

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

VINICIUS HECTOR ABUD LOURO

**Procedimentos de Análise em Magnetometria: Estimativa de  
Magnetização Remanente visando Inversões para Exploração  
Mineral**

São Paulo

2013

2013

VINICIUS HECTOR ABUD LOURO

**Procedimentos de Análise em Magnetometria: Estimativa de Magnetização Remanente visando Inversões para Exploração Mineral**

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

Área de concentração: Métodos Potenciais

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Marta S. M. Mantovani

Versão corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.

São Paulo

2013

Louro, Viinicius Hector Abud

Procedimentos de Análise em Magnetometria: Estimativa de Magnetização Remanente visando Inversões para Exploração Mineral. / Vinicius Hector Abud Louro; orientadora Marta Silvia Maria Mantovani. – São Paulo, 2013.

XX f.: XX fig.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

Magnetometria, Inversão 3-D e Alcalina.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Vinicius Hector Abud Louro

Procedimentos de Análise em Magnetometria: Estimativa de Magnetização Remanente visando Inversões para Exploração Mineral.

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

Área de concentração: Métodos Potenciais

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Marta S. M. Mantovani

Aprovado em:

### Banca Examinadora

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_



*Àqueles que correram ao meu lado:  
Van, Martinha, Shamboo...  
Mãe, Pai, Mãe, Pai, Avós...  
E todos os meus irmãos de Sangue e de Loucuras.*

*“It’s a trap!!”*

Admiral Ackbar



## **AGRADECIMENTOS**

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Marta S. M. Mantovani, que me orientou neste trabalho e foi mais do que um exemplo ao longo de todos esses anos.

Ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

A CODEMIG e CPRM (Serviço Geológico do Brasil) por ceder os dados do aerolevante da Área 7 e do Sudeste de Rondônia, imprescindíveis para a realização deste trabalho.

A Geophysical Inversion Facility da University of British Columbia por fornecer a licença do programa de inversão utilizado neste trabalho.

A CAPES, ao CNPQ e à Pró-Reitoria de Pós-Graduação da USP pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

A Família GEOLIT pelas dicas e discussões.

## RESUMO

Neste estudo é apresentado um procedimento de análise de dados magnéticos em casos de presença de magnetização remanente para, ao final do processo, a realização de uma inversão mais rápida e fiel ao comportamento do alvo em sub-superfície. O procedimento é composto por seis passos: (1) Delimitação lateral do alvo; (2) Estimativa de suas profundidades; (3) Estimativa das direções de inclinação e declinação aparentes de seu vetor de magnetização total; (4) Modelagem inicial com inferência de valores de susceptibilidades oriundos de estudos geológicos anteriores sobre o alvo e/ou sua região; (5) Inversão dos dados magnéticos utilizando o modelo inicial; e (6) atribuição das características magnéticas do passo (3) sobre o modelo de contraste de susceptibilidade magnética obtido com a inversão para a modelagem final do alvo, conhecendo-se seus vetores de magnetização induzida, total e, por subtração vetorial de ambos, remanente. Este procedimento foi aplicado a 108 casos sintéticos e a 8 casos reais pertencentes às províncias ígneas do Alto do Paranaíba e Rondoniana-San-Ignácio. Os resultados do uso deste procedimento indicaram uma recuperação das direções das componentes de magnetização com erro menor que 10%, em casos sintéticos, uma redução de mais de 20% no tempo de inversão com o uso de modelos iniciais, e qualitativamente, apresentaram modelos mais próximos dos originais (nos casos sintéticos) e geologicamente factíveis nos casos reais.

## **ABSTRACT**

In this study, we present a procedure of analysis of magnetic data when remanence is present in order to, at the end of the process, obtain an inversion faster and more reliable inversion. The procedure is composed of six steps: (1) Estimation of the borders of the target; (2) Estimation of its depths; (3) A sweeping for the total apparent inclination and declination directions; (4) Initial modeling of a synthetic body, based on the recovered geometry and depth, on the directions of inclination and declination of the total magnetic field, and on previous analysis of the target and/or its region; (5) Inversion of magnetic data using the initial model; and (6) Attribution of the magnetic features of step (3) to the model recovered by the inversion for a final modeling of the target, estimating as well its remanent magnetization; the last through the vectorial resultant of the induction and total magnetization subtraction. This procedure was applied to 108 synthetic and to 8 real cases from the Alto do Paranaíba and Rondonian-San Ignacio Igneous Provinces. Their results pointed out that the error between the recovered directions of the magnetization components and the original values, in synthetic cases, was smaller than 10%; The inversions had their processing-time reduced in more than 20% and, qualitatively, presented models were more similar to the original (synthetic cases) and geologically feasible (real cases).

# SUMÁRIO

RESUMO .....	1
ABSTRACT .....	2
SUMÁRIO .....	3
1. INTRODUÇÃO .....	14
Metodologia e Técnicas Utilizadas (Capítulo 2):.....	15
a. Delimitação Espacial.....	15
b. Análise da Magnetização do Corpo.....	15
c. Modelagem Inicial.....	15
d. Inversão .....	16
e. Modelagem Final.....	16
Prova da Efetividade do método de trabalho.....	16
Conclusões dos Resultados (Capítulo 6).....	17
2. METODOLOGIA .....	18
Magnetometria .....	18
Técnicas de Processamento.....	23
2.1. Separação das Componentes Regional-Residual do Campo Magnético.....	23
2.2. Definição dos Limites Espaciais do Corpo Intrudido .....	23
i. Limites Laterais:.....	23
ii. Limites Verticais (Profundidade de Topo).....	24
2.3. Determinação das Direções do Vetor de Magnetização Total .....	26
2.4. Modelagem Inicial.....	27
2.5. Inversão .....	28
2.6. Modelagem Final.....	31
Avaliação dos Resultados.....	32
3. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES: MODELOS SINTÉTICOS .....	34
a. Cenários de Corpos Simples .....	35
b. Cenários com Vários Corpos.....	37
3.1. Técnicas.....	40
i. EHD.....	40

ii.	EHD-Depth .....	44
iii.	Deconvolução de Euler .....	45
iv.	Redução ao Polo Magnético Iterativa – Método MinMax .....	46
v.	Modelagem Inicial.....	48
vi.	Inversões dos Dados Magnéticos .....	50
vii.	Modelagem Final.....	52
4.	RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES: CASOS REAIS: <i>PIAP</i> .....	54
	Província Ígnea do Alto do Paranaíba (PIAP).....	54
4.1.	ANOMALIA MAGNÉTICA DE PRATINHA I .....	57
4.2.	COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍTICO DE TAPIRA .....	69
4.3.	COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍTICO DE ARAXÁ .....	81
4.4.	COMPLEXO DE SERRA NEGRA E SALITRE I, II E III.....	91
4.5.	COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍTICO DE CATALÃO I.....	110
5.	RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES: CASOS REAIS: <i>PRSI</i> .....	121
5.1.	ANOMALIA MAGNÉTICA DE MORRO DO LEME.....	123
6.	CONCLUSÕES.....	134
7.	REFERÊNCIAS .....	142
	ANEXO A.....	150

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Perturbação no campo magnético terrestre esperada para um corpo situado no hemisfério sul (RIBEIRO, 2011). .....	19
Figura 2.2 Esquema de levantamento de campo magnetométrico. ....	22
Figura 2.3 Exemplo de malha tridimensional utilizado para as inversões (adaptado de RIBEIRO, 2011). ....	29
Figura 2.4 Representação gráfica do procedimento de subtração vetorial para estimação da magnetização remanente. ....	32
Figura 3.1 Modelos sintéticos: (A) Dique, (B) Esfera e (C) Pipe. ....	35
Figura 3.2 Esquema de desvio de $MT$ em relação à $MI$ . ....	36
Figura 3.3 Organograma apresentando as subdivisões dos Cenários de Corpos Simples, sendo $MT$ o vetor de Magnetização Total, $MI$ o vetor de magnetização induzida e $Q$ a Razão de Köenigsberg. ....	37
Figura 3.4 Organograma apresentando as subdivisões dos Cenários de Vários Corpos. ....	38
Figura 3.5 Discriminação dos corpos para (A) geometrias iguais (esferas) e, em geometrias diferentes, para (B) Mesmo conduto, (C) Dique-Pipe-Esfera e (D) Pipe com Esfera Interna (com mesmas susceptibilidades magnéticas, mas remanências diferentes). As especificações espaciais e magnéticas dos modelos sintéticos, os resultados numéricos das técnicas utilizadas, as comparações entre os tempos de processamento ( $CPU-Time$ ) e volumes das inversões com e sem Modelo Inicial estão disponíveis nas tabelas A.1 à A.14 do Anexo A. ....	39
Figura 3.6 Exemplos de grids de $EHD$ para: (A) Pipe, (B) Dique e (C) Esfera com diferença de direções de magnetização entre $MT$ e $MI$ de $45^\circ$ e Razão de Köenigsberg de 2.0. ....	41
Figura 3.7 Relação entre os limites de uma esfera de 2000 metros de raio e os pontos de máximo e mínimo do $EHD$ . ....	42
Figura 3.8 (A) Campo magnético total de um Pipe com $60^\circ$ entre $MT$ e $MI$ , Razão de Köenigsberg ( $Q$ ) igual a 2.0 e com ruído de alta frequência; e (B) Resultado da aplicação do $EHD$ . ....	43

Figura 3.9 Aplicações do <i>EHD</i> a conjuntos de corpos: (A) Conjunto de Pipe com Esfera Interna; (B) Conjunto de três esferas com susceptibilidades magnéticas iguais, direções de magnetização e Razões de Köenigsberg diferentes.....	44
Figura 3.10 <i>EHD</i> de uma esfera a 100 metros de profundidade, com 135° entre <i>MT</i> e <i>MI</i> , Razão de Köenigsberg ( <i>Q</i> ) igual a 4.0 e a localização dos pontos correspondentes ao centro do corpo avaliados pela Deconvolução de Euler. Com limites (cores correspondentes ao valor máximo da barra de cores) a cerca de 2000 metros, a profundidade do topo da esfera foi identificado a 97 ± 10 metros. A profundidade do centro e raio real da esfera são respectivamente 2100 e 2000 metros.....	45
Figura 3.11 Gráficos dos erros de inclinação e declinação recuperados em relação aos originais dos modelos sintético para (A) Diques, (B) Esferas e (C) Pipes.....	46
Figura 3.12 Gráficos dos erros de inclinação e declinação recuperados em relação aos originais dos modelos sintético para (A) Composições de 3 Diques, (B) Composições de 3 Esferas, (C) Composições de 3 Pipes e (D) Composições de Corpos de Geometrias Diferentes. ....	47
Figura 3.13 Sequência esquemática das informações adquiridas sobre os limites do alvo e as características dos vetores de magnetização, até o estágio de composição do modelo inicial para a inversão magnética. ....	48
Figura 3.14 Gráficos dos erros de intensidade recuperados em relação aos modelos sintéticos originais para (A) Modelos Simples, (B) Composições de Corpos Iguais e (C) Composições com Corpos de Geometrias Diferentes.....	49
Figura 3.15 Gráfico da diferença dos tempos de inversão com e sem modelos iniciais para Diques (azul), Esferas (vermelho) e Pipes (verde).....	51
Figura 3.16 Gráfico da diferença dos tempos de inversão com e sem modelos iniciais para grupos de (A) 3 Diques (azul), 3 Esferas (vermelho) e 3 Pipes (verde) iguais; e (B) Conjuntos de corpos com geometrias diferentes. ....	51
Figura 3.17 Exemplo da comparação de resultados com e sem a utilização do Procedimento de Análise deste trabalho. No caso, um pipe com 45° entre <i>MT</i> e <i>MI</i> , Razão de Köenigsberg ( <i>Q</i> )	



igual a 2.0 e suas diferenças de formas, volumes, tempos de inversão ( <i>CPU-Time</i> ) e distribuição de susceptibilidades para um intervalo de susceptibilidades de 0.05 a 0.1 (S.I.).	52
Figura 4.1 Localização das províncias magmáticas do centro-sul brasileiro e Paraguai oriental (modificado de Gibson <i>et al.</i> , 1995 e Brod <i>et al.</i> , 2004).	55
Figura 4.2 Eventos geológicos da PIAP (Adaptado de Gibson <i>et al.</i> , 1995).	56
Figura 4.1.1 Campo Magnético Residual (CMR) de Pratinha I.	57
Figura 4.1.2 <i>EHD</i> de Pratinha I com as zonas de cisalhamento da Bocaina (ao norte) e de Limeira I (a sudoeste) tracejadas.	59
Figura 4.1.3 Estimativas de profundidades com (A) <i>EHD-Depth</i> e (B) Deconvolução de Euler sobre o mapa de <i>EHD</i> de Pratinha I.	60
Figura 4.1.4 Redução ao Polo Magnético de Pratinha I.	61
Figura 4.1.5 Modelo inicial construído para Pratinha I nas vistas (A) sul, (B) oeste, (C) topo e (D) perspectiva.	62
Figura 4.1.6 Resultado da inversão magnética de Pratinha I sem o uso de Modelo Inicial nas vistas (A) sul (com o sinal para o norte em perspectiva), (B) oeste, (C) topo com corte a 1000 m de profundidade, (D) perspectiva com cortes N-S e E-W e, em detalhe, (E) perspectiva com contraste de susceptibilidades entre 0.13 e 0.15 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação $-29.7^\circ$ ; declinação $-20.6^\circ$ ; intensidade 23270 nT; projeção do campo magnético: inclinação: $-29.7^\circ$ ; declinação $-20.6^\circ$ .	64
Figura 4.1.7 Resultado da inversão magnética de Pratinha I com o uso de Modelo Inicial nas vistas (A) sul, (B) oeste, (C) topo com corte a 1000 m de profundidade, (D) perspectiva com cortes N-S e E-W e, em detalhe, (E) perspectiva com contraste de susceptibilidades entre 0.08 e 0.15 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação $-29.7^\circ$ ; declinação $-20.6^\circ$ ; intensidade 23270 nT; projeção do campo magnético: inclinação: $30.4^\circ$ ; declinação $-40.9^\circ$ .	65
Figura 4.1.8 Comparação entre os perfis (NW)-(SE) magnéticos de campo magnético residual de Pratinha I (azul) e calculado a partir do modelo invertido (vermelho) com os pares inclinação/declinação: (A) $30.00^\circ$ , $-40.90^\circ$ ; (B) $-30.00^\circ$ , $-40.90^\circ$ ; e (C) $-5.00^\circ$ , $-40.90^\circ$ .	66

Figura 4.1.9 <i>RTP</i> de Pratinha I utilizando a inclinação e declinação $-5.00^\circ$ e $-40.90^\circ$ respectivamente. O perfil A-B apresentado na figura 4.1.8 é localizado ao longo da linha (NW)-(SE). .....	67
Figura 4.1.10 Resultado da inversão magnética de Pratinha I com o uso de Modelo Inicial com o par inclinação/declinação corrigido, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo com corte a 1000 m de profundidade, (D) perspectiva com cortes N-S e E-W e, em detalhe, (E) perspectiva com contraste de susceptibilidades entre 0.08 e 0.125 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação $-29.7^\circ$ ; declinação $-20.6^\circ$ ; intensidade 23270 nT; projeção do campo magnético: inclinação: $-5.0^\circ$ ; declinação $-40.9^\circ$ .....	67
Figura 4.2.1 Mapa geológico simplificado da região de Tapira, Minas Gerais (Modificado de SILVA, 2003).....	69
Figura 4.2.2 Geologia do complexo de Tapira (Modificado de BROD, 1999), sendo B-1 – bebedouritos, B-2 – bebedouritos com predominância de apatita piroxenitos, S – sienitos e C-1 a C-5 carbonatitos. A linha branca representa o limite mina no ano de 2004.....	70
Figura 4.2.3 Campo magnético residual de Tapira. ....	71
Figura 4.2.4 <i>EHD</i> do complexo de Tapira com contornos em pontilhado preto os limites em superfície, de Brod (1999), dos bebedouritos e em marrom do carbonatito C-1. ....	72
Figura 4.2.5 <i>EHD-Depth</i> do complexo de Tapira .....	73
Figura 4.2.6 Perfil geológico da mina de Tapira, com o controle vertical dos tipos de minério observados em relação à topografia. Modificado de Brod et al. (2004).....	74
Figura 4.2.7 Mapa do <i>RTP</i> de Tapira com os contornos dos bebedouritos B-1 e B-2 em pontilhado preto e do carbonatito C-1 em pontilhado marrom. A porção negativa inserida no contorno dos bebedouritos pode ser relacionada ao sienito S-1.....	75
Figura 4.2.8 Cenário sintético inicial proposto para Tapira relacionando os corpos reais com os modelados, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo e (D) perspectiva. A porção em preto interna ao corpo B-2 está associada à presença do carbonatito C1, cuja extensão vertical foi inferida com base em Ribeiro (2011). ....	76

Figura 4.2.9 Inversão dos dados magnéticos do complexo máfico-ultramáfico-carbonatítico de Tapira sem a utilização do procedimento proposto neste trabalho, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva com cortes N-S e E-W, e (E) em detalhe, perspectiva com corte de contrastes de susceptibilidades de 0.09 a 0.13 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação -29.7°; declinação -20.6°; intensidade 23270 nT; projeção do campo magnético: inclinação: -29.7°; declinação -20.6°.....	77
Figura 4.2.10 Modelo de contraste de susceptibilidade magnética recuperado para o complexo de Tapira a partir do uso do procedimento de análise magnética, com vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva com cortes N-S e E-W, e (E) em detalhe, perspectiva com corte de susceptibilidade de 0.13 a 0.16 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação -29.7°; declinação -20.6°; intensidade 23270 nT; projeção do campo magnético: inclinação: 65.9°; declinação 169.5°.....	78
Figura 4.3.1 Mapa geológico do complexo de Araxá (Modificado de BIONDI, 2003). .....	82
Figura 4.3.2 Campo magnético residual de Araxá. ....	82
Figura 4.3.3 <i>EHD</i> de Araxá ressaltando nas linhas pontilhadas os limites dos corpos observados na Fig. 4.2.3.....	83
Figura 4.3.4 Profundidades resultantes da aplicação do <i>EHD-Depth</i> sobre os dados magnéticos de Araxá, com os perfis NW-SE e NE-SW apresentados na Fig. 4.3.5. ....	84
Figura 4.3.5 Perfis geológicos de Araxá em relação à topografia nas direções NE e NW (Modificado de BIONDI, 2003).....	84
Figura 4.3.6 Redução ao Polo Magnético Iterativa de Araxá.....	85
Figura 4.3.7 Modelo Inicial composto para o complexo de Araxá nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo e (D) perspectiva.....	86
Figura 4.3.8 Inversão magnética do complexo de Araxá sem a utilização de modelo inicial, com vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva com cortes N-S e E-W, e em detalhe, (E) perspectiva com corte de susceptibilidade de 0.13 e 0.15 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação -29.7°; declinação -20.6°; intensidade 23270 nT; projeção do campo magnético: inclinação: -29.7°; declinação -20.6°.....	87

Figura 4.3.9 Modelo de contraste de susceptibilidade magnética recuperado para Araxá contando com a utilização de modelo inicial para inversão, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva e, em detalhe, (E) perspectiva com corte de susceptibilidade entre 0.06 e 0.15 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação -29.7°; declinação -20.6°; intensidade 23270 nT; projeção do campo magnético: inclinação: -27.6°; declinação -18.6°.....	88
Figura 4.3.10 Modelo evolutivo do complexo de Araxá (ISSA FILHO <i>et al.</i> , 1984, PEREIRA e MANTOVANI, 2012;).....	89
Figura 4.4.1 Campo magnético residual dos complexos de Serra Negra e Salitre.....	91
Figura 4.4.2 Mapa geológico do Complexo de Serra Negra (Modificado de MARIANO E MARCHETTO, 1991; GRASSO, 2010).....	92
Figura 4.4.3 Geologia do complexo de Salitre (Modificado de BROD <i>et al.</i> , 2004).....	93
Figura 4.4.4 <i>EHD</i> de Serra Negra e Salitre I, II e III. ....	94
Figura 4.4.5 Perfil 1-2 do <i>EHD</i> de Serra Negra e Salitre II. ....	94
Figura 4.4.6 Estimativa de profundidades de Serra Negra e Salitre I, II e III por meio da aplicação do <i>EHD-Depth</i> . ....	95
Figura 4.4.7 <i>RTP</i> de Serra Negra e Salitre I, II e III. ....	96
Figura 4.4.8 Modelo inicial composto para os complexos de Serra Negra e Salitre, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo e (D) perspectiva. ....	97
Figura 4.4.9 Resultado da inversão magnética dos complexos de Serra Negra e Salitre sem o uso de Modelo Inicial nas vistas (A) sul, (B) oeste, (C) topo com corte a 1000 m de profundidade, (D) perspectiva com cortes N-S e E-W e, em detalhe, (E) perspectiva com contraste de susceptibilidades entre 0.15 e 0.20 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação -27.9°; declinação -20.5°; intensidade 23370 nT; projeção do campo magnético: inclinação -27.9°; declinação -20.5°. ....	98
Figura 4.4.10 Resultado da inversão magnética dos complexos de Serra Negra e Salitre com o uso de Modelo Inicial nas vistas (A) sul, (B) oeste, (C) topo com corte a 1000 m de profundidade, (D) perspectiva com cortes N-S e E-W e, em detalhe, (E) perspectiva com contraste de susceptibilidades entre 0.10 e 0.20 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético	

induzido: inclinação $-27.9^\circ$ ; declinação $-20.5^\circ$ ; intensidade 23370 nT; projeção do campo magnético: inclinação $-43.9^\circ$ ; declinação $-129.3^\circ$ .....	99
Figura 4.4.11 Perfil NW-SE dos campos magnéticos real (em azul) e sintético (a partir do modelo invertido; em vermelho) de Serra Negra, com os pares inclinação/declinação: (A) - $43.9^\circ/-129.3^\circ$ ; (B) $-60^\circ/-129.3^\circ$ ; (C) $43.9^\circ/-129.3^\circ$ ; (D) $-43.9^\circ/129.3^\circ$ ; e (E) $-43.9^\circ/-20.3^\circ$ .....	102
Figura 4.4.12 Redução ao polo utilizando as direções de $-43.90^\circ$ de inclinação e $-20.00^\circ$ de declinação no (A) <i>grid</i> dos complexos de Serra Negra e Salitre identificando a extensão do perfil da Fig. 4.4.11, com detalhamentos em (B) para o resultado da anomalia de Serra Negra. ....	103
Figura 4.4.13 Redução ao polo utilizando as direções de $-33.90^\circ$ de inclinação e $-20.00^\circ$ de declinação nos <i>grids</i> de (A) Salitre II e (B) Salitre III. ....	103
Figura 4.4.14 <i>EHD</i> localizado de Salitre I identificando, em pontilhado, os limites das duas estruturas de diferentes direções de magnetização total.....	104
Figura 4.4.15 <i>RTP</i> de Salitre I detalhando em (A) a estrutura a NW, com inclinação a $48.3^\circ$ e declinação a $-155.4^\circ$ ; e em (B) o corpo a SE, com inclinação e declinação $-30.4^\circ$ e $-18.7^\circ$ respectivamente.....	105
Figura 4.4.16 Inversão de dados magnéticos de Serra Negra e Salitre considerando as orientações de inclinação e declinação específicas de cada corpo. Nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva e (E), em detalhe, perspectiva com corte entre os contrastes de susceptibilidade de 0.1 a 0.2 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação $-27.9^\circ$ ; declinação $-20.5^\circ$ ; intensidade 23370 nT; projeção do campo magnético: variável com a localização (vide Tabela 4.4.1). ....	106
Figura 4.5.1 Mapa geológico de Catalão I (modificado de RIBEIRO, 2008).....	111
Figura 4.5.2 Mapa de campo magnético residual de Catalão I. ....	112
Figura 4.5.3 Mapa do <i>EHD</i> de Catalão I destacando as anomalias culturais (AC).....	113
Figura 4.5.4 Estimativas de profundidade de Catalão I utilizando (A) <i>EHD-Depth</i> e (B) Deconvolução de Euler. ....	114

Figura 4.5.5 Esquema de perfil de alteração de Catalão I, em relação a altitude, baseado em testemunhos de sondagens coletados na mina da região norte/nordeste do complexo (modificado de OLIVEIRA e IMBERNON, 1998).....	115
Figura 4.5.6 Redução ao polo magnético de Catalão I com inclinação de $-48.9^{\circ}$ e declinação $-14.5^{\circ}$ , destacando as anomalias culturais (AC).....	116
Figura 4.5.7 Modelo inicial para inversão de Catalão I, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo e (D) perspectiva.....	117
Figura 4.5.8 Inversão dos dados magnéticos de Catalão I sem a utilização de Modelo Inicial, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva e (E), em detalhe, perspectiva com corte de contraste de susceptibilidades entre 0.18 e 0.21. Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação $-25.9^{\circ}$ ; declinação $-20.1^{\circ}$ ; intensidade 23402 nT; projeção do campo magnético: inclinação $-25.9^{\circ}$ ; declinação $-20.1^{\circ}$ .....	118
Figura 4.5.9 Inversão dos dados magnéticos de Catalão I com a utilização de Modelo Inicial, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva e (E), em detalhe, perspectiva com corte de contraste de susceptibilidades entre 0.15 e 0.17. Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação $-25.9^{\circ}$ ; declinação $-20.1^{\circ}$ ; intensidade 23402 nT; projeção do campo magnético: inclinação $-78.7^{\circ}$ ; declinação $-27.1^{\circ}$ .....	119
Figura 5.1 Mapa simplificado da porção brasileira do SW do Cráton Amazônico apresentando os limites das principais províncias, orógenos, terrenos, cinturões e unidades litológicas (adaptado de BETTENCOURT <i>et al.</i> , 2010).....	122
Figura 5.1.1 Áreas trabalhadas pelo “Projeto Grupo das Platinas” da CPRM localizando a noroeste o Morro do Leme (NUNES, 2000).....	123
Figura 5.1.2 Mapa geológico de Morro do Leme apresentando suas três intrusões (modificado de NUNES, 2000).....	125
Figura 5.1.3 Campo magnético residual da região de Morro do Leme, destacando as anomalias referentes às três intrusões em pontilhado.....	126
Figura 5.1.4 EHD da região de Morro do Leme, identificando em pontilhado os sinais relacionáveis com as três intrusões estudadas.....	127

Figura 5.1.5 Estimativa de profundidades de Morro do Leme através do <i>EHD-Depth</i> . ....	128
Figura 5.1.6 Esquema de sondagem realizada no Morro 1 (NUNES, 2000). ....	128
Figura 5.1.7 <i>RTP</i> de Morro do Leme identificando em pontilhado os sinais relacionáveis com as três intrusões.....	129
Figura 5.1.8 Modelo inicial de Morro do Leme, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo e (D) perspectiva.....	130
Figura 5.1.9 Modelo de contraste de susceptibilidade de Morro do Leme obtido com a inversão sem modelo inicial, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva e (E), em detalhe, perspectiva com corte de susceptibilidades entre 0.08 e 0.16 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação -8.9°; declinação -13.1°; intensidade 23843 nT; projeção do campo magnético: inclinação -8.9°; declinação -13.1°.....	131
Figura 5.1.10 Modelo de contraste de susceptibilidade de Morro do Leme obtido com a inversão com modelo inicial, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva e (E), em detalhe, perspectiva com corte de susceptibilidades entre 0.02 (S.I.) e 0.03 (S.I.), em azul, e 0.10 e 0.13 (S.I.) em amarelo-avermelhado. Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação -8.9°; declinação -13.1°; intensidade 23843 nT; projeção do campo magnético: inclinação 64.8°; declinação -141.2°.....	132

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo da magnetometria, principalmente na área de prospecção mineral, encontra um grande obstáculo: a magnetização remanente ( $M_R$ ). A magnetização remanente, ou somente remanência, se dá pela propriedade de alguns minerais reterem parte da magnetização do campo magnético terrestre no momento em que cristalizam. Este fato levará, no momento da aquisição dos dados magnéticos, à soma das direções (vetoriais) de magnetização induzida ( $M_I$ ) – paralela ao campo magnético da Terra atual para o local e época da aquisição – e da remanência.

A exploração mineral tem como grande aliados os métodos geofísicos potenciais para a localização e delimitação de corpos litológicos. Havendo contraste de propriedades físicas entre a rocha/mineral e sua estrutura encaixante, estes métodos se apresentam como formas rápidas e eficazes de obtenção de informações sobre possíveis alvos minerais com potencial para exploração e exploração.

O processamento e modelagem (ou inversão) de dados magnéticos, assim como sua posterior interpretação, para obter resultados confiáveis devem levar em consideração a presença da remanência, especialmente para casos localizados na América do Sul, onde é observada a Anomalia do Atlântico Sul. Esta anomalia é observada como uma “depressão” do campo magnético do planeta, atingindo



intensidades próximas a 23000 nT (HARTMANN e PACCA, 2009), o que reflete diretamente na intensidade da magnetização induzida nas rochas e, por consequência, aumentando a interferência da remanência na aquisição magnetométrica.

Junto àquela da remanência, está a questão da confiabilidade de inversões de dados magnéticos realizadas na presença da mesma. Em geral, os algoritmos de inversão presumem somente a existência de magnetização induzida

Em vista disso, é proposta uma forma de trabalho para o processamento, inversão e análise de dados magnetométricos será apresentada da seguinte forma:

### ***Metodologia e Técnicas Utilizadas (Capítulo 2):***

#### *a. Delimitação Espacial*

- i. Localização das bordas do corpo-fonte da anomalia;
- ii. Estimativa da profundidade do corpo.

#### *b. Análise da Magnetização do Corpo*

- i. Varredura da direção da Magnetização Total ( $M_T$ ) do corpo;

#### *c. Modelagem Inicial*

- i. A partir das informações de delimitação espacial do corpo e da análise da magnetização (etapas *a* e *b*), é realizada uma primeira modelagem do corpo, com inferência da susceptibilidade magnética baseada em estudos prévios do alvo ou em estruturas de características geológicas similares ao alvo presentes na mesma região;

*d. Inversão*

- i. Inversão dos dados magnéticos considerando as direções de  $M_T$  (soma vetorial das magnetizações induzida e remanente) tomando como ponto de partida o modelo sintético inicial obtido na etapa anterior;

*e. Modelagem Final*

- i. Considerando os limites espaciais do corpo, as direções de magnetização total, a forma e a susceptibilidade magnética (estas duas últimas através da inversão – sendo a forma comparada aos limites obtidos no primeiro passo), é possível obter um modelo com precisão satisfatória, tanto espacialmente quanto magneticamente.

***Prova da Efetividade do método de trabalho***

- a. A sequência de técnicas apresentadas no Capítulo 2 foi aplicada em mapas de campo magnético de 108 modelos sintéticos diferentes (Capítulo 3), distribuídos em:
  - i. 27 modelos de cilindros inclinados (diques inclinados), com  $M_T$  direcionada a  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $150^\circ$  e  $180^\circ$  da direção da  $M_I$  (campo magnético terrestre atual), variando-se a intensidade da  $M_R$  cada direção de modo que sua razão de Königsberg ( $Q = M_R/M_I$ ; BLAKELY, 1995) seja de 1, 2 e 4.
  - ii. 27 modelos de cilindros verticais (pipes) com as mesmas características magnéticas dos cilindros inclinados;

- iii. 27 modelos de esferas com as mesmas características magnéticas dos cilindros inclinados;
  - iv. 8 conjuntos de 3 cilindros inclinados, variando em cada caso direções de  $M_T$  em relação a  $M_I$ , Susceptibilidade Magnética e Razão de Köenigsberg.
  - v. 8 conjuntos de 3 cilindros verticais com as mesmas características magnéticas do item anterior.
  - vi. 8 conjuntos de 3 esferas com as mesmas características magnéticas do item iv.
  - vii. 3 conjuntos de corpos de geometrias variadas baseadas em casos reais como intrusões alcalino-carbonatíticas e kimberlitos.
- b. E em 8 casos reais pertencentes à Província Ígnea do Alto do Paranaíba (PIAP – Capítulo 4) e Província Rondoniana-San Ignácio (PRSI – Capítulo 5).

### ***Conclusões dos Resultados (Capítulo 6)***

Este trabalho tem como alvo propor uma sequência de passos com os quais se possam processar, analisar e interpretar com sucesso uma anomalia magnética – ou um conjunto delas – na presença de magnetização remanente, além de provar a relevância do uso de um modelo inicial para inversões magnéticas, o que não só aumenta a confiabilidade do modelo invertido, assim como diminui drasticamente o tempo de inversão (CPU-Time).

## 2. METODOLOGIA

### *Magnetometria*

Toda a matéria é magnética. Em níveis atômicos os átomos se comportam como dipolos magnéticos devido às órbitas e aos *spins* (ou momento angular orbital) de seus elétrons ao redor do núcleo. Quando inserida em um campo magnético externo, a matéria tem os *spins* de seus elétrons perturbados. O tipo de reação a essa perturbação depende da condição original em que os elétrons se dispunham o que definirá também o tipo de material permeado.

Quando um material é inserido em um campo magnético, tende a sofrer indução magnética (Fig. 2-1) dada por:

$$\vec{M}_I = \chi \vec{H}, \quad (01)$$

sendo  $M_I$  a magnetização induzida,  $\chi$  a susceptibilidade magnética e  $H$  a força de magnetização do campo externo.

A susceptibilidade magnética é uma grandeza adimensional que indica o grau de magnetização a ser induzida em determinado material uma vez inserido em um campo magnético externo.

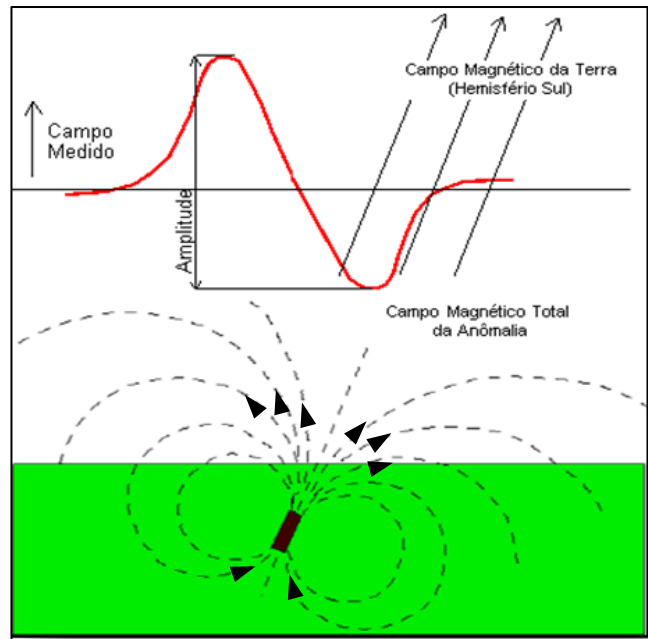


Figura 2.1 Perturbação no campo magnético terrestre esperada para um corpo situado no hemisfério sul (RIBEIRO, 2011).

Os materiais podem ser divididos em três principais grupos:

- Materiais Diamagnéticos têm elétrons pareados, ou seja, seus *spins* estão em direções opostas cancelando seus momentos magnéticos (KEAREY *et al.*, 2009). Quando inseridos em um campo magnético externo, materiais diamagnéticos tendem a apresentar uma indução magnética contrária ao campo externo e de pequena intensidade (BLAKELY, 1995);
- Materiais Paramagnéticos não apresentam pareamento total dos *spins*, apresentando, desta forma, momento magnético mesmo na ausência de campo magnético externo. Quando inseridos em um campo tendem a apresentar um campo induzido na mesma direção que o externo, de intensidade pouco maior – mas ainda fraca – que a dos materiais diamagnéticos;
- Materiais Ferromagnéticos são materiais em que os *spins* estão orientados na mesma direção, interferindo construtivamente no momento magnético do elétron, apresentando magnetização espontânea. Ao serem inseridos em um

campo magnético externo, esses materiais têm seus momentos alinhados com o campo, o que gera uma magnetização induzida forte, que pode perdurar mesmo após a retirada do campo, ao contrário dos materiais diamagnéticos e paramagnéticos. A esta propriedade de retenção é dado o nome de Magnetização Remanente ( $M_R$ ).

Quando se tem corpos tridimensionais, a magnetização ( $M$ ) se dará pelo somatório dos momentos magnéticos ( $m_i$ ) do corpo em função de seu volume ( $V$ ; BLAKELY, 1995):

$$M = \frac{1}{V} \sum_i m_i. \quad (02)$$

Dessa forma, o dado coletado por meio da magnetometria será constituído pela soma de duas componentes vetoriais: a Magnetização Induzida ( $\vec{M}_I$ ; gerada pelo Campo Magnético Terrestre) e a Magnetização Remanente ( $\vec{M}_R$ ; adquirida ao longo do tempo de cristalização da rocha):

$$\vec{M}_T = \vec{M}_I + \vec{M}_R, \quad (03)$$

sendo  $M_T$  a Magnetização Total do corpo.

A relação entre as intensidades  $M_I$  e  $M_R$  é denominada Razão de Köenigsberg ( $Q$ ; BLAKELY, 1995):

$$Q = \frac{M_R}{M_I}. \quad (04)$$

As magnetizações são consideradas matematicamente como vetores tridimensionais, sendo definidas pelas componentes direcionais de inclinação (variando verticalmente de  $-90^\circ$  a  $+90^\circ$ ) e de declinação (variando horizontalmente de  $-180^\circ$  a  $+180^\circ$ ), e pela intensidade dada a partir da Eq. 02.

As direções de  $\overline{M}_I$ , dessa forma, podem ser identificadas como paralelas ao Campo Magnético Terrestre (CMT). Já a intensidade será calculada de acordo com o tipo de rocha através da Eq. 01.

O CMT sofre uma variação secular para oeste, tendo rotacionado no globo 70° nos últimos 415 anos (HARTMANN e PACCA, 2009). Essa variação é calculada e publicada quinquenalmente utilizando o International Geomagnetic Reference Field (IGRF).

Segundo Blakely (1995), para estruturas litológicas crustais, a  $\overline{M}_R$  depende do raio atômico, da cristalografia, da composição química, da história termal, e da geologia e tectônica da região onde está instalada.

Um levantamento magnetométrico é influenciado pelo CMT, pela magnetização natural das rochas (remanência) e pela ação de campos magnéticos externos, como o solar, o que leva à necessidade da aplicação das seguintes correções:

- Correção de Paralaxe: Consiste na eliminação da diferença dos tempos de medição do magnetômetro e do altímetro com o sistema de posicionamento. Esta diferença é medida a partir da comparação de duas linhas de vôo, de diferentes sentidos, executadas sobre uma mesma anomalia magnética conhecida.
- Remoção da Variação Magnética Diurna: O campo magnético terrestre está sujeito a oscilações causadas primariamente pela interação de ventos solares na ionosfera – a magnetopausa. Grandes eventos como tempestades solares podem influenciar significativamente o campo magnético terrestre. Para eliminar o efeito deste tipo de interação foi realizada a Remoção da Variação Magnética Diurna através da utilização de magnetômetros base, instalados próximos às regiões de levantamentos em local de gradiente magnético suave, livre de objetos móveis e de interferência

cultural. Esta correção se dará pela aplicação de um filtro passa-baixa e posterior subtração dos sinais magnéticos dos magnetômetros base e itinerante. (Fig. 2.2).

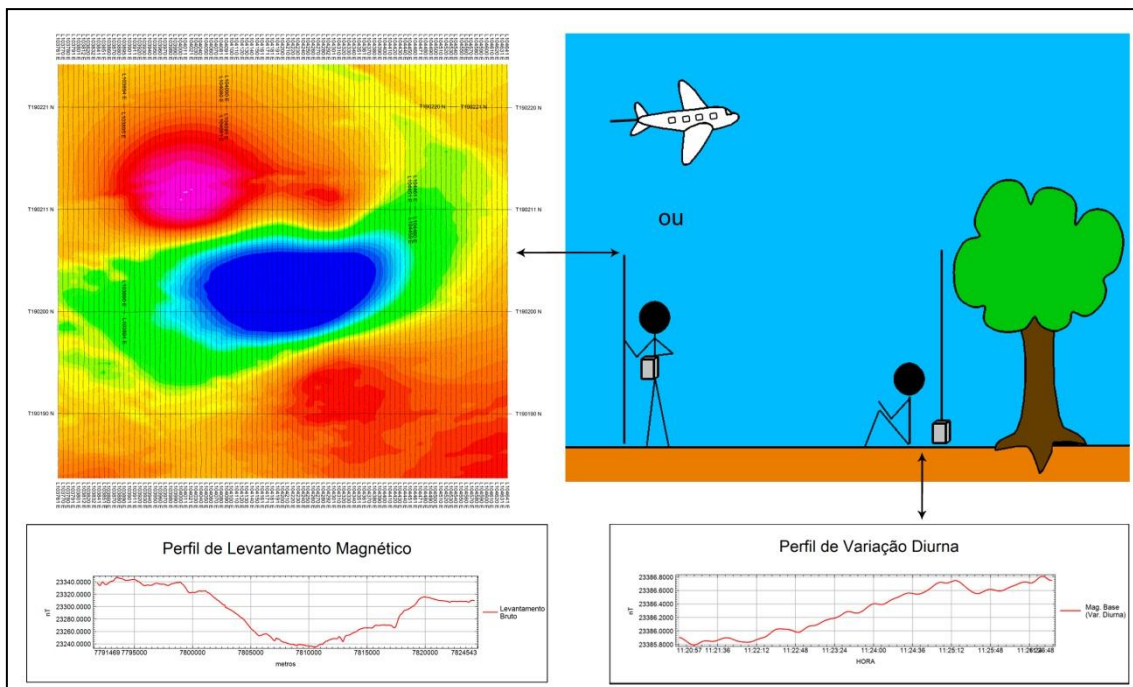


Figura 2.2 Esquema de levantamento de campo magnetométrico.

- Remoção do IGRF: A remoção do *IGRF* tem por objetivo eliminar a componente nuclear do campo medido. Este procedimento foi executado a partir das rotinas do software Oasis Montaj considerando uma altitude de 100m (mantida durante os levantamentos dos dados reais utilizados neste trabalho) para o cálculo da superfície que representa o modelo do *IGRF*, referido ao valor médio do período do levantamento.

Para os casos reais abordados neste trabalho foram utilizados os levantamentos da Área 7 de Minas Gerais (realizado entre 2005 e 2006 pela Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais – CODEMIG), Goiás – Sul da Faixa Brasília (realizado em 2005 pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil) e Área 2 de Mato Grosso (em 2008, também realizado pela CPRM).



## ***Técnicas de Processamento***

As técnicas de processamento de dados magnetométricos propostas neste trabalho foram utilizadas na mesma sequência que é apresentada de modo que, para cada passo do procedimento é interessante que se tenham as informações provenientes da etapa anterior.

### ***2.1. Separação das Componentes Regional-Residual do Campo Magnético***

Para os casos reais, quando necessário, foi utilizado filtro de superfície polinomial ajustada aos valores dos dados pelo método de mínimos quadrados disponível no software Oasis Montaj.

### ***2.2. Definição dos Limites Espaciais do Corpo Intrudido***

#### *i. Limites Laterais:*

##### *Derivada Horizontal Aumentada (EHD)*

A Derivada Horizontal Aprimorada (*Enhanced Horizontal Derivatives – EHD*) foi proposta por Cordell e Grauch (1985), automatizada por Blakely e Simpson (1986) e implementada, como técnica semi-quantitativa de detecção com alta-resolução de bordas de corpos magnetizados, por Fedi e Florio (2001).

O EHD propõe a transformação do grid de Campo Magnético Residual em uma Série de Taylor como forma de permitir ao usuário um controle sobre a interferência causada por sinais magnéticos de alta frequência e ruídos:

$$\varphi(x, y, z) = f(x, y, z) + \frac{f^1(x, y, z)}{1!} + \frac{f^2(x, y, z)}{2!} + \dots + \frac{f^n(x, y, z)}{n!}, \quad (05)$$

sendo  $\varphi(x, y, z)$  o grid reconstruído sob a forma de Série de Taylor,  $f(x, y, z)$  o sinal magnético original e  $f^n(x, y, z)$  sua derivada vertical de ordem n. A partir deste ponto é aplicado o filtro de Gradiente Horizontal (*EHD*):

$$EHD = \sqrt{\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2}, \quad (06)$$

Esta operação de filtragem permitirá a observação dos limites laterais do corpo-fonte em seus pontos de máximo valor.

## ii. *Limites Verticais (Profundidade de Topo)*

O método magnetométrico não tem a propriedade de indicar a base de estruturas geológicas em subsuperfície, no entanto permite uma boa aproximação das profundidades do topo das fontes magnéticas. Neste trabalho são utilizados o *EHD-Depth*, uma extrapolação da técnica do *EHD* baseada no Sinal Analítico Aprimorado (*Enhanced Analytic Signal*) de Hsu *et al.* (1998), e a Deconvolução de Euler (Thompson, 1982), REID *et al.*, 1990).

### *EHD-Depth*

O *EHD-Depth* é dado por:

$$EHD_2 = \sqrt{\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z \partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z \partial y}\right)^2}, \quad (07)$$

$$EHD - Depth = \frac{|EHD|}{|EHD_2|}. \quad (08)$$

Em casos de limites verticais entre litologias o *EHD-Depth* apresenta resultados bastante precisos para as profundidades de topo destes limites.

O *EHD*, em casos de corpos esféricos, exibe uma característica diferente da observada para corpos que possuem contatos verticais com a rocha encaixante: apresenta claramente um sinal positivo para a posição do corpo, porém sem um ponto de máximo local correspondente com o limite da intrusão, o que impede a definição dos limites laterais com precisão. Este fato tem consequências negativas diretas na utilização do *EHD-Depth*, pois os pontos usados no cálculo das profundidades não serão bem definidos. No entanto, se por um lado se perde precisão para a utilização do *EHD-Depth*, por outro esta característica deixa clara a existência de um corpo (aproximadamente) esférico. Este conhecimento permite a utilização da Deconvolução de Euler com grande precisão, pois já é conhecido o índice estrutural a ser utilizado.

### *Deconvolução de Euler*

Proposta por Thompson (1982) e aprimorada por Reid *et al.* (1990), a Deconvolução de Euler é dada a partir da equação diferencial homogênea de Euler:

$$(x - x_0) \frac{\partial M}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial M}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial M}{\partial z} = \eta(R - M), \quad (09)$$

onde  $x_0$ ,  $y_0$  e  $z_0$  são as coordenadas da fonte do sinal magnético,  $M$  é a anomalia magnética (ou gravimétrica),  $\eta$  o índice estrutural (no caso de sinal magnético de corpos esféricos deve-se utilizar o índice 3) e  $R$  o nível de base. Ao nível de base

atribui-se a taxa de decaimento do sinal gravimétrico ou magnético de acordo com a geometria da fonte do sinal, sendo que para cada geometria é indicado um valor específico (Tabela 2.1):

Tabela 2.1 Relação entre as geometrias das fontes dos sinais magnéticos com seus respectivos Índices Estruturais (adaptado de REID *et al.*, 1990).

Modelo Geológico	Índice Estrutural Magnético
Esfera	3
Pipe	2
Cilindro Horizontal	2
Dique	1
Sill	1
Contato	0

### 2.3. Determinação das Direções do Vetor de Magnetização Total

#### *Redução ao Polo Magnético Iterativa – Método MinMax*

Fedi *et al.* (1994) propuseram um algoritmo de determinação das direções de magnetização através da análise de distorção de anomalias reduzidas ao polo magnético. Neste algoritmo, implementado por Cordani e Shukowsky (2009), são selecionados aleatoriamente 30 pares de valores de inclinação e declinação, e realizadas Reduções ao Pólo Magnético (RTP):

$$RTP(\rho, \theta) = \frac{1}{[\sin I_H + i \cos I_H \cos(D_H - \theta)][\sin I_T + i \cos I_T \cos(D_T - \theta)]}, \quad (10)$$

no qual  $\rho$  e  $\theta$  são as representações em coordenadas polares das coordenadas do grid de Campo Magnético Residual no domínio da frequência após a aplicação da Transformada de Fourier;  $I_H$  e  $D_H$  são as direções de inclinação e declinação, respectivamente, do campo induzido (CMT) para a região em análise;  $i$  é a unidade

imaginária; e  $I_T$  e  $D_T$  são o par inclinação/declinação da magnetização total da fonte da anomalia.

Após a aplicação do filtro de *RTP* sobre o grid original utilizando-se os 30 pares de inclinação/declinação iniciais, os grids resultantes são avaliados através do método MaxiMin (FEDI *et al.*, 1994); este indica os pares que reduziram a anomalia ao polo com maior efetividade, ou seja, minimizando os valores negativos no grid resultante. Os três grids que apresentarem maior distorção do campo reduzido ao polo são descartados juntamente com seus pares inclinação/declinação e o processo é reiniciado até que se atinja o número de iterações definido pelo usuário ou uma convergência dos resultados das últimas 10 iterações realizadas.

É importante ressaltar que, neste tipo de técnica, é considerado o valor de magnetização total médio, ou seja, se o alvo da análise for uma estrutura muito grande, seu tempo de resfriamento foi provavelmente longo, o que leva à “gravação” de diversas orientações do campo magnético da Terra até que passasse por sua respectiva temperatura de Curie.

#### **2.4. Modelagem Inicial**

A modelagem inicial foi realizada com base no algoritmo de Barnett (1976) utilizado pelo software ModelVision Pro, o qual apresenta uma solução analítica para campos magnéticos provenientes de fontes de geometrias arbitrárias. Segundo o autor, para o cálculo do campo magnético, o modelo matemático do corpo deve ser “fatiado” em formas triangulares e, para cada fatia, calculado o campo magnético.

Ao final do processo, o campo magnético total será construído a partir da soma de todos os campos gerados por cada “fatia”.

Dessa forma, esta etapa tem como objetivo a construção de um modelo matemático a partir das informações conhecidas:

- i) Limites espaciais do corpo: através do *EHD* e do *EHD-Depth* ou da Deconvolução de Euler;
- ii) Direções de inclinação e declinação do vetor de magnetização induzida: através do IGRF (paralelo ao mesmo);
- iii) Direções de inclinação e declinação do vetor de magnetização total média: através do *RTP* iterativo.

Neste ponto deve-se inferir com base em estudos geológicos e/ou geoquímicos a susceptibilidade do alvo. Caso não haja informações, sugere-se uma análise nas intrusões próximas previamente estudadas para que se tenha um ponto de partida.

Se a susceptibilidade magnética for conhecida, o processo se torna mais simples sendo possível a modelagem direta do alvo. De qualquer maneira, não há necessidade de uma alta precisão no ajuste do sinal modelado com o real, isto se dará nas etapas seguintes.

## ***2.5. Inversão***

As inversões dos dados magnéticos deste trabalho foram realizadas através do software MAG3D da *University of British Columbia – Geophysical Inversion Facility*, com o algoritmo de Li e Oldenburg (1996, 2003). Este algoritmo assume que não há desmagnetização associada à fonte da anomalia, no entanto permite que cada ponto do grid a ser invertido contenha uma projeção da anomalia de modo que considere a magnetização total do alvo em estudo. Assim a magnetização observada para a *i*-ésima célula é dada por:

$$J_i = \chi_i H_0 \quad (11)$$

sendo, de modo análogo à Eq. 01,  $J_i$  a magnetização da  $i$ -ésima célula,  $\chi_i$  sua susceptibilidade magnética (mantendo-se constante em todo o volume da célula) e  $H_0$  o campo magnético terrestre para sua posição.

A relação entre anomalia magnética discretizada num vetor de dados  $\vec{d} = (d_1 \cdots d_N)$  e seu respectivo modelo tridimensional, caracterizado através de um vetor de susceptibilidades  $\vec{\kappa} = (\kappa_1 \cdots \kappa_M)^T$ , é considerada através da relação:

$$\vec{d} = G\vec{\kappa} \quad (12)$$

em que  $G$  é uma matriz  $M \times N$  de sensibilidade cujo  $ij$ -ésimo elemento,  $G_{ij}$ , é numericamente a contribuição do  $j$ -ésimo prisma, com propriedade física unitária, à  $i$ -ésima observação magnética (Fig. 2.3).

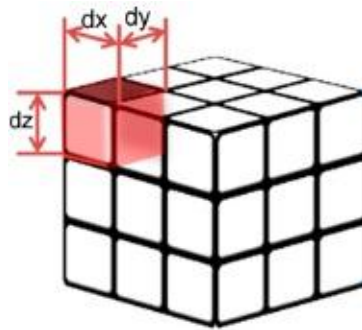


Figura 2.3 Exemplo de malha tridimensional utilizado para as inversões (adaptado de RIBEIRO, 2011).

A função peso da profundidade (*depth weighting*) tem como função impedir que o sistema concentre a propriedade física na superfície da Terra:

$$w(\vec{r}_j) = \left[ \frac{1}{\Delta z_j} \int_{\Delta z_j} \frac{dz}{(z+z_0)^\beta} \right]^{1/2}, \quad j = 1, \dots, M, \quad (13)$$

onde  $\vec{r}_j$  representa a  $j$ -ésima célula da malha,  $\Delta z_j$  a espessura da célula,  $z_0$  uma constante utilizada para garantir que a integral fique bem definida, e  $\beta = 3.0$ .

A função de regularização do MAG3D é descrita da forma:

$$\begin{aligned} \phi_m(m) = & \alpha_s \int_V w_s \{w(\vec{r}) \cdot [m(\vec{r}) - m_0]\}^2 dv + \alpha_x \int_V w_x \left\{ \frac{\partial w(\vec{r}) \cdot [m(\vec{r}) - m_0]}{\partial x} \right\}^2 dv + \\ & \alpha_y \int_V w_y \left\{ \frac{\partial w(\vec{r}) \cdot [m(\vec{r}) - m_0]}{\partial y} \right\}^2 dv + \alpha_z \int_V w_z \left\{ \frac{\partial w(\vec{r}) \cdot [m(\vec{r}) - m_0]}{\partial z} \right\}^2 dv \end{aligned} \quad (14)$$

em que  $\alpha_s$ ,  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  e  $\alpha_z$  são coeficientes positivos ajustáveis relativos a importância das componentes da função de regularização;  $w_s$  é a função que, no caso da utilização de um modelo de referência, indica o quão fiel a este modelo o resultado da inversão deve ser.

No MAG3D existe a possibilidade tanto da inserção de um modelo inicial, o qual será usado como ponto de partida para a inversão, quanto de um modelo de referência o qual, dado o valor de  $w_s$ , deverá ser buscado como resultado final da inversão.

Os parâmetros  $w_s$ ,  $w_x$ ,  $w_y$  e  $w_z$  controlam as derivadas de ordem 1 da distribuição das propriedades físicas ao longo das direções s, x, y e z, e são ponderadas pela função peso ( $w(\vec{r})$ ; Eq. 13).

Segundo Lelièvre *et al.* (2006), a função objetivo a ser minimizada é definida como:

$$\phi = \phi_d + \mu \phi_m, \quad (15)$$

tal que  $\mu$  seja o parâmetro de regularização do ajuste dos dados,  $\phi_m$  a função de regularização (Eq. 14) e  $\phi_d$  seja a função do ajuste, dada por:

$$\phi_d = \left\| W_d \left( G\vec{k} - \overline{d^{obs}} \right) \right\|^2, \quad (16)$$

em que  $\overline{d^{obs}}$  é o vetor de dados magnéticos adquiridos no levantamento e  $W_d$  a matriz diagonal cujo i-ésimo elemento  $w_i$  é:

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i}, \quad (17)$$

com  $\sigma_i$  representando o desvio padrão do i-ésimo dado.



Como forma de limitação da minimização da função objetivo para valores de susceptibilidades cabíveis a cada cenário geológico a ser invertido, é inserida na mesma, com controle do usuário, limites de mínima e máxima susceptibilidade magnética ( $\kappa^{min}$  e  $\kappa^{max}$ , respectivamente; Eq. 18):

$$\phi(\lambda) = \phi_d + \mu\phi_m - 2\lambda \sum_{j=1}^M [\ln(\kappa_j - \kappa_j^{min}) + \ln(\kappa_j^{max} - \kappa_j)], \quad (18)$$

sendo  $\lambda$  o parâmetro de barreira que previne a minimização de cruzar a “barreira” de limites de susceptibilidade magnética possíveis.

A solução completa da minimização da função objetivo e das demais restrições aplicadas às diferentes versões do MAG3D é apresentada em Li e Oldenburg (1996, 2003) e MAG3D (2002).

Com este algoritmo, os dados deverão ser invertidos a partir do modelo inicial inferido na etapa 2.4. O corpo resultante, uma vez que convirja a uma forma que corrobore com as informações obtidas pelo *EHD*, *EHD-Depth* ou Deconvolução de Euler, deve apresentar uma boa aproximação do contraste de susceptibilidade magnética aparente entre a fonte do sinal anômalo e a rocha encaixante. Sendo conhecida a susceptibilidade magnética da rocha encaixante, através de literatura especializada (mapas geológicos locais e/ou regionais, entre outros), ou ainda visitas em campo, pode-se avaliar a provável susceptibilidade do corpo-fonte.

## **2.6. Modelagem Final**

Uma vez estimada a susceptibilidade através da inversão, é possível retornar ao passo 2.4 e aplicar a informação ao modelo inicial. Com isso serão conhecidas as intensidades de  $\vec{M}_T$  e  $\vec{M}_I$  e, por subtração de vetores (Fig. 2.4), será possível determinar a magnetização remanente e a razão de Königsberg (Q).

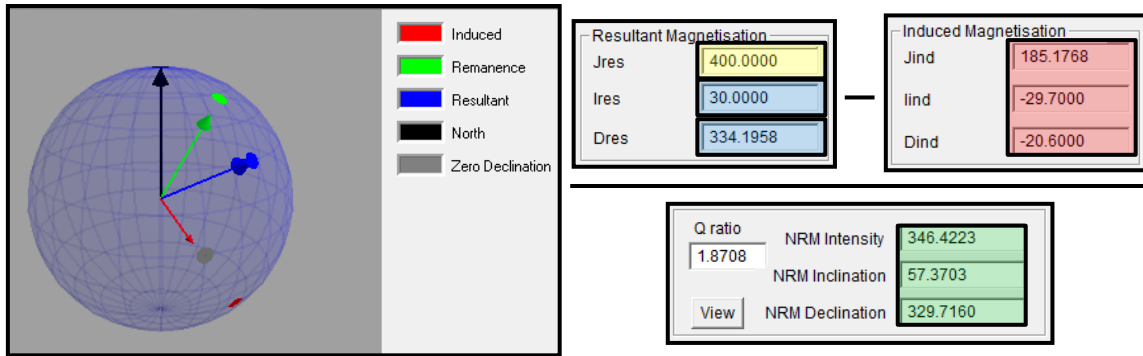


Figura 2.4 Representação gráfica do procedimento de subtração vetorial para estimação da magnetização remanente.

### *Avaliação dos Resultados*

Ao fim deste procedimento, os casos sintéticos tiveram suas informações recuperadas comparadas com suas originais, assim como foram também calculadas as diferenças de tempo de processamento entre as inversões com e sem a utilização de modelos iniciais.

Os dados de inclinação recuperados pelo *RTP* iterativo foram comparados com os dados sintéticos originais através da relação (Eq. 18):

$$Erro_{Incl}(\%) = \frac{|I_R - I_0|}{180} \cdot 100 \quad , \quad (18)$$

sendo  $I_R$  a inclinação recuperada,  $I_0$  a inclinação original, com sua diferença normalizada para o espaço amostral possível de valores possíveis para inclinações ( $-90^\circ$  a  $+90^\circ$ ).

De forma análoga foi realizada a avaliação dos valores de declinação:

$$Erro_{Decl}(\%) = \frac{|D_R - D_0|}{360} \cdot 100 \quad , \quad (19)$$

tal que  $D_R$  e  $D_0$  sejam as declinações recuperada e original, com sua diferença normalizada para o espaço amostral de  $-180^\circ$  a  $+180^\circ$ .

As intensidades foram analisadas por Erro Relativo Percentual:

$$Erro_{Int}(\%) = \frac{|J_R - J_0|}{J_0} \cdot 100 \quad , \quad (20)$$

com  $J_R$  e  $J_0$  representando as intensidades recuperada e original respectivamente.

Os parâmetros espaciais dos modelos original e recuperado foram comparados diretamente, contando com os valores recuperados de profundidade e volumes dos corpos invertidos e seus respectivos desvios padrão.

Para os tempos de processamento (*CPU-Time*) foram tomados os valores relativos entre as inversões com e sem modelo inicial e calculada o quão menor foi o tempo de processamento da primeira em relação à segunda inversão:

$$Diff_{CPU-Time} = 100 - \left( 100 \cdot \frac{T_{Mod-Ini}}{T_{Sem-Mod}} \right) \quad , \quad (21)$$

em que  $T_{Mod-Ini}$  e  $T_{Sem-Mod}$  são os *CPU-Times* das inversões com e sem a utilização de Modelo Inicial.

### 3. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES: MODELOS SINTÉTICOS

O procedimento apresentado no capítulo anterior foi aplicado em 108 casos sintéticos diferentes visando comprovar sua eficácia. Os grids de campo magnético total dos modelos sintéticos foram discretizados em grids de dimensões 24500 m (E-W) por 34300 m (N-S), com dados distanciados em cinco metros entre si.

As direções de inclinação e declinação do vetor de magnetização induzida foram mantidas constantes para todos os modelos, com *Inclinação* =  $-29.7^\circ$  e *Declinação* =  $-20.6^\circ$ .

Estes valores de inclinação e declinação se referem à região sul da Província Ígnea do Alto do Paranaíba, onde está localizada a maior parte dos casos reais abordados neste trabalho. Nesta região, a intensidade do Campo Magnético da Terra é baixa devido à Anomalia do Atlântico Sul, o que aumenta o grau de complexidade do processamento e interpretação dos dados magnéticos, exigindo maior eficácia do procedimento de análise proposto.

A intensidade ( $M_I$ ) deste vetor resultou da susceptibilidade empregada em cada corpo, de modo que para  $\chi = 0.05$ ,  $M_I = 92.60 \text{ nT}$ ; para  $\chi = 0.10$ ,  $M_I = 185.20 \text{ nT}$ ; e para  $\chi = 0.05$ ,  $M_I = 277.76 \text{ nT}$ .

Os mapas resultantes de cada técnica (quando aplicável) estão no CD-ROM em anexo à dissertação.

### *a. Cenários de Corpos Simples*

Primeiramente o procedimento foi aplicado em 81 cenários com um único corpo. Estes cenários foram divididos em três grupos de 27 casos mantendo-se a geometria fixa em cada grupo. As geometrias utilizadas foram: cilindros inclinados (representando diques inclinados), esferas (representando domos) e cilindros verticais (representando pipes), sendo nomeados, a fim de praticidade, como diques, esferas e pipes respectivamente (Fig. 3.1).

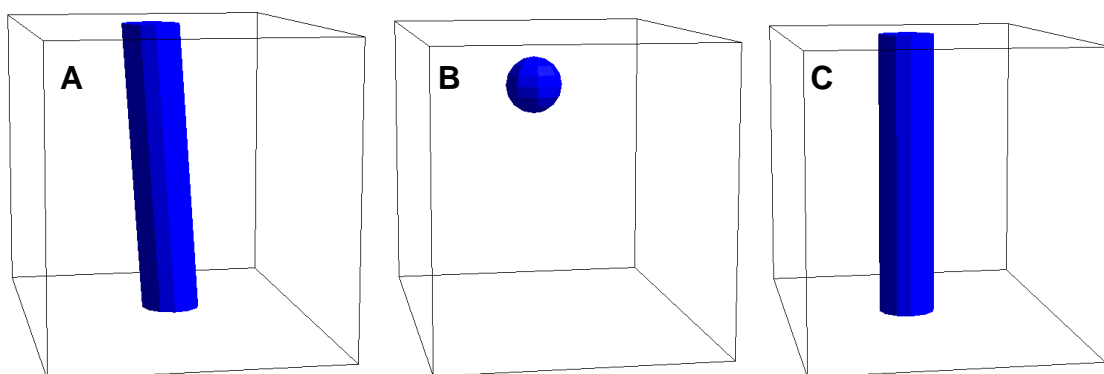


Figura 3.1 Modelos sintéticos: (A) Dique, (B) Esfera e (C) Pipe.

As características de cada modelo são descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Parâmetros espaciais dos modelos utilizados nos Cenários de Corpos Simples, sendo  $\chi$  a susceptibilidade magnética.

Corpo	Raio (m)	Extensão Vertical (m)	Profundidade do Topo (m)	Volume (km <sup>3</sup> )	Direção	Ângulo de Mergulho	$\chi$ (S.I.)
Dique	2000	10000	100	267	N60E	70°	0.1
Esfera	2000	2000	100	34	---	---	0.1
Pipe	2000	10000	100	251	---	90°	0.1

Dentro de cada grupo geométrico, os modelos foram divididos quanto à presença ou não de remanência. Os modelos que continham remanência foram subdivididos quanto ao ângulo entre o vetor de magnetização total e o de magnetização induzida (Fig. 3.2):

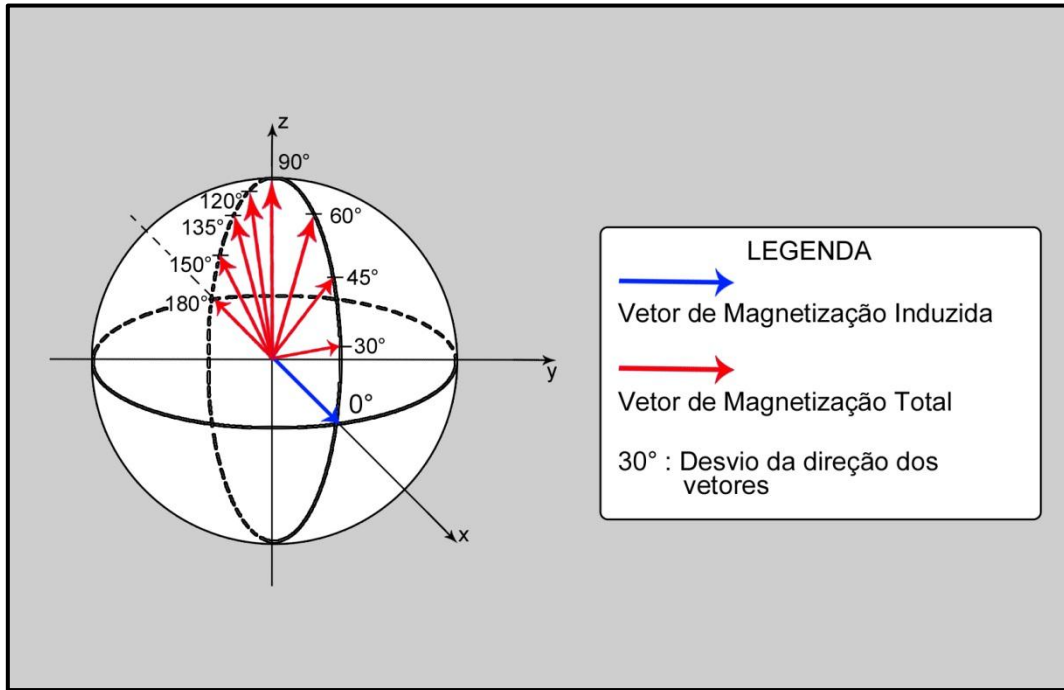


Figura 3.2 Esquema de desvio de  $\vec{M}_T$  em relação à  $\vec{M}_I$ .

Para cada caso de desvio de  $\vec{M}_T$  em relação à  $\vec{M}_I$  foram criados três cenários variando a intensidade de  $\vec{M}_R$  quando comparada à  $\vec{M}_I$ . Nesta última subdivisão as Razões de Königsberg utilizadas foram  $Q=1, 2$  e  $4$  (Eq. 04).

A Fig. 3.3 ilustra a divisão dos Cenários de Corpos Simples em forma de diagrama de hierarquia, de modo que o mesmo se repetirá para cada geometria de modelo (Dique, Esfera e Pipe):

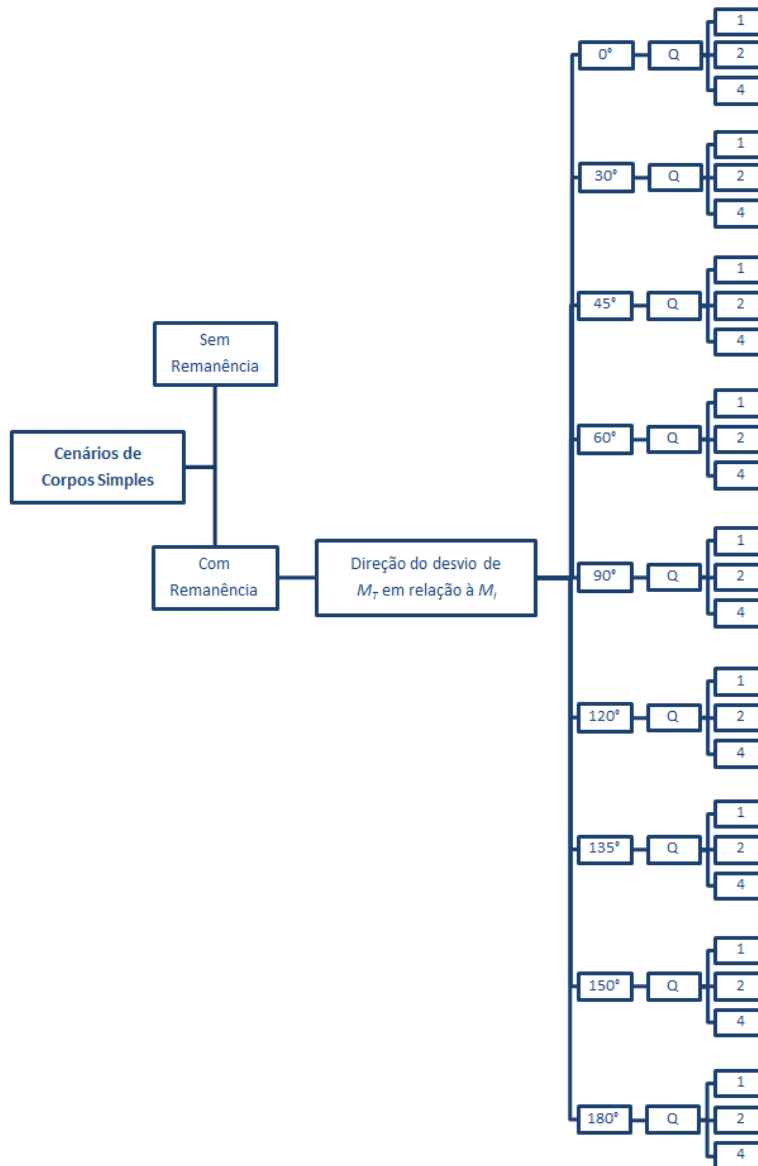


Figura 3.3 Organograma apresentando as subdivisões dos Cenários de Corpos Simples, sendo  $\vec{M}_T$  o vetor de Magnetização Total,  $\vec{M}_I$  o vetor de magnetização induzida e  $Q$  a Razão de Königsberg.

### ***b. Cenários com Vários Corpos***

Nos 27 casos contendo vários corpos buscou-se a simulação da eficácia do procedimento em casos contendo interferência entre sinais magnéticos, de diferentes corpos-fonte, localizados muito próximos uns aos outros. Os grupos de modelos foram divididos segundo suas geometrias, direções de  $\vec{M}_T$  em relação à  $\vec{M}_I$  e Razões de Königsberg, como são apresentados na Fig. 3.4.

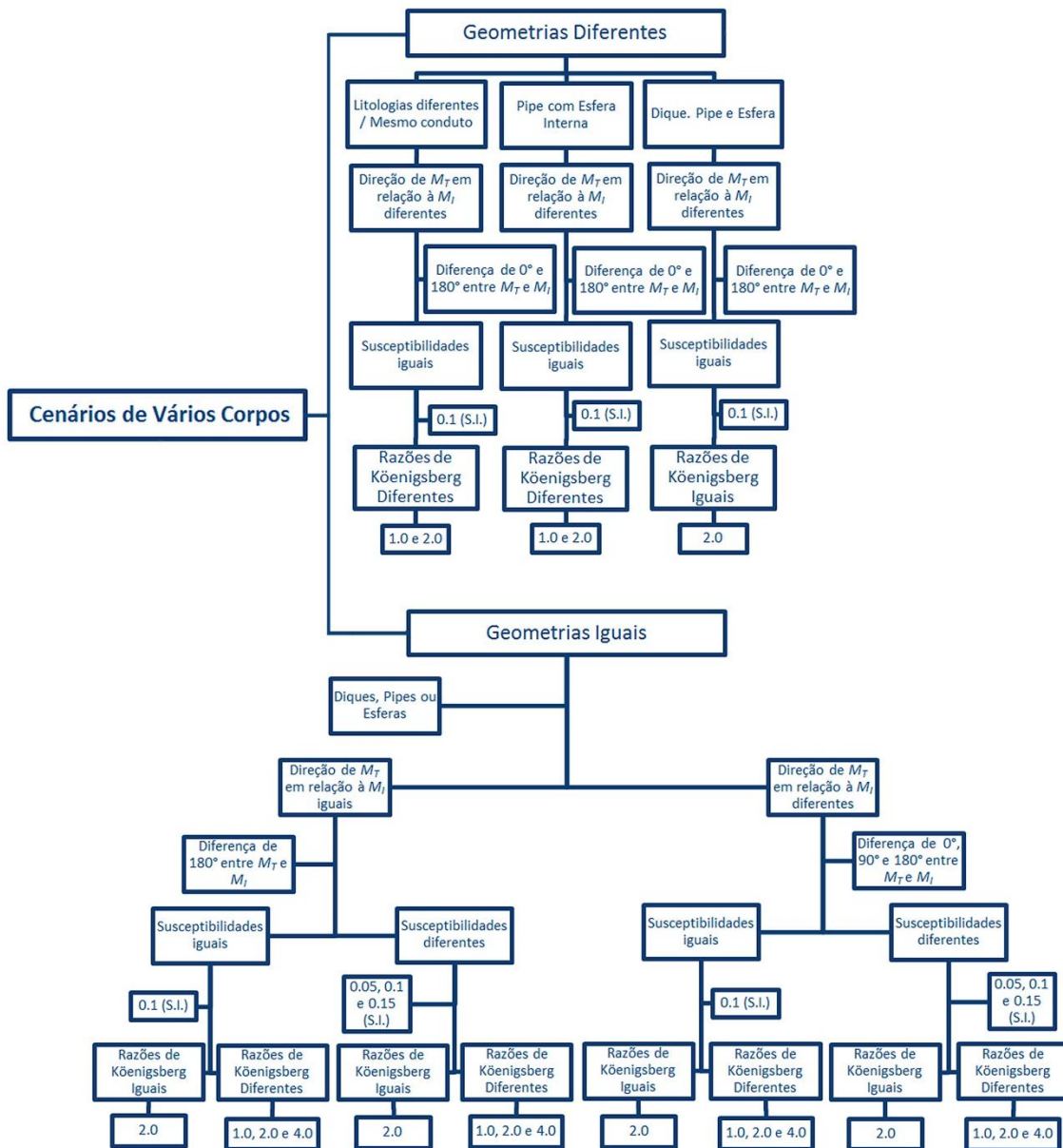


Figura 3.4 Organograma apresentando as subdivisões dos Cenários de Vários Corpos.

Os modelos utilizados nos cenários de geometrias iguais e no de geometria diferente com dique, pipe e esfera, têm as mesmas características espaciais daqueles utilizados em casos de apenas um corpo por grid (Tabela 3.1). Nos outros dois de geometrias diferentes os modelos estão dispostos na Tabela 3.2 e na Fig. 3.5.



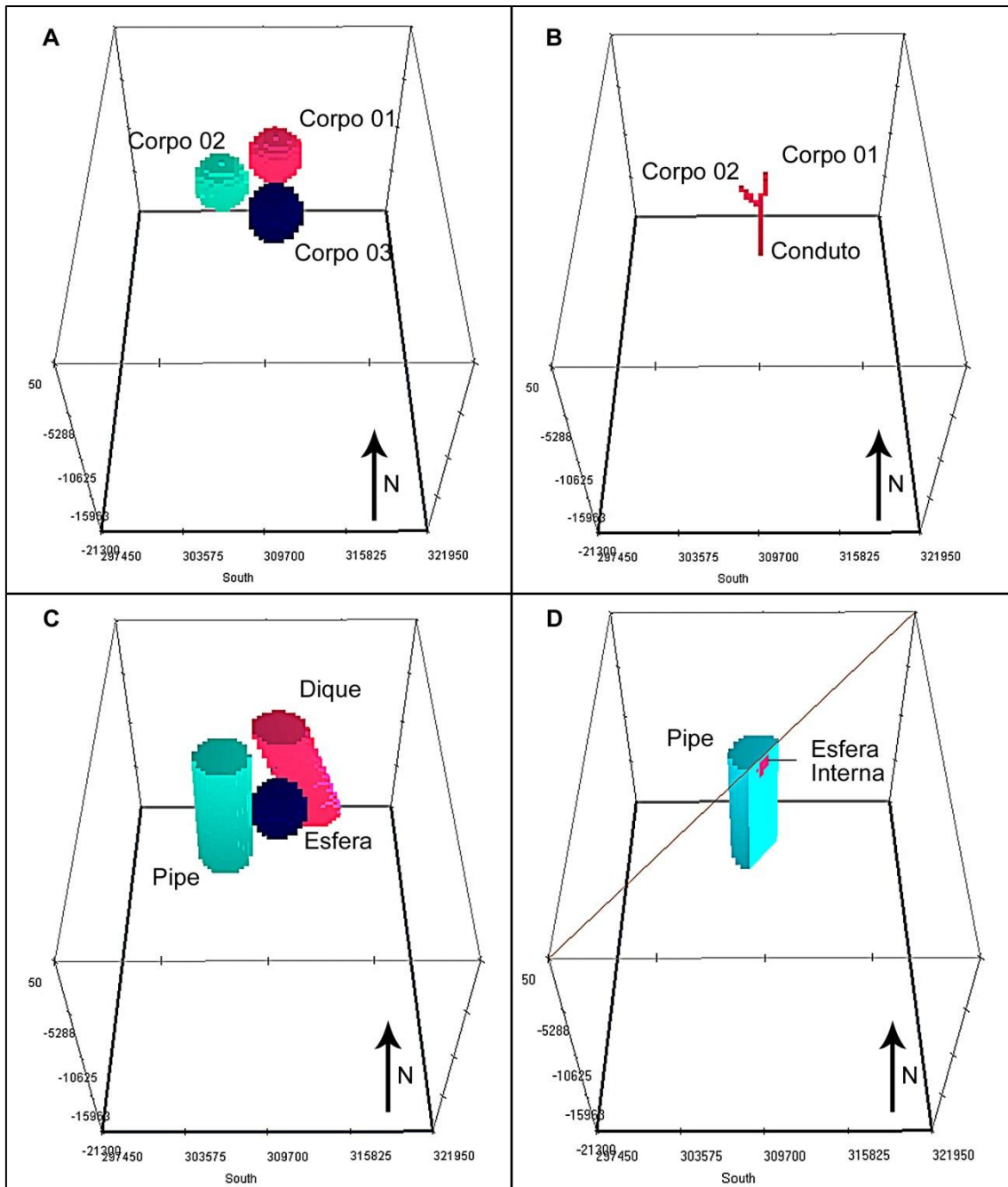


Figura 3.5 Discriminação dos corpos para (A) geometrias iguais (esferas) e, em geometrias diferentes, para (B) Mesmo conduto, (C) Dique-Pipe-Esfera e (D) Pipe com Esfera Interna (com mesmas susceptibilidades magnéticas, mas remanências diferentes). As especificações espaciais e magnéticas dos modelos sintéticos, os resultados numéricos das técnicas utilizadas, as comparações entre os tempos de processamento (*CPU-Time*) e volumes das inversões com e sem Modelo Inicial estão disponíveis nas tabelas A.1 à A.14 do Anexo A.

Tabela 3.2 Parâmetros espaciais dos modelos utilizados nos Cenários de Vários Corpos.

Cenário	Corpo	Raio (m)	Extensão Vertical (m)	Profundidade do Topo (m)	Direção	Mergulho	$\chi$ (S.I.)
Litologias Diferentes / Mesmo conduto	Corpo 01	200	3000	100	S60W	80°	0.1
	Corpo 02	200	3000	100	N60E	60°	0.1
	Conduto	200	5000	3000	Vertical	90°	0.1
Pipe com Esfera Interna	Pipe	2000	1000	100	Vertical	90°	0.1
	Esfera	800	800	100	---	---	0.1

Os resultados serão apresentados técnica por técnica a seguir.

### 3.1. Técnicas

#### i. EHD

Para mapas de campo magnético de corpos simples o *EHD* delimita com clareza limites verticais de intrusões (Fig. 3.6-A). Em situações de bordas com mergulho de alto ângulo, como é o caso dos modelos sintéticos de Diques utilizados neste trabalho (Mergulho = 70°), esta técnica não permite a observação desta característica (Fig. 3.6-B).

Em casos de esferas, os pontos de máximo do *EHD* não representaram as bordas dos corpos, mas revelaram um comportamento característico de contraste positivo em relação ao restante do mapa, com uma depressão no centro do corpo (Fig. 3.6-C). Isto mostrou ser exclusivo aos modelos esféricos, o que gera uma informação valiosa para a estimativa de profundidades, uma vez que será possível inferir o índice estrutural ( $\eta$ ) da Deconvolução de Euler.

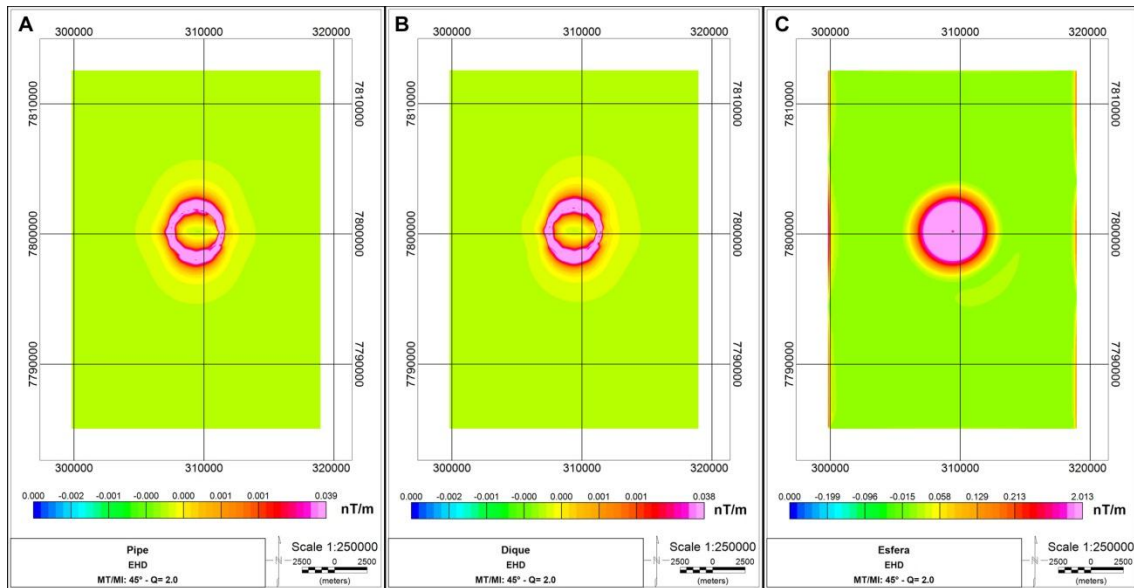


Figura 3.6 Exemplos de grids de *EHD* para: (A) Pipe, (B) Dique e (C) Esfera com diferença de direções de magnetização entre  $\vec{M}_T$  e  $\vec{M}_I$  de  $45^\circ$  e Razão de Königsberg de 2.0.

Na evolução deste trabalho, foi descoberta uma relação entre a distância entre os picos do *EHD* e seu ponto central de menor amplitude em casos de esferas. Considerando um perfil de *EHD* que passe sobre o raio da esfera, independentemente da direção e intensidade da magnetização atribuída ao modelo, a distância entre pico e vale não varia, permanecendo em 800 metros ( $d_{pico-vale}$ ) para esferas de 2000 metros de raio (Fig. 3.7).

Este resultado permaneceu para os 27 cenários de corpos esféricos simples e para os 8 de múltiplas esferas, levando-se em consideração apenas os casos em que era possível observar anomalia magnética. Assim, para que se obtenha o raio real de uma dada esfera, deve-se medir a distância entre pico e vale do *EHD* e multiplicar por 2.5.

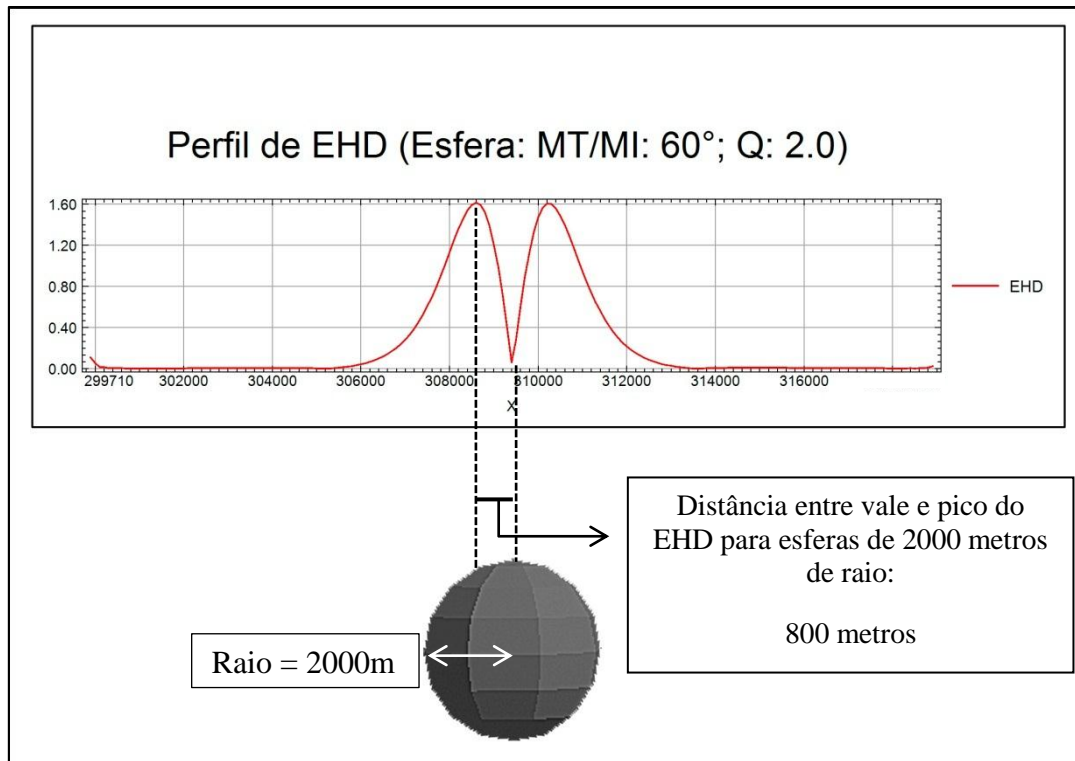


Figura 3.7 Relação entre os limites de uma esfera de 2000 metros de raio e os pontos de máximo e mínimo do *EHD*.

A aplicação do *EHD* permitiu uma boa recuperação dos limites dos corpos, mostrando ter uma fraca dependência da direção do campo magnético. Em cenários em que foi inserido ruídos de altas frequências (Fig 3.8-A), também apresentou bons resultados (Fig. 3.8-B). Neste caso foi atribuído ruído gaussiano por convolução do *grid* de campo magnético total com média 2.00 e desvio padrão de 5.00.

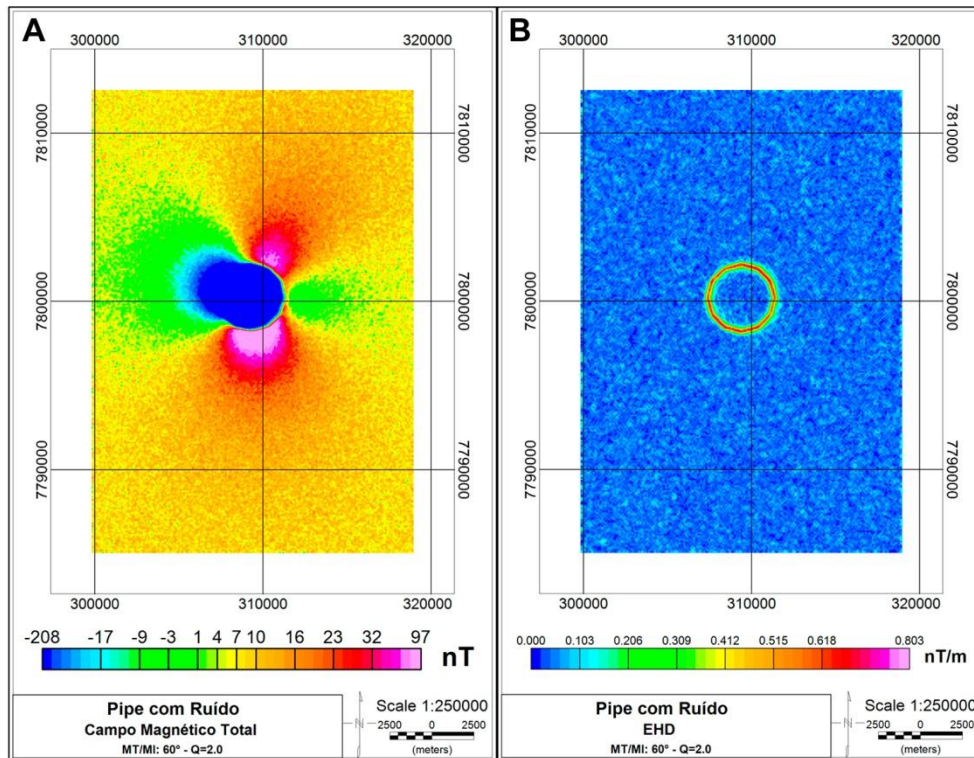


Figura 3.8 (A) Campo magnético total de um Pipe com  $60^\circ$  entre  $\vec{M}_T$  e  $\vec{M}_J$ , Razão de Königsberg ( $Q$ ) igual a 2.0 e com ruído de alta frequência; e (B) Resultado da aplicação do *EHD*.

Nos conjuntos de modelos pode-se observar um dos pontos fortes do *EHD* que identifica com boa precisão as bordas de corpos próximos, inclusive se um estiver encrustado no outro e contando com magnetizações diferentes (Fig. 3.9-A).

Nos grupos que apresentavam diferentes direções de magnetização, em especial nos casos de esferas com Razões de Königsberg diferentes, o sinal magnético mais intenso, associados aos corpos “3” dos conjuntos de mesma geometria, com  $\chi = 0.15$ , interfere o suficiente para impedir a identificação do sinal dos corpos de susceptibilidades menores ou iguais a  $\chi = 0.05$ , como o corpo “1” do caso da Fig. 3.9-B.

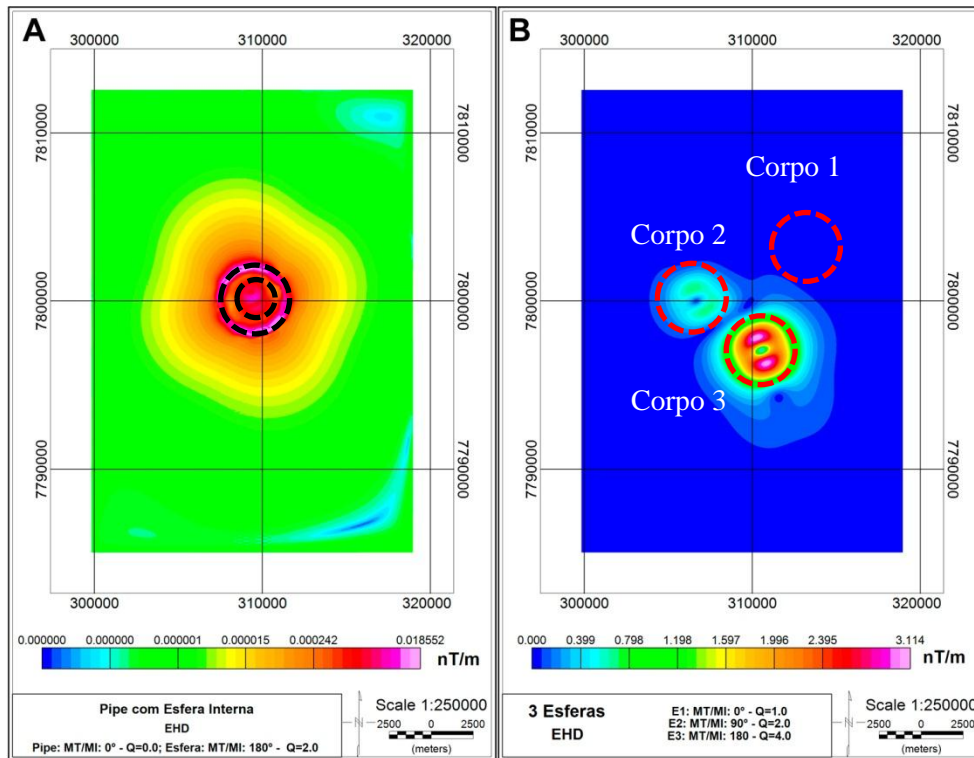


Figura 3.9 Aplicações do *EHD* a conjuntos de corpos: (A) Conjunto de Pipe com Esfera Interna; (B) Conjunto de três esferas com susceptibilidades magnéticas iguais, direções de magnetização e Razões de Koenigsberg diferentes.

## ii. *EHD-Depth*

Com dependência direta da precisão do *EHD*, o *EHD-Depth* permitiu a recuperação das profundidades de topo das bordas dos corpos intrudidos, com uma profundidade média de  $91.25 \pm 29.4$  m para corpos a 100 metros de profundidade, independente da direção ou intensidade de magnetização, e/ou da presença de ruído. Os valores recuperados para cada caso sintético estão disponíveis no Anexo A.

Como descrito na metodologia (Capítulo 02), a imprecisão do *EHD* em determinar a borda de corpos esféricos, apesar de seu comportamento característico (Fig. 3.6-C), diminui drasticamente a eficiência desta técnica em cenários com a presença dessa geometria. Esta resposta, porém, dá suporte para uma utilização segura da Deconvolução de Euler com o conhecimento do índice estrutural ( $\eta$ ) apropriado.

### iii. Deconvolução de Euler

A aplicação da Deconvolução de Euler nos casos de esferas, conhecendo-se o índice estrutural apropriado, levou à recuperação de excelentes resultados: para modelos a 100 m de profundidade, pôde-se obter uma média de  $99.20 \pm 16.8$  m, incluindo casos de múltiplos corpos com direções de magnetizações diferentes (Tabelas A.4 e A.10). Esta técnica estima a posição aproximada do centro do corpo de forma que, para a estimativa do topo da esfera, deve-se subtrair o raio aproximado obtido pelo *EHD* (Fig. 3.10).

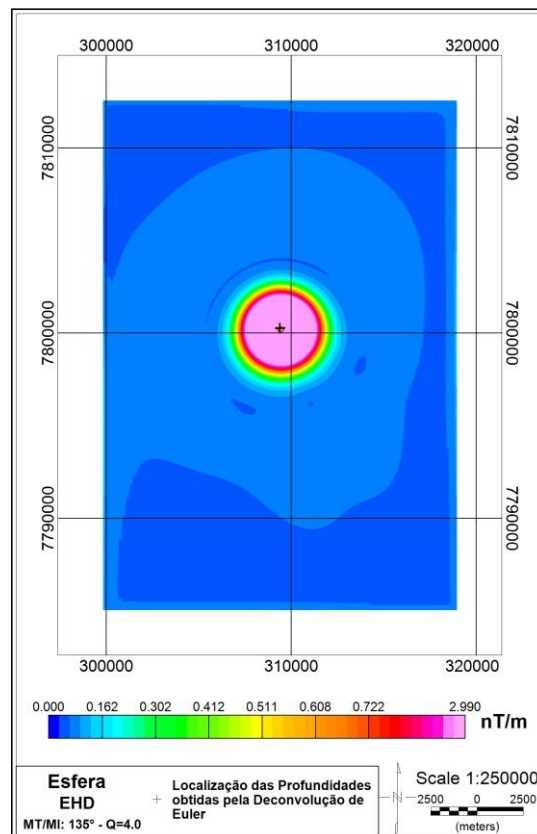


Figura 3.10 *EHD* de uma esfera a 100 metros de profundidade, com  $135^\circ$  entre  $\vec{M}_T$  e  $\vec{M}_I$ , Razão de Königsberg ( $Q$ ) igual a 4.0 e a localização dos pontos correspondentes ao centro do corpo avaliados pela Deconvolução de Euler. Com limites (cores correspondentes ao valor máximo da barra de cores) a cerca de 2000 metros, a profundidade do topo da esfera foi identificado a  $97 \pm 10$  metros. A profundidade do centro e raio real da esfera são respectivamente 2100 e 2000 metros

iv. *Redução ao Polo Magnético Iterativa – Método MinMax*

As Reduções ao Polo Magnético (RTP) utilizando método *MinMax* aplicadas aos modelos sintéticos tiveram sucesso em buscar as direções de inclinação e declinação de  $\vec{M}_T$ , especialmente em cenários com um único corpo. Nestes casos as comparações entre os valores originais e recuperados mostraram uma diferença de menos de 10% (Fig. 3.11).

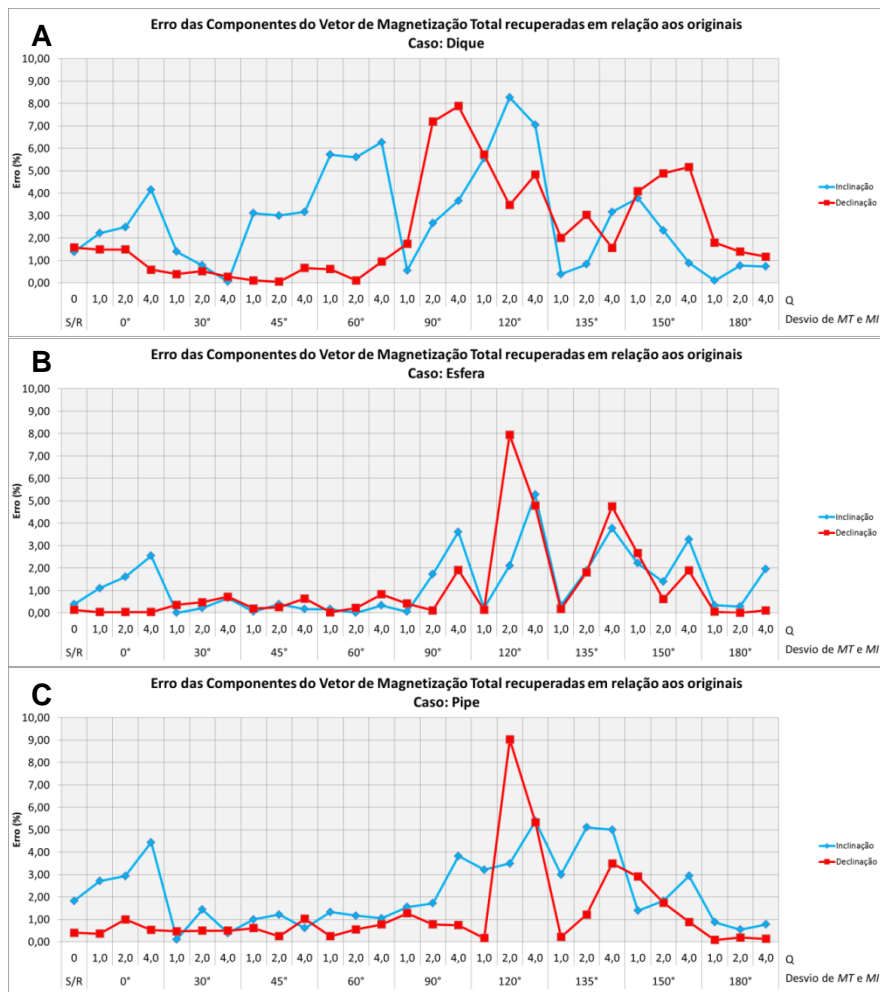


Figura 3.11 Gráficos dos erros de inclinação e declinação recuperados em relação aos originais dos modelos sintético para (A) Diques, (B) Esferas e (C) Pipes.

Os cenários com múltiplos corpos apresentaram comportamentos similares, independentemente da geometria. Quando os corpos apresentavam a mesma direção de magnetização, mesmo que diferente daquela do campo magnético externo, a redução convergia para um valor que satisfizes a todos os corpos. No entanto quando as direções



de magnetização total eram diferentes entre si, o RTP tendeu a indicar as direções de inclinação e declinação totais da fonte de maior intensidade, seja por apresentarem maior susceptibilidade magnética e/ou remanência mais intensa (Fig. 3.12).

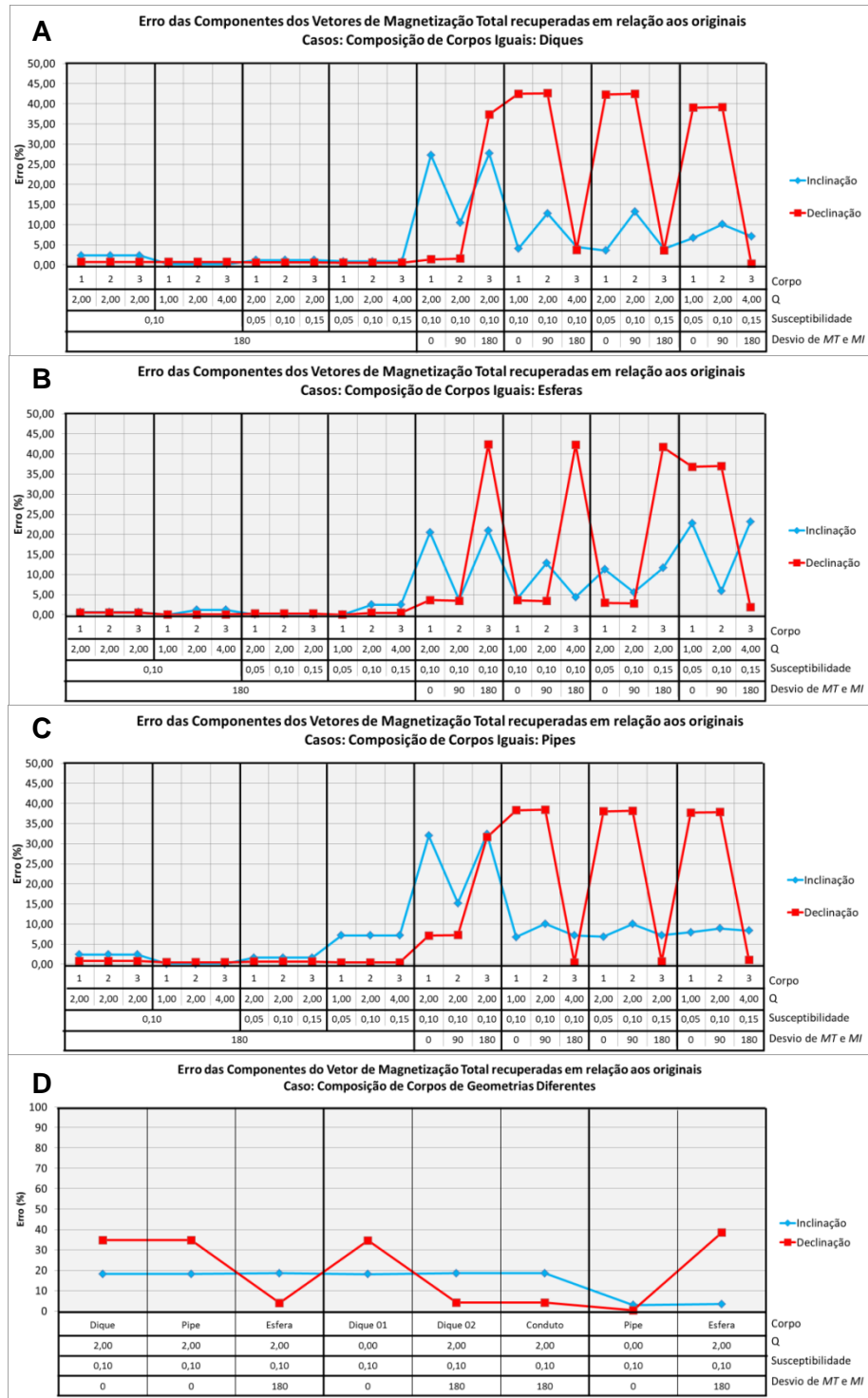


Figura 3.12 Gráficos dos erros de inclinação e declinação recuperados em relação aos originais dos modelos sintético para (A) Composições de 3 Diques, (B) Composições de 3 Esferas, (C) Composições de 3 Pipes e (D) Composições de Corpos de Geometrias Diferentes.

## v. Modelagem Inicial

Uma vez conhecidas as informações de limites laterais, profundidade e características direcionais dos vetores de magnetização induzida e total de cada caso, foi possível construir cenários próximos o suficiente dos originais, tais que seus sinais magnéticos se aproximassem (Fig. 3.13).

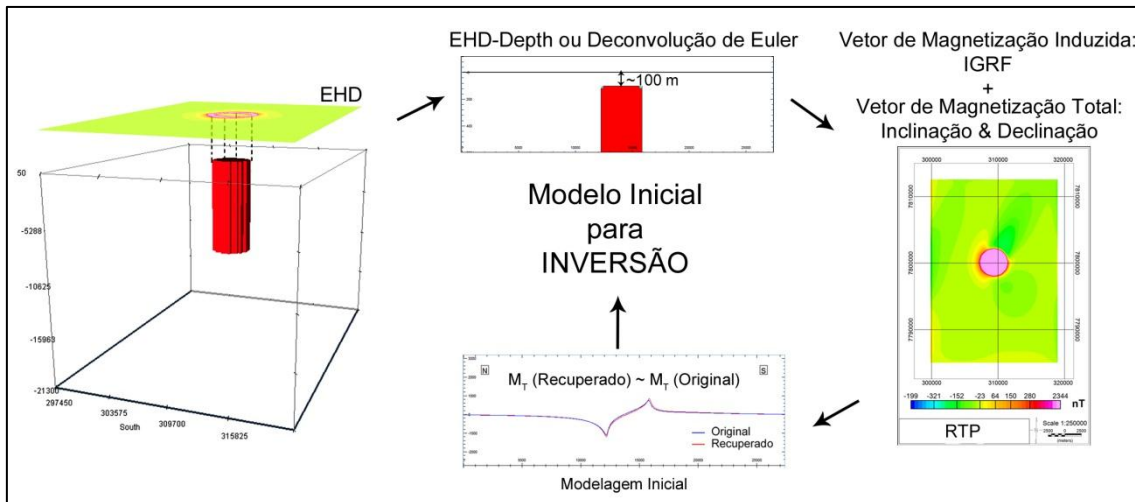


Figura 3.13 Sequência esquemática das informações adquiridas sobre os limites do alvo e as características dos vetores de magnetização, até o estágio de composição do modelo inicial para a inversão magnética.

Nesta etapa é necessária a inferência de um valor de susceptibilidade magnética inicial, a qual pode ser avaliada por meio de trabalhos geofísicos e/ou geológicos sobre o alvo ou até regionais. Para os modelos sintéticos, foram considerados para todos os casos  $\chi = 0.1 \text{ SI}$ .

Os erros relativos às inclinações, declinações e intensidades recuperadas foram menores que 10% nos casos de geometria simples e nos de múltiplos corpos de mesma geometria. Para os casos de geometrias diferentes, as intensidades recuperadas tiveram um desvio mais significativo, porém relacionáveis com os valores dos erros de inclinação e declinação destes conjuntos (Fig. 3.14).

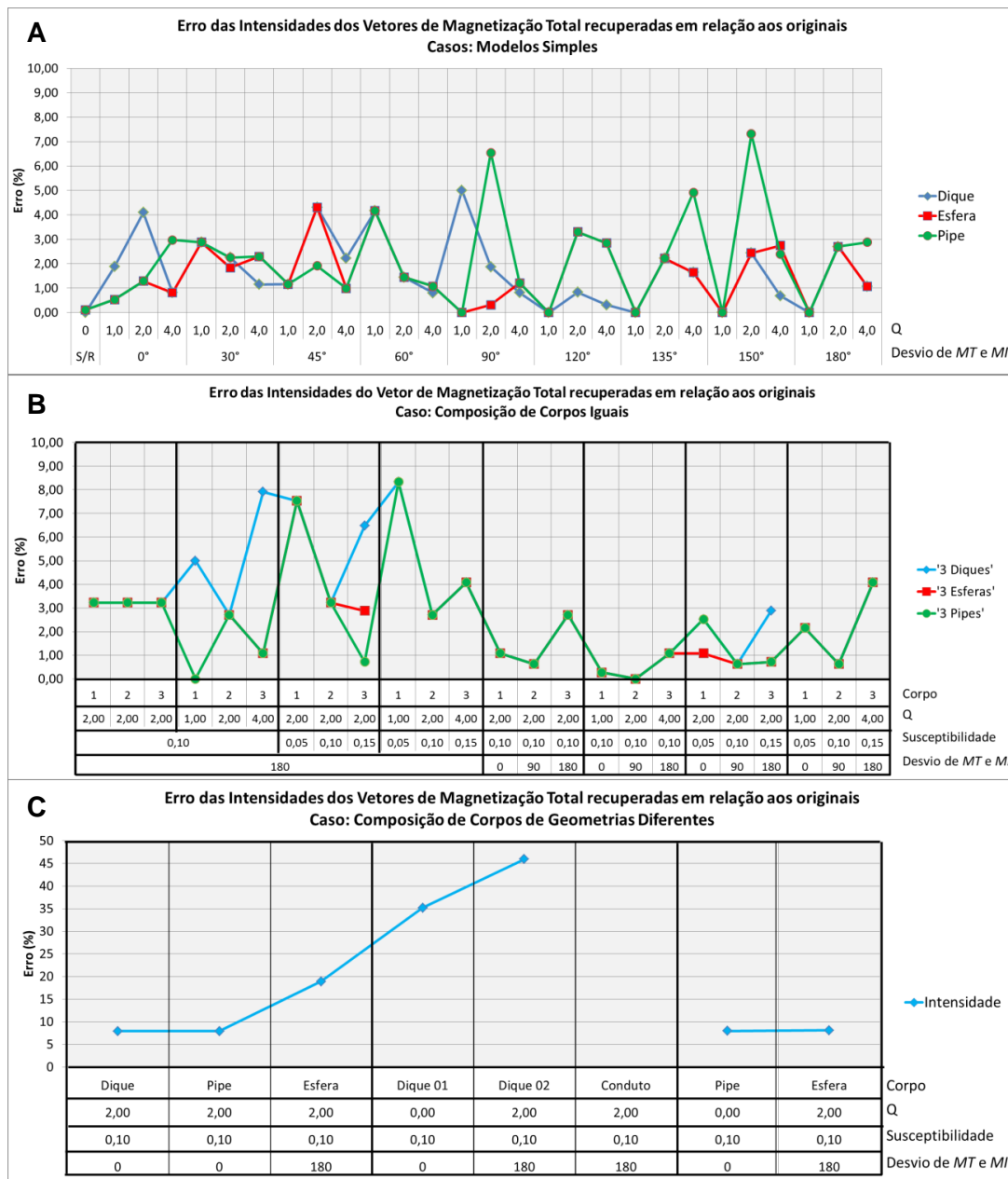


Figura 3.14 Gráficos dos erros de intensidade recuperados em relação aos modelos sintéticos originais para (A) Modelos Simples, (B) Composições de Corpos Iguais e (C) Composições com Corpos de Geometrias Diferentes.

Como reportado na seção do *EHD*, não foi possível determinar as direções e mergulhos dos modelos de diques, os quais, desta forma, tiveram suas primeiras modelagens na forma de pipes.

#### vi. *Inversões dos Dados Magnéticos*

As inversões dos modelos sintéticos se deram a partir dos dados discretizados dos *grids* de campo magnético total, com 2200 valores a serem invertidos numa malha de 24500 m (E-W) x 34300 m (N-S) x 21350 m (Z), com células cúbicas de 350 m.

Foram realizadas inversões com e sem a presença de modelos iniciais, para avaliar a eficiência da utilização dos mesmos. Todos os parâmetros (função peso da profundidade, limites máximo e mínimo de susceptibilidade magnética, coeficientes  $\alpha$  relativos à importância da função objetivo em cada direção e modo de compressão do arquivo) foram mantidos os mesmos para ambos os casos.

As inversões dos modelos sintéticos que utilizaram modelos iniciais apresentaram um tempo de processamento menor (Fig. 3.15), assim como um aumento na qualidade do modelo: mais compacto e com susceptibilidades médias mais próximas das do corpo original. No gráfico, quanto mais alto o pico, mais rápida foi a inversão com modelo inicial em relação àquela sem modelo.

As inversões dos cenários de múltiplos corpos, assim como alguns casos de pipes, apresentaram um tempo de inversão menor para aquelas que não utilizaram modelos iniciais. No entanto, nestes casos as inversões não convergiram para um corpo que justificasse o sinal magnético, considerando o algoritmo utilizado (Fig. 3.16).

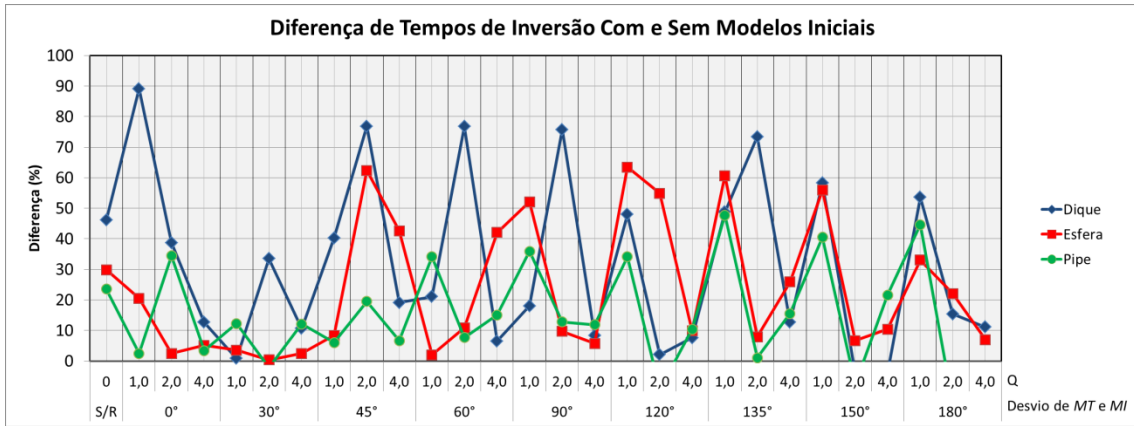


Figura 3.15 Gráfico da diferença dos tempos de inversão com e sem modelos iniciais para Diques (azul), Esferas (vermelho) e Pipes (verde).

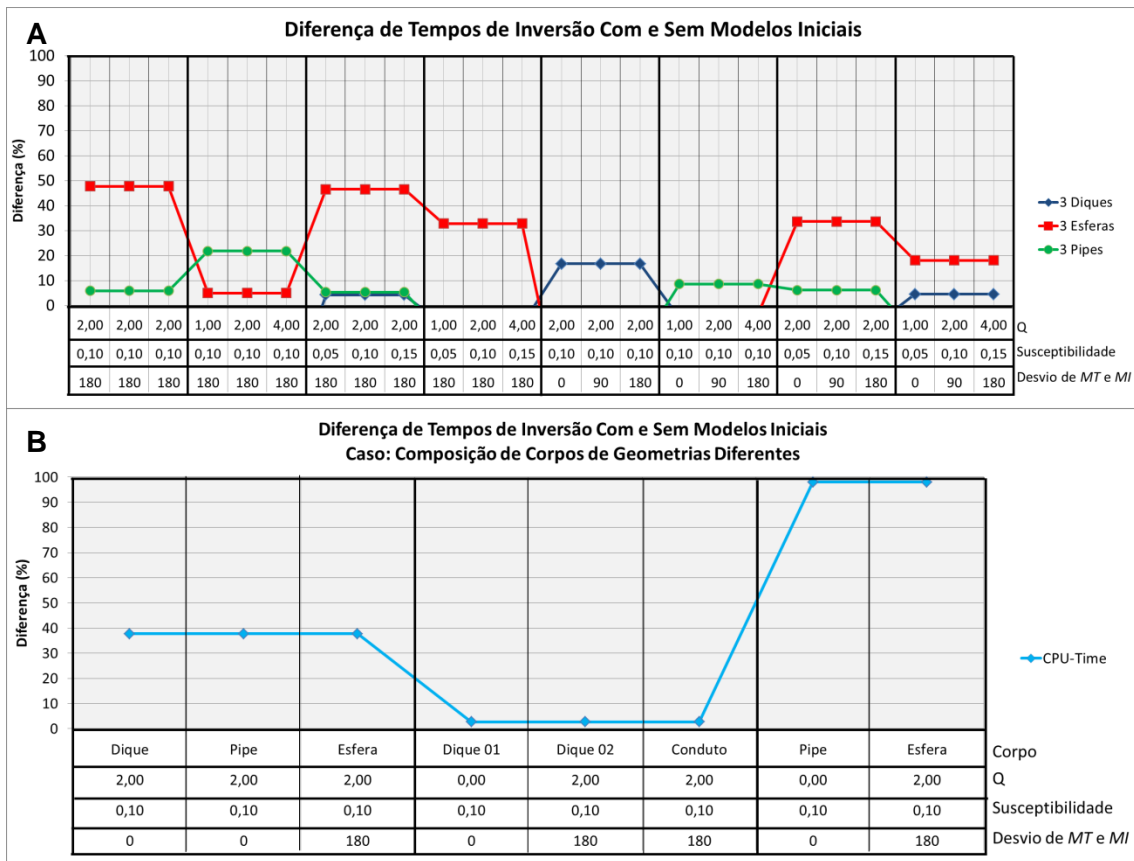


Figura 3.16 Gráfico da diferença dos tempos de inversão com e sem modelos iniciais para grupos de (A) 3 Diques (azul), 3 Esferas (vermelho) e 3 Pipes (verde) iguais; e (B) Conjuntos de corpos com geometrias diferentes.

Os resultados das inversões com a utilização de modelos iniciais e das direções de inclinação e declinação de  $\vec{M}_T$  obtidas pelo Método *MinMax* tenderam a apresentar menores tempos de inversão, e corpos cujas formas e volumes melhor se aproximavam do corpo inicial (Fig. 3.17). Imagens dos resultados das inversões dos modelos sintéticos estão disponíveis no CD-ROM que acompanha esta dissertação.

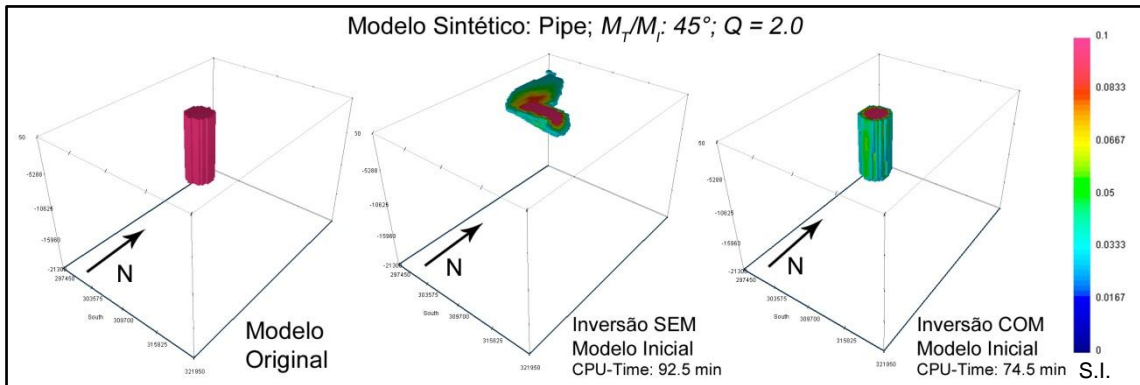


Figura 3.17 Exemplo da comparação de resultados com e sem a utilização do Procedimento de Análise deste trabalho. No caso, um pipe com  $45^\circ$  entre  $\vec{M}_T$  e  $\vec{M}_I$ , Razão de Königsberg ( $Q$ ) igual a 2.0 e suas diferenças de formas, volumes, tempos de inversão (*CPU-Time*) e distribuição de susceptibilidades para um intervalo de susceptibilidades de 0.05 a 0.1 (S.I.).

As inversões com modelos iniciais de Diques, em todos os cenários, recuperaram corpos em forma de *pipes*. Isto se deve à similaridade dos sinais magnéticos de ambos que, ao não ser possível discriminar uns dos outros com a aplicação da técnica do *EHD*, levaram a confecção de modelos iniciais inexatos.

### vii. Modelagem Final

Tendo como base os resultados das inversões, a etapa final do trabalho foi utilizar os corpos recuperados, com suas respectivas características espaciais e

magnéticas para a determinação da remanência com maior precisão. Uma vez que foi utilizada a susceptibilidade inicial correta para os modelos sintéticos, não houve alterações dos resultados neste ponto.

#### **4. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES: CASOS REAIS: *PIAP***

Os resultados obtidos pela aplicação nos 108 modelos sintéticos do procedimento proposto neste trabalho permitiu a verificação de sua eficiência, especialmente para corpos isolados ou em conjuntos de corpos de magnetizações semelhantes.

Os casos reais estão localizados nas Províncias Ígnea do Alto do Paranaíba e Rondoniana-San Ignácio. A primeira abriga a maior parte dos alvos reais deste trabalho: Pratinha I, Tapira, Araxá, Serra Negra, Salitres I, II e III, e Catalão I. Já a segunda contém a anomalia de Morro do Leme.

##### ***Província Ígnea do Alto do Paranaíba (PIAP)***

Segundo Gibson et al.(1995) e Brod et al. (2004), o intervalo entre o Eocretáceo e o Eoceno foi marcado por uma intensa atividade magmática na porção centro-sul do Brasil e oriental do Paraguai, que deu origem aos basaltos da Formação Serra Geral da Bacia do Paraná e a diversas províncias ígneas ao longo de suas bordas (Fig. 4.1)



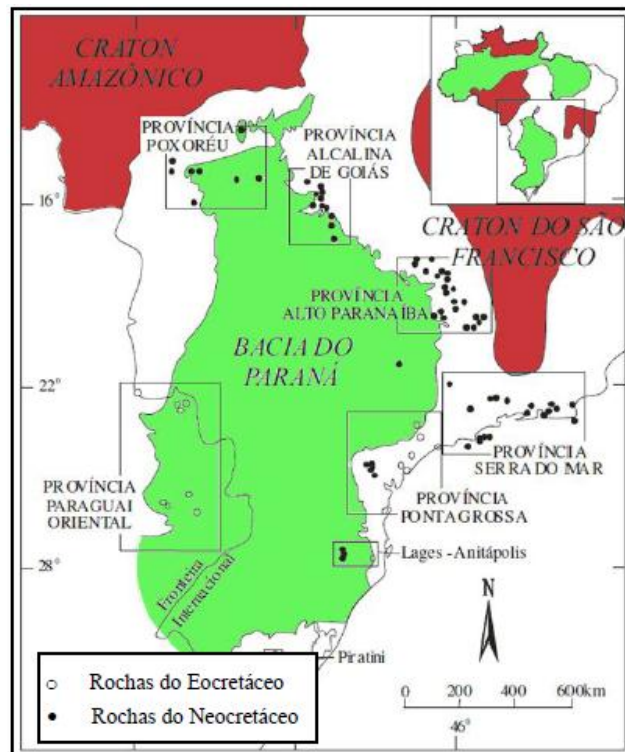


Figura 4.1 Localização das províncias magmáticas do centro-sul brasileiro e Paraguai oriental (modificado de Gibson *et al.*, 1995 e Brod *et al.*, 2004).

Na porção oeste de Minas Gerais e sul de Goiás se encontra o Arco do Alto do Paranaíba, com estrutura NW-SE e soerguimento datado do Eocretáceo com intensificação no Neocretáceo. Campos e Dardenne (1997 *apud* BROD *et al.*, 2004) afirmam que esse arco teve papel decisivo na evolução independente das bacias do Paraná e do São Francisco.

A Província Ígnea do Alto do Paranaíba (PIAP - Fig. 4.2) é caracterizada por suítes máficas/ultramáficas e potássicas/ultrapotássicas com destaques para complexos alcalinos e kamafugíticos, kimberlitos e peridotitos, além de ocasionais rochas foscoríticas, glimeríticas, melitíticas e basaltico-ankaratríticas, todos dispostos em diques pipes, plugs, diatremas, derramamentos, complexos plutônicos e piroclásticos (GOMES e COMIN-CHIARAMONTI, 2005; BROD *et al.*, 2004; GIBSON *et al.*, 1995).

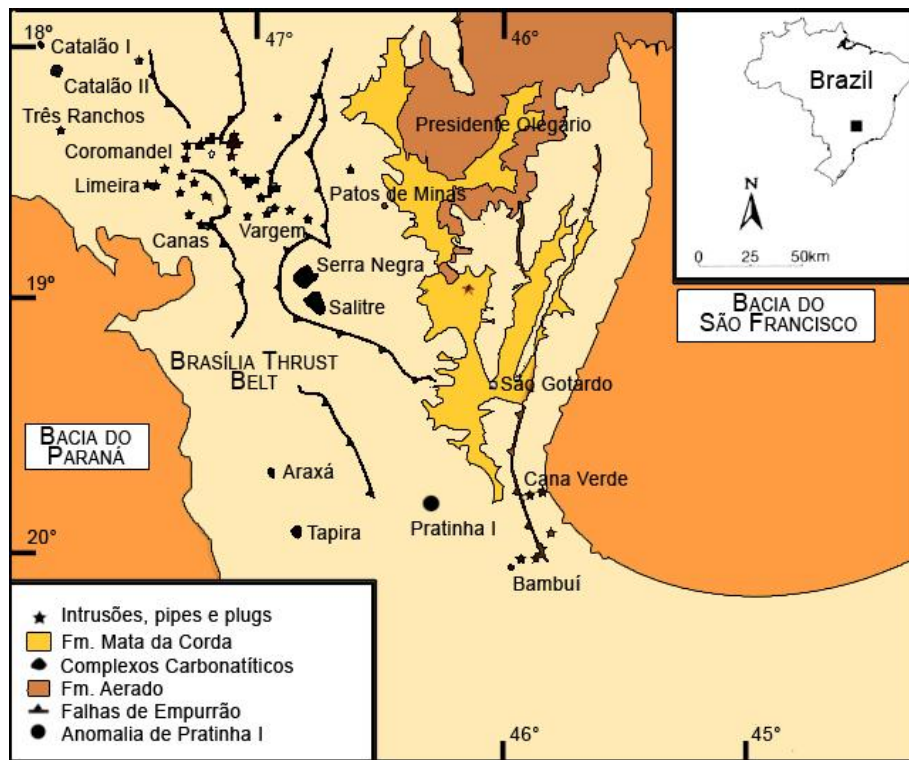


Figura 4.2 Eventos geológicos da PIAP (Adaptado de Gibson *et al.*, 1995).

A PIAP vem, desde o século XVIII, sendo palco de expressiva exploração mineral, haja vista o complexo alcalino de Araxá que produz, segundo a CODEMIG (Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais), 75% do nióbio do mundo. Barbosa *et al.* (1970 *apud* BROD *et al.*, 2004) estabelece a importância econômica da extração de fosfatos e nióbio em complexos alcalinos, além de outros minerais como ouro, cobre e diamantes em menores proporções.

## 4.1. ANOMALIA MAGNÉTICA DE PRATINHA I

A anomalia de Pratinha I (LOURO e MANTOVANI, 2012) tem seu ponto central localizado sobre a cidade de mesmo nome, a cerca de 100 km a leste do domo de Tapira. Seu sinal magnético se alonga por mais de 50 km em seu maior eixo (N-S), com sua amplitude variando de -691 a 292 nT (Fig. 4.1.1). A anomalia magnética de Pratinha I foi isolada com sucesso com a aplicação de um filtro de superfície polinomial de primeira ordem.

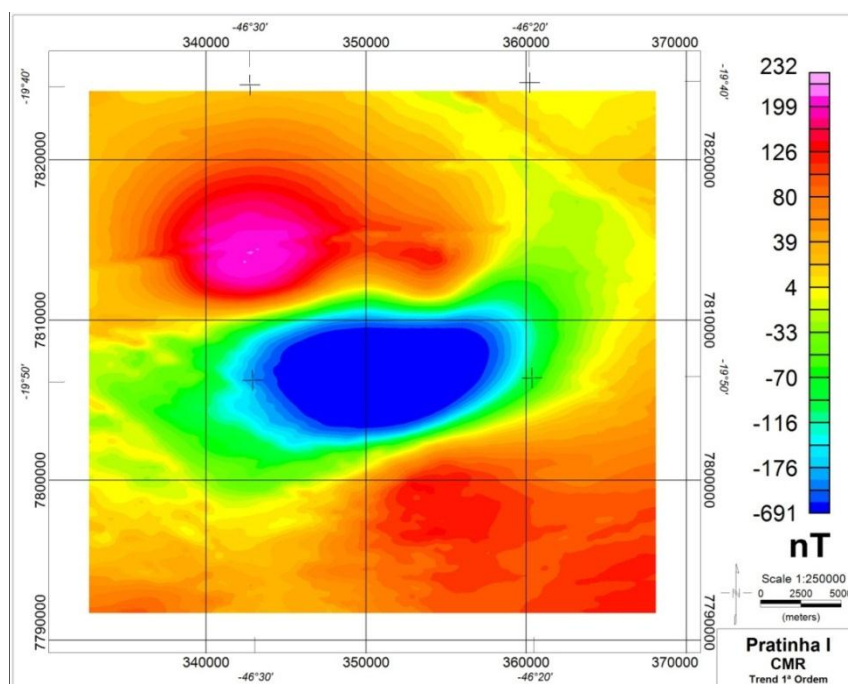


Figura 4.1.1 Campo Magnético Residual (CMR) de Pratinha I.

Esta anomalia não apresenta sinais de afloramento e, além da análise magnética e gravimétrica de Louro e Mantovani (2012), não constam em literatura acessível outros trabalhos que contenham informações geológicas sobre este alvo.

Pratinha I está localizada no Grupo Canastra, por sua vez caracterizado por “uma sequência psamo-pelítica de filitos muscovíticos e quartzitos, com predominância de quartzitos para o topo” (SIMÕES E NAVARRO, 1996). Louro e Mantovani (2012) ainda afirmam que, na região sobre a anomalia magnética, o grupo metassedimentar apresenta uma presença de grafitas-micaxistosas com veios quartizíticos, porém sem indícios de alterações geológicas ou retrabalhamentos topográficos relacionados ao possível corpo-fonte. Isto pode indicar uma intrusão profunda ou que tenha sofrido retrabalhamento após sua instalação na crosta.

Abaixo são apresentados os resultados obtidos pelo processamento dessa anomalia.

*i. EHD*

O *EHD* de Pratinha I revelou uma estrutura fortemente limitada pelas zonas de cisalhamento da Bocaina, a norte, e de Limeira I a oeste-sudoeste (Fig. 4.1.2). É possível notar que a região é consideravelmente afetada pela tectônica, com diversas zonas de cisalhamento e fraturamentos com mesmas direções. Sobre o contorno da anomalia, é possível avaliar um comportamento mais vertical em sua porção sul, enquanto ao norte o *EHD* indica um aprofundamento mais gradual da fonte.

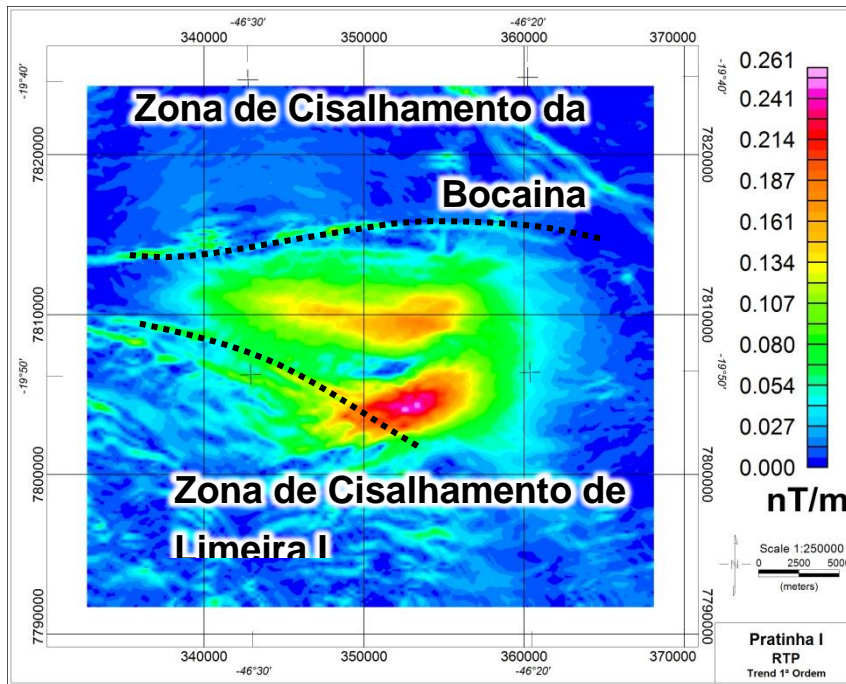


Figura 4.1.2 *EHD* de Pratinha I com as zonas de cisalhamento da Bocaina (ao norte) e de Limeira I (a sudoeste) tracejadas.

ii. *EHD-Depth e Deconvolução de Euler*

A partir do comportamento do *EHD* de Pratinha I, é possível tratar seu formato como vertical em profundidade, dado o seu controle tectônico, e mais arredondado em suas porções superiores e centrais. Desse modo, optou-se por aplicar ambas as técnicas de estimativa de profundidades, o *EHD-Depth* (Fig. 4.1.3) e a Deconvolução de Euler utilizando o índice estrutural 2.

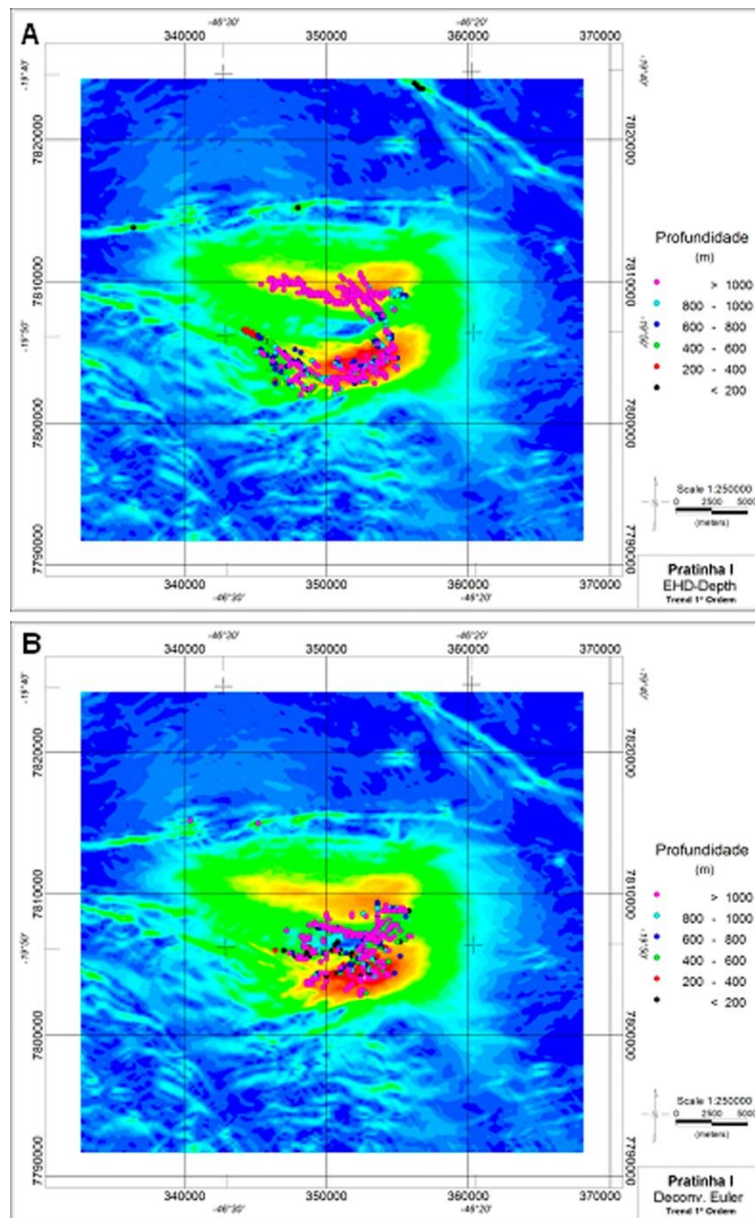


Figura 4.1.3 Estimativas de profundidades com (A) *EHD-Depth* e (B) Deconvolução de Euler sobre o mapa de *EHD* de Pratinha I.

O *EHD-Depth* recuperou profundidades para as bordas e alguns contrastes de profundidades mais centrais, estando as primeiras a uma média de 1000 metros (da superfície à borda da intrusão) e as demais a cerca de 400 metros de profundidade (da superfície ao topo).



A Deconvolução de Euler localizou pontos mais ao centro da fonte (próximos ao provável topo) a cerca de 200 metros de profundidade, com aumento de valores próximo às bordas do corpo, onde são estimadas, como no *EHD-Depth*, a mais de 1000 metros.

iii. *Redução ao Polo Magnético Iterativa – Método MinMax*

O RTP de Pratinha I reduziu o sinal de sua fonte a localizando dentro dos limites impostos pelas zonas de cisalhamento adjacentes (Fig. 4.1.4). No entanto, a redução mostrou ter sido afetada pelo sinal das próprias zonas de cisalhamento, especialmente a da Bocaina ao norte, com duas regiões de valores negativos sobre a extensão da mesma (Fig. 4.1.4). O Método *MinMax*, ainda revelou as direções de inclinação  $30.4^\circ$  e declinação  $-40.9^\circ$  do vetor de magnetização total.

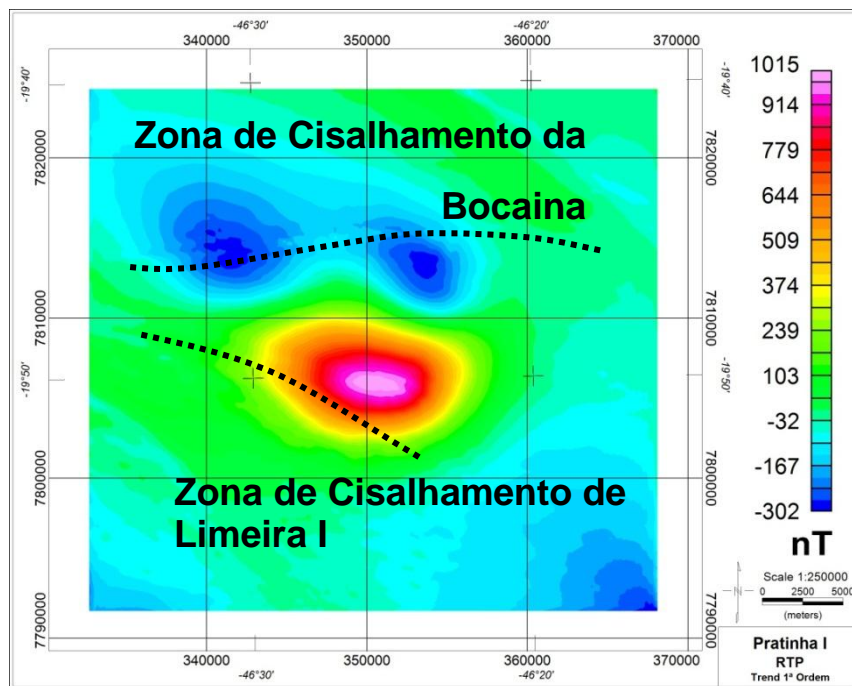


Figura 4.1.4 Redução ao Polo Magnético de Pratinha I.

iv. *Modelagem Inicial*

O modelo inicial construído para Pratinha I está disposto na Fig. 4.1.5. Esta anomalia é um caso de fonte de sinal magnético não aflorante e sem dados geológicos e/ou geoquímicos com os quais se pudessem traçar paralelos e vincular o modelo. Por isso, o procedimento adotado para inferência da susceptibilidade magnética foi analisar os aspectos regionais de geologia e tectônica.

Para a construção do modelo, foi utilizada uma malha tridimensional com células cúbicas de 400 metros de lado. Seu limite superior respeita a altitude máxima da região da anomalia (1296 metros), localizando-se a 1400 metros de altitude, e se estende em profundidade até 32600 metros abaixo da superfície. Os limites horizontais da malha são coincidentes com os dos *grids* da anomalia de Pratinha I.

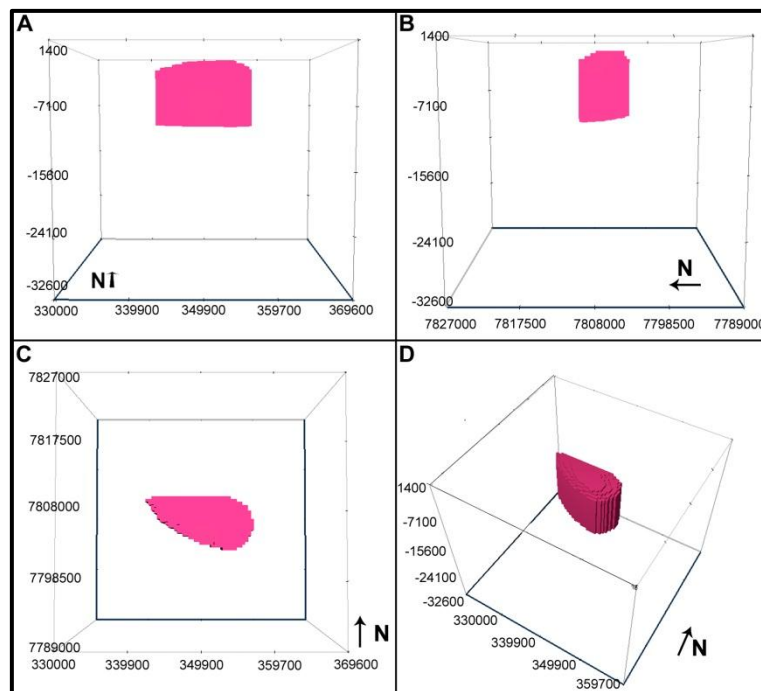


Figura 4.1.5 Modelo inicial construído para Pratinha I nas vistas (A) sul, (B) oeste, (C) topo e (D) perspectiva.



Pratinha I está inserida na Província Ígnea do Alto do Paranaíba (PIAP), a qual abriga em sua maioria intrusões ígneas de caráter alcalino, com predominância de piroxenitos e peridotitos, como é possível observar em suas intrusões de maiores escalas: Tapira, Araxá, Serra Negra e Catalão (BROD *et al.*, 2004). Segundo Telford *et al.* (1990), estes tipos litológicos podem apresentar uma variação de susceptibilidades magnéticas de 0.09 a 0.2 (S.I.).

Dentre piroxenitos e peridotitos, os primeiros tem uma recorrência maior nas intrusões citadas e, por isso, foi inferida ao modelo sintético de Pratinha I a susceptibilidade média de 0.125 (S.I; TELFORD *et al.*, 1990).

Complementando o modelo, a rocha encaixante foi considerada como metassedimentar, à qual são atribuídas susceptibilidades muito baixas, da ordem de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  S.I. (TELFORD *et al.*, 1990).

#### v. *Inversões dos dados Magnéticos*

A inversão sem a utilização de modelo inicial recuperou um corpo alongado na direção E-W e com mergulho para norte, onde ocorre um espalhamento de altas susceptibilidades incoerente com os resultados dos *EHD*. O contraste de susceptibilidade magnética se manteve em cerca de 0,13 (S.I; Fig. 4.1.6). Sua profundidade de topo foi de 1600 metros, diferentemente dos 400 m obtidos pela Deconvolução de Euler e pelo *EHD-Depth*.

A inversão utilizando o modelo inicial (Fig. 4.1.5) recuperou um modelo de contraste sem o espalhamento de altas susceptibilidades para as bordas da malha. Apresentou um mergulho de alto grau sentido sul, similar àqueles observados nos casos

de diques sintéticos, o qual seria imperceptível para o processamento com o *EHD*. O contraste de susceptibilidade que definiu o corpo ficou em cerca de 0.08 (S.I.), mantendo seu topo entre 400 e 800 metros, considerando-se células cúbicas de 400 metros de lado (Fig. 4.1.7).

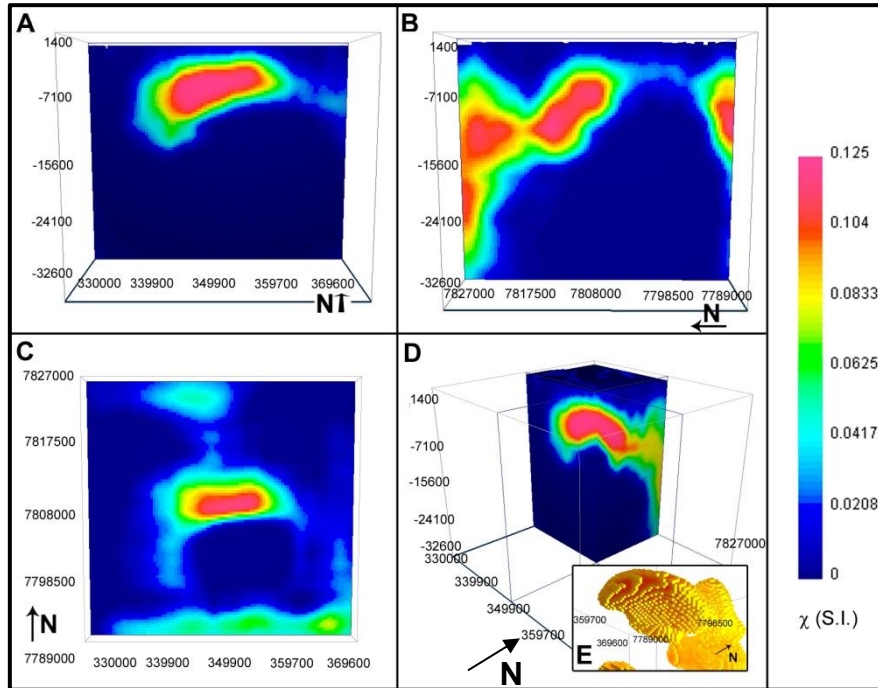


Figura 4.1.6 Resultado da inversão magnética de Pratinha I sem o uso de Modelo Inicial nas vistas (A) sul (com o sinal para o norte em perspectiva), (B) oeste, (C) topo com corte a 1000 m de profundidade, (D) perspectiva com cortes N-S e E-W e, em detalhe, (E) perspectiva com contraste de susceptibilidades entre 0.13 e 0.15 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação  $-29.7^\circ$ ; declinação  $-20.6^\circ$ ; intensidade 23270 nT; projeção do campo magnético: inclinação:  $-29.7^\circ$ ; declinação  $-20.6^\circ$ .

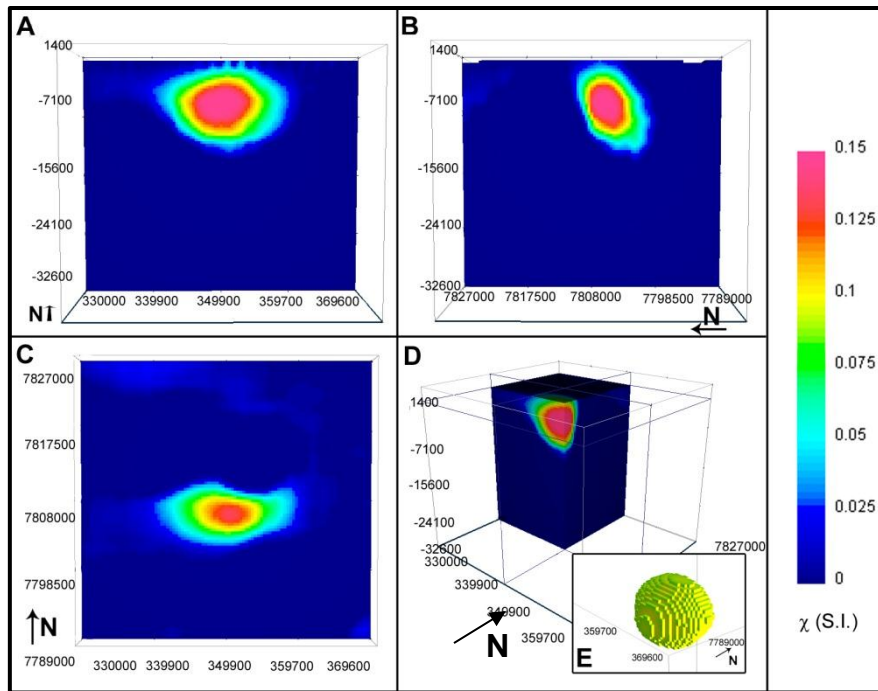


Figura 4.1.7 Resultado da inversão magnética de Pratinha I com o uso de Modelo Inicial nas vistas (A) sul, (B) oeste, (C) topo com corte a 1000 m de profundidade, (D) perspectiva com cortes N-S e E-W e, em detalhe, (E) perspectiva com contraste de susceptibilidades entre 0.08 e 0.15 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação  $-29.7^\circ$ ; declinação  $-20.6^\circ$ ; intensidade 23270 nT; projeção do campo magnético: inclinação:  $30.4^\circ$ ; declinação  $-40.9^\circ$ .

Entre os tempos de inversão com e sem o uso de modelo inicial, houve uma queda de 74.89% e o volume do corpo neste caso, com susceptibilidades entre 0.08 e 0.15 (S.I.), foi de aproximadamente  $440 \text{ km}^3$ .

#### vi. Modelagem Final

A partir da malha de contraste de susceptibilidade recuperada com a inversão e a associação de valor zero para a susceptibilidade da rocha encaixante de Pratinha I, tem-se um modelo matemático de um corpo conforme visto na Fig. 4.1.7.

Quando as direções do vetor de magnetização total foram atribuídas a cada célula deste corpo notou-se que, mesmo variando a intensidade da magnetização total em um grande espaço amostral, o sinal do corpo recuperado não se ajusta ao sinal

original (Fig. 4.1.8-A). Este problema advém da etapa de redução ao pólo que não obteve sucesso em seu procedimento devido a influencia das zonas de cisalhamento.

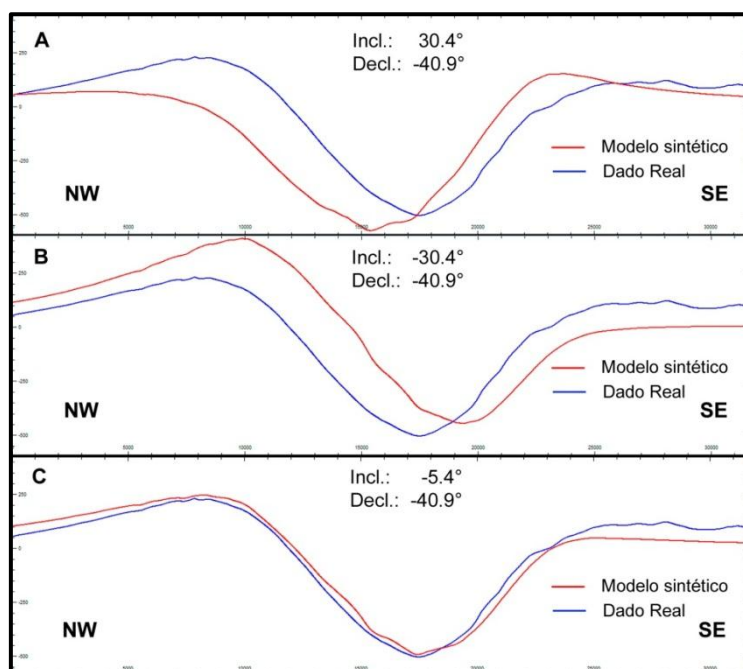


Figura 4.1.8 Comparação entre os perfis (NW)-(SE) magnéticos de campo magnético residual de Pratinha I (azul) e calculado a partir do modelo invertido (vermelho) com os pares inclinação/declinação: (A) 30.00°, -40.90°; (B) -30.00°, -40.90°; e (C) -5.00°, -40.90°.

A comparação de perfis magnéticos, entretanto, permitiu observar que, apesar de diferentes em uma forma geral, os sinais apresentam no ponto de maior diferença uma característica de polaridade invertida (Fig. 4.1.8-A). Esse comportamento permitiu inferir que, se alterada a polaridade da inclinação, provavelmente seria possível obter mais sucesso na redução ao polo, o que de fato ocorreu.

Ao inverter a polaridade da inclinação de 30° para -30°, o perfil magnético do modelo sintético se aproximou da forma do perfil real (Fig. 4.1.8-B), comportamento que se aprofundou com a redução da inclinação até atingir o valor de -5° (4.1.8-C). Assim, foi possível reduzir ao polo magnético a anomalia de Pratinha I com o novo par inclinação/declinação (-5.00°, -40.90°; Fig. 4.1.9).

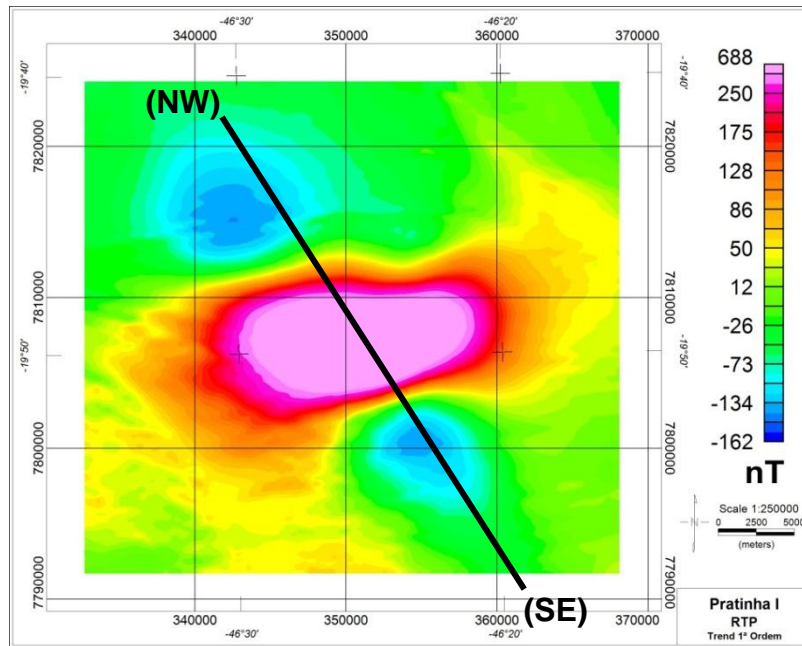


Figura 4.1.9 RTP de Pratinha I utilizando a inclinação e declinação  $-5.00^\circ$  e  $-40.90^\circ$  respectivamente. O perfil A-B apresentado na figura 4.1.8 é localizado ao longo da linha (NW)-(SE).

Conhecendo, agora, valores mais precisos de inclinação e declinação do vetor de magnetização total, foi realizada mais uma vez a inversão dos dados. O modelo recuperado é apresentado na Fig. 4.1.10.

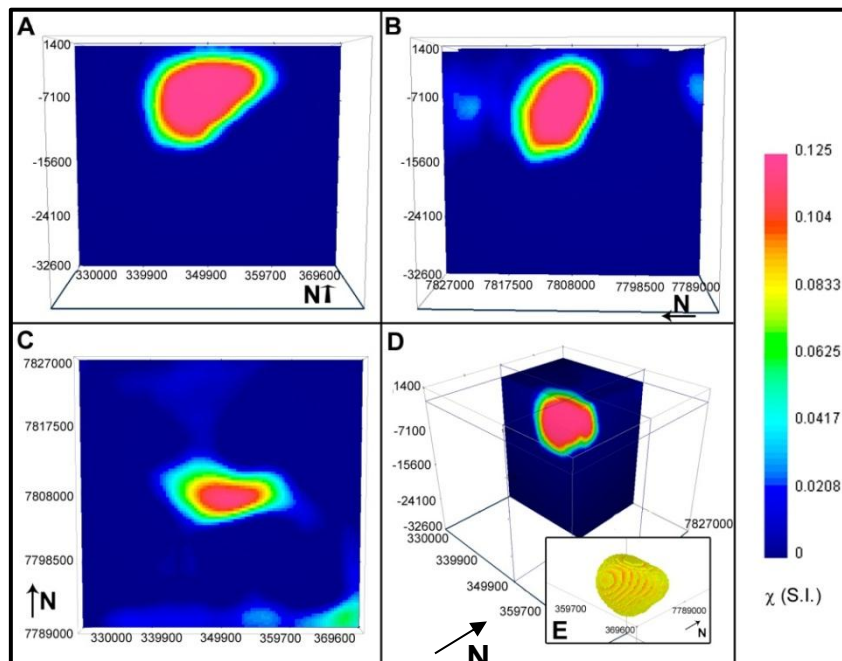


Figura 4.1.10 Resultado da inversão magnética de Pratinha I com o uso de Modelo Inicial com o par inclinação/declinação corrigido, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo com corte a 1000 m de profundidade, (D) perspectiva com cortes N-S e E-W e, em detalhe, (E) perspectiva com contraste de susceptibilidades entre 0.08 e 0.125 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação  $-29.7^\circ$ ; declinação  $-20.6^\circ$ ; intensidade 23270 nT; projeção do campo magnético: inclinação:  $-5.0^\circ$ ; declinação  $-40.9^\circ$ .

Dessa forma, em uma nova modelagem final, foi possível recuperar com sucesso as características magnéticas de Pratinha I com os parâmetros de magnetização apresentados na Tabela 4.1.1. Esta caracterização de Pratinha I indica uma Razão de Königsberg de 0.53, com a intensidade de magnetização induzida aproximadamente duas vezes maior que a remanente.

Tabela 4.1.1 Características dos vetores magnéticos da Anomalia de Pratinha I após a Modelagem Final.

Anomalia de Pratinha I			
Vetor de Magnetização	Inclinação	Declinação	Intensidade
Induzida	-29.71°	-20.44°	203.69
Total	-5°	-40.90°	200.00
Remanente	55.09°	213.45°	107.12

A diferença de volumes entre o apresentado neste trabalho (950 km<sup>3</sup>) e os indicados por Louro e Mantovani (2012; 1440 km<sup>3</sup>) é de 34.1%, e pode ser atribuída à diferença entre extensões verticais de ambos, influenciadas por modelos iniciais de formatos diferentes.

Assim, este cenário, inserido à Província Ígnea do Alto do Paranaíba, pode indicar uma provável intrusão de rocha alcalina, facilitada pelas zonas de cisalhamento a norte e a sudoeste da intrusão, com uma remanência fraca quando comparada ao campo magnético terrestre atual.

## 4.2. COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍCO DE TAPIRA

O domo de Tapira, localizado na porção mais ao sul da PIAP e centrado em (19°50'S; 46°50'W), está instalado num conjunto de três escamas (domínios litológicos) distintas, limitadas por falhas de cavalgamento e empurradas sobre o grupo Bambuí (aflorante a NE do domo; SILVA *et al.*, 2006). Estas três escamas são definidas pelos mesmos autores da seguinte forma (Fig. 4.2.1):

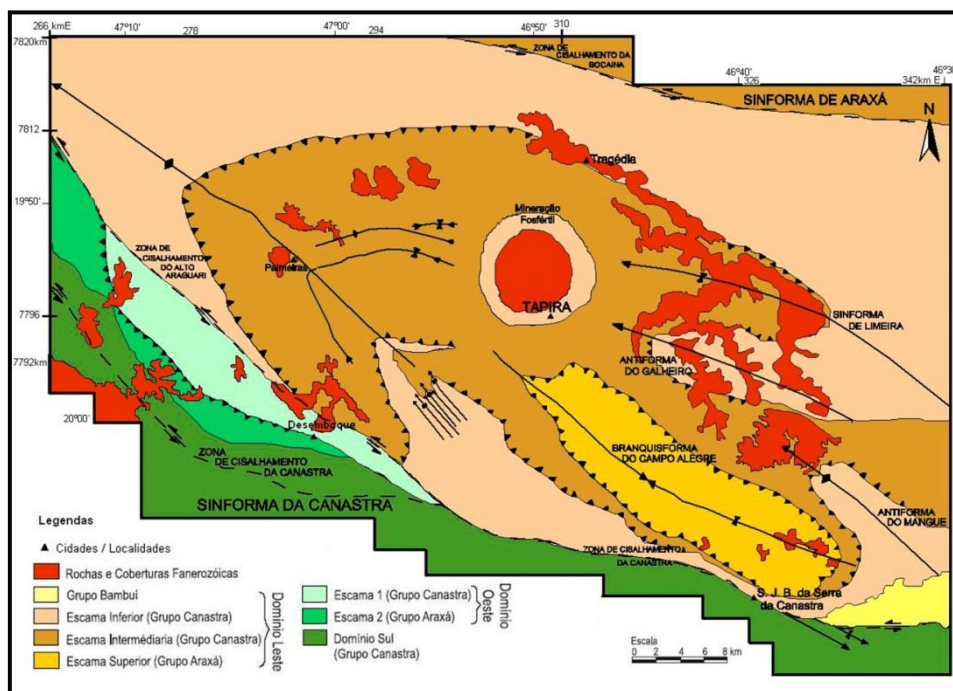


Figura 4.2.1 Mapa geológico simplificado da região de Tapira, Minas Gerais (Modificado de SILVA, 2003).



- Escama Inferior (Grupo Canastra): base de quartzo-muscovita, xistos intercalados por muscovita xistos, que em direção ao topo passam gradativamente a grafita-muscovita xistos.
- Escama Intermediária (Grupo Canastra): base marcada por granada-grafita-muscovita xistos de granulação fina intercalados a xistos grafitosos e granada-biotita-muscovita xistos. No topo dessa escama ocorrem quartzitos com intercalações métricas de quartzo e muscovita xistos e quartzitos micáceos.
- Escama Superior (Grupo Araxá): granada-mica xistos, com camadas métricas de granada-quartzo xistos e rochas meta-ultramáficas.

O Complexo de Tapira cobre uma área de aproximadamente 35 km<sup>2</sup>, e se estende por 7.4 km na direção NE e por 6.0 km na direção NW (Fig. 4.2.2; MARANGONI E MANTOVANI, 2013) e é datado por K/Ar entre 87.2 Ma e 85.6 Ma a partir de micas (SONOKI e GARDA, 1988).

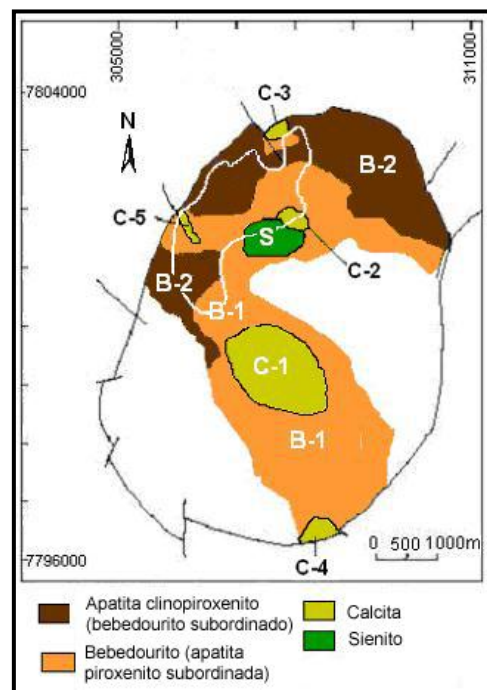


Figura 4.2.2 Geologia do complexo de Tapira (Modificado de BROD, 1999), sendo B-1 – bebedouritos, B-2 – bebedouritos com predominância de apatita piroxenitos, S – sienitos e C-1 a C-5 carbonatitos. A linha branca representa o limite mina no ano de 2004.



Segundo Brod (1999), a intrusão de Tapira deformou sua rocha encaixante (grupo Canastra) causando o desenvolvimento de disjunções colunares em quartzitos, cristalização de piroxenitos sódicos e feldspatos em um halo de alteração restrito. Segundo Tavares *et al.* (2008), o contato entre intrusão e rocha encaixante é vertical e irregular.

Araújo *et al.* (2002) indicam uma composição de cerca de 80% de piroxenito para o complexo, sendo a rocha alcalina formada por intrusões de rochas plutônicas silicáticas e por carbonatitos em menor escala. Segundo Brod *et al.* (2004), as intrusões plutônicas consistem em bebedouritos (clinopiroxenito alcalino com biotita) e clinopiroxenitos, com sienitos, dunitos e wehrlitos (peridotito serpentizado) subordinados. Estas intrusões são identificadas como B1 e B2 na Fig. 4.2.2.

Este complexo ainda tem ocorrências de carbonatitos, indicando uma diferenciação durante a ascensão de seu magma ultrapotássico (BROD *et al.*, 2000), com cristalização destas rochas por imiscibilidade de líquidos em seu fracionamento final (BROD, 1999; BROD *et al.*, 2005).

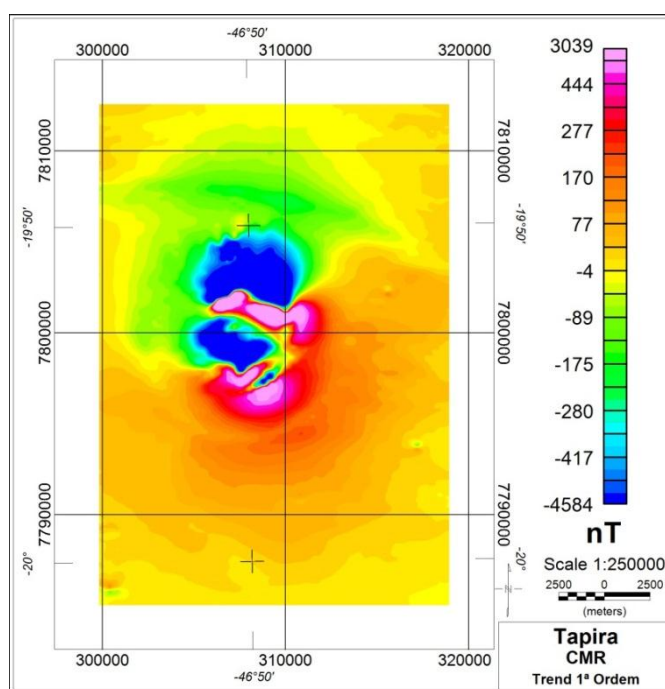


Figura 4.2.3 Campo magnético residual de Tapira.

O campo magnético de Tapira foi separado da componente regional através de um filtro de superfície polinomial de grau 1 (Fig. 4.2.3), assim como o de Pratinha I.

*i. EHD*

O *EHD* de Tapira demarcou especialmente os contornos dos bebedouritos B1 e B2 (linha preta pontilhada na Fig. 4.2.4). Mesmo sem a presença de máximos locais, o contorno elipsoidal do complexo ficou evidente. As estruturas de menores susceptibilidades magnéticas, como carbonatitos não puderam ser claramente identificados, com exceção do carbonatito C-1 que, ainda que sem uma alta precisão, pode ser localizado no centro do domo (linha marrom pontilhada).

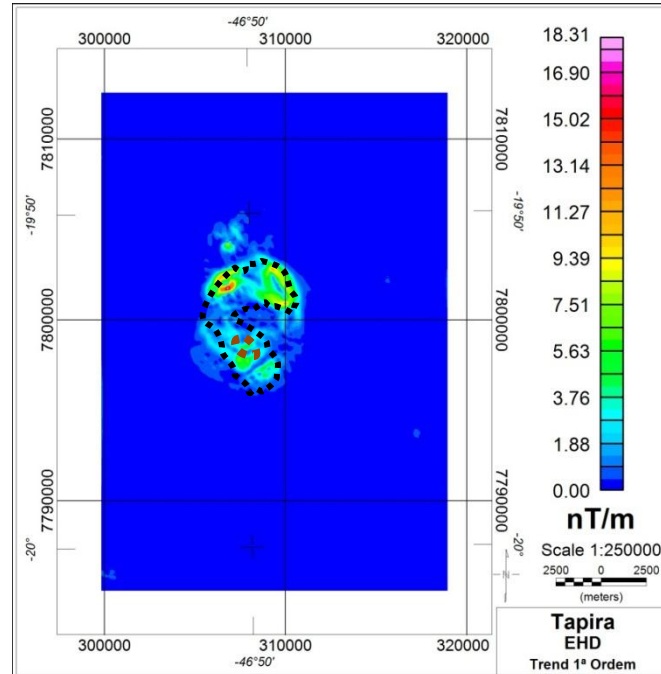


Figura 4.2.4 *EHD* do complexo de Tapira com contornos em pontilhado preto os limites em superfície, de Brod (1999), dos bebedouritos e em marrom do carbonatito C-1.

ii. *EHD-Depth*

Tavares *et al.* (2008) apontam que o contato entre intrusão e rocha encaixante é vertical e irregular através de furos de sondagem. Isto implicou na escolha da técnica de estimativa de profundidade, levando à utilização do *EHD-Depth*. Esta técnica recuperou dois grupos de profundidades que podem ser associadas com as rochas frescas do complexo: um grupo a NE e um a S-SE, com ambos mantendo uma variação de 100 a 300 metros (Fig. 4.2.5). As porções nordeste e sul demonstraram uma tendência a se localizarem em regiões mais rasas que o restante do corpo.

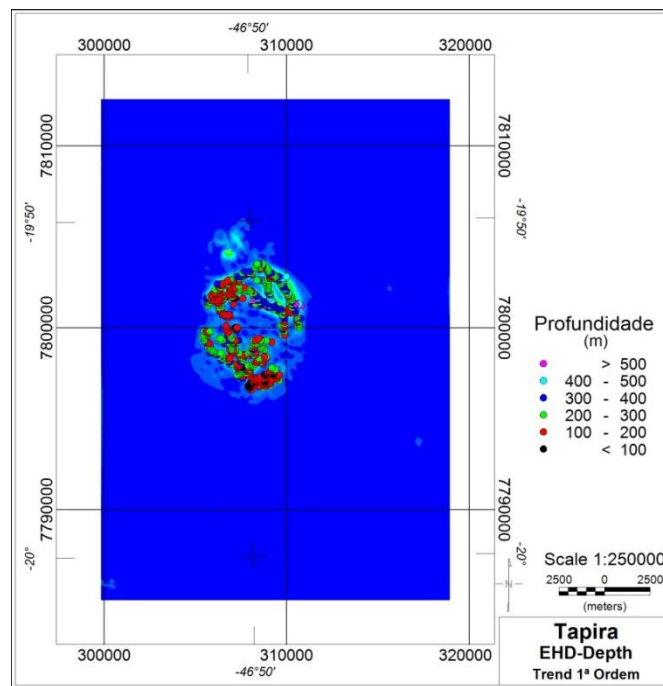


Figura 4.2.5 *EHD-Depth* do complexo de Tapira

Estas profundidades de bordas vão ao encontro daquelas indicadas por Brod (1999) para a localização das rochas não alteradas do complexo, obtidas através de testemunhos de sondagens (Fig. 4.2.6), aumentando a confiabilidade dos resultados do *EHD-Depth*.

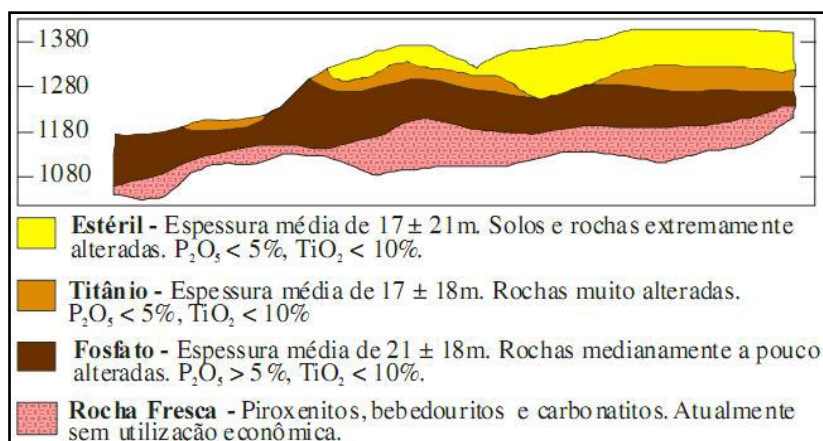


Figura 4.2.6 Perfil geológico da mina de Tapira, com o controle vertical dos tipos de minério observados em relação à topografia. Modificado de Brod et al. (2004).

### iii. Redução ao Polo Magnético Iterativa – Método MinMax

O Complexo de Tapira apresenta uma anomalia magnética complexa, contando com uma anomalia de caráter reverso ao campo magnético atual da região, circunscrevendo uma segunda anomalia menor orientada na direção do campo (Fig.4.2.3). Esta configuração torna difícil a avaliação direta da fonte anômala, tornando o uso do procedimento deste trabalho de alta valia.

A redução ao polo iterativa de Tapira recuperou direções de inclinação e declinação de  $65.90^\circ$  e  $169.50^\circ$  respectivamente para seu vetor de magnetização total. O resultado da redução considerando essas direções está disposto na Fig. 4.2.7.

Ainda que não tenha sido possível identificar com precisão os sinais magnéticos referentes aos carbonatitos com a aplicação do *EHD*, o *RTP* indicou uma porção anômala, assim como no *EHD*, na mesma região onde é encontrado o carbonatito C-1 (linha tracejada marrom na Fig. 4.2.7).

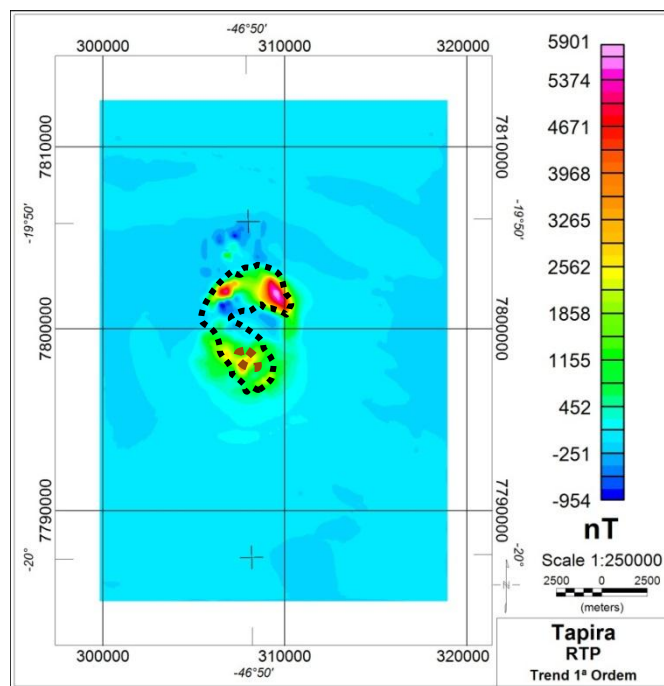


Figura 4.2.7 Mapa do RTP de Tapira com os contornos dos bebedouritos B-1 e B-2 em pontilhado preto e do cabonatito C-1 em pontilhado marrom. A porção negativa inserida no contorno dos bebedouritos pode ser relacionada ao sienito S-1.

#### iv. Modelagem Inicial

Baseado nas informações geológicas, levantadas através de estudos prévios, e dos resultados das técnicas aplicadas sobre os dados magnéticos de Tapira, foi possível compor um cenário inicial para a inversão (Fig. 4.2.8). De acordo com Cordani e Shukowsky (2009) e Ribeiro (2011), a Razão de Königsberg de Tapira é próxima de 2.0, indicando um ponto de início para a busca da intensidade do vetor de magnetização total.

Com base na posição estimada por meio do EHD e do RTP interativo, o carbonatito C-1 foi inserido no modelo sintético do corpo referente ao Bebedourito B-1. O modelo de C-1 foi limitado verticalmente pela profundidade estimada pelo *EHD-Depth* no topo e, na base, a partir de informações de inversões prévias em Ribeiro (2011).

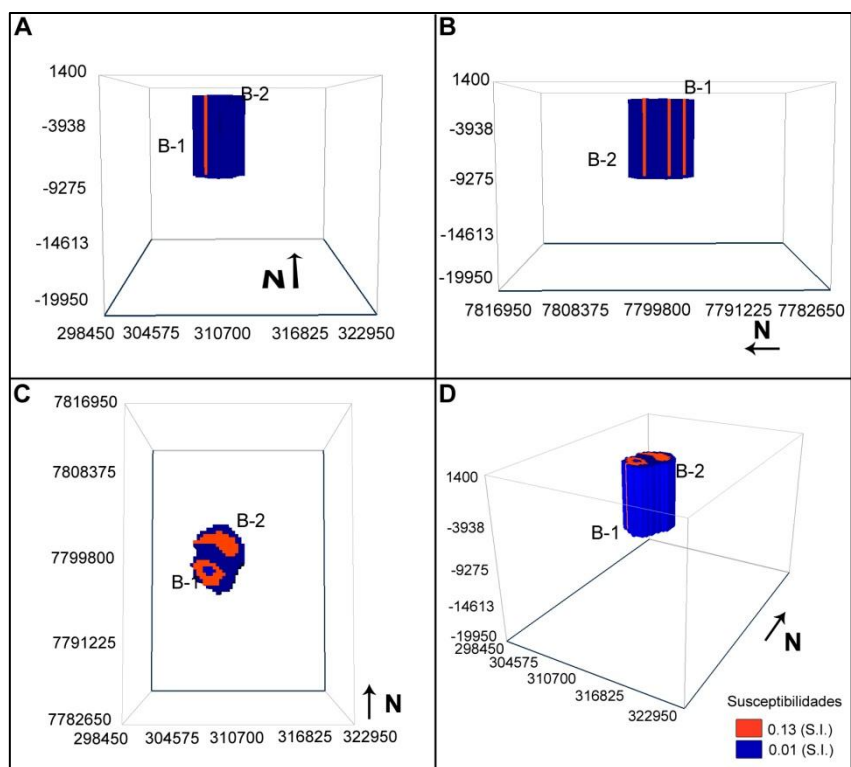


Figura 4.2.8 Cenário sintético inicial proposto para Tapira relacionando os corpos reais com os modelados, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo e (D) perspectiva. A porção em preto interna ao corpo B-2 está associada à presença do carbonatito C1, cuja extensão vertical foi inferida com base em Ribeiro (2011).

Da mesma forma que em Pratinha I, o meio encaixante da intrusão considerado tanto para o modelo inicial quanto para as inversões foi de metassedimentos ( $\chi = 10^{-4}$  a  $10^{-5}$  S.I; TELFORD *et al.*, 1990).

v. *Inversões dos dados magnéticos*

As inversões dos dados de Tapira se mostraram extremamente dependentes da realização de um procedimento que ou buscasse as direções de magnetizações total e/ou remanente ou tivesse pouca dependência destas (como em RIBEIRO, 2011). Esta dependência fica ressaltada no resultado da inversão sem o modelo inicial (Fig. 4.2.9).

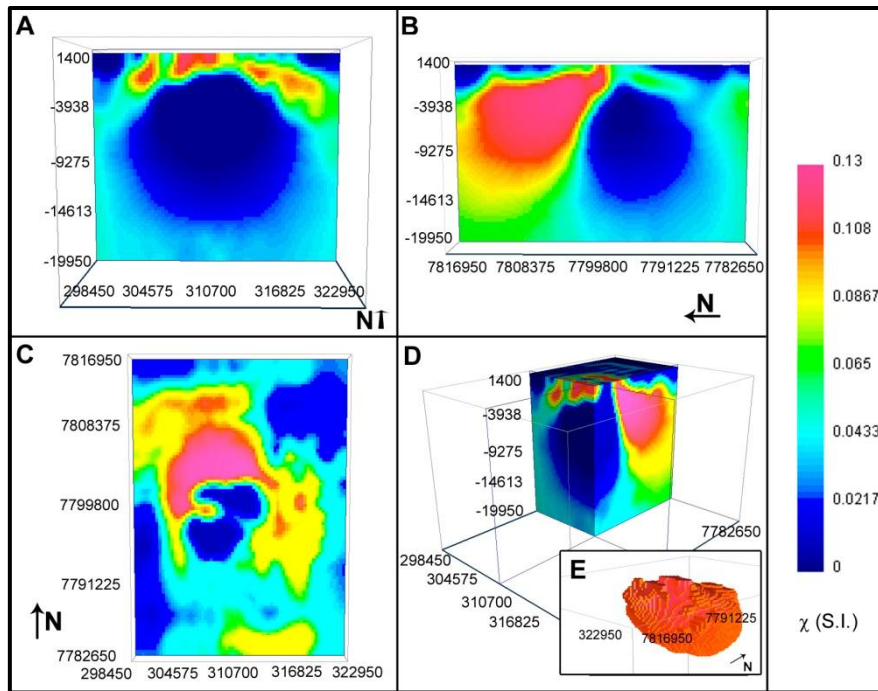


Figura 4.2.9 Inversão dos dados magnéticos do complexo máfico-ultramáfico-carbonatítico de Tapira sem a utilização do procedimento proposto neste trabalho, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva com cortes N-S e E-W, e (E) em detalhe, perspectiva com corte de contrastes de susceptibilidades de 0.09 a 0.13 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação  $-29.7^\circ$ ; declinação  $-20.6^\circ$ ; intensidade 23270 nT; projeção do campo magnético: inclinação:  $-29.7^\circ$ ; declinação  $-20.6^\circ$ .

Com a aplicação do procedimento de análise magnética deste trabalho, vinculado às informações geofísicas e geológicas de trabalhos anteriores, foi possível recuperar um cenário plausível para a explicação do comportamento de Tapira em subsuperfície (Fig. 4.2.10).

O corpo recuperado assemelha-se com aquele reportado por Ribeiro (2011), com um corpo vertical de contraste de susceptibilidade magnética com a rocha encaixante de cerca de 0.16 (S.I.), e com uma ausência de contraste em sua porção central a qual pode ser associada ao carbonatito C-1.

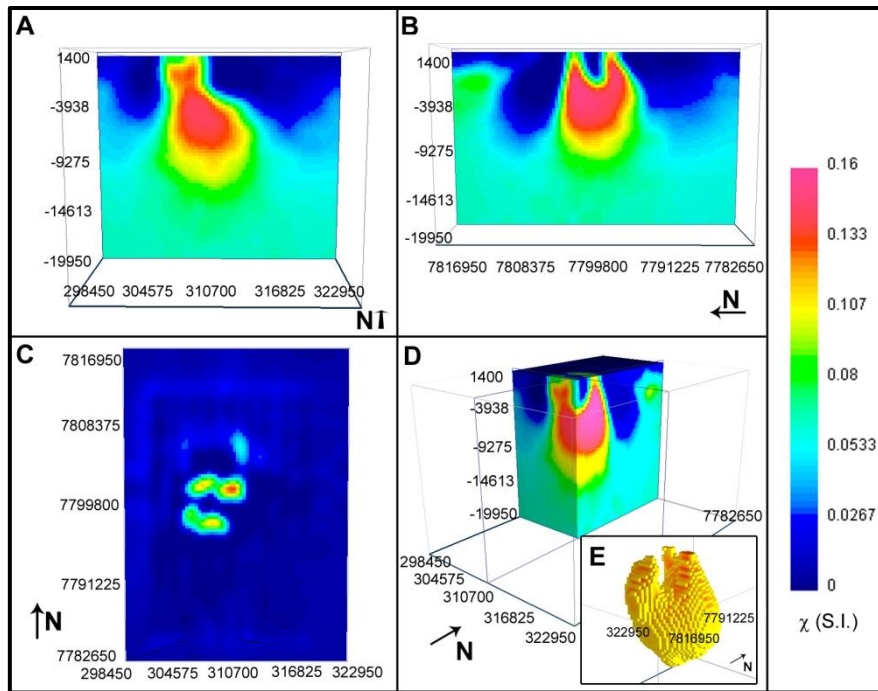


Figura 4.2.10 Modelo de contraste de susceptibilidade magnética recuperado para o complexo de Tapira a partir do uso do procedimento de análise magnética, com vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva com cortes N-S e E-W, e (E) em detalhe, perspectiva com corte de susceptibilidade de 0.13 a 0.16 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação -29.7°; declinação -20.6°; intensidade 23270 nT; projeção do campo magnético: inclinação: 65.9°; declinação 169.5°.

O modelo recuperado com o uso do modelo inicial mostrou boa similaridade com os resultados das técnicas de delimitações vertical e lateral aplicadas anteriormente, assim como com dados geológicos, aumentando a confiabilidade da representação matemática.

O tempo de inversão com o modelo inicial foi 46.34% menor do que sem o uso do mesmo. Neste caso, o corpo de susceptibilidades entre 0.13 e 0.16 (S.I. – Fig. 4.2.10-E) apresentou um volume de 250 km<sup>3</sup>, com menor extensão vertical e maior contraste de susceptibilidade do que os corpos recuperados por Ribeiro (2011), apesar da semelhança em forma. Esta diferença pode ser atribuída à própria ambiguidade do método magnético para estimativa das bases e/ou extensões verticais de corpos magnetizados.



vi. *Modelagem Final*

A etapa final do procedimento de análise para o complexo de Tapira, diferentemente do apresentado em Pratinha I, indicou que o *RTP* iterativo identificou com eficiência as direções de magnetização total, permitindo a recuperação de um sinal muito próximo ao real quando inseridas em um corpo com a forma e susceptibilidade magnética (0.16 S.I.) obtida pela inversão com modelo inicial.

Os valores finais de magnetização média dos bebedouritos B-1 e B-2 são apresentados na Tabela 4.2.1.

Tabela 4.2.1 Características magnéticas médias recuperadas para os bebedouritos do complexo de Tapira.

Complexo Alcalino-Carbonatítico de Tapira			
Vetor de Magnetização	Inclinação	Declinação	Intensidade
Induzida	-29.70°	-20.60°	296.28
Total	65.90°	169.50°	500.00
Remanente	52.70°	163.95°	758.39

A relação entre magnetizações remanente e induzida dos bebedouritos de Tapira levaram a identificação de uma Razão de Königsberg ( $Q$ ) de 2.56. Cordani e Shukowsky (2009) estimaram que para  $Q$  entre 2.00 e 3.00, o complexo poderia ser datado entre 70 Ma e 80 Ma, concordantemente com datações de Hasui e Cordani (1968) e Sonoki e Garda, (1988) que atribuem idades entre 87.2 Ma e 71.2 Ma, e entre 87.2 e 85.6 Ma respectivamente.

A extensão vertical do corpo carbonatítico C-1, considerado a partir da ausência de contraste com a rocha encaixante na região superior-central do modelo, assim como em Ribeiro (2011), foi estimado em aproximadamente 3.5 km.

### **4.3. COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍTICO DE ARAXÁ**

O Complexo de Araxá é um dos grandes alvos exploratórios minerais brasileiros, sendo o maior produtor de Nióbio (pirocloro) no Brasil e no mundo. Situado a norte de Tapira, centrado nas coordenadas (19°40'S; 46°24'W), este complexo está inserido no grupo Ibiá, caracterizado por Seer (1999) como uma alternância de metadiamicritos com clastos extremamente variados e calcifilitos esverdeados em contato tectônico por falhas de empurrão e zonas de cisalhamentos com o grupo Canastra (já descrito neste trabalho – tópicos 4.1 e 4.2).

Geologicamente, o complexo de Araxá apresenta um caso de intrusão erodida ao nível de meso a catazona, com um manto de intemperismo com enriquecimento residual de minerais resistentes (ISSA FILHO *et al.*, 1984 *apud* BIONDI, 2003).

Segundo Biondi (2003), o complexo é composto por uma intrusão de dunitos e peridotitos que sofreram metassomatismo com a intrusão posterior de magma carbonatítico, transformando-os em glimeritos (carbonatitos com Fe, Mg e Al associados) e beforsitos (dolomita-carbonatito), e fenitizaram os quartzitos da rocha encaixante (Fig. 4.3.1). Sonoki e Garda (1988) datam Araxá entre 77 e 97 Ma por K/Ar.

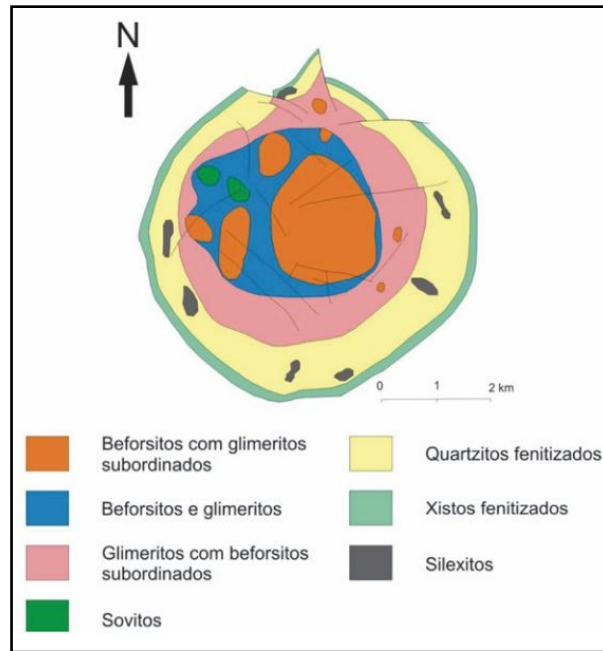


Figura 4.3.1 Mapa geológico do complexo de Araxá (Modificado de BIONDI, 2003).

A anomalia magnética referente ao complexo de Araxá se trata de uma anomalia com polaridade normal para o campo magnético do hemisfério sul, com sua porção negativa a S-SE e positiva a N-NW (Fig. 4.3.2). Neste caso, assim como nos anteriores da mesma região, o filtro que melhor separou as componentes regional-residual foi a superfície polinomial de ordem 1.

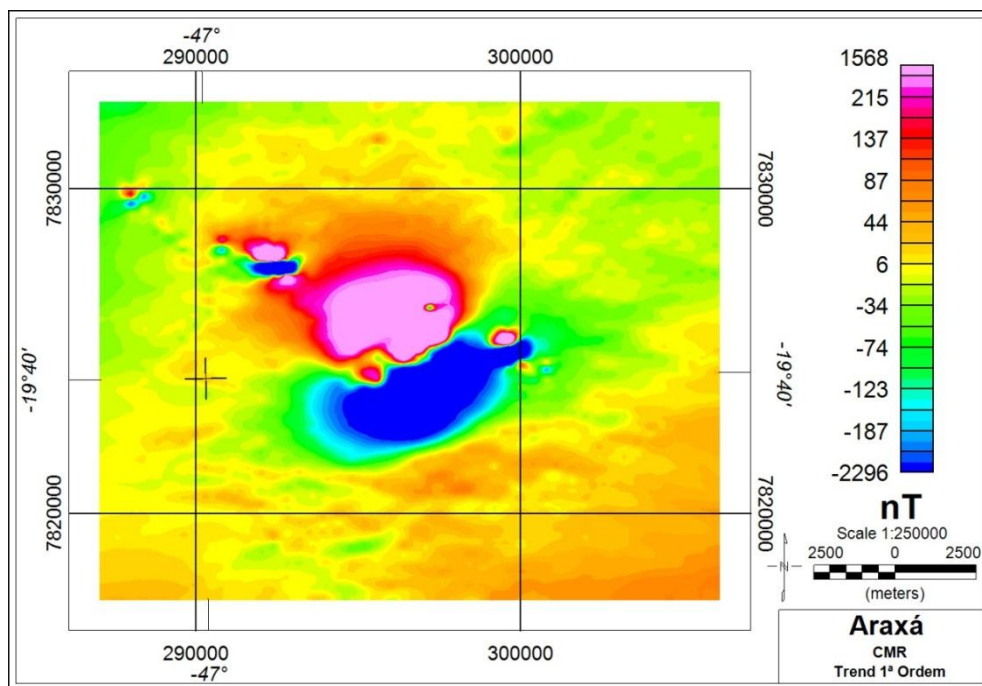


Figura 4.3.2 Campo magnético residual de Araxá.

i. *EHD*

O *EHD* de Araxá (Fig. 4.3.3) revelou várias estruturas visíveis no mapa geológico da Fig. 4.3.1, com ênfase nas posições da intrusão original dunítica e peridotítica posteriormente metassomatizada em sovitos e beforsitos com glimeritos subordinados. Algumas outras estruturas, a leste e a noroeste da anomalia principal, foram também mapeadas pelo *EHD*, não havendo correlação geológica com o complexo.

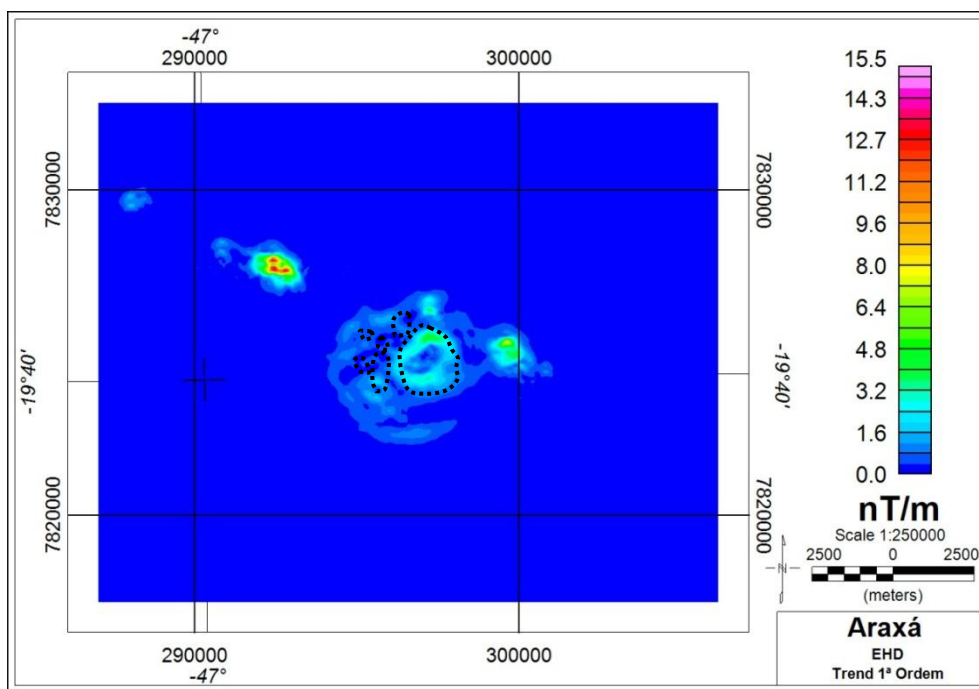


Figura 4.3.3 *EHD* de Araxá ressaltando nas linhas pontilhadas os limites dos corpos observados na Fig. 4.2.3.

ii. *EHD-Depth*

Por ser uma intrusão de geometria similar a de Tapira, foi utilizado o *EHD-Depth* para mapear as profundidades dos corpos. Esta técnica recuperou profundidades entre 100 e 300 metros, mantendo uma média de 170 metros, considerando-se todas as estruturas (Fig. 4.3.4).

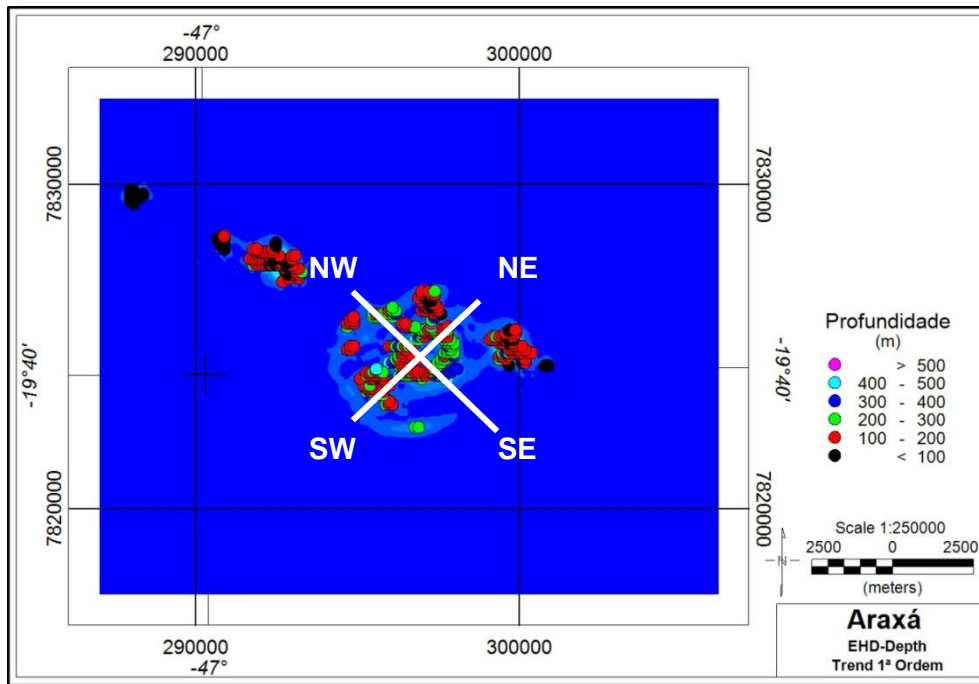


Figura 4.3.4 Profundidades resultantes da aplicação do EHD-Depth sobre os dados magnéticos de Araxá, com os perfis NW-SE e NE-SW apresentados na Fig. 4.3.5.

As profundidades recuperadas, mais uma vez, corroboraram com informações geológicas anteriores para as profundidades estimadas de rochas frescas do complexo (Fig. 4.3.5), se mantendo entre 100 e 300 dependendo da região do complexo.

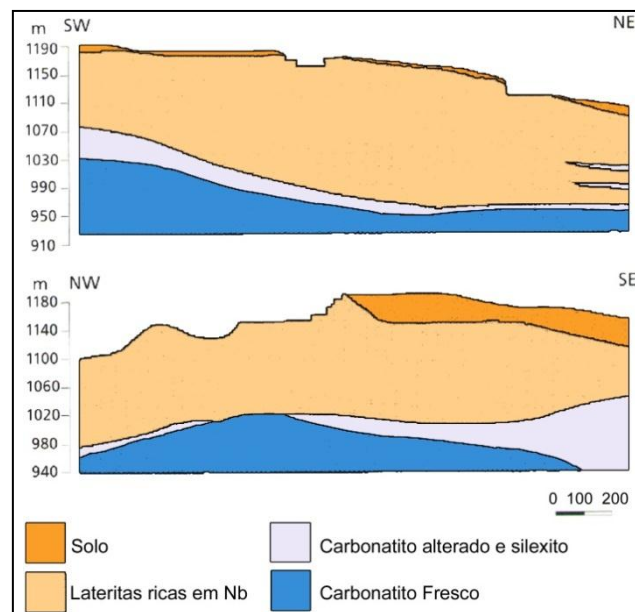


Figura 4.3.5 Perfis geológicos de Araxá em relação à topografia nas direções NE e NW (Modificado de BIONDI, 2003).

iii. *Redução ao Polo Magnético Iterativa – Método MinMax*

A redução ao polo iterativa de Araxá convergiu para os valores de inclinação e declinação ( $-27.6^\circ$ ,  $-18.6^\circ$ ), indicando uma direção de magnetização praticamente paralela ao campo magnético da Terra, à ocasião do levantamento, para a região ( $-29.2^\circ$ ,  $-20.4^\circ$ ). Isso pode indicar que ou a magnetização remanente de Araxá tem baixa intensidade e, assim, pouca influência sobre a magnetização total, ou a direção do campo magnético da Terra para o período de cristalização do complexo era muito similar à atual.

O RTP deste complexo reduziu satisfatoriamente o sinal referente à anomalia maior vinculada ao corpo principal da intrusão (Fig. 4.3.6). As outras anomalias menores não tiveram seu sinal reduzido com efetividade porém, como não possuem correlação aparente com o mesmo, não influíram na continuidade do processo.

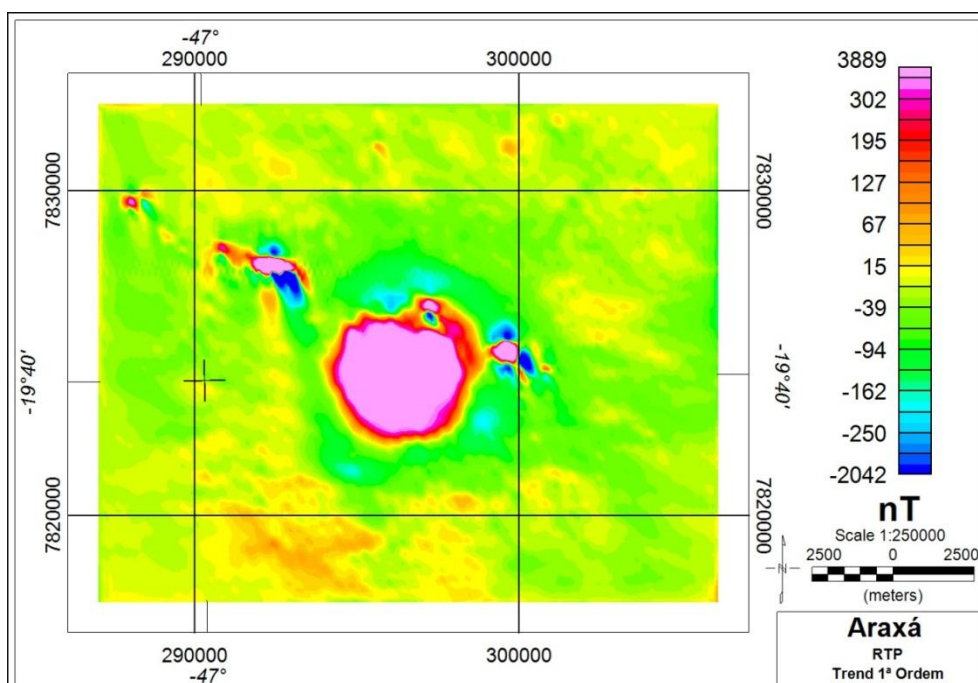


Figura 4.3.6 Redução ao Polo Magnético Iterativa de Araxá.

iv. *Modelagem Inicial*

A partir das informações obtidas com as técnicas apresentadas, foi constituído um cenário inicial composto por prismas verticais delimitados pelos contornos definidos pelo *EHD* (Fig. 4.3.7). Estes contornos apresentaram boa correlação com as posições da primeira intrusão de dunitos e peridotitos, posteriormente metassomatizada em beforsitos do complexo, o que levou à atribuição de susceptibilidades compatíveis com este tipo de rocha segundo ( $\chi = 0.14$  S.I. – TELFORD *et al.*, 1990) . À rocha encaixante foi atribuído o valor de susceptibilidade magnética correspondente a metassedimentos ( $\chi = 10^{-4}$  S.I.).

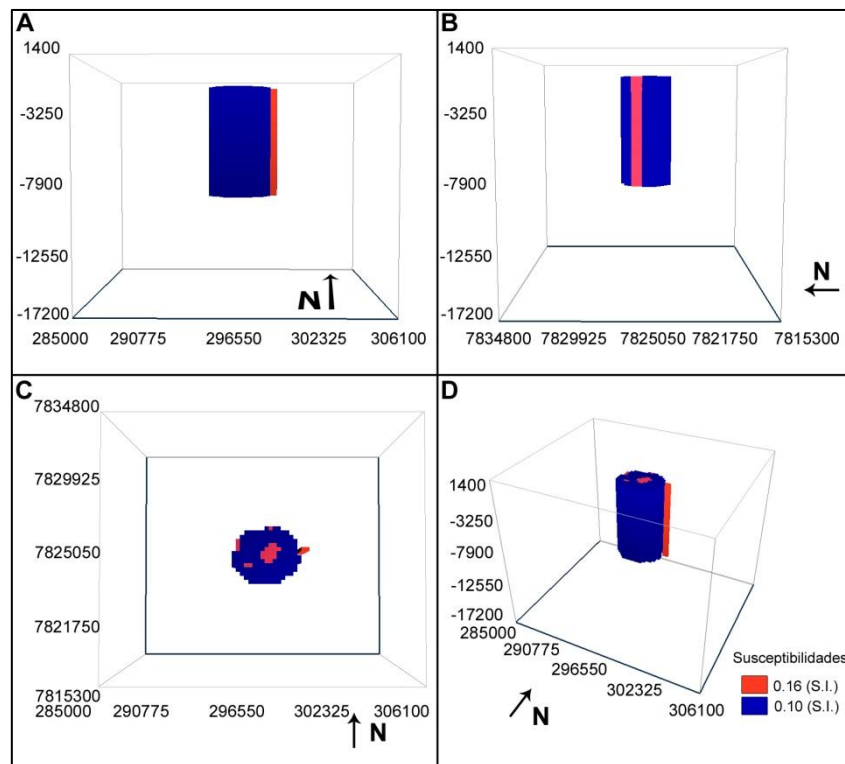


Figura 4.3.7 Modelo Inicial composto para o complexo de Araxá nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo e (D) perspectiva.



v. *Inversões dos dados magnéticos*

A inversão magnética dos dados de Araxá sem a utilização de um modelo inicial recuperou um modelo de contraste de susceptibilidades com boa aproximação das informações geofísicas estimadas e também com as geológicas de trabalhos anteriores (BROD *et al.*, 2004; BIONDI, 2003; PEREIRA E MANTOVANI, 2012).

Esta inversão resultou em um corpo aflorante com contraste de susceptibilidade de cerca de 0.15 (S.I.), numa forma aproximadamente elipsoidal (Fig. 4.3.8), mais achatada que a apresentada por Pereira e Mantovani (2012).

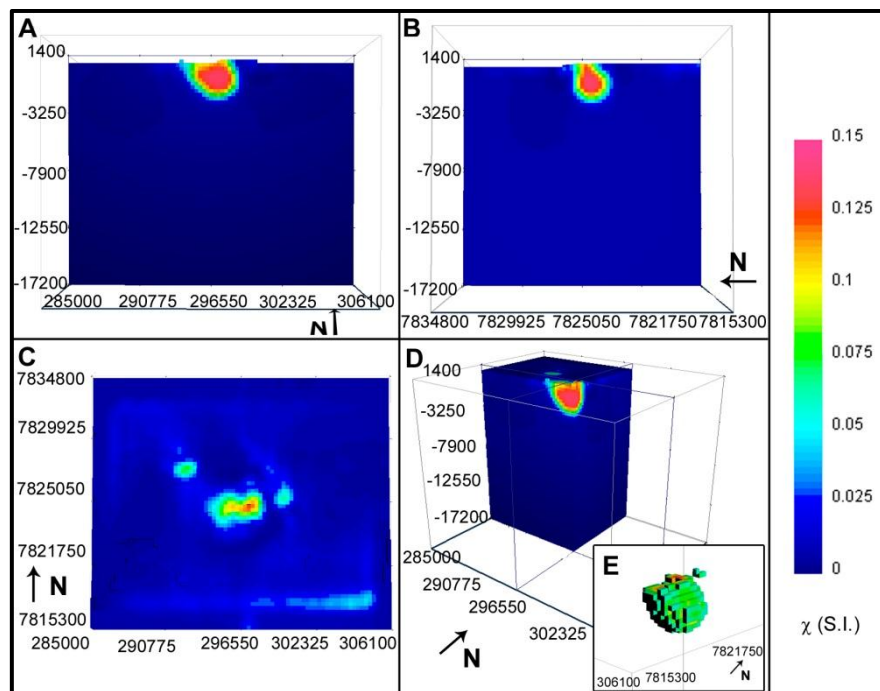


Figura 4.3.8 Inversão magnética do complexo de Araxá sem a utilização de modelo inicial, com vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva com cortes N-S e E-W, e em detalhe, (E) perspectiva com corte de susceptibilidade de 0.13 e 0.15 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação  $-29.7^\circ$ ; declinação  $-20.6^\circ$ ; intensidade 23270 nT; projeção do campo magnético: inclinação:  $-29.7^\circ$ ; declinação  $-20.6^\circ$ .

A utilização do procedimento de análise magnética para a inversão com modelo inicial apresentou um contraste relacionável com uma intrusão vertical, com uma concentração de material magnético nas últimas centenas de metros antes de aflorar (Fig. 4.3.9).

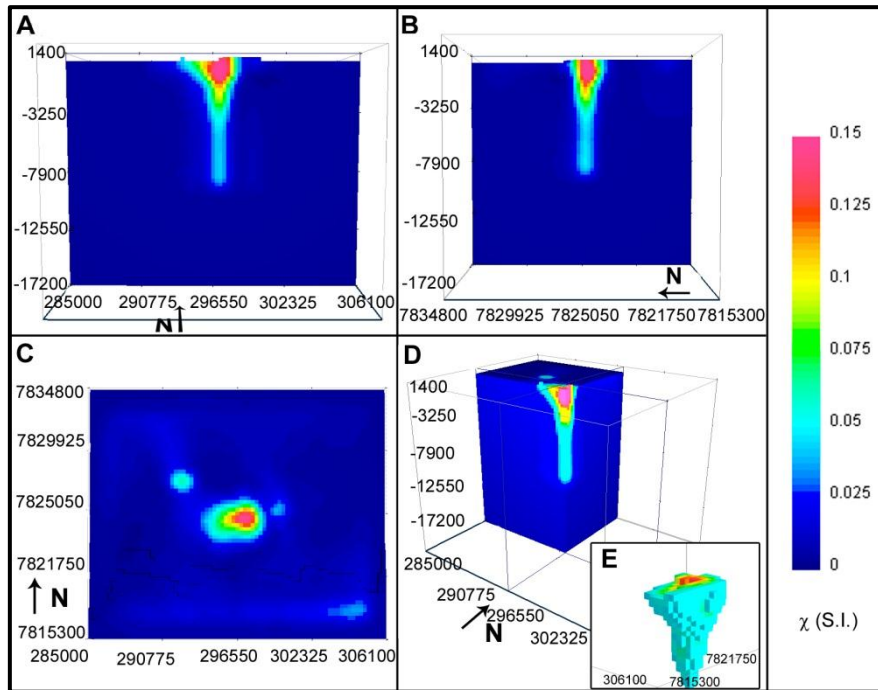


Figura 4.3.9 Modelo de contraste de susceptibilidade magnética recuperado para Araxá contando com a utilização de modelo inicial para inversão, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva e, em detalhe, (E) perspectiva com corte de susceptibilidade entre 0.06 e 0.15 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação  $-29.7^\circ$ ; declinação  $-20.6^\circ$ ; intensidade  $23270$  nT; projeção do campo magnético: inclinação:  $-27.6^\circ$ ; declinação  $-18.6^\circ$ .

O contraste de susceptibilidade magnética recuperada na Fig. 4.3.9 se mostra muito similar àquela proposta por Issa Filho *et al.* (1984) *apud* Biondi (2003) na qual há a intrusão inicial de rochas ultrabásicas, seguida pela intrusão de magma carbonatítico e metassomatização das rochas ultrabásicas em glimeritos e beforsitos (Fig. 4.3.10). Este efeito somente pode ser considerado pela utilização de um modelo inicial com estas características, caso contrário este efeito decorrerá por efeitos numéricos da regularização de Tikhonov de ordem 1 utilizada pelo algoritmo de inversão.

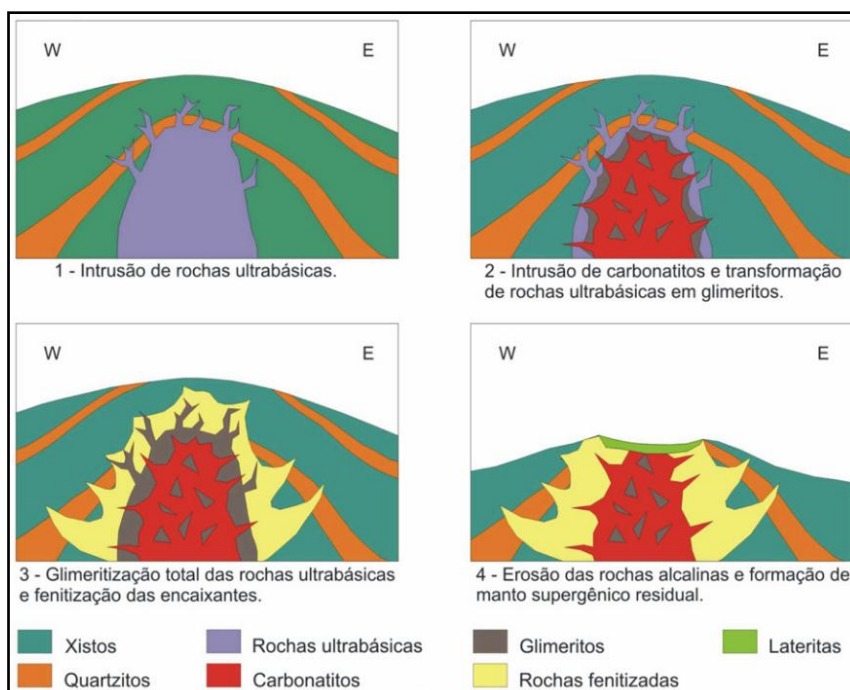


Figura 4.3.10 Modelo evolutivo do complexo de Araxá (ISSA FILHO *et al.*, 1984, PEREIRA e MANTOVANI, 2012;)

#### vi. *Modelagem Final*

O modelo recuperado com a utilização de um modelo inicial mostrou um corpo em forma de diatrema, usualmente considerada para intrusões alcalinas como Araxá, com um contraste de susceptibilidade magnética de 0.15 (S.I.) em relação à rocha encaixante, também esperado para intrusão de bebedouritos. Foi bem evidenciado inclusive a gradação de altas susceptibilidades para baixas, possibilitando uma correlação com a auréola de fenitização encontrada ao redor do complexo.

O volume do modelo obtido nesta inversão foi de aproximadamente 35 km<sup>3</sup>, muito próximo ao estimado por Pereira e Mantovani (2012), ainda que com formas diferentes. Esta diferença entre limites em subsuperfície pode ser atribuída primariamente à utilização de modelos iniciais, o que restringiu a inversão a vínculos não utilizados por estes autores.

As características magnéticas de Araxá estimadas com a avaliação do modelo em função das componentes vetoriais de magnetização induzida e total, são apresentadas na Tabela 4.3.1.

Tabela 4.3.1 Propriedades dos vetores magnéticos do complexo de Araxá.

Complexo Alcalino-Carbonatítico de Araxá			
Vetor de Magnetização	Inclinação	Declinação	Intensidade
Induzida	-29.23°	-20.48°	296.28
Total	-27.60°	-18.60°	400.00
Remanente	-21.14°	-14.36°	105.09

A modelagem final de Araxá indicou uma remanência fraca, da mesma forma que Pratinha I, resultando em uma Razão de Köenigsberg de 0.35. Este valor corrobora com o estimado por Cordani e Shukowsky (2009).

O modelo obtido com procedimento de análise magnética sobre os dados do complexo de Araxá evidenciou uma intrusão vertical em forma de diatrema, a cerca de 300 metros da superfície, como apontado por Brod *et al.* (2004).

O contraste de susceptibilidade magnética de 0.15 (S.I.) entre intrusão e rocha encaixante se encaixa nos limites aceitáveis para rochas piroxeníticas e peridotíticas (TELFORD *et al.*, 1990), como as propostas para o primeiro estágio evolutivo do complexo de Araxá proposto por Biondi (2003).

#### 4.4. COMPLEXO DE SERRA NEGRA E SALITRE I, II E III

Serra Negra e Salitre I, II e III formam dois complexos distintos que, pela proximidade, suas anomalias magnéticas acabam por interferir uma nas outras, tornando inviável uma análise magnética individual (Fig. 4.4.1). A este conjunto de anomalias foi aplicado um filtro de superfície polinomial de ordem 1 para separação regional-residual.

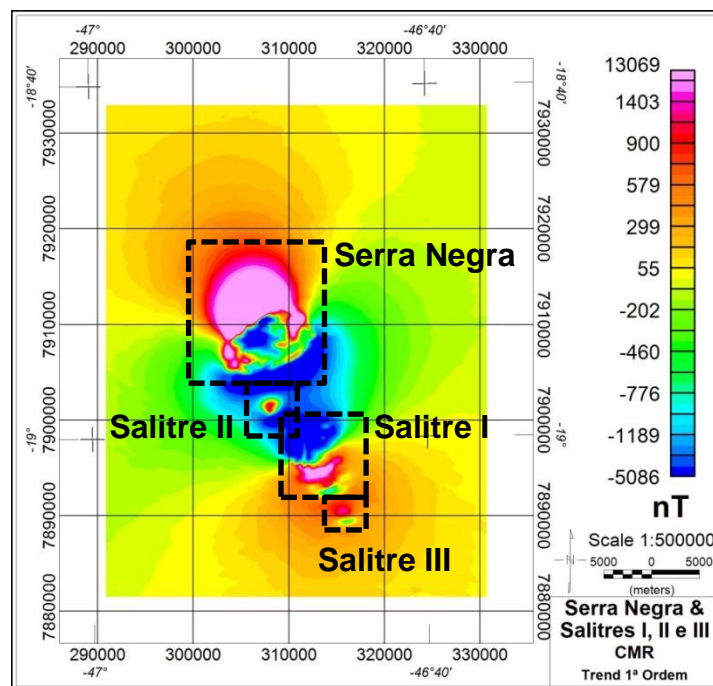


Figura 4.4.1 Campo magnético residual dos complexos de Serra Negra e Salitre.

O complexo de Serra Negra ( $18^{\circ}55'S$ ;  $46^{\circ}50'W$ ) é o maior dos complexos carbonatíticos da PIAP (BROD *et al.*, 2004), tendo intrudido de forma forçada nos quartzitos do grupo Canastra (descrito nos itens *a* e *b* referentes a Pratinha I e Tapira

neste capítulo), formando uma estrutura dômica. Este complexo é formado por um núcleo central de calcita-carbonatito, contendo flogopita, magnetita, humita, rutilo, pirocloro, baddeleyita, pirrotita e pirita acessórios (MARIANO E MARCHETTO, 1991 *apud* BROD *et al.*, 2004). Ao redor do núcleo, há uma zona de piroxenitos e nas bordas noroeste, norte e leste ocorrências de dunitos e peridotitos (Fig. 4.4.2). Gomes *et al.* (1990) datam a intrusão por K/Ar em torno de 83.0 Ma.

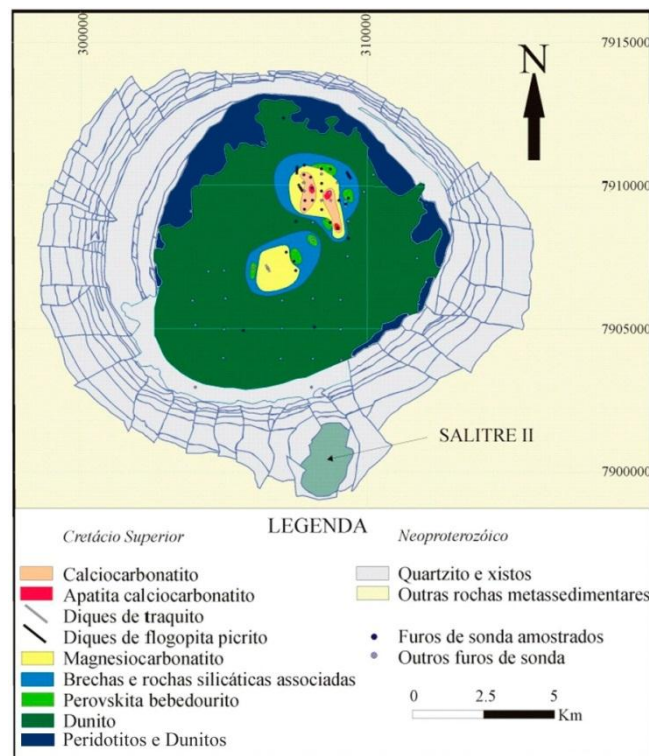


Figura 4.4.2 Mapa geológico do Complexo de Serra Negra (Modificado de MARIANO E MARCHETTO, 1991; GRASSO, 2010).

O Complexo de Salitre (19°03'S; 46°47'W) é composto por três intrusões em meio aos quartzitos do grupo Canastra. A intrusão principal, Salitre I, tem forma elíptica, levemente distorcida com 7 km (N-S) por 5 km (E-W) de extensão. Em sua composição predominam piroxenitos (bebedouritos), com um pequeno corpo de carbonatito em sua porção norte (MARIANO E MARCHETTO, 1991 *apud* BROD *et*

al, 2004), sendo datada por K/Ar em  $86.3 \pm 5.7$  Ma (SONOKI e GARDA, 1988). Em sua porção sul são identificadas intrusões de rochas feldspáticas como traquitos, fenitos e fonolitos.

Segundo Brod *et al.*(2004), Salitre II é composto por rochas ultramáficas (dunitos, perovskitos, clinopiroxenitos) com diques e veios de carbonatitos; e Salitre III por piroxenitos com rochas da série foscorítica em sua porção sul (Fig. 4.4.3).

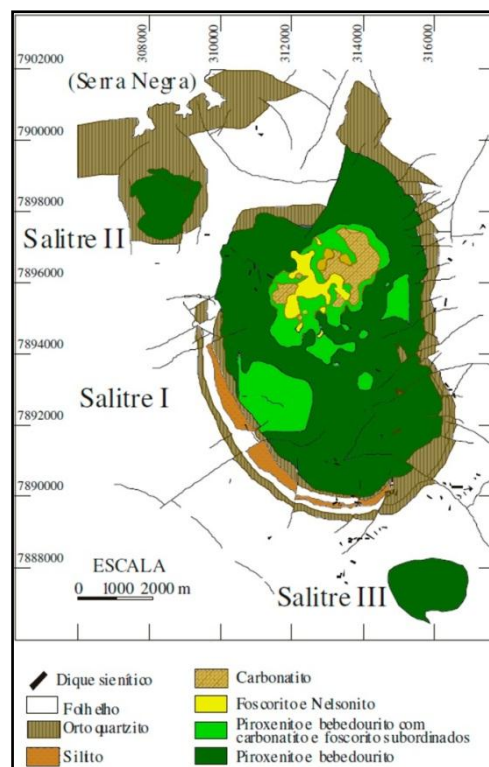


Figura 4.4.3 Geologia do complexo de Salitre (Modificado de BROD *et al.*, 2004).

i. *EHD*

A aplicação do *EHD* delimitou com eficiência as bordas dos quatro corpos de Serra Negra e Salitre I, II e III, mesmo na presença da forte interferência dos sinais magnéticos entre as fontes (Fig. 4.4.4).



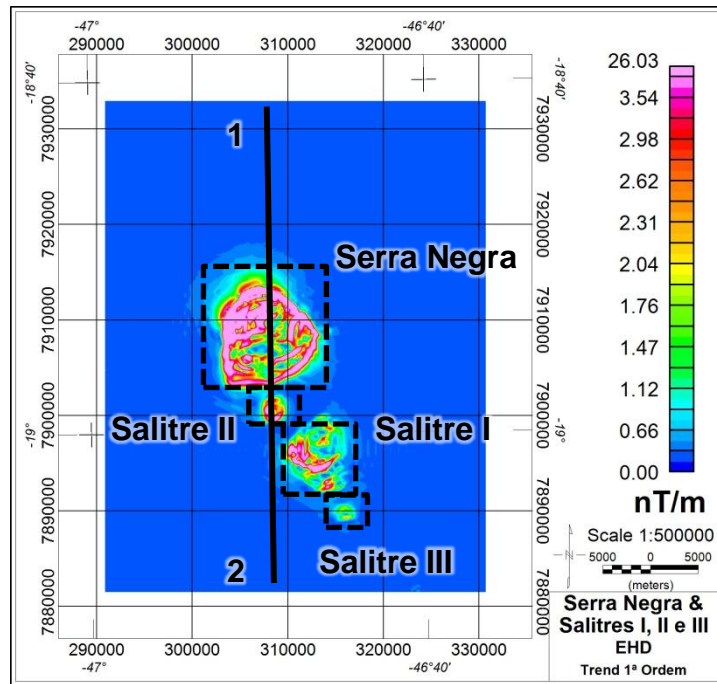


Figura 4.4.4 *EHD* de Serra Negra e Salitre I, II e III.

A partir da Fig. 4.4.4 e do perfil 1-2 da Fig. 4.4.5 é possível observar um aumento na amplitude do *EHD* na porção norte de Serra Negra, indicando a possível presença de material mais magnético que o restante do complexo, na mesma localização onde, segundo Brod *et al.* (2004) se encontram indícios de peridotitos e dunitos. Este comportamento, no entanto, não se mantém em Salitre II.

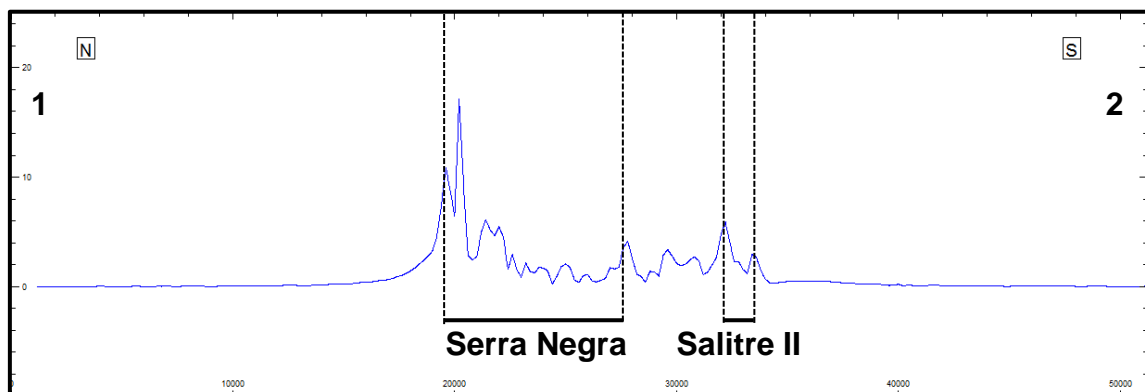


Figura 4.4.5 Perfil 1-2 do *EHD* de Serra Negra e Salitre II.



As fontes das anomalias de Salitre I a III ficaram bem delimitadas, com um notável aumento de sinal na porção oeste de Salitre I (Fig. 4.4.4), de forma similar àquela observada na porção norte de Serra Negra, podendo ser assimilada como uma porção de maior intensidade de magnetização seja por litologia de maior susceptibilidade magnética ou por maior intensidade de magnetização total (remanente + induzida).

ii. *EHD-Depth*

A estimativa de profundidade localizou os corpos principais (Serra Negra e Salitre I) a profundidades de cerca de 245 metros e os demais entre 300 e 400 metros (Fig. 4.4.6). Na porção central de Serra Negra foi possível obter profundidades de menos de 200 metros, em acordo com a presença de dunitos a aproximadamente 140 metros recuperados por furos de sondagens em Brod *et al.* (2004). O mesmo ocorre no centro de Salitre I, corroborando com a presença de piroxenitos a aproximadamente 100 metros.

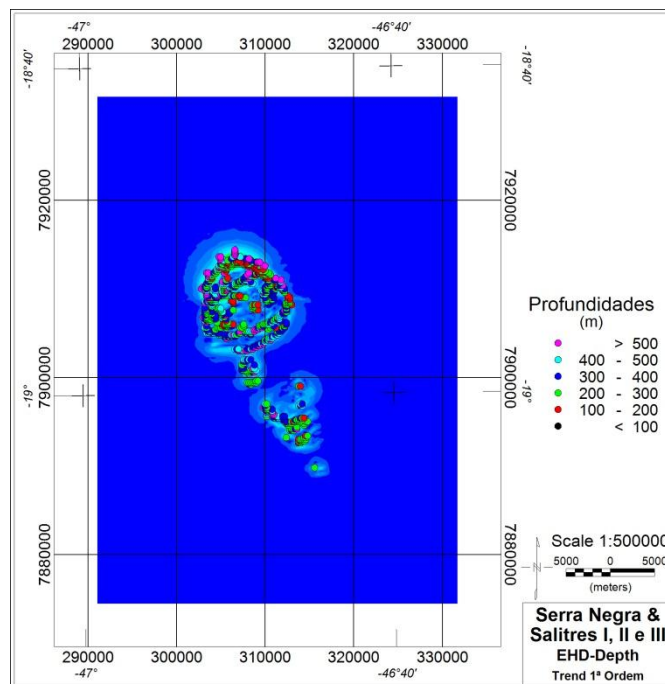


Figura 4.4.6 Estimativa de profundidades de Serra Negra e Salitre I, II e III por meio da aplicação do *EHD-Depth*.

iii. *Redução ao Polo Magnético Iterativa – Método MinMax*

A redução ao polo magnético de Serra Negra e Salitre (Fig. 4.4.7) se comportou de forma semelhante ao *RTP* de Pratinha I (Fig. 4.1.4), devido à interferência entre sinais magnéticos de corpos próximos com altas intensidades e direções de magnetizações diferentes.

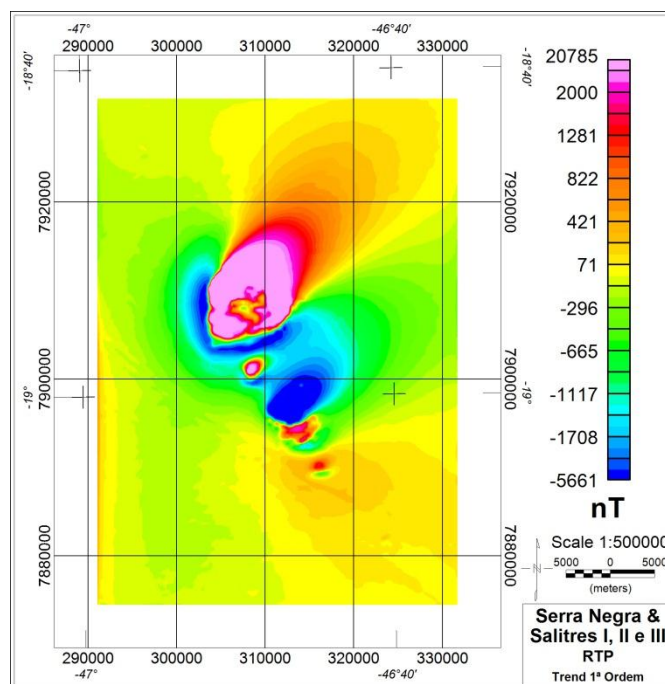


Figura 4.4.7 *RTP* de Serra Negra e Salitre I, II e III.

Uma vez reconhecida a ineficácia do *RTP* para o caso em estudo, o par de inclinação e declinação do vetor de magnetização total deverá ser buscado na etapa de modelagem final.

iv. *Modelagem Inicial*

O modelo inicial para o cenário de Serra Negra e Salitre foi composto com base nas informações do EHD e de trabalhos anteriores sobre a geologia do local. Foram inseridos os valores de inclinação e declinação do vetor de magnetização total obtidos

pela redução ao polo, porém não foi buscada uma aproximação mais precisa entre o sinal magnético do modelo inicial em relação ao campo magnético residual dos complexos alcalinos. Essa opção se deveu ao conhecimento de que o par de inclinação e declinação obtidos pelo *RTP* não se aproximam dos reais, tornando essa busca inicial longa e infrutífera.

Com isso, uma modelagem buscando uma maior similaridade do sinal magnético sintético com o real será deixada para a etapa de modelagem final (*vi*). A Fig. 4.4.8 apresenta o modelo inicial construído para o caso.

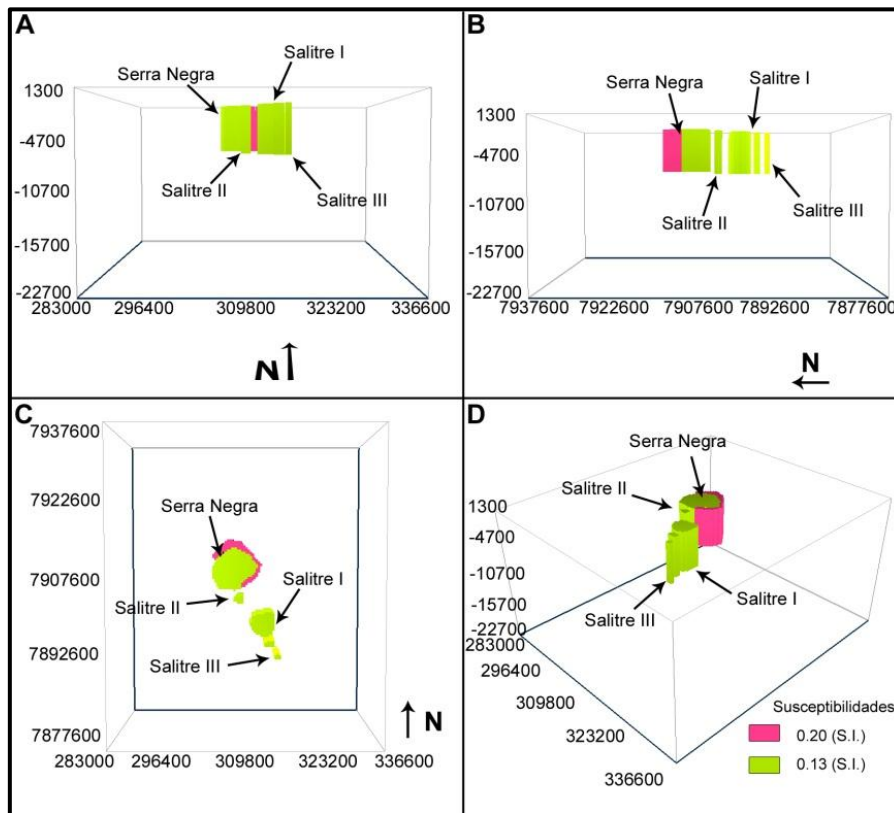


Figura 4.4.8 Modelo inicial composto para os complexos de Serra Negra e Salitre, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo e (D) perspectiva.

v. *Inversões dos dados magnéticos*

Como era esperado, um caso complexo como Serra Negra e Salitre não pode ser invertido com sucesso sem a utilização de um modelo inicial que vincule o procedimento matemático à realidade física. Mesmo assim, essa inversão foi realizada para posterior comparação. Seus resultados revelaram um único corpo aflorante para todos os complexos, sem similaridade com a geologia superficial (Figs. 4.4.2 e 4.4.3) e com os resultados do *EHD* e *EHD-Depth*, e contando um contraste de susceptibilidade de cerca de 0.18 (S.I.) com a rocha encaixante. Os mesmos são apresentados na Fig. 4.4.9.

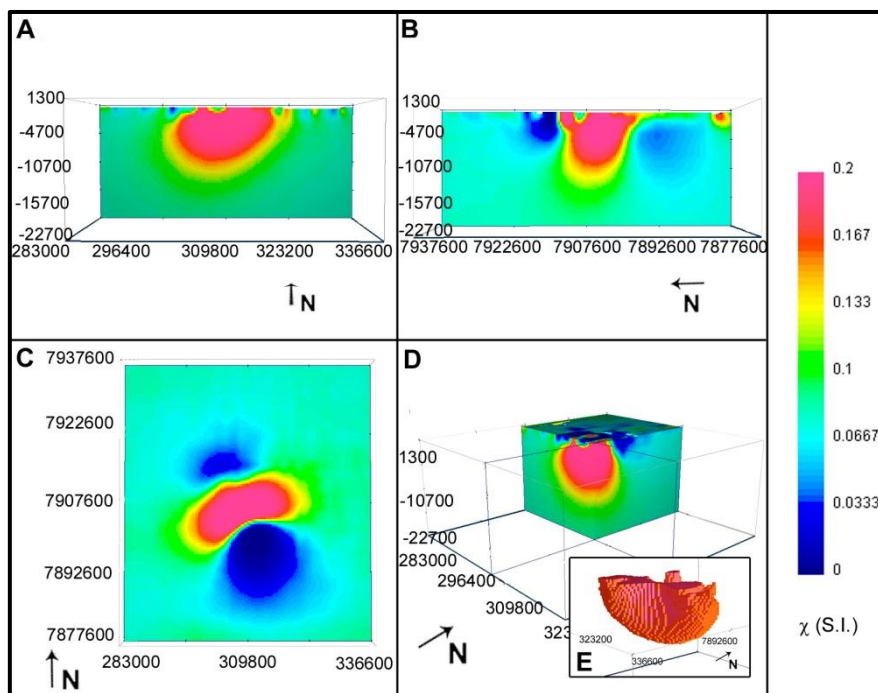


Figura 4.4.9 Resultado da inversão magnética dos complexos de Serra Negra e Salitre sem o uso de Modelo Inicial nas vistas (A) sul, (B) oeste, (C) topo com corte a 1000 m de profundidade, (D) perspectiva com cortes N-S e E-W e, em detalhe, (E) perspectiva com contraste de susceptibilidades entre 0.15 e 0.20 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação  $-27.9^\circ$ ; declinação  $-20.5^\circ$ ; intensidade 23370 nT; projeção do campo magnético: inclinação  $-27.9^\circ$ ; declinação  $-20.5^\circ$ .

O modelo da inversão, utilizando o modelo inicial da Fig. 4.4.8, recuperou corpos que podem ser relacionados com Serra Negra e Salitre I (Fig. 4.4.10). Nesta figura nota-se uma tendência de concentração de susceptibilidades maiores na porção leste e norte de Serra Negra, como são esperados para estas regiões em função da presença de dunitos e peridotitos (BROD *et al.*, 2004).

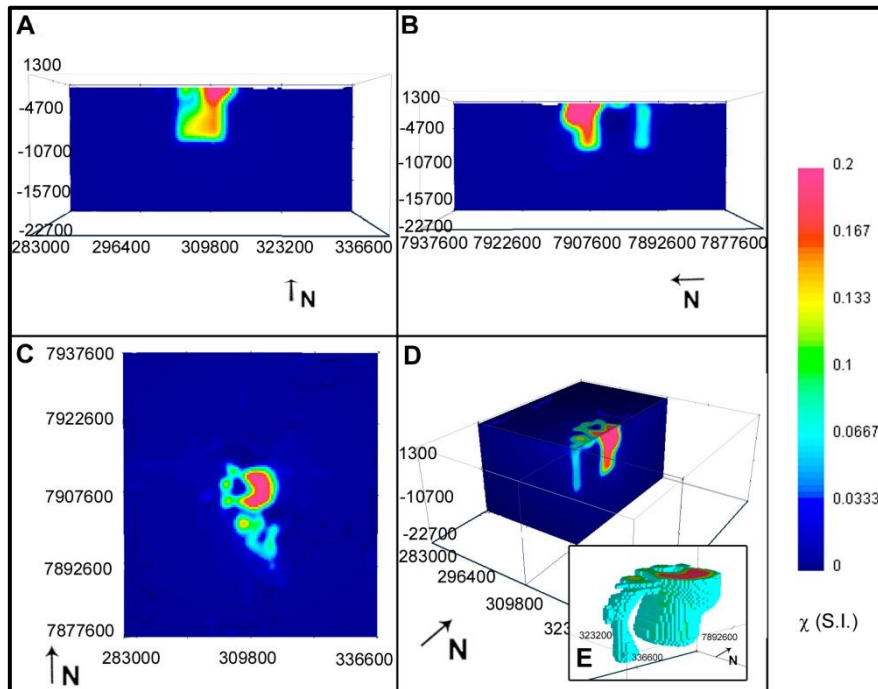


Figura 4.4.10 Resultado da inversão magnética dos complexos de Serra Negra e Salitre com o uso de Modelo Inicial nas vistas (A) sul, (B) oeste, (C) topo com corte a 1000 m de profundidade, (D) perspectiva com cortes N-S e E-W e, em detalhe, (E) perspectiva com contraste de susceptibilidades entre 0.10 e 0.20 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação  $-27.9^\circ$ ; declinação  $-20.5^\circ$ ; intensidade 23370 nT; projeção do campo magnético: inclinação  $-43.9^\circ$ ; declinação  $-129.3^\circ$ .

Considerando os modelos recuperados para os complexos de Salitre, foi recuperada uma conexão em subsuperfície entre os três, contando com uma maior susceptibilidade magnética para a posição central do corpo associável com Salitre II.

Nesta inversão, apesar dos resultados correlacionáveis com a geologia, há a ressalva que as direções de magnetização total atribuídas ao sistema de corpos estavam

provavelmente equivocadas, uma vez que o *RTP* não obteve sucesso, podendo levar a um comportamento em subsuperfície com menor precisão.

vi. *Modelagem Final*

A grande interferência entre os sinais magnéticos de diferentes fontes impediu uma estimativa direta das direções de magnetização total. Assim como no Capítulo 4.1 sobre a anomalia magnética de Pratinha I, o procedimento de análise magnética teve de ser implementado na etapa de Modelagem Final.

A utilização do modelo de contraste de susceptibilidade invertido com o uso do modelo inicial anterior, aliado às direções estimadas pelo *RTP*, permite avaliar os corpos individualmente. Foram compostos perfis NW-SE espaçados de 200 m entre si para análise das direções de magnetização. Para fins de exemplo, o perfil NW-SE da Fig. 4.4.11 (localizado na Fig. 4.4.12) ilustra os passos do procedimento de busca pelas direções de magnetização que expliquem o comportamento magnético de Serra Negra, Salitre I, II e III individualmente.

O procedimento de busca se deu da mesma forma apresentada para a anomalia de Pratinha I (Capítulo 4.1.vi), começando com a avaliação do perfil magnético do corpo obtido pela inversão com modelo inicial, quando atribuído das direções de magnetização obtidas pelo *RTP* (Figs. 4.4.11-A).

No caso de Serra Negra as direções de magnetização indicam a mesma polaridade (Fig. 4.4.1) e, com isso, foram seguidos os passos para a busca das direções de inclinação e declinação que explicassem o sinal magnético real.

As direções do *RTP* não explicavam o sinal original e, ao alterar somente a intensidade magnética a forma do sinal se manteve a mesma, somente alterando a amplitude dos picos (Fig. 4.4.11-A);

- Ao alterar a inclinação de  $-43.9^\circ$  para  $-60.9^\circ$  (Fig. 4.4.11-B), mantendo a polaridade, o perfil se ajustou ao primeiro pico de intensidade, porém se mantendo distante do comportamento do restante do perfil;
- Ao inverter a polaridade da inclinação de  $-43.9^\circ$  para  $43.9^\circ$  (Fig. 4.4.11-C), da mesma forma que Pratinha I (Fig. 4.1.8), o sinal se inverteu, provando que a polaridade, neste caso de inclinação é negativa e próxima àquela do *RTP*;
- A variação da inclinação se mostrou infrutífera e, dessa forma, esta foi fixada na direção apontada pelo *RTP*. Neste ponto, o parâmetro a ser variado foi a declinação, que ao ser invertida sua polarização de  $-129.3^\circ$  para  $129.3^\circ$ , apresentou um resultado similar àquele visto na Fig. 4.4.11-B, indicando que a declinação correta pode ser encontrada reduzindo a mesma para algum ponto próximo ao valor médio entre  $-129.3^\circ$  e  $120.3^\circ$  (Fig. 4.4.11-D).
- De fato, com uma aproximação da forma do sinal apresentada no item anterior, o último passo foi reduzir a amplitude da declinação até obter um ajuste aceitável (Fig. 4.4.11-E). Este ajuste se deu com as direções de inclinação e declinação  $-43.9^\circ$  e  $-20.3^\circ$ , respectivamente.

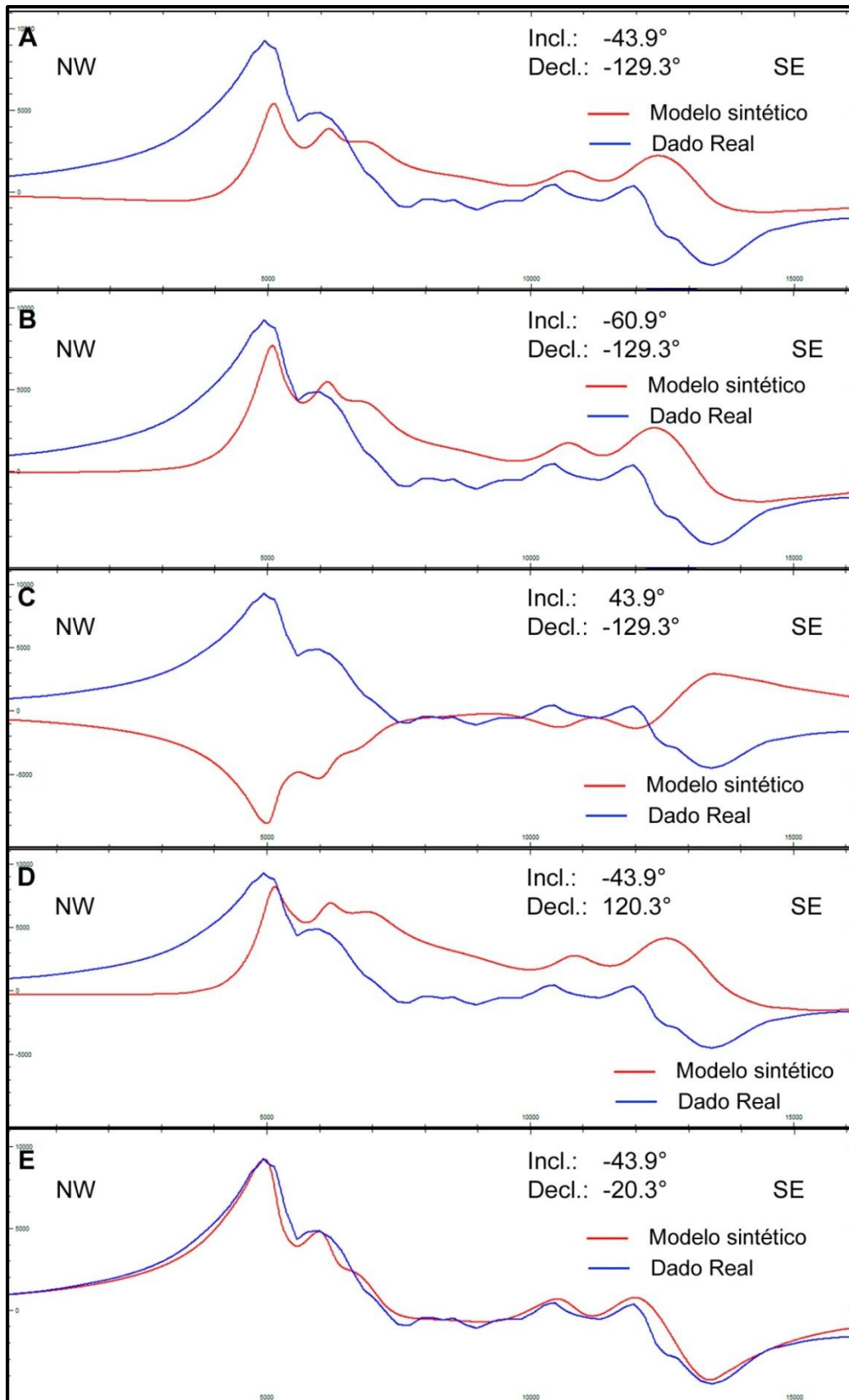


Figura 4.4.11 Perfil NW-SE dos campos magnéticos real (em azul) e sintético (a partir do modelo invertido; em vermelho) de Serra Negra, com os pares inclinação/declinação: (A) - $43.9^\circ/-129.3^\circ$ ; (B)  $-60^\circ/-129.3^\circ$ ; (C)  $43.9^\circ/-129.3^\circ$ ; (D)  $-43.9^\circ/129.3^\circ$ ; e (E)  $-43.9^\circ/-20.3^\circ$ .



Estas direções, quando aplicadas ao *RTP*, obtiveram sucesso para o corpo de Serra Negra (Fig. 4.4.12). Salitre II e III indicaram uma direção de magnetização próxima, sendo identificadas a partir do mesmo processo utilizado para Serra Negra valores de  $-33.9^\circ$ , para a inclinação, e  $-20.3^\circ$  para a declinação (Fig. 4.4.13). No entanto para Salitre I a mesmas direções não se aplicaram.

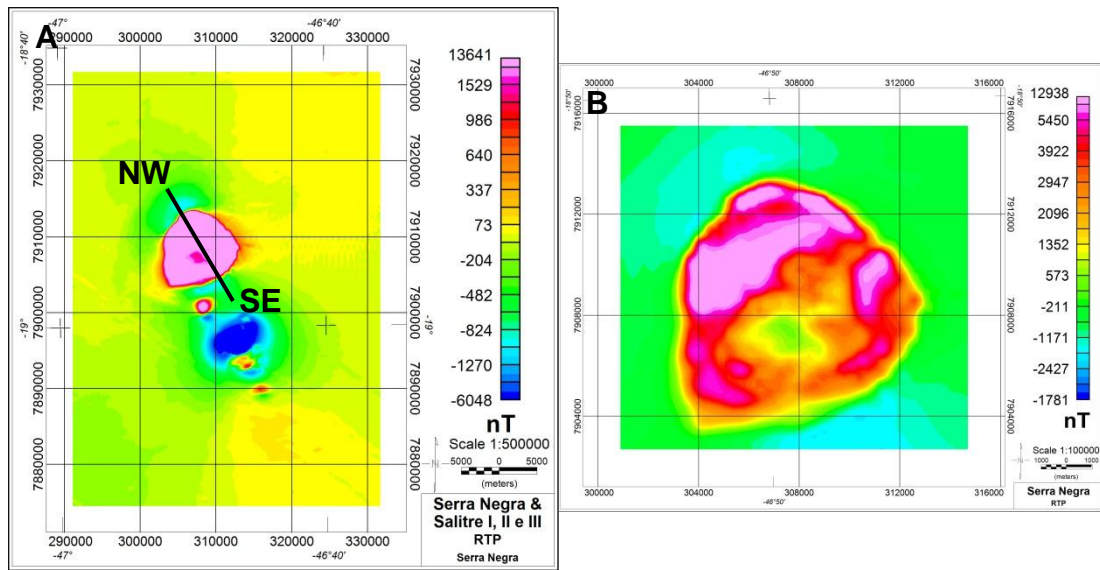


Figura 4.4.12 Redução ao polo utilizando as direções de  $-43.90^\circ$  de inclinação e  $-20.00^\circ$  de declinação no (A) *grid* dos complexos de Serra Negra e Salitre identificando a extensão do perfil da Fig. 4.4.11, com detalhes em (B) para o resultado da anomalia de Serra Negra.

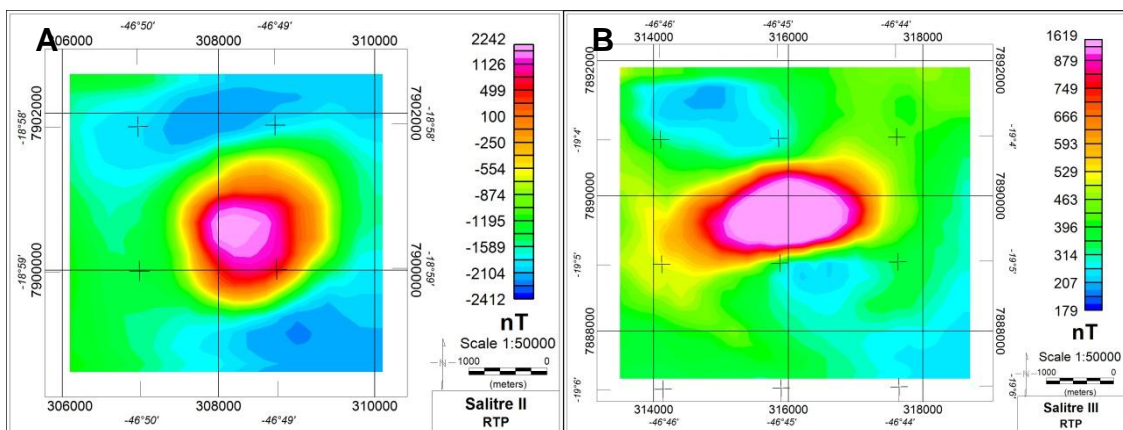


Figura 4.4.13 Redução ao polo utilizando as direções de  $-33.90^\circ$  de inclinação e  $-20.00^\circ$  de declinação nos *grids* de (A) Salitre II e (B) Salitre III.

O *RTP* de Serra Negra obteve uma concentração de sinal nas posições de borda do complexo, concomitantemente com a localização dos dunitos e peridotitos (Fig. 4.4.2). Em sua porção central, apresentou uma região de baixo magnético, podendo ser relacionada à presença de carbonatitos.

Salitre I se mostrou a anomalia mais complicada deste caso para a estimativa das direções de magnetização. Isso se deve à interferência construtiva entre sua porção negativa da anomalia com a mesma pertencente à anomalia de Serra Negra.

Uma análise detalhada de Salitre I permitiu a identificação de duas estruturas de direções de magnetização diferentes dentro dos limites do complexo identificados em literatura (Fig. 4.4.3), uma maior a noroeste e uma segunda menor a sudeste. Na Fig. 4.4.14 são identificados no *EHD* de Salitre I os limites dos dois corpos.

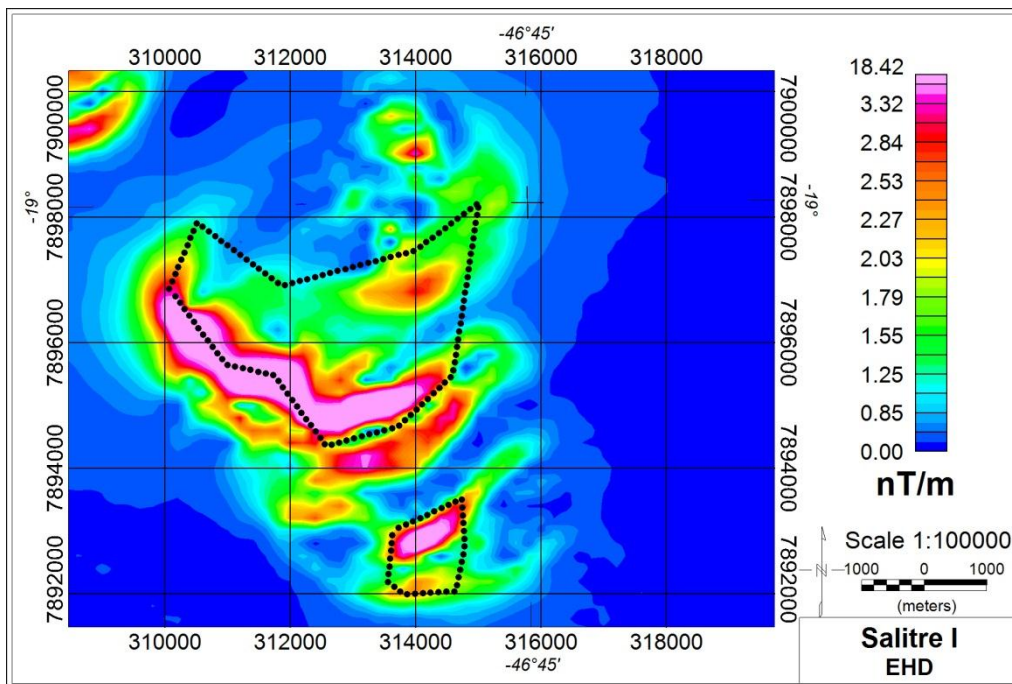


Figura 4.4.14 *EHD* localizado de Salitre I identificando, em pontilhado, os limites das duas estruturas de diferentes direções de magnetização total.

Mesmo considerando a interferência, as duas anomalias foram selecionadas e filtradas independentemente com o *RTP* iterativo. Ambos as filtragens tiveram bons resultados, com a minimização das amplitudes negativas referentes aos corpos.

A redução do corpo a noroeste revelou uma estrutura alongada na direção NW-SE (Fig. 4.4.15-A), com direções de inclinação e declinação de  $48.3^\circ$  e  $-155.4^\circ$  respectivamente. No caso a sudeste (Fig. 4.4.15-B), as direções foram *Incl.* =  $-30.4^\circ$  e *Decl.* =  $-18.7^\circ$ , de forma muito semelhante às direções obtidas para Salitre II e III.

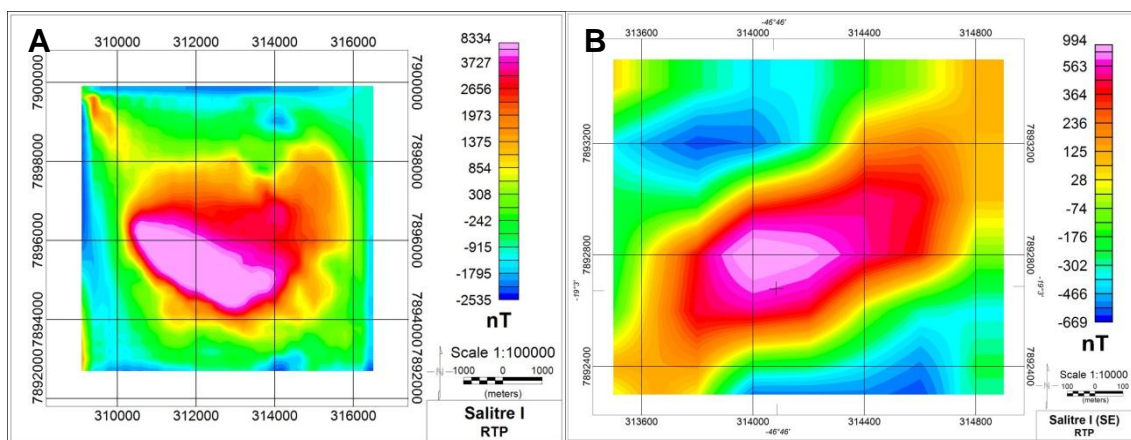


Figura 4.4.15 *RTP* de Salitre I detalhando em (A) a estrutura a NW, com inclinação a  $48.3^\circ$  e declinação a  $-155.4^\circ$ ; e em (B) o corpo a SE, com inclinação e declinação  $-30.4^\circ$  e  $-18.7^\circ$  respectivamente.

A partir dos valores de inclinação e declinação recuperados, foi novamente realizada a inversão dos dados magnéticos da região, agora considerando individualmente as direções de magnetização para cada corpo. O cenário de contraste magnético recuperado mostra contrastes de susceptibilidades relativos às porções dúnico-peridotíticas de Serra Negra, sem menção de contraste entre sua região central em relação à rocha encaixante (Fig.4.4.16). Salitre II foi recuperado como uma pequena extensão do corpo de Serra Negra com um contraste de 0.13 (S.I.) aproximadamente.

Sobre Salitre I, só foi possível a recuperação de sua parte piroxenítica, com um contraste de cerca de 0.18 (S.I.), porém sem indícios do corpo carbonatítico ao norte ou das rochas feldspáticas a sudeste. Salitre III foi identificado com o mesmo contraste de Salitre II (0.13 S.I.).

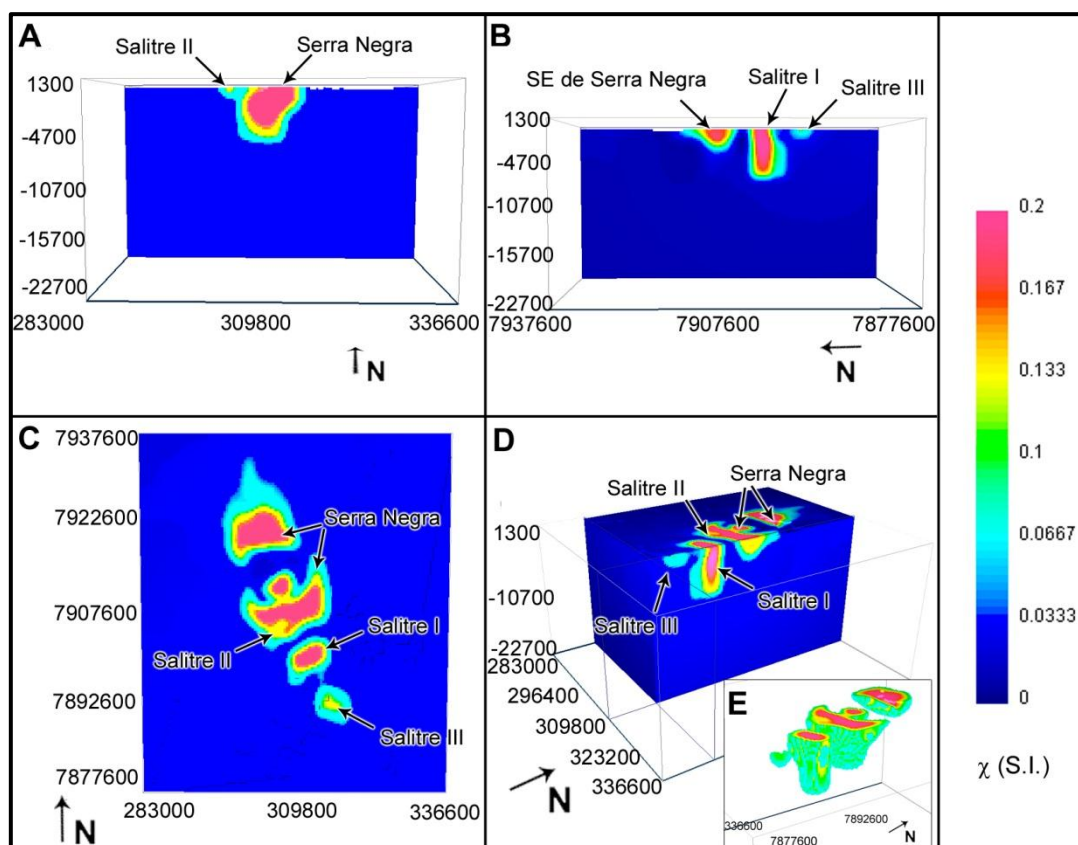


Figura 4.4.16 Inversão de dados magnéticos de Serra Negra e Salitre considerando as orientações de inclinação e declinação específicas de cada corpo. Nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva e (E), em detalhe, perspectiva com corte entre os contrastes de susceptibilidade de 0.1 a 0.2 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação  $-27.9^\circ$ ; declinação  $-20.5^\circ$ ; intensidade 23370 nT; projeção do campo magnético: variável com a localização (vide Tabela 4.4.1).

Em relação às demais inversões, o tempo de processamento desta última inversão foi substancialmente maior (51.48% em relação à inversão sem modelo inicial e 102.40% em relação a que fez uso do modelo), devendo-se à utilização de direções de magnetização total individualmente a cada corpo identificado pelo procedimento.

As características magnéticas das estruturas de Serra Negra e Salitre (Tabelas 4.4.1, 4.4.2 e 4.4.3), aliadas às informações de datações dos complexos, podem levar a uma proposição de evolução dos complexos. Segundo Sonoki e Garda (1988) e Gomes *et al.* (1990), a intrusão de Salitre I é pouco mais antiga que a de Serra Negra, desconsiderando seu erro associado ( $86.3 \pm 5.7$  Ma e 83 Ma, respectivamente).

Tabela 4.4.1 Características magnéticas do complexo de Serra Negra.

Complexo Alcalino-Carbonatítico de Serra Negra			
Vetor de Magnetização	Inclinação	Declinação	Intensidade
Induzida	-27.98°	-20.48°	370.67
Total	-43.90°	-20.00°	2000.00
Remanente	-37.55°	-140.63°	1989.65

Tabela 4.4.2 Características magnéticas do complexo de Salitre I, considerando o corpo bebedourítico a NW e as intrusões feldspáticas a SE.

Complexo Alcalino-Carbonatítico de Salitre I – Estrutura NW			
Vetor de Magnetização	Inclinação	Declinação	Intensidade
Induzida	-27.98°	-20.48°	278.00
Total	48.30°	-155.40°	800.00
Remanente	44.09°	-168.71°	1028.00
Complexo Alcalino-Carbonatítico de Salitre I – Estrutura SE			
Vetor de Magnetização	Inclinação	Declinação	Intensidade
Induzida	-27.98°	-20.48°	278.00
Total	-30.40°	-18.70°	400.00
Remanente	-44.13°	-20.50°	125.40

Tabela 4.4.3 Características magnéticas dos complexos de Salitre II e III.

Complexos Alcalino-Carbonatíticos de Salitre II			
Vetor de Magnetização	Inclinação	Declinação	Intensidade
Induzida	-27.98°	-20.48°	278.00
Total	-33.90°	-20.00°	500.00
Remanente	-32.50°	-20.97°	222.37
Complexos Alcalino-Carbonatíticos de Salitre III			
Vetor de Magnetização	Inclinação	Declinação	Intensidade
Induzida	-27.98°	-20.48°	278.00
Total	-33.90°	-20.00°	470.00
Remanente	-40.15°	-20.50°	194.57

Avaliando as direções de magnetização do complexo, é possível observar uma proximidade das orientações de magnetização das intrusões de Serra Negra, Salitre II, Salitre III e da porção a sudeste de Salitre I. A porção sudeste de Salitre I, ao contrário das demais, teve suas características inferidas por não ter sido possível recuperá-lo em nenhuma das inversões.

A porção noroeste de Salitre I, local dos pontos datados do complexo, apresenta uma magnetização com polarização reversa, permitindo a proposição da intrusão inicial do corpo NW de Salitre I, composto por bebedouritos, com uma direção de inclinação similar àquela observada em Tapira, de idade também similar, entre 87.2 e 85.6 Ma (SONOKI e GARDA, 1988); Mais tarde, aproveitando-se da zona de fraqueza que permitiu a colocação do magma de Salitre I (porção NW), teriam se instalado os demais

corpos, já após a reversão da polarização do campo magnético terrestre em aproximadamente 83 Ma indicada pela anomalia 34 do Oceano Atlântico (CANDE e KENT, 1992). A pequena variação de magnetização entre o grande corpo de Serra Negra e os menores Salitre II, III e rochas feldspáticas do sudeste de Salitre I, observada nas Tabelas 4.4.1, 4.4.2 e 4.4.3, pode ser devido à diferença de tempo de resfriamento entre esses corpos, dadas suas diferentes dimensões em função da variação secular do campo magnético terrestre.

Quanto ao comportamento da remanência dos complexos, Serra Negra apresentou uma Razão de Königsberg ( $Q$ ) de 5.37 para a porção correspondente aos peridotitos e dunitos das bordas do corpo. Para Salitre I, foram recuperadas  $Q = 3.70$  e 0.45 para os bebedouritos (NW) e intrusões feldspáticas (SE) respectivamente. Salitre II e III apresentaram  $Q = 0.80$  e 0.70.

## 4.5. COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍTICO DE CATALÃO I

Localizado em (18°08'S, 47°48'W), Catalão é o complexo alcalino mais setentrional da Província Ígnea do Alto do Paranaíba, sendo composto por duas intrusões, Catalão I (alvo deste estudo) e Catalão II.

Catalão I trata-se de uma estrutura aproximadamente circular, com 6 km de raio. Sonoki e Garda (1988) o datam por K/Ar em  $85 \pm 6.9$  Ma. Esta intrusão está instalada no grupo Araxá da Faixa Brasília, a qual é composta por quartzo-mica xistos, mica xistos, granada-quartzo-mica xistos, granada-cloritóide-quartzo-mica xistos, quartzitos e quartzitos micáceos (SEER *et al.*, 2005), indicando uma baixa susceptibilidade magnética para a rocha encaixante, de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  (S.I.) de acordo com Telford *et al.* (1990).

Segundo Brod *et al.* (2004), a instalação do complexo provocou uma deformação dômica dos xistos e quartzitos do grupo Araxá, com focos de brechação e fenitização.

De acordo com os mesmos autores, o complexo de Catalão I é caracterizado por dunitos, clinopiroxenitos, bebedouritos, carbonatitos, foscoritos e abundantes flogopititos metassomáticos. Em sua porção central é identificado um corpo de carbonatito cercado por rochas ultramáficas convertidas em flogopititos em intensidades variáveis (Fig. 4.5.1).



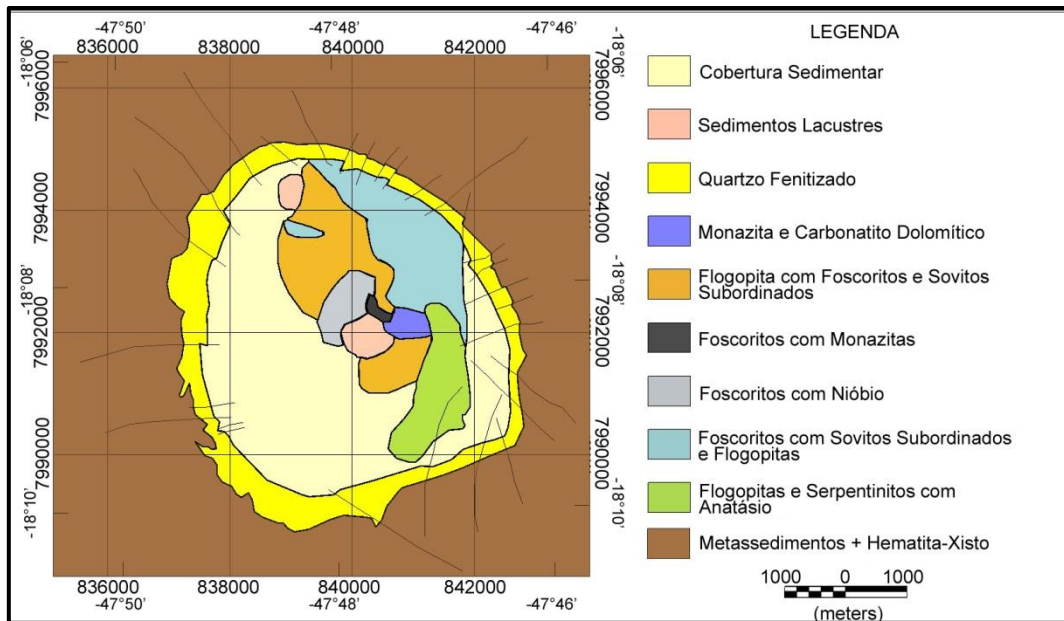


Figura 4.5.1 Mapa geológico de Catalão I (modificado de RIBEIRO, 2008).

Ribeiro (2008) indica uma evolução do complexo em três fases:

- Intrusão de magma primitivo sílico-carbonatado, que por imiscibilidade gerou um líquido silicático o qual, após diferenciação, cristalizou os dunitos, piroxenitos e veios carbonatíficos;
- Repartição por imiscibilidade de líquido carbonatítico em dois novos líquidos, foscorítico e carbonatítico, com evolução do primeiro formando cumulos de apatita.
- Divisão do líquido carbonático em um novo sub-trajeto de foscoritos e carbonatitos, sendo o primeiro rico em pirocloro e magnetita.

Ao *grid* de campo magnético total do complexo de Catalão I, foi aplicado um filtro de superfície polinomial de ordem 1 para a remoção regional-residual. O *grid* resultante é apresentado na Fig. 4.5.2. Catalão I apresenta uma anomalia magnética de polaridade

normal (ao hemisfério sul, negativo ao sul – positivo ao norte), com uma variação de intensidade de  $-4667$  nT a  $6534$  nT.

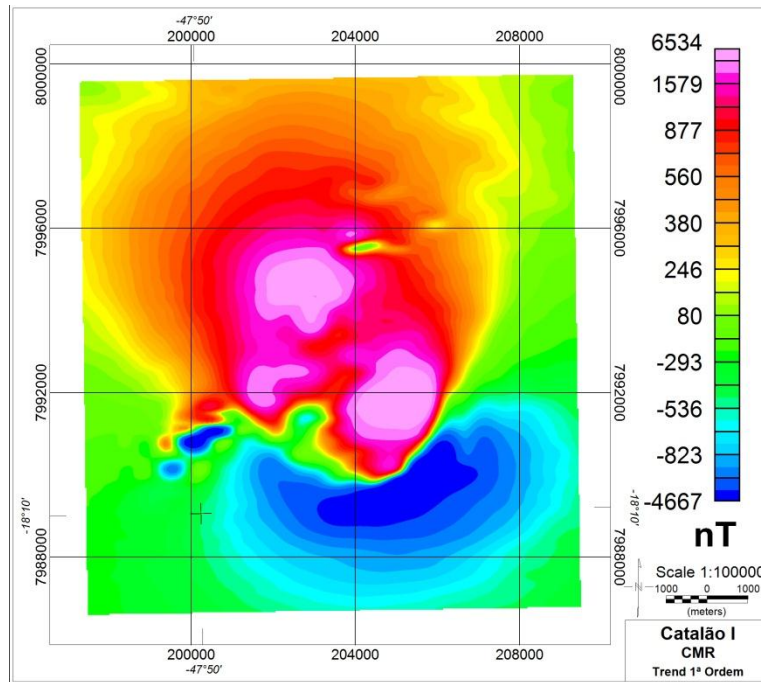


Figura 4.5.2 Mapa de campo magnético residual de Catalão I.

i. *EHD*

Os limites de Catalão I recuperados através do EHD indicaram três corpos principais compondo o complexo (Fig. 4.5.3). A oeste e a nordeste aparecem sinais de duas estruturas magnéticas que puderam ser identificadas como dependências da mina sobre Catalão I, podendo ser caracterizadas como anomalias culturais.

Os valores de maiores amplitudes do *EHD* de Catalão I indicaram estruturas com concentrações de minerais ferromagnéticos principalmente na borda sudeste, norte e oeste, porém seus formatos e posições não indicam relação com limites litológicos internos ao complexo conhecidos em superfície (Fig. 4.5.1).

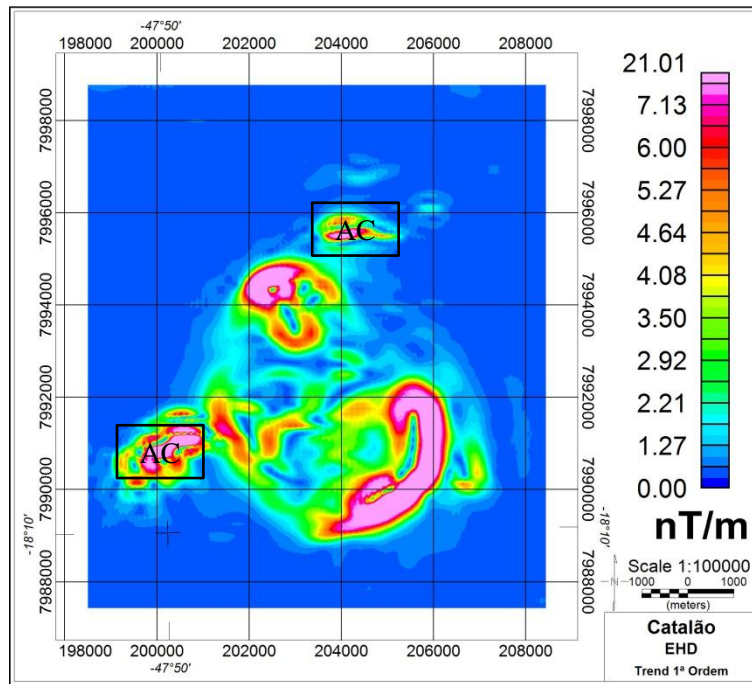


Figura 4.5.3 Mapa do *EHD* de Catalão I destacando as anomalias culturais (AC).

ii. *EHD-Depth* e Deconvolução de Euler

A etapa de estimativa de profundidades de Catalão levou a utilização tanto do *EHD-Depth* quanto da Deconvolução de Euler, isso devido ao caráter vertical do contato da intrusão, com feições dômicas em sua porção mais superficial. O *EHD-Depth* recuperou profundidades de cerca de 700 metros em média para os limites laterais das estruturas em sub-superfície (Fig. 4.5.4-A), com alguns pontos mais superficiais em regiões mais centrais ao complexo.

Levando-se em conta o topo dômico de Catalão, a deconvolução de Euler foi utilizado o índice 2.0 (vide Tabela 2.1), e recuperou profundidades de até 50 metros na região correspondente à litologia de foscritos com nióbio (mais central; Fig. 4.5.1). Na porção a nordeste, onde se encontram foscritos com sovitos subordinados e flogopitas em superfície, são estimadas profundidades entre 300 e 400 metros (Fig. 4.5.4-B).

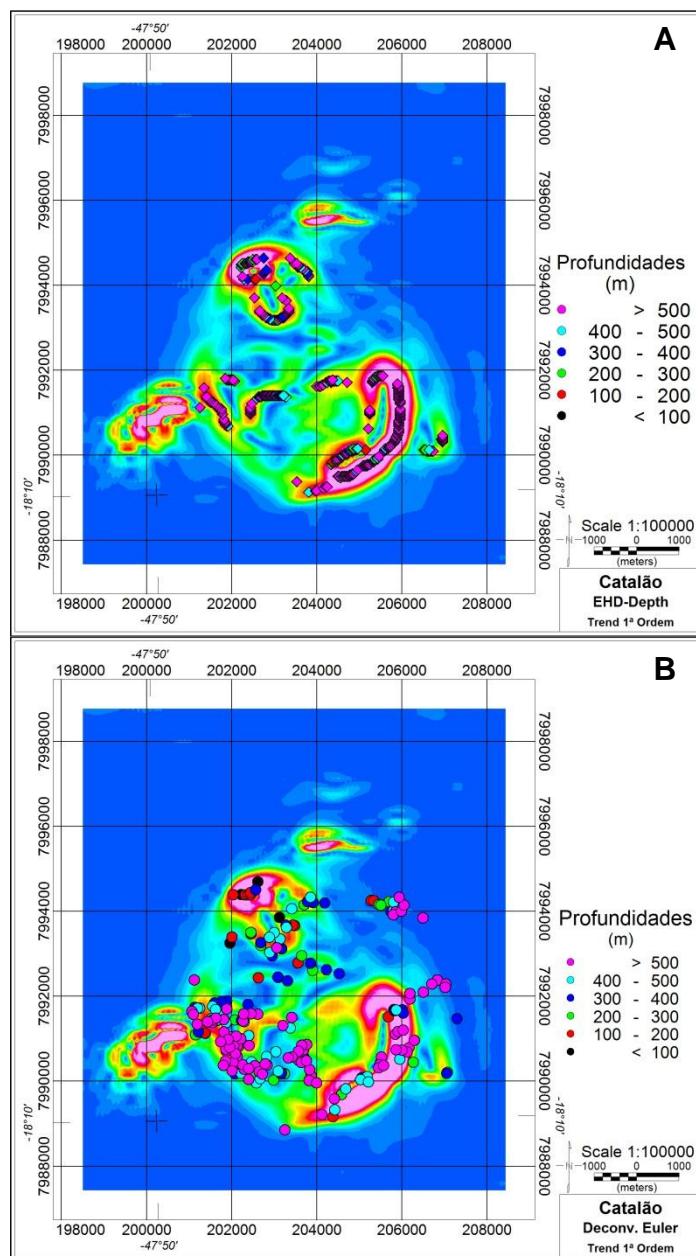


Figura 4.5.4 Estimativas de profundidade de Catalão I utilizando (A) *EHD-Depth* e (B) Deconvolução de Euler.

As profundidades recuperadas para a região central e nordeste de Catalão I, a qual possui sondagens publicadas em literatura (Fig. 4.5.5), indicaram boa correlação entre si, sugerindo profundidades até o topo da rocha fresca de 100 a 200 metros.

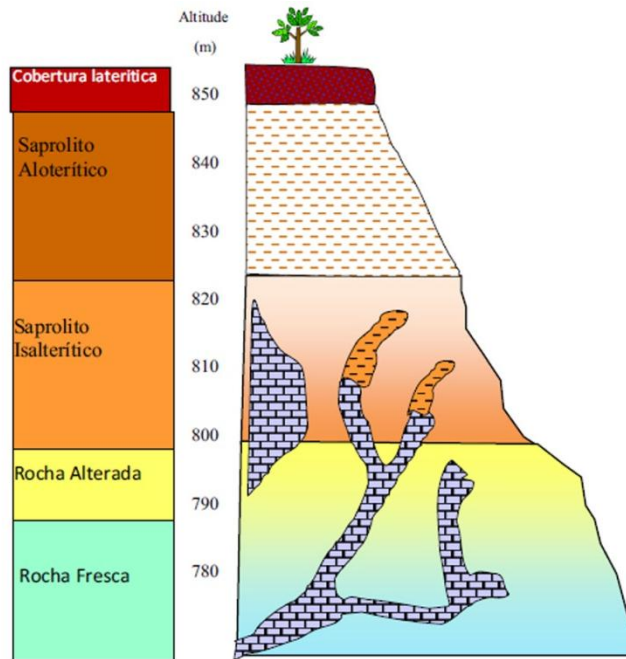


Figura 4.5.5 Esquema de perfil de alteração de Catalão I, em relação a altitude, baseado em testemunhos de sondagens coletados na mina da região norte/nordeste do complexo (modificado de OLIVEIRA e IMBERNON, 1998).

iii. *Redução ao Polo Magnético Iterativa – Método MinMax*

A redução ao polo magnético iterativa de Catalão I recuperou, da mesma forma que o *EHD*, três corpos de maior expressão magnética nas porções norte, oeste e sudeste do complexo, sem correlação direta com a geologia superficial (Fig. 4.5.6). As direções de inclinação e declinação que filtraram o *RTP* com sucesso foram  $-48.9^\circ$  e  $-14.5^\circ$  respectivamente.

Como esperado, os sinais magnéticos referentes às anomalias culturais próximas ao complexo não foram reduzidas ao polo propriamente, porém não afetaram os resultados do procedimento de análise magnética de Catalão.

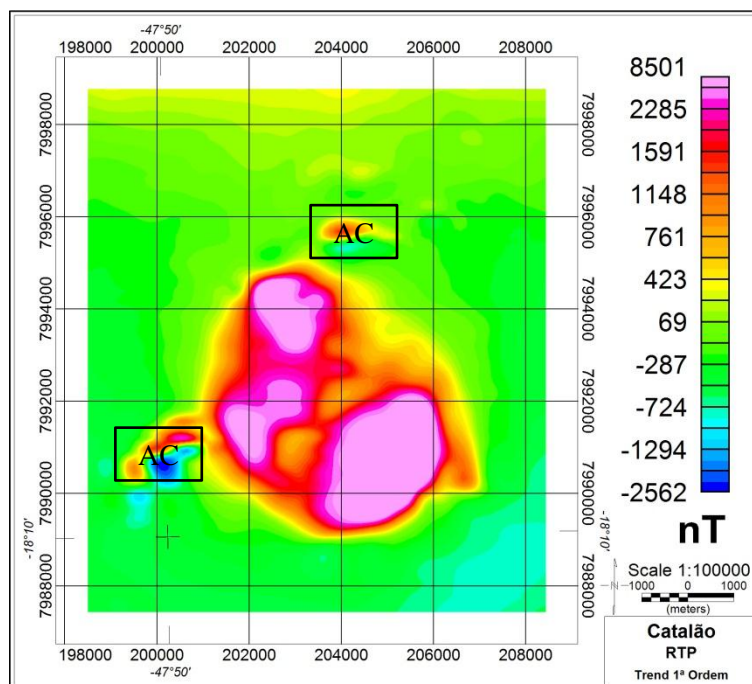


Figura 4.5.6 Redução ao polo magnético de Catalão I com inclinação de  $-48.9^\circ$  e declinação  $-14.5^\circ$ , destacando as anomalias culturais (AC).

iv. *Modelagem Inicial*

Contando com as estimativas obtidas pelo *EHD*, pelo *EHD-Depth*, pela Deconvolução de Euler e pelo *RTP*, somadas a dados geológicos do complexo de Catalão I e de sondagens realizadas por empresas de mineração em sua porção nordeste (disponíveis em *BROD et al.*, 2004; *RIBEIRO*, 2008), foi composto um modelo inicial para a inversão de dados magnéticos de acordo com o apresentado na Fig. 4.5.7.

Os corpos construídos no modelo inicial referentes àqueles observados pelas técnicas geofísicas (estruturas de susceptibilidade 0.13 S.I. na Fig. 4.5.7) foram inferidos com susceptibilidades magnéticas iniciais de 0.13 (S.I.). Ao modelo de prisma vertical (estrutura verde na Fig. 4.5.7), que engloba os três corpos magnéticos, foi atribuída a susceptibilidade de 0.02, comum a rochas ígneas metassomatizadas segundo a literatura (*TELFORD et al.*, 1990).

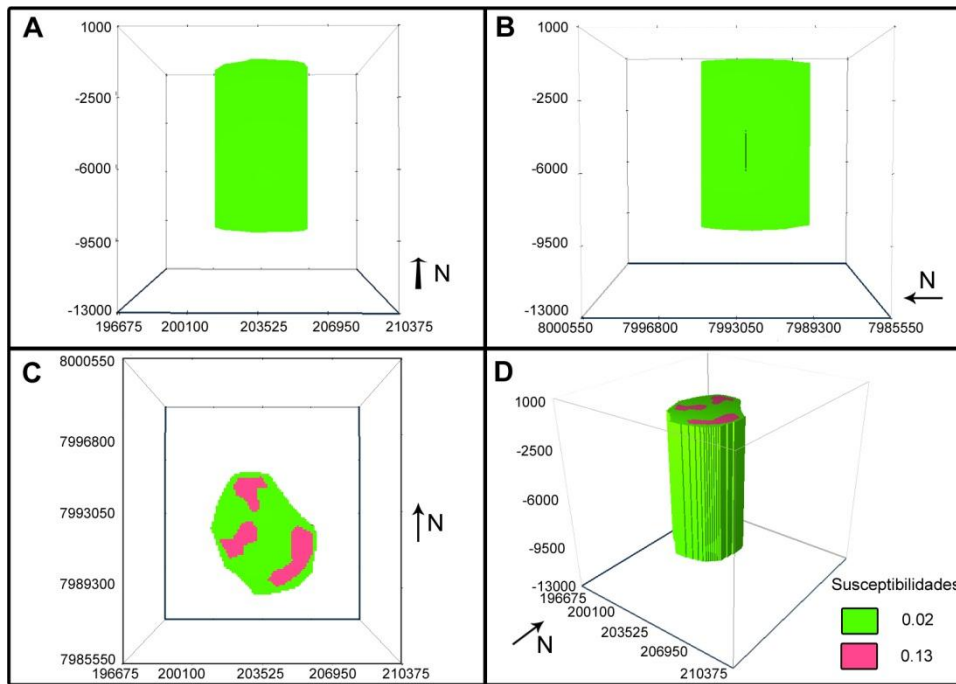


Figura 4.5.7 Modelo inicial para inversão de Catalão I, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo e (D) perspectiva.

v. *Inversões dos dados magnéticos*

As inversões de dados magnéticos de Catalão I renderam modelos que indicam, por ausência de contraste de susceptibilidade, a presença de uma litologia menos magnética na porção central do corpo, a qual se pode relacionar com o corpo carbonatítico do complexo.

Na inversão sem a utilização de modelo inicial, foram recuperadas as três estruturas magnéticas observadas nos resultados das técnicas do *EHD*, *EHD-Depth* e *RTP* (Fig. 4.5.8-C). A cerca de 1000 metros de profundidade, estas estruturas se unem formando um único corpo volumoso e arredondado que se estende até cerca de 10000 metros de profundidade (Fig. 4.5.8).



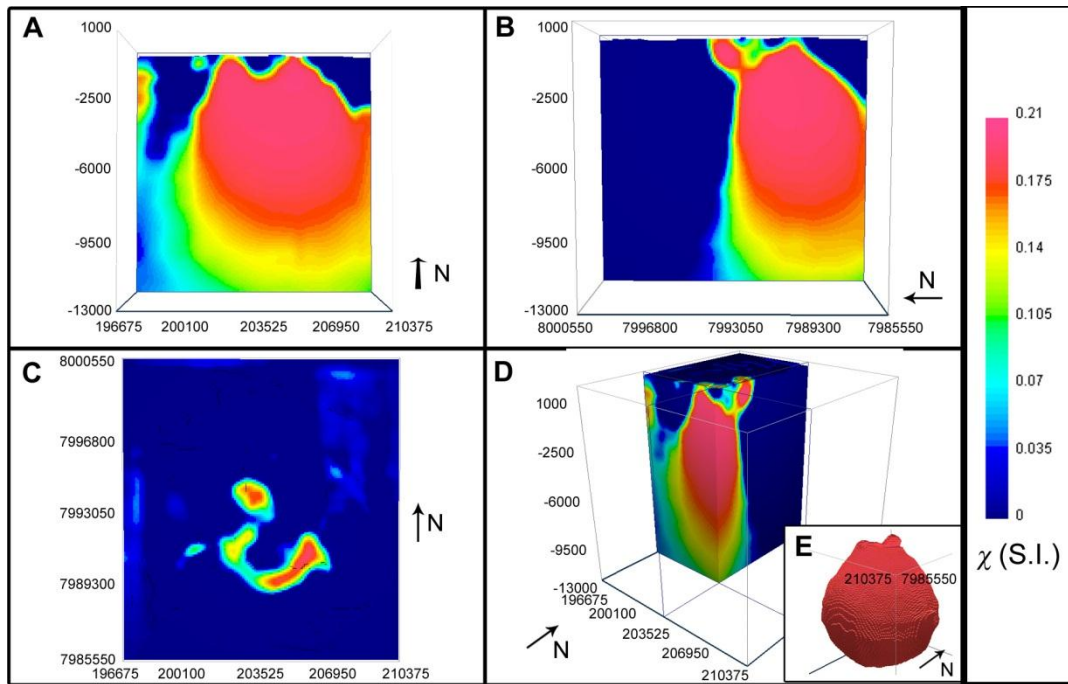


Figura 4.5.8 Inversão dos dados magnéticos de Catalão I sem a utilização de Modelo Inicial, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva e (E), em detalhe, perspectiva com corte de contraste de susceptibilidades entre 0.18 e 0.21. Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação  $-25.9^\circ$ ; declinação  $-20.1^\circ$ ; intensidade 23402 nT; projeção do campo magnético: inclinação  $-25.9^\circ$ ; declinação  $-20.1^\circ$ .

Esta inversão indica uma profundidade do topo do corpo a menos de 300 metros da superfície, como era esperado por meio de furos de sondagem, e um contraste de susceptibilidade de 0.21 (S.I.).

Ao utilizar o modelo inicial para a inversão, foi possível obter um corpo mais compacto, com menor extensão vertical, mas mantendo o posicionamento e limites laterais das estruturas magnéticas observadas com as técnicas de delimitação de bordas e estimativas de profundidades (Fig. 4.5.9).

Da mesma forma que a inversão sem modelo inicial, apresentou uma ligação entre as estruturas em profundidade, deixando uma porção com ausência de contraste de susceptibilidade aparente com a rocha encaixante. Esta porção, assim como proposto por Requejo e Mantovani (2011) e Marangoni e Mantovani (2013), pode ser associada à



presença do corpo carbonatítico do complexo de Catalão I, com uma extensão vertical de cerca de 1900 metros a partir da superfície, de forma similar aos 1700 metros indicados por estes autores.

As dimensões do corpo recuperado se assemelham com aquelas propostas por Requejo e Mantovani (2011) e Marangoni e Mantovani (2013), apesar da susceptibilidade menor, com o volume do corpo recuperado em aproximadamente 79 km<sup>3</sup> em relação aos 75.1km<sup>3</sup> propostos pelos autores acima.

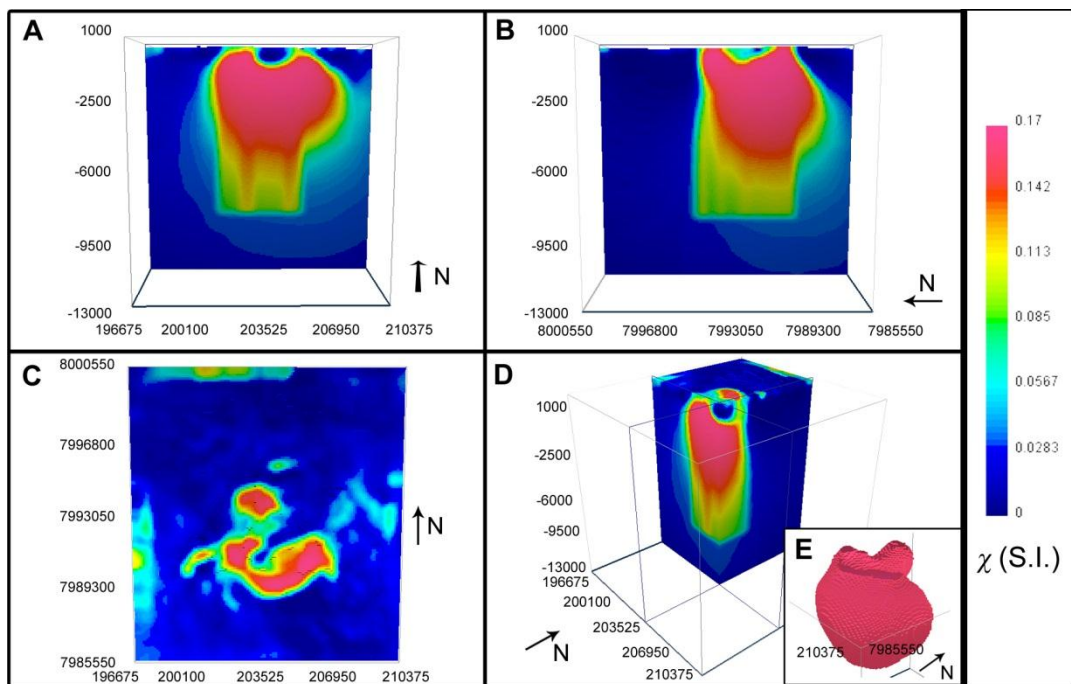


Figura 4.5.9 Inversão dos dados magnéticos de Catalão I com a utilização de Modelo Inicial, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva e (E), em detalhe, perspectiva com corte de contraste de susceptibilidades entre 0.15 e 0.17. Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação -25.9°; declinação -20.1°; intensidade 23402 nT; projeção do campo magnético: inclinação -78.7°; declinação -27.1°.

Por outro lado, diferentemente da inversão sem o modelo inicial, a utilização do mesmo permitiu a recuperação de uma susceptibilidade aparente menor, mais próxima daquela sugerida para peridotitos (entre 0.09 S.I. e 0.2 S.I.) e piroxenitos (0.15 S.I.) por Telford *et al.* (1990). O tempo de inversão obtido com o uso do modelo inicial em Catalão I foi reduzido em 46.34%.

vi. *Modelagem Final*

Ao atribuir as direções de magnetização induzida e total ao modelo de contrastes de susceptibilidades recuperada com a inversão utilizando o modelo inicial, foi possível estimar o vetor de magnetização remanente de Catalão I. Suas características magnéticas são apresentadas na Tabela 4.5.1.

Tabela 4.5.1 Características magnéticas estimadas para o complexo de Catalão I.

Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão			
Vetor de Magnetização	Inclinação	Declinação	Intensidade
Induzida	-25.90°	-20.10°	316.00
Total	-48.90°	-14.50°	700.00
Remanente	-65.78°	-5.59°	431.96

Esta etapa indicou uma magnetização total com direções de inclinação e declinação relativamente próximas às do campo magnético terrestre na época do levantamento, o que justifica a polaridade normal da anomalia, mesmo na presença de uma remanência significativa. A Razão de Königsberg obtida para Catalão I foi de 1.37, representando uma significância maior da magnetização remanente do que a induzida, e indiretamente, uma concentração alta de minerais como titanomagnetitas e óxidos de Fe e Ti no complexo.

O contraste de susceptibilidade recuperado permite relacionar o modelo invertido com rochas oriundas do primeiro estágio evolutivo de Catalão I, representado por dunitos e piroxenitos carbonatados, vinculando o modelo matemático à geologia do complexo.

## 5. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES: CASOS REAIS: PRSI

A porção do sudoeste da Cráton Amazônico é representada por quatro províncias proterozóicas subparalelas (CORDANI e TEIXEIRA, 2007; CORDANI *et al.*, 2009): Ventuari-Tapajós (2.00-1.80 Ga), Rio Negro-Juruena (1.78-1.55 Ga), Rondoniana-San Ignácio (1.50-1.30 Ga) e Sunsás-Aguapeí (1.25-1.00 Ga; Fig. 5.1).

Bettencourt *et al.* (2010) propõem que a Província Rondoniana-San Ignácio (PRSI) seja um orógeno composto, consistindo de um orógeno acrecionário complexo (1556-1430 Ma) seguido pela colisão de um microcontinente com o continente em 1340-1320 Ma. Segundo esses autores, as principais províncias que compõem a PRSI são: o Terreno Paraguá, Terreno Jauru, Terreno Rio Alegre e o Cinturão Alto Guaporé (Fig. 5.1).

A cratonização da PRSI ocorreu entre 1.30 Ga (idades Ar-Ar) e 1.25 Ga (idades K-Ar) e foi seguida por uma reativação tectônica, deformação, impressão térmica e magmatismo relacionados à Orogenia Sunsás (Bettencourt *et al.*, 2010). Estes efeitos são manifestados através de extensas zonas de cisalhamento (ex.: Zona de Cisalhamento Ji-Paraná – SCANDOLARA *et al.*, 1999; TOHVER *et al.*, 2005), cinturões miloníticos, rifts e bacias sedimentares, e intrusões pós-tectônicas e anorogenéticas (CORDANI e TEIXEIRA, 2007; CORDANI *et al.*, 2009; TEIXEIRA *et al.*, 2010).

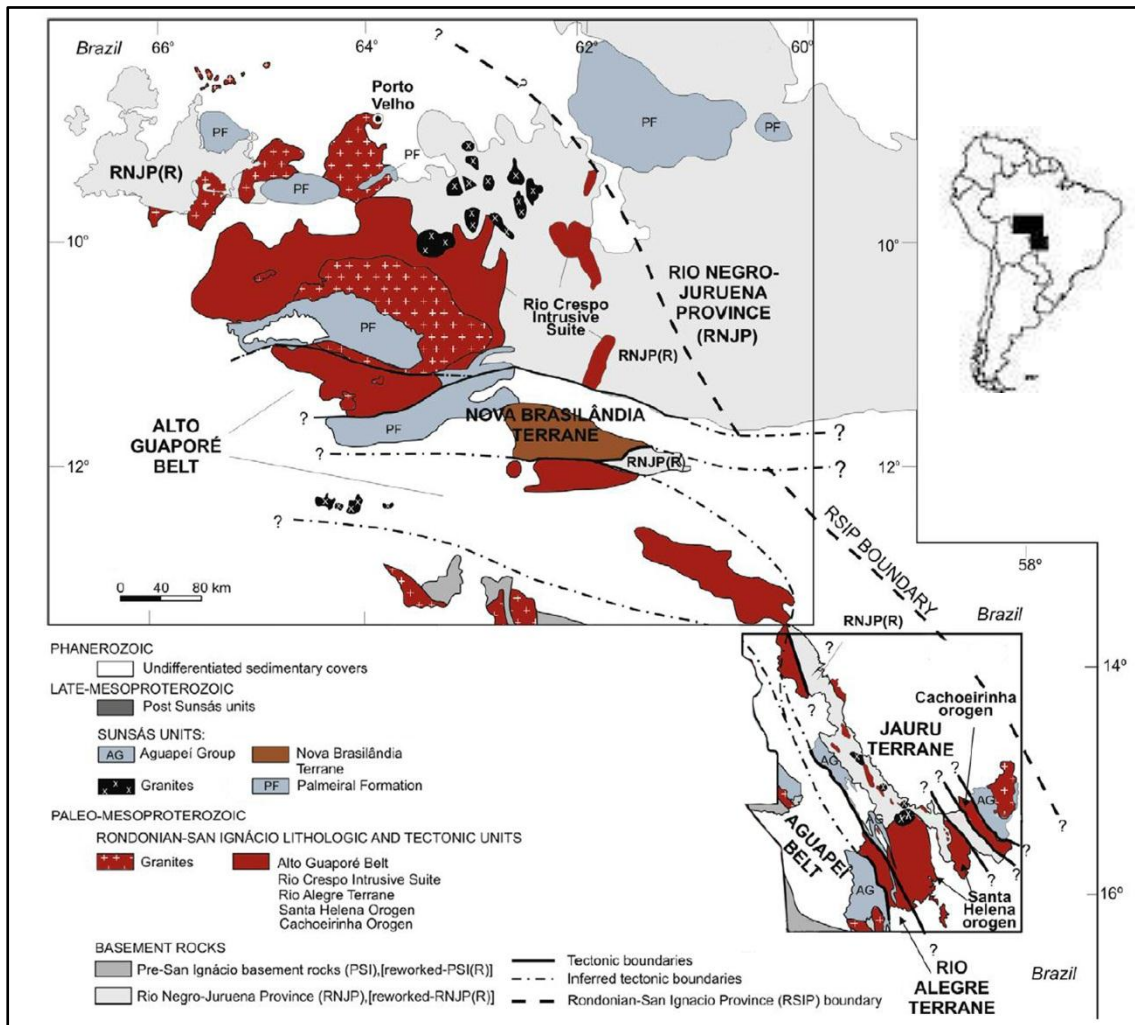


Figura 5.1 Mapa simplificado da porção brasileira do SW do Cráton Amazônico apresentando os limites das principais províncias, orógenos, terrenos, cinturões e unidades litológicas (adaptado de BETTENCOURT *et al.*, 2010).

Neste escopo, a estrutura de interesse deste trabalho é o Cinturão Alto Guaporé, onde está instalado o Terreno Nova Brasilândia.

O Cinturão Alto Guaporé é uma região com direção WNW-ESE (aproximadamente 500x100 km) ao longo da região sul e sudeste de Rondônia. O limite norte é demarcado pela Bacia Pacaás Novos, Suíte Intrusiva Alto Candeias, Terreno Nova Brasilândia e Província Rio Negro-Juruena. Os limites ao norte e ao sul são muito pouco conhecidos, uma vez que estes são cobertos pela sequência sedimentar fanerozóica (Fig. 5.1).

## 5.1. ANOMALIA MAGNÉTICA DE MORRO DO LEME

Na porção oeste do estado do Mato Grosso, encontra-se o Distrito Niquelífero de Comodoro, representado pelos depósitos de Morros do Leme e do Sem Boné, com ocorrências conhecidas de níquel laterítico (Fig. 5.1.1). Morro do Leme possui reservas totais de 14.306.000t com altas concentrações de Ni (teor de 1,8%; NUNES, 2000).

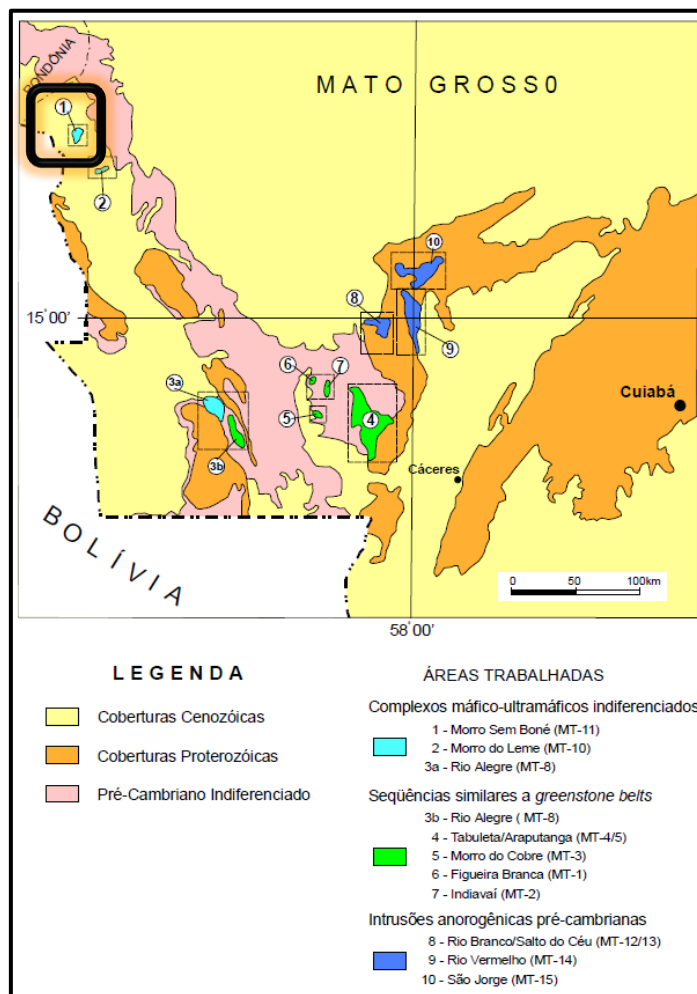


Figura 5.1.1 Áreas trabalhadas pelo “Projeto Grupo das Platinas” da CPRM localizando a noroeste o Morro do Leme (NUNES, 2000).

Depósitos lateríticos niquelíferos são originados pela alteração de rochas máficas ou ultramáficas contendo olivina e ortopiroxenito, minerais com altas susceptibilidades magnéticas.

Segundo Nunes (2000), Morro do Leme apresenta concentrações de níquel em seu manto laterítico, que varia de 20 a 40 metros de espessura, e concentrações magmáticas de sulfetos e cromitas em intercalações entre ambas a cerca de 150 metros, apresentando valores anômalos de Ni, Cu, Au e Elementos do Grupo da Platina (EGP).

O Morro do Leme está situado na Província Sunsás, unidade mais jovem do cráton Amazônico, caracterizada por rochas geradas pela erosão, deposição e subsequente deformação e metamorfismo da crosta continental mais antiga que 1.3 Ga (TASSINARI e MACAMBIRA, 1999). Dentro deste contexto está a Sequência Nova Brasilândia, que se estende desde o sudoeste de Rondônia, onde aflora até a região de Morro do Leme.

Segundo Scandolara *et al.* (1992) *apud* Nunes (2000), a Sequência Nova Brasilândia é definida como metavulcanossedimentar, sendo composta por rochas psamo-pelíticas, químico exalativas, metabasaltos de fundo oceânico e piroclásticas, metamorfisadas na fácies anfíbolito e com idade atribuída ao início do Mesoproterozóico. A região do Morro do Leme está encoberta por uma camada de detrito laterítico pertencente à formação Guaporé do Cinturão Alto Guaporé, de idade cenozóica. Estas características permitem a inferência de uma susceptibilidade média de cerca de 0.01 S.I., segundo Telford *et al.* (1990).

O Morro do Leme é parte da suíte intrusiva básica-ultrabásica Cacoal a qual, na região do alvo, é composta por dunitos e peridotitos normalmente serpentinizados de idade mesoproterozóica (NUNES, 2000). O depósito de Morro do Leme é constituído

por três corpos (Fig. 5.1.2), definidos como Morros 1 (intrusão principal), 2 (a NW) e 3 (a SW), sendo a estes inferidas susceptibilidades médias de 0.16 S.I. – em referência a esperada para peridotitos, baseando-se em Telford *et al.* (1990)

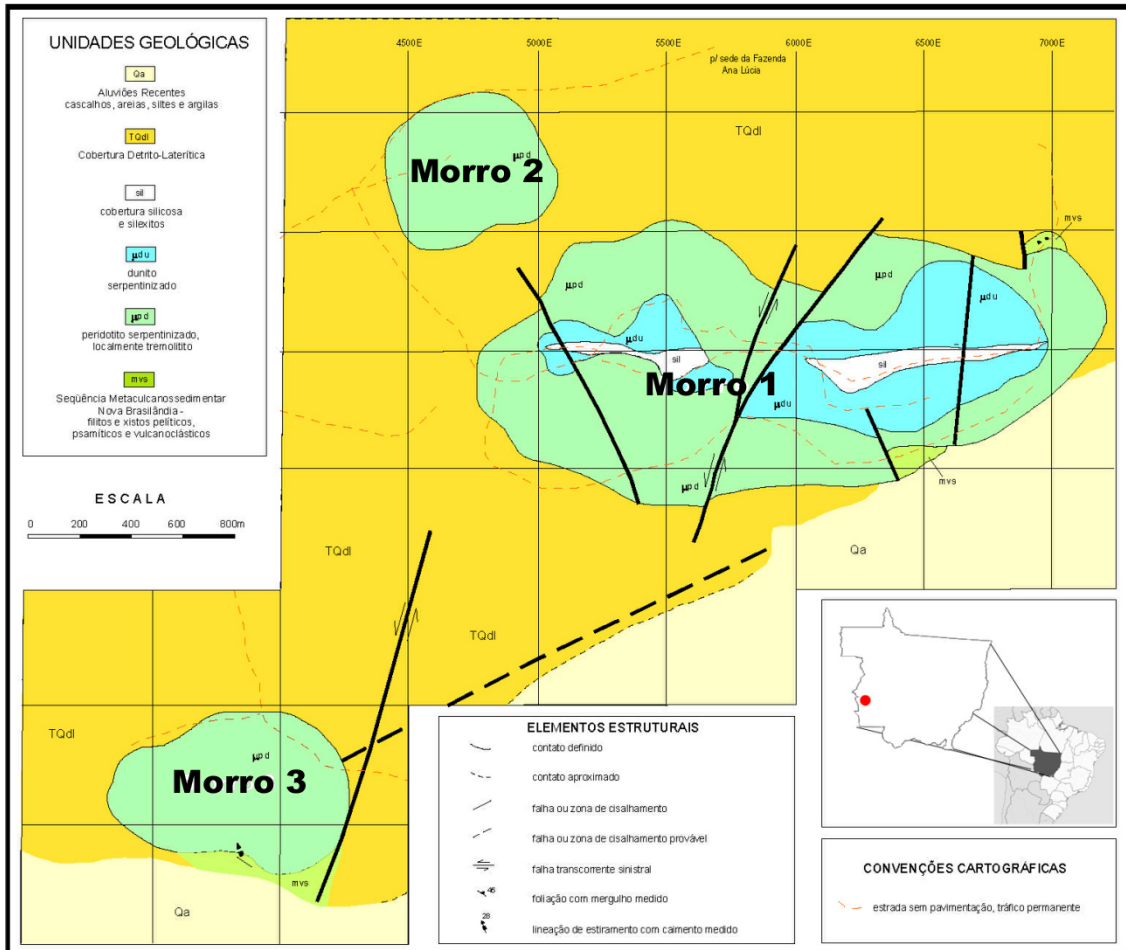


Figura 5.1.2 Mapa geológico de Morro do Leme apresentando suas três intrusões (modificado de NUNES, 2000).

A região de Morro do Leme foi amostrada por meio de aerolevantamentos do projeto “1068 – Sudeste de Rondônia” do Serviço Geológico Brasileiro (CPRM), ocorrido entre Maio e Julho de 2006. Este levantamento contou com linhas de voo N-S espaçadas de 500 metros entre si e controladas por linhas E-W a cada 10 km. A altura de voo foi mantida a cerca de 100 metros.

O campo magnético da região de Morro do Leme revela três anomalias de polarização reversa à esperada para corpos intrudidos no hemisfério sul (Fig. 5.1.3). Seus posicionamentos são facilmente relacionáveis com os três corpos identificados pela geologia (Fig. 5.1.2), assim como seus comportamentos alongados na direção E-W. Ao campo magnético total foi aplicado um filtro de superfície polinomial de 1ª ordem para a separação das componentes regional e residual do mesmo.

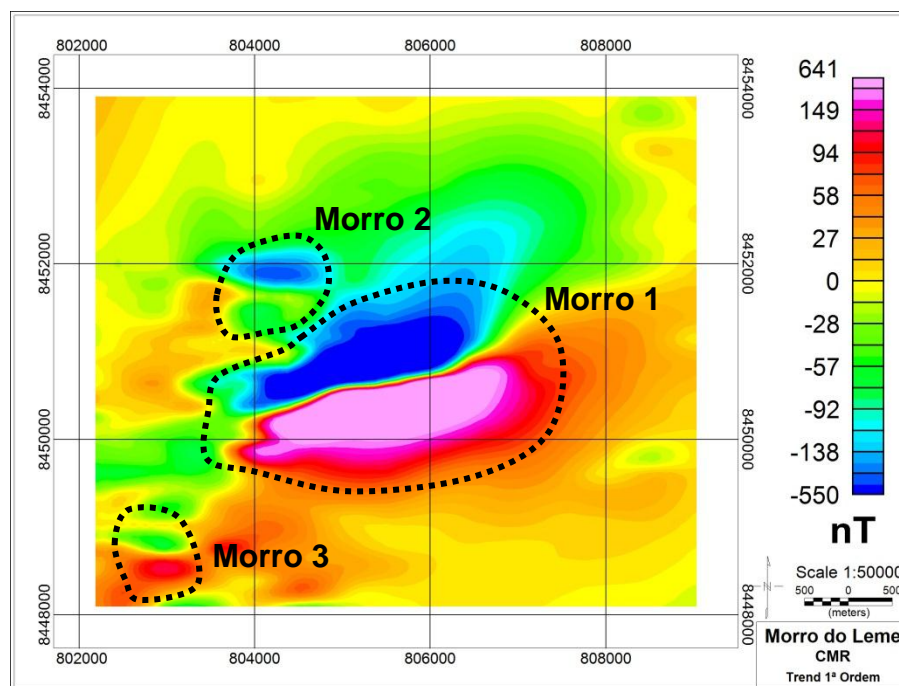


Figura 5.1.3 Campo magnético residual da região de Morro do Leme, destacando as anomalias referentes às três intrusões em pontilhado.

*i. EHD*

Assim como esperado devido ao comportamento do campo magnético residual da região de Morro do Leme, o *EHD* revelou contrastes de sinal alongados na direção E-W (Fig. 5.1.4), caracterizando Morro 1 como um alvo aproximadamente elíptico com dimensões de cerca de 2750 m (E-W) por 1080 m (N-S). Morro 2, localizado a noroeste de Morro 1, possui um comportamento aproximadamente circular, com 700 metros de



raio. O Morro 3, assim como Morro 1, apresenta uma anomalia quase elíptica, com 630 m (E-W) por 400 m (N-S).

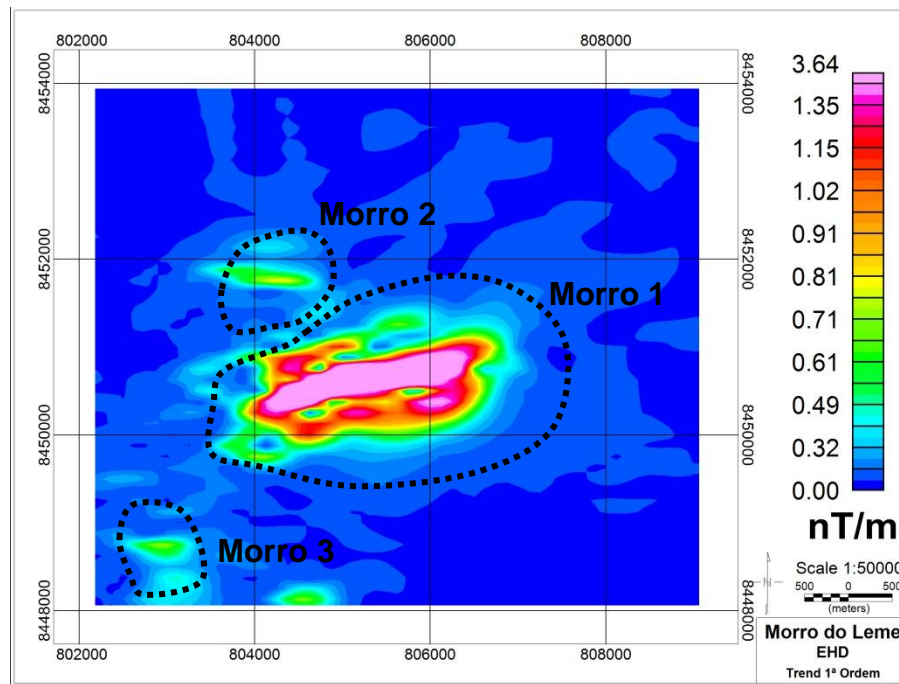


Figura 5.1.4 EHD da região de Morro do Leme, identificando em pontilhado os sinais relacionáveis com as três intrusões estudadas.

## ii. EHD-Depth

A avaliação das estimativas de profundidades de Morro do Leme via *EHD-Depth*, posicionou as possíveis rochas frescas entre (Fig.5.1.5):

- Morro 1: 59 e 200 metros;
- Morro 2: 90 e 136 metros;
- Morro 3: 69 e 112 metros.

As profundidades referentes ao Morro 1 corroboram com informações de sondagens apresentadas por Nunes (2000), as quais apontam a rocha fresca entre 20 e 40 metros de profundidade (Fig. 5.1.6).

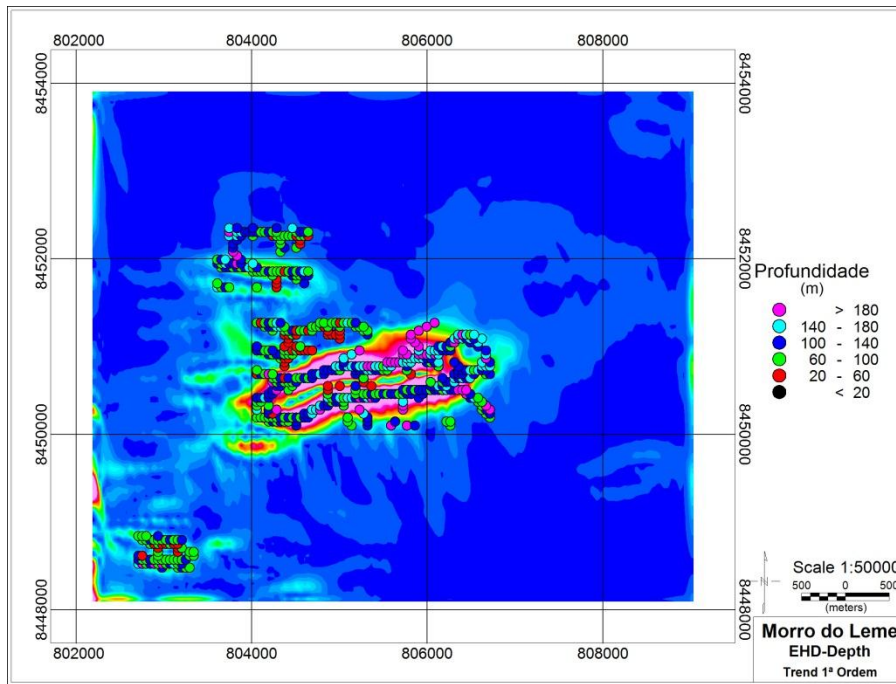


Figura 5.1.5 Estimativa de profundidades de Morro do Leme através do *EHD-Depth*.

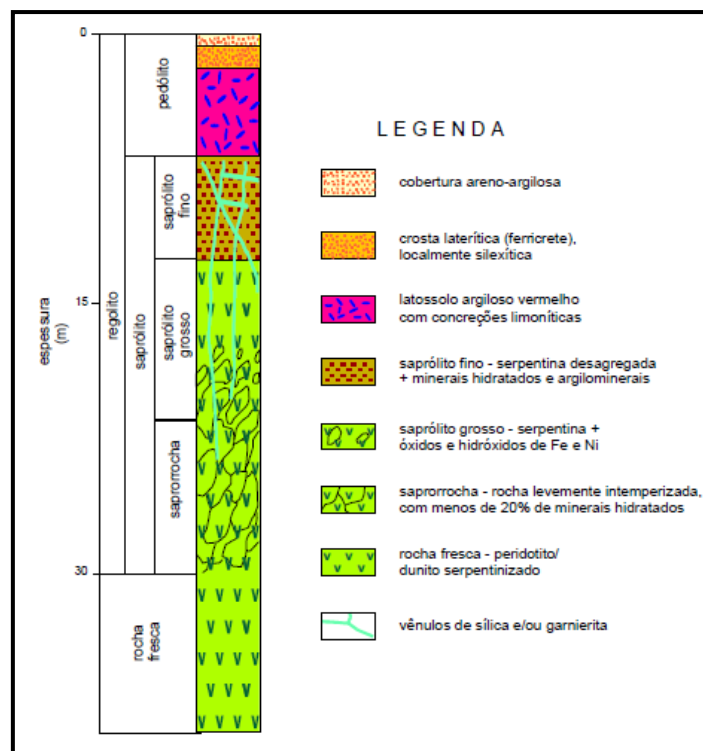


Figura 5.1.6 Esquema de sondagem realizada no Morro 1 (NUNES, 2000).

iii. *Redução ao Polo Magnético Iterativa – Método MinMax*

Quando submetidos à redução ao pólo magnético iterativa, os sinais relacionados aos três morros foram reduzidos com sucesso utilizando o mesmo par de inclinação e declinação (Fig. 5.1.7). Isto significa que as três intrusões tiveram seu resfriamento concomitantemente e, se passaram por eventos metamórficos com potencial para alteração de suas características magnéticas, tiveram resultados similares.

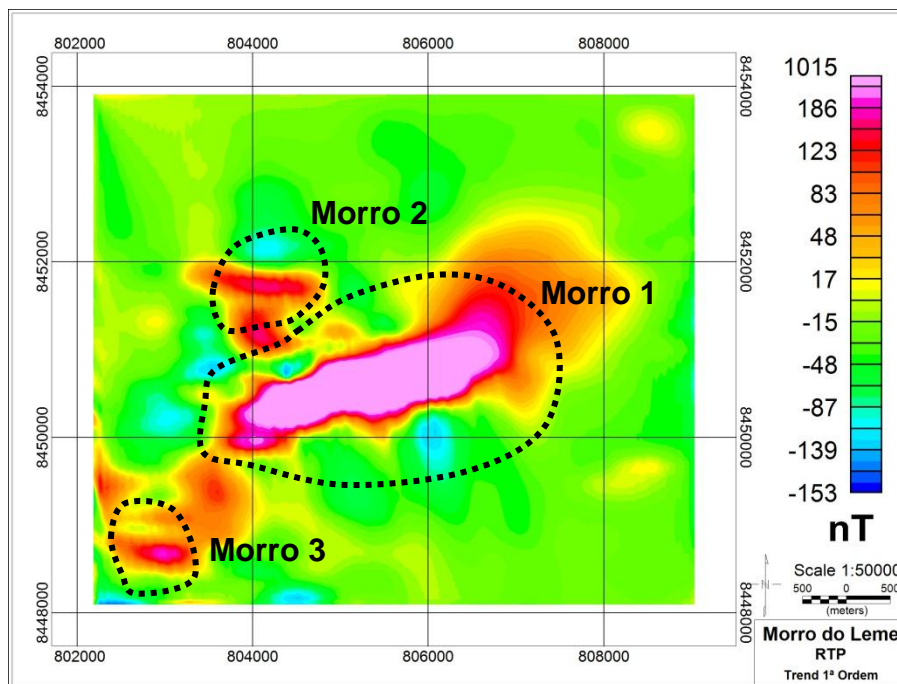


Figura 5.1.7 RTP de Morro do Leme identificando em pontilhado os sinais relacionáveis com as três intrusões.

O par de inclinação e declinação recuperado pelo RTP foi de  $64.8^\circ$  e  $-141.8^\circ$  respectivamente. A Fig. 5.1.7, mais uma vez caracteriza as estruturas magnéticas através de sinais alongados na direção E-W.

iv. *Modelagem Inicial*

Uma vez estimados os limites laterais dos três morros, as profundidades das intrusões nestes pontos e inferidas as susceptibilidades magnéticas dos corpos e da rocha encaixante por meio de estudos anteriores, foi possível a construção do cenário inicial da Fig. 5.1.8.

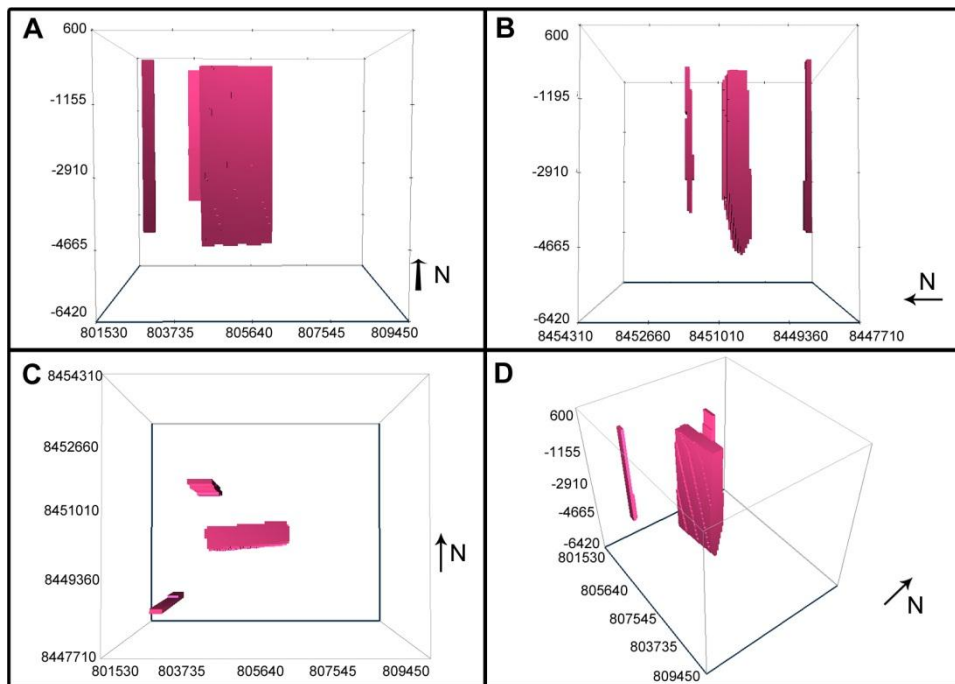


Figura 5.1.8 Modelo inicial de Morro do Leme, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo e (D) perspectiva.

Aos três corpos foram atribuídas susceptibilidades de 0.16 (S.I.), de acordo com indicado por Telford *et al.* (1990) para peridotitos.

v. *Inversões dos dados magnéticos*

A inversão sem utilização de modelo inicial recuperou apenas o corpo principal de Morro do Leme, fornecendo com um contraste de susceptibilidade de 0.08 a 0.16 (S.I.) condizente com o esperado para a litologia local (Fig. 5.1.9). Porém, os limites

espaciais deste modelo não estavam de acordo com as estimativas de bordas e profundidades obtidas pelo *EHD* e *EHD-Depth*, apresentando dois corpos bastante inclinados convergindo para a mesma região em superfície. Neste caso nota-se uma ausência de estruturas na região onde foram caracterizadas as profundidades mais rasas do Morro 1.

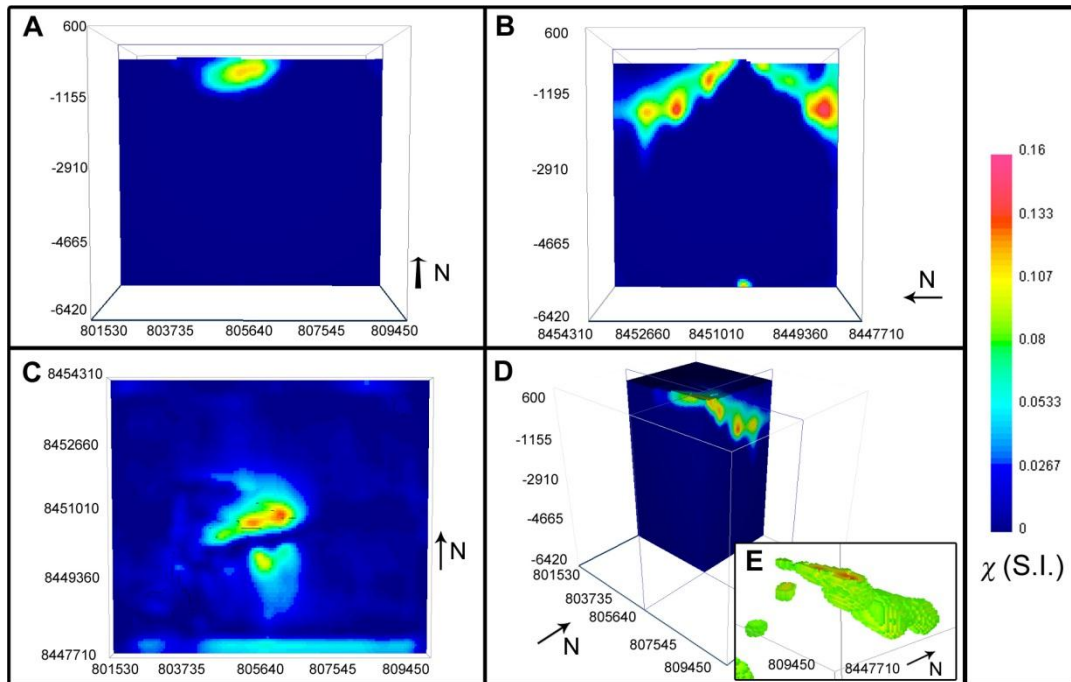


Figura 5.1.9 Modelo de contraste de susceptibilidade de Morro do Leme obtido com a inversão sem modelo inicial, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva e (E), em detalhe, perspectiva com corte de susceptibilidades entre 0.08 e 0.16 (S.I.). Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação  $-8.9^\circ$ ; declinação  $-13.1^\circ$ ; intensidade 23843 nT; projeção do campo magnético: inclinação  $-8.9^\circ$ ; declinação  $-13.1^\circ$ .

Ao utilizar o modelo inicial da Fig. 5.1.8 na inversão, foi possível recuperar corpos relacionáveis com as três intrusões. (Fig. 5.1.10). Estes corpos, alongados na direção E-W, apresentaram contrastes de susceptibilidades distintos. O modelo do Morro 1 apresentou um contraste de cerca de 0.12 (S.I.) – dentro do esperado para uma intrusão dunítica-peridotítica com serpentinização. Já os modelos dos Morros 2 e 3, revelaram contrastes de aproximadamente 0.03 S.I.

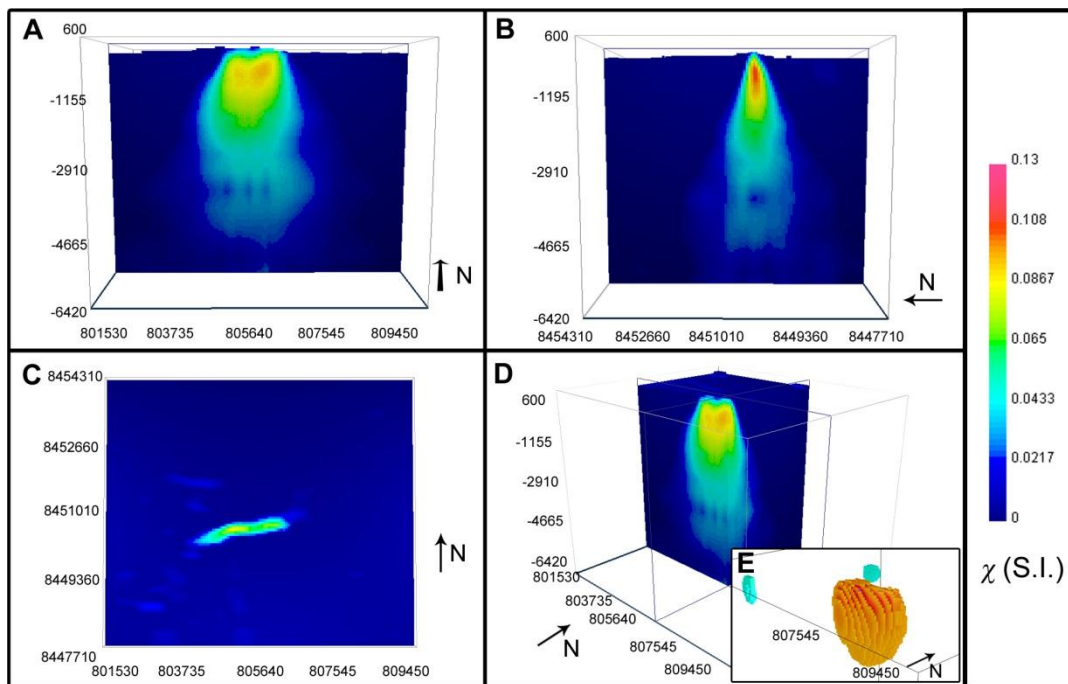


Figura 5.1.10 Modelo de contraste de susceptibilidade de Morro do Leme obtido com a inversão com modelo inicial, nas vistas: (A) sul, (B) oeste, (C) topo, (D) perspectiva e (E), em detalhe, perspectiva com corte de susceptibilidades entre 0.02 (S.I.) e 0.03 (S.I.), em azul, e 0.10 e 0.13 (S.I.) em amarelo-avermelhado. Dados utilizados: campo magnético induzido: inclinação  $-8.9^\circ$ ; declinação  $-13.1^\circ$ ; intensidade 23843 nT; projeção do campo magnético: inclinação  $64.8^\circ$ ; declinação  $-141.2^\circ$ .

Este contraste de susceptibilidades dos modelos dos Morros 2 e 3, pode estar relacionado a alteração em alto grau por intemperismo, visto que são corpos antigos, relativamente pequenos e localizados a latitudes sub-equatoriais; e, principalmente a sub-amostragem dos corpos devido a seus tamanhos em relação ao espaçamento entre linhas de voo do aerolevantamento.

#### vi. *Modelagem Final*

Ao utilizar o modelo de contraste de susceptibilidades obtido com a inversão com modelo inicial de Morro do Leme, foi possível estimar as direções de magnetização remanente do alvo (Tabela 5.1.1).

Tabela 5.1.1 Características magnéticas recuperadas da Anomalia de Morro do Leme

Anomalia de Morro do Leme			
Vetor de Magnetização	Inclinação	Declinação	Intensidade
Induzida	-8.50°	-12.90°	304.36
Total	64.80°	-141.80°	140.00
Remanente	26.62°	174.95°	382.52

As componentes dos vetores de magnetização remanente e induzida indicaram uma Razão de Köenigsberg de 1.26, com uma intensidade de remanência um pouco maior que a intensidade induzida.

Com a composição de um modelo bem vinculado a dados geológicos, é possível indicar que, uma vez que os modelos recuperados apresentam o comportamento espacial da rocha fresca em sub-superfície, os melhores locais para exploração de níquel estão localizados próximos às bordas do Morro 1 – especialmente a sul, devido a maior espessura do manto laterítico. Por outro lado, se o alvo exploratório forem os cromititos e/ou os sulfetos enriquecidos em Ni, Cu, Au e EGP, os pontos mais interessantes estão localizados na porção central do Morro 1, onde o manto laterítico é menos espesso.

Quanto aos Morros 2 e 3, quaisquer conclusões podem ser arriscadas por conta de sua sub-amostragem devido a seus tamanhos em relação ao espaçamento entre linhas de voo do aerolevanteamento.

## 6. CONCLUSÕES

O processamento de anomalias magnéticas, especialmente relacionadas a corpos minerais em que a magnetização remanente compõe boa parte da magnetização total, pode representar o sucesso ou não de uma inversão.

Em casos de inexistência de informações prévias à análise deste tipo de dados, o processamento se torna ainda mais necessário para o vínculo e limitação do modelo calculado com parâmetros físicos/geológicos cabíveis ao cenário em estudo.

Este trabalho propõe um procedimento de análise de dados magnéticos para delimitação espacial e das características magnéticas de uma dada anomalia, correspondente à estruturas geológicas aflorantes ou não. Este procedimento visa justamente compreender ao máximo as características da possível fonte magnética para, posteriormente, restringir os resultados da inversão desses dados aos parâmetros estimados.

O procedimento de análise de dados magnéticos consistiu de seis passos básicos, podendo o último ser estendido quando necessário, como em casos de anomalias com interferências entre si ou de estruturas não relacionadas (por exemplo, anomalia de Pratinha I e complexos de Serra Negra e Salitre I, II e III). Os passos são:

- *Determinação dos limites laterais;*
- *Estimativa da profundidade (dos limites laterais determinados e/ou do topo);*



- *Estimativa das direções de inclinação e declinação médias da magnetização total* da fonte (soma vetorial das magnetizações induzida e remanente);
- *Modelagem inicial* da fonte magnética, contando com os limites espaciais e direções de magnetização total estimados, com inferência da susceptibilidade magnética baseada em literatura específica do alvo e/ou da região onde este se encontra;
- *Inversão dos dados magnéticos* vinculando o modelo a ser recuperado com as informações obtidas nos passos anteriores;
- *Modelagem final* a partir do cenário de contraste de susceptibilidades recuperado com a inversão, inserindo no mesmo as características magnéticas estimadas da magnetização total, de modo a determinar o vetor de magnetização remanente médio do alvo.

Este procedimento foi aplicado a 108 modelos sintéticos de diferentes geometrias, susceptibilidades magnéticas, razões de Königsberg e direções de inclinação e de declinação totais para determinação de sua eficiência.

Foi possível constatar que o procedimento tem grande eficácia principalmente em cenários com uma única fonte magnética, recuperando os atributos espaciais e físicos dos modelos com erros menores que 10%. Em casos de várias fontes próximas, o procedimento tendeu a recuperar muito bem as características das fontes com maiores intensidades de magnetização total, em detrimento de outros corpos próximos de menor magnitude desta magnetização.

Quanto à delimitação lateral dos corpos, pode-se atestar uma excelente determinação dos limites de corpos verticais, com a técnica do *EHD*. Esta, no entanto, não tem a capacidade de determinar mergulhos de ângulos maiores que 60°.

A estimativa de profundidades, independentemente da técnica utilizada, está intimamente ligada à intensidade da magnetização total. Havendo contraste identificável, pode-se estimar a profundidade da fonte. A utilização do *EHD*, principalmente aliada a informações geológicas do alvo – se disponíveis, fornece base não somente para a determinação das profundidades dos limites laterais do corpo em sub-superfície, mas também um indicativo de sua geometria, dado utilizado no índice estrutural da Deconvolução de Euler para uma estimativa de profundidades mais precisa.

O procedimento de identificação das direções de inclinação e declinação médias do alvo está condicionado à presença de interferência de diferentes fontes magnéticas. Se as direções de magnetização das estruturas magnéticas forem próximas, o *RTP* correrá sem problemas, caso contrário o par inclinação/declinação recuperado tenderá às direções do alvo de maior magnitude magnética.

A modelagem inicial se provou de grande importância, tanto para o aumento da qualidade dos resultados da inversão quanto para a redução do tempo de inversão dos dados (decréscimo médio de 22 % do tempo total de inversão). Os cenários de contraste de susceptibilidades magnéticas recuperados permitiram uma estimativa da remanência dos modelos com grande eficiência, especialmente em casos de corpos isolados.

Uma vez identificados os pontos fortes e limítrofes do procedimento de análise dos dados magnéticos proposto neste trabalho, o mesmo foi aplicado em oito casos reais pertencentes à Província Ígnea do Alto do Paranaíba (PIAP) e da Província Ígnea Rondoniana-San Ignácio (PRSI).

Na PIAP, o procedimento foi aplicado aos alvos: anomalia de Pratinha I, complexos alcalino-carbonatíticos de Tapira, Araxá, Serra Negra e Salitre I, II e III (em

Minas Gerais), e Catalão I (em Goiás). Na PRSI, alvo dos próximos trabalhos, o procedimento foi aplicado ao Morro do Leme, em Mato Grosso.

A anomalia de Pratinha I, quando submetida ao procedimento de análise, resultou em um corpo alongado na direção E-W, com susceptibilidade magnética aparente de cerca de 0.11 (S.I.) que, dentro de seu contexto geológico e tectônico, pode indicar um complexo alcalino, com possibilidade de ocorrência de carbonatitos. Sua forma indica uma intrusão condicionada pelas zonas de cisalhamento da Bocaina, a norte, e de Limeira I, a sudoeste. Esta intrusão apresenta uma razão de Königsberg de 0.53, indicando uma remanência fraca, similar ao complexo de Araxá.

O Complexo Alcalino de Tapira apresenta uma magnetização complexa com duas anomalias superpostas, uma com polaridade reversa (maior) e outra menor de polarização normal. As determinações dos limites de Tapira mostraram o contorno referente aos corpos bebedouríticos, com suas profundidades situadas entre 100 e 200 metros em sua maioria.

O modelo recuperado mostrou um contraste de susceptibilidade magnética aparente entre 0.13 e 0.16 (S.I.) em relação à rocha encaixante, valores esperados para intrusões de rochas piroxeníticas segundo a literatura. As características magnéticas estimadas pelo *RTP* foram atribuídas ao corpo identificado, o que indicou uma Razão de Königsberg de 2.56. Sua porção central apresentou uma ausência de contraste magnético com a rocha encaixante; comportamento possivelmente relacionado com a presença de um corpo carbonatítico que, de acordo com o modelo invertido, se estende a até 3.5 km de profundidade.

O complexo alcalino-carbonatítico de Araxá, a norte de Tapira, é a principal fonte de nióbio conhecida no mundo e a intrusão da PIAP a ser explorada por mais

tempo, desde a década de 1950. Trata-se de uma intrusão vertical de dunitos e peridotitos, altamente alterados por metassomatismo e por intemperismo, formando uma auréola de fenitização que chega a alguns quilômetros do centro do complexo.

Esta alcalina apresenta um campo magnético residual de polaridade normal para o hemisfério sul. A partir deste campo foi possível estimar diversos pequenos corpos constituintes do complexo, assim como suas profundidades, entre 100 e 300 metros dependendo do corpo. O modelo invertido de Araxá mostrou um comportamento similar a um diatrema, com sua porção mais rasa cobrindo o contorno do complexo observado em sua geologia superficial, porém sem diferenciar suas intrusões menores identificadas pelas técnicas de delimitação lateral. A razão de Köenigsberg obtida para este complexo foi de 0.35, indicando uma predominância da magnetização induzida sobre a remanência.

Mais ao norte destas intrusões localizam-se os complexos de Serra Negra e Salitre I, II e III. São quatro intrusões alcalino-carbonatíticas cujas anomalias magnéticas se interferem, tornando o cenário um dos mais complexos da PIAP.

Serra Negra, o maior complexo alcalino da APIP, apresenta uma intrusão forçada sob os quartzitos do grupo Canastra, rendendo uma feição dômica ao relevo. Distribui-se em formato aproximadamente circular, com uma predominância de dunitos e peridotitos em suas bordas norte e leste. Em sua porção central concentram-se piroxenitos e carbonatitos, levando a um aumento crítico da magnitude da magnetização do complexo quando próximo das bordas.

Salitre I, II, e III são intrusões piroxeníticas com polaridades de magnetização diferentes. O corpo principal, Salitre I, se apresenta de forma aproximadamente elipsoidal, contendo um pequeno corpo carbonatítico em sua porção norte cercado por

piroxenitos com, ao sul, presença de rochas feldspáticas. Salitre II e III, localizados a noroeste e sudeste de Salitre I respectivamente, são pequenos corpos piroxeníticos com afloramento somente do primeiro.

O campo magnético da região de Serra Negra e Salitre indica uma grande anomalia de polarização normal, seguida a sudeste por uma pequena anomalia de mesma polarização (Salitre II), uma maior reversa (Salitre I) e, finalmente, mais uma normal (Salitre III). A interferência magnética entre estas anomalias criam um cenário em que o *RTP* iterativo não consegue definir uma direção de magnetização adequada. Isto levou à aplicação inicial do procedimento sobre todo o cenário e, a partir de então, ao trabalho individual sobre cada anomalia.

Os resultados do trabalho individual sobre as anomalias de Serra Negra e Salitre I, II e III, revelou direções de magnetização que permitem inferir a sequência evolutiva do cenário tectônico ao vincula-las a trabalhos anteriores de datação. Isto indicou uma intrusão inicial do corpo referente aos piroxenitos de Salitre I, com diferenciação magmática evidenciada por seu corpo carbonatítico. Mais tarde, aproveitando-se da zona de fraqueza gerada na região foi intrudido Serra Negra, um grande corpo que, com o esforço exigido para sua intrusão, enfraqueceu a crosta no local, facilitando a instalação dos magmas geradores dos corpos de Salitre II, Salitre III e das rochas feldspáticas na porção sul de Salitre I.

A inversão de Serra Negra e Salitre I, II e III, após a identificação individual das direções de magnetização dos corpos, indicou contrastes de cerca de 0.20 (S.I.) para o corpo referente a Serra Negra e de aproximadamente 0.13 (S.I.) para as demais intrusões. Uma vez atribuídas as características de magnetização individuais de cada corpo, observou-se uma remanência forte relativa aos dunitos e peridotitos da borda

norte e leste de Serra Negra ( $Q = 5.37$ ), assim como a remanência dos piroxenitos de Salitre I, Salitre II e III e as rochas feldspáticas no sul de Salitre I apresentaram remanências menos expressivas, com dominância da componente induzida de magnetização.

O complexo de Catalão I, o mais setentrional da PIAP, é uma intrusão dunítico-piroxenítica metassomatizada instalada nos metassedimentos do grupo Araxá, e conta com a presença de corpos carbonatíticos em suas porções centrais. Sua expressão magnética se trata de uma anomalia de polarização normal que, após a aplicação de técnicas de delimitação espacial, revela a presença de três estruturas magnéticas a sul, a oeste e a norte, sem correspondência com a geologia superficial do complexo; com profundidades entre 100 e 300 metros, dependendo de sua posição.

O modelo invertido de Catalão I mostrou uma ligação em sub-superfície entre as três estruturas magnéticas culminando, em profundidade, em uma estrutura aproximadamente esférica com um contraste de susceptibilidade com a rocha encaixante entre 0.15 e 0.17 (S.I.).

O único caso fora da PIAP apresentado neste trabalho, o depósito niquelífero de Morro do Leme, se trata de três corpos predominantemente peridotíticos intrudidos nos metassedimentos da sequência Nova Brasilândia e nos sedimentos detrítico-lateríticos da formação Guaporé, ambas localizadas na Província Rondoniana-San Ignácio, oeste mato-grossense.

As anomalias magnéticas de Morro do Leme se apresentam com polaridades reversas, indicando proximidade das épocas de intrusão dos corpos. A delimitação espacial das fontes anômalas identificou claramente o corpo principal (Morro I) e, sobre

os demais, deu indicativos de suas presenças. As profundidades obtidas variaram de 59 a 200 metros, respectivamente no centro e nas bordas do Morro I.

A inversão deste cenário revelou um corpo alongado na direção E-W associado a Morro I, respeitando os limites observados pelas técnicas de delimitação aplicadas anteriormente. O contraste de susceptibilidade obtido para este corpo varia entre 0.10 e 0.13 (S.I.). Os corpos referentes aos Morros II e III apresentaram contrastes de susceptibilidades bem menores que o Morro I, as quais foram atribuídas às pequenas dimensões dos mesmos em relação à distância entre linhas de voo do levantamento magnético e a possível alteração por intemperismo comum às latitudes dos corpos. Quando atribuídas as características de magnetização recuperadas pelo *RTP* iterativo, o corpo referente ao Morro I indicou uma razão de Köenigsberg de 1.26.

O uso de modelos iniciais para a inversão de dados magnéticos leva a um decréscimo do tempo de processamento quando comparado às inversões sem esta ferramenta, ao passo que suas fidelidades aos corpos-alvos em sub-superfície aumentam.

Dessa forma, a utilização de um procedimento de análise de dados magnéticos se mostra não só aconselhável como essencial para uma inversão mais precisa, independentemente do conhecimento prévio das características geológicas do alvo.

## 7. REFERÊNCIAS

Araújo, R. V. V., Sobral, L. G. S., Santos, R. L. C., 2002. Produção de fosfato no Brasil: complexo de mineração de Tapira/Fosfértil. *In: ENTMME, XIX, 2002, Recife. Contribuição Técnica ao XIX ENTMME.*

Barbosa, O., Braun, O. P. G., Dyer, R. C., Cunha, C. A. B., 1970. Geologia da região do Triângulo Mineiro. *Boletim DFPM/DNPM, 136, 140 p.*

Barnett, C. T., 1976. Theoretical modeling of the magnetic and gravitational fields of an arbitrarily shaped three-dimensional body. ***Geophysics***, 41, 1353-1364.

Bettencourt, J. S., Leite Jr., W. B., Ruiz, A. S., Matos, R., Payolla, B. L., Tosdal, R. M., 2010. The Rondonian-San Ignacio Province in the SW Amazonian Craton: an overview. ***Journal of South American Earth Sciences***, 29, 28–46.

Biondi, J. C., 2003. Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros. *Oficina de Textos, São Paulo, 528 p.*

Blakely, R. J., 1995. *Potential theory in gravity and magnetic applications.* 1 ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 441 p.

Blakely, R. J., Simpson, R. W., 1986. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. ***Geophysics***, 51, 1494-1498.



Brod, J. A., 1999. Petrologia e geoquímica do complexo de Tapira, estado de Minas Gerais. Tese de Doutorado. University of Durham, United Kingdom.

Brod, J. A., Gibson, S. A., Thompson, R. N., Junqueira-Brod, T. C., Seer, H. J., Moraes, L. C., Boaventura, G. R., 2000. The kamafugite-carbonatite association in the Alto Paranaíba Igneous Province, southeastern Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, 30, 404-408.

Brod, J. A., Ribeiro, C. C., Gaspar, J. C., Junqueira-Brod, T. C., Barbosa, E. S. R., Riffel, B. F., Silva, J. F., Chaban, N., Ferrari, A.L.D., 2004. Excursão 1. Geologia e mineralização dos complexos alcalino-carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 42, Guias de Excursões. 1-29. (CDROM). Araxá.

Brod, J. A., Ribeiro, C. C., Gaspar, J. C., Diniz-Pinto, H. S., Junqueira-Brod, T. C., 2005. Spinel chemistry and petrogenetic processes in the Tapira Alkaline-Carbonatite Complex, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, 35(1), 23-32.

Campos J.E.G., Dardenne M.A., 1997. Origem e evolução tectônica da bacia Sanfranciscana. **Revista Brasileira de Geociências**, 27, 283-294.

Cande, S., Kent, D., 1992. A new geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous Cenozoic. **Journal of Geophysical Research**, 100(B4), 2156-2202.

Cordani, U. G., Teixeira, W., 2007. Proterozoic accretionary belts in the Amazonian Craton. *In: Hatcher Jr, R. D., Carlson, M. P., McBride, J. H., Martínez Catalán, J. R., 2007. 4-D Framework of Continental Crust. Colorado: Geological Society of America Memoir*, 200, 297–320.

Cordani, U. G., Teixeira, W., D'Agrella-Filho, M. S., Trindade, R. I., 2009. The position of the Amazonian Craton in supercontinents. *Gondwana Research*, 15, 396–407.

Cordani, R., Shukowsky, W., 2009. Virtual Pole from Magnetic Anomaly (VPMA): A procedure to estimate the age of a rock from its magnetic anomaly only. **Journal of Applied Geophysics**, October, 69(2), 96–102.

Cordell, L., Grauch, V. J. S., 1985. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan basin, New Mexico. *In: The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps*. Society of Exploration Geophysicists. 181-197.

Fedi, M., Florio, G., Rapolla, A., 1994. A method to estimate the total magnetization direction from a distortion analysis of magnetic anomalies. **Geophysical Prospecting**, 42 (3), 261–274.

Fedi, M., Florio, G., 2001. Detection of potential fields source boundaries by enhanced horizontal derivative method. **Geophysical Prospecting**, 49, 40–58.

Gibson, S. A., Thompson, R. N., Leonardos, O. H., Dinkin, A. P., Mitchell, J. G., 1995. The late cretaceous impact of the Trindade Mantle plume: evidence from large volume mafic, potassic magmatism in SE Brazil. **Jornal of Petrology**, 36, 189-229.

Gomes, C. B., Ruberti, E., Morbidelli, L., 1990. Carbonatite complexes from Brazil: a review. **Journal of South American Earth Sciences**, 3, 51-63.

Gomes, C. B., Comin-Chiaramonti, P., 2005. Some notes on the Alto do Paranaíba Igneous Province. *In: Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian platform*. EDUSP/FAPESP, São Paulo, 752 p.

- Grasso, C. B., 2010. Petrologia do complexo alcalino-carbonatítico de Serra Negra, MG. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 157 p.
- Hartmann, G.A., Pacca, I.G., 2009. Time evolution of the South Atlantic Magnetic Anomaly. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 81(2), 243-255.
- Hasui, Y., Cordani, U. G., 1968. Idade Potássio-Argônio de rochas eruptivas Mesozóicas do Oeste Mineiro e sul de Goiás. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 22, Belo Horizonte, 1968. *Anais*, Belo Horizonte, SBG, p. 139-143.
- Hsu, S., Coppers, D., Shyu, C., 1998. Depth to magnetic source using generalized analytic signal. *Geophysics* 63, 1947–1957.
- Issa Filho, A., Lima, P. R. A., Souza, O. M., 1984. Aspects of Geology of the Barreiro Carbonatitic Complex, Araxá, MG, Brazil. In: Carbonatitic complexes of Brazil: geology. Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, São Paulo, p. 19-44.
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I., 2009. Geofísica de Exploração. Tradução: Coelho, M. C. M. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 440 p.
- Lelièvre, P. G., Oldenburg, D. W., Phillips, N., 2006. 3D magnetic inversion for total magnetization in areas with complicated remanence. In: SEG TECHNICAL PROGRAM EXPANDED ABSTRACTS. Resumo expandido... Society of Exploration Geophysicists, 2006, 953-957. Disponível em: [http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/pubs/papers/Lelievre\\_seg2006abstr.pdf](http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/pubs/papers/Lelievre_seg2006abstr.pdf). Acesso em: 30 de janeiro de 2013.
- Li, Y., Oldenburg, D.W., 1996. 3D inversion of magnetic data. *Geophysics*, 61 (2), 394–408.

Li, Y., Oldenburg, D. W., 2003. Fast inversion of large-scale magnetic data using wavelet transforms and a logarithmic barrier method. **Geophysical Journal International**, 152(2), 251-265.

Louro, V. H. A., Mantovani, M. S. M., 2012. 3D inversion and modeling of magnetic and gravimetric data characterizing the geophysical anomaly source in Pratinha I in the southeast of Brazil. **Journal of Applied Geophysics**, 80, 110-120.

MAG3D, 2002. A program library for forward modeling and inversion of magnetic data over 3D structures, version 3.1. Developed under the consortium research project Joint/Cooperative Inversion of Geophysical and Geological Data, UBC-Geophysical Inversion Facility, Department of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia. 2002.

Marangoni, Y. R., Mantovani, M. S. M., 2013. Geophysical signatures of the alkaline intrusions bordering the Paraná Basin. **Journal of South American Earth Sciences**, 41, 83-98.

Mariano, A. N., Marchetto, M., 1991. Serra Negra and Salitre carbonatite alkaline igneous complex. *In: Leonardos, O. H., Meyer, H. O. A., Gaspar, J. C. (eds.). In: 5th International Kimberlite Conference Araxá, Field Guide Book, CPRM, Special Publication 3/91, p. 75-79.*

Nunes, N. S. V., 2000. Geologia e resultados prospectivos das Áreas Morro do Leme e Morro Sem Boné, Mato Grosso. Goiânia: CPRM, 2000. (Programa Nacional de Prospecção de Metais do Grupo da Platina - PNPP. Informe de Recursos Minerais. Série do Grupo da Platina e Associados, 19), 61 p.

Oliveira, S. M. B., Imbernon, R. A. L., 1998. Weathering and REE concentration in the Catalão I carbonatitic complex, Central Brazil. **Journal South American Earth Science**, 11(4), 379-388.

Pereira, W. R., Mantovani, M. S. M., 2012. Inversão dos dados geofísicos do Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro, Araxá (MG). **Geologia USP – Série Científica**. 12 (2), 15-30.

Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, A. J., Somerton, I. W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. **Geophysics**, 55, 80-91.

Requejo, H. S., Mantovani, M. S. M., 2011. Catalão I Alkaline Complex: Gravimetric and magnetic inversions. 12<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society, extended abstracts, CD ROM.

Ribeiro, C. C., 2008. Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do complexo carbonatítico Catalão I, GO. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 234 p.

Ribeiro, V. B., 2011. Modelagem geofísica do complexo alcalino de Tapira – MG. Tese de mestrado, Universidade de São Paulo, SP, 117 pp.

Scandolara, J.E., Rizzotto, G.J., Silva, L.C., 1992 Geologia da Região de Nova Brasilândia, Rondônia. Congresso Brasileiro de Geologia, 37, Anais..., São Paulo, 154-155.

Scandolara, J. E., Rizzotto, G. J., Bahia, R. B. C., Quadros, M. L. E. S., Amorim, J. L., Dall'igna, L.G., 1999. Geologia e Recursos Minerais do Estado de Rondônia: texto explicativo e mapa geológico na escala 1:1.000.000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Brasília: CPRM-Serviço Geológicos do Brasil.

Seer, H. J., 1999. Evolução tectônica dos grupos Araxá, Ibiá e Canastra na Sinfoma de Araxá, Minas Gerais. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 267 p.

Seer, H. J., Brod, J. A., Valeriano, C. M., Fuck, R. A., 2005. Leucogranitos intrusivos no Grupo Araxá: registro de um evento magmático durante colisão neoproterozóica na porção meridional da Faixa Brasília. **Revista Brasileira de Geociências**, 35(1), 33-42.

Silva, C. H., 2003. Evolução geológica da Faixa Brasília na região de Tapira, sudoeste de Minas Gerais. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

Silva, C. H., Simões, L. S. A., Krymsky, R., Macambira, M. J. B., 2006. Proveniência e idade do metamorfismo das rochas da Faixa Brasília, na região de Tapira (SW de Minas Gerais). **Geologia USP Série Científica**. 6(1), 53-66.

Simões, L. S. A., Navarro, G., 1996. Estruturação da Faixa Brasília na região de Araxá, MG. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 39, Salvador, 1996. Anais... Salvador, SBG, 92-95.

Sonoki, I. K., Garda, G. M., 1988. Idades K-Ar de rochas alcalinas do Brasil Meridional e Paraguai Oriental: compilação e adaptação às novas constantes de decaimento. **Geologia USP Série Científica**. 19, 63-85.

Tassinari, C. C. G., Macambira, M. J. B., 1999. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. **Episodes**, 22, 174–182.

Tavares, S. T. P., Mendes, E. C., Resende, S. E., 2008. Avaliação geometalúrgica da rocha fresca de Tapira, MG. *In*: Prêmio de Excelência da Indústria Minero-Metalúrgica Brasileira, 10, 30 p.

Teixeira, W.. Geraldés, M. C.. Matos, R.. Ruiz, A. S.. Saes, G.. Vargas-Matos, G., 2010. A review of the tectonic evolution of the Sunsás belt, SW portion of the Amazonian Craton. **Journal of South American Earth Science**, 29, 47–60.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., Keys, D. A., 1990. Applied Geophysics, 2nd edition. Cambridge University Press. 770 p.

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

Tohver, E., Van Der Pluijm, B., Scandolara, J. E., Essene, E. J., 2005. Late Mesoproterozoic deformation of SW Amazonia (Rondônia, Brazil): geochronological and structural evidence for collision with southern Laurentia. **Journal of Geology**, 113, 309–323.

## **ANEXO A**



Tabela A.1 – Características magnéticas dos modelos sintéticos de Diques, os valores das componentes de sua magnetização Total recuperada e os erros entre estas componentes e seus valores originais. As intensidades de magnetização são dadas em A.m<sup>-1</sup>.

Análise dos Resultados																
Dique																
Desvio da direção de Mag. Total em relação à Direção de Mag. Induzida	Razão de Koenigsberg	Vetor Indução			Vetor Remanência			Vetor Total			Vetor Total Recuperado			Erro %		
		Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade
0°	0,0	-29,71	-20,58	185,20	0,00	0,00	0,00	-29,71	-20,58	185,20	-32,20	-14,90	185,20	1,38	1,58	0,00
	1,0	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	372,00	-33,70	-15,20	365,00	2,22	1,49	1,88
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	557,17	-34,20	-15,20	580,00	2,49	1,49	4,10
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	927,53	-37,20	-22,70	920,00	4,16	0,59	0,81
30°	1,0	-29,71	-20,58	185,20	30,17	39,50	185,44	0,30	9,40	278,00	2,80	10,80	270,00	1,39	0,39	2,88
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	14,72	22,35	371,01	0,30	9,40	489,00	1,70	11,30	500,00	0,78	0,53	2,25
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	7,46	15,68	741,37	0,30	9,40	870,00	0,40	10,40	880,00	0,06	0,28	1,15
	1,0	-29,71	-20,58	185,20	47,62	89,76	185,64	15,30	24,40	172,00	20,90	24,00	170,00	3,11	0,11	1,16
45°	2,0	-29,71	-20,58	185,20	33,01	45,95	370,86	15,30	24,40	418,00	20,70	24,60	400,00	3,00	0,06	4,31
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	24,30	34,09	740,93	15,30	24,40	808,00	21,00	26,80	790,00	3,17	0,67	2,23
	1,0	-29,71	-20,58	185,20	38,71	145,03	185,39	30,30	39,40	48,00	40,60	37,20	46,00	5,72	0,61	4,17
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	45,82	72,04	370,59	30,30	39,40	345,00	40,40	39,00	350,00	5,61	0,11	1,45
60°	4,0	-29,71	-20,58	185,20	38,91	53,36	741,95	30,30	39,40	742,00	41,60	42,80	748,00	6,28	0,94	0,81
	1,0	-29,71	-20,58	185,20	33,80	159,00	185,00	60,00	-21,00	10,00	59,00	-27,30	9,50	0,56	1,75	5,00
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	89,00	150,00	372,00	60,00	-21,00	321,00	64,80	-46,90	315,00	2,67	7,19	1,87
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	75,00	340,00	741,00	60,00	-21,00	741,00	66,60	-49,40	735,00	3,67	7,89	0,81
90°	1,0	-29,71	-20,58	185,20	29,90	159,40	185,67	90,00	99,40	1,00	80,00	120,00	1,00	5,56	5,72	0,00
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	64,26	159,40	370,48	90,00	99,40	242,00	75,10	111,90	240,00	8,28	3,47	0,83
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	77,46	159,40	741,40	90,00	99,40	632,00	77,30	116,80	630,00	7,06	4,83	0,32
	1,0	-29,71	-20,58	185,20	29,90	159,30	185,80	74,70	114,40	1,00	75,40	107,20	1,00	0,39	2,00	0,00
120°	2,0	-29,71	-20,58	185,20	16,14	147,70	371,81	74,70	114,40	225,00	73,20	125,30	220,00	0,83	3,03	2,22
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	66,38	136,89	742,27	74,70	114,40	610,00	69,00	120,00	600,00	3,17	1,56	1,64
	1,0	-29,71	-20,58	185,20	29,86	159,31	185,98	59,70	129,40	1,00	66,50	144,10	1,00	3,78	4,08	0,00
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	46,42	147,70	370,95	59,70	129,40	205,00	63,90	147,00	200,00	2,33	4,89	2,44
135°	4,0	-29,71	-20,58	185,20	53,47	139,90	741,59	59,70	129,40	584,00	58,10	148,00	580,00	0,89	5,17	0,68
	1,0	-29,71	-20,58	185,20	30,00	160,00	185,00	-29,71	-20,58	2,00	-29,90	-14,10	2,00	0,11	1,80	0,00
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	30,00	160,00	370,00	29,71	160,00	185,00	31,10	165,00	180,00	0,77	1,39	2,70
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	30,00	160,00	741,00	29,71	160,00	556,00	28,40	164,20	550,00	0,73	1,17	1,08

Tabela A.2 – Profundidades e volumes dos modelos sintéticos de Diques, seus valores estimados com o procedimento deste estudo, os erros entre seus valores originais e recuperados, e os tempos de processamento das inversões com e sem modelo inicial e suas diferenças.

Análise dos Resultados														
Dique														
Desvio da direção de Mag. Total em relação à Direção de Mag. Induzida	Razão de Köenigsberg	Profundidade Real	Profundidade Recuperada (EHD)		Volume Real (km³)	Volume Recuperado (km³)		Diferença %	Volume Recuperado (km³)		Diferença %	Tempo de Processamento (min)		
			EHD	Desvio Padrão EHD		Sem Mod.	Com Mod.		Sem Mod.	Com Mod.		Sem Mod.	Com Mod.	Diferença %
Sem Remanência	0,0	100	77	17	120	36,87	69,28	81,67	31,94	10,053	5,419	46,09		
	1,0	100	81	30	120	52,99	55,84	118,03	1,64	59,05	6,42	89,13		
	2,0	100	83	36	120	245,75	104,79	131,02	9,18	40,47	24,80	38,72		
	4,0	100	85	37	120	362,25	201,88	212,32	76,93	42,48	37,10	12,66		
30°	1,0	100	88	30	120	382,31	218,59	116,26	3,12	37,80	37,50	0,79		
	2,0	100	96	39	120	170,77	42,31	109,82	8,48	52,30	34,80	33,46		
	4,0	100	99	38	120	187,27	56,06	118,35	1,38	39,40	35,20	10,66		
	1,0	100	92	16	120	41,50	65,42	90,25	24,79	76,50	45,70	40,26		
45°	2,0	100	91	22	120	47,24	60,63	113,79	5,18	42,20	9,80	76,78		
	4,0	100	93	30	120	34,17	71,53	116,57	2,86	38,70	31,30	19,12		
	1,0	100	86	15	120	7,97	93,36	54,45	54,63	80,70	63,70	21,07		
	2,0	100	85	12	120	10,93	90,89	110,48	7,93	56,70	13,20	76,72		
60°	4,0	100	85	13	120	72,84	39,30	115,76	3,53	66,10	61,80	6,51		
	1,0	100	85	11	120	0,81	99,33	17,79	85,18	103,90	85,20	18,00		
	2,0	100	86	12	120	3,85	96,79	111,56	7,03	65,10	15,80	75,73		
	4,0	100	84	11	120	8,44	92,97	117,69	1,93	69,30	63,50	8,37		
90°	1,0	100	79	8	120	12,86	89,28	74,08	38,27	137,90	71,80	47,93		
	2,0	100	79	9	120	4,24	96,47	115,71	3,58	71,10	69,60	2,11		
	4,0	100	80	14	120	8,48	92,93	118,37	1,36	68,50	63,30	7,59		
	1,0	100	77	8	120	1,92	98,40	78,80	34,33	164,20	84,20	48,72		
120°	2,0	100	76	10	120	8,78	92,68	105,68	11,93	68,70	18,30	73,36		
	4,0	100	76	11	120	17,96	85,03	118,93	0,89	70,40	61,50	12,64		
	1,0	100	73	16	120	4,88	95,93	81,84	31,80	147,40	61,60	58,21		
	2,0	100	74	17	120	17,79	85,18	117,30	2,25	66,90	69,50	-3,89		
135°	4,0	100	72	15	120	6,47	94,61	118,72	1,07	66,30	68,90	-3,92		
	1,0	100	81	19	120	3,85	96,79	60,06	49,95	145,70	67,70	53,53		
	2,0	100	79	19	120	13,72	88,57	56,46	52,95	61,00	51,60	15,41		
	4,0	100	80	20	120	7,41	93,83	117,99	1,68	62,10	55,20	11,11		

Tabela A.3 – Características magnéticas dos modelos sintéticos de Esferas, os valores das componentes de sua magnetização Total recuperada e os erros entre estas componentes e seus valores originais. As intensidades de magnetização são dadas em  $A.m^{-1}$ .

Análise dos Resultados																			
Esfera																			
Desvio da direção de Mag. Total em relação à Direção de Mag. Induzida	Razão de Koenigsberg	Vetor Indução			Vetor Remanência			Vetor Total			Vetor Total Recuperado			Erro %					
		Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Declinação	Intensidade	
Sem Remanência	0,0	-29,71	-20,58	185,20	0,00	0,00	0,00	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	185,20	-30,40	-20,10	185,00	0,38	0,13	0,11
0°	1,0	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	372,00	-31,70	-20,70	370,00	1,11	0,03	0,54
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	557,17	-32,60	-20,70	550,00	1,61	0,03	1,29
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	927,53	-34,30	-20,70	920,00	2,55	0,03	0,81
30°	1,0	-29,71	-20,58	185,20	30,17	39,50	185,44	0,30	9,40	278,00	0,30	9,40	278,00	-0,30	10,70	270,00	0,00	0,36	2,88
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	14,72	22,35	371,01	0,30	9,40	489,00	0,30	9,40	489,00	-0,70	11,10	480,00	0,22	0,47	1,84
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	7,46	15,68	741,37	0,30	9,40	870,00	0,30	9,40	870,00	-1,50	12,00	850,00	0,67	0,72	2,30
45°	1,0	-29,71	-20,58	185,20	47,62	89,76	185,64	15,30	24,40	172,00	15,30	24,40	172,00	15,40	25,10	170,00	0,06	0,19	1,16
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	33,01	45,85	370,86	15,30	24,40	418,00	15,30	24,40	418,00	14,60	25,30	400,00	0,39	0,25	4,31
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	24,30	34,09	740,93	15,30	24,40	808,00	15,30	24,40	808,00	15,60	26,70	800,00	0,17	0,64	0,99
60°	1,0	-29,71	-20,58	185,20	38,71	145,03	185,39	30,30	39,40	48,00	30,30	39,40	48,00	30,00	39,30	50,00	0,17	0,03	4,17
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	45,82	72,04	370,59	30,30	39,40	39,40	30,30	39,40	39,40	30,30	40,20	350,00	0,00	0,22	1,45
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	38,91	53,36	741,95	30,30	39,40	742,00	30,30	39,40	742,00	30,90	42,40	750,00	0,33	0,83	1,08
90°	1,0	-29,71	-20,58	185,20	33,80	159,00	185,00	60,00	-21,00	10,00	60,00	-21,00	10,00	59,90	-19,50	10,00	0,06	0,42	0,00
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	89,00	150,00	372,00	60,00	-21,00	321,00	60,00	-21,00	321,00	63,10	-21,40	320,00	1,72	0,11	0,31
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	75,00	340,00	741,00	60,00	-21,00	741,00	60,00	-21,00	741,00	66,50	-14,10	750,00	3,61	1,92	1,21
120°	1,0	-29,71	-20,58	185,20	29,90	159,40	185,67	90,00	99,40	1,00	90,00	99,40	1,00	89,60	99,90	1,00	0,22	0,14	0,00
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	64,26	159,40	370,48	90,00	99,40	242,00	90,00	99,40	242,00	86,20	128,00	250,00	2,11	7,94	3,31
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	77,46	159,40	741,40	90,00	99,40	632,00	90,00	99,40	632,00	80,50	116,60	650,00	5,28	4,78	2,85
135°	1,0	-29,71	-20,58	185,20	29,90	159,30	185,80	74,70	114,40	1,00	74,70	114,40	1,00	74,10	115,00	1,00	0,33	0,17	0,00
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	16,14	147,70	371,81	74,70	114,40	225,00	74,70	114,40	225,00	71,30	120,90	220,00	1,89	1,81	2,22
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	66,38	136,89	742,27	74,70	114,40	610,00	74,70	114,40	610,00	67,90	131,50	600,00	3,78	4,75	1,64
150°	1,0	-29,71	-20,58	185,20	29,86	159,31	185,98	59,70	129,40	1,00	59,70	129,40	1,00	55,70	119,80	1,00	2,22	2,67	0,00
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	46,42	147,70	370,95	59,70	129,40	205,00	59,70	129,40	205,00	57,20	131,60	200,00	1,39	0,61	2,44
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	53,47	139,90	741,59	59,70	129,40	584,00	59,70	129,40	584,00	53,80	136,20	600,00	3,28	1,89	2,74
180°	1,0	-29,71	-20,58	185,20	30,00	160,00	185,00	-29,71	-20,58	2,00	-29,71	-20,58	2,00	-29,10	-20,40	2,00	0,34	0,05	0,00
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	30,00	160,00	370,00	-29,71	-20,58	185,00	-29,71	-20,58	185,00	29,20	160,00	190,00	0,28	0,00	2,70
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	30,00	160,00	741,00	-29,71	-20,58	556,00	-29,71	-20,58	556,00	26,20	159,60	550,00	1,95	0,11	1,08

Tabela A.4 – Profundidades e volumes dos modelos sintéticos de Esferas, seus valores estimados com o procedimento deste estudo, os erros entre seus valores originais e recuperados, e os tempos de processamento das inversões com e sem modelo inicial e suas diferenças.

Análise dos Resultados													
Esfera													
Desvio da direção de Mag. Total em relação à Direção de Mag. Induzida	Razão de Königsberg	Profundidade Real	Profundidade Recuperada (EHD + Euler)		Volume Real (km³)	Volume Recuperado (km³)	Diferença %	Volume Recuperado (km³)	Diferença %	Tempo de Processamento (min)			
			Topo	Desvio Padrão						Sem Mod. Inicial	Com Mod. Inicial	Sem Mod. Inicial	Com Mod. Inicial
0°	0,0	100,00	91,00	7,00	33,51	68,48	104,36	33,37	0,42	31,50	22,10	29,84	29,84
	1,0	100,00	78,00	12,00	33,51	96,59	188,24	33,05	1,37	26,30	20,90	20,53	20,53
	2,0	100,00	78,00	23,00	33,51	74,03	120,92	34,60	3,25	20,40	19,90	2,45	2,45
	4,0	100,00	84,00	15,00	33,51	75,93	126,59	34,64	3,37	21,60	20,50	5,09	5,09
30°	1,0	100,00	78,00	6,00	33,51	26,06	22,23	29,58	11,73	27,90	26,90	3,58	3,58
	2,0	100,00	88,00	12,00	33,51	30,22	9,82	31,98	4,57	25,10	25,00	0,40	0,40
	4,0	100,00	83,00	18,00	33,51	40,04	19,49	29,88	10,83	24,50	23,90	2,45	2,45
	1,0	100,00	80,00	3,00	33,51	25,68	23,37	24,65	26,44	45,30	41,50	8,39	8,39
45°	2,0	100,00	87,00	10,00	33,51	18,60	44,49	32,97	1,61	31,60	11,90	62,34	62,34
	4,0	100,00	88,00	14,00	33,51	19,20	42,70	32,45	3,16	21,60	12,40	42,59	42,59
	1,0	100,00	98,00	2,00	33,51	45,70	36,38	36,22	8,09	15,00	14,70	2,00	2,00
	2,0	100,00	78,00	6,00	33,51	29,24	12,74	32,62	2,66	25,13	22,40	10,86	10,86
90°	4,0	100,00	89,00	15,00	33,51	303,76	806,48	160,99	380,42	27,00	15,65	42,04	42,04
	1,0	100,00	100,00	2,00	33,51	13,59	59,44	23,45	30,02	26,50	12,70	52,08	52,08
	2,0	100,00	95,00	6,00	33,51	28,21	15,82	31,98	4,57	17,05	15,40	9,68	9,68
	4,0	100,00	72,00	16,00	33,51	228,43	581,68	210,30	527,57	22,60	21,30	5,75	5,75
120°	1,0	100,00	101,00	2,00	33,51	19,03	43,21	24,22	27,72	46,25	16,90	63,46	63,46
	2,0	100,00	92,00	9,00	33,51	41,88	24,98	31,68	5,46	35,60	16,05	54,92	54,92
	4,0	100,00	81,00	17,00	33,51	22,20	33,75	31,85	4,95	15,60	14,06	9,87	9,87
	1,0	100,00	100,00	2,00	33,51	5,74	82,87	27,01	19,40	79,00	31,10	60,63	60,63
135°	2,0	100,00	94,00	8,00	33,51	5,57	83,38	27,09	19,16	25,30	23,30	7,91	7,91
	4,0	100,00	97,00	10,00	33,51	4,82	85,62	33,27	0,72	25,90	19,20	25,87	25,87
	1,0	100,00	99,00	2,00	33,51	7,84	76,60	26,23	21,72	53,70	23,70	55,87	55,87
	2,0	100,00	104,00	10,00	33,51	7,67	77,11	25,81	22,98	28,60	26,70	6,64	6,64
150°	4,0	100,00	15,00	18,00	33,51	6,00	82,09	32,58	2,78	28,00	25,10	10,36	10,36
	1,0	100,00	98,00	1,00	33,51	13,72	59,06	27,56	17,76	62,00	41,50	33,06	33,06
	2,0	100,00	111,00	7,00	33,51	13,37	60,10	24,76	26,11	35,80	27,90	22,07	22,07
	4,0	100,00	122,00	11,00	33,51	6,90	79,41	32,19	3,94	33,10	30,80	6,95	6,95

Tabela A.5 – Características magnéticas dos modelos sintéticos de Pipes, os valores das componentes de sua magnetização Total recuperada e os erros entre estas componentes e seus valores originais. As intensidades de magnetização são dadas em A.m<sup>-1</sup>.

Análise dos Resultados																
Pipe																
Desvio da direção de Mag. Total em relação à Direção de Mag. Induzida	Razão de Königsberg	Vetor Indução			Vetor Remanência			Vetor Total			Vetor Total Recuperado			Erro %		
		Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade
Sem Remanência	0	-29,71	-20,58	185,20	0,00	0,00	0,00	-29,71	-20,58	185,20	-33,00	-19,10	185,00	1,83	0,41	0,11
0°	1,0	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	372,00	-34,60	-21,90	370,00	2,72	0,37	0,54
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	557,17	-35,00	-24,20	550,00	2,94	1,01	1,29
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	185,20	-29,71	-20,58	927,53	-37,70	-22,50	900,00	4,44	0,53	2,97
	1,0	-29,71	-20,58	185,20	30,17	39,50	185,44	0,30	9,40	278,00	-0,50	11,10	270,00	0,11	0,47	2,88
30°	2,0	-29,71	-20,58	185,20	14,72	22,35	371,01	0,30	9,40	489,00	-2,90	11,20	500,00	1,44	0,50	2,25
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	7,46	15,68	741,37	0,30	9,40	870,00	-1,00	11,20	850,00	0,39	0,50	2,30
	1,0	-29,71	-20,58	185,20	47,62	89,76	185,64	15,30	24,40	172,00	17,10	26,60	170,00	1,00	0,61	1,16
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	33,01	45,85	370,86	15,30	24,40	418,00	17,50	25,30	410,00	1,22	0,25	1,91
45°	4,0	-29,71	-20,58	185,20	24,30	34,09	740,93	15,30	24,40	808,00	16,40	28,10	800,00	0,61	1,03	0,99
	1,0	-29,71	-20,58	185,20	38,71	145,03	185,39	30,30	39,40	48,00	32,70	40,30	50,00	1,33	0,25	4,17
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	45,82	72,04	370,59	30,30	39,40	345,00	32,40	41,40	350,00	1,17	0,56	1,45
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	38,91	53,36	741,95	30,30	39,40	742,00	32,20	42,20	750,00	1,06	0,78	1,08
90°	1,0	-29,71	-20,58	185,20	33,80	159,00	185,00	60,00	-21,00	10,00	57,20	-25,60	10,00	1,56	1,28	0,00
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	89,00	150,00	372,00	60,00	-21,00	321,00	63,10	-23,80	300,00	1,72	0,78	6,54
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	75,00	340,00	741,00	60,00	-21,00	741,00	66,90	-18,30	750,00	3,83	0,75	1,21
	1,0	-29,71	-20,58	185,20	29,90	159,40	185,67	90,00	99,40	1,00	84,20	-98,80	1,00	3,22	0,17	0,00
120°	2,0	-29,71	-20,58	185,20	64,26	159,40	370,48	90,00	99,40	242,00	83,70	-131,90	250,00	3,50	9,03	3,31
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	77,46	159,40	741,40	90,00	99,40	632,00	80,30	118,60	650,00	5,39	5,33	2,85
	1,0	-29,71	-20,58	185,20	29,90	159,30	185,80	74,70	114,40	1,00	80,10	113,60	1,00	3,00	0,22	0,00
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	16,14	147,70	371,81	74,70	114,40	225,00	65,50	110,00	220,00	5,11	1,22	2,22
135°	4,0	-29,71	-20,58	185,20	66,38	136,89	742,27	74,70	114,40	610,00	65,70	127,00	580,00	5,00	3,50	4,92
	1,0	-29,71	-20,58	185,20	29,86	159,31	185,98	59,70	129,40	1,00	57,20	118,90	1,00	1,39	2,92	0,00
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	46,42	147,70	370,95	59,70	129,40	205,00	56,40	123,10	190,00	1,83	1,75	7,32
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	53,47	139,90	741,59	59,70	129,40	584,00	54,40	132,60	570,00	2,94	0,89	2,40
150°	1,0	-29,71	-20,58	185,20	30,00	160,00	185,00	-29,71	-20,58	2,00	-31,30	-20,90	2,00	0,88	0,09	0,00
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	30,00	160,00	370,00	29,71	160,00	185,00	30,70	160,70	190,00	0,55	0,19	2,70
	4,0	-29,71	-20,58	185,20	30,00	160,00	741,00	29,71	160,00	556,00	28,30	160,50	540,00	0,78	0,14	2,88
	2,0	-29,71	-20,58	185,20	45,82	72,04	370,59	30,30	39,40	345,00	40,60	45,10	540,00	5,72	1,58	56,52
60° (com ruído)	2,0	-29,71	-20,58	185,20	45,82	72,04	370,59	30,30	39,40	345,00	40,60	45,10	540,00	5,72	1,58	56,52

Tabela A.6 – Profundidades e volumes dos modelos sintéticos de Pipes, seus valores estimados com o procedimento deste estudo, os erros entre seus valores originais e recuperados, e os tempos de processamento das inversões com e sem modelo inicial e suas diferenças.

Análise dos Resultados													
Pipe													
Desvio da direção de Mag. Total em relação à Direção de Mag. Induzida	Razão de Königsberg	Profundidade Real	Profundidade Recuperada (EHD)		Volume Real (km³)	Volume Recuperado (km³)		Diferença %	Volume Recuperado (km³)		Diferença %	Tempo de Processamento (min)	
			EHD	Desvio Padrão EHD		Sem Mod.	Inicial		Sem Mod.	Inicial		Sem Mod.	Inicial
Sem Remanência	0	100	79	12	125,66	83,43	33,61	110,24	12,27	27,60	21,10	23,55	
0°	1,0	100	77	17	125,66	91,32	27,33	115,93	7,74	61,00	59,50	2,46	
	2,0	100	80	27	125,66	79,27	36,92	114,39	8,97	61,00	40,00	34,43	
	4,0	100	78	22	125,66	18,69	85,13	117,69	6,34	59,10	57,10	3,38	
	1,0	100	86	23	125,66	55,82	55,58	108,30	13,82	92,00	80,70	12,28	
30°	2,0	100	86	23	125,66	64,61	48,58	113,91	9,35	92,20	94,20	-2,17	
	4,0	100	86	22	125,66	37,81	69,91	118,80	5,46	107,20	94,20	12,13	
	1,0	100	86	14	125,66	40,94	67,42	101,35	19,35	94,10	88,40	6,06	
	2,0	100	86	15	125,66	57,79	54,01	115,50	8,09	92,50	74,50	19,46	
45°	4,0	100	90	25	125,66	16,37	86,97	117,09	6,82	90,40	84,40	6,64	
	1,0	100	84	13	125,66	21,60	82,81	105,09	16,37	151,10	99,50	34,15	
	2,0	100	85	13	125,66	2,70	97,85	115,54	8,05	86,20	79,60	7,66	
	4,0	100	86	18	125,66	2,74	97,82	118,24	5,90	99,10	84,20	15,04	
90°	1,0	100	85	11	125,66	32,45	74,18	58,91	53,12	131,30	84,20	35,87	
	2,0	100	90	16	125,66	2,18	98,27	118,63	5,59	82,90	72,30	12,79	
	4,0	100	88	20	125,66	2,16	98,28	118,80	5,46	86,10	75,90	11,85	
	1,0	100	80	8	125,66	3,28	97,39	50,93	59,47	171,20	112,80	34,11	
120°	2,0	100	82	19	125,66	1,92	98,47	117,90	6,18	82,60	90,30	-9,32	
	4,0	100	83	18	125,66	7,63	93,93	116,36	7,40	96,10	86,10	10,41	
	1,0	100	79	11	125,66	12,21	90,28	64,99	48,28	175,70	91,90	47,69	
	2,0	100	79	12	125,66	5,83	95,36	113,53	9,65	86,50	85,60	1,04	
135°	4,0	100	76	13	125,66	18,73	85,09	118,07	6,04	91,30	77,10	15,55	
	1,0	100	78	27	125,66	8,91	92,91	56,61	54,95	167,70	99,80	40,49	
	2,0	100	78	26	125,66	8,61	93,15	116,91	6,96	79,30	85,30	-7,57	
	4,0	100	78	28	125,66	6,00	95,23	117,34	6,62	87,00	68,20	21,61	
150°	1,0	100	78	22	125,66	16,97	86,50	67,95	45,93	179,50	99,40	44,62	
	2,0	100	79	22	125,66	56,74	54,85	118,03	6,07	75,80	86,30	-13,85	
	4,0	100	80	20	125,66	6,38	94,92	118,37	5,80	63,10	83,60	-32,49	

Tabela A.7 – Características magnéticas dos modelos sintéticos de Conjuntos de Diques, os valores das componentes de sua magnetização Total recuperada e os erros entre estas componentes e seus valores originais. As intensidades de magnetização são dadas em  $A \cdot m^{-1}$ .

Direções de Magnetizações Totais		Susceptibilidades		Razões de Kőentgsberg		Corpo		Análise dos Resultados																	
								Composições de 3 corpos iguais: Diques																	
Iguais entre si		Iguais entre si	0,10	Iguais entre si	2,00	1,00	4,00	Vetor Indução			Vetor Remanência			Vetor Total			Vetor Total Recuperado			Erro %					
								Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade
Iguais entre si	A 180° de Direção de Magnetização Induzida	Diferentes entre si	0,05	Diferentes entre si	2,00	1,00	4,00	1	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	186,00	180,00	162,70	180,00	2,33	0,75	3,23		
								2	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	186,00	186,00	34,20	180,00	2,33	0,75	3,23		
								3	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	186,00	186,00	180,00	2,33	0,75	3,23			
		Diferentes entre si	0,10	Diferentes entre si	2,00	1,00	4,00	1,00	4,00	1	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	2,00	1,90	180,00	0,22	0,75	5,00	
										2	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	741,00	30,00	160,00	185,00	600,00	0,22	0,75	2,70		
										3	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	185,00	30,00	160,00	93,00	100,00	1,22	0,61	7,53		
		Diferentes entre si	0,15	Diferentes entre si	2,00	1,00	4,00	1,00	4,00	1	-29,71	-20,58	277,76	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	278,00	180,00	162,20	1,22	0,61	3,23	
										2	-29,71	-20,58	277,76	29,00	160,00	555,75	30,00	160,00	0,60	260,00	1,22	0,61	6,47		
										3	-29,71	-20,58	277,76	29,00	160,00	92,00	30,00	160,00	0,55	0,55	0,89	0,58	8,33		
		Diferentes entre si	0	Diferentes entre si	0,10	Diferentes entre si	2,00	1,00	4,00	1	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	1110,00	30,00	160,00	834,00	800,00	162,10	800,00	16,67	0,58	4,08
										2	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	185,00	550,00	27,27	1,39	1,08		
										3	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	60,00	-20,58	322,00	320,00	10,44	1,56	0,82		
Diferentes entre si	0,15			Diferentes entre si	2,00	1,00	4,00	1,00	4,00	1	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	29,00	160,00	185,00	180,00	25,60	180,00	27,67	37,33	2,70
										2	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	29,00	-20,58	371,00	320,00	12,78	42,48	0,00		
										3	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	60,00	-20,58	320,00	37,00	173,50	320,00	12,78	42,64	0,00
Diferentes entre si	0,05			Diferentes entre si	2,00	1,00	4,00	1,00	4,00	1	-29,71	-20,58	185,20	30,00	160,00	742,00	29,00	160,00	556,00	550,00	37,00	550,00	4,44	3,75	1,08
										2	-29,71	-20,58	92,60	29,00	160,00	185,00	29,00	-20,58	277,00	270,00	3,61	42,31	2,53		
										3	-29,71	-20,58	185,20	90,00	150,00	370,00	60,00	-20,58	322,00	320,00	13,22	42,47	0,62		
Diferentes entre si	0,05			Diferentes entre si	2,00	1,00	4,00	1,00	4,00	1	-29,71	-20,58	277,76	30,00	160,00	555,00	29,00	160,00	278,00	270,00	172,90	270,00	4,00	3,58	2,88
										2	-29,71	-20,58	277,76	30,00	160,00	93,00	-29,71	-20,58	186,00	186,00	6,72	39,03	---		
										3	-29,71	-20,58	185,20	90,00	150,00	370,00	60,00	-20,58	322,00	320,00	10,11	39,19	0,62		
Diferentes entre si	0,15	Diferentes entre si	2,00	1,00	4,00	1,00	4,00	1	-29,71	-20,58	277,76	30,00	160,00	1111,00	29,00	160,00	834,00	800,00	161,10	800,00	7,11	0,31	4,08		
								2	-29,71	-20,58	277,76	30,00	160,00	370,00	29,00	-20,58	322,00	320,00	10,11	39,19	0,62				
								3	-29,71	-20,58	277,76	30,00	160,00	1111,00	29,00	160,00	834,00	800,00	7,11	0,31	4,08				

Tabela A.8 – Profundidades e volumes dos modelos sintéticos de Conjunto de Diques, seus valores estimados com o procedimento deste estudo, os erros entre seus valores originais e recuperados, e os tempos de processamento das inversões com e sem modelo inicial e suas diferenças.

Análise dos Resultados														
Composições de 3 corpos iguais: Diques														
Direções de Magnetizações Totais	Susceptibilidades	Razões de Köenigsberg	Corpo	Profundidade Real	Profundidade Recuperada (EHD)		Volume Real	Volume Recuperado (km³) Sem Mod. Inicial	Diferença %	Volume Recuperado (km³) Com Mod. Inicial	Diferença %	Tempo de Processamento (min)		
					EHD	Desvio Padrão EHD						Sem Mod. Inicial	Com Mod. Inicial	
Iguals entre si	Iguals entre si	0,10	2,00	1	100	77	360	46,13	87,19	267,32	25,74	61,10	79,00	-29,30
					100	88								
					100	79								
		Diferentes entre si	2,00	1	100	76	360	6,47	98,20	341,88	5,03	48,70	69,30	-42,30
					100	88								
					100	83								
	Diferentes entre si	0,05	2,00	1	100	80	360	41,67	88,43	331,93	7,80	69,90	66,90	4,29
					100	88								
					100	78								
		0,10	1,00	1	100	79	360	9,28	97,42	347,93	3,35	69,80	75,20	-7,74
					100	88								
					100	80								
Diferentes entre si	0,15	4,00	3	100	80	360	123,28	65,76	228,18	36,62	87,50	72,80	16,80	
				100	81									
				100	80									
	0,10	1,00	1	100	---	360	11,44	96,82	298,15	17,18	81,00	85,10	-5,06	
				100	78									
				100	82									
Diferentes entre si	0,05	2,00	1	100	79	360	91,96	74,46	264,88	26,42	69,60	74,80	-7,47	
				100	83									
				100	83									
	0,15	1,00	1	100	---	360	13,5	96,25	346,55	3,74	67,60	64,50	4,59	
				100	78									
				100	85									
180	0,15	4,00	3	100	85	360	13,5	96,25	346,55	3,74	67,60	64,50	4,59	
				100	78									
				100	85									



Tabela A.9 – Características magnéticas dos modelos sintéticos de Conjuntos de Esferas, os valores das componentes de sua magnetização Total recuperada e os erros entre estas componentes e seus valores originais. As intensidades de magnetização são dadas em  $A.m^{-1}$ .

Análise dos Resultados																		
Composições de 3 corpos iguais: Esferas																		
Direções de Magnetizações Totais	Susceptibilidades	azões de Khenigsbe	Corpo	Vetor Indução			Vetor Remanência			Vetor Total			Vetor Total Recuperado			Erro %		
				Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade
Iguals entre si	0,10	Iguals entre si	2,00	1	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	186,00	180,00	0,67	0,53	3,23	
				2	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	186,00	180,00	0,67	0,53	3,23	
				3	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	186,00	180,00	0,67	0,53	3,23	
		Diferentes entre si	1,00	1	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	185,00	30,00	160,00	2,00	---	---	---	---	
				2	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	185,00	180,00	1,22	0,08	2,70	
				3	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	741,00	30,00	160,00	556,00	550,00	1,22	0,08	1,08	
	Diferentes entre si	0,05	Iguals entre si	2,00	1	-29,71	-20,58	92,60	29,00	160,00	185,00	30,00	160,00	93,00	100,00	0,00	0,28	7,53
					2	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	186,00	180,00	0,00	0,28	3,23
					3	-29,71	-20,58	277,76	29,00	160,00	555,75	30,00	160,00	278,00	270,00	0,00	0,28	2,88
		Diferentes entre si	1,00	1	-29,71	-20,58	92,60	29,00	160,00	92,00	30,00	160,00	0,00	---	---	---		
				2	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	185,00	800,00	16,67	0,47	2,70	
				3	-29,71	-20,58	277,76	29,00	160,00	1110,00	30,00	160,00	834,00	800,00	16,67	0,47	4,08	
Diferentes entre si	0,10	Iguals entre si	2,00	1	-29,71	-20,58	185,20	29,71	-20,58	371,00	-29,71	-20,58	556,00	550,00	20,49	3,63	1,08	
				2	-29,71	-20,58	185,20	90,00	150,00	370,00	60,00	160,00	322,00	320,00	3,67	3,47	0,62	
				3	-29,71	-20,58	185,20	30,00	160,00	370,00	29,00	160,00	185,00	190,00	20,89	42,36	2,70	
		Diferentes entre si	1,00	1	-29,71	-20,58	185,20	90,00	150,00	185,00	60,00	-20,58	371,00	370,00	3,99	3,58	0,27	
				2	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	742,00	29,00	160,00	556,00	320,00	12,83	3,42	0,00	
				3	-29,71	-20,58	185,20	30,00	160,00	185,00	29,00	160,00	277,00	550,00	4,39	42,31	1,08	
	Diferentes entre si	0,05	Iguals entre si	2,00	1	-29,71	-20,58	185,20	90,00	150,00	370,00	60,00	-20,58	322,00	280,00	11,27	2,97	1,08
					2	-29,71	-20,58	185,20	30,00	160,00	742,00	29,00	160,00	556,00	320,00	5,56	2,81	0,62
					3	-29,71	-20,58	277,76	30,00	160,00	555,00	29,00	160,00	278,00	280,00	11,67	41,69	0,72
		Diferentes entre si	1,00	1	-29,71	-20,58	92,60	29,71	-20,58	93,00	-29,71	-20,58	186,00	190,00	22,72	36,81	2,15	
				2	-29,71	-20,58	185,20	90,00	150,00	370,00	60,00	-20,58	322,00	320,00	5,89	36,97	0,62	
				3	-29,71	-20,58	277,76	30,00	160,00	1111,00	29,00	160,00	834,00	800,00	23,11	1,92	4,08	

Tabela A.10 – Profundidades e volumes dos modelos sintéticos de Conjunto de Esferas, seus valores estimados com o procedimento deste estudo, os erros entre seus valores originais e recuperados, e os tempos de processamento das inversões com e sem modelo inicial e suas diferenças.

Análise dos Resultados													
Composições de 3 corpos iguais: Esferas													
Direções de Magnetizações Totais	Susceptibilidades	Razões de Köenigsberg	Corpo	Profundidade Real	Profundidade Recuperada (EHD)		Volume Real (km³)	Volume Recuperado (km³)		Diferença %	Tempo de Processamento (min)		Diferença %
					EHD	Desvio Padrão EHD		Sem Mod. Inicial	Com Mod. Inicial		Sem Mod. Inicial	Com Mod. Inicial	
Iguais entre si A 180° da Direção de Magnetização Induzida	Iguais entre si 0,10	Iguais entre si	1	100	113	19	100,53	13,54	86,53	12,94	35,20	18,40	47,73
			2	100	89	20							
			3	100	77	13							
	Diferentes entre si	Diferentes entre si	1	100	---	---	100,53	2,10	97,91	33,01	25,80	24,50	5,04
			2	100	79	14							
			3	100	120	22							
	Diferentes entre si	Diferentes entre si	1	100	96	38	100,53	26,49	73,65	28,01	36,50	19,50	46,58
			2	100	94	37							
			3	100	116	17							
	Diferentes entre si	Diferentes entre si	1	100	---	---	100,53	1,50	98,51	44,18	28,30	19,00	32,86
			2	100	148	38							
			3	100	133	23							
Diferentes entre si	Diferentes entre si	1	100	94	20	100,53	40,60	59,61	35,99	30,30	42,70	-40,92	
		2	100	71	27								
		3	100	122	25								
Diferentes entre si	Diferentes entre si	1	100	93	16	100,53	5,64	94,39	21,78	25,10	26,00	-3,59	
		2	100	124	14								
		3	100	136	25								
Diferentes entre si	Diferentes entre si	1	100	118	31	100,53	46,60	53,65	28,05	33,30	22,10	33,63	
		2	100	97	26								
		3	100	128	30								
Diferentes entre si	Diferentes entre si	1	100	120	30	100,53	2,91	97,11	6,86	30,40	24,90	18,09	
		2	100	126	26								
		3	100	122	27								

Tabela A.11 – Características magnéticas dos modelos sintéticos de Conjuntos de Pipes, os valores das componentes de sua magnetização Total recuperada e os erros entre estas componentes e seus valores originais. As intensidades de magnetização são dadas em A.m<sup>-1</sup>.

Análise dos Resultados																			
Composições de 3 corpos iguais: Pipes																			
Direções de Magnetizações Totais	Susceptibilidades	Razões de Köenigsberg	Corpo	Vetor Indução			Vetor Remanência			Vetor Total			Vetor Total Recuperado			Erro %			
				Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Declination
A 180° da Direção de Magnetização Induzida	Iguais entre si	0,10	2,00	1	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	186,00	180,00	2,39	0,78	3,23		
				2	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	186,00	180,00	2,39	0,78	3,23		
				3	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	186,00	180,00	2,39	0,78	3,23		
		Diferentes entre si	1,00	1	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	185,00	30,00	160,00	2,00	2,00	0,06	0,47	0,00		
				2	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	185,00	180,00	0,06	0,47	2,70		
				3	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	741,00	30,00	160,00	556,00	550,00	0,06	0,47	1,08		
	Diferentes entre si	0,05	2,00	1	-29,71	-20,58	92,60	29,00	160,00	185,00	30,00	160,00	93,00	100,00	1,61	0,64	7,53		
				2	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	186,00	180,00	1,61	0,64	3,23		
				3	-29,71	-20,58	277,76	29,00	160,00	555,75	30,00	160,00	278,00	280,00	1,61	0,64	0,72		
		Diferentes entre si	1,00	1	-29,71	-20,58	92,60	29,00	160,00	92,00	30,00	160,00	0,60	0,55	7,17	0,44	8,33		
				2	-29,71	-20,58	185,20	29,00	160,00	370,00	30,00	160,00	185,00	190,00	16,67	0,44	2,70		
				3	-29,71	-20,58	277,76	29,00	160,00	1110,00	30,00	160,00	834,00	800,00	16,67	0,44	4,08		
Diferentes entre si	0,10	2,00	1	-29,71	-20,58	185,20	90,00	150,00	371,00	-29,71	-20,58	322,00	320,00	15,17	7,28	0,62			
			2	-29,71	-20,58	185,20	30,00	160,00	370,00	29,00	160,00	185,00	190,00	32,39	31,61	2,70			
			3	-29,71	-20,58	185,20	90,00	150,00	370,00	29,00	160,00	371,00	370,00	6,77	38,31	0,27			
	Diferentes entre si	1,00	1	-29,71	-20,58	185,20	90,00	150,00	370,00	60,00	-20,00	320,00	320,00	10,06	38,47	0,00			
			2	-29,71	-20,58	185,20	30,00	160,00	742,00	29,00	160,00	556,00	550,00	7,17	0,42	1,08			
			3	-29,71	-20,58	277,76	29,00	160,00	185,00	-29,71	-20,58	277,00	270,00	6,83	38,03	2,53			
Diferentes entre si	0,05	2,00	1	-29,71	-20,58	185,20	90,00	150,00	370,00	60,00	-20,00	322,00	320,00	10,00	38,19	0,62			
			2	-29,71	-20,58	185,20	30,00	160,00	555,00	29,00	160,00	278,00	280,00	7,22	0,69	0,72			
			3	-29,71	-20,58	277,76	29,00	160,00	93,00	-29,71	-20,58	186,00	190,00	7,94	37,70	2,15			
	Diferentes entre si	1,00	1	-29,71	-20,58	92,60	90,00	150,00	370,00	60,00	-20,00	322,00	320,00	8,89	37,86	0,62			
			2	-29,71	-20,58	185,20	30,00	160,00	1111,00	29,00	160,00	834,00	800,00	8,33	1,03	4,08			
			3	-29,71	-20,58	277,76	30,00	160,00	277,76	29,00	160,00	277,76	277,76	0,00	0,00	0,00			

Tabela A.12 – Profundidades e volumes dos modelos sintéticos de Conjuntos de Pipes, seus valores estimados com o procedimento deste estudo, os erros entre seus valores originais e recuperados, e os tempos de processamento das inversões com e sem modelo inicial e suas diferenças.

Análise dos Resultados														
Composições de 3 corpos iguais: Pipes														
Direções de Magnetizações Totais	Susceptibilidades	Razões de Königsberg	Corpo	Profundidade Real	Profundidade Recuperada (EHD)		Volume Real (km³)	Volume Recuperado (km³) Sem Mod. Inicial	Diferença %	Volume Recuperado (km³) Com Mod. Inicial	Diferença %	Tempo de Processamento (min)		
					EHD	Desvio Padrão EHD						Sem Mod. Inicial	Com Mod. Inicial	
Iguais entre si	Iguais entre si	0,10	2,00	1	100	78	376,98	35,37	90,82	299,35	20,59	84,40	79,40	5,92
					100	77								
					100	79								
		Diferentes entre si	1,00	1	100	81	376,98	3,17	99,16	332,58	11,78	77,30	60,40	21,86
					100	82								
					100	81								
	Diferentes entre si	0,05	2,00	1	100	77	376,98	57,53	84,74	341,58	9,39	70,00	66,20	5,43
					100	78								
					100	79								
		Diferentes entre si	1,00	1	100	84	376,98	5,91	98,43	323,52	14,18	68,30	76,20	-11,57
					100	85								
					100	85								
Diferentes entre si	Iguais entre si	0,10	2,00	1	100	82	376,98	66,71	82,30	286,70	23,95	71,80	83,80	-16,71
					100	76								
					100	10								
		Diferentes entre si	1,00	1	100	78	376,98	8,74	97,68	285,79	24,19	78,90	72,10	8,62
					100	88								
					100	15								
	Diferentes entre si	0,05	2,00	1	100	77	376,98	85,49	77,32	308,61	18,14	80,90	75,90	6,18
					100	88								
					100	14								
		Diferentes entre si	1,00	1	100	80	376,98	6,68	98,23	341,58	9,39	68,70	76,40	-11,21
					100	88								
					100	14								



Tabela A.15 – Características magnéticas dos casos reais, os valores das componentes de suas magnetizações recuperadas, Razões de Köenigsberg e estimativas de susceptibilidades magnéticas aparentes. As intensidades de magnetização são dadas em  $A.m^{-1}$ .

Análise dos Resultados												
Casos Reais												
Anomalia	Razão de Köenigsberg	Susceptibilidade Magnética Estimada	Vetor Indução			Vetor Remanência			Vetor Total Recuperado			
			Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	Inclinação	Declinação	Intensidade	
Araxá	0,35	0,16	-29,23	-20,48	296,28	-21,14	-14,36	105,09	-27,60	-18,60	400,00	
Pratinha I	0,53	0,11	-29,71	-20,58	203,69	55,09	213,45	107,12	-5,00	-40,90	150,00	
Salitre I (NW)	3,70	0,15	-27,98	-20,48	278,00	44,09	-168,71	1028,46	48,30	-155,40	800,00	
Salitre I (SE)	0,45	0,15	-27,98	-20,48	278,00	-44,13	-20,50	125,40	-30,40	-18,70	400,00	
Salitre II	0,80	0,15	-27,98	-20,48	278,00	-32,50	-20,97	222,37	-33,90	-20,00	500,00	
Salitre III	0,70	0,15	-27,98	-20,48	278,00	-40,15	-20,50	194,57	-33,90	-20,00	470,00	
Serra Negra (perófito)	5,37	0,20	-27,98	-20,48	370,67	-37,55	-140,63	1989,65	-43,90	-20,00	2000,00	
Tapira	2,56	0,16	-29,70	-20,60	296,28	52,70	163,95	758,39	65,90	169,50	500,00	
Catalão	1,37	0,17	-25,90	-20,10	316,00	-65,78	-5,59	431,96	-48,90	-14,50	700,00	
Morro do Leme	1,26	0,13	-8,50	-12,90	304,36	26,62	174,95	382,52	64,80	-141,80	140,00	

Tabela A.16 – Profundidades, volumes dos casos reais e os tempos de processamento das inversões com e sem modelo inicial e suas diferenças.

Análise dos Resultados													
Casos Reais													
Anomalia	Profundidade Média Recuperada (EHD)		Volume Recuperado (km³)			Tempo de Processamento (min)							
	EHD	Desvio Padrão EHD	Sem Mod. Inicial	Com Mod. Inicial	Com Mod. Inicial	Sem Mod. Inicial	Com Mod. Inicial	Diferença %	Com Mod. Inicial Re-analisado	Diferença com Inversão sem Mod. Inicial	Diferença com Inversão com Mod. Inicial		
Araxá	177	78	21	35	37,20	41,90	11,22						
Pratinha I	330	40	580	950	22,50	89,60	74,89						
Salitre I (NW)	247	112	---	297									
Salitre I (SE)	247	112	---	---									
Salitre II	244	40	---	35									
Salitre III	405	105	---	29									
Serra Negra (peridotito)	297	104	1111	236	116,01	155,00	25,15	234,80	-51,48	-102,40			
Tapira	86	25	351	250	24,20	45,10	46,34	---	---	---			
Catalão	153	75	310	79	127,60	174,10	26,71	---	---	---			
Morro do Leme	59	20	2,5	2,9	18,70	53,90	65,31	---	---	---			