar no botão acessa o texto fornecido pelo usuário ao componente de entrada de dados e atribui tal informação ao componente de texto localizado abaixo do botão.

Conseqüentemente, na medida em que novos componentes gráficos são inseridos em uma janela e dada a complexidade das funções que estes componentes executam, maior e mais complexo fica seu código fonte. Seguindo a lógica do código expresso na Figura 1.4.10 diversas interfaces gráficas de usuário foram desenvolvidas para compor o programa que foi desenvolvido no presente trabalho, denominado Grav Mag Suite. O programa foi disponibilizado no *github* (<https://github.com/fcastro25/GravMagSuite>) e a relação de todas as ferramentas implementadas encontra-se na seção 6.1 dos anexos deste trabalho.

1.6. MÉTODOS

Os métodos implementados no Grav Mag Suite estão divididos em duas categorias. A primeira refere-se aos métodos qualitativos, utilizados para realçar feições ou certas bandas de frequência do dado. A segunda categoria agrupa os métodos semiquantitativos, que

estimam parâmetros de interesse das fontes causadoras, como profundidade, mergulho, contraste da propriedade física, dentre outros.

A Tabela 1.6.1 lista os métodos implementados no Grav Mag Suite.

Tabela 1.6.1 – Técnicas qualitativas e semiquantitativas implementadas no Grav Mag Suite.

TÉCNICAS QUALITATIVAS	Amplitude do sinal analítico (ASA)	TÉCNICAS SEMIQUANTITATIVAS	Deconvolução de Euler Clássica
	Gradiente horizontal total (GHT)		<i>Tilt-Depth</i>
	Inclinação da amplitude do sinal analítico (ISA)		<i>Source Distance</i>
	Inclinação do gradiente horizontal total (IGHT)		
	Theta-map		<i>Transformada Signum</i>
	Inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA_GHT)		
	Gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico (GHT_ISA)		
	Filtros combinados de derivada <i>tilt</i> (ISA+IGHT e ISA-IGHT)		

1.6.1. Técnicas Qualitativas

- Amplitude do Sinal Analítico;

O conceito de sinal analítico nasce em meados do século passado com Ville (1948), que define o sinal analítico $a(x)$ de uma função $f(x)$ como sendo a seguinte função de valores complexos, cuja parte real é a própria $f(x)$ e a parte imaginária é a sua transformada de Hilbert:

$$a(x) = f(x) - iH[f(x)]. \quad (1.6.1)$$

Este mesmo conceito foi aplicado a dados de campos potenciais por Nabighian (1972, 1974), que observou que, para um campo potencial M medido ao longo do eixo x e com altura de observação constante z , gerado por uma estrutura 2D alinhada paralelamente ao eixo z , ortogonal a x , a derivada vertical M_z pode ser obtida a partir da derivada horizontal M_x por meio da transformada de Hilbert:

$$M_z = -H[M_x]. \quad (1.6.2)$$

Além disso, o sinal analítico pode ser expresso em termos das derivadas horizontal e vertical:

$$a(x) = M_x - iH[M_x] = M_x + iM_z. \quad (1.6.3)$$

Embora o sinal analítico seja uma grandeza complexa, a interpretação de corpos magnéticos bidimensionais é realizada através de seu valor absoluto:

$$|a(x)| = \text{ASA} = \sqrt{M_x^2 + M_z^2}. \quad (1.6.4)$$

Para o modelo de anomalia magnética estudado por Nabighian (1972), o valor absoluto ou amplitude do sinal analítico (ASA) de um campo potencial independe da direção do vetor magnetização, o que resultou na aplicação do ASA como um método alternativo à redução ao polo de dados em perfil.

O conceito de sinal analítico para dados com dimensionalidade superior a 2D foi expandido em Nabighian (1984), porém nenhuma expressão sobre a amplitude do sinal analítico foi fornecida. Roest et al. (1992) propôs a expressão da amplitude do sinal analítico tridimensional como sendo a raiz quadrada da soma das derivadas do campo potencial ao quadrado nas direções ortogonais x , y e z :

$$ASA = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}. \quad (1.6.5)$$

A Equação 1.6.5 foi deduzida com base em diversas suposições referentes ao caso bidimensional (Nabighian 1972; 1974) e algumas propriedades inerentes à técnica nem sempre são válidas em corpos tridimensionais, como a invariabilidade do método para diferentes vetores de magnetização (Li, 2006).

A Figura 1.6.1 explicita o comportamento da amplitude do sinal analítico sobre corpos tridimensionais. As figuras 1.6.1 (a) e (b) representam anomalias magnéticas causadas por um modelo composto corpos prismáticos verticais com 100 e 200 metros de profundidade de topo, porém com inclinações e declinações magnéticas distintas. A figura 1.6.1 (a) caracteriza uma anomalia magnética no polo, enquanto que a figura 1.6.1 (b) representa uma anomalia causada por um campo de indução magnética comum de latitudes intermediárias.

Após a aplicação da amplitude do sinal analítico (Figuras 1.6.1c e 1.6.1d), nota-se que os resultados para ambas as anomalias são distintos, o que refuta a afirmação de que este filtro pode funcionar, de forma generalizada, como um método de redução ao polo. Porém, os perfis extraídos perpendicularmente à direção dos corpos fontes (Figuras 1.6.1e e 1.6.1f) mostram o comportamento oposto, dando a falsa impressão de que a amplitude do sinal analítico removeu o caráter dipolar de anomalias magnéticas.

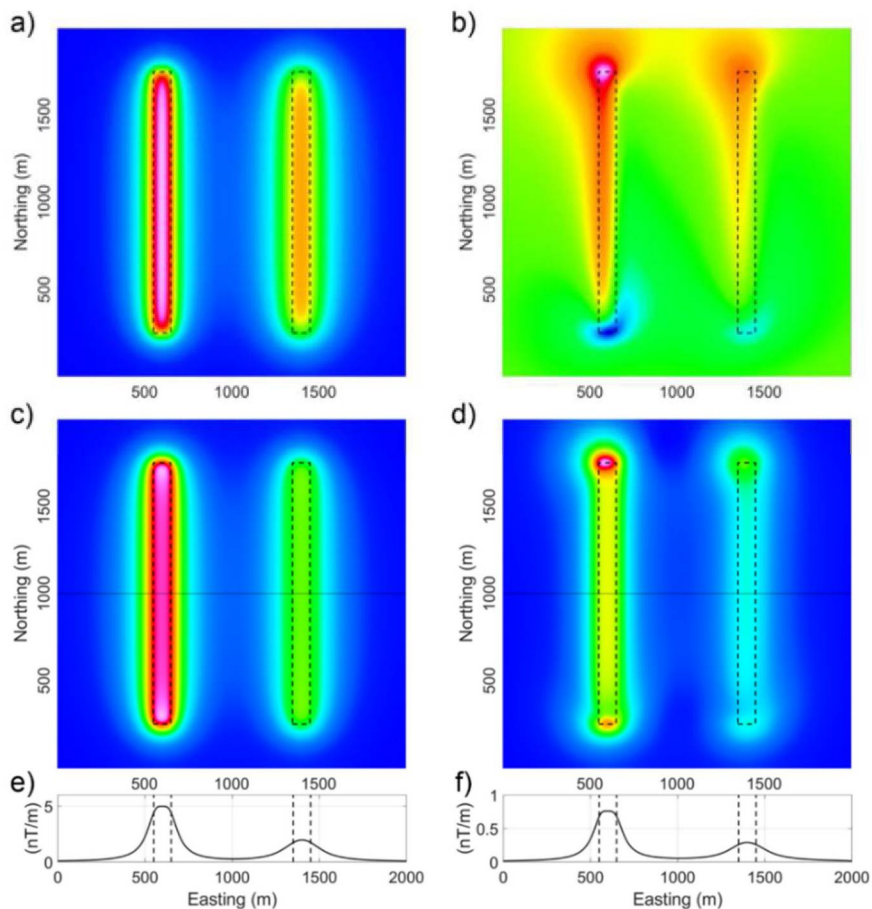


Figura 1.6.1 – Amplitude do sinal analítico causado por dois prismas com profundidades de topo distintas para diferentes campos de indução magnética. a) CMA no polo ($I=90^\circ$, $D=0^\circ$). b) CMA em Curitiba ($I=-35.5^\circ$, $D=-18^\circ$). c) ASA referente ao CMA no polo. d) ASA referente ao CMA em Curitiba. e) Perfil extraído da Figura 1.6.1c. f) Perfil extraído da Figura 1.6.1d.

As Figuras 1.6.1e e 1.6.1f mostram que a amplitude do sinal analítico de anomalias magnéticas bidimensionais com inclinações e declinações magnéticas distintas possui a mesma forma, porém, em corpos tridimensionais esse comportamento não se verifica (Figuras 1.6.1c e 1.6.1d).

- Gradiente Horizontal Total;

O gradiente horizontal total (GHT) é um método detector de borda que faz uso das derivadas horizontais do campo magnético para realçar os limites das fontes causadoras das anomalias (Cordell & Grauch, 1982). O GHT é dado pela raiz quadrada da soma das derivadas horizontais do campo magnético ao quadrado:

$$\text{GHT} = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2}. \quad (1.6.6)$$

O GHT é um método sensível à profundidade das fontes, ou seja, corpos com dimensões horizontais iguais e com profundidades de topo distintas resultam em gradientes horizontais totais distintos. O GHT associado a um corpo raso possui picos elevados e próximos às bordas reais do corpo, enquanto que o GHT referente a um corpo profundo apresenta picos atenuados e deslocados da borda real do corpo (Figura 1.6.2).

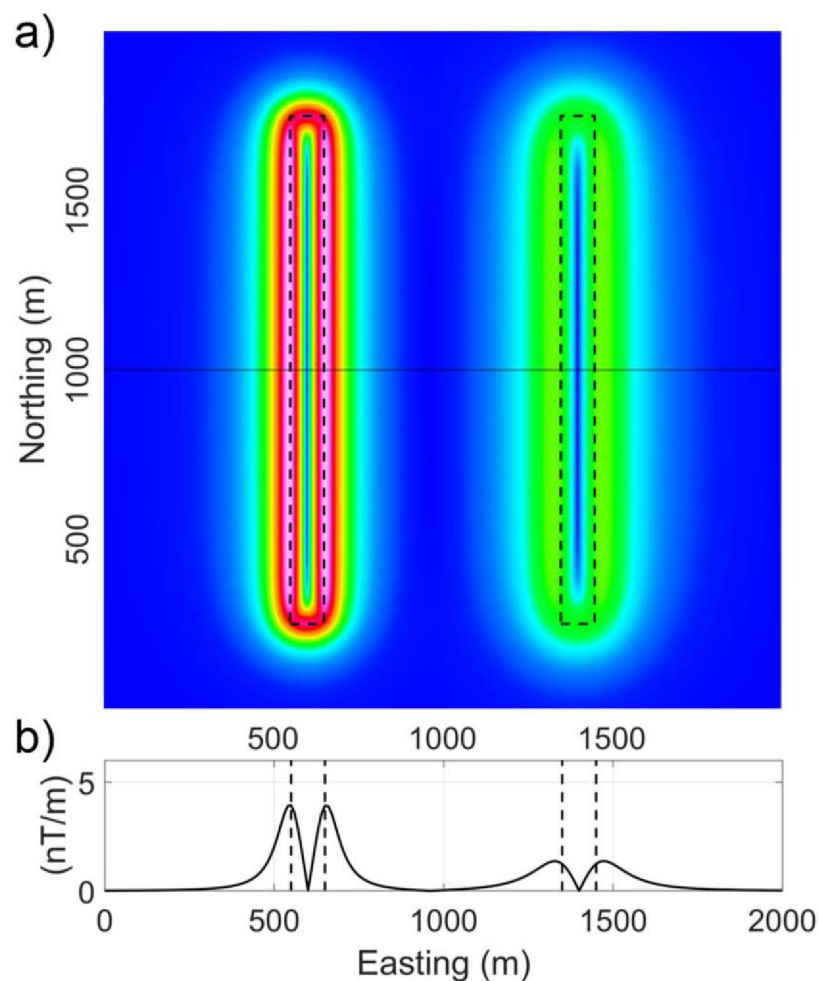


Figura 1.6.2 – Gradiente horizontal total causado por dois prismas com profundidades de topo distintas. a) GHT em planta. b) GHT em perfil.

- Inclinação da amplitude do sinal analítico;

Miller & Singh (1994) propuseram, como método de realce, a inclinação da amplitude do sinal analítico (ISA), definido como o arco tangente da razão entre a derivada vertical do campo e seu gradiente horizontal total:

$$\text{ISA} = \text{atan} \left(\frac{M_z}{GHT} \right) = \text{atan} \left(\frac{\frac{\partial M}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y} \right)^2}} \right). \quad (1.6.7)$$

O ISA possui a propriedade de ser positivo sobre as fontes causadoras, atingir valores nulos próximo do limite dos corpos e ser negativo na ausência de fontes. Devido à normalização pelo gradiente horizontal total, o ISA apresenta a propriedade de equalizar a magnitude das anomalias, independentemente das profundidades dos corpos fonte, de modo que o que difere um ISA referente a um corpo raso de um ISA associado a um corpo profundo é o comprimento de onda do mesmo (Figura 1.6.3).

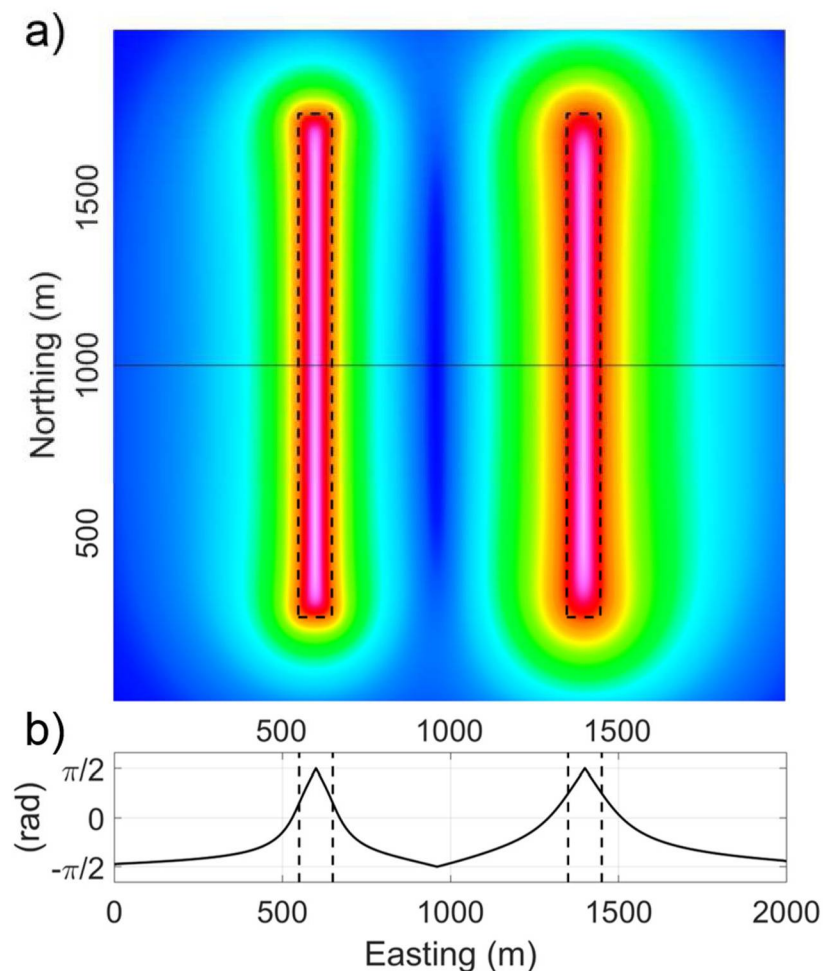


Figura 1.6.3 – Inclinação da amplitude do sinal analítico causado por dois prismas com profundidades de topo distintas. a) ISA em planta. b) ISA em perfil.

- Inclinação do gradiente horizontal total;

Cooper & Cowan (2006) propuseram, como método detector de borda, a inclinação do gradiente horizontal total (IGHT). O IGHT é considerado uma versão normalizada do gradiente horizontal total e é representado pela seguinte expressão:

$$\text{IGHT} = \text{atan}\left(\frac{\text{GHT}}{|M_z|}\right) = \text{atan}\left(\frac{\sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2}}{\left|\frac{\partial M}{\partial z}\right|}\right). \quad (1.6.8)$$

O IGHT, por ser um método detector de borda, apresenta picos próximos aos limites das fontes causadoras, ao contrário do ISA, que possui picos sobre o eixo central dos corpos. Apesar do IGHT e GHT serem métodos detectores de bordas, o primeiro possui a propriedade de equalizar a magnitude das anomalias geradas por fontes com profundidade de topo distintas, devido à normalização (Figura 1.6.4).

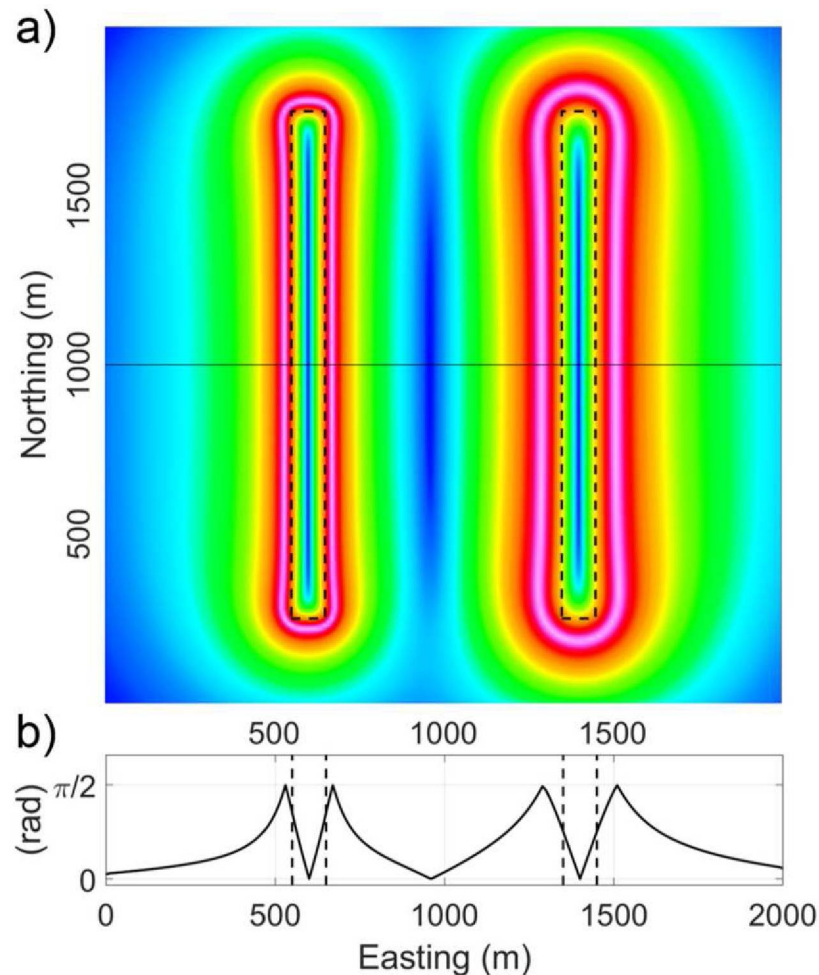


Figura 1.6.4 – Inclinação do gradiente horizontal total causado por dois prismas com profundidades de topo distintas. a) IGHT em planta. b) IGHT em perfil.

- *Theta-Map*;

Wijns et al. (2005) propuseram uma técnica de processamento derivada do sinal analítico, denominada *Theta Map* e capaz de detectar as bordas dos corpos, independentemente da direção e da amplitude das anomalias, além de fornecer informações que podem ser utilizadas na estimativa da direção do mergulho das estruturas. A expressão que caracteriza o *Theta Map* encontra-se representada abaixo:

$$\text{Theta Map} = \text{acos} \left(\frac{GHT}{ASA} \right) = \text{acos} \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2}} \right). \quad (1.6.9)$$

As bordas dos corpos são caracterizadas por valores do *Theta Map* próximos de zero. Este método de realce, demarca o centro dos corpos com picos com valores próximos a $\pi/2$, porém existem picos com essa característica que não estão associados a fontes causadoras (Figura 1.6.5).

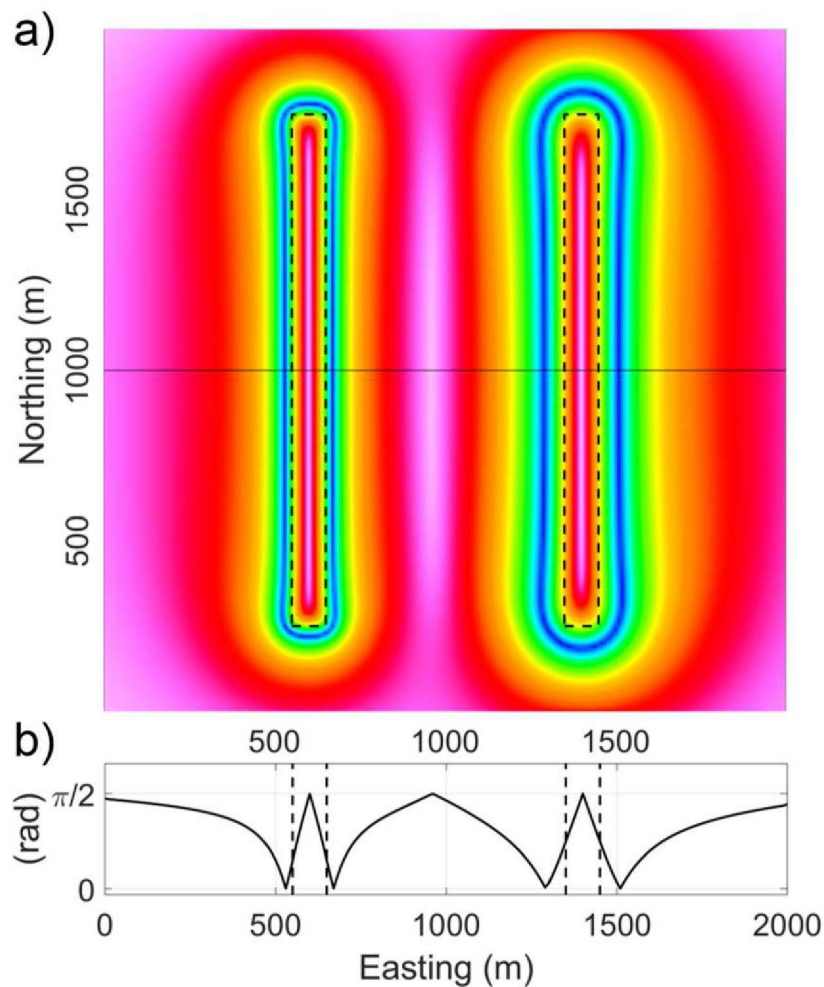


Figura 1.6.5 – *Theta Map* causado por dois prismas com profundidades de topo distintas. a) *Theta Map* em planta. b) *Theta Map* em perfil.

Cabe enfatizar que alguns métodos qualitativos foram apontados na literatura como sendo redundantes (Pilkington & Tschirhart, 2017), sendo alguns deles equivalentes, como

indicado por Ferreira et al. (2013), que apresenta uma síntese da relação entre os filtros ISA, IGHT e theta map.

- Gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico;

Verduzco et al. (2004) propuseram um método detector de borda de derivada de segunda ordem baseado no gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico.

$$\text{GHT_ISA} = \sqrt{\left(\frac{\partial \text{ISA}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \text{ISA}}{\partial y}\right)^2}. \quad (1.6.10)$$

Este método equivale ao valor absoluto do número de onda local e não possui a característica de equalizar o sinal gerado por fontes localizadas em profundidades distintas (Figura 1.6.6).

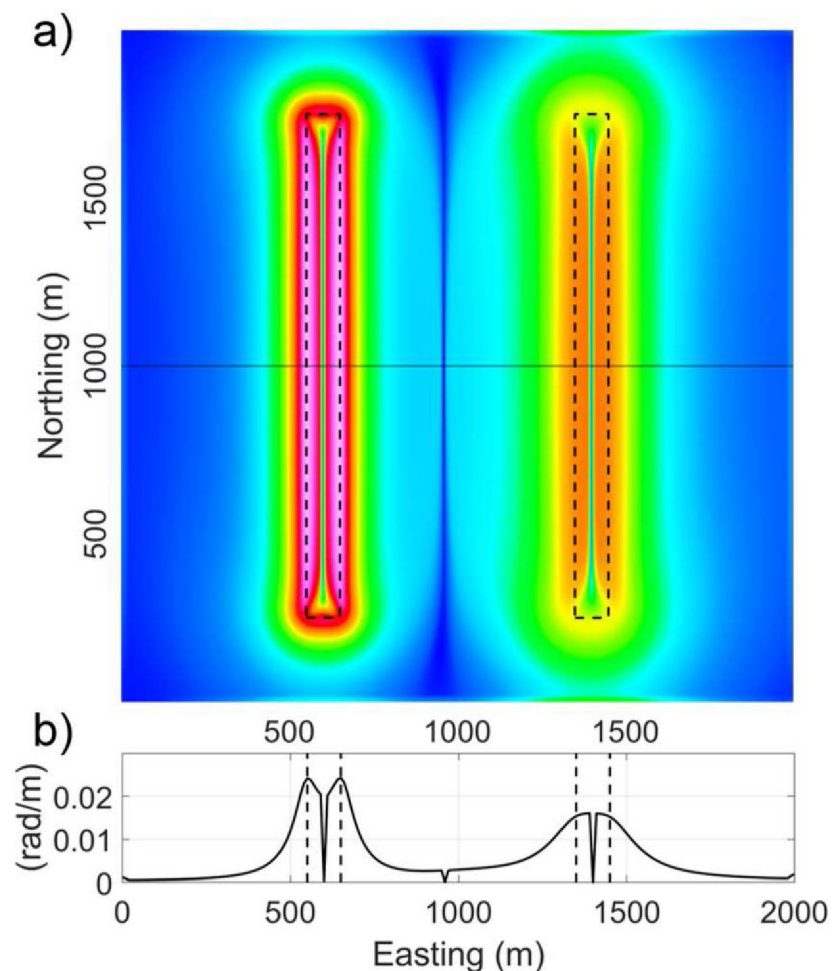


Figura 1.6.6 – Gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico causado por dois prismas com profundidades de topo distintas. a) GHT_ISA em planta. b) GHT_ISA em perfil.

- Inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total;

Ferreira et al. (2013) propuseram, como método detector de borda, a inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA_GHT). O ISA_GHT é obtido pelo arco tangente da razão entre a derivada vertical do gradiente horizontal total e seu módulo.

Este método, por se tratar de uma técnica que faz uso de derivadas de segunda ordem, delimita com melhor precisão as fontes causadoras, uma vez que o deslocamento entre o máximo do ISA_GHT e as bordas reais dos corpos é menos acentuado. Outra vantagem da técnica é referente à equalização do sinal, devido à normalização (Figura 1.6.7).

$$\text{ISA_GHT} = \text{atan} \left(\frac{\left(\frac{\partial \text{GHT}}{\partial z} \right)}{\sqrt{\left(\frac{\partial \text{GHT}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \text{GHT}}{\partial y} \right)^2}} \right). \quad (1.6.11)$$

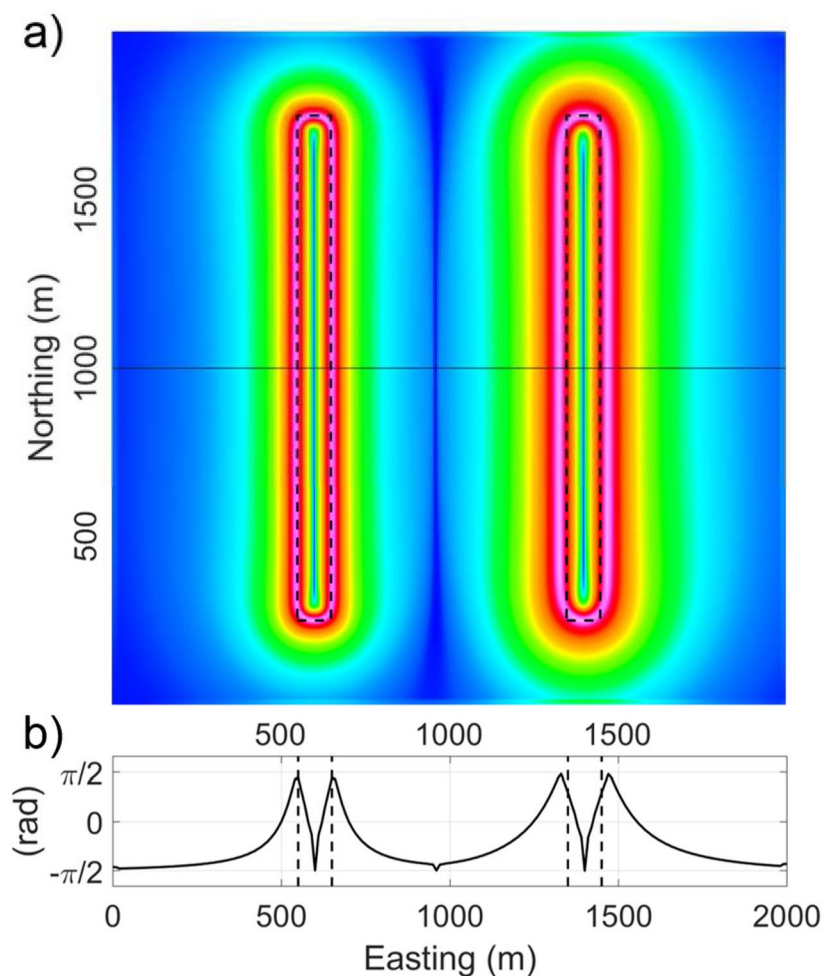


Figura 1.6.7 – Inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total causado por dois prismas com profundidades de topo distintas. a) ISA_GHT em planta. b) ISA_GHT em perfil.

Embora as derivadas de segunda ordem produzam assinaturas que melhor caracterizam as bordas de fontes profundas, estas também amplificam o ruído, sem necessariamente afetar a razão sinal-ruído (vide Ferreira et al., 2013, Figura 5).

1.6.2. Técnicas Semiquantitativas

As técnicas semiquantitativas, ou de interpretação (Hartman et al., 1971), visam extrair do campo anômalo informações referentes aos corpos causadores das anomalias de interesse, como profundidade, mergulho e contraste de susceptibilidade magnética e

densidade e diferem dos métodos qualitativos, onde filtros diversos são aplicados aos dados, com o objetivo de realçar as características das anomalias relacionadas aos corpos causadores.

Os métodos semiquantitativos podem, tanto fazer uso direto dos campos anômalos, quanto fazer uso indireto dos mesmos, por meio de produtos como a amplitude do sinal analítico (ASA), gradiente horizontal total (GHT), inclinação da amplitude do sinal analítico (ISA), dentre outros.

- Deconvolução de Euler Clássica;

Impulsionadas pela necessidade de processar grandes volumes de dados de campos potenciais aferidos a partir dos anos 70, diversas técnicas automatizadas de processamento foram desenvolvidas. Dentre elas, destaca-se a deconvolução de Euler (Thompson, 1982; Reid et al., 1990). A formulação padrão da deconvolução de Euler afirma que um campo magnético M aferido em (x, y, z) , associado a uma fonte pontual localizada em (x_0, y_0, z_0) satisfaz a equação homogênea de Euler:

$$(x - x_0) \frac{\partial M}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial M}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial M}{\partial z} = -\eta M, \quad (1.6.12)$$

em que η é o grau de homogeneidade ou índice estrutural, parâmetro associado à taxa de decaimento da anomalia magnética com relação à distância entre a fonte e o ponto de aferição e B representa um nível de base constante. Considerando que o campo magnético M é dado pela subtração entre um campo H e um nível de base B , tem-se que:

$$(x - x_0) \frac{\partial H}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial H}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial H}{\partial z} = -\eta(H - B). \quad (1.6.13)$$

Rearranjando a Equação 1.6.13, obtém-se:

$$x_0 \frac{\partial H}{\partial x} + y_0 \frac{\partial H}{\partial y} + z_0 \frac{\partial H}{\partial z} + \eta B = x \frac{\partial H}{\partial x} + y \frac{\partial H}{\partial y} + z \frac{\partial H}{\partial z} + \eta H. \quad (1.6.14)$$

A Equação 1.6.14, quando avaliada nos pontos de uma janela sobre o *grid*, resulta em um sistema linear do tipo $Ax = y$, cuja solução fornece uma estimativa para os quatro parâmetros $\{x_0, y_0, z_0, B\}$. Considerando que o número de linhas da matriz, dada pelo número de pontos da janela, em geral é maior que o número de colunas (quatro), a solução x é obtida resolvendo-se o sistema de equações normais $A^T Ax = A^T y$.

Desta maneira, ao calcular as derivadas do campo H nas três direções e escolher um valor para η , pode-se estimar a posição (x_0, y_0, z_0) das fontes causadoras ao resolver o sistema linear.

O algoritmo clássico da deconvolução de Euler possui duas limitações principais relacionadas à necessidade de fornecer um valor para η e à presença de uma nuvem de soluções espúrias. A escolha *a priori* de um valor para η requer que o usuário faça uma análise prévia do dado, quanto à forma das anomalias de interesse, de modo que se produzam resultados interpretáveis. A nuvem de soluções espúrias, relacionada à instabilidade das soluções na presença de ruído, impulsionou o desenvolvimento de diversos métodos que visam reduzir este efeito (Fairhead et al., 1994; Barbosa et al., 1999; Mikhailov et al., 2003; Silva e Barbosa, 2003).

- *Tilt-depth*;

O *Tilt-depth* (Salem, 2007) é uma técnica semiquantitativa capaz de estimar a profundidade de contatos magnéticos. Esta técnica faz uso indireto do campo magnético anômalo, por meio do ISA e calcula a profundidade do topo das fontes causadoras por meio da distância entre as isolinhas 0 e $\pm 45^\circ$. Salem (2007) demonstrou que esta afirmação é válida para o modelo simplificado do contato magnético, com o mergulho e campo de indução magnética verticais, logo, modelos que diferem deste podem estimar profundidades de topo que não correspondem à profundidade real do corpo causador.

Ao simplificar a expressão que caracteriza o ISA (Eq. 1.6.7) para o caso bidimensional, ou seja $\partial M/\partial y = 0$, obtém-se a seguinte expressão:

$$ISA = \text{atan} \left(\frac{\frac{\partial M}{\partial z}}{\left| \frac{\partial M}{\partial x} \right|} \right). \quad (1.6.15)$$

As expressões que caracterizam as derivadas horizontal e vertical do campo magnético gerado por um contato com posição horizontal $x = 0$ e profundidade de topo z_c , foram definidas em Nabighian (1972) e são dadas por:

$$\frac{\partial M}{\partial x} = 2KFc \sin d \left(\frac{z_c \cos(2I - d - 90) + x \sin(2I - d - 90)}{x^2 + z_c^2} \right) \quad (1.6.16)$$

e

$$\frac{\partial M}{\partial z} = 2KFc \sin d \left(\frac{x \cos(2I - d - 90) - z_c \sin(2I - d - 90)}{x^2 + z_c^2} \right). \quad (1.6.17)$$

onde d é o ângulo entre a face que caracteriza o contato e a horizontal, partindo dessa face no sentido horário (vide Figura 2 de Nabighian, 1972).

Ao considerar que o contato e o campo de indução magnética são verticais, tem-se que as Equações 1.6.16 e 1.6.17 simplificam para:

$$\frac{\partial M}{\partial x} = 2KFc \left(\frac{z_c}{x^2 + z_c^2} \right) \quad (1.6.18)$$

e

$$\frac{\partial M}{\partial z} = 2KFc \left(\frac{h}{x^2 + z_c^2} \right). \quad (1.6.19)$$

Aplicando as Equações 1.6.18 e 1.6.19 na equação que define a derivada *tilt* (Eq. 1.6.15), obtém-se a seguinte expressão:

$$ISA = \text{atan} \left(\frac{x}{z_c} \right). \quad (1.6.20)$$

Pela Equação 1.6.20 conclui-se que na medida em que a profundidade do topo do contato z_c tende para a distância x o valor do ISA tende para 45° . Dessa forma, ao se calcular a distância entre as isolinhas 0 e $\pm 45^\circ$, obtém-se o valor da profundidade do topo da fonte.

- *Source Distance*;

Cooper (2015), baseando-se no modelo de diques finos, propôs que a razão entre amplitudes do sinal analítico de ordens 0 e 1 (ASA_0 e ASA_1 , respectivamente) pode ser utilizada para determinar a profundidade das fontes causadoras:

$$r = \frac{ASA_0}{ASA_1}, \quad (1.6.21)$$

em que $ASA_0 = \sqrt{H[M]^2 + M^2}$ e $ASA_1 = \sqrt{\frac{\partial M^2}{\partial x} + \frac{\partial M^2}{\partial z}}$.

A Equação 1.6.21 é motivada pela equação da anomalia magnética causada pelo modelo de diques finos, proposta por Reford (1964) e expressa da seguinte forma:

$$M = 2KFcw \left(\frac{x \sin(2I - d - 90) - z \cos(2I - d - 90)}{x^2 + z^2} \right). \quad (1.6.22)$$

Aplicando a transformada de Hilbert em M obtém-se a seguinte expressão:

$$H[M] = 2KFcw \left(\frac{z \sin(2I - d - 90) + x \cos(2I - d - 90)}{x^2 + z^2} \right). \quad (1.6.23)$$

Segue das expressões acima que amplitude do sinal analítico de ordem 0 é dada por:

$$ASA_0 = \frac{2KFcw}{\sqrt{x^2 + z^2}}. \quad (1.6.24)$$

Analogamente, a expressão da amplitude do sinal analítico de ordem 1 é obtida ao derivar a Equação 1.6.22 nas direções x e z (Eq. 1.6.25).

$$ASA_1 = \frac{2KFcw}{x^2 + z^2}. \quad (1.6.25)$$

Ao aplicar a razão entre a amplitude do sinal analítico de ordens 0 e 1, dada pela equação 1.6.21, obtém-se:

$$r = \frac{ASA_0}{ASA_1} = \frac{\frac{2KFcw}{\sqrt{x^2 + z^2}}}{\frac{2KFcw}{x^2 + z^2}} = \frac{x^2 + z^2}{\sqrt{x^2 + z^2}}. \quad (1.6.26)$$

Sobre o centro do dique ($x=0$), tem-se que a Equação 1.6.26 reduz para:

$$r = \frac{0 + z^2}{\sqrt{0 + z^2}} = \frac{z^2}{z} = z. \quad (1.6.27)$$

Contudo, a razão entre amplitudes de sinal analítico de ordens 0 e 1 fornece a profundidade das fontes em pontos localizados sobre o eixo dos diques.

- Transformada *Signum*;

Trabalhos recentes aplicaram a Transformada *Signum* em campos magnéticos anômalos causados por diques (Souza & Ferreira, 2012, 2013, 2015; Oliveira et al., 2017). A Transformada *Signum* de uma função arbitrária $f(x)$ é dada pela seguinte expressão:

$$TS[f(x)] = \begin{cases} \frac{f(x)}{|f(x)|}, & f(x) \neq 0, \\ 1, & f(x) = 0. \end{cases} \quad (1.6.28)$$

Se a função $f(x)$ for, por exemplo, a derivada vertical de um campo magnético anômalo $\partial M / \partial z$, tem-se que a Transformada *Signum* desta função retorna uma função sinal que é positiva e igual a 1 sobre as fontes causadoras, negativa e igual a -1 onde não há fonte e nula na borda do corpo.

A anomalia magnética causada por um dique é dada pela seguinte expressão (Rao et al., 1973):

$$M = 2J_f \sin \theta \left(\cos Q_f (\theta_A - \theta_B) + \sin Q_f \ln \left(\frac{r_B}{r_A} \right) \right), \quad (1.6.29)$$

em que $(\theta_A - \theta_B) = \text{atan} \left(\frac{x+a}{z} \right) - \text{atan} \left(\frac{x-a}{z} \right)$, $r_A = \sqrt{(x+a)^2 - z^2}$, $r_B = \sqrt{(x-a)^2 - z^2}$, a é a espessura do dique, θ é o mergulho do dique, J_f é um coeficiente associado à intensidade da magnetização e Q_f é um parâmetro que relaciona a declinação efetiva do vetor magnetização e o mergulho do corpo.

Para um dique com mergulho e campo de indução magnética verticais a Equação 1.6.29 reduz para a seguinte forma:

$$M = 2J_f(\theta_A - \theta_B) = 2J_f \left(\text{atan} \left(\frac{x+a}{z} \right) - \text{atan} \left(\frac{x-a}{z} \right) \right). \quad (1.6.30)$$

Igualando a zero as expressões referentes a derivada vertical de primeira ordem ($\partial M / \partial z$), a derivada horizontal de segunda ordem ($\partial^2 M / \partial x^2$) e a diferença entre a derivada vertical e o módulo da derivada horizontal de primeira ordem ($\partial M / \partial z - |\partial M / \partial x|$), obtém-se as seguintes expressões que caracterizam os valores onde $x = 0$:

$$x_v = \pm \sqrt{a^2 + z^2} \quad (1.6.31)$$

e

$$x_{hv-} = \pm h - \sqrt{a^2 + 2z^2}. \quad (1.6.32)$$

A profundidade h e espessura a do dique podem ser calculadas pelas seguintes expressões que relacionam as duas equações anteriores.

$$h = \frac{x_v^2 - x_{hv-}^2}{2x_{hv-}} \quad (1.6.33)$$

e

$$a = \sqrt{x_v^2 + h^2}. \quad (1.6.34)$$

2. RESULTADOS

2.1. ARTIGOS

Durante o desenvolvimento do trabalho, foram submetidos um artigo e um resumo expandido. O artigo, que trata dos métodos qualitativos ISA+IGHT e ISA-IGHT, foi submetido e aceito na Revista Brasileira de Geofísica, enquanto que o resumo expandido, referente ao pacote Grav Mag Suite, foi submetido e aceito no VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica.

COMBINING TILT DERIVATIVE FILTERS: NEW APPROACHES TO ENHANCE MAGNETIC ANOMALIES

Fabício Rodrigues Castro, Saulo Pomponet Oliveira,
Jeferson de Souza and Francisco José Fonseca Ferreira

ABSTRACT. We extend the concept of two earlier enhancement techniques based on the local phase of the magnetic anomaly, namely the vertical (TDR) and horizontal (TDX) tilt angles, which are defined by the inverse tangent of ratios involving the total horizontal gradient and the vertical derivative. These filters are useful to locate both shallow and deep sources, because they equalize the signal amplitudes. The proposed approach is based on the addition and subtraction of TDR and TDX. The TDR+TDX filter produces constant values over the causative bodies, while TDR-TDX generates peaks over the center of bodies and is constant out of them. By applying the proposed techniques to synthetic and aeromagnetic data we show that they locate more clearly the centers and edges of the sources in comparison to TDR and TDX, respectively. The combined filters have essentially the same computational cost as TDR and TDX and can replace them as auxiliary interpretation tools.

Keywords: qualitative methods, local phase filters, aeromagnetic data.

RESUMO. Estendemos o conceito de duas técnicas de realce baseadas na fase local da anomalia magnética: as inclinações do sinal analítico (TDR) e do gradiente horizontal total (TDX), definidos pelo arco tangente de razões envolvendo o gradiente horizontal total e a derivada vertical. Estes filtros são úteis para localizar tanto fontes rasas quanto profundas. O método proposto baseia-se na adição e subtração dos filtros TDR e TDX. O filtro TDR+TDX produz valores constantes sobre as fontes causadoras, enquanto que o TDR-TDX produz picos sobre o centro dos corpos e é constante onde fontes causadoras não são verificadas. Aplicando as técnicas propostas aos dados sintéticos e reais mostra-se que elas localizam mais claramente os centros e as bordas dos corpos em comparação com o TDR e o TDX, respectivamente. Os filtros combinados têm essencialmente o mesmo custo computacional dos filtros originais, TDR e TDX, e podem substituí-los como ferramentas de interpretação.

Palavras-chave: métodos qualitativos, filtros de fase local, dados aeromagnéticos.

INTRODUCTION

Enhancement methods based on first-order derivatives of gravity and magnetic data are commonly employed to locate edges and centers of causative sources. These techniques are robust in the sense that they can cope with low-quality data, and require low computational effort (Pilkington & Tschirhart, 2017). Some traditional methods of this class are the analytic signal amplitude (Nabighian, 1972, 1974; Roest et al., 1992) and the total horizontal gradient (Cordell & Grauch, 1985). These methods have been applied to delineate causative sources in aeromagnetic data (Behrendt et al., 1996; Bastani & Pedersen, 2001), besides being used as ingredients to develop other filters (Wijns et al., 2005; Cooper, 2009; Ferreira et al., 2013).

Later on, several methods have resorted to normalization in order to balance low and high amplitudes due to shallow and deep sources, respectively. Among these, we focus on local phase filters such as Tilt Angle (Miller & Singh, 1994), Theta Map (Wijns et al., 2005), and Horizontal Tilt Angle (Cooper & Cowan, 2006). These filters have been extended to higher-order derivatives as well (Verduzco et al., 2004; Ferreira et al., 2013).

It is well known that some of these methods are equivalent to each other (Pilkington & Tschirhart, 2017). In particular, Ferreira et al. (2013) observed that $|TDR| = TH$, as well as $|TDR| = \pi/2 - TDX$. In this work we explore the latter relation, which grants special properties to two particular combinations of these filters: $TDR+TDX$ and $TDR-TDX$. Even though TDR and TDX have shown to be useful tools for geophysical mapping (Oruç & Selim, 2011; Jordan et al., 2013), these methods do not clearly indicate the boundaries of interfering sources (Zuo et al., 2018).

As we shall see next, $TDR+TDX$ represents an improvement over TDX in the sense that its maximum values are located not only near the edges of the sources, but over the whole sources, resulting in a plateau over them. Likewise, $TDR-TDX$ not only produces a peak over the center of the bodies as TDR , but also generates a plateau over the regions in absence of sources. The plateaus provided by these combined techniques render the potential field easier to interpret.

METHODOLOGY

Let us recall that the TDR and TDX filters are respectively defined as follows:

$$TDR = \tan^{-1} \left(\frac{M_z}{M_h} \right) \tag{1}$$

and

$$TDX = \tan^{-1} \left(\frac{M_h}{|M_z|} \right), \tag{2}$$

where M_z and M_h are vertical and total horizontal derivatives of the anomaly M . Both formulas equalize the field responses due to the characteristics of the arctangent, whose limits range from $-\pi/2$ to $\pi/2$. Moreover, since $|\tan^{-1}(x)| = \tan^{-1}(|x|)$, it follows that

$$|TDR| = \tan^{-1} \left(\frac{|M_z|}{M_h} \right) = \cot^{-1} \left(\frac{M_h}{|M_z|} \right), \tag{3}$$

thus, $\tan(TDX) = \cot(|TDR|)$. If $M_z = 0$, then $TDX = \pi/2$ and $|TDR| = 0$, i.e., $|TDR| = \pi/2 - TDX$. Otherwise, since

$$\tan(TDX) - \cot(|TDR|) = \frac{\cos(TDX + |TDR|)}{\cos(TDX) \sin(|TDR|)} \tag{4}$$

and $\tan(TDX) - \cot(|TDR|) = 0$, it follows that $\cos(TDX + |TDR|) = 0$, and again $|TDR| = \pi/2 - TDX$. This relation can be written as follows:

$$\begin{cases} TDR + TDX = \frac{\pi}{2}, & \text{if } TDR > 0, \\ TDR - TDX = \frac{-\pi}{2}, & \text{if } TDR < 0. \end{cases} \tag{5}$$

Since TDR is positive over a source and negative elsewhere (Miller & Singh, 1994), it turns out that the combined filter $TDR+TDX$ provides a plateau with value $+\pi/2$ over the sources, whereas $TDR-TDX$ produces plateaus with value $-\pi/2$ in regions where sources are not expected.

The $TDR+TDX$ and $TDR-TDX$ filters are implemented within GRAV-MAG SUITE, an open-source MATLAB® graphical environment for processing potential field data (Castro et al., 2018). For implementation in Geosoft's Oasis Montaj® package, we recommend to compute the local phase filters (TDR and TDX) in the "Grid Math Expression Builder" section of "Grid and Image" menu to ensure that all filters will be enclosed in the range $[-\pi/2, \pi/2]$.

Synthetic example

To illustrate the properties of the proposed methods, a synthetic model with three equally-spaced prisms was generated using GRAV-MAG PRISM software (Bongiolo et al., 2013), representing parallel dike-like bodies with different depths to the top (Fig. 1). The model parameters are shown in Table 1. The strength, declination and inclination of the induced field vector are 57000 nT, 0, and 90 degrees, respectively, and no remanent magnetization was considered.

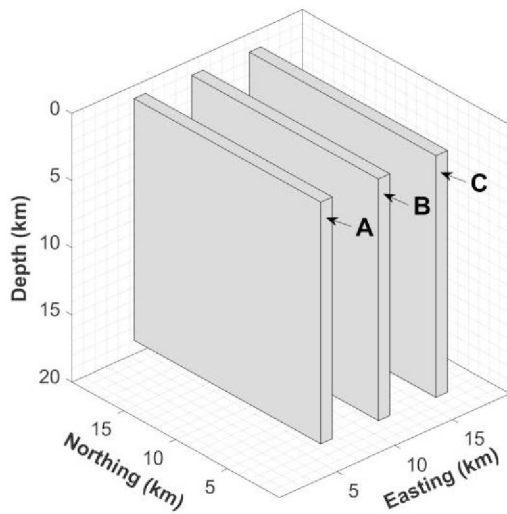


Figure 1 – 3D view of synthetic model.

Table 1 – Geometrical parameters of the synthetic model. X, Y, Z are the coordinates of the prisms.

Prism	A	B	C
X(km)	5	10	15
Y(km)	10	10	10
Z(km)	0.2	0.4	0.6
Length (km)	18	18	18
Width (km)	1	1	1
Thickness (km)	18	18	18

Figure 2 shows the magnetic anomaly, whereas Figures 3 and 4 show $TDR+TDX$ and $TDR-TDX$, respectively. As we previously mentioned, the $TDR+TDX$ map (Fig. 3) shows that the plateaus are located over the sources. Likewise, Figure 4 shows that the $TDR-TDX$ values are maximal over the center of each prism and constant out of them.

The profiles at 10km are gathered in Figure 5. Figure 5a shows the Total Magnetic Intensity (TMI) profile and Figure 5b shows the TMI vertical and horizontal derivatives. Note that $TDR-TDX$ improves TDR by flattening its response away from the sources (Fig. 5c). Moreover, while the TDX produces two sharp peaks over the body's edges, the $TDR+TDX$ yields a plateau between them, which makes the source locations more easily identifiable (Fig. 5d).

Field example

The Ponta Grossa Arch (PGA) is a large uplifted tectonic structure with main axis dipping toward the Paraná Basin interior in a NW direction (Ferreira, 1982). It is composed by four narrow lineaments with approximate extensions of 600 km and widths varying from 20 km to 100 km. These lineaments are approximately aligned to the PGA axis and played an important role in the tectonic evolution of Paraná Basin (Algarte, 1972; Vieira, 1973; Ferreira et al., 1981, 1984; Ferreira, 1982; Almeida, 1983, 1986) (Fig. 6).

The study area comprises part of the Guapiara Lineament which defines the northern limit of Ponta Grossa Arch (Ferreira, 1982). This feature is marked by a swarm of NW Eocretaceous diabase dikes and characterizes a crustal suture related to reactivation of Ponta Grossa Arch, due to huge diastrophism during the Mesozoic (Ferreira et al., 1981). This structure was interpreted by Ferreira & Algarte (1979) as an underfloor expression related to basaltic spills, and alkaline/ultrabasic alkaline vulcanism conditioned by the Guapiara lineament. Figure 7 shows the geological map of study area indicating the diabase dikes (in green) according to Machado Junior (2000).

The aeromagnetic data of study (see location in Fig. 6) were acquired along a north-south flight lines spaced at 500 m and tie lines at 10 km with a mean terrain clearance of 150 m (CPRM, 2011). Figure 8 shows TMI intensity reduced to the pole, whereas Figures 9 to 12 show the corresponding maps of TDR , TDX , $TDR+TDX$ and $TDR-TDX$, respectively.

The TMI anomaly (Fig. 8) shows that the amplitude of some NW-SE anomalies decreases suggesting an increasing depth to top of the corresponding dikes. This behavior is not verified in local phase filters (Figs. 9-12) as the inverse tangent equalizes anomalies related to both deep and shallow sources. On the other hand, these filters may overestimate the lateral limits of deep sources as observed in the synthetic example (Figs. 5c-d).

Note that the dikes contained in the Guapiara Lineament, located at the SW portion of the TMI map (Fig. 8), are blurred by a single anomaly pattern. These dikes can be seen with the TDR filter (Fig. 9) but are best identified in the $TDR-TDX$ map (Fig. 12). The peaks of TDX are difficult to be interpreted as edges without auxiliary filters (e.g., TDR). These peaks are connected by plateaus in $TDR+TDX$, where no further filtering is needed to avoid ambiguity.

The applicability of $TDR \pm TDX$ is valid for reduced to the pole anomalies and vertical dipping dikes. For low latitudes and subvertical dipping dikes the magnetic anomalies present

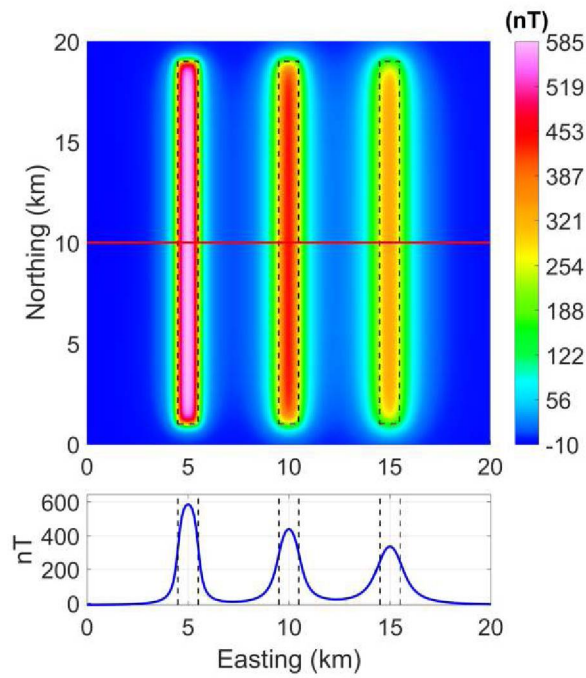


Figure 2 – Total magnetic intensity of the synthetic example with indication of bodies limits (dashed lines) and profile at $y=10$ km (red line).

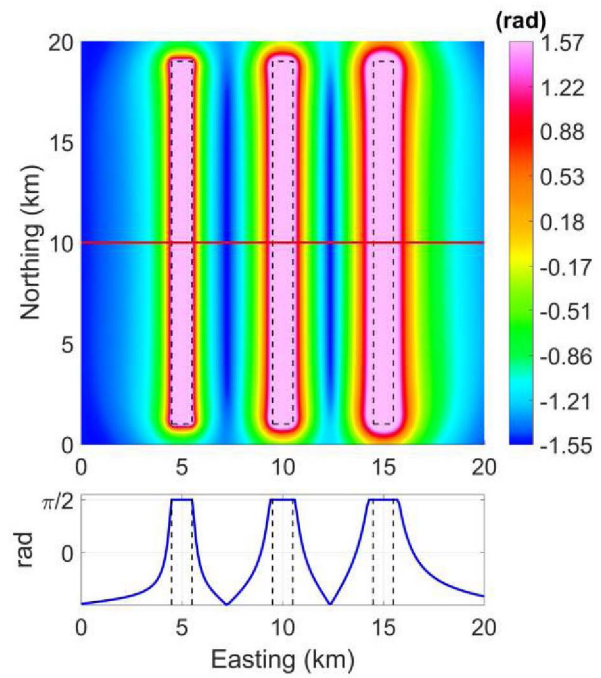


Figure 3 – TDR+TDX of the data in Figure 2 with indication of bodies limits (dashed lines) and profile at $y=10$ km.

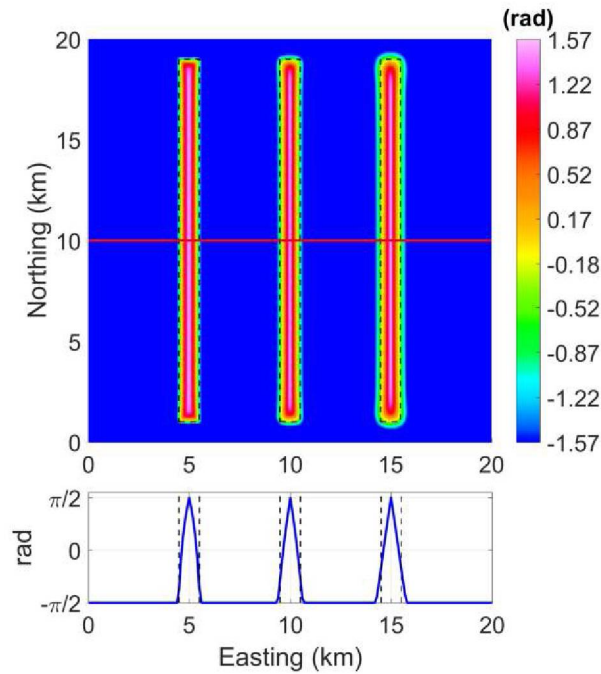


Figure 4 – TDR-TDX of the data in Figure 2 with indication of bodies limits (dashed lines) and profile at $y=10$ km.

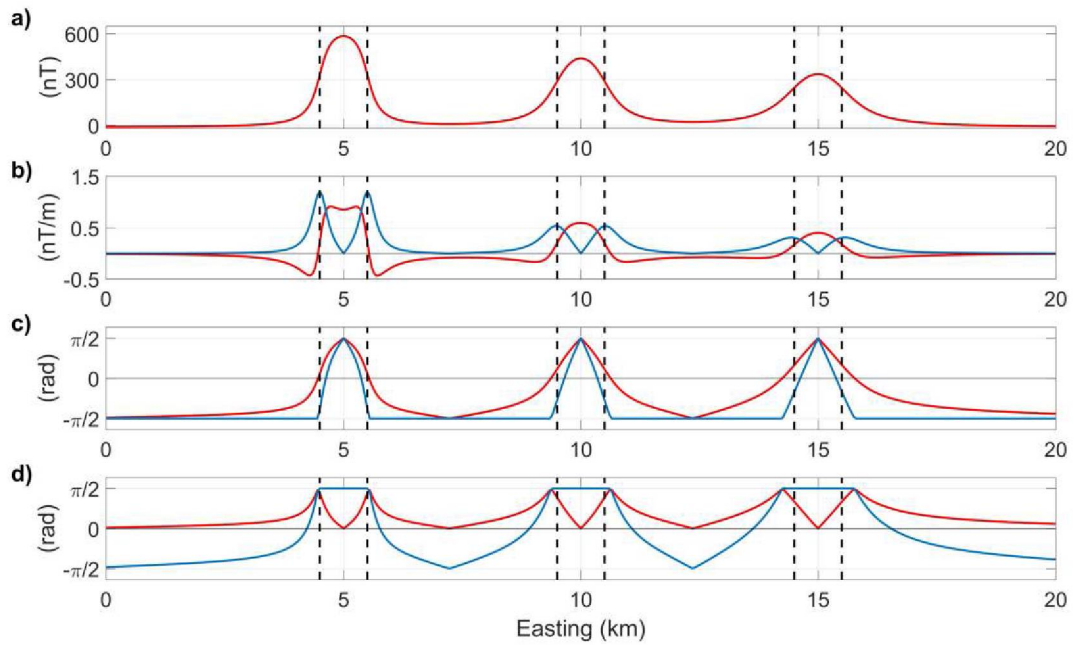


Figure 5 – Profiles at 10km: (a) TMI profile (extracted from Fig. 2); (b) first-order derivatives (red line: M_z and blue line: $|M_x|$); (c) TDX (red line) and $TDR-TDX$ (blue line); (d) TDR (red line) and $TDR+TDX$ (blue line).

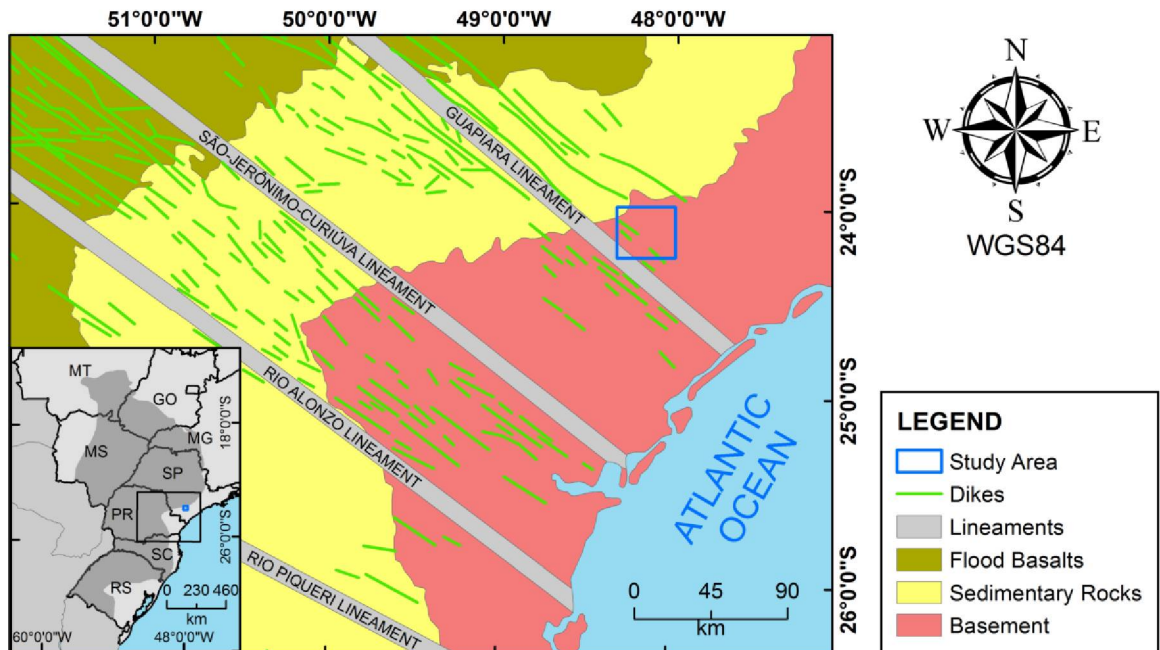


Figure 6 – Sketch map of Ponta Grossa Arch with indication of four lineaments and dike swarm (Ruberti et al., 2005; Gomes et al., 2018)

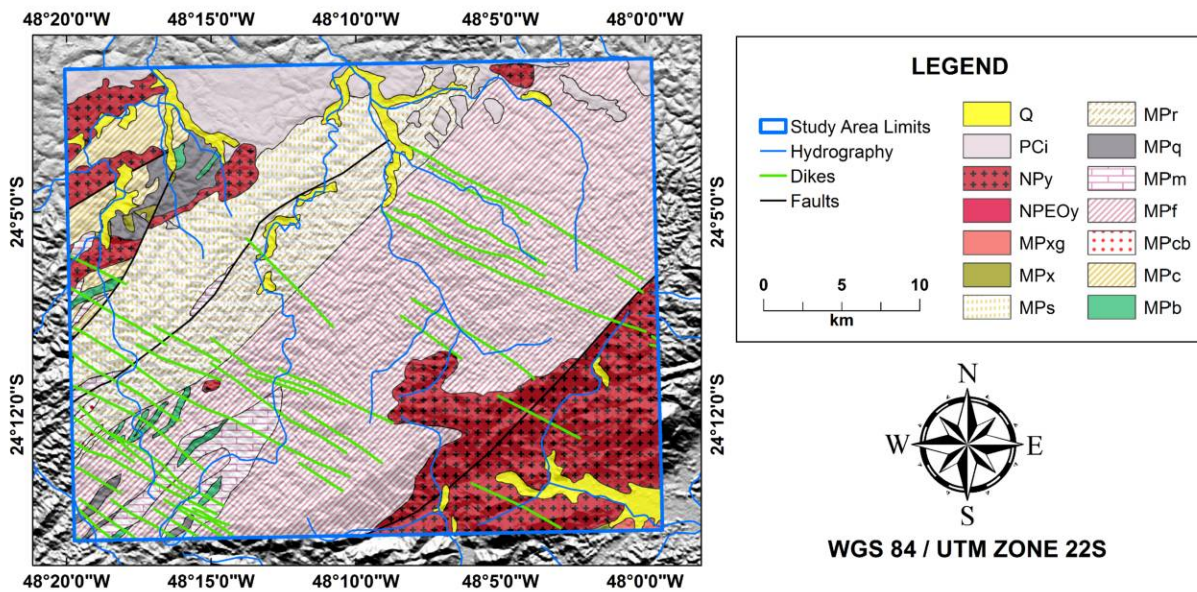


Figure 7 – Geologic map of study area (see location in Fig. 6) listing the main lithotypes and structures over a grey shaded relief. Q (Quaternary deposits); PCi (Carboniferous Permian - Itararé Sub-Group); NPy (Neoproterozoic - Pos-tectonic granites); NPEOy (Neoproterozoic - Polimitic; greywacke, and meta-arkose conglomerates); MPxg (Mesoproterozoic - Micaxists); MPx (Mesoproterozoic - Schists); MPs (Mesoproterozoic - Phyllites); MPr (Mesoproterozoic - Meta-sandstones); MPq (Mesoproterozoic - Quartzite); MPm (Mesoproterozoic - Marbles); MPf (Mesoproterozoic - Meta-rhythmites); MPcb (Mesoproterozoic - Meta-conglomerates and meta-breccias); MPc (Mesoproterozoic - Calcissilicites with phyllite or schist associated); and MPb (Mesoproterozoic - Mafic meta-vulcanics), modified from Machado Junior (2000).

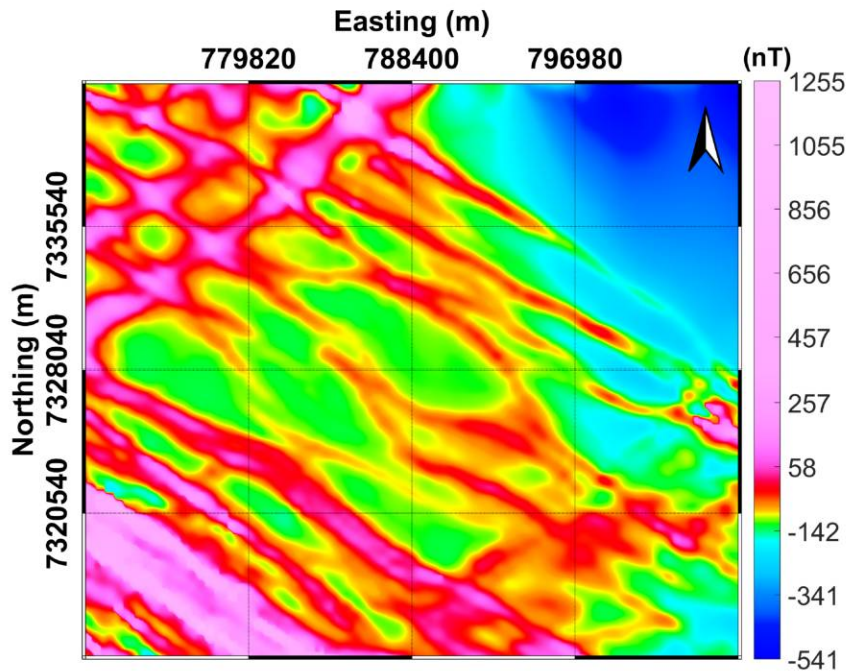


Figure 8 – TMI reduced to the magnetic pole (see location in Fig. 6).

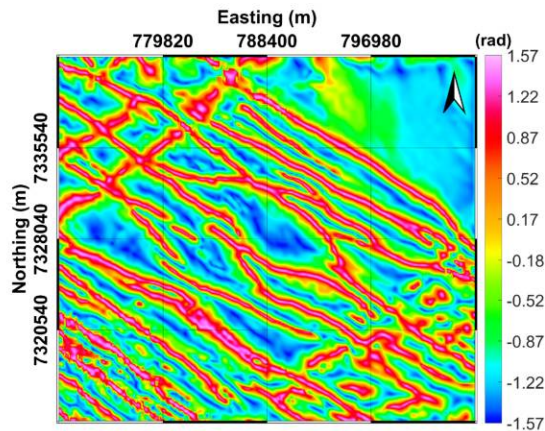


Figure 9 – TDR of the data in Figure 8.

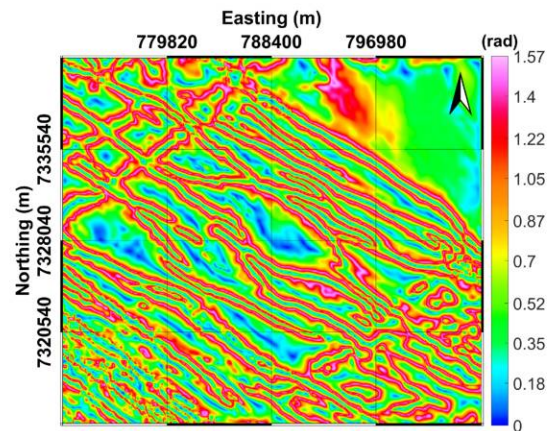


Figure 10 – TDX of the data in Figure 8.

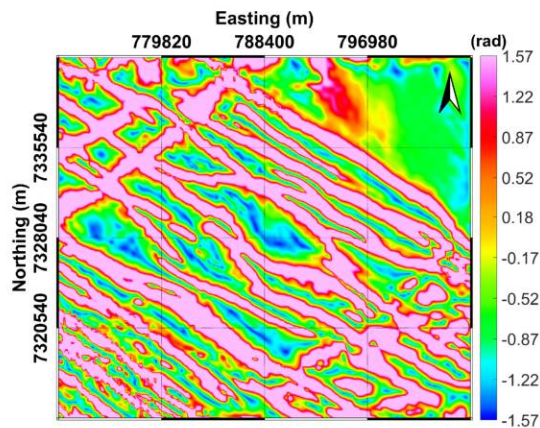


Figure 11 – TDR+TDX of the data in Figure 8.

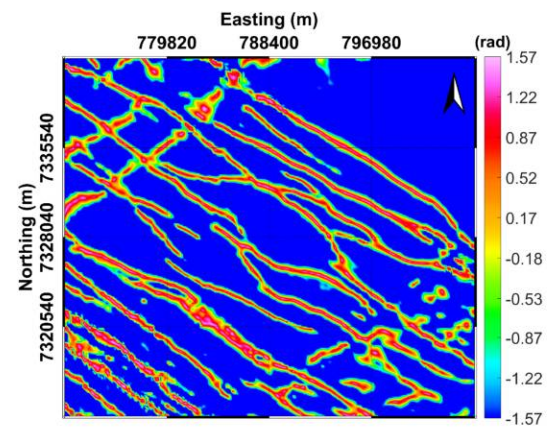


Figure 12 – TDR-TDX of the data in Figure 8.

a dipolar character and the positive peaks do not necessarily correspond to the bodies' horizontal limits. The application of the proposed filters in these situations may result in shifted peaks and plateaus.

CONCLUSIONS

In this preliminary study, we have verified that simple combinations of well-known tilt derivative filters have shown to improve the focus on the edges and centers of the sources, in both synthetic and field data. As illustrated in the chosen field data (Fig. 8), *TDR-TDX* flattens out the anomaly in the absence of structures of interest to geological mapping.

The proposed filters naturally inherit some limitations from the primary ones. Both *TDR+TDX* and *TDR-TDX* products spread those lateral limits according to increasing depth, for example, for deep sources the limits of body edges will appear greater than actual ones. Low-latitude magnetic anomalies present a dipolar

character that remains after the application of proposed filters, as in typical local phase filters. A similar behavior is noticed on subvertical dipping dikes where dipolarity is also observed.

The idea of combining filters could be applied to other qualitative methods (e.g., second order filters). Moreover, *TDR+TDX* has great potential in the processing of noisy data. In contrast with *TDR* and *TDX*, where the sources are identified by peaks which may be confounded with noise, the plateaus over the sources in *TDR+TDX* could be easily distinguished from those artifacts.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank Programa de Pós-Graduação em Geologia – UFPR, DS/CAPES, and CNPq (grants 306978/2015-6, 313100/2017-9, and 113897/2018-9) for their financial support. The authors are grateful to Serviço Geológico do Brasil (CPRM) for permission to use the aeromagnetic data.

REFERENCES

- ALGARTE JP. 1972. A influência dos arqueamentos cratônicos no condicionamento das alcalinas dos Estados de São Paulo e Paraná. In: 26 Congresso Brasileiro de Geologia. Volume 1, SBG, Belém, Brazil.
- ALMEIDA FFM. 1983. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da Plataforma Sul-Americana. *Revista Brasileira de Geociências*, 13(3): 139–158.
- ALMEIDA FFM. 1986. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(4): 325–349.
- BASTANI M & PEDERSEN LB. 2001. Automatic interpretation of magnetic dike parameters using the analytical signal technique. *Geophysics*, 66(2): 551–561.
- BEHRENDT JC, SALTUS R, DAMASKE D, MCCAFFERTY A, FINN CA, BLANKENSHIP D & BELL RE. 1996. Patterns of late Cenozoic volcanic and tectonic activity in the West Antarctic rift system revealed by aeromagnetic surveys. *Tectonics*, 15(3): 660–676.
- BONGIOLO ABS, DE SOUZA J, FERREIRA FJF & DE CASTRO LG. 2013. GRAV_MAG_PRISM: a MATLAB/OCTAVE program to generate gravity and magnetic anomalies due to rectangular prismatic bodies. *Brazilian Journal of Geophysics*, 31(3): 347–363.
- CASTRO FR, OLIVEIRA SP, DE SOUZA J & FERREIRA FJF. 2018. GRAV-MAG SUITE: An open source MATLAB-based program for processing potential field data. In: VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica. Volume 1, SBGf, Pará, Brazil.
- COOPER GR. 2009. Balancing images of potential-field data. *Geophysics*, 74(3): L17–L20.
- COOPER GRJ & COWAN DR. 2006. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers & Geosciences*, 32(10): 1585–1591.
- CORDELL L & GRAUCH VJS. 1985. Mapping Basement Magnetization Zones from Aeromagnetic Data in the San Juan Basin, New Mexico. doi: 10.1190/1.0931830346.ch16. URL <https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.0931830346.ch16>.
- CPRM. 2011. Projeto Aerogeofísico Paraná-Santa Catarina. Technical report. Serviço Geológico do Brasil. Brazil.
- FERREIRA FJF. 1982. Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa. M.Sc Dissertation. Universidade de São Paulo. Brazil. 169 pp.
- FERREIRA FJF & ALGARTE JP. 1979. O comportamento aeromagnético-cintilométrico das principais rochas alcalinas dos Estados de São Paulo e Paraná. In: 2 Simpósio Regional de Geologia. Volume 2, Brazil, p. 195–208.
- FERREIRA FJF, DAITX EA & MORAES MC. 1984. Nova manifestação do magmatismo mesozóico associada ao Arco de Ponta Grossa: O complexo gabróide Barra do Estrela. In: 33 Congresso Brasileiro de Geologia. Volume 1, SBG, Brazil.
- FERREIRA FJF, DE SOUZA J, DE B E S BONGIOLO A & DE CASTRO LG. 2013. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Geophysics*, 78(3): J33–J41.
- FERREIRA FJF, MORAES RAV, FERRARI MP & VIANNA RB. 1981. Contribuição ao estudo do Alinhamento Estrutural de Guapiara. In: Simpósio Regional de Geologia, 3., Curitiba, Brazil. p. 226–240.
- GOMES CB, AZZONE RG, RUBERTI E, VASCONCELOS PMD, SATO K & ROJAS GEE. 2018. New age determinations for the Banhadão and Itapirapuã complexes in the Ribeira Valley, southern Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 48(2): 403–414.
- JORDAN TA, FERRACCIOLI F, ROSS N, CORR HF, LEAT PT, BINGHAM RG, RIPPIN DM, LE BROCCQ A & SIEGERT MJ. 2013. Inland extent of the Weddell Sea Rift imaged by new aerogeophysical data. *Tectonophysics*, 585: 137–160.
- MACHADO JUNIOR DDL. 2000. Condicionantes estruturais e contexto tectônico do alinhamento de Guapiara. Ph.D. thesis. Universidade de São Paulo, Brazil. 143 pp.
- MILLER HG & SINGH V. 1994. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32(2-3): 213–217.
- NABIGHIAN MN. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37(3): 507–517.
- NABIGHIAN MN. 1974. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, 39(1): 85–92.
- ORUÇ B & SELIM HH. 2011. Interpretation of magnetic data in the Sinop area of Mid Black Sea, Turkey, using tilt derivative, Euler deconvolution, and discrete wavelet transform. *Journal of Applied Geophysics*, 74(4): 194–204.
- PILKINGTON M & TSCHIRHART V. 2017. Practical considerations in the use of edge detectors for geologic mapping using magnetic data. *Geophysics*, 82(3): J1–J8. doi: 10.1190/geo2016-0364.1. URL <https://doi.org/10.1190/geo2016-0364.1>.
- ROEST WR, VERHOEF J & PILKINGTON M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57(1): 116–125. doi: 10.1190/1.1443174. URL <https://doi.org/10.1190/1.1443174>.
- RUBERTI E, GOMES CB & COMIN-CHIARAMONTI P. 2005. The alkaline magmatism from the Ponta Grossa Arch. Brazilian Platform. Edusp, São Paulo, Brazil.

VERDUZCO B, FAIRHEAD JD, GREEN CM & MACKENZIE C. 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23(2): 116–119.

VIEIRA AJ. 1973. Geologia do centro e nordeste do Paraná e centro-sul de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 27., Aracaju, Brazil. p. 259–277.

WIJNS C, PEREZ C & KOWALCZYK P. 2005. Theta map: edge detection in magnetic data. *Geophysics*, 70(4): L39–L43.

ZUO B, HU X, LIU S & GENG M. 2018. Delineation of overlapping magnetic field source boundaries with a 3-D multi-layer convolution model. *Journal of Applied Geophysics*, 150: 74–83.

Recebido em 22 setembro, 2018 / Aceito em 21 novembro, 2018

Received on September 22, 2018 / accepted on November 21, 2018

2.2. RESULTADOS COMPLEMENTARES

2.2.1. Validação dos métodos semiquantitativos

Para o processo de validação dos métodos semiquantitativos foi usado um modelo de seis corpos prismáticos gerado no Grav Mag Prisma (Barros et al. 2013). Dos corpos que compõem o modelo, dois possuem formas características de diques, três apresentam formas associadas a corpos isolados e um possui dimensões relativas a um contato geológico (Fig. 2.2.1).

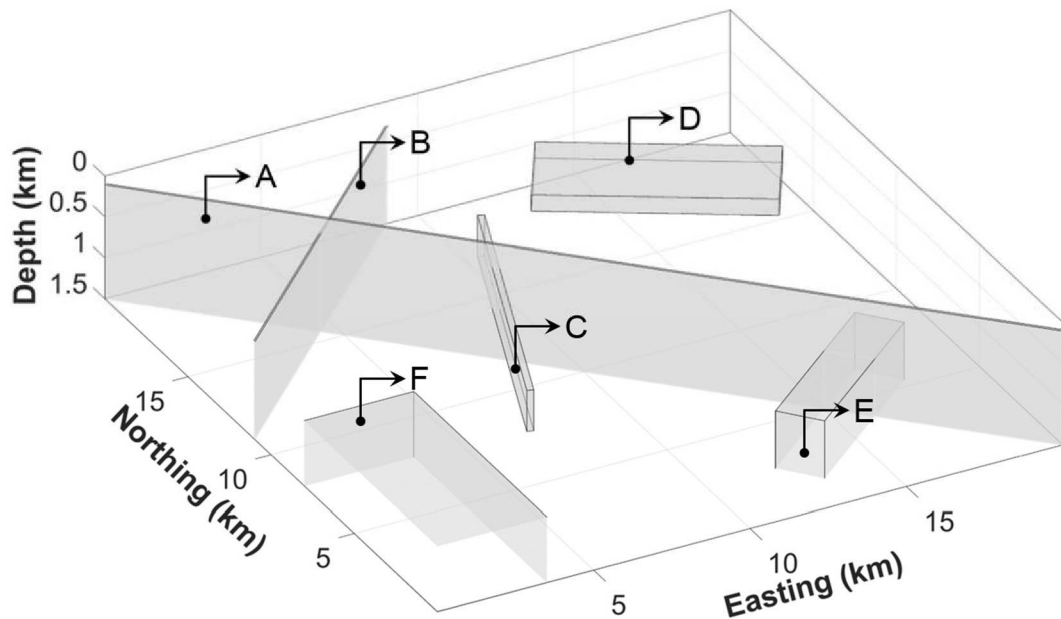


Figura 2.2.1 – Representação tridimensional do modelo de corpos prismáticos.

O campo magnético anômalo gerado pelo modelo de corpos prismáticos ilustrado na Figura 2.2.1 encontra-se exposto a seguir (Figura 2.2.2).

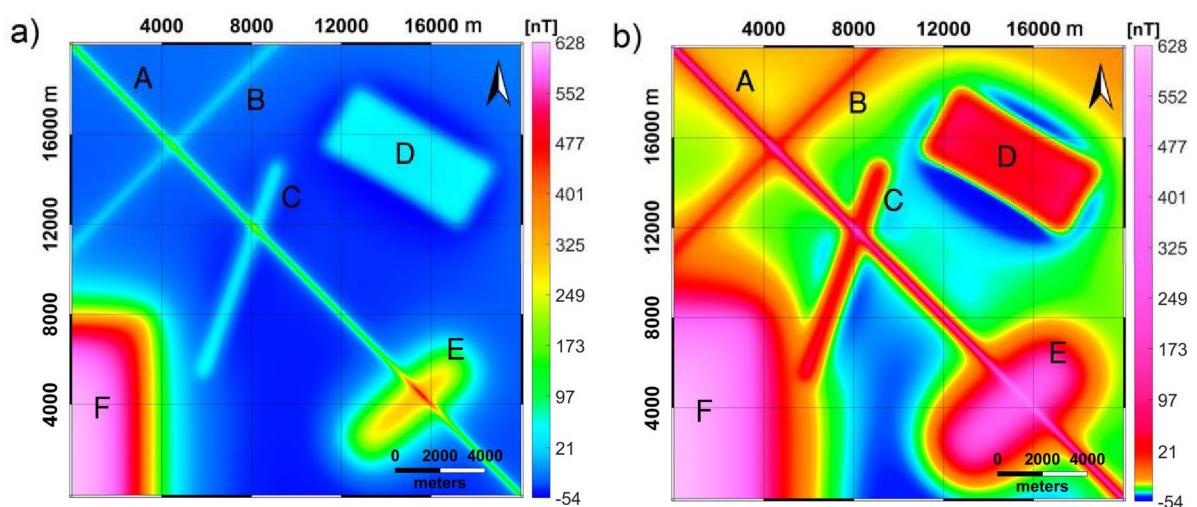


Figura 2.2.2 – Campo magnético anômalo sintético. a) CMA com distribuição linear de cor. b) CMA com distribuição de cor por equalização de histograma.

As estruturas encontram-se limitadas em uma área de 20 km². O corpo A representa um dique com *strike* NW-SE e corta diagonalmente o centro da área, enquanto que o segundo dique, caracterizado pelo corpo B, possui *strike* NE-SW e encontra-se localizado na porção noroeste da área. Os corpos C, D e E representam corpos isolados e o corpo F caracteriza um contato geológico, com suas faces verticais oeste e sul tendendo ao infinito nas direções de x e y negativos. Os parâmetros espaciais e físicos referentes ao modelo e ao campo de indução magnética estão dispostos na Tabela 2.2.1.

Tabela 2.2.1 – Parâmetros espaciais e físicos do exemplo sintético.

Parâmetros físicos do campo de indução magnética						
Intensidade do campo	Inclinação do campo		Declinação do campo			
57000 nT	90°		0°			
Parâmetros espaciais e físicos das fontes						
	A	B	C	D	E	F
Comprimento (km)	50	50	10	7	6	50
Largura (km)	0.08	0.05	0.2	3	1.5	50
Espessura (km)	20	20	0.5	0.2	5	20
<i>Strike</i> (°)	-45	45	20	120	50	0
Profundidade (km)	0.1	0.3	0.4	0.5	0.8	0.7
Coordenada X (km)	10	4	7.5	15	15	-1.5
Coordenada Y (km)	10	15	10	15	4	-17
Susceptibilidade	0.0276	0.0276	0.0276	0.0276	0.0276	0.0276

- *Source distance*;

A técnica semiquantitativa *source distance* é utilizada para estimar a profundidade de diques finos. Assim, espera-se que as estimativas de profundidade dos corpos A e B sejam aproximadas corretamente.

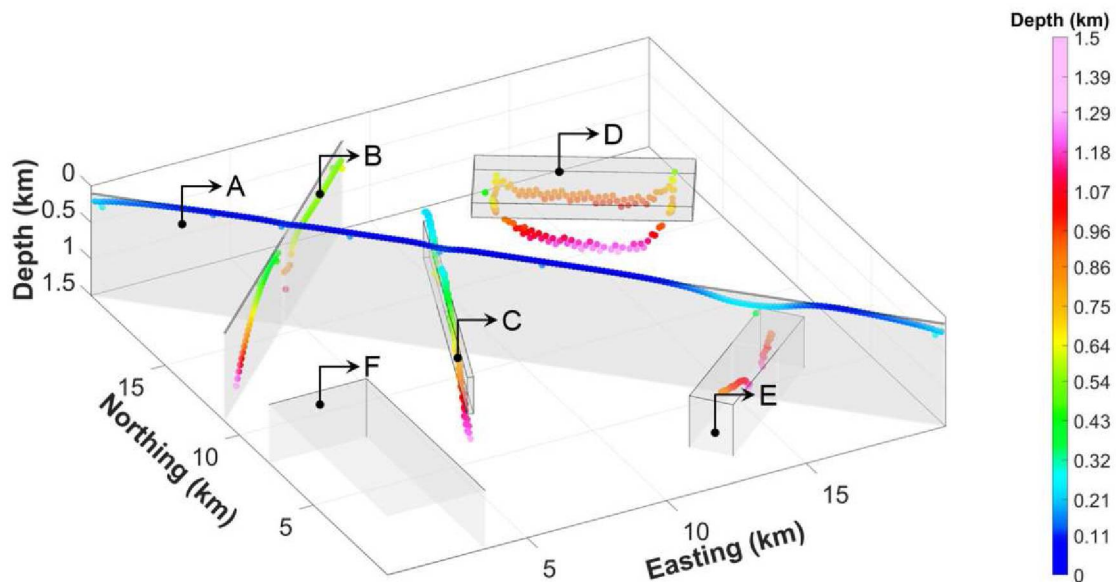


Figura 2.2.3 – Estimativas de profundidade calculadas pelo método *source distance*.

Segundo a Figura 2.2.3 o método *source distance* apresentou resultados satisfatórios apenas para o corpo A e parte do corpo B. A técnica é bastante sensível a fontes interferentes e a porção sudoeste do corpo B, localizada próxima ao contato magnético (corpo F), apresenta

estimativas superestimadas de profundidade. Os corpos restantes, por não se tratarem de diques, apresentam estimativas de profundidade com elevada margem de erro.

Como as melhores estimativas de profundidade calculadas pelo método *source distance* se localizam sobre o eixo central dos corpos, tem-se que o algoritmo de detecção dos picos das anomalias é eficiente apenas em corpos com largura finita. Como o corpo F, para simular as características do contato magnético, teve suas dimensões estendidas para além dos limites da área de estudo, o método não foi capaz de localizar o eixo do corpo F e calcular estimativas de profundidade para o mesmo.

- *Tilt-Depth*;

A técnica semiquantitativa *Tilt-Depth*, como afirmada no capítulo 1, é usada para estimar a profundidade de contatos magnéticos, logo espera-se que a estimativa relacionada ao corpo F seja bem próxima de 0,7 km, uma vez que o mesmo possui dimensões espaciais características de um contato (Figura 2.2.4).

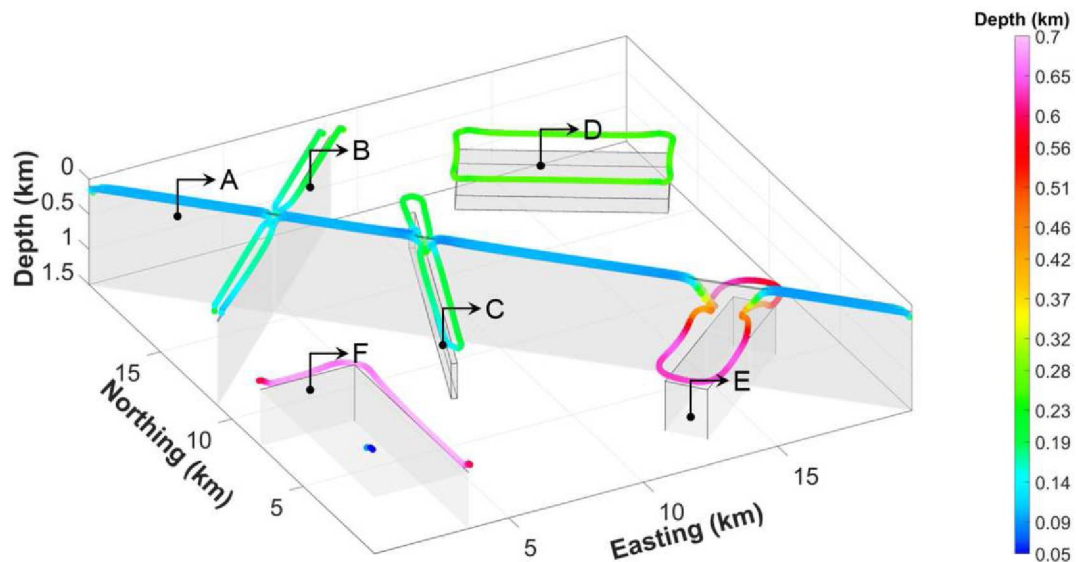


Figura 2.2.4 – Estimativas de profundidade calculadas pelo método *Tilt-Depth*.

Segundo a Figura 2.2.4, as soluções associadas à fonte F possui valores muito próximos a 0,7 km, o que indica que a técnica estima satisfatoriamente a profundidade de topo de corpos cuja forma é característica de contatos magnéticos. Embora os corpos restantes possuam formas que não são características do modelo do contato magnético, as estimativas de profundidade mostraram-se bastante satisfatórias para o dique mais raso (fonte A) e o corpo prismático diagonal da porção sudeste do modelo (fonte E). As fontes B, C e D são os corpos cujas estimativas de profundidade apresentam maior erro.

- Transformada *Signum*;

A técnica semiquantitativa da transformada *Signum* é utilizada para estimar a profundidade de diques e espera-se um melhor desempenho nas estimativas para os corpos A e B, como no método *source distance*.

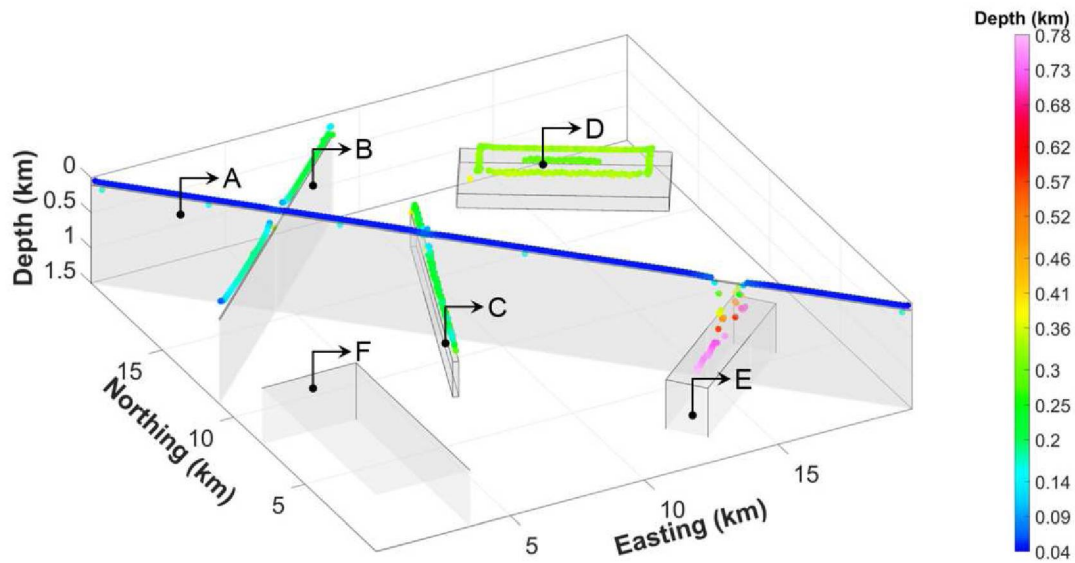


Figura 2.2.5 – Estimativas de profundidade calculadas pela transformada *Signum*.

Segundo a Figura 2.2.5 as soluções relacionadas aos corpos A e B, que representam diques, apresentam-se bem próximas aos valores de 0,1 e 0,2 km utilizados na construção do modelo. Os corpos C e E, embora não possuam grandes extensões em profundidade, de modo a caracterizá-los como diques, tiveram suas profundidades de topo bem estimadas pelo método da transformada *Signum*. O corpo D, representado por um corpo tabular horizontal, teve sua profundidade de topo subestimada e o mesmo foi verificado no corpo F, onde o algoritmo não conseguiu estimar a profundidade.

- Deconvolução de Euler;

A técnica semiquantitativa da deconvolução de Euler estima a profundidade de topo de diversos tipos de fontes, baseando-se em valores distintos de índices estruturais. Dessa maneira, para estimar a profundidade de diques é necessário utilizar um índice estrutural igual a 1, para dados magnéticos, enquanto que para estimar a profundidade de um contato magnético convencionou-se utilizar um índice estrutural próximo de 0.

A Figura 2.2.6 caracteriza as estimativas de profundidade para índice estrutural igual a 1. Desta maneira, espera-se que os corpos, cujas formas aproximam-se de diques, tenham suas profundidades de topo estimadas em valores próximos a 0,1 e 0,2 metros.

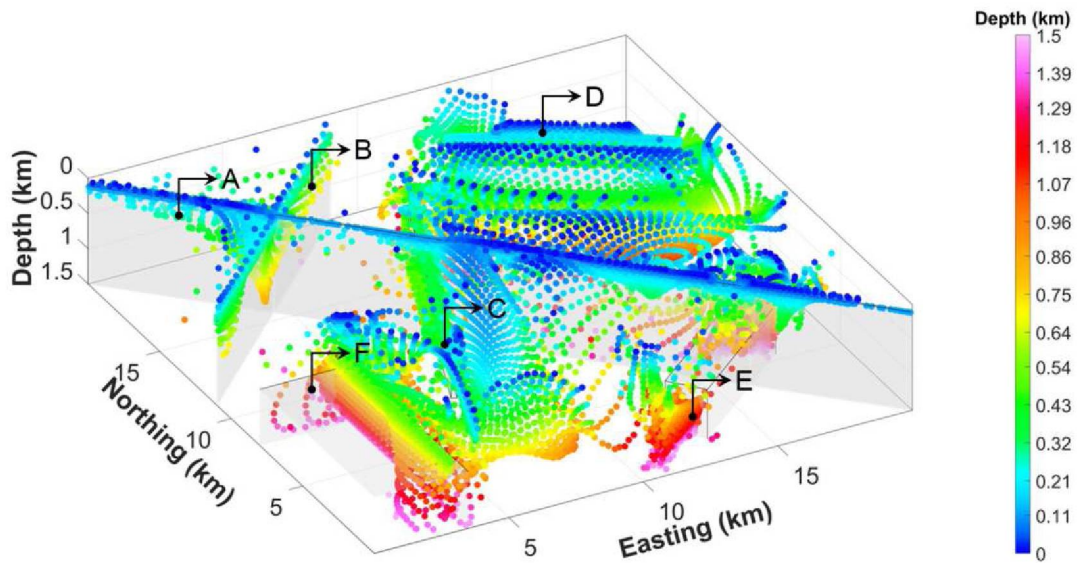


Figura 2.2.6 – Estimativas de profundidade calculadas pelo método da deconvolução de Euler para um índice estrutural igual a 1.

Apesar do método da deconvolução de Euler apresentar bastante solução espúria é possível notar que as soluções associadas aos corpos A e B, caracterizados por diques, apresentam estimativas próximas às profundidades reais dos corpos, com exceção para as porções onde se verificam corpos interferentes. Os corpos restantes têm suas profundidades por vezes subestimadas (corpos C e D) e superestimadas (corpos E e F), devido, dentre outros fatores, ao índice estrutural utilizado.

Ao utilizar um índice estrutural igual a zero as estimativas de profundidade apresentam o comportamento totalmente distinto do verificado na Figura 2.2.6. Os corpos A até E têm suas profundidades subestimadas e apenas o corpo F, que caracteriza um contato magnético, apresenta estimativas de profundidade distribuídas aproximadamente sobre as bordas do corpo e próximas a 0,7 km (Figura 2.2.7).

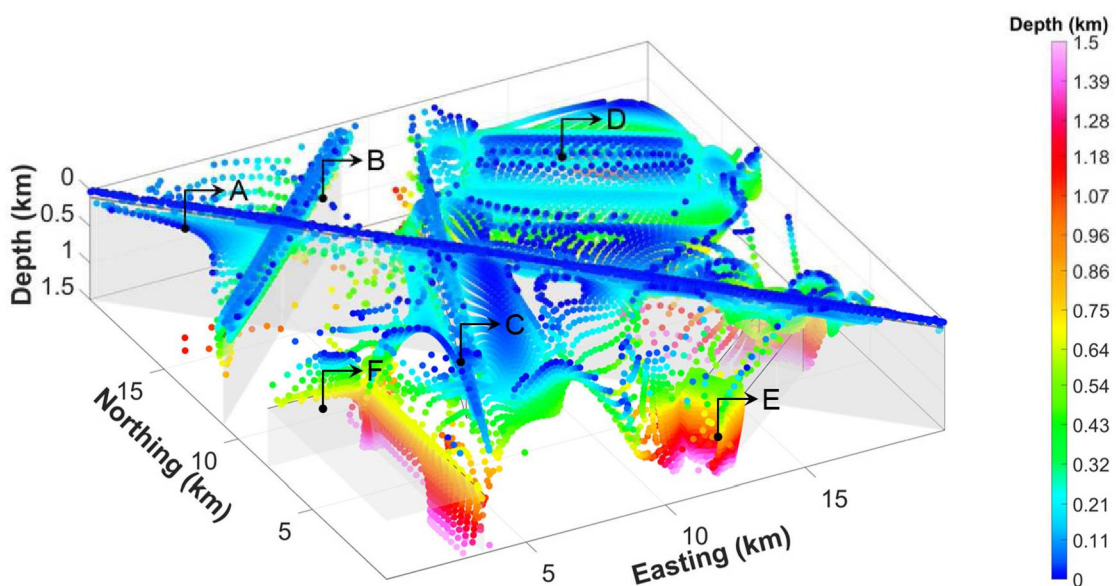


Figura 2.2.7 – Estimativas de profundidade calculadas pelo método da deconvolução de Euler para um índice estrutural igual a 0.

2.2.2. Arcabouço Estrutural

Nesta seção serão aplicados filtros ao dado aeromagnético do arco de Ponta Grossa com o objetivo de identificar novas feições estruturais e complementar feições mapeadas pela geologia em estudos prévios. A Figura 2.2.8 reúne produtos resultantes da aplicação de alguns filtros de realce.

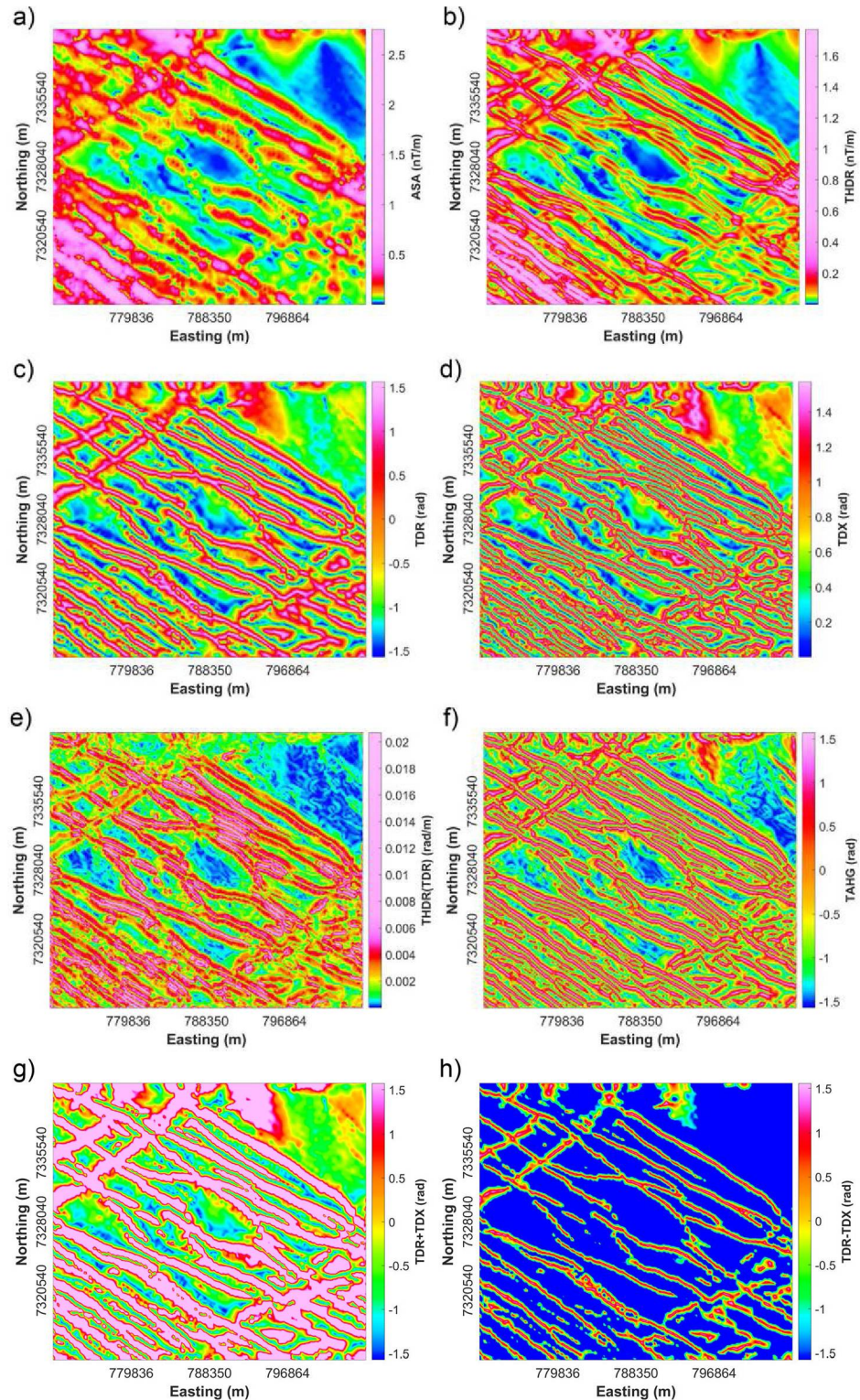


Figura 2.2.8 – Filtros de realce aplicados ao CMA reduzido ao polo da área de estudo. a) ASA. b) GHT. c) ISA. d) IGHT. e) GHT_ISA. f) ISA_GHT. g) ISA+IGHT. h) ISA-IGHT.

O mapa ISA-IGHT (Figura 2.2.8h) caracteriza as fontes causadoras com picos de magnitude $\pi/2$ ao mesmo tempo que as porções do mapa onde não se verificam estruturas são caracterizadas por faixas constantes e de magnitude $-\pi/2$ (Castro et al., 2018). Este comportamento resulta em um mapa com gradiente de cor restrito às porções sobre as fontes, o que facilita a demarcação destas estruturas. Com base na análise do ISA-IGHT, foram demarcadas estruturas de interesse geológico, como falhas e diques (Figura 2.2.9).

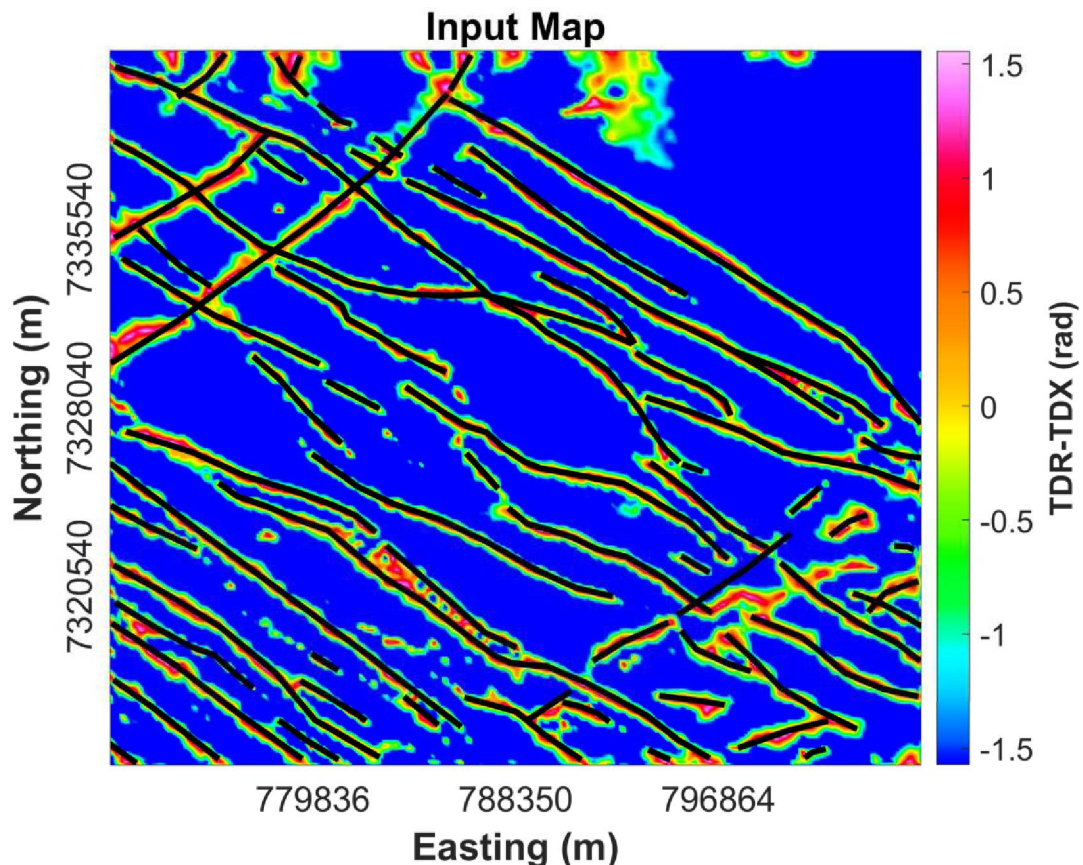


Figura 2.2.9 – ISA-IGHT aplicado ao CMA reduzido ao polo da área de estudo com indicação das estruturas de interesse.

Com base no mapa disposto na Figura 2.2.9 verifica-se a ocorrência de estruturas NW-SE por quase toda a área de estudo, com exceção da porção nordeste. As estruturas NE-SW são verificadas apenas nas porções noroeste e sudeste. As estruturas NE-SW da porção sudeste mostram-se fragmentadas pelas estruturas NW-SE, o que sugere que a últimas sejam estruturas mais recentes.

Segundo estudos prévios (Machado Junior, 2000; Ferreira et al., 1981; Ferreira & Algarte, 1979) as estruturas NW-SE são interpretadas como diques de diabásio, enquanto os lineamentos NE-SW são interpretados como falhas. Esta mesma categorização foi aplicada nos lineamentos magnéticos (Figura 2.2.10).

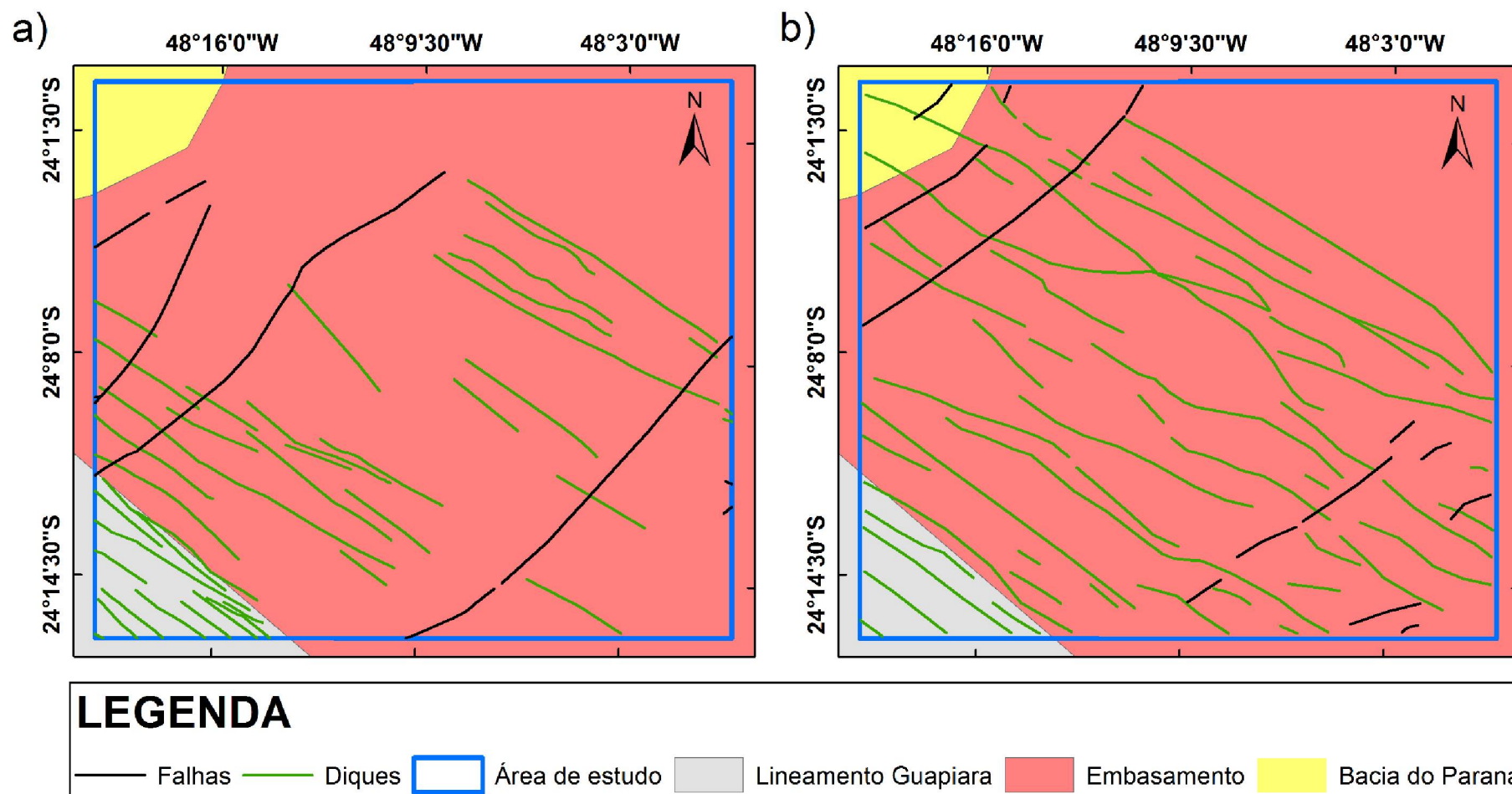


Figura 2.2.10 – Estruturas lineares da área de estudo. a) Arcabouço estrutural elaborado por Machado Junior (2000) com base em mapeamento geológico. b) Arcabouço estrutural elaborado a partir da análise de dados aeromagnéticos.

As estruturas demarcadas com base em mapeamento geológico (Figura 2.2.10a) apresentam uma elevada densidade de lineamentos NW-SE na porção sudoeste da área de estudo, enquanto que as estruturas demarcadas com base nos dados aeromagnéticos (Figura 2.2.10b) apresentam uma menor ocorrência. Este comportamento deve-se à diferença nas resoluções de cada método. Embora o mapeamento geológico seja restrito à superfície, o mesmo possui uma resolução maior que levantamentos geofísicos aéreos. No restante da área de estudo é verificado um comportamento contrário, onde o dado geofísico foi capaz de demarcar mais estruturas NW-SE sobre o mapeamento geológico, uma vez que muitas dessas estruturas não afloram.

As falhas da porção sudeste demarcadas por ambas as técnicas apresentam certa correlação, porém as falhas na Figura 2.2.10b mostram-se fragmentadas pelo enxame de diques, enquanto que as falhas na Figura 2.2.10a foram interpretadas como tendo um caráter mais contínuo. Os falhamentos da porção noroeste demarcados por ambas as técnicas não apresentam equivalência espacial e mostram-se deslocadas umas sobre as outras.

2.2.3 Resumo Expandido

O resumo em anexo, apresentado no VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica, realizado entre 18 a 20 de setembro de 2018 em Salinópolis-PA, trata das funcionalidades do pacote Grav Mag Suite, ilustradas por meio da anomalia magnética gerada pelo modelo proposto no início da seção 2.2.



GRAV-MAG SUITE: An open source MATLAB-based program for processing potential field data

Castro, F.R., UFPR; Oliveira, S.P.*, UFPR; de Souza, J., Secretary of Education/PR; Ferreira, F.J.F., UFPR

Copyright 2018, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salinópolis, 18 a 20 de setembro de 2018. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VIII SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Abstract

GRAV-MAG SUITE is a MATLAB-based program that has been developed for processing potential field data. The program is composed by several tools, which involve miscellaneous field transformations and enhancing filters, semiquantitative methods, and simple shape forward modeling algorithms. GRAV-MAG SUITE provides a graphical user interface (GUI) that facilitates the user's interaction with the program. In order to illustrate the program functionalities, a set of tools will be applied on a synthetic data composed by six prisms representing the most typical geological structures.

Introduction

Airborne potential field data has been a cornerstone of the mineral industry through the last decades. The use of gravity and magnetic data plays an important role in identify subtle features related to sources with economic value. However, potential field data has a frequency content that may evidence details regarding both shallow and deep causative sources, and the extraction of information related to specific frequency bands depends on the enhancement technique applied to data. In this context a set of qualitative and semiquantitative techniques has been developed (Nabighian 1972; Roest et al. 1992; Cordell and Grauch 1985; Miller and Singh 1994; Cooper and Cowan 2006; Ferreira et al. 2013; Thompson 1982; Salem et al. 2007, Cooper 2015).

Currently, the processing of potential field data is carried out mostly by commercial software packages. However, another strand, encompassing open source software has been taken strength since new technologies have made its development possible (Mendonça and Meguid 2008; Arisoy and Dikmen 2011). In this scenario we present a MATLAB-based open source software for processing both gravity and magnetic data.

Several program functionalities will be tested on synthetic data composed by prismatic sources whose dimensions simulate common geologic features. In order to validate the implemented methods, the source parameters estimated by the qualitative and semiquantitative methods will be compared to the exact parameters used to generate the synthetic model.

Program interface

GRAV-MAG SUITE is composed by a set of MATLAB functions. The program functions are categorized into two types: GUI functions, and processing functions. The first type are functions responsible to generate the program graphical user interfaces, and the second type are functions which perform some processing task.

Among the GUI functions there is a main function which generates the core interface. This graphical interface is composed by two fields. The first field is the menu field, which links the core interface with all other program GUIs. The second field presents the current data the user is processing and has some GUI components to customize the data visualization (Fig. 1).

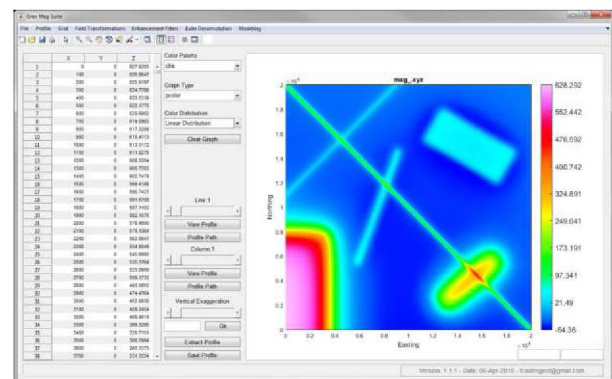


Figure 1 – Main GRAV-MAG SUITE graphical user interface with the synthetic data loaded.

In the *File* menu, the user can find options to open a dataset disposed on xyz column format or in a matrix form, view the data statistics, and export the data in a common figure formats. The *Profile* menu provides a set of options to process a profile data, for instance, to perform numerical differentiation and apply some enhancement filters, and to extract profiles from gridded datasets. The *Grid* menu provides some grid operations like interpolation, windowing, regrid, and trend removal.

In the *Field Transformations* menu there is a set of linear Fourier filters, for example, derivative filter on 3D orthogonal directions, upward/downward continuation, vertical integration, reduction to the magnetic pole and equator, directional cosine filter, anisotropic diffusion filter, among others.

The *Enhancement Filters* menu is divided into two categories. The first category groups qualitative filters commonly used to enhance or suppress some data frequency bands of gridded datasets. The second one gathers the semiquantitative methods to estimate some

source parameters like horizontal location, depth to the top and bottom, physical property contrast, and dip, etc.

Program functionalities

In order to illustrate the program functionalities, a synthetic model with six prisms was generated to simulate interfering dike-like bodies, contacts, and prismatic bodies with different strike directions, and depths to the top (Fig. 2).

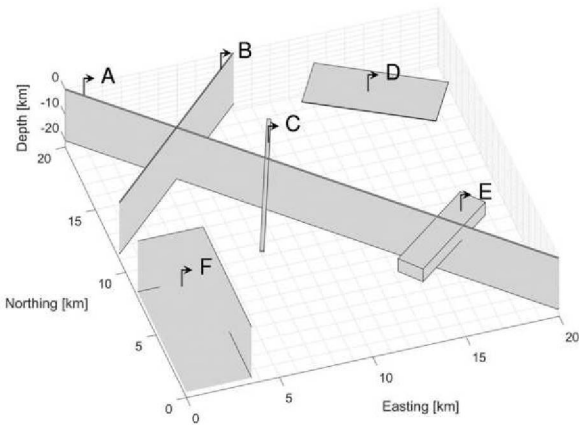


Figure 2 – 3D representation of synthetic model.

The model parameters are shown in Table 1. The strength, declination, and inclination of the induced field vector are 57000 nT, 0, and 90 degrees, respectively, and no remanent magnetization was considered. The magnetic anomaly was computed in grid with mesh ranging from 0 to 20 km in both x and y directions, with a squared grid cell of dimension 100x100 meters.

Table 1 - Spatial and physical parameters of the synthetic model. X, and Y are the coordinates of the prisms, and Z are the prisms depth to top.

Prism	X (km)	Y (km)	Z (km)	Length (km)	Width (km)	Thickness (km)	Strike direction (degrees)
A	10	10	0.1	50	0.1	20	-45
B	4	15	0.3	50	0.05	20	45
C	7.5	10	0.4	10	0.2	0.5	20
D	15	15	0.5	7	3	0.2	120
E	15	4	0.8	6	1.5	5	50
F	-1.5	-17	0.7	50	10	20	0

Figure 3 shows the total magnetic intensity (TMI) computed using the model of Figure 2. Prisms representing the bodies A and B have dimensions which characterize dike-like bodies, while prisms C, D, and E characterize a duct,

horizontal thin slab, and a culvert, and prism F represents a contact model.

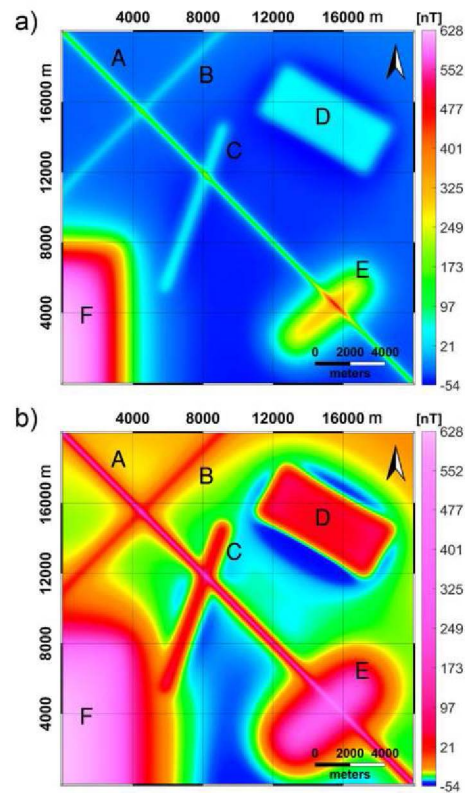


Figure 3 – Total magnetic intensity of synthetic data. a) Linear color distribution (MATLAB's default). b) Histogram color distribution.

The magnetic anomaly shown in Fig. 3 was generated using GRAV MAG PRISM, a MATLAB-based forward modeling program for both magnetic and gravity fields generated by prismatic bodies (Bongiolo et al. 2013). GRAV MAG SUITE offers a GUI function that calls the original GRAV MAG PRISM scripts. (Fig. 4). GRAV MAG PRISM GUI has entry components for both field and source parameters, needed for the computation of the gravity and magnetic anomaly fields.

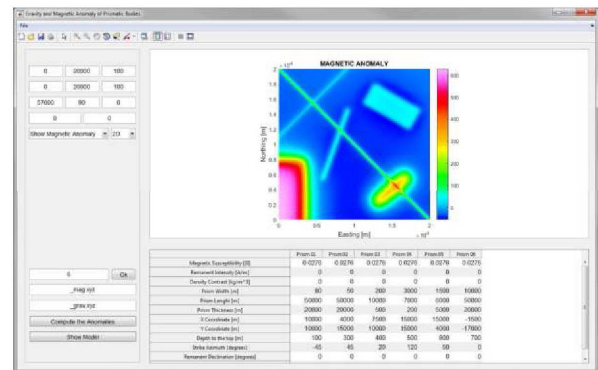


Figure 4 – Graphical user interface of Grav Mag Prism.

GRAV MAG SUITE performs forward modeling of two-dimensional bodies with simple shapes, for example, dike-like, spherical, and cylindrical bodies using closed formula (Telford et al. 1990), and irregular cross-section bodies using the line integral approach (Hubbert 1948; Talwani et al. 1959; Won and Bevis 1987) (Fig. 5).

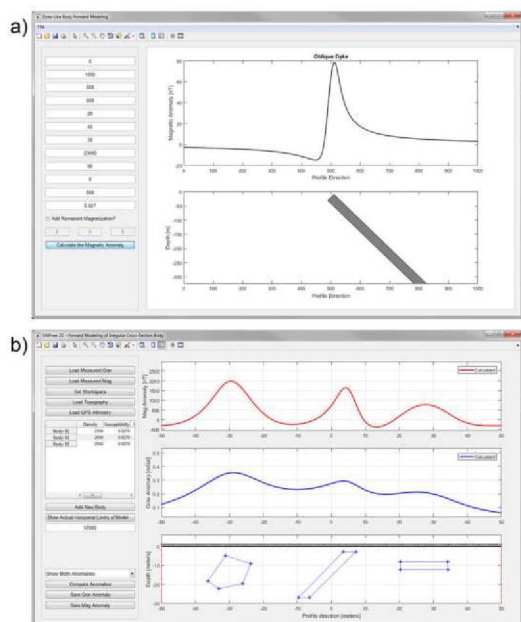


Figure 5 – Other forward modeling GUIs. a) Dike-like body forward modeling GUI with magnetic anomaly caused by a 45 degrees dipping dike. b) Irregular shaped body forward modeling GUI with both gravity and magnetic anomalies caused by three irregular cross-section bodies.

To grid scattered data the program offers traditional interpolation methods like bilinear, bicubic, nearest neighbor, and natural neighbor (Verbyla 2003). When an anisotropic sampling rate is verified, as in airborne surveys, these interpolate methods generate spatial aliasing of short-wavelength features, like boudinage effects. This issue can be overcome by using an anisotropic diffusion filter (Smith and O’Connell, 2005) (Fig. 6).

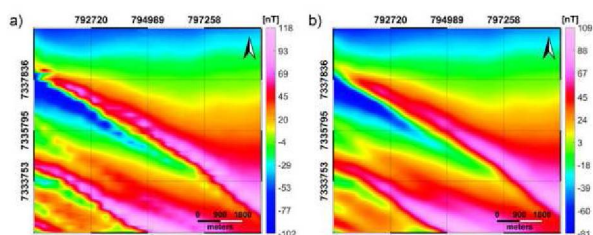


Figure 6 – Aeromagnetic data of southeast São Paulo State. a) Survey gridded by bilinear interpolation method. b) Same survey after applying anisotropic diffusion filter.

Once the anomaly maps are generated, a set of processing tools can be applied, for instance, a profile extraction (Fig. 7), windowing some anomaly map (Fig. 8), derivative filters (Fig. 9), and field continuation filters (Fig. 10).

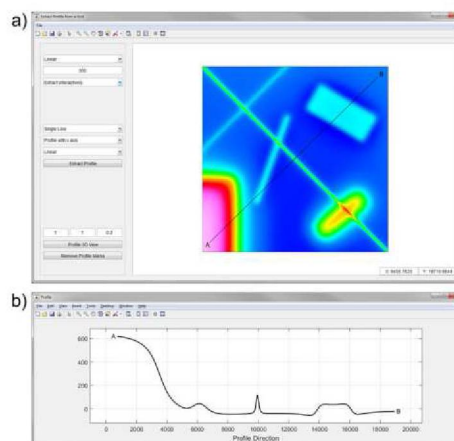


Figure 7 – Profile extraction GUI. a) Main profile extraction interface. b) Extracted profile.

Figure 7 illustrates the profile extraction tool present in the Profile menu of GRAV-MAG SUITE. This tool allows the user to extract profiles in any direction of the anomaly map, and the profile can be a single line or a polyline, which comprises a multiple line segments profile.

To select a region rather than a profile, one can use the Window Grid GUI present in the Grid menu. This tool provides some options that allow the user to apply a window to a gridded dataset. This window can be rectangular, polygonal, or irregularly shaped (Fig. 8).

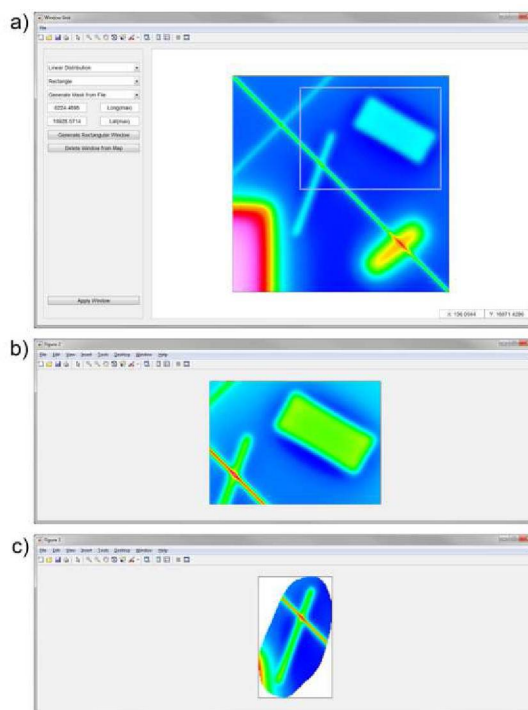


Figure 8 – Window grid GUI. a) Main window grid graphical user interface. b) Anomaly map windowed by a rectangular window (white line rectangle in a). c) Anomaly map windowed by an irregular window.

GRAV MAG SUITE has support for different derivative algorithms. It is possible to take the derivative in the three orthogonal directions, products necessary for computing several enhancement techniques (Fig. 9). All filters implemented on GRAV-MAG SUITE prepare the input grid by expanding, filling NaN/dummy values, and tapering, to prevent edge noise introduced by Fourier operations.

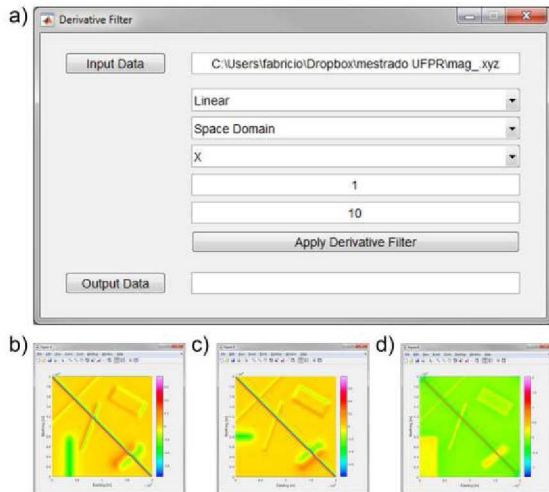


Figure 9 – Derivative filter. a) Graphical user interface of derivative filter. b) First order derivative in x direction. c) First order derivative in y direction. d) First order derivative in z direction.

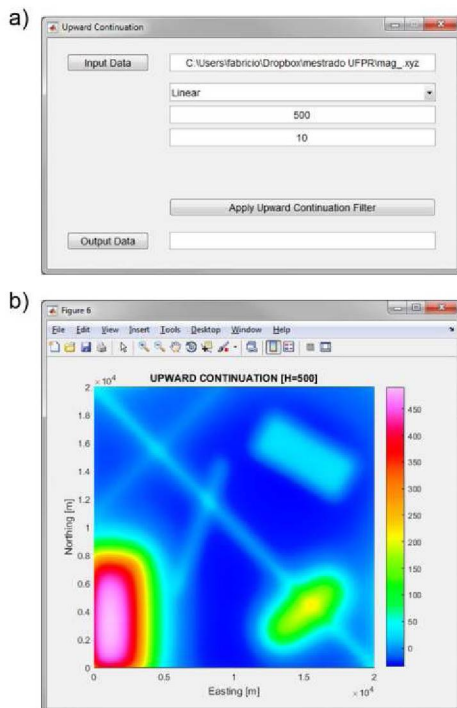


Figure 10 – Field continuation filter. a) Field continuation GUI. b) Anomaly of Figure 3 upward continued by a height of 500 meters.

Several enhancement filters or qualitative methods are implemented in GRAV-MAG SUITE. Figure 12 illustrates some of these filters: ASA (Nabighian 1972; Roest et al. 1992), THDR (Cordell and Grauch 1985), TDR (Miller and Singh 1994), TDX (Cooper and Cowan 2006), and TAHG (Ferreira et al. 2013).

Furthermore, a set of semiquantitative methods are also implemented in GRAV-MAG SUITE, such as, Euler deconvolution (Thompson 1982), tilt-depth (Salem et al. 2007), source distance (Cooper 2015), and Signum transform (de Souza and Ferreira 2015; Oliveira et al. 2017).

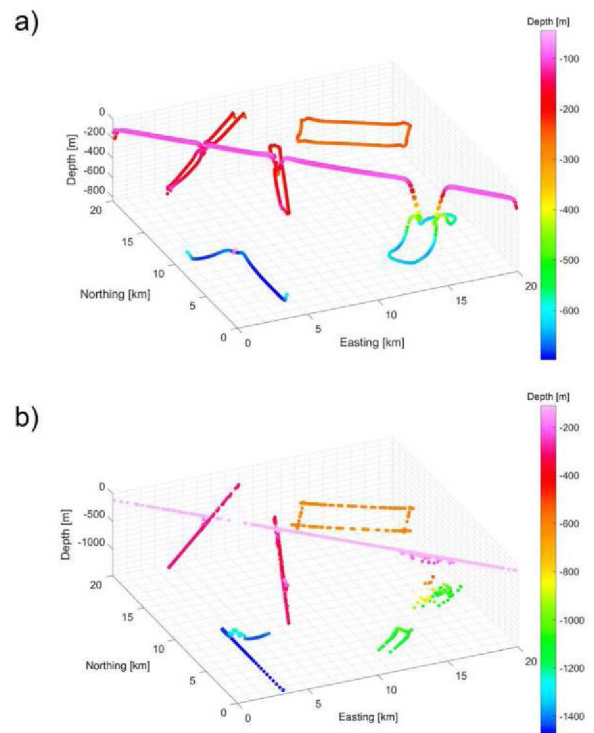


Figure 11 – Depth solutions estimated by semiquantitative methods. a) Tilt-depth solutions. b) Euler deconvolution depth solutions for a structural index of 1 and window size of 10x10 grid points (1000x1000 meters).

Figure 11 shows the depth estimates of two semiquantitative methods. Although Tilt-depth method (Salem et al. 2007), represented in Figure 10a is recommended only to approximate the depth of contact models, a good depth estimation of the other sources was verified. The same was verified in Euler deconvolution depth solutions except for the contact model whose depth was overestimated.

Conclusions

A set of processing tools, usually restricted to commercial software, has been implemented for use in MATLAB in the form of an integrated system with a graphical user-friendly interface.

By enabling the access of commercial software algorithms to the community, we facilitate the reproduction of academic works for validation purposes, as well as its application and improvements in new researches.

Semiquantitative methods implemented on GRAV-MAG SUITE have estimated the sources parameters with acceptable error, even when the methods have intrinsic limitations on situations whose source's shape leads to poor estimates.

The program should be available by April 2019, upon completion of the related master's degree research. Until the final release, more functionalities are planned to be included, such as more interpolation methods like minimum curvature (Briggs, 1974), improvements of source distance method (Cooper, 2015), among others.

Acknowledgments

The authors thank the support of Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA) for providing the infrastructure required for the implementation of GRAV-MAG SUITE. SP Oliveira and FJF Ferreira are supported by CNPq (grants 313100/2017-9 and 306978/2015-6, respectively).

References

- Arisoy, M. Ö. and Dikmen, Ü., 2011. Potensoft: MATLAB-based software for potential field data processing, modeling and mapping. *Computers and geosciences*, 37(7): 935-942.
- Bongiolo, A. B. S., de Souza, J., Ferreira, F. J. F. and Castro, L. G., 2013. GRAV MAG PRISM: a Matlab/Octave program to generate gravity and magnetic anomalies due to rectangular prismatic bodies: *Revista Brasileira de Geofísica*, 31: 347-363.
- Briggs, I. C., 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39(1): 39-48.
- Cooper, G. R. J. and Cowan, D. R., 2006. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers and Geosciences*, 32: 1585-1591.
- Cooper, G. R. J., 2015. Using the analytic signal amplitude to determine the location and depth of thin dikes from magnetic data: *Geophysics*, 80(1): J1-J6.
- Cordell, L. and Graunch, V. J. S., 1985. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. In: Hinze WJ (Ed). *The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomalies Maps*. Society of Exploration Geophysicists: 181-197.
- de Souza, J., Ferreira, F. J. F., 2015. The application of the Signum transform to the interpretation of magnetic anomalies. ASEG-PESA 2015, *Geophysics and Geology together for Discovery*, 24th International Geophysical Conference and Exhibition, Expanded Abstracts.
- Ferreira, F. J. F., de Souza, J., Bongiolo, A. B. S. and de Castro, L. G., 2013. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle: *Geophysics*, 78: J33-J41.
- Hubbert, M. K., 1948. A line-integral method of computing the gravimetric effects of two-dimensional masses. *Geophysics*, 13(2): 215-225.
- Mendonça, C. A., Meguid, A. M. A., 2008. Programs to compute magnetization to density ratio and the magnetization inclination from 3-D gravity and magnetic anomalies. *Computers and Geosciences*, 34(6): 603-610.
- Miller, H. G. and Singh, V., 1994. Potential field tilt - A new concept for location of potential field sources: *Journal of Applied Geophysics*, 32: 213-217.
- Nabighian, M. N., 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross section: Its properties and use for automated anomaly interpretation: *Geophysics*, 37: 507-517.
- Oliveira, S. P., Ferreira, F. J. F., de Souza, J., 2017. EdgeDetectPFI: An algorithm for automatic edge detection in potential field anomaly images—application to dike-like magnetic structures. *Computers and Geosciences*, 103: 80-91.
- Roest, W. R, Verhoef, J. and Pilkington, M., 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal: *Geophysics*, 57(1): 116-125.
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, J. D., Ravat, D. and Smith, R., 2007. Tilt-depth method: A simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives: *The Leading Edge*, 26(12): 1502-1505.
- Smith, R. S., O'Connell, M. D., 2005. Interpolation and gridding of aliased geophysical data using constrained anisotropic diffusion to enhance trends. *Geophysics*, 70(5): V121-V127.
- Talwani, M., Worzel, J. L., Landisman, M., 1959. Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *Journal of geophysical research*, 64(1): 49-59.
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R., 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- Thompson, D. T., 1982. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data: *Geophysics*, 47(1): 31-37.
- Verbyla, D. L., 2003. *Practical GIS analysis*. CRC press.
- Won, I. J., Bevis, M., 1987. Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines. *Geophysics*, 52(2): 232-238.

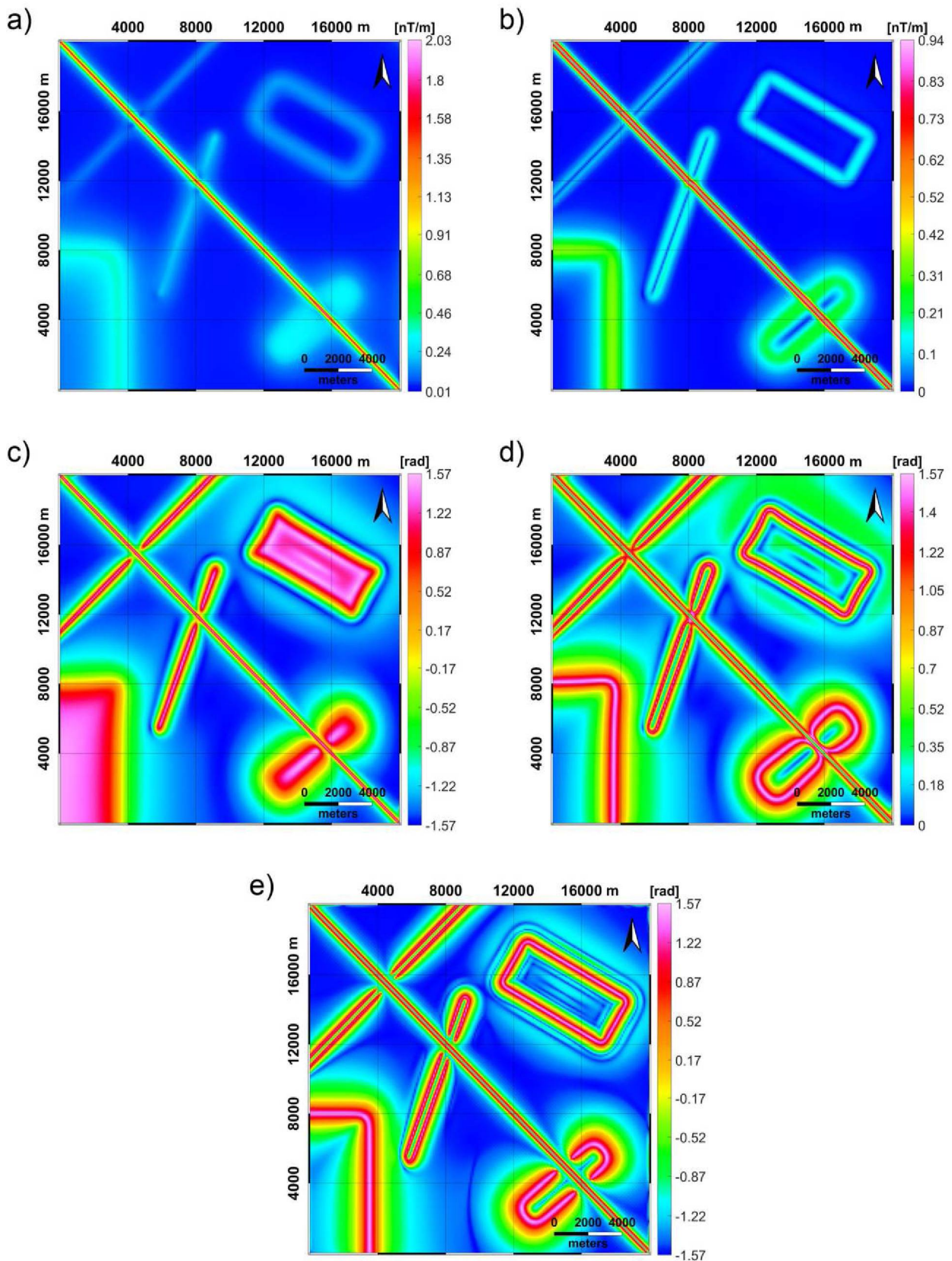


Figure 12 – Qualitative enhancement filters. a) ASA; b) THDR; c) TDR; d) TDX; e) TAHG.

3. DISCUSSÕES

A utilização de dados sintéticos no processo de validação das técnicas semiquantitativas implementadas mostrou-se uma estratégia eficaz, uma vez que os parâmetros espaciais e físicos do modelo associado a estes dados são conhecidos. O modelo utilizado no processo de validação é constituído de fontes com formas variadas, o que possibilitou constatar em quais situações as técnicas implementadas apresentam limitações.

A técnica *Source distance*, desenvolvida para encontrar a profundidade de diques não produziu boas estimativas de profundidade para corpos que não são tipo-dique, como corpos prismáticos, tabulares horizontais e contatos. Mesmo para os corpos que simulam diques, as estimativas mostraram que esta técnica é fortemente influenciada por anomalias causadas por corpos adjacentes. O *Tilt-depth*, desenvolvido para calcular a profundidade de contatos magnéticos também produziu boas estimativas de profundidade para os corpos em forma de diques, porém para os corpos prismáticos e tabulares horizontais as profundidades foram subestimadas.

A Transformada Signum produziu boas estimativas de profundidade para os corpos em forma de dique e também para alguns corpos prismáticos, porém o contato magnético não foi sequer amostrado pela técnica e o corpo tabular horizontal teve sua profundidade subestimada. As soluções de Euler para índice estrutural 1 caracterizaram bem os corpos em forma de dique, porém muitas soluções espúrias foram geradas, o que dificultou a análise de outros corpos. As soluções de Euler para índice estrutural 0 caracterizou bem a borda superior do contato magnético, porém o excesso de soluções espúrias dificultou verificar se os corpos restantes do modelo foram bem estimados.

O uso do dado aeromagnético na identificação de novos lineamentos para a área de estudo possibilitou a extração de novas informações. Novas estruturas NW-SE, interpretadas como diques de diabásio, foram demarcadas nas porções sudeste, centro e noroeste da área. O mapeamento geológico não foi capaz de identificar tantas estruturas nestas porções, uma vez que esta técnica se limita a estudos superficiais.

A porção sudoeste da área é marcada por uma densa ocorrência de estruturas NW-SE, associadas ao Lineamento Guapiara. As anomalias do dado aeromagnético localizadas nesta porção apresentam as magnitudes mais intensas do dado. Este comportamento possivelmente se deve ao fato de as anomalias individuais de cada corpo unirem-se na medida em que a distância fonte-sensor aumenta. Em contrapartida, o mapeamento geológico por ser um estudo feito em contato direto com as fontes, foi capaz de demarcar mais estruturas.

As estruturas NE-SW demarcadas por ambas as técnicas e interpretadas como falhas, apresentam posicionamentos semelhantes nas ocorrências da porção sudeste, embora os lineamentos marcados pela geofísica apresentem fragmentados devido a interferência dos diques.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação computacional de ferramentas de processamento de dados de campos potenciais com interface gráfica mostrou-se um processo viável, dado o vasto acervo de funções que o MATLAB possui. Neste trabalho foi possível implementar diversas técnicas qualitativas, semiquantitativas e quantitativas. Quanto às técnicas qualitativas destacaram-se filtros de realce tradicionais, como por exemplo o ASA, GHT, ISA, IGHT, *theta map*, ISA_GHT e o GHT_ISA, além novos filtros propostos no decorrer da pesquisa, como as combinações ISA+IGHT e ISA-IGHT.

Quatro métodos semiquantitativos já propostos foram implementados no modo de interface gráfica, como os algoritmos clássicos da deconvolução de Euler 2D e 3D, o *tilt-depth*, *source distance* e a transformada *signum*. Um novo método baseado na deconvolução de Euler foi proposto neste trabalho, por meio da aplicação dos filtros de realce desenvolvidos nesta pesquisa para a construção de uma máscara de restrição. A aplicação dos filtros produz a redução do número de soluções espúrias, uma vez que as máscaras restringem os locais do mapa anômalo onde a janela móvel da deconvolução de Euler é aplicada.

Alguns métodos quantitativos também foram implementados no modo de interface gráfica, como a modelagem direta dos campos gravimétrico e magnetométrico causados por corpos de geometria simples, tanto bidimensionais, quanto tridimensionais (prismas e esferas). Um bom exemplo são as rotinas do Grav Mag Prisma, que foram ampliadas para o acesso via interface gráfica.

Muitas vezes processar um dado geofísico significa manipular uma enorme quantidade de informações e em situações como essas verificou-se que o MATLAB é uma ferramenta limitada. Em alguns casos, certas funções pré-programadas do MATLAB apresentam aumentos em seus tempos de execução. Dessa maneira, o Grav Mag Suite limita-se a estudos locais onde a quantidade de dados geralmente é menor.

Vale ressaltar que o fato de os códigos serem abertos possibilita os usuários realizarem adaptações nos mesmos. Estas adaptações podem tanto otimizar os algoritmos quanto alterá-los para se adequarem a outras situações, o que pode promover o surgimento de novas ferramentas, como as apresentadas nos artigos vinculados a este trabalho. Dessa maneira, os códigos do programa serão disponibilizados em uma plataforma colaborativa chamada *github*. Além de permitir o download dos códigos, o *github* também facilita parcerias, de modo que qualquer usuário pode melhorar os códigos e anexar as melhorias ao projeto raiz.

REFERÊNCIAS

- AKCA, I. ELRIS2D: A MATLAB package for the 2D inversion of DC resistivity/IP data. **Acta Geophysica**, v. 64, n. 2, p. 443-462, 2016.
- ALGARTE, J. P. A influência dos arqueamentos cratônicos no condicionamento das alcalinas dos Estados de São Paulo e Paraná. In: **26º Congresso Brasileiro de Geologia**. SBG, 1972.
- ALMEIDA, F. F. M. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da Plataforma Sul-Americana. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 13, n. 3, p. 139-158, 1983.
- ALMEIDA, F. F. M. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 16, n. 4, p. 325-349, 1986.
- ARISOY, M. O., & DIKMEN, U. Potensoft: MATLAB-based software for potential field data processing, modeling and mapping. **Computers & Geosciences**, v. 37, n. 7, p. 935-942, 2011.
- BARANOV, V. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies. **Geophysics**, v. 22, n. 2, p. 359-382, 1957.
- BARANOV, V., & NAUDY, H. Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. **Geophysics**, v. 29, n. 1, p. 67-79, 1964.
- BARBOSA, V. C. F., SILVA, J. B. C., & MEDEIROS, W. E. Stability analysis and improvement of structural index estimation in Euler deconvolution. **Geophysics**, v. 64, n. 1, p. 48-60, 1999.
- BARROS, A. B. S., DE SOUZA, J., FERREIRA, F. J. F., & DE CASTRO, L. G. Grav mag prism: a matlab/octave program to generate gravity and magnetic anomalies due to rectangular prismatic bodies. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 31, n. 3, p. 347-363, 2013.
- BLAKELY, R. J. **Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 441p.
- COOPER, G. R. J., & COWAN, D. R. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. **Computers & Geosciences**, v. 32, n. 10, p. 1585-1591, 2006.
- COOPER, G. R. J. The automatic determination of the location, depth, and dip of contacts from aeromagnetic data. **Geophysics**, v. 79, n. 3, p. J35-J41, 2014.
- COOPER, G. R. J. The automatic determination of the location and depth of contacts and dykes from aeromagnetic data. **Pure and Applied Geophysics**, v. 171, n. 9, p. 2417-2423, 2014.
- COOPER, G. R. J. Using the analytic signal amplitude to determine the location and depth of thin dikes from magnetic data using the analytic signal amplitude. **Geophysics**, v. 80, n. 1, p. J1-J6, 2015.
- CORDELL, L., & GRAUCH, V. J. S. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. In: **SEG Technical Program Expanded Abstracts 1982**. Society of Exploration Geophysicists, 1982. p. 246-247.
- CPRM 2011. Programa Geologia do Brasil (PGB) – Projeto Aerogeofísico Paraná – Santa Catarina Relatório final do levantamento processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Volume 1. Lasa Prospecções.

- DENTITH, M., & MUDGE, S. T. **Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 438p.
- FAIRHEAD, J. D., BENNETT, K. J., GORDON, D. R. H., & HUANG, D. Euler: beyond the "black box". In: **SEG Technical Program Expanded Abstracts 1994**. Society of Exploration Geophysicists, 1994. p. 422-424.
- FAIRHEAD, J. D., SALEM, A., WILLIAMS, S., & SAMSON, E. Magnetic interpretation made easy: The tilt-depth-dip- Δk method. In: **SEG Technical Program Expanded Abstracts 2008**. Society of Exploration Geophysicists, 2008. p. 779-783.
- FERREIRA, F. J. F., & ALGARTE, J. P. O comportamento aeromagnético-cintilométrico das principais rochas alcalinas dos Estados de São Paulo e Paraná. In: **Simpósio Regional de Geologia**. 1979. p. 195-208.
- FERREIRA, F. J. F., MORAES, R. A. V., FERRARI, M. P., & VIANNA, R. B. Contribuição ao estudo do alinhamento estrutural de Guapiara. In: **3º Simpósio Regional de Geologia**, SBG, 1981. p. 226-240.
- FERREIRA F. J. F. **Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 1982.
- FERREIRA F. J. F., DAITX E. A., & MORAES M. C. Nova manifestação do magmatismo mesozóico associada ao Arco de Ponta Grossa: O complexo gabróide Barra do Estrela. In: **34º Congresso Brasileiro de Geologia**, SBG, 1984. 259-277.
- FERREIRA, F. J. F., DE SOUZA, J., de B. e S. BONGIOLO, A., & de CASTRO, L. G. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. **Geophysics**, v. 78, n. 3, p. J33-J41, 2013.
- GOMES, C. D. B., AZZONE, R. G., RUBERTI, E., VASCONCELOS, P. M. D., SATO, K., & ROJAS, G. E. E. New age determinations for the Banhadão and Itapirapuã complexes in the Ribeira Valley, southern Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, n. AHEAD, p. 0-0, 2018
- GRAUCH, V. J. S., & CORDELL, L. Limitations of determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudogravity data. **Geophysics**, v. 52, n. 1, p. 118-121, 1987.
- GUO, L., MENG, X., & SHI, L. Gridding aeromagnetic data using inverse interpolation. **Geophysical Journal International**, v. 189, n. 3, p. 1353-1360, 2012.
- HARTMAN, R. R., TESKEY, D. J., FRIEDBERG, J. L. A system for rapid digital aeromagnetic interpretation. **Geophysics**, v. 36, n. 5, p. 891-918, 1971.
- LI, X. Understanding 3D analytic signal amplitude. **Geophysics**, v. 71, n. 2, p. L13-L16, 2006.
- LI, X. Magnetic reduction-to-the-pole at low latitudes: Observations and considerations. **The Leading Edge**, v. 27, n. 8, p. 990-1002, 2008.
- LI, X., & GOETZE, H. J. Comparison of some gridding methods. **The Leading Edge**, v. 18, n. 8, p. 898-900, 1999.
- MA, G., & DU, X. An improved analytic signal technique for the depth and structural index from 2D magnetic anomaly data. **Pure and Applied Geophysics**, v. 169, n. 12, p. 2193-2200, 2012.

- MA, G., & LI, L. Edge detection in potential fields with the normalized total horizontal derivative. **Computers & Geosciences**, v. 41, p. 83-87, 2012.
- MA, G., LIU, C., & LI, L. Balanced horizontal derivative of potential field data to recognize the edges and estimate location parameters of the source. **Journal of Applied Geophysics**, v. 108, p. 12-18, 2014.
- MACHADO JUNIOR, D. de L. **Condicionantes estruturais e contexto tectônico do “Alinhamento de Guapiara”**. 2000. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica)—Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000.
- MACLEOD, I. N., JONES, K., & DAI, T. F. 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. **Exploration Geophysics**, v. 24, n. 3/4, p. 679-688, 1993.
- MIKHAILOV, V., GALDEANO, A., DIAMENT, M., GVISHIANI, A., AGAYAN, S., BOGOUTDINOV, S., GRAEVA, E., & SAILHAC, P. Application of artificial intelligence for Euler solutions clustering. **Geophysics**, v. 68, n. 1, p. 168-180, 2003.
- MILLER, H. G., & SINGH, V. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. **Journal of Applied Geophysics**, v. 32, n. 2-3, p. 213-217, 1994.
- NABIGHIAN, M. N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. **Geophysics**, v. 37, n. 3, p. 507-517, 1972.
- NABIGHIAN, M. N. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. **Geophysics**, v. 39, n. 1, p. 85-92, 1974.
- NABIGHIAN, M. N. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations. **Geophysics**, v. 49, n. 6, p. 780-786, 1984.
- OLIVEIRA, S. P., FERREIRA, F. J. F., & DE SOUZA, J. EdgeDetectPFI: An algorithm for automatic edge detection in potential field anomaly images—application to dike-like magnetic structures. **Computers & Geosciences**, v. 103, p. 80-91, 2017.
- PIGNATELLI, A., NICOLOSI, I., CARLUCCIO, R., CHIAPPINI, M., & VON FRESE, R. Graphical interactive generation of gravity and magnetic fields. **Computers & Geosciences**, v. 37, n. 4, p. 567-572, 2011.
- PIGNATELLI, A., NICOLOSI, I., CARLUCCIO, R., & CHIAPPINI, M. GamField 2.0—Significant advances to synthetic potential fields data generator. **Annals of Geophysics**, v. 61, n. 1, p. 112, 2018.
- PILKINGTON, M., & TSCHIRHART, V. Practical considerations in the use of edge detectors for geologic mapping using magnetic data. **Geophysics**, v. 82, n. 3, p. J1-J8, 2017.
- RAO, B. S. R., MURTHY, I. V. R., RAO, C. V. Two methods for computer interpretation of magnetic anomalies of dikes. **Geophysics**, v. 38, n. 4, p. 710-718, 1973.
- REFORD, M. S. Magnetic anomalies over thin sheets. **Geophysics**, v. 29, n. 4, p. 532-536, 1964.
- REID, A. B., ALLSOP, J. M., GRANSER, H., MILLETT, A. T., & SOMERTON, I. W. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. **Geophysics**, v. 55, n. 1, p. 80-91, 1990.

- ROEST, W. R., VERHOEF, J., & PILKINGTON, M. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. **Geophysics**, v. 57, n. 1, p. 116-125, 1992.
- RUBERTI, E., GOMES C, B., & COMIN CHIARAMONTI, P. The alkaline magmatism from the Ponta Grossa Arch. 2005.
- SALEM, A., WILLIAMS, S., FAIRHEAD, J. D., RAVAT, D., & SMITH, R. Tilt-depth method: A simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives. **The Leading Edge**, v. 26, n. 12, p. 1502-1505, 2007.
- SALEM, A., WILLIAMS, S., FAIRHEAD, J. D., SMITH, R., & RAVAT, D. Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives. **Geophysics**, v. 73, n. 1, p. L1-L10, 2008.
- SILVA, J. B. C., BARBOSA, V. C. F. 3D Euler deconvolution: Theoretical basis for automatically selecting good solutions. **Geophysics**, v. 68, n. 6, p. 1962-1968, 2003.
- SOUZA, J., & FERREIRA, F. J. F. On the use of derivatives for interpreting magnetic anomalies due to dyke-like bodies: qualitative and quantitative analysis. In: **Istanbul 2012-International Geophysical Conference and Oil & Gas Exhibition**. Society of Exploration Geophysicists and The Chamber of Geophysical Engineers of Turkey, 2012. p. 1-4.
- SOUZA, J., & FERREIRA, F. J. F. On the use of derivatives for interpreting magnetic anomalies due to dyke-like bodies II: application to synthetic and field data. In: **SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013**. Society of Exploration Geophysicists, 2013. p. 1121-1125.
- SOUZA, J., & FERREIRA, F. J. F. The application of the Signum transform to the interpretation of magnetic anomalies due to prismatic bodies. In: **ASEG Extended Abstracts 2015**, n. 1, p. 1-5, 2015.
- THOMPSON, D. T. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. **Geophysics**, v. 47, n. 1, p. 31-37, 1982.
- VERDUZCO, B., FAIRHEAD, J. D., GREEN, C. M., & MACKENZIE, C. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. **The Leading Edge**, v. 23, n. 2, p. 116-119, 2004.
- VIEIRA, A. J. Geologia do centro e nordeste do Paraná e centro-sul de São Paulo. In: **27º Congresso Brasileiro de Geologia**. 1973. p. 259-277.
- VILLE, J. Théorie et applications de la notion de signal analytique. **Cables et Transmission**, v. 2, n. 1, p. 61-74, 1948.
- WIJNS, C., PEREZ, C., & KOWALCZYK, P. Theta map: edge detection in magnetic data. **Geophysics**, v. 70, n. 4, p. L39-L43, 2005.

ANEXOS

A.1. ESTRUTURA DO PROGRAMA

O Grav Mag Suite é composto por diversas funções escritas em linguagem *MATLAB SCRIPT*. A função que carrega a interface principal do programa encontra-se disposta no diretório raiz, que possui, também, as seguintes sub-pastas: *\ascii files*, *\control files*, *\tbl*, *\images*, *\Menu*, *\Processing* e *\Third-party*. As quatro primeiras subpastas são responsáveis por armazenar arquivos de dados sintéticos, arquivos de controle, tabelas de cores e imagens utilizadas em algumas interfaces do programa.

O diretório *\Menu* contém sub-pastas onde estão dispostas as funções responsáveis por gerar as interfaces gráficas complementares. As demais funções estão distribuídas nas pastas *\Processing* e *\Third-party*, a depender de terem sido desenvolvidas neste trabalho ou desenvolvidas por terceiros. A figura a seguir esquematiza a estrutura dos diretórios do programa (Fig. A.1).

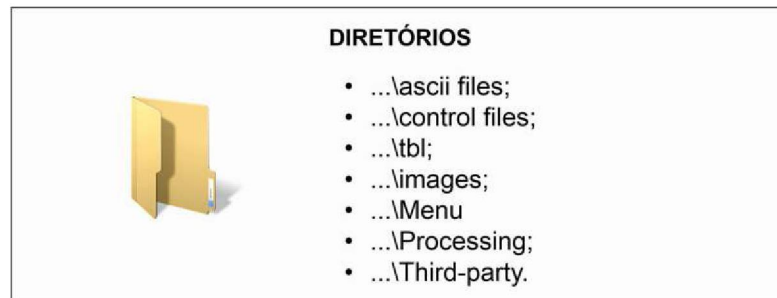


Figura A.1 – Estrutura dos diretórios do Grav Mag Suite.

A interface principal possui menus que se comunicam com as interfaces secundárias localizadas no diretório *\Menu*, o que dá acesso ao usuário a todas as ferramentas implementadas. Os menus da interface principal são *File*, *Profile*, *Grid*, *Field Transformations*, *Enhancement Filters*, *Semiquantitative Methods*, e *Modeling*. (Fig. A.2).

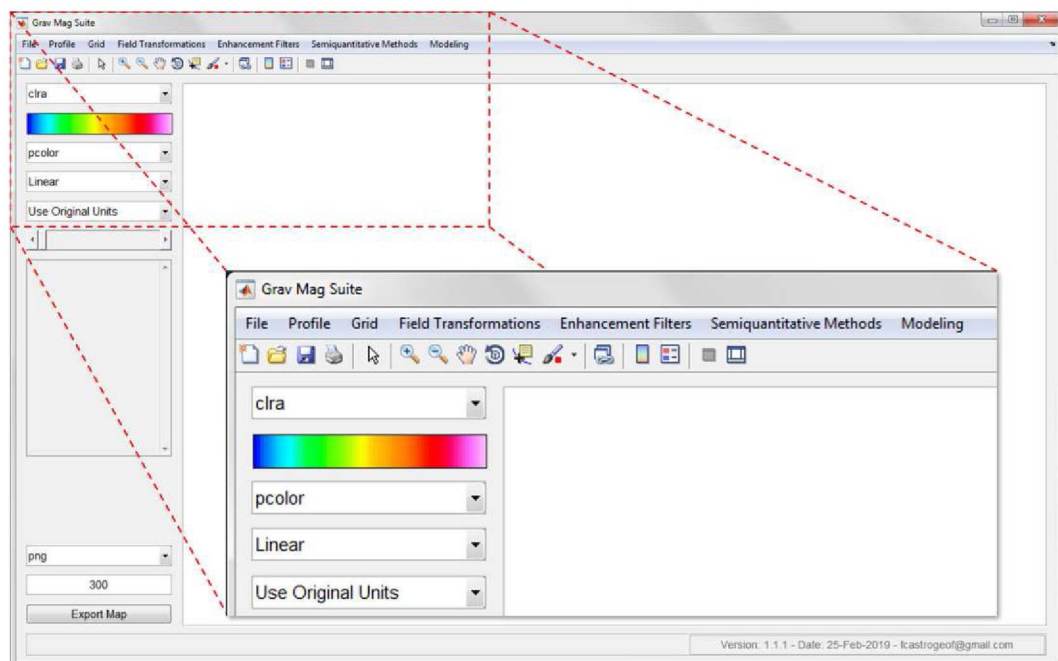


Figura A.2 – Interface principal do Grav Mag Suite com destaque para os principais componentes gráficos.

O menu *File* é responsável pela abertura de dados, por acessar informações sobre a estatística de dados interpolados, por exportar dados interpolados em formatos comuns de imagem, como JPEG, PNG, TIFF, dentre outros. O menu *Profile* possui opções responsáveis pela aplicação de filtros de realce nos dados em formato de perfil, pela aplicação de ruído, e pela extração de perfis a partir de dados interpolados. O menu *Grid* apresenta funções que realizam a interpolação de dados dispostos irregularmente, aplicam operações de janelamento, extraem o contorno de dados interpolados, preenchem vazios nos dados (*dummy/NaN*), removem superfícies de tendência e adicionam ruído.

O menu *Field Transformations* possui opções responsáveis pela aplicação de filtros a dados interpolados, como por exemplo, filtros que calculam a derivada na direção desejada, que continuam o campo para cima ou para baixo, reduzem dados magnéticos ao polo e ao equador, removem feições dispostas em direções específicas, removem certas bandas de frequência, dentre outros. O menu *Enhancement Filters* agrupa filtros qualitativos capazes de realçar feições a partir de campos potenciais anômalos.

O menu *Semiquantitative Methods* reúne funções que calculam parâmetros físicos e geométricos de interesse associados aos corpos causadores. O menu *Modeling* apresenta funções que geram anomalias magnéticas e gravimétricas a partir de sólidos geométricos simples, como prismas e esferas, e complexos, como poliedros.

Os componentes restantes da interface principal são responsáveis pela manipulação da representação gráfica de dados interpolados carregados no programa. Ao abrir algum dado no Grav Mag Suite, o mesmo é plotado na área caracterizada pelo retângulo branco à direita da interface. Os componentes dispostos à esquerda do gráfico alteram a tabela de cores do dado, a distribuição das cores entre linear e histograma equalizado, e o tipo do gráfico entre mapa bidimensional e tridimensional, além de apresentar informações estatísticas do dado carregado e exportá-lo em formatos de imagem. Todos os menus descritos abaixo irão ter, como dado de entrada, o campo magnético anômalo referente à área de estudo.

- Menu *File*

As funcionalidades referentes ao menu *File* encontram-se representadas na Figura A.3, e conectam a interface principal com as seguintes funções de interface:

1. *GUIdataStatistics.m*;
2. *GUIgenerateColormap.m*;
3. *GUIexportMap.m*.

As funcionalidades restantes do menu *File* não se conectam com funções de interface, porém executam blocos de código que realizam certas tarefas, como o carregamento de dados, por meio de caixas de diálogo de seleção e o fechamento da interface gráfica principal.

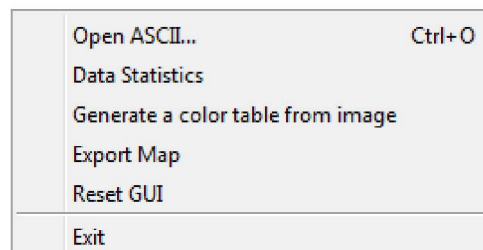


Figura A.3 – Funcionalidades presente no menu *File*.

A opção *Open ASCII...* permite que dados sejam carregados, por meio de uma caixa de diálogo de seleção, possibilitando a navegação até o diretório certo dado se encontra. O

Grav Mag Suite é capaz de carregar dados com codificação ASCII nos formatos XYZ, TXT e DAT, e organizados no padrão de três colunas, podendo ou não apresentar cabeçalho.

A opção *Data Statistics* abre uma interface gráfica secundária, que calcula a estatística do dado carregado. O lado esquerdo da interface possui um painel com componentes gráficos que fornecem informações a respeito do número total de amostras do dado, valor mínimo, máximo, média aritmética, mediana, desvio padrão, etc. O lado direito da interface gráfica possui um painel dedicado a plotar o dado carregado. Os valores que compõem o dado carregado são representados na forma de histograma e diagrama de extremos e quartis (*boxplot*) (Figura A.4).

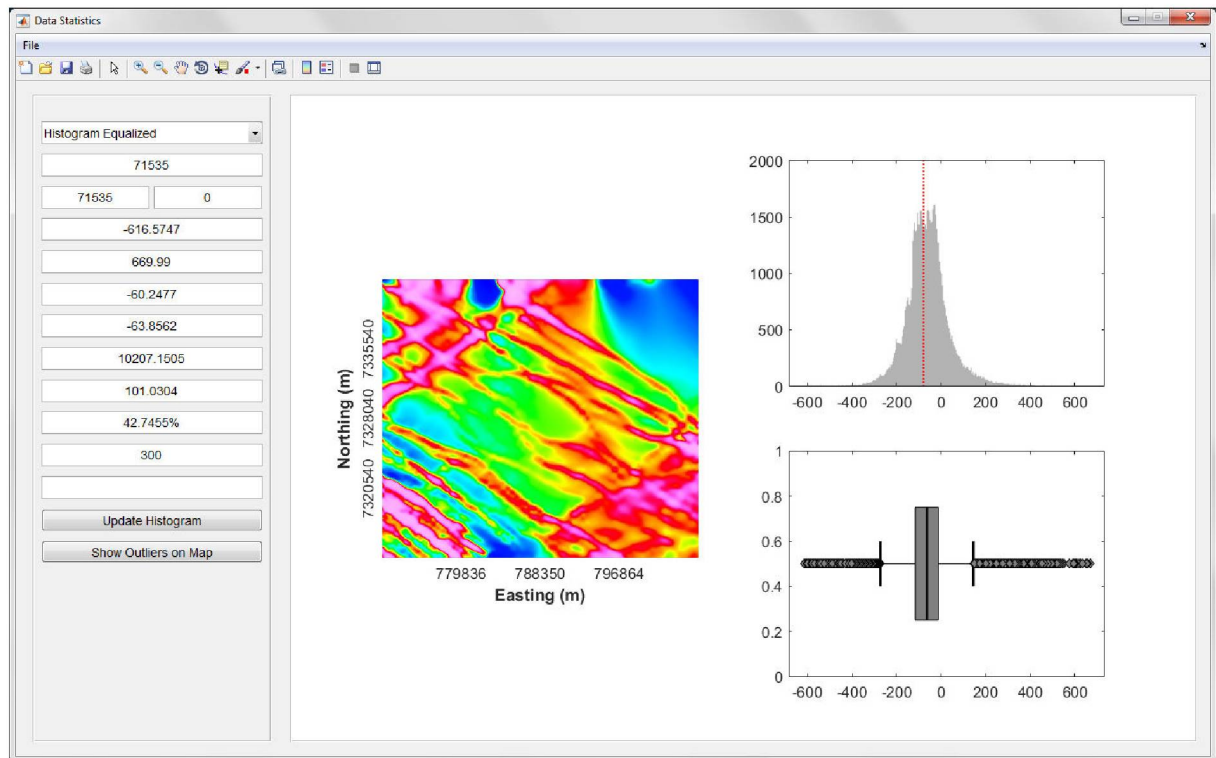


Figura A.4 – Interface gráfica referente a opção *Data Statistics*.

A opção *Generate a color table from image* converte tabelas de cores no formato de imagem para o formato TBL aceito pelo Grav Mag Suite. A opção *Export Map* carrega uma interface gráfica que possui opções capazes de gerar *templates* de mapas, com indicação de coordenadas, escala gráfica, e da seta do Norte (Figura A.5). O mapa com o *template* gerado pode ser exportado em formatos comuns de imagem, com o PNG, JPEG e JPG, em resoluções predefinidas pela densidade de pixels (DPI).

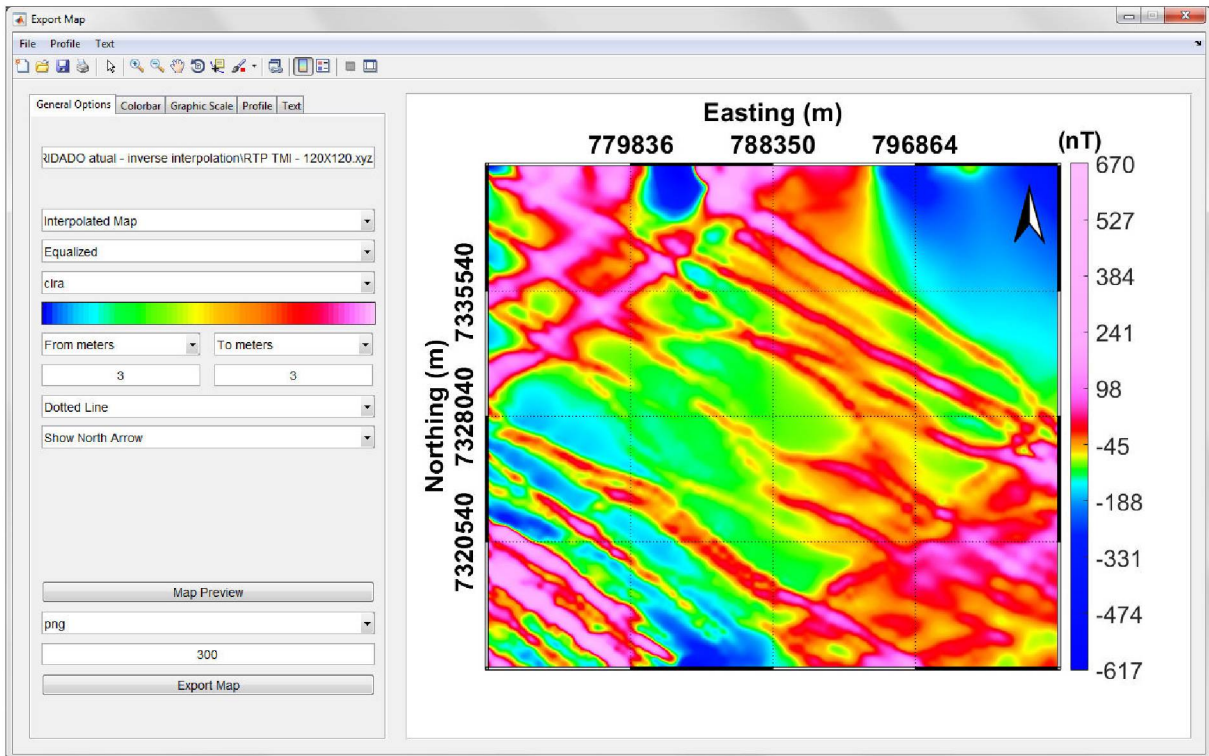


Figura A.5 – Interface gráfica referente a opção *Export Map*.

A opção *Reset GUI* restaura a interface gráfica principal para a forma padrão, verificada quando o programa acaba de ser executado. A última opção do menu *File*, denominada *Exit*, carrega uma caixa de diálogo onde é questionado ao usuário se o mesmo deseja sair do programa ou não e dependendo da decisão, o programa permanece aberto ou é de fato fechado. A mesma caixa de diálogo é carregada se o usuário clicar sobre botão vermelho x no canto superior direito da interface principal.

- Menu *Profile*

As funcionalidades presentes no menu *Profile* encontram-se representadas na Figura A.6, e conectam a interface principal com as seguintes funções de interface:

1. *GUIprofileAnalysis.m*;
2. *GUextractProfile.m*;
3. *GUaddNoiseProfile.m*.

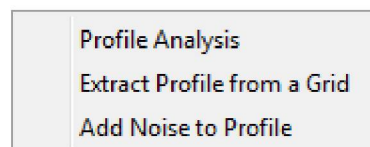


Figura A.6 – Funcionalidades presentes no menu *Profile*.

A primeira funcionalidade do menu *Profile* carrega uma interface gráfica responsável por aplicar filtros de realce e por calcular as derivadas horizontal e vertical dos dados em forma de perfil (Figura A.7). Os filtros de realce são os mesmos disponíveis nos menus *Enhancement Filters* e *TDR±TDX*, descritos posteriormente.

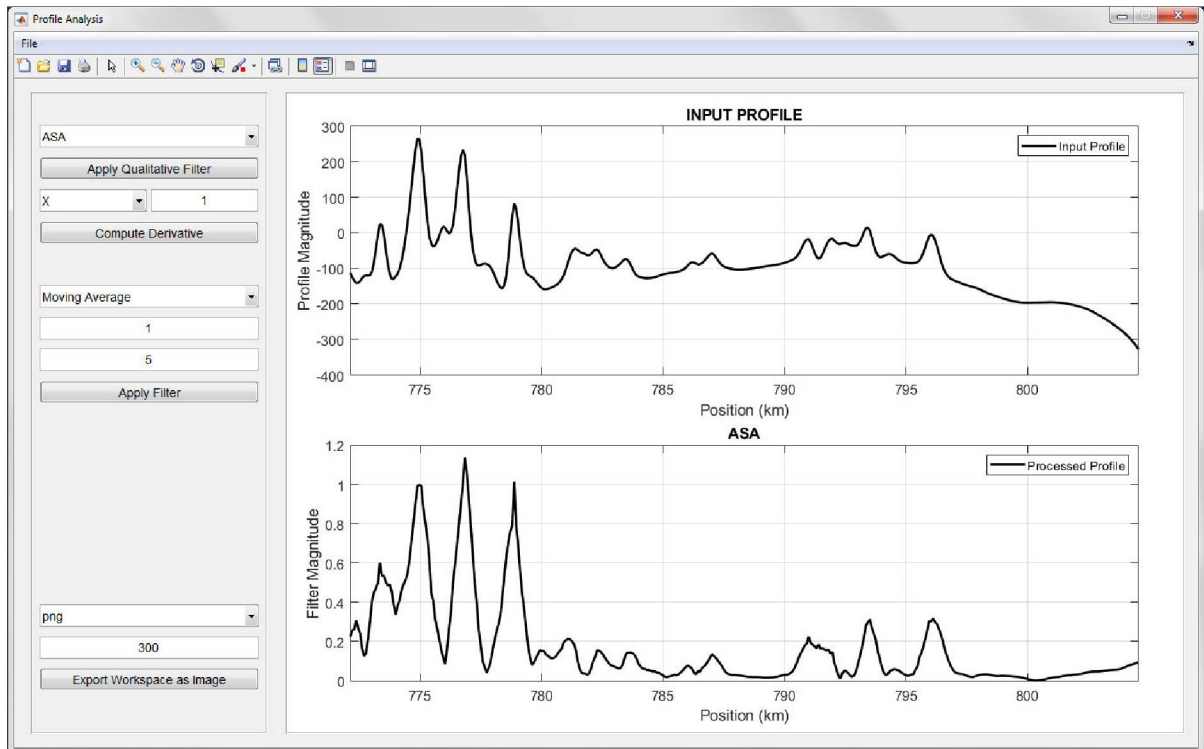


Figura A.7 – Interface gráfica referente à opção *Profile Analysis*.

A segunda opção do menu *Profile* é responsável pela extração de perfis a partir de dados interpolados bidimensionais. É possível extrair perfis de forma interativa, por meio da marcação do perfil no mapa anômalo ou por meio da indicação da linha ou da coluna que se deseja extrair. A primeira forma permite a extração de perfis oblíquos, enquanto que a segunda limita-se às direções horizontais e verticais.

O modo interativo permite a extração de perfis constituídos por um único segmento de reta ou por múltiplos segmentos. Pode-se escolher que a coluna das coordenadas do perfil seja caracterizada pelas coordenadas horizontais, verticais, ou pela distância verdadeira. As coordenadas que compõem o perfil podem ser salvas em um arquivo de controle no formato DAT de modo que o usuário pode carregar as informações salvas para a extração de perfis associados a outros mapas interpolados (Figura A.8).

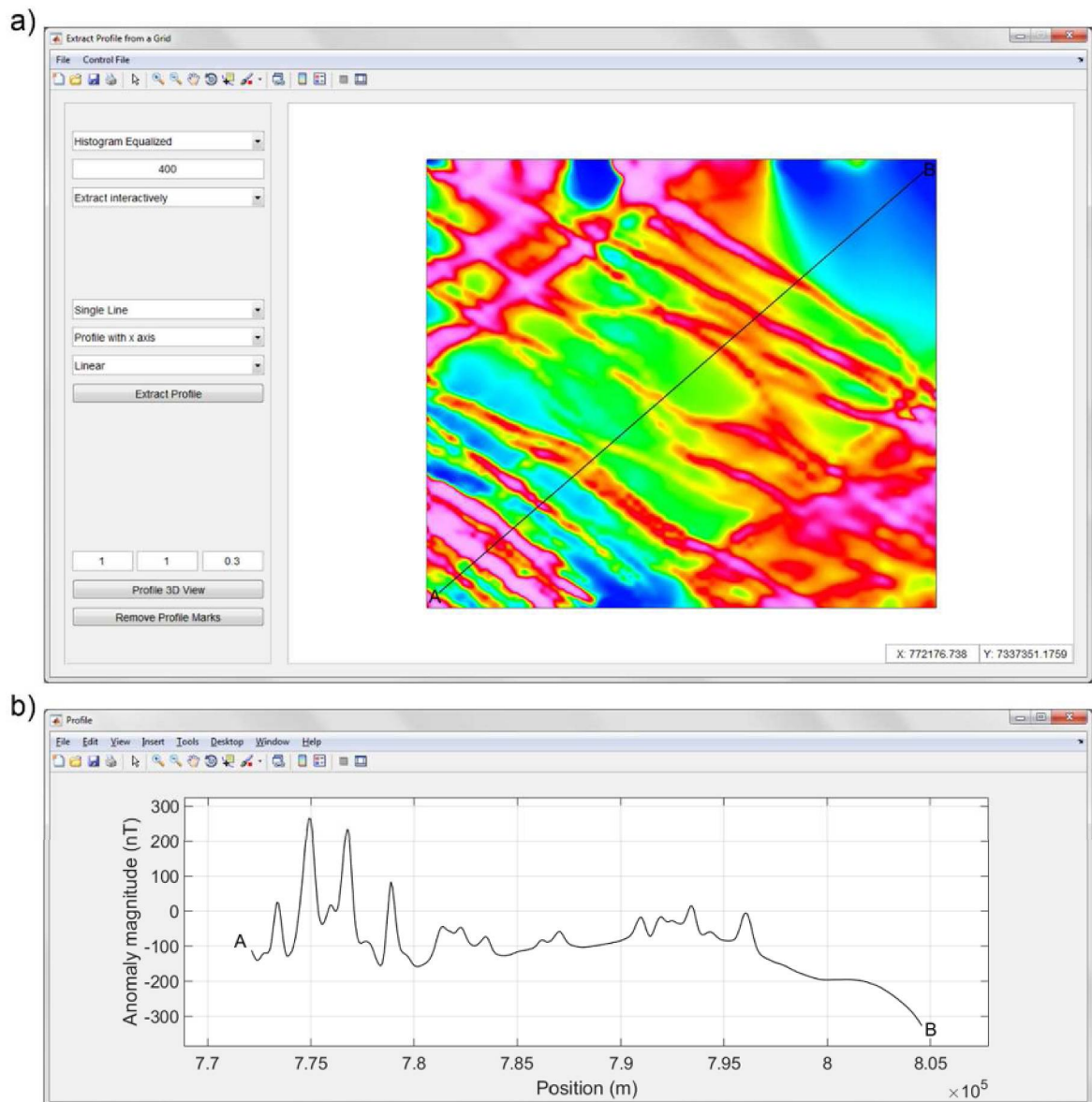


Figura A.8 – Interface gráfica referente à opção *Extract Profile from a Grid*. a) Interface principal de extração de perfis. b) Exemplo de perfil extraído.

A terceira opção do menu *Profile* adiciona ruído gaussiano a dados em formato de perfil (Figura A.9). Esta ferramenta é bastante utilizada para contaminar dados sintéticos livres de ruído, para fins de estudo das limitações de uma determinada técnica sob condições de baixa razão sinal-ruído.

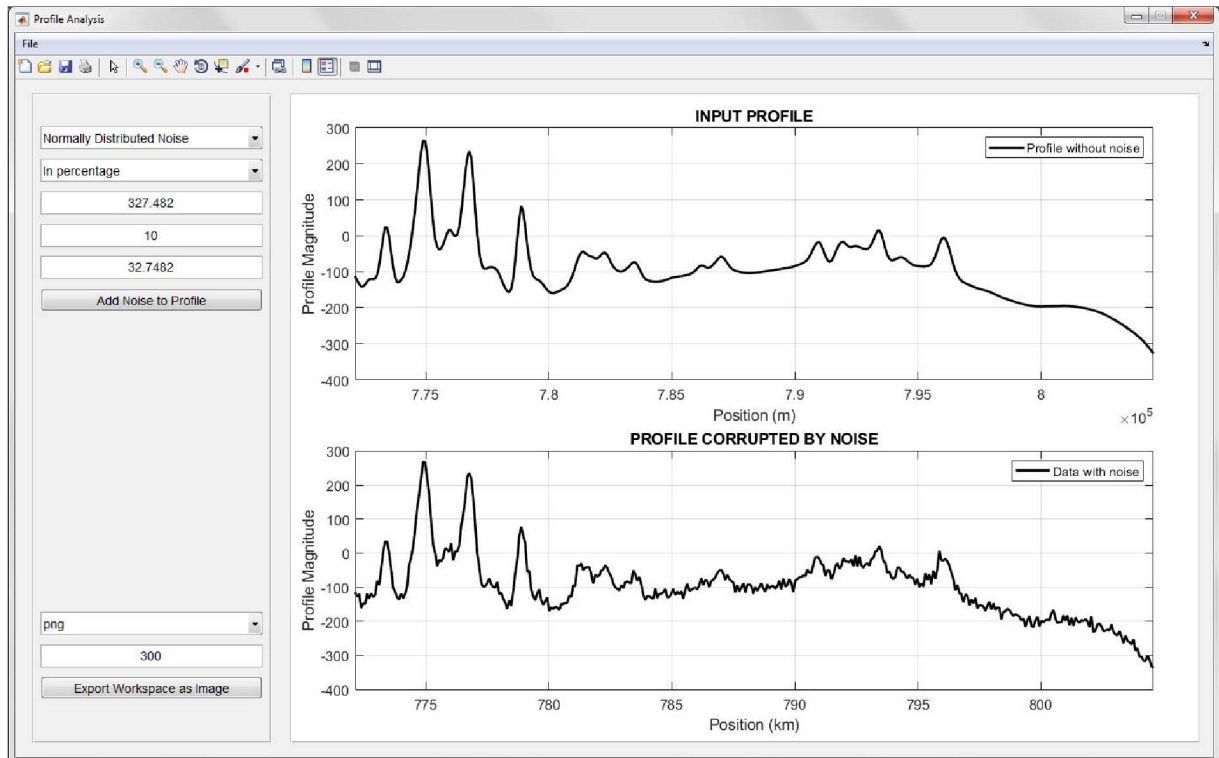


Figura A.9 – Interface gráfica referente à opção *Add Noise to Profile*.

A interface da Figura A.9 possibilita adicionar ruído uniforme e gaussiano. A magnitude do ruído uniforme, ou o desvio padrão do ruído gaussiano, pode ser fornecida como o percentual da magnitude máxima da anomalia ou como um valor fixo com mesma unidade do dado a ser perturbado.

- Menu *Grid*

As opções presentes no menu *Grid* estão representadas na Figura A.10 e conectam a interface principal com as seguintes funções de interface:

1. *GUIinverseInterpolation.m*;
2. *GUIgapFilling.m*;
3. *GUIgridData.m*;
4. *GUIscatteredInterpolant.m*;
5. *GUIregridData.m*;
6. *GUIwindowGrid.m*;
7. *GUIgridOutline.m*;
8. *GUIfillNaN.m*;
9. *GUIclassesSeparation.m*;
10. *GUItrendRemoval.m*;
11. *GUIaddNoise*.

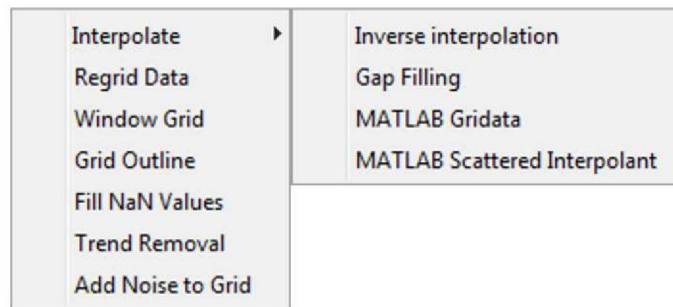


Figura A.10 – Opções presentes no menu *Grid*.

A primeira opção do menu *Grid* consiste de quatro interfaces gráficas responsáveis pela interpolação de dados dispostos de forma irregular. A primeira interface interpola dados utilizando métodos de interpolação inversa (Guo et al. 2012). Este método reduz efeitos associados à amostragem anisotrópica através de um parâmetro que controla o grau de influência do valor de um ponto amostrado sobre os pontos vizinhos a serem interpolados (Figura A.11).

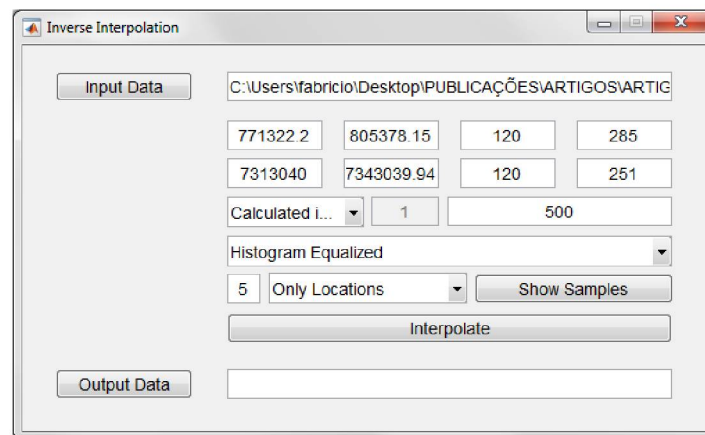


Figura A.11 – Interface gráfica referente à opção *Inverse Interpolation*.

A segunda interface interpola dados por meio de um interpolador comumente utilizado na recuperação de imagens com pixels sem informação, baseado na transformada cosseno (Garcia, 2010; Wang et al., 2012). Este método de interpolação possui um parâmetro que controlar o grau de suavidade do dado interpolado e reduzir efeitos causados pela amostragem anisotrópica de dados aéreos (Figura A.12).

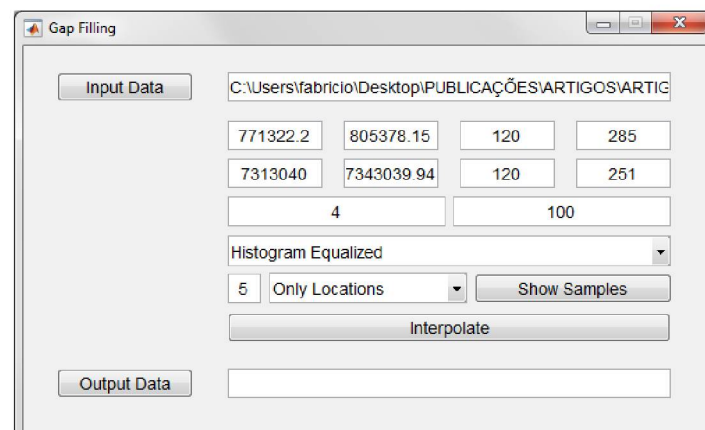


Figura A.12 – Interface gráfica referente à opção *Gap Filling*.

As duas interfaces finais interpolam dados dispostos irregularmente por meio de funções padrões do MATLAB. Estas funções, denominadas *griddata* e *scatteredinterpolant* e são capazes de interpolar utilizando os seguintes métodos: bilinear, bicúbico, vizinho mais próximo e vizinho natural (Figura A.13).

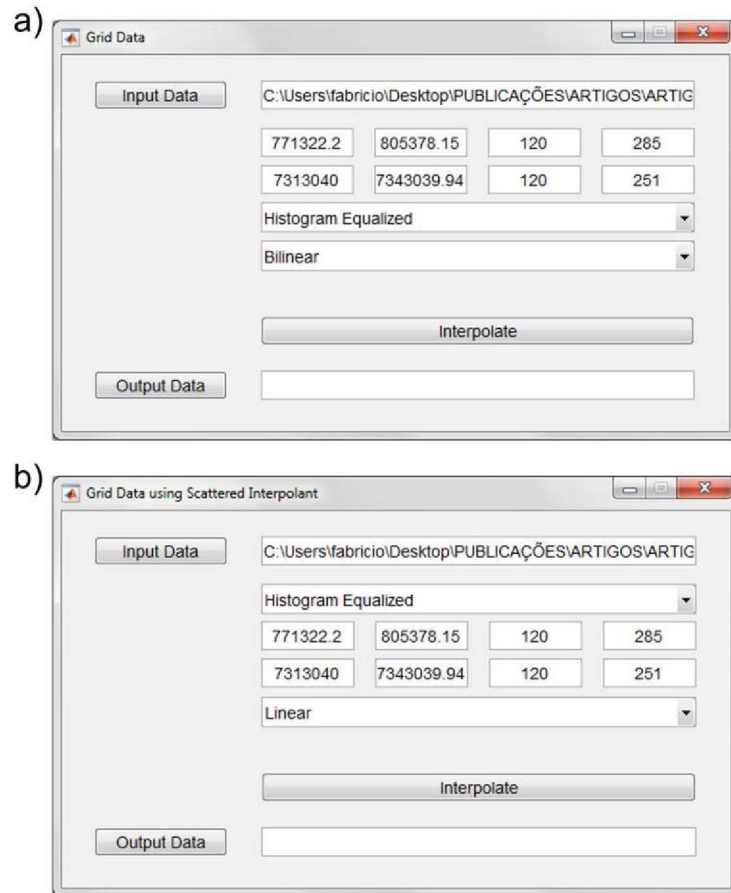


Figura A.13 – Interfaces gráficas referentes a métodos de interpolação padrões do MATLAB. a) Interface que interpola por meio da função *griddata*. b) Interface que interpola por meio da função *scatteredInterpolant*.

Ao carregar o dado a ser interpolado, alguns componentes gráficos das interfaces acima (Figuras A.11,12,13) são preenchidos automaticamente, como os limites mínimos e máximos de ambas as coordenadas x e y, os tamanhos horizontal e vertical da célula de interpolação e a quantidade de pontos da malha de interpolação nas direções x e y. A Figura A.14 lista todas as técnicas de interpolação descritas acima aplicadas ao dado da área de estudo.

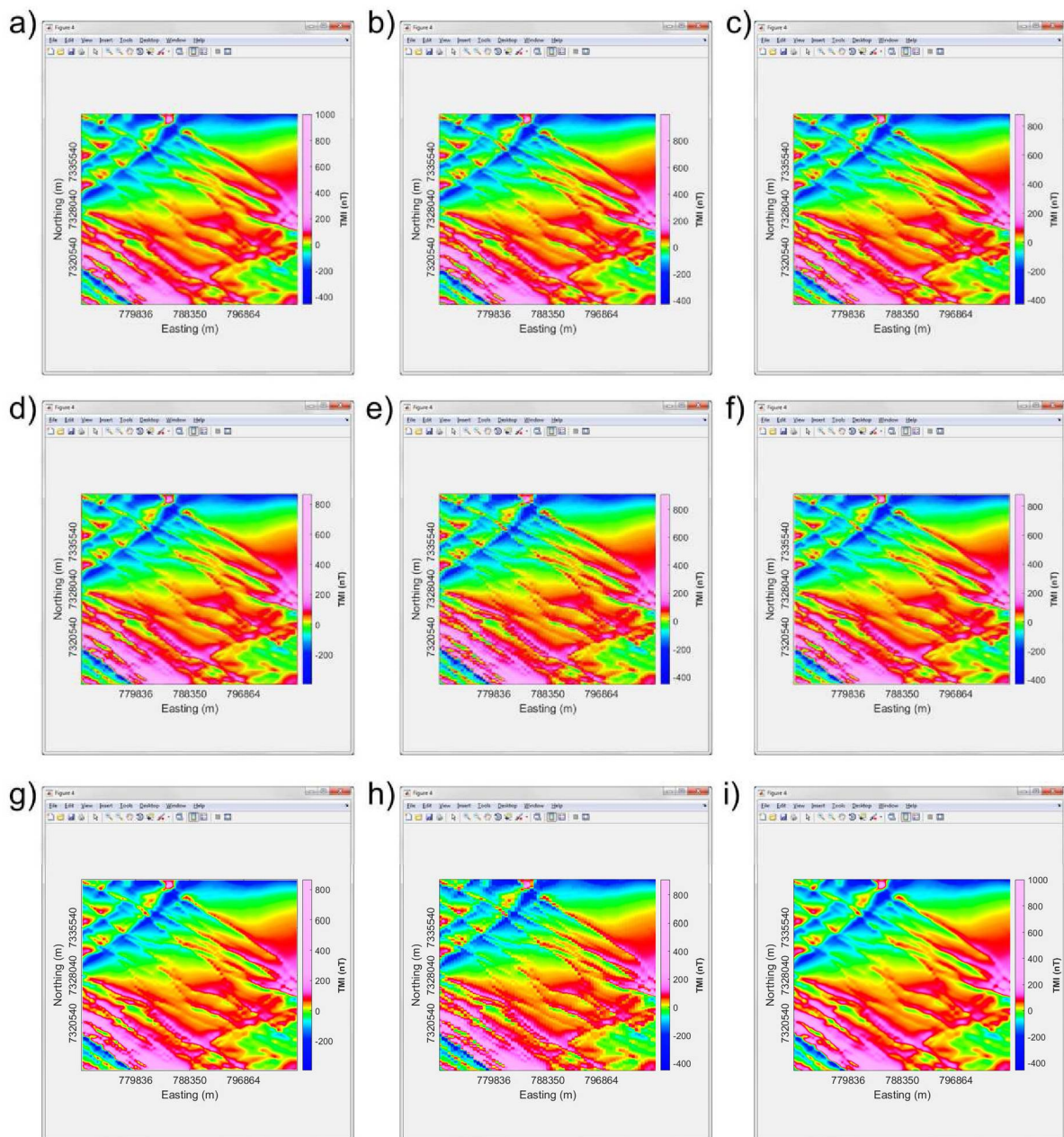


Figura A.14 – Métodos de interpolação disponíveis no Grav Mag Suite. a) Dado interpolado com a técnica *inverse interpolation*. b) Dado interpolado com a técnica *gap filling*. c) Dado interpolado com a função *griddata* do MATLAB e interpolador bilinear. d) Dado interpolado com a função *griddata* do MATLAB e interpolador bicúbico. e) Dado interpolado com a função *griddata* do MATLAB e interpolador vizinho mais próximo. f) Dado interpolado com a função *griddata* do MATLAB e interpolador vizinho natural. g) Dado interpolado com a função *scatteredInterpolant* do MATLAB e interpolador bilinear. h) Dado interpolado com a função *scatteredInterpolant* do MATLAB e interpolador vizinho mais próximo. i) Dado interpolado com a função *scatteredInterpolant* do MATLAB e interpolador vizinho natural.

A segunda opção do menu *Grid* é responsável por aumentar ou reduzir a taxa de amostragem de dados interpolados. Ao carregar um dado interpolado sua quantidade de linhas e colunas são fornecidas e estes valores podem ser alterados pelo usuário para obter um *grid* mais ou menos denso que o *grid* original (Figura A.15).

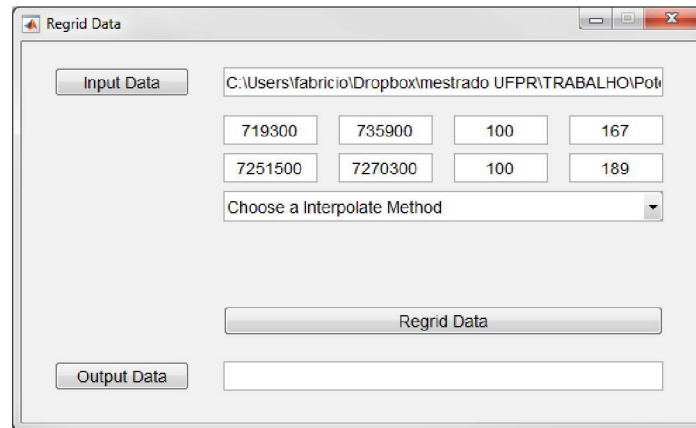


Figura A.15 – Interface gráfica referente à opção *Regrid Data*.

A terceira opção do menu *Grid* carrega uma interface gráfica com diversas funções capazes de aplicar uma janela a um dado interpolado. Esta janela pode ter diversos formatos, sendo eles: retangular, poligonal, irregular ou na forma de elipse. Os valores do dado interpolado localizados fora da janela são transformados em dummy/NaN e os valores restantes são mantidos. A janela pode ser desenhada pelo usuário, de forma interativa ou por meio de um arquivo do tipo PLY ou SHP, que contém informações das coordenadas dos vértices da janela. As janelas desenhadas interativamente podem ser salvas em formato PLY ou SHP, para serem posteriormente utilizadas (Figura A.16).

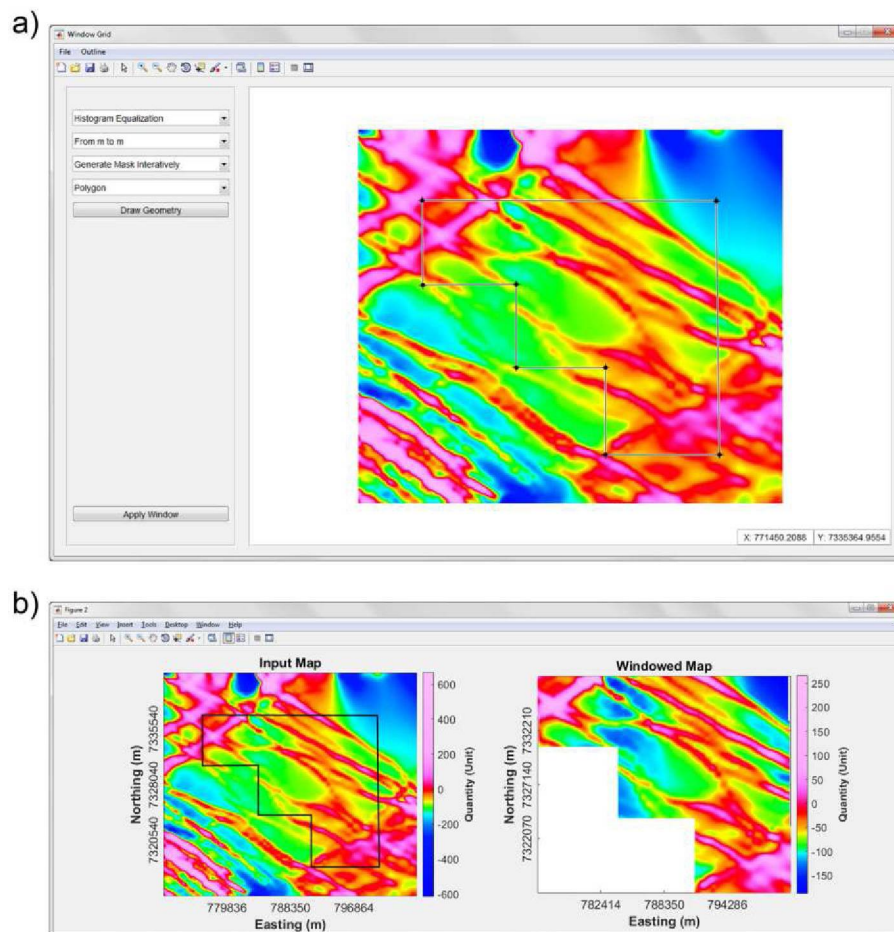


Figura A.16 – Interface gráfica referente à opção *Window Grid*. a) Interface principal com indicação de uma janela poligonal. b) Resultado do janelamento aplicado ao dado carregado.

A quarta opção do menu *Grid* carrega uma interface gráfica que gera o contorno de dados interpolados. Este contorno é definido pela transição entre dado amostrado e ausência de dado (Figura A.17).

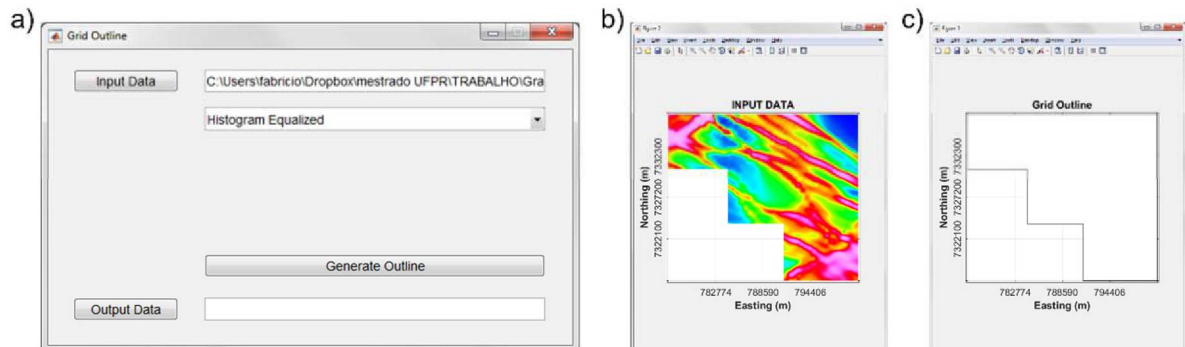


Figura A.17 – Contorno de um dado interpolado. a) Interface gráfica referente à opção *Grid Outline*. b) Dado de entrada. c) Contorno do dado de entrada.

A quinta opção do menu *Grid* é responsável pelo preenchimento de *grids* que possuem pontos sem informação (dummy/NaN). O preenchimento pode ser feito substituindo os pontos sem informação por um valor fornecido pelo usuário, como por exemplo 0, ou pode ser realizado por meio de algum método de interpolação (Figura A.18).

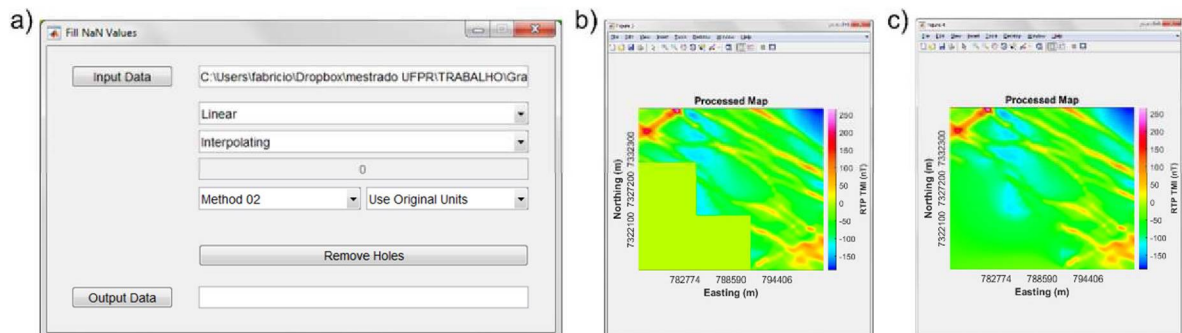


Figura A.18 – Preenchimento de um dado interpolado com pontos sem informação. a) Interface gráfica referente à opção *Fill NaN Values*. b) Dummy/NaN substituídos por zeros. c) Dummy/NaN interpolados.

A sexta opção do menu *Grid* é responsável pela remoção de uma superfície de tendência de um dado interpolado. A superfície de tendência é definida por um polinômio que se ajusta aos valores do dado carregado e pode ter diversos graus, de modo que o grau igual a 1 gera uma superfície planar e na medida em que o grau aumenta a superfície melhor se ajusta ao dado de entrada (Figura A.19).

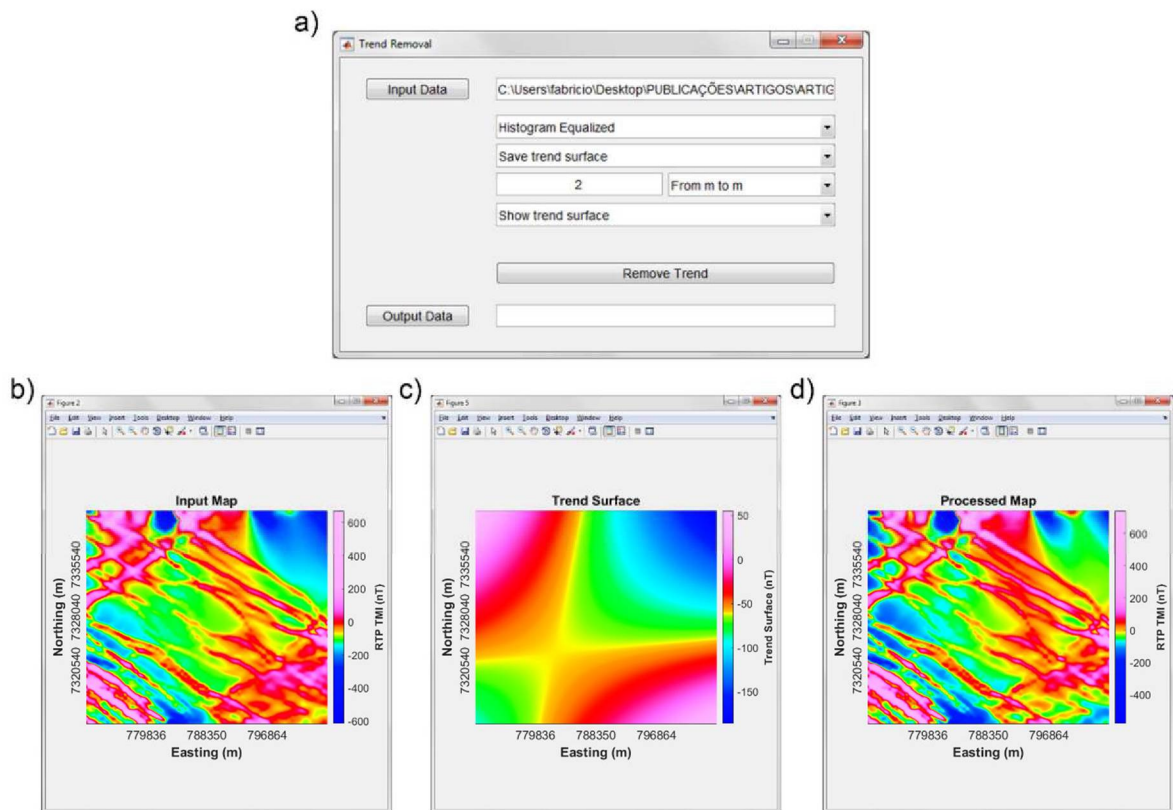


Figura A.19 – Superfície de tendência. a) Interface gráfica referente à opção *Trend Removal*. b) Dado de entrada. c) Superfície de tendência de primeira ordem. d) Dado sem a superfície de tendência.

A sétima opção do menu *Grid* é responsável pela adição de ruído tanto gaussiano quanto uniforme em um dado interpolado. As mesmas opções presentes na interface que adiciona ruído em dados na forma de perfil estão presentes nesta opção (Figura A.20).

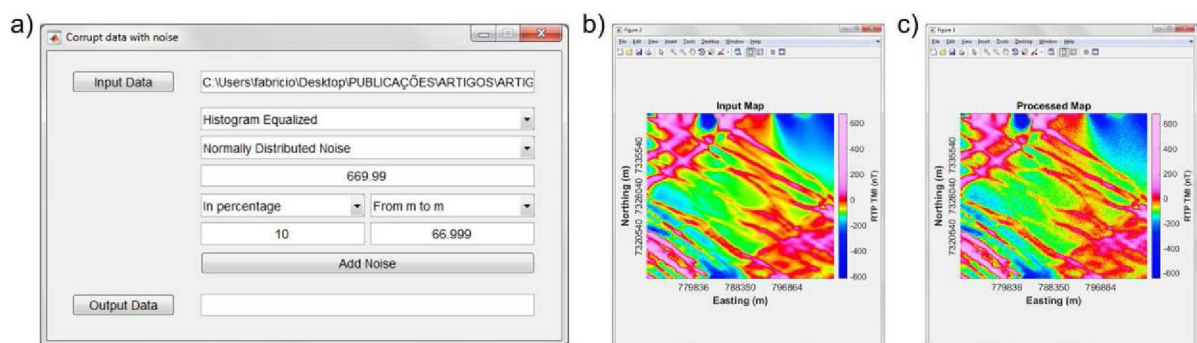


Figura A.20 – Adição de ruído em dado interpolado. a) Interface gráfica referente à opção *Add Gaussian Noise*. b) Dado de entrada sem ruído gaussiano. c) Dado de entrada com ruído gaussiano de magnitude igual a 10 nT.

- Menu *Field Transformations*

As opções presentes no menu *Field Transformations* são representadas pela Figura A.21 e conectam a interface principal com as seguintes funções de interface:

1. *GUIderivative.m*;
2. *GUIdirectionalDerivative.m*;

3. *GUIgeneralDerivativeOperator.m*;
4. *GUIfieldContinuation.m*;
5. *GUIdirectionalCosine.m*;
6. *GUIrtpGunn.m*;
7. *GUIrtpMcLeod.m*;
8. *GUIreductionToEquator.m*;
9. *GUIverticalIntegration.m*;
10. *GUIhilbertTransform.m*;
11. *GUIanisotropicDiffusionFilter.m*;
12. *GUI3x3conv.m*;
13. *GUIbutterworthFilter.m*.

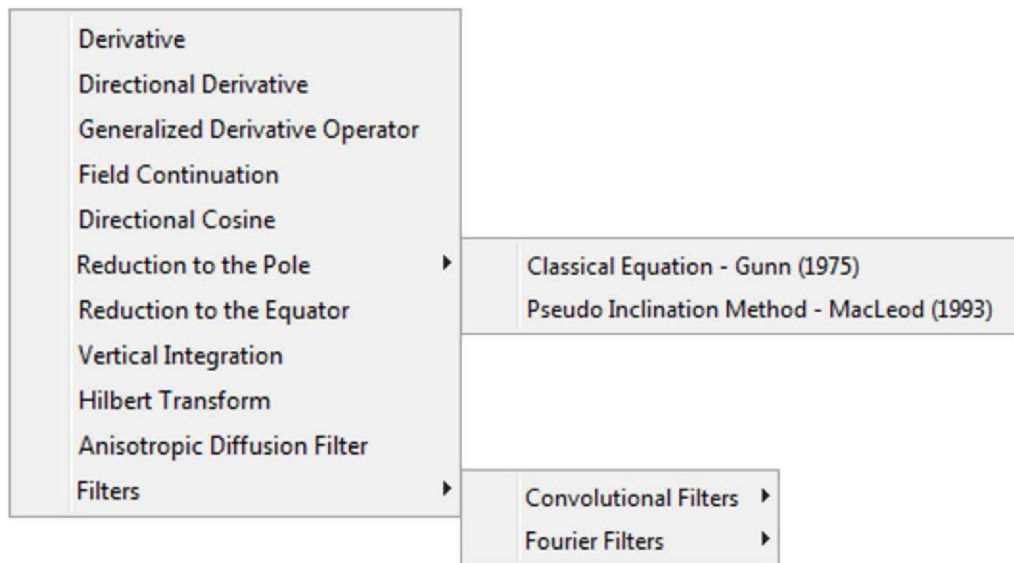


Figura A.21 – Opções presentes no menu *Field Transformations*.

A primeira opção do menu *Field Transformations* carrega uma interface gráfica responsável pela derivada nas direções x , y e z de dados interpolados (Figura A.22). As derivadas são calculadas no domínio da frequência multiplicando a transformada de Fourier do dado pelo filtro correspondente (Blakely, 1996), porém as derivadas horizontais podem ser calculadas no domínio do espaço por meio da técnica de diferenças finitas.

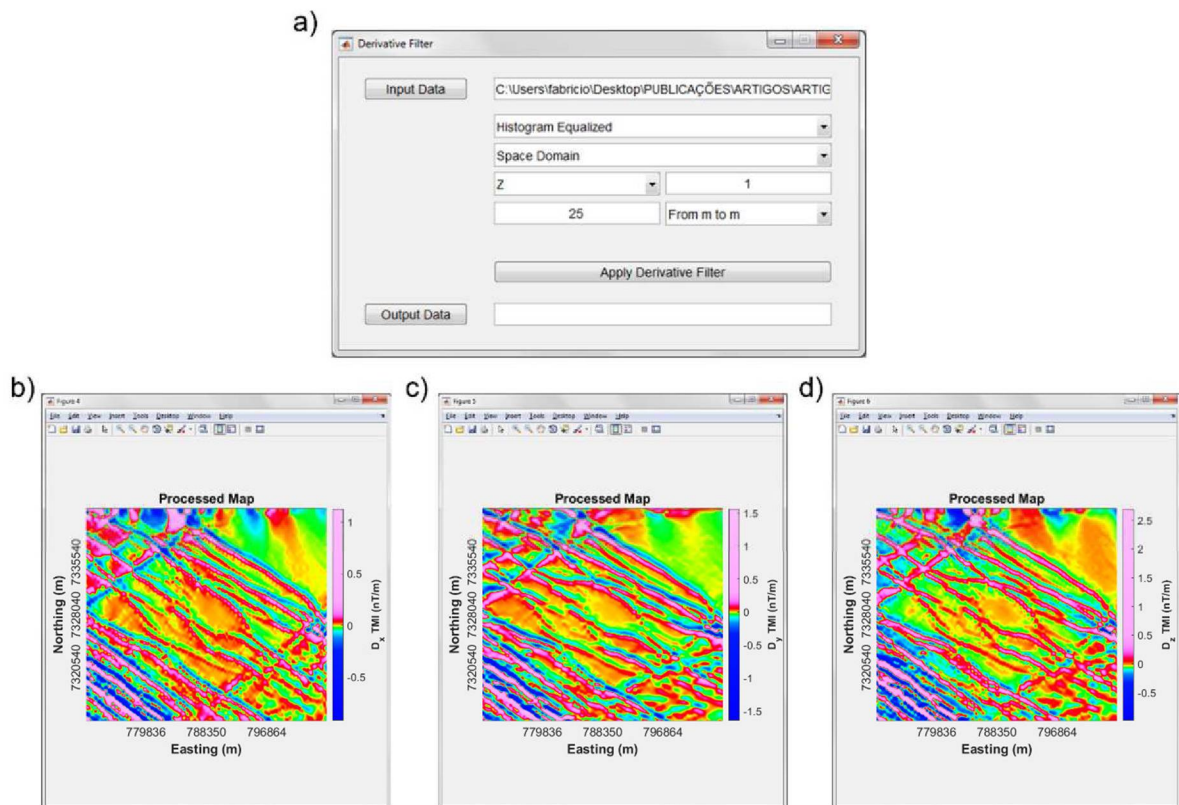


Figura A.22 – Derivada para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção *Derivative Filter*. b) Derivada na direção x. c) Derivada na direção y. d) Derivada na direção z.

A segunda opção do menu *Field Transformations* é responsável por carregar uma interface gráfica que calcula a derivada direcional de dados interpolados (Figura A.23). Pode-se escolher um valor, em graus decimais, que caracteriza a direção no plano xy (azimute) onde a derivada será calculada.

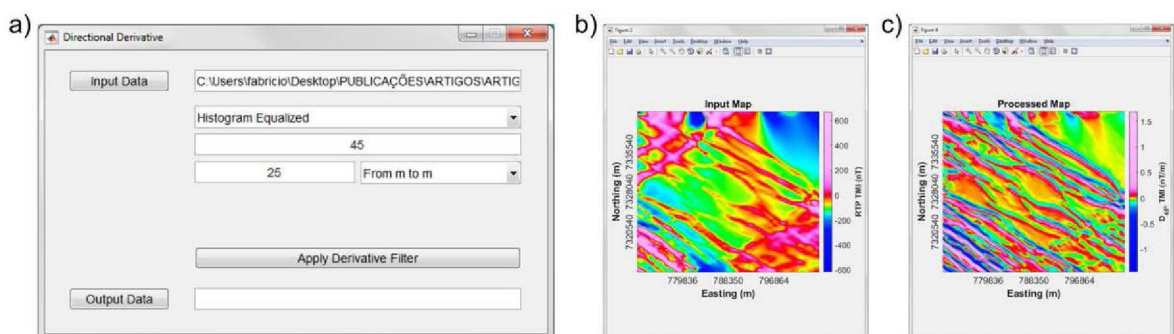


Figura A.23 – Derivada direcional para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção *Directional Derivative*. b) Campo magnético anômalo da área de estudo reduzido ao polo. c) Derivada na direção 45°.

A terceira opção do menu *Field Transformations* carrega uma interface gráfica responsável por aplicar um operador generalizado da derivada (Figura A.24). Neste operador, além da direção no plano xy, é considerado um parâmetro referente ao ângulo pertencente a um plano ortogonal ao plano horizontal (Cooper, 2010).

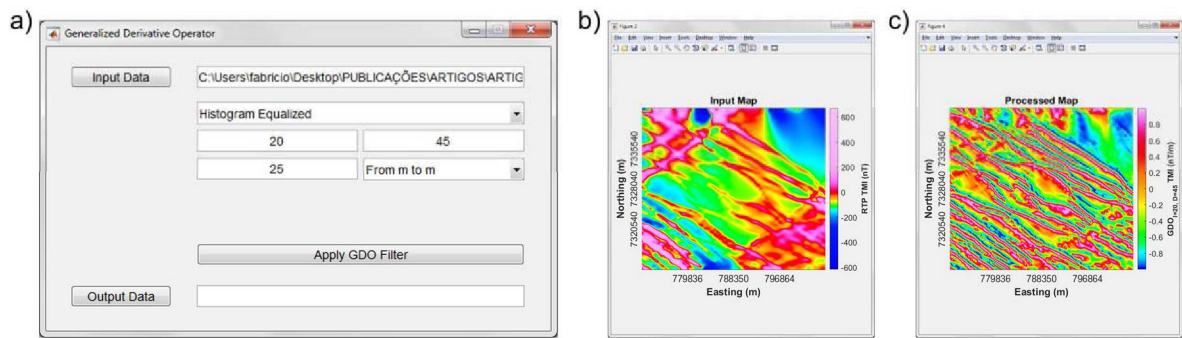


Figura A.24 – Operador generalizado da derivada para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção *Generalized Derivative Operator*. b) Campo magnético anômalo da área de estudo reduzido ao polo. c) Mapa resultante da aplicação do operador com inclinação de 20° e azimute de 45° .

A quarta opção do menu *Field Transformations* é responsável pela continuação ascendente e descendente do campo. Ambas as continuações são calculadas no domínio da frequência (Blakely, 1996), porém, devido à instabilidade do operador da continuação descendente no domínio de Fourier, que realça tanto as anomalias de alta frequência quanto o ruído, implementou-se um algoritmo melhorado proposto por Cooper (2004). Este algoritmo, assim como o algoritmo tradicional, realiza as operações no domínio da frequência, porém calcula a derivada vertical de segunda ordem do campo no domínio do espaço antes de aplicar o operador da continuação descendente seguido do operador da integral vertical (Figura A.25).

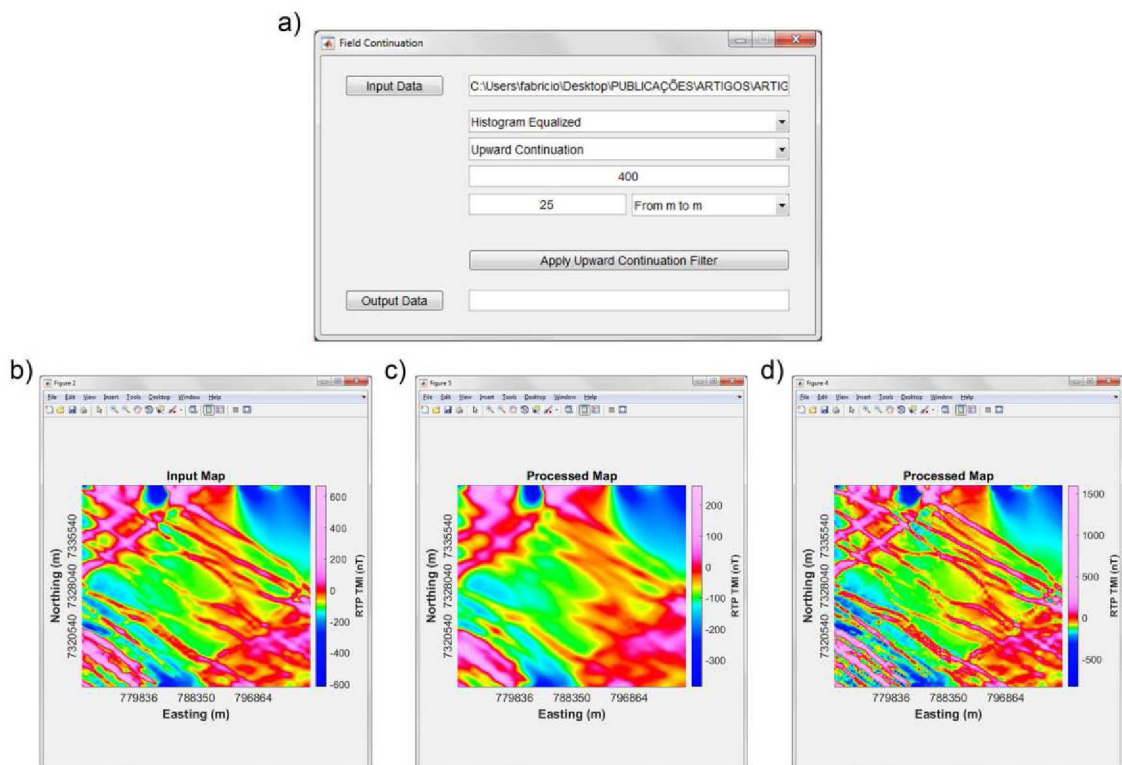


Figura A.25 – Continuação do campo para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção *Upward Continuation*. b) Campo magnético anômalo reduzido ao polo. c) Continuação ascendente para uma altura de 400 metros. d) Continuação descendente para uma altura de 200 metros utilizando o algoritmo melhorado (Cooper, 2004).

A quinta opção do menu *Field Transformations* carrega uma interface gráfica responsável por aplicar um filtro de cosseno direcional. A interface permite alterar parâmetros como o grau do filtro, o tipo do filtro e o azimute da estrutura que se deseja passar ou atenuar (Figura A.26).

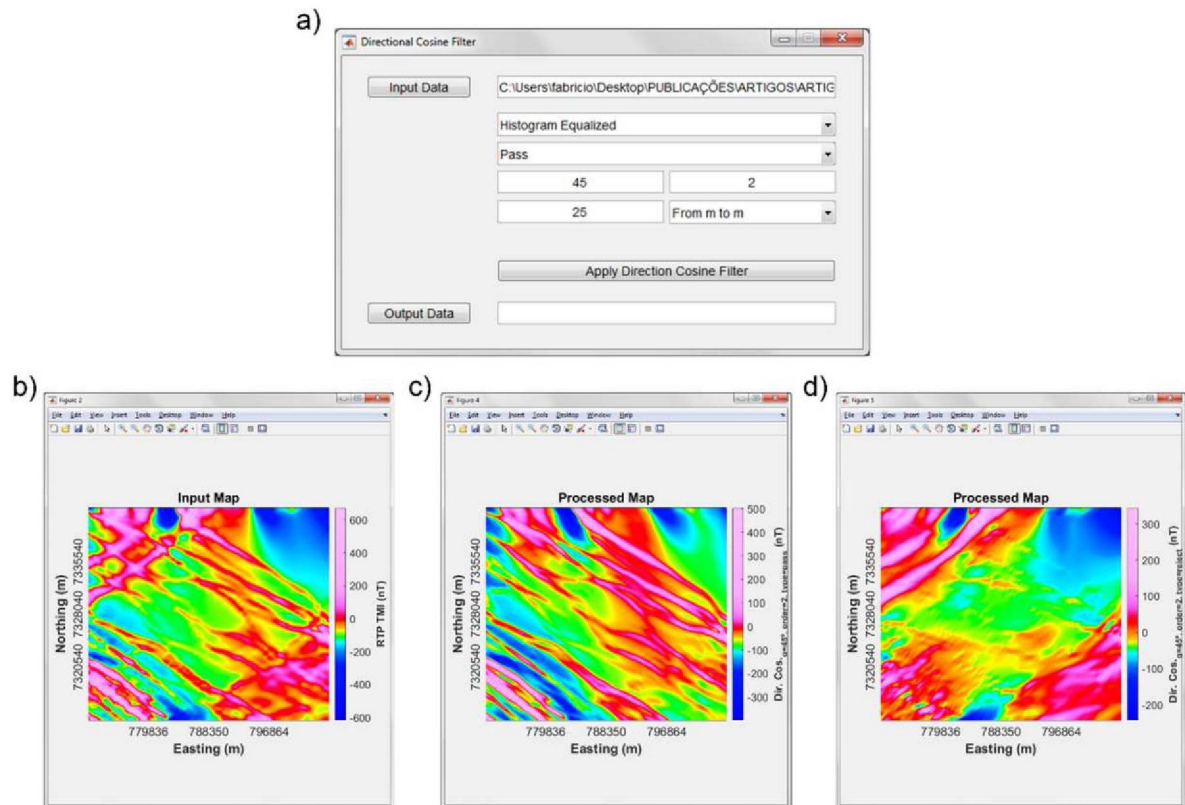


Figura A.26 – Cosseno direcional para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção *Directional Cosine Filter*. b) Campo magnético anômalo da área de estudo reduzido ao polo. c) Dado filtrado por um cosseno direcional de ordem 2, que rejeita anomalias com azimute igual a 45° . d) Dado filtrado por um cosseno direcional de ordem 2, que passa anomalias com azimute igual a 45° .

A sexta opção do menu *Field Transformations* carrega duas opções que dão acesso a interfaces gráficas que realizam a redução ao polo (Figura A.27). A primeira opção aplica o operador clássico da redução ao polo (Gunn, 1975), enquanto que a segunda opção aplica um operador melhorado, que possui um parâmetro chamado inclinação de correção de amplitude, responsável por estabilizar o operador de redução ao polo para baixas latitudes magnéticas (MacLeod et al., 1993).

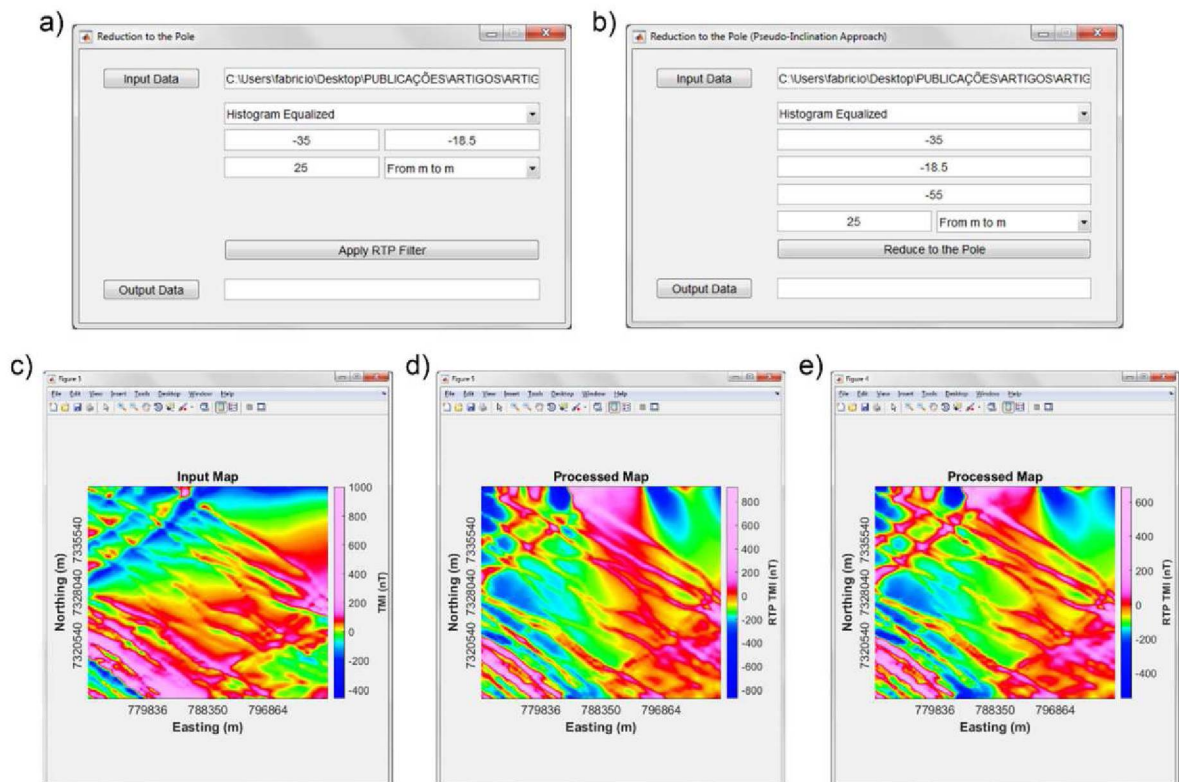


Figura A.27 – Redução ao polo para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção *Reduction to the pole (Classical Approach)*. b) Interface gráfica referente à opção *Reduction to the pole (Pseudo-Inclination Approach)*. c) Dado de entrada. c) Dado reduzido ao polo com o operador clássico ($I=-35^\circ$, $D=-19^\circ$). d) Dado reduzido ao polo com o operador que possui correção de amplitude ($I=-35^\circ$, $D=-19^\circ$, $I_a=-55^\circ$).

A sétima opção do menu *Field Transformations* carrega uma interface gráfica responsável por reduzir o dado ao equador magnético (Figura A.28).

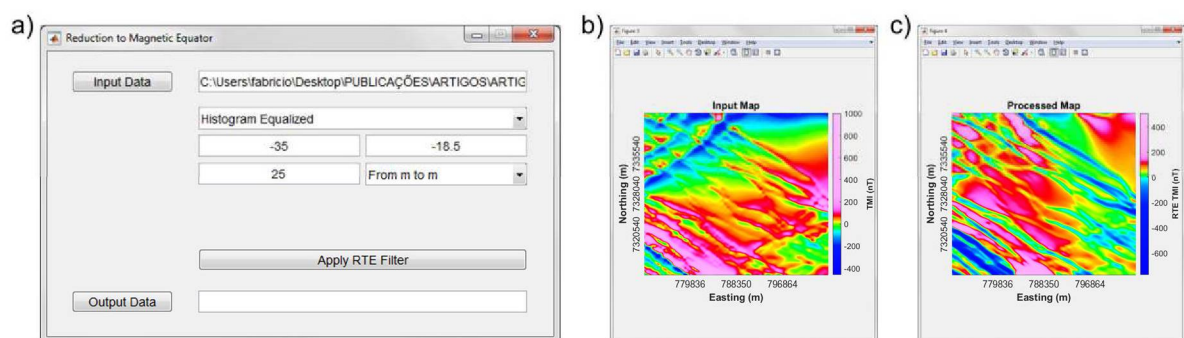


Figura A.28 – Redução ao equador para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção *Reduction to Magnetic Equator*. b) Dado de entrada. c) Dado reduzido ao equador magnético.

A oitava opção do menu *Field Transformations* carrega uma interface gráfica responsável por aplicar um filtro que calcula a integral vertical (Figura A.29).

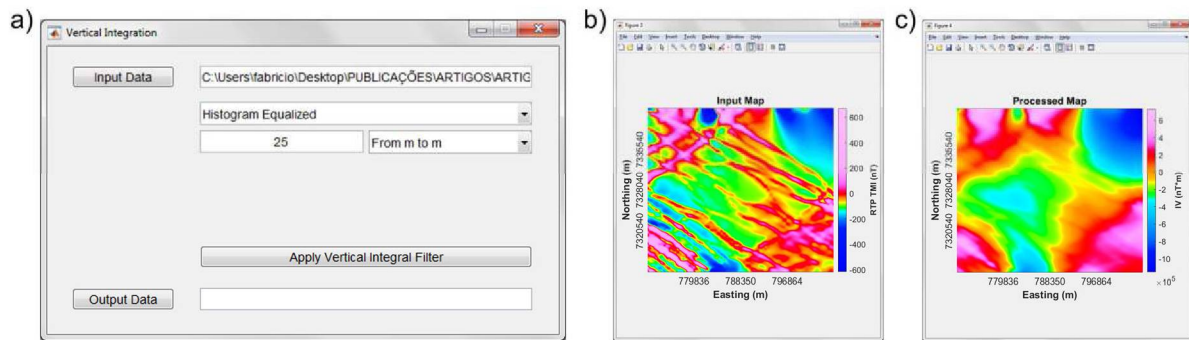


Figura A.29 – Filtro da integral vertical para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção *Vertical Integration*. b) Campo magnético anômalo da área de estudo reduzido ao polo. c) Filtro da integral vertical aplicado ao dado em (b).

A nona opção do menu *Field Transformations* carrega uma interface gráfica responsável por aplicar a transformada de Hilbert 2D (Figura A.30). Esta interface retorna, as componentes horizontais tanto na direção x, quanto na direção y da transformada de Hilbert 2D.

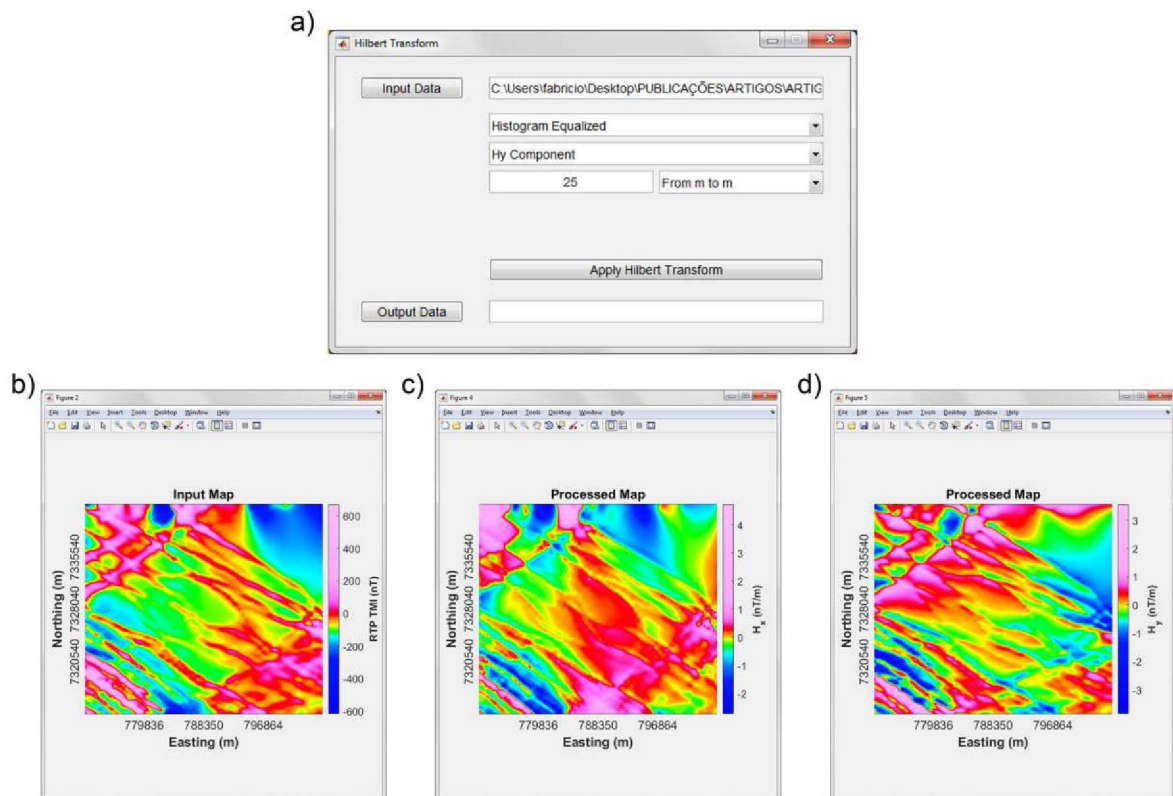


Figura A.30 – Transformada de Hilbert 2D para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção *Hilbert Transform*. b) Campo magnético anômalo da área de estudo reduzido ao polo. c) Componente x da transformada de Hilbert do dado em (b). d) Componente y da transformada de Hilbert do dado em (b).

A décima opção do menu *Field Transformations* carrega uma interface gráfica responsável pelo filtro de difusão anisotrópica (Figura A.31), que suaviza feições com baixos comprimentos de onda perpendiculares a anomalias de comprimento de onda elevado, geralmente causadas pelo interpolador aplicado em dados com amostragem não homogênea.

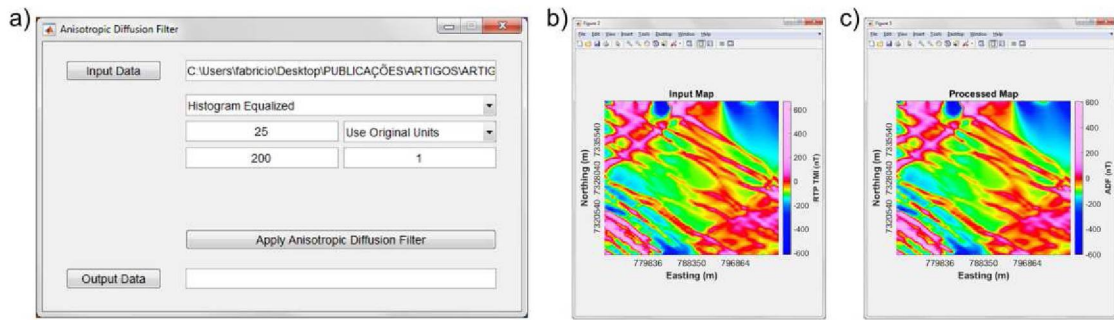


Figura A.31 – Filtro de difusão anisotrópica para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção *Anisotropic Diffusion Filter*. b) Dado de entrada. c) Filtro aplicado ao dado em (b).

A décima primeira opção do menu *Field Transformations* carrega duas opções que dão acesso a filtros convolucionais e no domínio da frequência. A interface responsável pelos filtros convolucionais tem suporte a filtros como: hanning, laplaciano, derivada na direção x, y e 45° , porém outros filtros podem ser construídos por meio da opção “Provide Filter Parameters”, em que o usuário fornece os nove parâmetros da matriz 3x3 que constitui o filtro, ou por meio da opção “Load an ASCII File” em que é carregado um arquivo ASCII, que contém os nove parâmetros do filtro (Figura A.32).

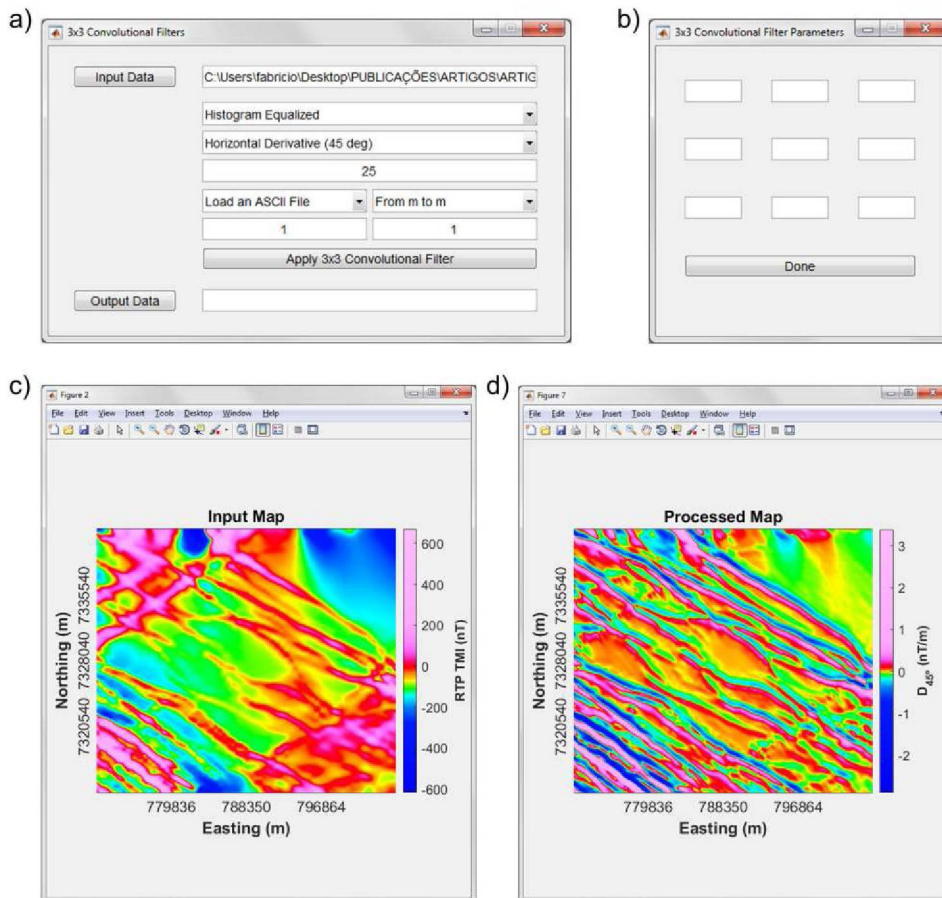


Figura A.32 – Filtro convolucional 3x3 para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção *3x3 Convolutional Filters*. b) Interface gráfica secundária referente aos parâmetros da matriz 3x3 que compõem o filtro c) Campo magnético anômalo da área de estudo reduzido ao polo. d) Filtro da derivada com direção 45° aplicado ao dado em (c).

A décima segunda opção do menu *Field Transformations* carrega uma interface gráfica responsável por aplicar filtros butterworth dos tipos passa baixa, passa alta, passa banda e rejeita banda (Figura A.33). O usuário pode especificar as frequências de corte de forma interativa ao clicar no gráfico referente à transformada de Fourier do dado de entrada e o filtro é automaticamente construído, com base nos parâmetros fornecidos.

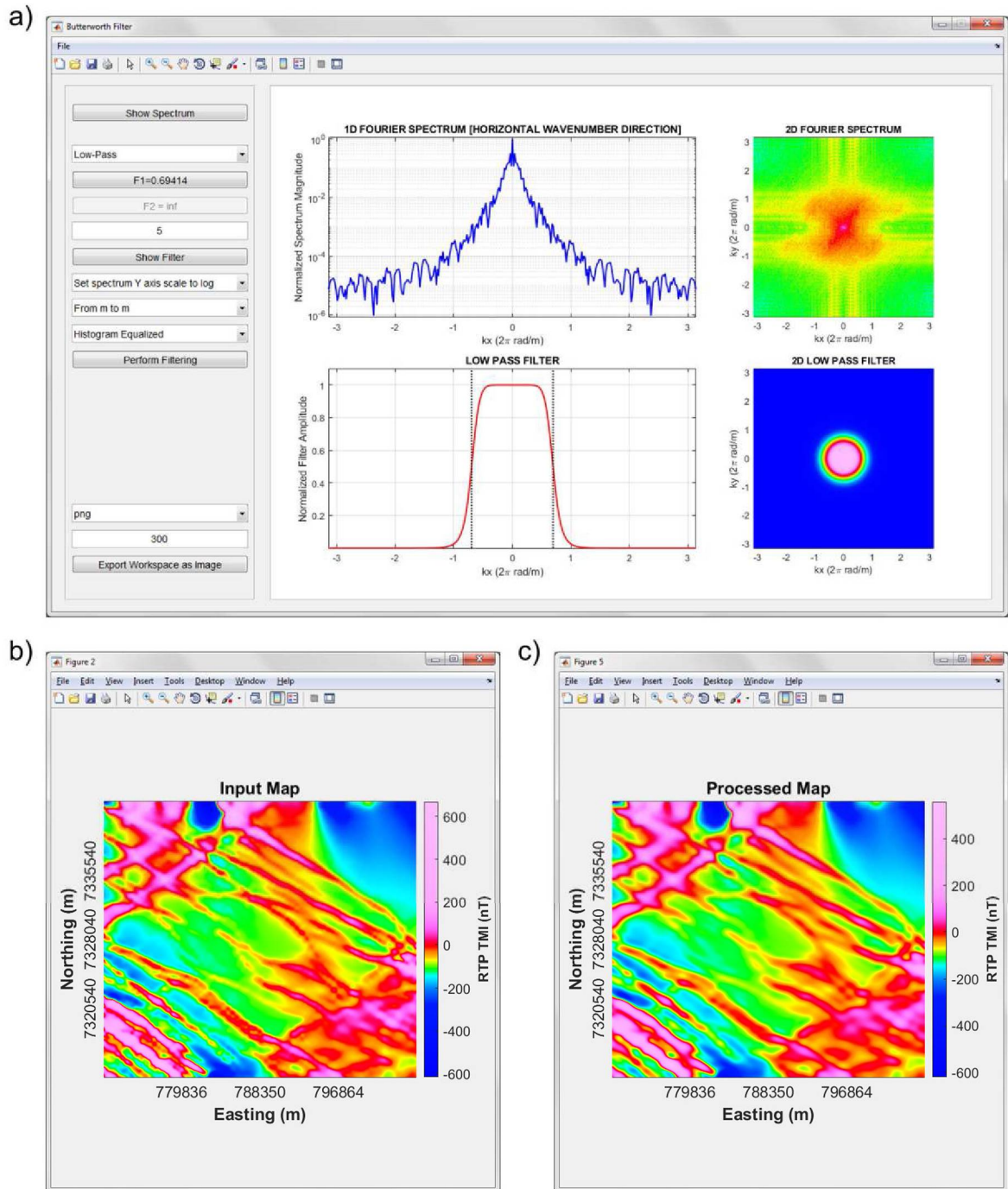


Figura A.33 – Filtro butterworth para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção *Butterworth Filter*. b) Campo magnético anômalo da área de estudo reduzido ao polo. c) Filtro passa baixa aplicado ao dado em (b).

- Menu *Enhancement Filters*

As opções presentes no menu *Enhancement Filters* estão representadas na Figura A.34 e conectam a interface principal com as seguintes funções de interface:

1. *GUIclassicalEnhancementFilters.m*;
2. *GUIcombinedTDR_TDX.m*;

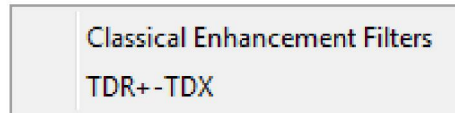


Figura A.34 – Opção presente no menu *Enhancement Filters*.

O menu *Enhancement Filters* carrega uma interface gráfica responsável por aplicar filtros de realce tradicionais como a amplitude do sinal analítico, gradiente horizontal total, inclinação da amplitude do sinal analítico, inclinação do gradiente horizontal total, dentre outros (Figura A.35).

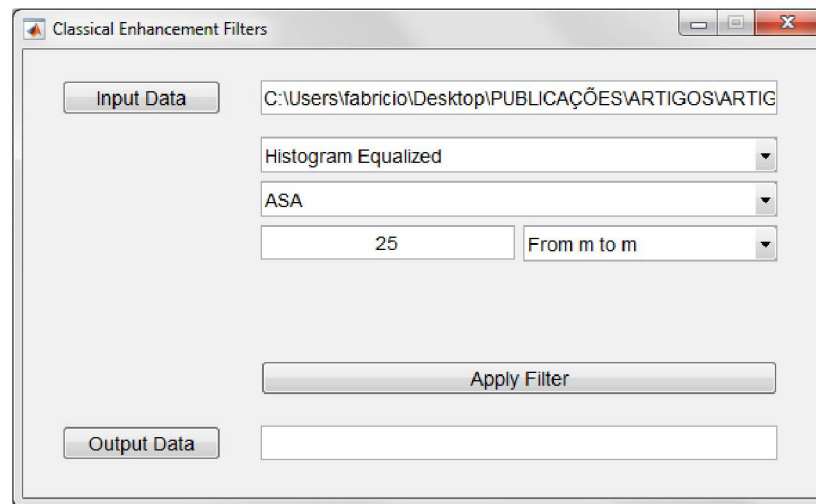


Figura A.35 – Interface gráfica referente aos filtros de realce tradicionais para dados interpolados.

Os produtos que a interface da Figura A.33 é capaz de gerar estão dispostos na Figura A.36.

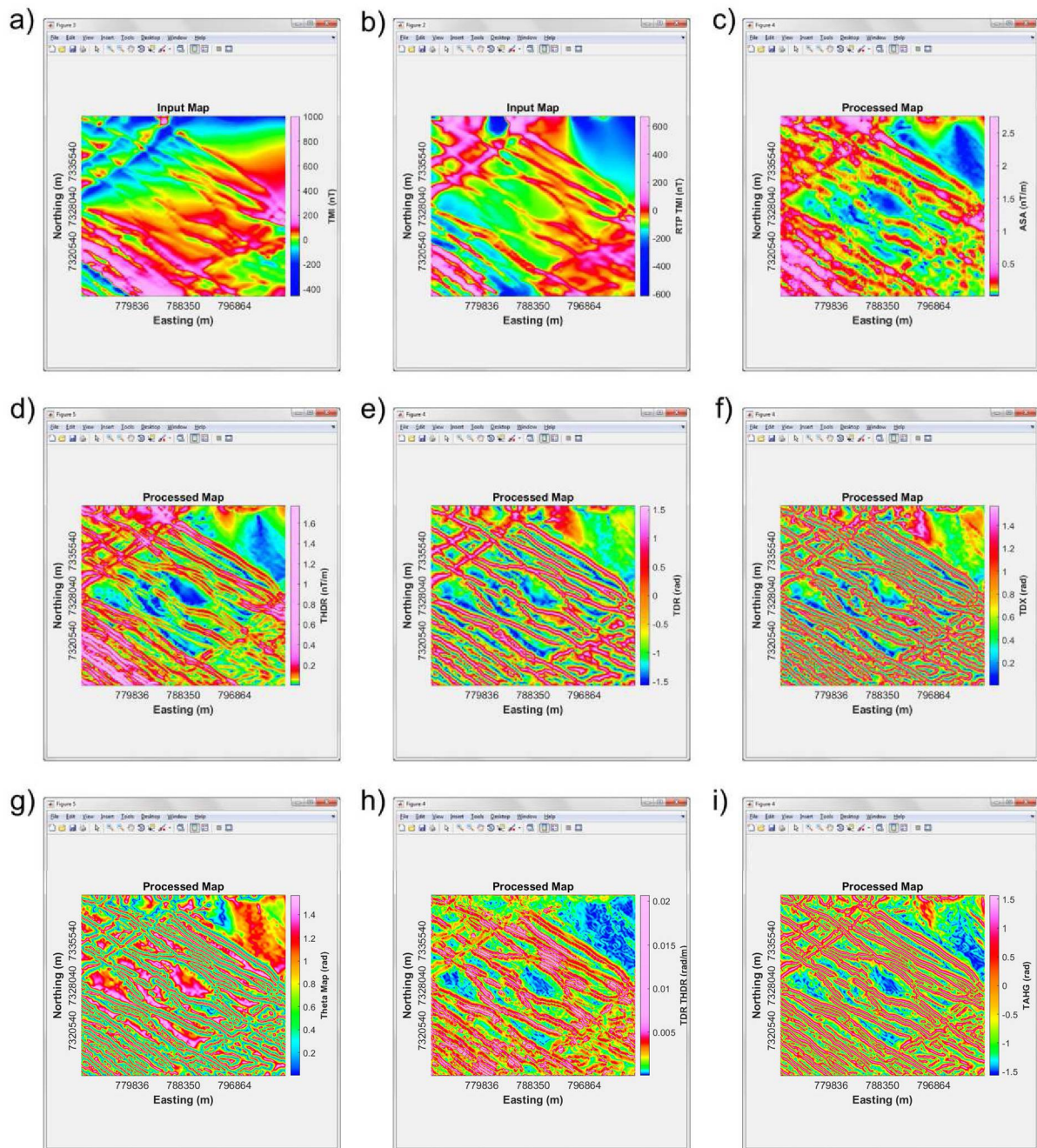


Figura A.36 – Filtros de realce tradicionais para dados interpolados. a) CMA da área de estudo. b) CMA reduzido ao polo. c) ASA aplicado ao dado em (b). d) GHT aplicado ao dado em (b). e) ISA aplicado ao dado em (b). f) IGHT aplicado ao dado em (b). g) *Theta Map* aplicado ao dado em (b). h) GHT_ISA aplicado ao dado em (b). i) ISA_GHT aplicado ao dado em (b).

A segunda opção do menu *Enhancement Filters* carrega uma interface responsável por aplicar combinações entre filtros clássicos baseados na derivada tilt (Figura A.37).

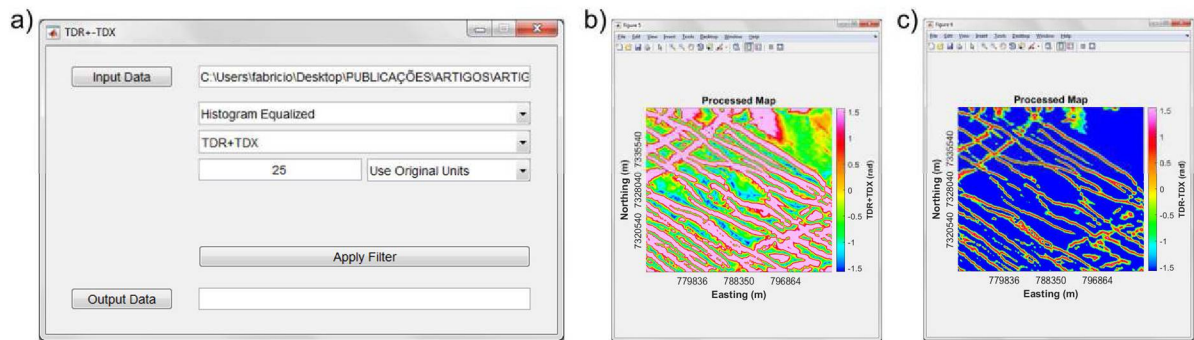


Figura A.37 – Combinações de filtros clássicos de derivada tilt. a) Interface gráfica que gera os filtros combinados. b) ISA+IGHT. c) ISA+IGHT.

- Menu *Semiquantitative Methods*

O menu *Semiquantitative Methods* carrega quatro opções que executam interfaces gráficas relacionadas a métodos semiquantitativos (Figura A.38). Dentre os métodos implementados destacam-se, *source distance*, *Tilt-Depth*, transformada Signum e deconvolução de Euler.

3. *GUIrDistance.m*;
4. *GUiltDepth.m*;
5. *GUisignumTransform.m*;
6. *GUiclassical2DEulerDeconv.m*;
7. *GUiclassical3DEulerDeconv.m*;
8. *GUICMWEulerDeconv.m*;
9. *GUplotEulerSolutions.m*;
10. *GUiclassSeparationEulerDeconv.m*;
11. *GUisubsetEulerDeconv.m*.

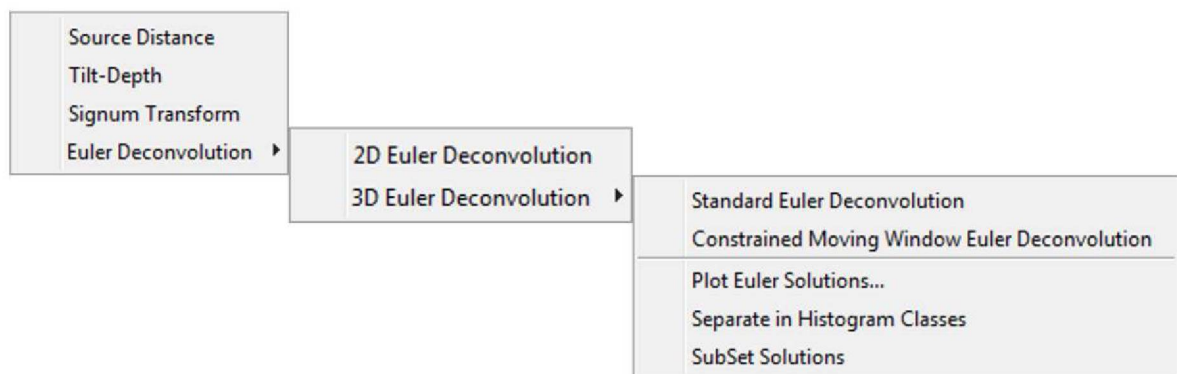


Figura A.38 – Opções presentes no menu *Semiquantitative Methods*.

O cálculo da profundidade pelo método da *source distance* é baseado na equação analítica do dique, de modo que porções do dado cujas anomalias são causadas por fontes com formas distintas da forma esperada para um dique, como anomalias estreitas e alongadas, produzem estimativas de profundidade com valores muito elevados e sem significado geológico. Logo, para ter uma melhor representação dos valores de profundidade são plotados apenas os valores menores que a média mais um desvio padrão das profundidades estimadas.

A interface referente ao método *source distance* dispõe duas formas de representação das estimativas de profundidade (Figura A.39). Na primeira forma, por superfície interpolada, apenas os valores dentro do intervalo de significância (média mais um desvio padrão) são plotados. Na segunda forma, por soluções pontuais, apenas as estimativas relacionadas ao centro das anomalias e dentro do intervalo de significância são consideradas.

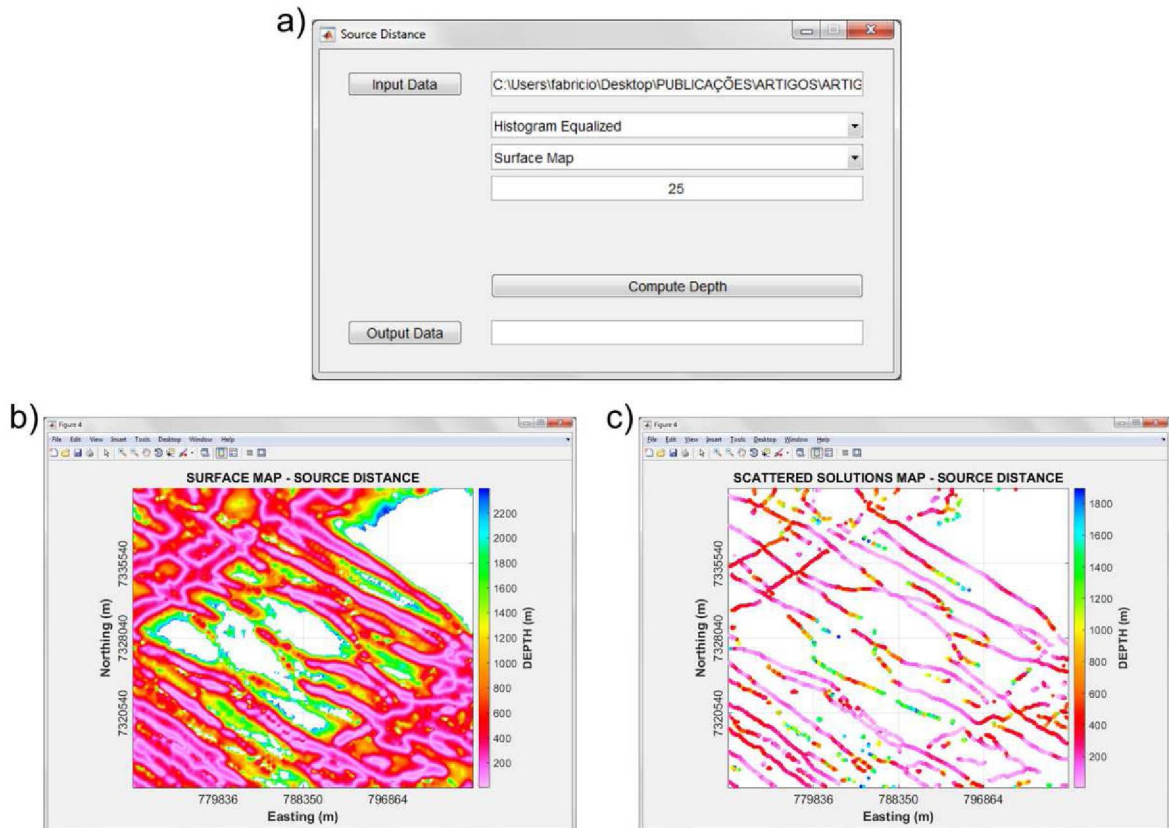


Figura A.39 – *Source distance* para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção *Source Distance*. b) Estimativas de profundidades representadas na forma de mapa de superfície. c) Estimativas de profundidade representadas na forma de soluções pontuais.

A segunda opção do sub-menu *Semi-quantitative Techniques* carrega uma interface gráfica responsável pelo método *Tilt-depth* através da função *GUTiltDepth.m* (Figura A.40). Ao fornecer os parâmetros necessários, a interface calcula as estimativas de profundidade por meio da função *tiltDepth.m*.

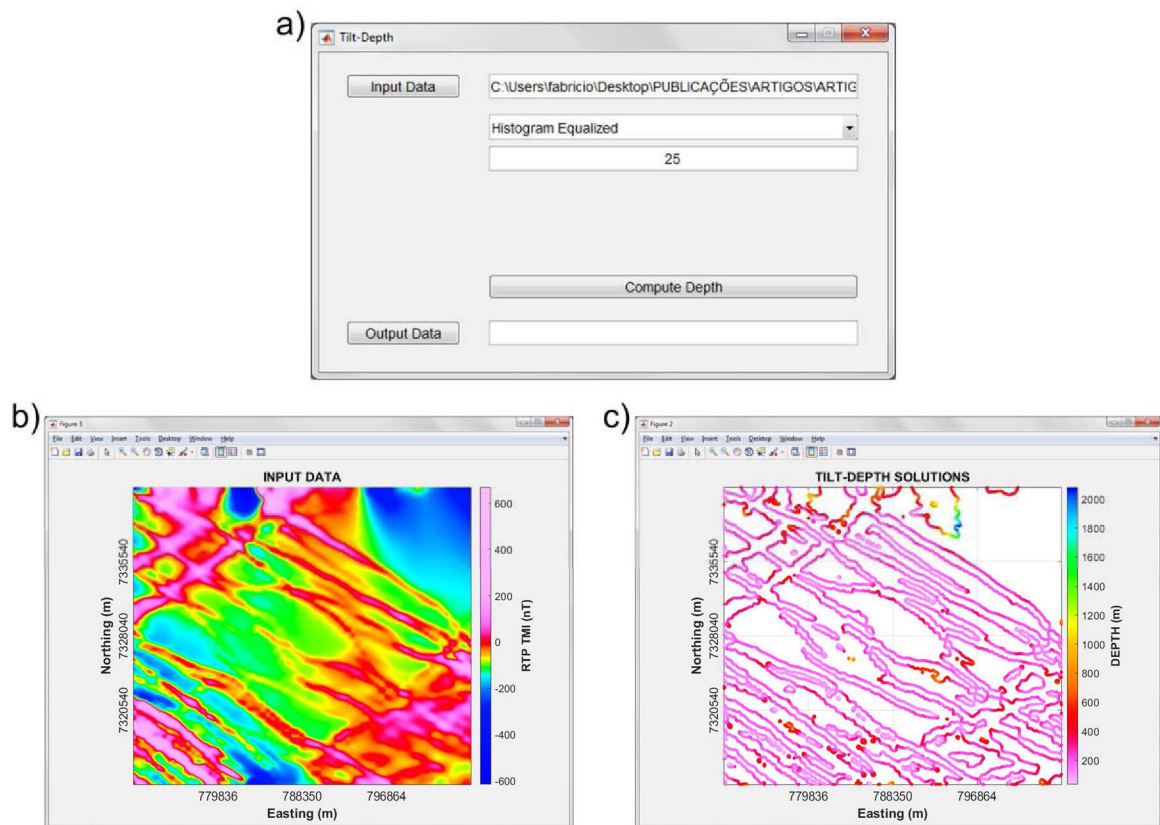


Figura A.40 – *Tilt-depth* para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção *Tilt-Depth*. b) Campo magnético anômalo da área de estudo reduzido ao polo. c) Estimativas de profundidade pelo método *Tilt-depth*.

A terceira opção do sub-menu *Semiquantitative Techniques* carrega uma interface gráfica responsável pelo método da transformada Signum através da função *GUISignumTransform.m* (Figura A.41).

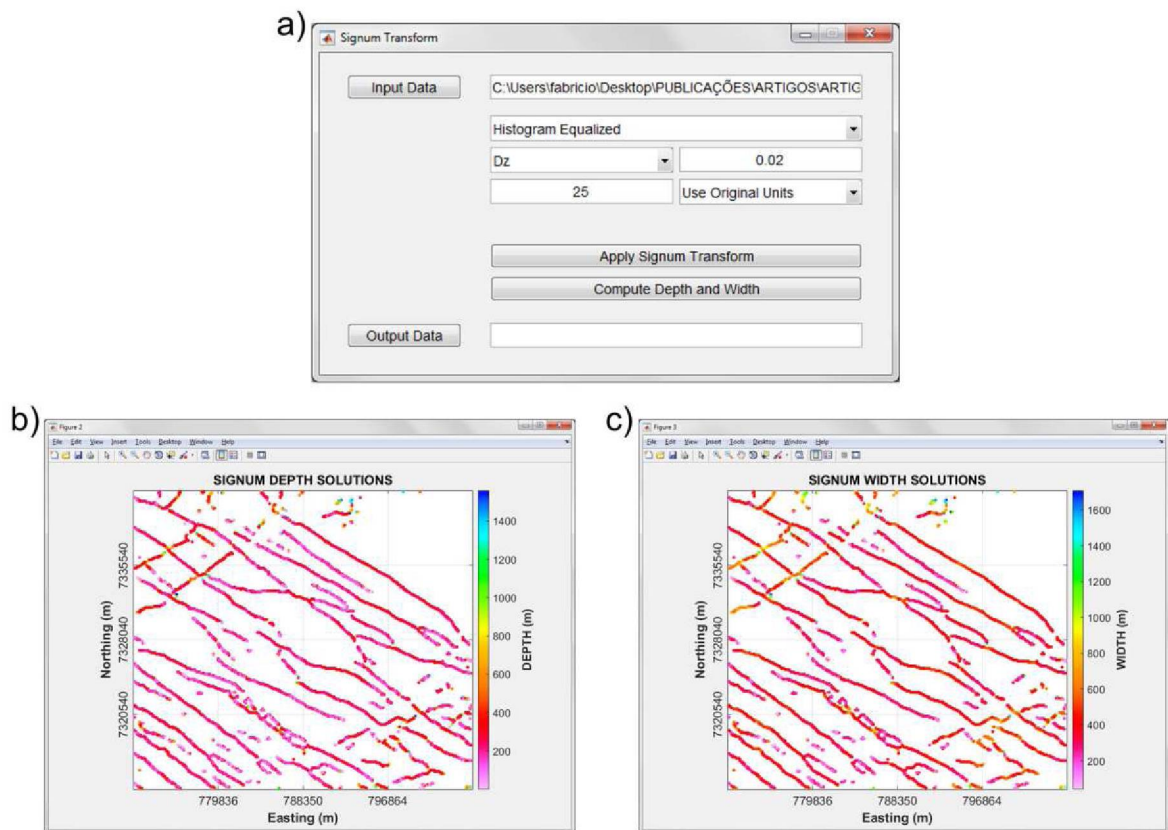


Figura A.41 – Transformada Signum para dados interpolados. a) Interface gráfica referente à opção *Signum Transform*. b) Estimativa de profundidade das fontes. c) Estimativa das larguras das fontes.

A quarta opção do sub-menu *Semiquantitative Techniques* carrega duas opções referentes ao método da deconvolução de Euler. A primeira opção é responsável por carregar uma interface gráfica associada à deconvolução de Euler bidimensional, através da função *GUIclassical2DEulerDeconv.m* (Figura A.42).

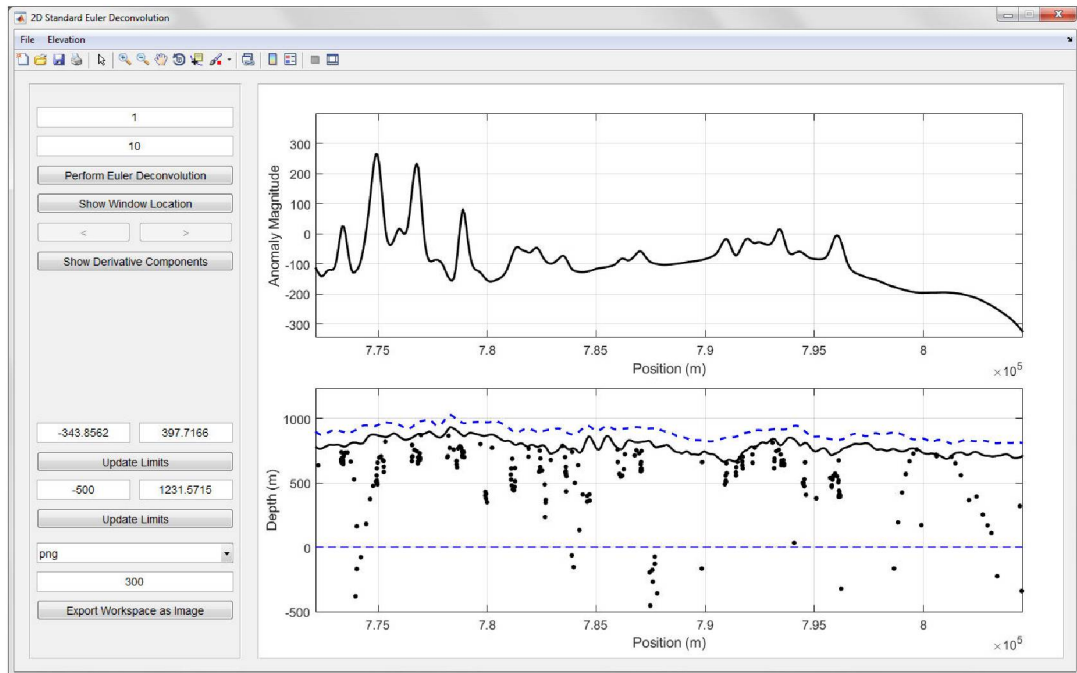


Figura A.42 – Interface gráfica referente a opção *2D Standard Euler Deconvolution* com perfis magnético e topográfico extraídos da área de estudo e soluções de Euler calculadas para uma janela de 10 pontos e índice estrutural igual a 1.

A segunda opção, dedicada à deconvolução de Euler tridimensional, é responsável por carregar cinco outras opções. As duas primeiras opções carregam interfaces gráficas responsáveis por calcular as soluções tridimensionais da deconvolução de Euler, sendo que a primeira executa o algoritmo clássico (Reid et al., 1990), em que a janela escaneia toda a matriz do dado (Figura A.43) e a segunda executa um algoritmo modificado, em que a janela escaneia partes específicas do dado, objetivando a redução de soluções espúrias (Figura A.44).

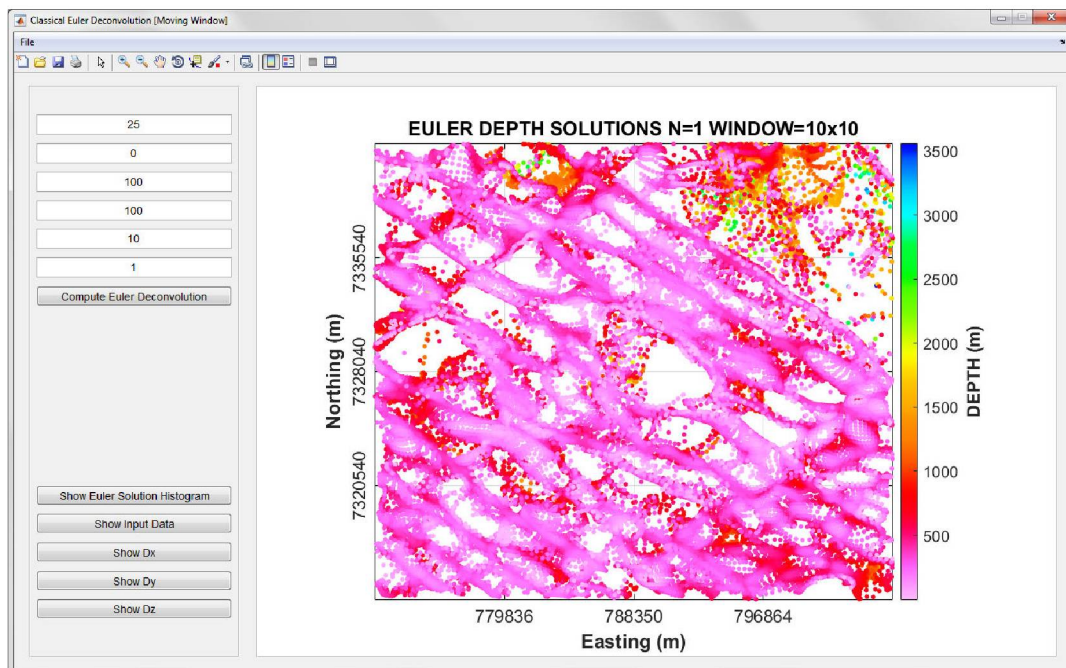


Figura A.43 – Interface gráfica referente a opção *Classical Euler Deconvolution [Moving Window]*.

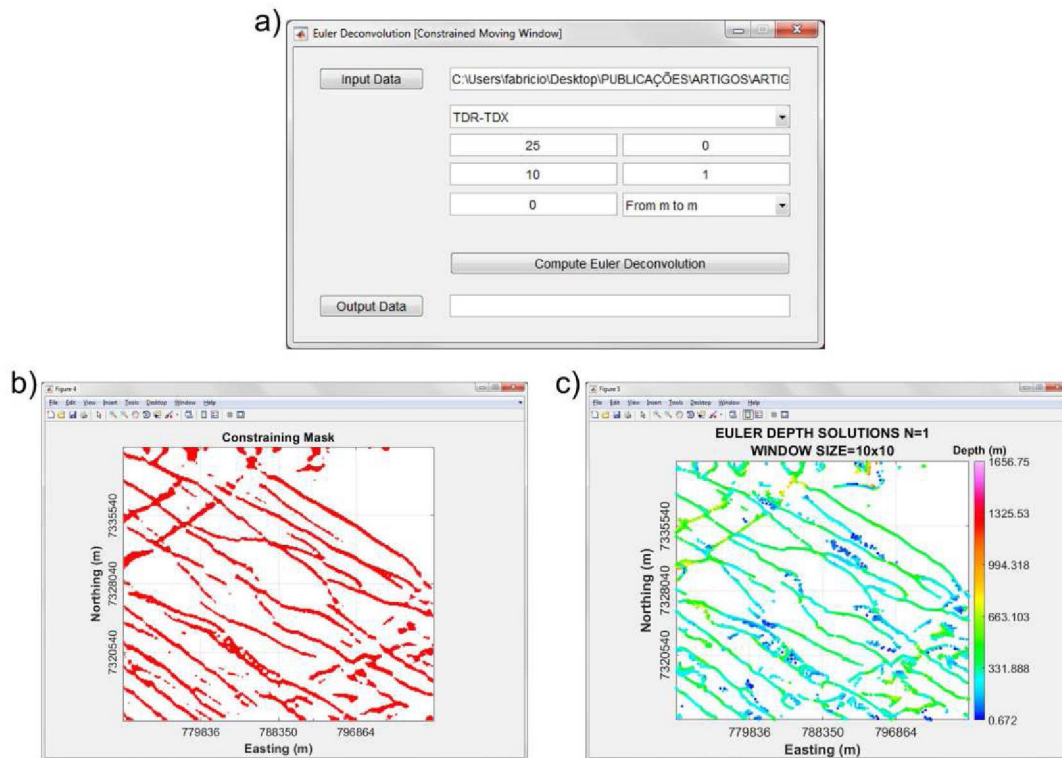


Figura A.44 – Deconvolução de Euler com escaneamento restrito da janela. a) Pontos vermelhos compõem a máscara restritiva e indicam a posição do centro das janelas utilizadas na estimativa das soluções de Euler. b) Soluções de Euler para uma janela de 10x10 pontos e índice estrutural 1.

As três últimas opções carregam interfaces gráficas dedicadas à plotagem das soluções (Figura A.45) e à filtragem das mesmas (Figuras A.46 e A.47).

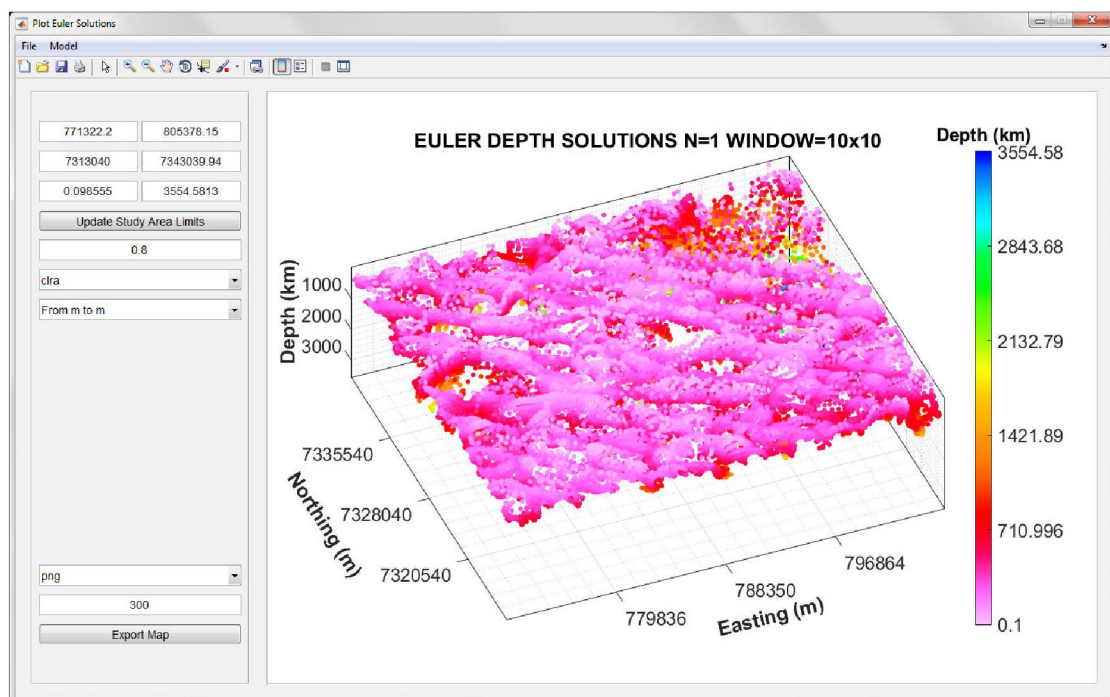


Figura A.45 – Interface gráfica referente a opção *Plot Euler Solutions* com as soluções de Euler da área de estudo.

Na interface gráfica da Figura A.45 é possível alterar os limites horizontais e verticais da área que comporta as soluções de Euler, de modo a destacar porções com anomalias de interesse. Pode-se também exibir estas soluções sobrepostas ao modelo tridimensional das fontes correspondentes. Após a configuração visual das soluções de Euler, uma imagem com as soluções pode ser exportada por meio da função *Export Map*.

Se o usuário desejar estudar separadamente soluções de Euler limitadas em intervalos específicos de profundidade, é possível subagrupar as soluções em intervalos de profundidade por meio da opção *GUIclassSeparationEulerDeconv.m* e salvar cada subgrupo em arquivos separados (Figura A.46).

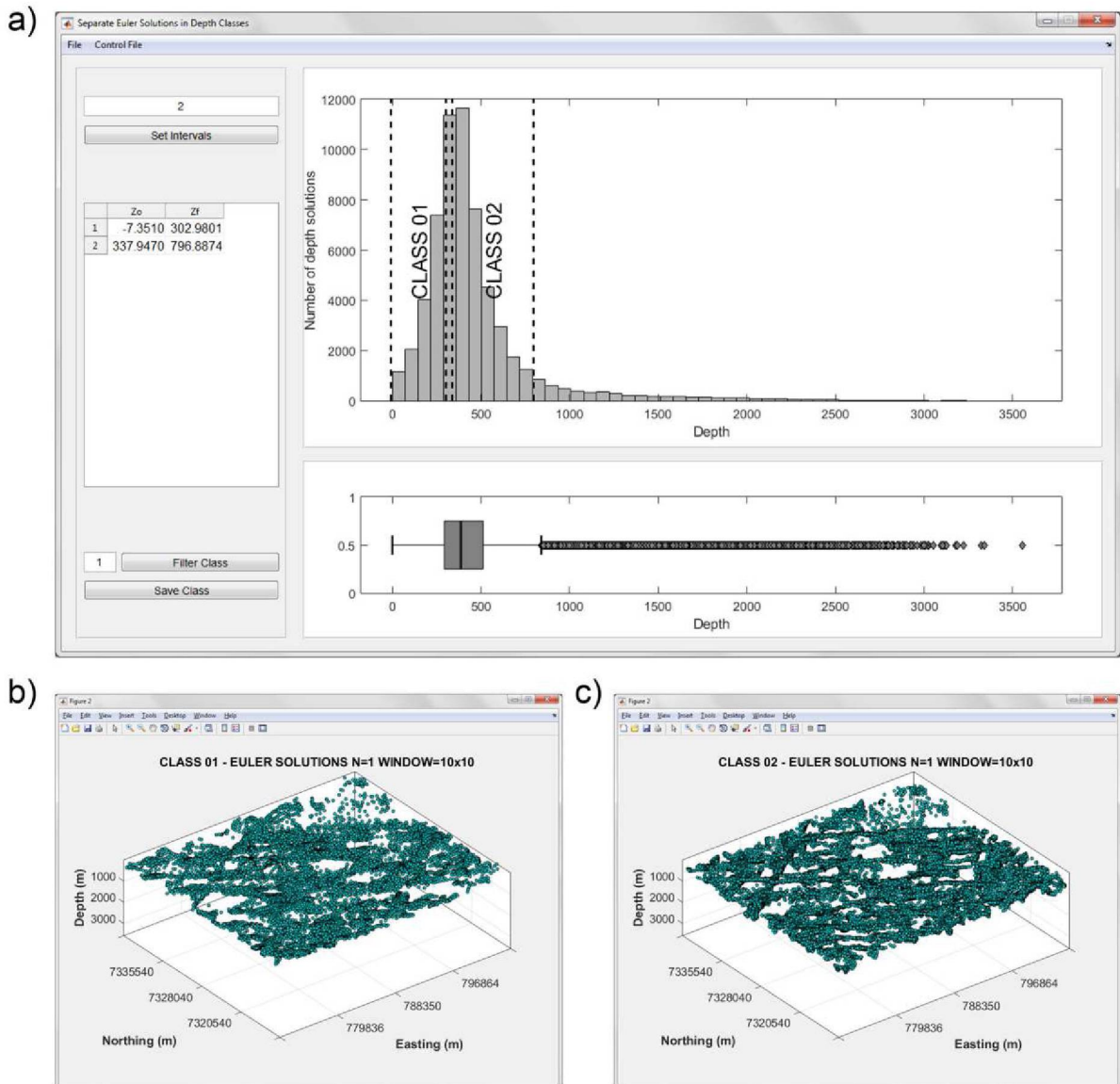


Figura A.46 – Separação das soluções de Euler por classes de profundidade guiadas por histogramas. a) Interface gráfica referente à opção *Separate Euler Solutions in Depth Classes*. b) Soluções de Euler limitadas pela classe 1. c) Soluções de Euler limitadas pela classe 2.

Outra forma de subagrupar as soluções de Euler é por meio da função *GUIsubsetEulerDeconv.m*, em que mascara as soluções a partir de um polígono. Esta opção é indicada em situações onde se deseja estudar as soluções associadas a uma estrutura específica (Figura A.47).

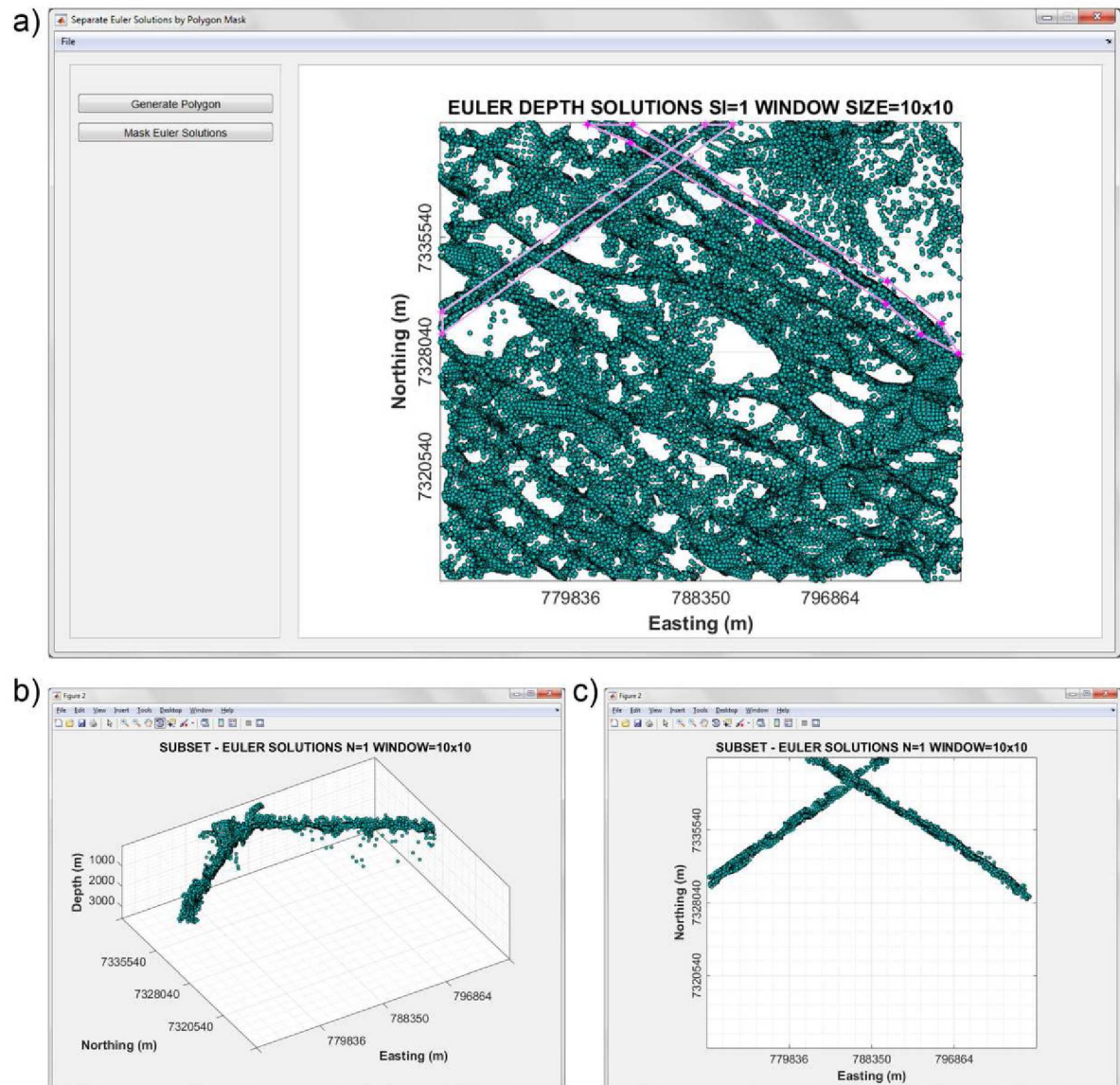


Figura A.47 – Separação das soluções de Euler limitadas por polígonos. a) Interface gráfica referente à opção *Separate Euler Solutions by Polygon Mask* com indicação dos polígonos (linha magenta). b) Soluções de Euler limitadas pelos polígonos (visão em perspectiva). c) Soluções de Euler limitadas pelos polígonos (visão em planta).

- Menu *Modeling*

As opções presentes no menu *Modeling* estão representadas na Figura A.48 e conectam a interface principal com as seguintes funções de interface:

1. *GUIprismaticBody.m*;
2. *GUIsphericalBody.m*;
3. *GUlcyllindricalBody.m*;
4. *GUldikeLikeBody.m*;
5. *GUlfaultModel.m*;
6. *GUlirregularCrossSectionBody.m*.

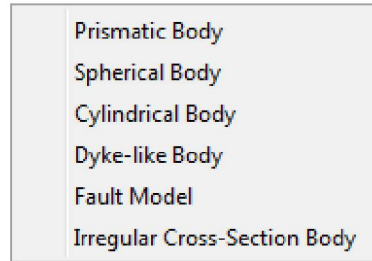


Figura A.48 – Opções presentes no menu *Modeling*.

Das opções presentes no menu *Modeling*, apenas a terceira, referente ao corpo cilíndrico, não foi implementada. A primeira opção carrega uma interface gráfica que funciona como um complemento gráfico da função associada ao programa Grav Mag Prisma. Nesta interface os parâmetros físicos e espaciais das fontes podem ser fornecidos diretamente na interface gráfica ou carregados por meio de um arquivo *ASCII* com os parâmetros salvos (Figura A.49).

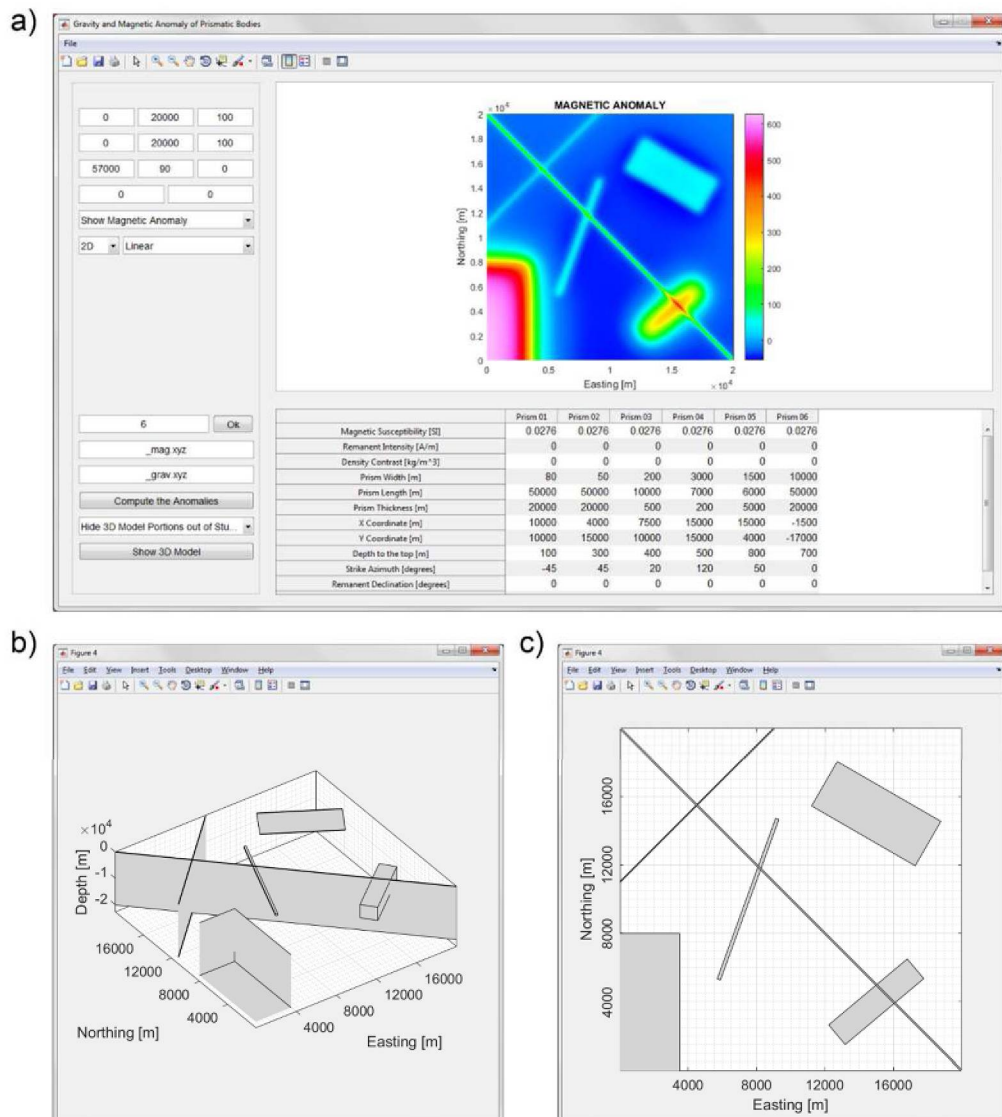


Figura A.49 – Anomalia de campo potencial gerado por corpos prismáticos. a) Interface gráfica referente à opção *Gravity and Magnetic anomaly of Prismatic Body*. b) Modelo gerado (visão em perspectiva). c) Modelo gerado (visão em planta).

A segunda opção do menu *Modeling* carrega uma interface gráfica responsável pelo cálculo da anomalia gravimétrica causada por um corpo esférico. A interface é dividida em duas abas, sendo que a primeira aba é destinada ao modelo bidimensional (perfil) e a segunda destinada ao modelo tridimensional (planta) (Figura A.50).

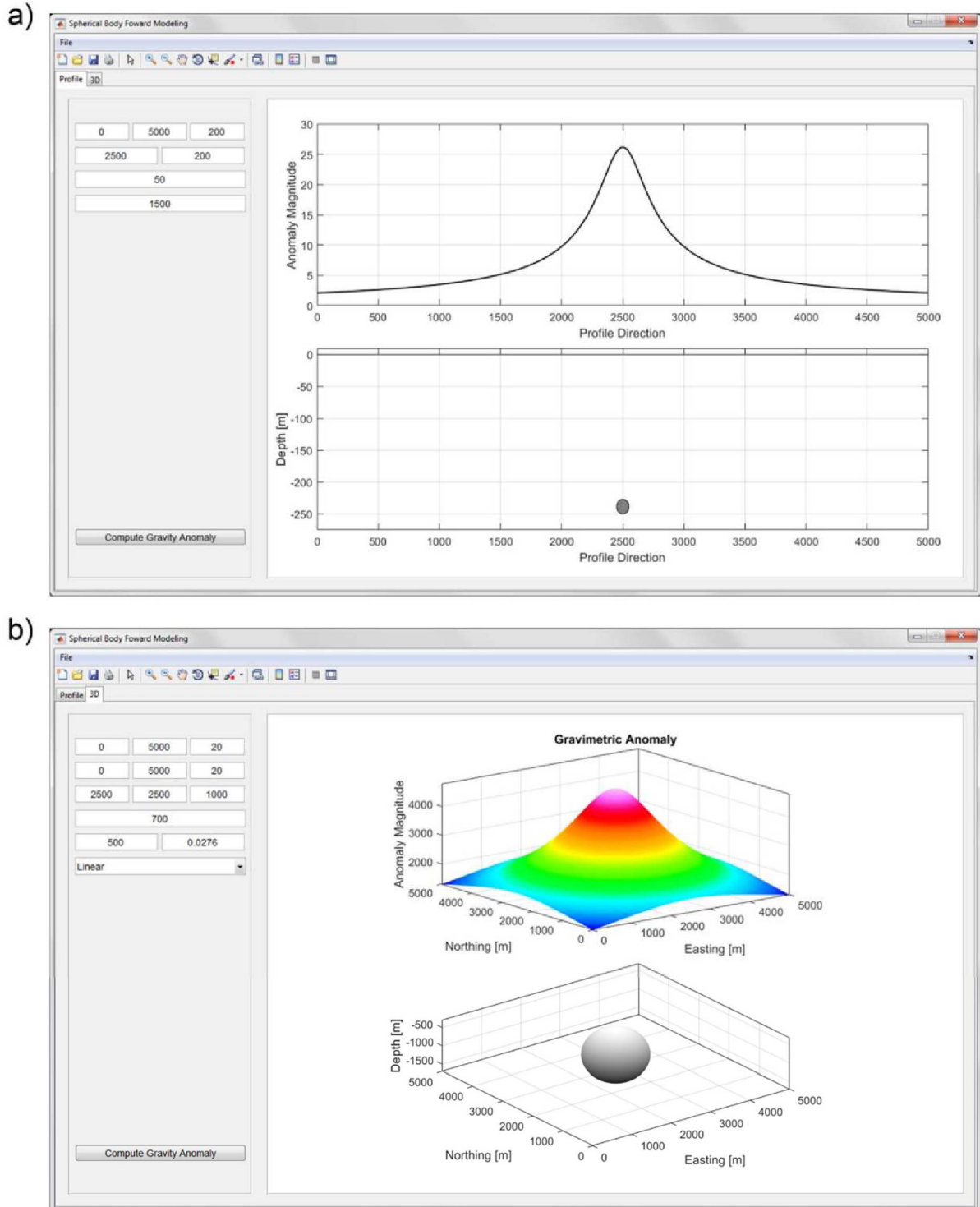


Figura A.50 – Anomalia gravimétrica gerada por corpo esférico. a) Interface da opção *Spherical Body Forward Modeling* referente ao modelo bidimensional. b) Interface da opção *Spherical Body Forward Modeling* referente ao modelo tridimensional.

A quarta opção do menu *Modeling* carrega uma interface gráfica responsável pelo cálculo da anomalia magnética causada por um corpo na forma de dique (Figura A.51).

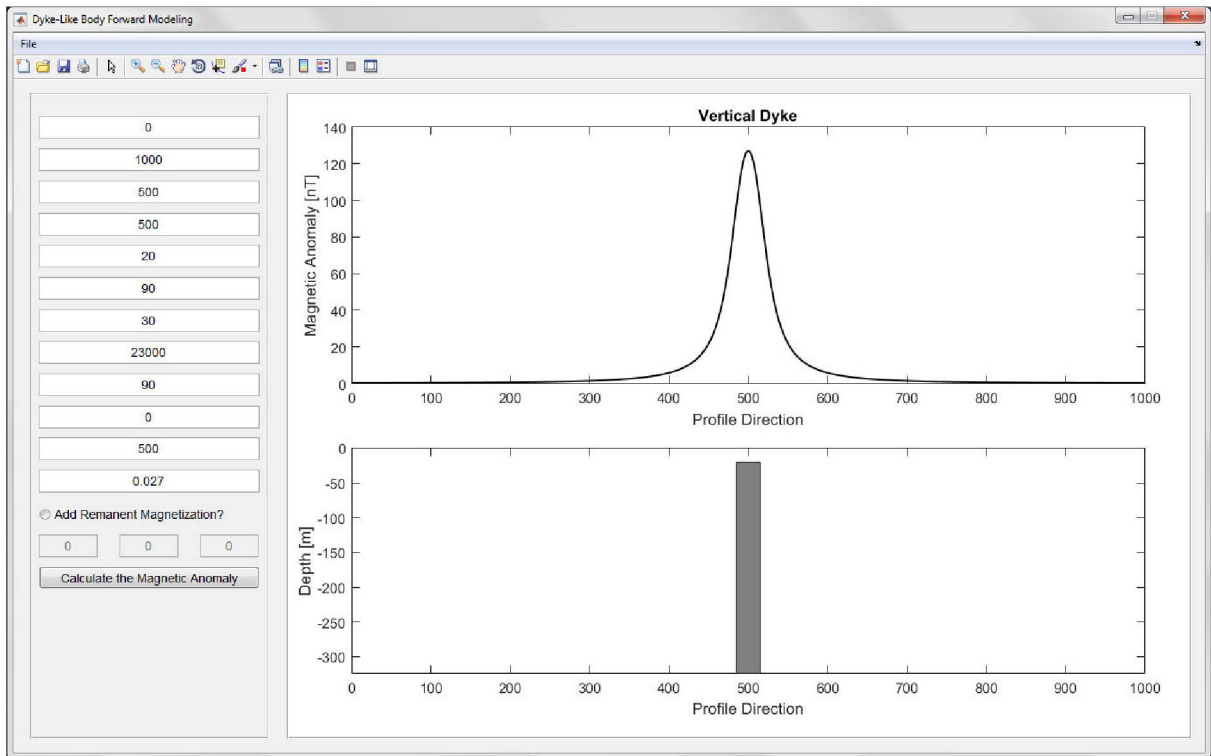


Figura A.51 – Interface gráfica referente à opção *Dike-Like Body Forward Modeling*.

A quinta opção do menu *Modeling* carrega uma interface gráfica responsável pelo cálculo da anomalia magnética causada por um contato por falha (Figura A.52).

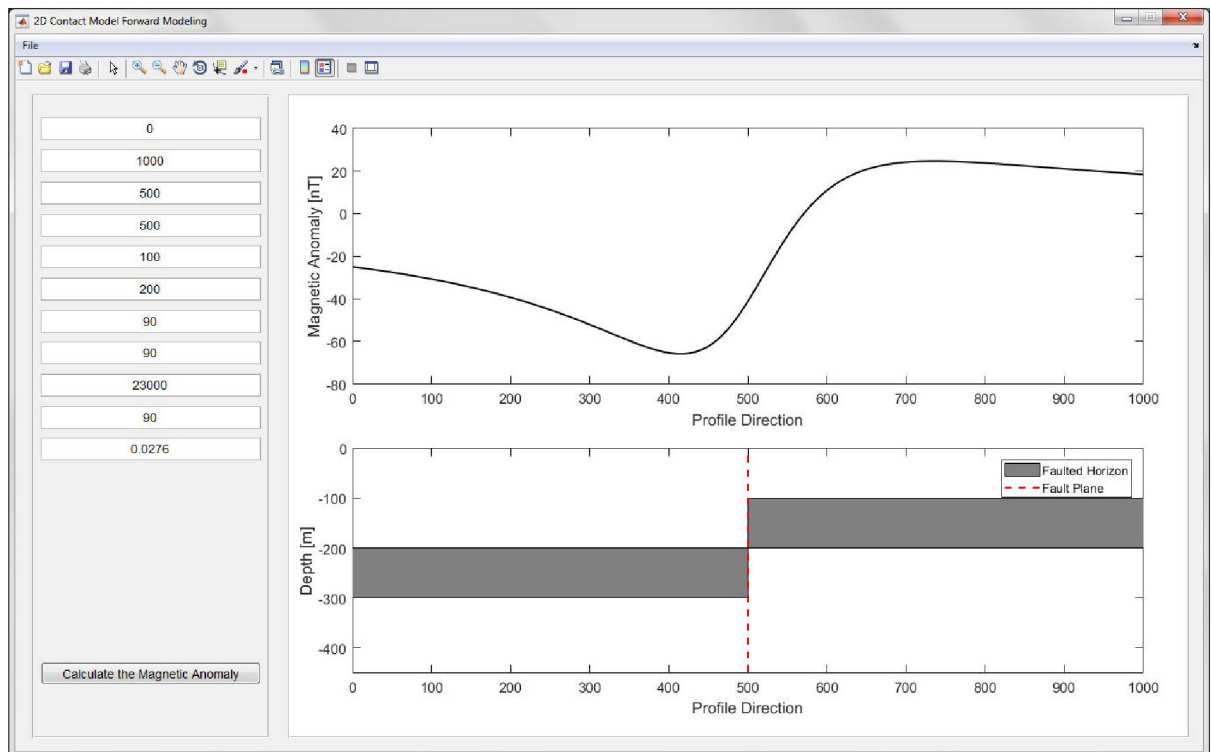


Figura A.52 – Interface gráfica referente à opção *2D Contact Model Forward Modeling*.

A sexta opção do menu Modeling carrega uma interface gráfica responsável pelo cálculo de anomalias gravimétricas e magnéticas causadas por corpos bidimensionais de seção transversal irregular (Figura A.53).

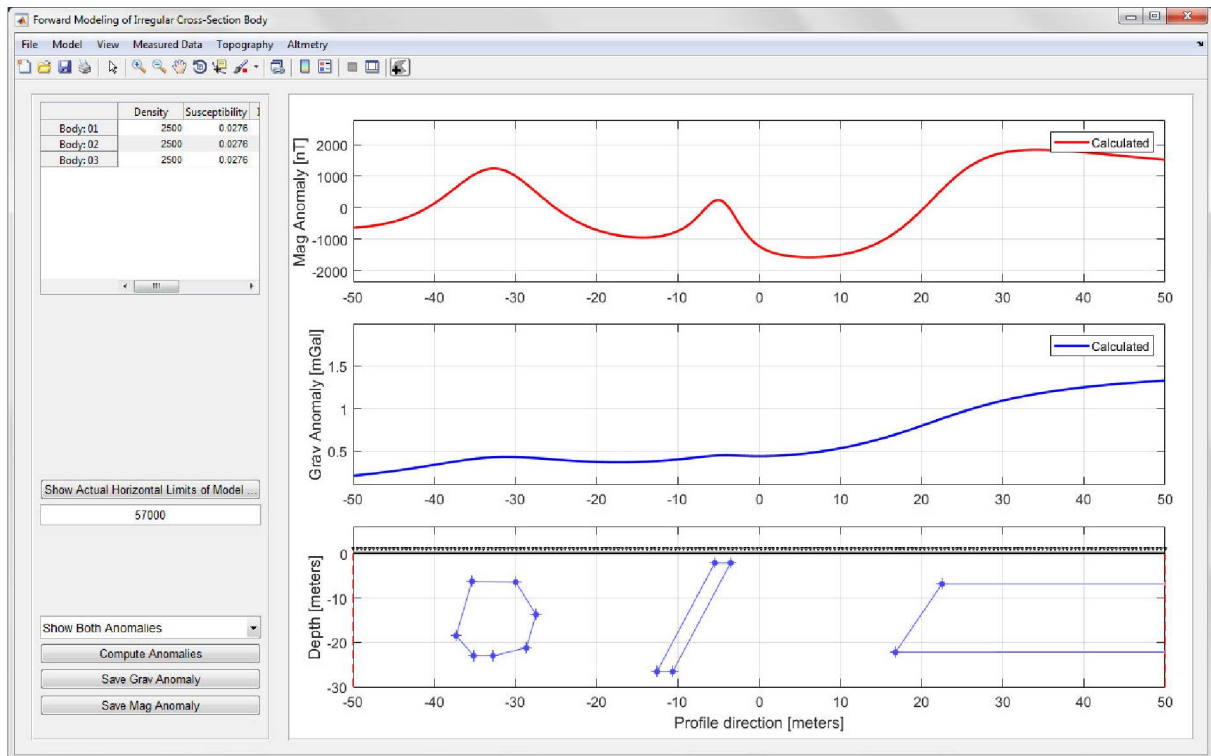


Figura A.53 – Interface gráfica referente à opção *Forward Modeling of Irregular Cross-Section Body*.

B.2. FUNÇÕES DESENVOLVIDAS POR TERCEIROS

Nesta seção é listada todas as funções feitas por terceiros utilizadas no Grav Mag Suite, assim como uma breve descrição de qual processo a mesma executa. Estas funções estão localizadas no diretório denominado *Third-party*, como mencionado no início da seção A e encontram-se listadas a seguir.

- `align_axislabel.m`, `align_axislabel_log.m`, `axislabel_rotation.m`, `axislabel_rotation_angle.m`, `axislabel_translation.m` e `axislabel_translation_slider.m`;
 - Funções responsáveis por rotacionar os rótulos de cada eixo juntamente com a rotação do gráfico.
- `inpaint_nans.m`;
 - Função responsável pelo preenchimento dos NaNs em um dado interpolado.
- `grav.m`;
 - Função responsável por calcular o campo gravimétrico causado por corpos prismáticos.
- `mag.m`;
 - Função responsável por calcular o campo magnético causado por corpos prismáticos.
- `regularizeNd.m`;
 - Função responsável por interpolar dados dispostos irregularmente (*scattered*).
- `removetrend.m`;
 - Função responsável por remover uma superfície polinomial de tendência.
- `stlread.m`;
 - Função responsável por carregar um arquivo no formato stl.

- `stlwrite.m`;
 - Função responsável por salvar um arquivo no formato stl.
- `SurfaceIntersection.m`:
 - Função responsável por calcular a interseção entre duas superfícies.
- `TriangleRayIntersection.m`;
 - Função responsável por retornar qual face triangular de um modelo 3D é interceptada por uma linha.