

INTERPRETAÇÃO AEROMAGNÉTICA AUTOMÁTICA COM USO DA EQUAÇÃO HOMOGÊNEA DE EULER E SUA APLICAÇÃO NA BACIA DO SOLIMÕES

por

LUIZ GERALDO DO CARMO LUCCHESI LOURES

Geólogo (Universidade Federal do Rio de Janeiro - 1988)

Tese submetida como requisito parcial ao grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

em

GEOFÍSICA

ao

Colegiado do Curso de Pós-Graduação em

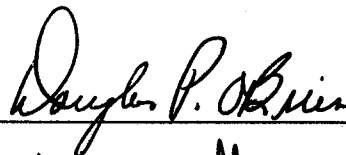
Geofísica

da

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Banca Examinadora :

Dr. Douglas Patrick O'Brien (Orientador)



Dra. Naomi Ussami



Dr. Marco Polo Pereira da Boa Hora



Data da Homologação : 27/09/1991

T 369 LOURES, Luiz Geraldo do Carmo Lucchesi. **Interpretação aeromagnética automática com uso da equação homogênea de Euler e sua aplicação na Bacia do Solimões.**
L 892 Belém: Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. Deptº de Geofísica, 1991. 115 p.
Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPa., 1991.

1. INTERPRETAÇÃO AEROMAGNÉTICA. 2. APLICAÇÃO DE EQUAÇÃO DE EULER-Bacia do Solimões. 3. GEOFÍSICA. I. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ. Centro de Geociências-Departamento de Geofísica. II. TÍTULO.

0391/546

T 369 03.10.91

SUMÁRIO

SUMÁRIO	i
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	iii
RESUMO	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	3
1.1 Interpretação automática.....	3
1.2 Os principais métodos de interpretação automática	3
1.3 Ambigüidade na interpretação aeromagnética automática	4
1.4 Objetivos do trabalho	5
CAPÍTULO 2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO	8
2.1 Teorema de Euler	10
2.2 Aplicação da equação de Euler na interpretação automática	11
2.3 Equação de Euler para corpos prismáticos	13
2.4 Cálculo do gradiente	17
CAPÍTULO 3. METODOLOGIA	20
3.1 Metodologia adotada.....	20
3.2 O problema inverso	20
CAPÍTULO 4. TESTES COM ANOMALIAS SINTÉTICAS.....	24
4.1 Prisma vertical semi-infinito.....	24
4.2 Interferência entre fontes	26

4.3 Efeito da interferência de soleiras	28
4.4 Análise geral dos resultados	32
CAPÍTULO 5. TESTES COM DADOS REAIS	88
5.1 Área escolhida para testes	88
5.2 Aplicação dos testes	88
5.3 Análise dos resultados	89
CAPÍTULO 6. INTERPRETAÇÃO AEROMAGNÉTICA AUTOMÁTICA NA BACIA DO SO-	
LIMÕES	99
6.1 Levantamento aeromagnético	101
6.2 Geologia regional	101
6.3 Aplicação do método	103
6.4 Análise dos resultados	104
CAPÍTULO 7. CONCLUSÃO	109
7.1 O método de interpretação automática	109
7.2 A interpretação automática na bacia do Solimões	110
AGRADECIMENTOS	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112

LISTA DE ILUSTRAÇÕES (LEGENDAS EM FORMA SUCINTA EM GERAL)

- Fig. 1 Anomalia magnética anti-simétrica. (a) Uma única fonte que possui magnetização constante e inclinação do vetor magnetização de 45° . (b) Duas fontes com com direções opostas dos vetores de magnetização..... 7
- Fig. 2 Anomalia magnética simétrica positiva. (a) Dique vertical semi-infinito, com vetor magnetização vertical como fonte. (b) Dique com mergulho semi-infinito e vetor magnetização paralelo ao mergulho como fonte 8
- Fig. 3 Ambigüidade causada pelo nível de base para anomalia magnética antissimétrica. (a) Inclinação do vetor magnetização de 45° . (b) Inclinação do vetor magnetização de 60° 9
- Fig. 4 Sistema cartesiano ortogonal 19
- Fig. 5 Prisma retangular vertical semi-infinito 19
- Fig. 6 Anomalia magnética causada pelo prisma vertical semi-infinito, com inclinação e declinação do vetor magnetização igual a 45° e 30° , respectivamente, e campo geomagnético com inclinação de 15° e declinação de -5° 33
- Fig. 7 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 6, usando-se $\phi_N = 0,0$, $\phi_{z_o} = 3,0$, $\lambda = 10^{-5}$ e janela de 1×1 km (5×5 observações) 34
- Fig. 8 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 6, usando-se $\phi_N = 0,0$, $\phi_{z_o} = 3,0$, $\lambda = 10^{-4}$ e janela de 1×1 km (5×5 observações) 35
- Fig. 9 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 6, usando-se $\phi_N = 0,0$, $\phi_{z_o} = 3,0$, $\lambda = 10^{-3}$ e janela de 1×1 km (5×5 observações) 36
- Fig. 10 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 6, usando-se $\phi_N = 0,0$, $\phi_{z_o} = 3,0$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1×1 km (5×5 observações) 37
- Fig. 11 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 6, usando-se $\phi_N = 0,0$, $\phi_{z_o} = 3,0$, $\lambda = 10^{-1}$ e janela de 1×1 km (5×5 observações) 38

Fig. 12 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 6, usando-se $\phi_N = 0,7$, $\phi_{zo} = 3,0$, $\lambda = 10^{-5}$ e janela de $1^\circ \times 1$ km (5 x 5 observações)	39
Fig. 13 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 6, usando-se $\phi_N = 0,7$, $\phi_{zo} = 3,0$, $\lambda = 10^{-4}$ e janela de $1^\circ \times 1$ km (5 x 5 observações)	40
Fig. 14 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 6, usando-se $\phi_N = 0,7$, $\phi_{zo} = 3,0$, $\lambda = 10^{-3}$ e janela de $1^\circ \times 1$ km (5 x 5 observações)	41
Fig. 15 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 6, usando-se $\phi_N = 0,7$, $\phi_{zo} = 3,0$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de $1^\circ \times 1$ km (5 x 5 observações)	42
Fig. 16 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 6, usando-se $\phi_N = 0,7$, $\phi_{zo} = 3,0$, $\lambda = 10^{-1}$ e janela de $1^\circ \times 1$ km (5 x 5 observações)	43
Fig. 17 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 6, usando-se $\phi_N = 0,5$, $\phi_{zo} = 3,0$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de $1^\circ \times 1$ km (5 x 5 observações)	44
Fig. 18 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 6, usando-se $\phi_N = 0,5$, $\phi_{zo} = 3,0$, $\lambda = 10^{-1}$ e janela de $1^\circ \times 1$ km (5 x 5 observações)	45
Fig. 19 Anomalia magnética causada pelo prisma vertical semi-infinito, com inclinação do vetor magnetização vertical e inclinação do campo geomagnético vertical	46
Fig. 20 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 19, usando-se $\phi_N = 0,0$, $\phi_{zo} = 3,0$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de $1^\circ \times 1$ km (5 x 5 observações)	47
Fig. 21 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 19, usando-se $\phi_N = 0,5$, $\phi_{zo} = 3,0$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de $1^\circ \times 1$ km (5 x 5 observações)	48
Fig. 22 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 19, usando-se $\phi_N = 0,7$, $\phi_{zo} = 3,0$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de $1^\circ \times 1$ km (5 x 5 observações)	49
Fig. 23 Anomalia magnética causada pelo prisma vertical semi-infinito, com inclinação do vetor magnetização e do campo geomagnético horizontal e declinação de 30°	50
Fig. 24 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 23, usando-se $\phi_N = 0,0$, $\phi_{zo} = 3,0$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de $1^\circ \times 1$ km (5 x 5 observações)	51

Fig. 25 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 23, usando-se $\phi_N = 0,5$, $\phi_{zo} = 3,0$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1×1 km (5 x 5 observações)	52
Fig. 26 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 23, usando-se $\phi_N = 0,7$, $\phi_{zo} = 3,0$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1×1 km (5 x 5 observações)	53
Fig. 27 Modelo sintético constituído por prismas verticais semi-infinitos.	54
Fig. 28 Campo magnético causado pelo modelo da figura 27	55
Fig. 29 Estimativas de $\bar{r}_o$, para o modelo da figura 27, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{zo} = 2,5$, $\lambda = 10^{-5}$ e janela de 1×1 km de largura	56
Fig. 30 Estimativas de $\bar{r}_o$, para o modelo da figura 27, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{zo} = 2,5$, $\lambda = 10^{-4}$ e janela de 1×1 km de largura	57
Fig. 31 Estimativas de $\bar{r}_o$, para o modelo da figura 27, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{zo} = 2,5$, $\lambda = 10^{-3}$ e janela de 1×1 km de largura	58
Fig. 32 Estimativas de $\bar{r}_o$, para o modelo da figura 27, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{zo} = 2,5$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1×1 km de largura	59
Fig. 33 Estimativas de $\bar{r}_o$, para o modelo da figura 27, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{zo} = 2,5$, $\lambda = 10^{-1}$ e janela de 1×1 km de largura	60
Fig. 34 Estimativas de $\bar{r}_o$, para o modelo da figura 27, usando-se $\phi_N = 0,0$ e $\phi_{zo} = 2,5$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1×1 km de largura	61
Fig. 35 Estimativas de $\bar{r}_o$, para o modelo da figura 27, usando-se $\phi_N = 0,0$ e $\phi_{zo} = 2,5$, $\lambda = 10^{-1}$ e janela de 1×1 km de largura	62
Fig. 36 Estimativas de $\bar{r}_o$, para o modelo da figura 27, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{zo} = 2,5$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 2×2 km de largura	63
Fig. 37 Anomalia magnética causada por uma soleira quadrada, com 0,3 km de espessura, a uma profundidade de 0,5 km, 20 km de lado, vetor magnetização com inclinação de 15° e declinação de -5° , susceptibilidade magnética de 0,0080 UGCS e campo geomagnético com inclinação de 15° , declinação de -5° e intensidade de 25.000 gama.	64

Fig. 38 Estimativas de $\bar{r}_o$, para o modelo da figura 37, usando-se $\phi_N = 0,0$ e $\phi_{z_o} = 3,0$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 2 x 2 km de largura	65
Fig. 39 Estimativas de $\bar{r}_o$, para o modelo da figura 37, usando-se $\phi_N = 0,5$ e $\phi_{z_o} = 3,0$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 2 x 2 km de largura	66
Fig. 40 Estimativas de $\bar{r}_o$, para o modelo da figura 37, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_o} = 3,0$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 2 x 2 km de largura	67
Fig. 41 Anomalia magnética causada por duas soleiras quadradas, com 0,3 km de espessura, a uma profundidade de 0,5 km, vetor magnetização com inclinação de 15° e declinação de -5°, susceptibilidade magnética de 0,0080 UGCS e campo geomagnético com inclinação de 15°, declinação de -5° e intensidade de 25.000 gama.	68
Fig. 42 Estimativas de $\bar{r}_o$, para o modelo da figura 41, usando-se $\phi_N = 0,0$ e $\phi_{z_o} = 3,0$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 2 x 2 km de largura	69
Fig. 43 Estimativas de $\bar{r}_o$, para o modelo da figura 41, usando-se $\phi_N = 0,5$ e $\phi_{z_o} = 3,0$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 2 x 2 km de largura	70
Fig. 44 Estimativas de $\bar{r}_o$, para o modelo da figura 41, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_o} = 3,0$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 2 x 2 km de largura	71
Fig. 45 Anomalia magnética causada pelo prisma vertical semi-infinito, com inclinação e declinação do vetor magnetização igual a 45° e 30°, sobreposto por uma soleira com 300 m de espessura a uma profundidade de 500 m, vetor magnetização com inclinação de 15° e declinação de -5° e campo geomagnético com inclinação de 15° e declinação de -5°	72
Fig. 46 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 44, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_o} = 2,5$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km de largura	73
Fig. 47 Anomalia magnética causada pelo prisma vertical semi-infinito, com inclinação e declinação do vetor magnetização igual a 45° e 30°, sobreposto por duas soleiras com 300 m de espessura com profundidades de 500 m e 1200 m, vetor magnetização com inclinação de 15° e declinação de -5° e campo geomagnético com inclinação de 15° e declinação de -5°	74

Fig. 48 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 47, $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{zo} = 2,5$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km de largura	75
Fig. 49 Modelo sintético constituído por prismas verticais semi-infinitos, sobrepostos por uma soleira com 300 m de espessura.	76
Fig. 50 Campo magnético causado pelo modelo da figura 41	77
Fig. 51 Estimativas de $\bar{r}_o$, para o modelo da figura 41, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{zo} = 2,5$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km de largura	78
Fig. 52 Modelo sintético constituído por prismas verticais semi-infinitos, sobrepostos por duas soleiras com 300 m de espessura.	79
Fig. 53 Campo magnético causado pelo modelo da figura 52.	80
Fig. 54 Estimativas de $\bar{r}_o$, para o modelo da figura 44, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{zo} = 2,5$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km de largura	81
Fig. 55 Posição da soleira com variação lateral do vetor magnetização	82
Fig. 56 Campo magnético causado por uma soleira cuja inclinação do vetor magnetização varia lateralmente	83
Fig. 57 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 48, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{zo} = 2,5$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km de largura	84
Fig. 58 Posição do prisma vertical em relação à soleira com variação lateral da inclinação do vetor magnetização	85
Fig. 59 Campo magnético causado pelo modelo da figura 50	86
Fig. 60 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a anomalia magnética da figura 51	87
Fig. 61 Campo magnético da área escolhida para testes do método com dados reais na bacia do Solimões	91
Fig. 62 Localização dos poços presentes na área escolhida para testes na bacia do Solimões	92

Fig. 63 Estimativas de $\bar{r}_o$ para a área na bacia do Solimões escolhida para testes, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_o} = 2,5$, $\lambda = 10^{-5}$ e janela de 1,5 x 1,5 km de largura	93
Fig. 64 Estimativas de $\bar{r}_o$, para a área na bacia do Solimões escolhida para testes, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_o} = 2,5$, $\lambda = 10^{-4}$ e janela de 1,5 x 1,5 km de largura	94
Fig. 65 Estimativas de $\bar{r}_o$, para a área na bacia do Solimões escolhida para testes, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_o} = 2,5$, $\lambda = 10^{-3}$ e janela de 1,5 x 1,5 km de largura	95
Fig. 66 Estimativas de $\bar{r}_o$, para a área na bacia do Solimões escolhida para testes, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_o} = 2,5$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1,5 x 1,5 km de largura	96
Fig. 67 Estimativas de $\bar{r}_o$, para a área na bacia do Solimões escolhida para testes, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_o} = 2,5$, $\lambda = 10^{-1}$ e janela de 1,5 x 1,5 km de largura	97
Fig. 68 Estimativas de $\bar{r}_o$, para a área na bacia do Solimões escolhida para testes, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_o} = 2,5$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1,0 x 1,0 km de largura	98
Fig. 69 Estimativas de $\bar{r}_o$, para a área na bacia do Solimões escolhida para testes, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_o} = 2,5$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 2,0 x 2,0 km de largura	99
Fig. 70 Interpretação das estimativas de $\bar{r}_o$ mostradas na figura 66	100
Fig. 71 Evolução intra-cratônica da bacia Sedimentar do Amazonas	106
Fig. 72 Sessão esquemática da bacia do Solimões mostrando os principais níveis de soleiras	107
Fig. 73 Alto de Jutai, Calha do Juruá e mapa de isopacas do embasamento	108

**INTERPRETAÇÃO AEROMAGNÉTICA AUTOMÁTICA COM USO DA
EQUAÇÃO HOMOGÊNEA DE EULER E SUA APLICAÇÃO
NA BACIA DO SOLIMÕES**
(TESE DE MESTRADO : Set./91)

LUIZ GERALDO DO CARMO LUCCHESI LOURES
Orientador : Dr. Douglas Patrick O'Brien

*Departamento de Geofísica – Centro de Geociências/UFPA
Caixa Postal 309 – Belém, PA, Brasil*

RESUMO

Na elaboração deste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia para interpretar dados aeromagnéticos de forma automática, visando uma rápida avaliação da distribuição das fontes, através de uma aplicação da “equação Homogênea de Euler”. Para o uso dessa equação é necessário conhecer apenas o campo magnético e suas três derivadas ($\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial T}{\partial y}$, $\frac{\partial T}{\partial z}$), as quais podem ser medidas diretamente ou calculadas a partir do campo magnético, o que torna possível a aplicação do método.

Com o uso da equação homogênea de Euler, é possível formular um problema inverso capaz de estimar o vetor de parâmetros, contendo a localização de onde pode existir a fonte e o índice estrutural, o qual depende do tipo de fonte. O problema inverso foi estabilizado com a introdução de informações “a priori” no vetor de parâmetros e com uso de uma matriz de pesos. A metodologia foi testada em anomalias teóricas e reais, em região de baixa latitude com resultados satisfatórios. A aplicabilidade do método é analisada, discutindo-se a ambigüidade causada pela falta de informações sobre o vetor magnetização do corpo, inerente aos métodos de interpretação automática.

Como uma aplicação, foi escolhida uma área na bacia do Solimões. A partir de 1977, a bacia do Solimões vem merecendo considerável atividade exploratória, motivada pelas primeiras descobertas de gás em arenitos da formação Monte Alegre. Desde então, trabalhos de sísmica e de perfuração vêm sendo desenvolvidos na região. O conhecimento das estruturas do embasamento, é de grande importância para a descoberta de estruturas favoráveis ao trapeamento de hidrocarbonetos e para um melhor conhecimento dos eventos tectônicos. Dessa aplicação, foi possível obter informações preliminares sobre a distribuição de intrusões de corpos magnéticos intra-embasamento e supra-embasamento.

INTERPRETATION OF AEROMAGNETIC DATA BY USE OF EULER'S HOMOGENEOUS EQUATIONS AND AN EXAMPLE OF ITS USE IN THE SOLIMÕES BASIN, BRAZIL

(MASTER THESIS : Sept./91)

LUIZ GERALDO DO CARMO LUCCHESI LOURES

Adviser : Dr. Douglas Patrick O'Brien

Departamento de Geofísica – Centro de Geociências/UFPA

Caixa Postal 309 – Belém, PA, Brasil

ABSTRACT

We present here a methodology for the rapid interpretation of aeromagnetic data in three dimensions. An estimation of the x , y and z coordinates of prismatic elements is obtained through the application of "Euler's Homogeneous equation" to the data. In this application, it is necessary to have only the total magnetic field and its derivatives ($\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial T}{\partial y}$, $\frac{\partial T}{\partial z}$). These components can be measured or calculated from the total field data.

In the use of Euler's Homogeneous equation, the structural index, the coordinates of the corners of the prism and the depth to the top of the prism are unknown vectors. Inversion of the data by classical least-squares methods renders the problem ill-conditioned. However, the inverse problem can be stabilized by the introduction of both *a priori* information within the parameter vector together with a weighting matrix. The algorithm was tested with synthetic and real data in a low magnetic latitude region and the results were satisfactory. The applicability of the theorem and its ambiguity caused by the lack of information about the direction of total magnetization, inherent in all automatic methods, is also discussed.

As an application, an area within the Solimões basin was chosen to test the method. Since 1977, the Solimões basin has become a center of exploration activity, motivated by the first discovery of gas bearing sandstones within the Monte Alegre formation. Since then, seismic investigations and drilling have been carried on in the region. A knowledge of basement structures is of great importance in the location of oil traps and understanding the tectonic history of this region. Through the application of this method a preliminary estimate of the areal distribution and depth of interbasement and sedimentary magnetic sources was obtained.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Interpretação automática

Com o advento do magnetômetro de precessão de prótons na década de 60, tornou-se possível a obtenção de medidas de campo magnético da terra em grandes quantidades através da realização de levantamentos aeromagnéticos. Segundo Redford (1980), cerca de 24 milhões de linhas-milha de dados aeromagnéticos foram coletados no período entre 1961 e 1978, excluindo-se nesta estimativa os aerolevantamentos feitos nos países de economia socialista. No início dessa nova fase, houve um grande aumento na demanda de informações e as técnicas de interpretação disponíveis deixavam um grande quantidade de dados aeromagnéticos que estavam sendo obtidos sem serem estudados. Surgiu então a necessidade de se criar métodos de interpretação que pudessem ser aplicados diretamente aos dados de campo, para se obter uma rápida avaliação da área em estudo, através de uma primeira aproximação da distribuição das fontes.

Nessa nova fase da Geofísica na área dos métodos potenciais, durante um trabalho de interpretação de um levantamento aeromagnético, duas etapas sucessivas são desenvolvidas. Na primeira etapa é feita a interpretação automática, objetivando a seleção de áreas e uma primeira aproximação da distribuição das fontes. Na etapa posterior, tendo uma aproximação da localização das fontes (conseguida na etapa anterior), métodos de inversão serão usados nas áreas de interesse e, através de sucessivas iterações, a distribuição das fontes em sub-superfície será estimada com a precisão necessária, produzindo resultados quantitativos, os quais, juntamente com as informações geológicas, formarão a base para a interpretação do ambiente geológico. Segundo Nabighian (1984) na fase em que os métodos automáticos são empregados (primeira etapa da interpretação geofísica) uma grande quantidade do tempo do trabalho de interpretação geofísica é consumida.

1.2 Os Principais métodos de interpretação automática

A partir da década de 70, um forte desenvolvimento na área da computação eletrônica tornou possível o desenvolvimento de novos métodos de interpretação em todas as áreas da Geofísica. Nesse período surgiram as primeiras publicações descrevendo métodos automáticos.

Um método chamado "Werner-Deconvolution" usado por geofísicos, deste 1968, foi pela

primeira vez descrito por Werner (1953). Porém, Hartman et al. (1971), foi quem primeiro publicou sobre esse método após alguns anos de sua utilização. Outras publicações como Jain (1976) apresentam modelos estudados através deste método. Ku & Sharp (1983) usa o método Marquardt de inversão para ajustar a primeira aproximação encontrada.

O'Brien (1971) desenvolve um método para estimar a profundidade da fonte em perfis aeromagnéticos, usando a propriedade de que as derivadas vertical e horizontal são a transformada de Hilbert uma da outra.

Um outro método automático para a determinação da profundidade em perfis aeromagnéticos foi descrito por Naudy (1971), no qual usa placas delgadas e prismas verticais como modelo.

Nabighian (1972, 1974) descreve um método que através da análise da magnitude do gradiente total ou do sinal analítico, estima os limites laterais do corpo em 2-D. Posteriormente, Nabighian (1984) estende o método para 3-D.

Outra abordagem em interpretações automáticas 3-D segue a idéia do mapeamento da susceptibilidade aparente em subsuperfície, introduzida por Grant (1973), sendo aplicada tanto no domínio da frequência (Grant, 1973; Bambrick et al. 1982), como no domínio do espaço (Silva e Hohman, 1984; Leão e Silva, 1989).

Thompson (1982) descreve um método automático que usa a equação de Euler na sua forma homogênea, para interpretar perfis aeromagnéticos. Reid (1990) faz uma implementação a este método, estendendo-o para 3-D.

1.3 Ambigüidade na interpretação aeromagnética automática

Os métodos automáticos estimam uma primeira aproximação para a localização das fontes, a partir das características do campo potencial, como por exemplo, o gradiente do campo, não sendo considerados outros parâmetros importantes para a definição do campo magnético. Tais parâmetros são: direção de magnetização (inclinação e declinação do vetor magnetização) e susceptibilidade magnética. A ausência destas informações, associada a interferências entre fontes, são os causadores da ambigüidade nos métodos automáticos. A ambigüidade pode também ser devido a outros fatores, como por exemplo, corpos com geometria complicada.

Uma das fontes de ambigüidade envolve magnetização e volume. Não sendo considerada a susceptibilidade da fonte, seu volume pode ser sub-estimado ou super-estimado.

Uma outra fonte de ambigüidade envolve a direção de magnetização e a posição da fonte. Para ilustrar, considere-se uma anomalia simples, que pode ser causada por uma única fonte, com magnetização constante e inclinação do vetor magnetização de 45° , com centro próximo da anti-simetria da anomalia (Figura 1a). Uma outra possibilidade seria duas fontes distintas com magnetização oposta, uma sob o máximo positivo da anomalia e a outra sob o mínimo negativo da anomalia (Figura 1b).

Por sua vez, considerando-se a iteração do vetor magnetização com a forma do corpo, as possibilidades se tornam inúmeras. Por exemplo, uma anomalia simétrica e positiva. Tal anomalia pode ser produzida por dois modelos (Figuras 2a e 2b).

O nível de base também contribui para a ambigüidade do problema. Uma anomalia anti-simétrica, típica de uma inclinação magnética de 45° (Figura 3a), pode ser produzida por uma inclinação magnética de 60° (Figura 3b), por exemplo, se o nível de base for sub-estimado.

Os métodos automáticos devem minimizar de alguma forma as ambigüidades acima descritas. Uma análise do sistema linear é também necessário para que se saiba se uma dada solução é confiável ou pode ser descartada.

1.4 Objetivos do trabalho

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma metodologia com aplicação da "Equação Homogênea de Euler" na interpretação aeromagnética automática, com a finalidade de ser aplicada em áreas, nas quais as fontes magnéticas possam ser aproximadas por corpos prismáticos, desejando-se estimar a posição e profundidade das fontes. Reid et al. (1990) mostrou que a "Equação Homogênea de Euler" funciona bem quando a geologia é constituída por corpos e estruturas simples, tais como: diques, falhas verticais, contatos geológicos e esferas.

O segundo objetivo é fazer uma interpretação automática em uma área da bacia do Solimões. Durante o desenvolvimento da bacia do Solimões, a ocorrência de processos magmáticos de caráter intrusivo, formando vários níveis de soleiras e intrudindo diques de diabásio, ocasionou problemas para a preservação de hidrocarbonetos na região, bem como limitando o uso da

sísmica. A interpretação aeromagnética automática nessa área dará uma primeira aproximação das fontes magnéticas em sub-superfície para uma extensa área. Tais resultados dão uma avaliação geral para a distribuição destes corpos intrusivos, os quais serão úteis para a definição de áreas de maior interesse e na escolha da estratégia de pesquisa a ser desenvolvida no estudo dessas áreas de interesse, bem como fornecer uma aproximação inicial a ser usada pelos métodos de inversão iterativos.

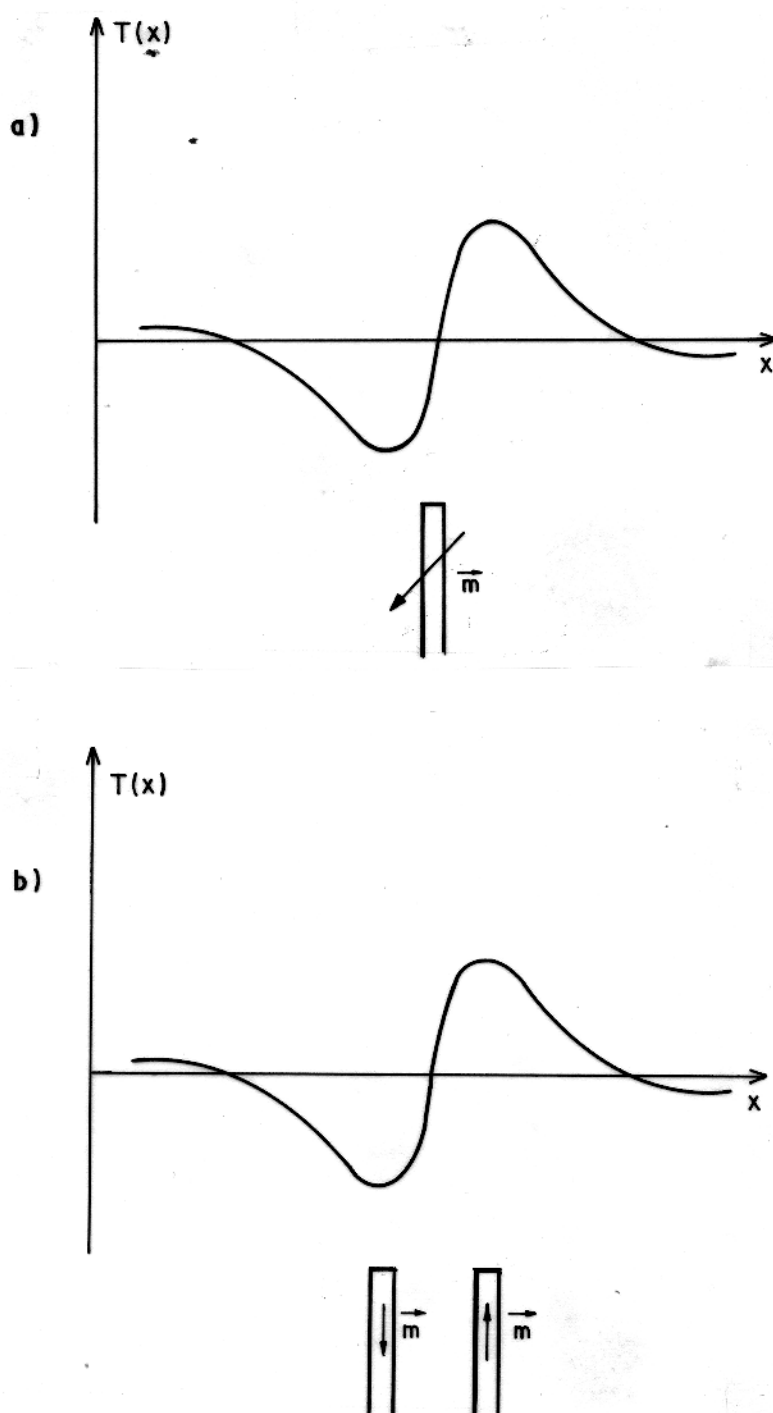


Figura 1: Anomalia magnética anti-simétrica, mostrando a ambigüidade causada pela falta de informação sobre a direção do vetor magnetização. (a) Uma única fonte que possui magnetização constante e inclinação do vetor magnetização de 45° . (b) Duas fontes com com direções opostas dos vetores de magnetização.

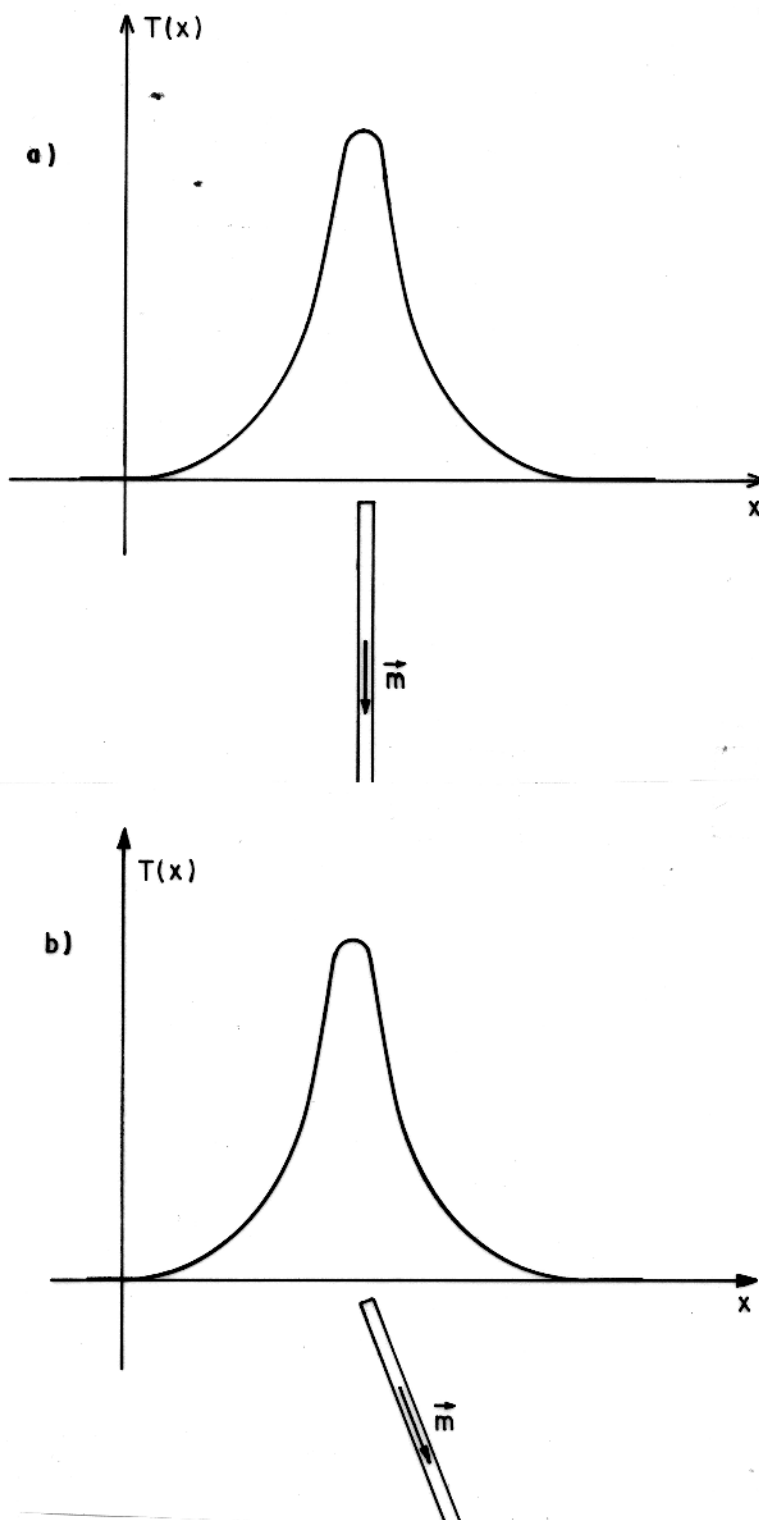


Figura 2: Anomalia magnética simétrica positiva, mostrando a ambigüidade que pode ser causada pelo mergulho de um dique. (a) Dique vertical semi-infinito, com vetor magnetização vertical como fonte. (b) Dique semi-infinito, com mergulho, e vetor magnetização paralelo ao mergulho como fonte.

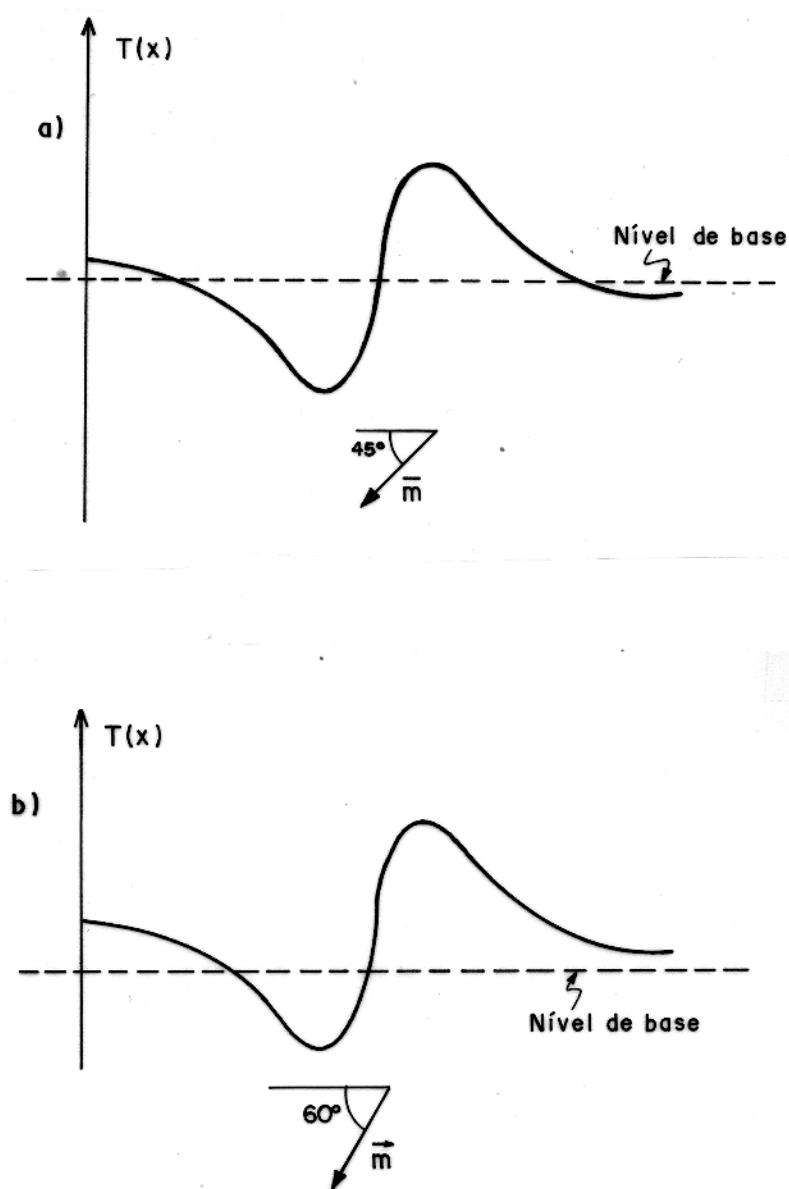


Figura 3: Ambigüidade causada pelo nível de base para anomalia magnética anti-simétrica. (a) Inclinação do vetor magnetização de 45° . (b) Inclinação do vetor magnetização de 60° .

CAPÍTULO 2

DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

2.1 Teorema de Euler

Este capítulo será iniciado explicitando o sistema de coordenadas a ser usado. Será considerado o sistema de coordenadas cartesianas com os três eixos X, Y e Z, sendo o eixo Z vertical e crescente no sentido de cima para baixo (Figura 4).

Seja uma dada função das três coordenadas deste sistema, descrito acima, representada por $f(x, y, z)$. Para que $f(x, y, z)$ seja homogênea e de grau n , é necessário que seja válida a seguinte expressão :

$$f(\lambda x, \lambda y, \lambda z) = \lambda^n f(x, y, z). \quad (1)$$

Pode-se também dizer que, dada a equação diferencial abaixo

$$P(x, y, z)dx + Q(x, y, z)dy + R(x, y, z)dz = 0, \quad (2)$$

se as funções $P(x, y, z)$, $Q(x, y, z)$ e $R(x, y, z)$ forem homogêneas e do mesmo grau n , a equação (2) será também homogênea e de grau n .

Para se chegar ao teorema de Euler, é preciso, primeiramente, derivar ambos os lados da equação (1) em relação a λ , como segue :

$$\frac{d}{d\lambda} f(\lambda x, \lambda y, \lambda z) = \frac{d}{d\lambda} \lambda^n f(x, y, z). \quad (3)$$

Derivando-se primeiramente o lado esquerdo da equação (3), obtem-se a seguinte expressão

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\lambda} f(\lambda x, \lambda y, \lambda z) &= \frac{\partial}{\partial x} f(\lambda x, \lambda y, \lambda z) \frac{d}{d\lambda} (\lambda x) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} f(\lambda x, \lambda y, \lambda z) \frac{d}{d\lambda} (\lambda y) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} f(\lambda x, \lambda y, \lambda z) \frac{d}{d\lambda} (\lambda z). \end{aligned} \quad (4)$$

Desenvolvendo-se a equação (4), será obtido:

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\lambda} f(\lambda x, \lambda y, \lambda z) &= x \frac{\partial}{\partial x} f(\lambda x, \lambda y, \lambda z) \\ &+ y \frac{\partial}{\partial y} f(\lambda x, \lambda y, \lambda z) \\ &+ z \frac{\partial}{\partial z} f(\lambda x, \lambda y, \lambda z). \end{aligned} \quad (5)$$

Derivando-se agora o lado direito da equação (3), o resultado será:

$$\frac{d}{d\lambda} \lambda^n f(x, y, z) = n \lambda^{n-1} f(x, y, z). \quad (6)$$

Substituindo-se as equações (5) e (6) na equação (3), será obtida a expressão seguinte :

$$x \frac{\partial}{\partial x} f(\lambda x, \lambda y, \lambda z) + y \frac{\partial}{\partial y} f(\lambda x, \lambda y, \lambda z) + z \frac{\partial}{\partial z} f(\lambda x, \lambda y, \lambda z) = n \lambda^{n-1} f(x, y, z). \quad (7)$$

Fazendo-se $\lambda = 1$, a equação (7) será escrita da seguinte forma:

$$x \frac{\partial}{\partial x} f(x, y, z) + y \frac{\partial}{\partial y} f(x, y, z) + z \frac{\partial}{\partial z} f(x, y, z) = n f(x, y, z). \quad (8)$$

Este é o “teorema de Euler para funções homogêneas”, sendo n o grau da função homogênea $f(x, y, z)$.

Pode-se escrever a equação (8) em uma simples forma vetorial. Dessa forma, o teorema de Euler poderá ser escrito da seguinte maneira:

$$\bar{r} \cdot \nabla f(\bar{r}) = n f(\bar{r}), \quad (9)$$

sendo $\bar{r}$ o vetor de parâmetros de $f(\bar{r})$, ou seja, no sistema de coordenadas cartesianas, $\bar{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$ e $\hat{i}$, $\hat{j}$ e $\hat{k}$ vetores unitários nas direções x , y e z respectivamente.

Essa equação diferencial parcial é chamada de “Equação Homogênea de Euler” ou simplesmente de equação de Euler.

2.2 Aplicação da equação de Euler na interpretação automática

O campo potencial (magnético ou gravimétrico) observado na superfície de um terreno é

causado por infinitas fontes infinitesimais distribuídas em sub-superfície. O efeito de uma dessas fontes ao campo observado na superfície pode ser descrito como

$$W(\bar{r}, \bar{r}_0) = \frac{K}{|\bar{r} - \bar{r}_0|^N}, \quad (10)$$

sendo $\bar{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$ a posição do ponto de observação, $\bar{r}_0 = x_0\hat{i} + y_0\hat{j} + z_0\hat{k}$ a posição da fonte e K não dependente de $\bar{r}$ ou $\bar{r}_0$. Torna-se claro que a equação (10) é uma equação homogênea e de grau $n = -N$. Para verificar, basta multiplicar um valor constante λ aos parâmetros de $W(\bar{r}, \bar{r}_0)$:

$$W(\lambda\bar{r}, \lambda\bar{r}_0) = \frac{K}{[\sqrt{(x\lambda - x_0\lambda)^2 + (y\lambda - y_0\lambda)^2 + (z\lambda - z_0\lambda)^2}]^N}. \quad (11)$$

Desenvolvendo-se a equação (11) será encontrada a seguinte expressão:

$$W(\lambda\bar{r}, \lambda\bar{r}_0) = \frac{K}{\lambda^N [\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}]^N}. \quad (12)$$

Pode-se escrever a equação (12) de uma maneira mais simples:

$$W(\lambda\bar{r}, \lambda\bar{r}_0) = \lambda^N W(x, y, z, x_0, y_0, z_0). \quad (13)$$

Pode-se, então, aplicar o teorema de Euler ao campo potencial magnético ou gravimétrico:

$$(x - x_0) \frac{\partial W}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial W}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial W}{\partial z} = -NW(\bar{r}, \bar{r}_0), \quad (14)$$

ou, escrevendo-se em forma vetorial:

$$(\bar{r} - \bar{r}_0) \cdot \nabla W = -NW \quad (15)$$

sendo $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\hat{i} + \frac{\partial}{\partial y}\hat{j} + \frac{\partial}{\partial z}\hat{k}$. N é chamado por Thompson (1982) de índice estrutural, devendo estar entre 0 e 3. Fisicamente, o índice estrutural representa a taxa de variação do campo relativa à distancia entre fonte e observador. Matematicamente, o índice estrutural está relacionado às derivadas do campo. Baixos índices estruturais estão relacionados à baixos gradientes e curvaturas.

Hood (1965) define o índice estrutural para o monopolo como sendo $N = 2$ e para o dipolo como sendo $N = 3$. Slack et al. (1967) determina que o valor de N para anomalias magnéticas

causadas por dikes deve estar entre 0 e 2, dependendo de uma relação entre profundidade e largura do corpo.

Thompson (1982) aplica a "Equação Homogênea de Euler" em modelos 2-D (dike, falha normal e contato geológico), estimando $\bar{\tau}_0$ e o nível de base para cada valor constante de N em cada modelo, usando 5 valores para N (0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0), determinando o melhor valor de N para cada modelo. Thompson (1982) conclui que usando baixos índices estruturais são obtidas estimativas ruins para a profundidade. Este autor também prefere fazer uma redução ao polo dos dados antes de aplicar o método.

Reid et al. (1990) faz uso da equação de Euler sobre um grid, através da deconvolução de uma janela, estimando $\bar{\tau}_0$ e usando valores constantes de N . Reid et al. (1990) usa modelos simples, concluindo também que baixos índices estruturais resultam em estimativas ruins para a profundidade e afirma que não é necessário fazer redução ao polo dos dados.

2.3 Equação de Euler para corpos prismáticos

Thompson (1982) e Reid et al. (1990) conseguiram bons resultados em dados reais para estimar falhas e contatos geológicos a partir de dados aeromagnéticos. Para o caso de corpos prismáticos será usado como modelo um prisma retangular vertical semi-infinito (Figura 5). Para simplificar a formulação será considerado vertical o vetor magnetização do prisma. A anomalia magnética causada pelo prisma vertical, com magnetização vertical pode ser descrita como (Bhattacharyya, 1964)

$$\Delta T = I_p \operatorname{atan} \left\{ \frac{(x - x')(y - y')}{(z - z')R} \right\} \Big|_{x'=-x_1}^{x_1} \Big|_{y'=-y_1}^{y_1} \Big|_{z'=z_1}^{z_2} \quad (16)$$

onde $R^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2$ e I_p é o vetor de polarização.

Seja o ponto de observação tão próximo do vértice $\bar{\tau}_1 = x_1\hat{i} + y_1\hat{j} + z_1\hat{k}$ a tal ponto que os outros vértices possam ser considerados muito distantes de $\bar{\tau}_1$, e os efeitos das faces verticais opostas a $\bar{\tau}_1$ possam ser desprezados nesse ponto de observação. Com essa aproximação, a equação (16) poderá ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta T \simeq I_p \operatorname{atan} \left\{ \frac{(x - x_1)(y - y_1)}{(z - z_1)R} \right\} + C; \quad (17)$$

encontrando-se agora as derivadas parciais de T em relação a x , y e z ;

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial x} \simeq \frac{I_p}{1+U^2} \left\{ \frac{(y-y_1)(z-z_1)R - (x-x_1)^2(y-y_1)(z-z_1)R^{-1}}{(z-z_1)^2 R^2} \right\}, \quad (18)$$

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial y} \simeq \frac{I_p}{1+U^2} \left\{ \frac{(x-x_1)(z-z_1)R - (x-x_1)(y-y_1)^2(z-z_1)R^{-1}}{(z-z_1)^2 R^2} \right\}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial z} \simeq -\frac{I_p}{1+U^2} \left\{ (x-x_1)(y-y_1) \left[\frac{R + (z-z_1)^2 R^{-1}}{(z-z_1)^2 R^2} \right] \right\}, \quad (20)$$

sendo $U = \frac{(x-x_1)(y-y_1)}{(z-z_1)R}$.

Para aplicar o teorema de Euler neste exemplo, será considerado $\bar{r}_0 = \bar{r}_1$. Substituindo-se as derivadas de T na equação (15), será obtido

$$\begin{aligned} (\bar{r} - \bar{r}_0) \cdot \nabla(\Delta T) \simeq & S \left\{ (x-x_1)(y-y_1)(z-z_1)R - (x-x_1)^3(y-y_1)(z-z_1)R^{-1} \right. \\ & + (x-x_1)(y-y_1)(z-z_1)R - (x-x_1)(y-y_1)^3(z-z_1)R^{-1} \\ & \left. - (x-x_1)(y-y_1)(z-z_1) [R + (z-z_1)^2 R^{-1}] \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

onde

$$S = \frac{I_p}{1+U^2} \left[\frac{1}{(z-z_1)^2 R^2} \right].$$

Rearrmando-se a equação (21), esta poderá ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} (\bar{r} - \bar{r}_0) \cdot \nabla \Delta T \simeq & S (x-x_1)(y-y_1)(z-z_1) \\ & \left\{ R - \frac{(x-x_1)^2}{R} + R - \frac{(y-y_1)^2}{R} - R - \frac{(z-z_1)^2}{R} \right\} \end{aligned} \quad (22)$$

resultando em

$$(\bar{r} - \bar{r}_0) \cdot \nabla \Delta T \simeq S(x-x_1)(y-y_1)(z-z_1)[R-R] = 0. \quad (23)$$

Fazendo-se o mesmo desenvolvimento para o caso em que o vetor magnetização do corpo é horizontal, com declinação de 0° e considerando-se a mesma aproximação feita anteriormente, o campo magnético observado em $\bar{r}$ pode ser descrito como (a partir da fórmula para o campo magnético de um prisma vertical de Bhattacharyya, 1964);

$$\Delta T \simeq I_p \tan \left\{ \frac{(x-x_1)(y-y_1)}{(x-x_1)^2 + (z-z_1)^2 + (z-z_1)R} \right\} + C. \quad (24)$$

As derivadas parciais de T em relação a x , y e z serão dadas por

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial x} \simeq \frac{I_p}{1+P^2} \left\{ \frac{(y-y_1)Q - (x-x_1)(y-y_1) \left[2(x-x_1) + \frac{(z-z_1)(x-x_1)}{R} \right]}{Q^2} \right\}, \quad (25)$$

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial y} \simeq \frac{I_p}{1+P^2} \left\{ \frac{(x-x_1)Q - (x-x_1)(y-y_1) \left[\frac{(z-z_1)(y-y_1)}{R} \right]}{Q^2} \right\}, \quad (26)$$

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial z} \simeq -\frac{I_p}{1+P^2} \left\{ \frac{(x-x_1)(y-y_1) \left[2(z-z_1) + R + \frac{(z-z_1)^2}{R} \right]}{Q^2} \right\} \quad (27)$$

onde

$$Q = (x-x_1)^2 + (z-z_1)^2 + (z-z_1)R,$$

$$P = \frac{(x-x_1)(y-y_1)}{(x-x_1)^2 + (z-z_1)^2 + (z-z_1)R}.$$

Aplicando-se o teorema de Euler e sendo $\bar{r}_0 = \bar{r}_1$, será obtido:

$$\begin{aligned} (\bar{r} - \bar{r}_0) \cdot \nabla(\Delta T) \simeq & \\ & V \left\{ (x-x_1)(y-y_1)Q - (x-x_1)^2(y-y_1) \left[2(x-x_1) + \frac{(z-z_1)(x-x_1)}{R} \right] \right. \\ & + (x-x_1)(y-y_1)Q - (x-x_1)(y-y_1)^2 \left[\frac{(z-z_1)(y-y_1)}{R} \right] \\ & \left. - (x-x_1)(y-y_1)(z-z_1) \left[2(z-z_1) + R + \frac{(z-z_1)^2}{R} \right] \right\}, \quad (28) \end{aligned}$$

sendo $V = -\frac{I_p}{(1+P^2)Q^2}$.

Rearrmando-se a equação (28), esta poderá ser escrita como:

$$\begin{aligned} (\bar{r} - \bar{r}_0) \cdot \nabla(\Delta T) \simeq & V \left\{ 2(x-x_1)^3(y-y_1) + 2(x-x_1)(y-y_1)(z-z_1)^2 \right. \\ & + 2(x-x_1)(y-y_1)(z-z_1)R - 2(x-x_1)^3(y-y_1) \\ & - \left[\frac{(x-x_1)^3(y-y_1)(z-z_1)}{R} \right] - \left[\frac{(x-x_1)(y-y_1)^3(z-z_1)}{R} \right] \\ & - 2(x-x_1)(y-y_1)(z-z_1)^2 - (x-x_1)(y-y_1)(z-z_1)R \\ & \left. - \left[\frac{(x-x_1)(y-y_1)(z-z_1)^3}{R} \right] \right\}. \quad (29) \end{aligned}$$

Desse modo,

$$(\bar{r} - \bar{r}_0) \cdot \nabla T \simeq V \{ (x - x_1)(y - y_1)(z - z_1) [R - (x - x_1)^2 R^{-1} - (y - y_1)^2 R^{-1} - (z - z_1)^2 R^{-1}] \} = 0. \quad (30)$$

A equação desenvolvida por Bhattacharyya (1964), possui também termos logarítmicos, os quais também satisfazem o teorema de Euler, como demonstrado abaixo:

$$A = \frac{\alpha_{23}}{2} \log \delta \quad (31)$$

sendo $\delta = \left[\frac{R - (x - x_1)}{R + (x - x_1)} \right]$. As derivadas parciais de δ podem ser dadas por:

$$\frac{\partial \delta}{\partial x} = \frac{2(x - x_1)^2 R^{-1} - 2R}{W}, \quad (32)$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial y} = \frac{2(x - x_1)(y - y_1) R^{-1}}{W}, \quad (33)$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial z} = \frac{2(x - x_1)(z - z_1) R^{-1}}{W}, \quad (34)$$

sendo $W = (R + x)^2$. Aplicando-se o teorema de Euler em (31),

$$(\bar{r} - \bar{r}_0) \cdot \nabla A = \frac{2(x - x_1)}{W} \left\{ \frac{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}{R} - R \right\} = 0. \quad (35)$$

Com esses resultados, para pontos de observação próximos de um dos vértices do prisma, podemos generalizar que o valor do índice estrutural é aproximadamente zero, não dependendo da direção do vetor de magnetização do corpo.

Pode-se dizer que, se o observador estiver infinitamente afastado do prisma, a fonte será considerada um dipolo de cargas. Nessa situação, o índice estrutural para o prisma será $N \simeq 3$, podendo-se esperar que $\bar{r}_0$ dê a posição desse dipolo. Dessa forma, pode-se dizer que a perda de resolução da forma de corpos prismáticos relativa à distância entre fonte e observador, pode ser correlacionada com o valor do índice estrutural. Um sentimento intuitivo (que pode ser exemplificado por muitos experimentos geofísicos) nos diz que esta perda de resolução ocorre de forma progressiva à medida em que o observador se distancia do corpo. Desse modo, pode-se esperar que o índice

estrutural deve aumentar progressivamente a partir de aproximadamente zero, nas proximidades de um vértice, até 3, à medida em que o observador se afaste do corpo. Haverá então um valor mínimo para o índice estrutural, a partir do qual os vértices do corpo não terão resolução.

2.4 Cálculo do gradiente

Em geral, na obtenção de dados de campo potencial (magnético ou gravimétrico) o que é medido é a componente do campo total em uma dada direção. Dessa forma é necessário calcular as derivadas parciais do campo anômalo ($\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial T}{\partial y}$, $\frac{\partial T}{\partial z}$) a partir dos dados observados. Para o caso em estudo neste trabalho (campo magnético), foram usadas para o cálculo das tres componentes do gradiente, as relações entre as transformadas de Fourier para o campo potencial (Nabighian, 1984).

A transformada de Fourier em 2-D de uma função $f(x, y)$ é definida pela seguinte formulação;

$$g(p, q) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i(px+qy)} dx dy$$

e

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} g(p, q) e^{i(px+qy)} dp dq \quad (36)$$

que será simbolizada por

$$g(p, q) = \mathcal{F}[f(x, y)]$$

e

$$f(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[g(p, q)]. \quad (37)$$

Existe a seguinte relação entre a transformada de Fourier de $f(x, y, z)$ e as derivadas parciais de $f(x, y, z)$:

$$\begin{aligned} \mathcal{F} \left[\frac{\partial f(x, y, z)}{\partial x} \right] &= ip \mathcal{F}[f(x, y, z)], \\ \mathcal{F} \left[\frac{\partial f(x, y, z)}{\partial y} \right] &= iq \mathcal{F}[f(x, y, z)], \\ \mathcal{F} \left[\frac{\partial f(x, y, z)}{\partial z} \right] &= \sqrt{p^2 + q^2} \mathcal{F}[f(x, y, z)]. \end{aligned} \quad (38)$$

Seja x a direção E-W e y a direção N-S, as derivadas parciais horizontais do campo magnético serão obtidas da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial x} &= \mathcal{F}^{-1} \{-ip\mathcal{F}[T]\}, \\ \frac{\partial T}{\partial y} &= \mathcal{F}^{-1} \{-iq\mathcal{F}[T]\}\end{aligned}\tag{39}$$

e a derivada vertical do campo magnético será dada pela seguinte expressão:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \sqrt{p^2 + q^2} \mathcal{F}[T] \right\}.\tag{40}$$

As operações de transformada de Fourier diretas e inversas foram feitas usando-se o algoritmo de Claerbout (1976).

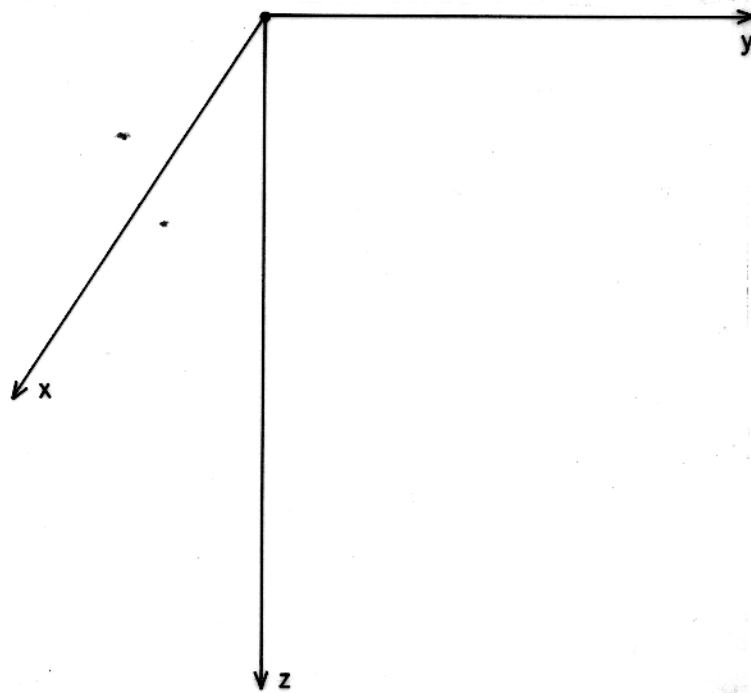


Figura 4: Sistema cartesiano ortogonal.

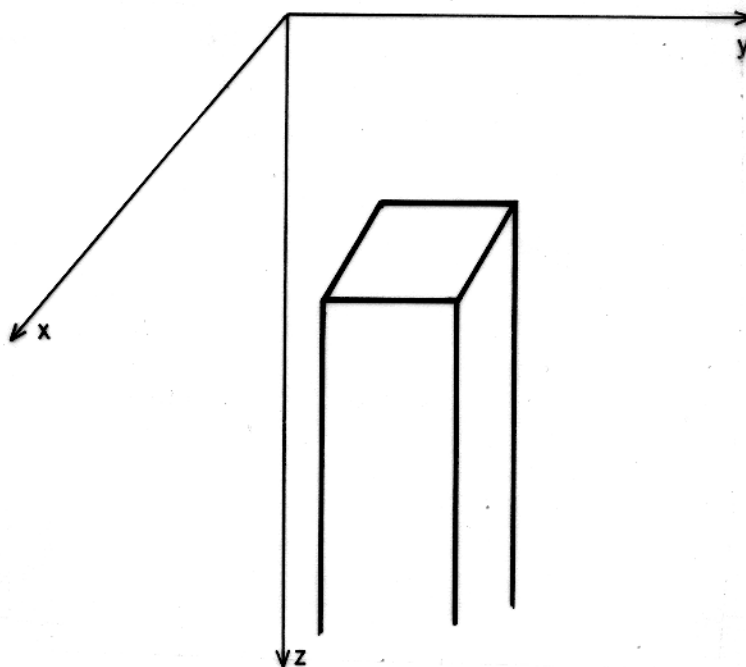


Figura 5: Prisma retangular vertical semi-infinito.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Metodologia adotada

Thompson (1982) e Reid et al. (1990) mostraram que para corpos e estruturas geológicas simples, tais como esferas, diques, falhas normais e contatos geológicos, o índice estrutural pode ser considerado constante para cada tipo de estrutura. Com isso, ao aplicar o teorema de Euler em uma área na qual se espera estimar a posição de tais corpos, pode-se usar um valor constante de N o qual está associado a tal tipo de corpo esperado, tal como foi feito pelos autores acima referidos.

Quando, numa área em estudo, as informações geológicas levam a que se creia na existência de corpos prismáticos, para se determinarem seus limites laterais e sua profundidade, torna-se necessário estimar $\bar{r}_o$ e N . Em cada solução encontrada $\hat{r}_o$ significa uma posição onde é possível a existência de fonte, a qual produz em $\bar{r}$ um campo que pode ser explicado por uma função homogênea de grau $n \simeq -\hat{N}$.

Sendo o objeto desse estudo estimar as bordas e as profundidades de corpos prismáticos, devem ser descartadas as soluções que tiverem um valor alto ou negativo para $\hat{N}$.

3.2 O problema inverso

Aplicando-se o teorema de Euler para interpretação aeromagnética automática seguindo-se a metodologia descrita acima, pode-se escrever a equação (15) na seguinte forma matricial:

$$\overline{\overline{A}}\overline{p} = \overline{y}. \quad (41)$$

Fazendo-se a deconvolução através de uma janela de $K \times K$ pontos de observação (totalizando um total de $M = K^2$ observações dentro de cada janela), tem-se a matriz $\overline{\overline{A}}$ de posto $M \times 4$, $\overline{p}$ um vetor de dimensão 4 e $\overline{y}$ um vetor de dimensão M .

$$\overline{\overline{A}} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \Delta T_{(1)}}{\partial x} & \frac{\partial \Delta T_{(1)}}{\partial y} & \frac{\partial \Delta T_{(1)}}{\partial z} & \Delta T_{(1)} \\ \frac{\partial \Delta T_{(2)}}{\partial x} & \frac{\partial \Delta T_{(2)}}{\partial y} & \frac{\partial \Delta T_{(2)}}{\partial z} & \Delta T_{(2)} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial \Delta T_{(M)}}{\partial x} & \frac{\partial \Delta T_{(M)}}{\partial y} & \frac{\partial \Delta T_{(M)}}{\partial z} & \Delta T_{(M)} \end{vmatrix},$$

$$\overline{p} = \begin{vmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \\ N \end{vmatrix},$$

$$\overline{y} = \begin{vmatrix} f(\overline{r}_1) \\ f(\overline{r}_2) \\ \cdot \\ \cdot \\ f(\overline{r}_M) \end{vmatrix},$$

sendo

$$f(\overline{r}) = \overline{r} \cdot \nabla T.$$

A matriz $\overline{\overline{A}}$ em geral é mal condicionada. Para estabilizar o problema são adicionados vínculos no vetor solução (Lawson e Hanson, 1974) e adicionada uma matriz de pesos estabilizadora, da seguinte forma: o vetor de estimativas $\hat{\overline{p}}$ pode ser descrito como

$$\hat{\overline{p}} = \overline{\phi} + \Delta \hat{\overline{p}} \quad (42)$$

sendo $\overline{\phi}$ um vetor de dimensão 4 contendo os valores médios esperados para $\overline{p}$, $\Delta \hat{\overline{p}}$ é um vetor de dimensão 4 contendo as perturbações em $\overline{p}$.

Desejando-se minimizar a norma euclidiana dos resíduos, com a condição dada pela equação (42), deve-se minimizar a seguinte expressão:

$$|\bar{A}\hat{p} - \bar{y}|^2 + \lambda \bar{W}|\hat{p} - \bar{\phi}|^2 = \min \quad (43)$$

sendo $\bar{W}$ uma matriz diagonal (4 x 4) de pesos e λ um valor constante positivo a ser multiplicado aos elementos de $\bar{W}$.

Igualando-se a derivada da equação (43) em relação a $\Delta\hat{p}$ a zero

$$\nabla_{\Delta\hat{p}} \{ |\bar{A}\Delta\hat{p} - \bar{y}|^2 + \nabla\bar{W}|\Delta\hat{p}|^2 \} = 0. \quad (44)$$

Resolvendo-se a equação (39)

$$\bar{A}^T \bar{A}(\bar{\phi} - \Delta\hat{p}) - \bar{A}^T \bar{y} + \lambda \bar{W} \Delta\hat{p} = 0. \quad (45)$$

a equação (40) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\bar{A}' \Delta\hat{p} = \bar{y}', \quad (46)$$

sendo

$$\bar{A}' = \bar{A}^T \bar{A} + \lambda \bar{W},$$

$$\bar{y}' = \bar{A}^T \bar{y} - \bar{A}^T \bar{A} \bar{\phi}.$$

A escolha dos elementos do vetor $\bar{\phi}$ é feita da seguinte forma: $\phi_{(1)}$ e $\phi_{(2)}$ serão as coordenadas do centro da janela, $\phi_{(3)}$ provém das informações geológicas e $\phi_{(4)}$ deve ser um valor positivo e inferior a 1. Como se espera estimar os vértices e arestas de corpos prismáticos, $\phi_{(4)}$ deve ser pequeno, pois, como já foi demonstrado, nas proximidades dos vértices de tais corpos $N \simeq 0$, devendo crescer à medida em que o observador se afasta do corpo. Para facilitar, passaremos a usar a seguinte notação: $\phi_1 = \phi_{x_0}$, $\phi_2 = \phi_{y_0}$, $\phi_3 = \phi_{z_0}$ e $\phi_4 = \phi_N$.

A escolha dos elementos da diagonal principal de $\bar{W}$ deve ser feita de maneira que o parâmetro ϕ_3 tenha uma maior liberdade para oscilar e os demais parâmetros oscilem pouco.

Seguindo-se esse critério, foi escolhida a matriz abaixo descrita. Com o uso dessa matriz foram feitos os testes com modelos teóricos e com dados reais da bacia do Solimões. Os resultados desses testes mostraram que a matriz de pesos escolhida funcionou bem, no sentido de minimizar a instabilidade do problema inverso.

$$\overline{\overline{W}} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

A escolha do melhor λ deve ser feita através da técnica Ridge-Trace (Hoerl e Kennard, 1971). Dessa forma, através de vários testes com modelos sintéticos e com dados reais da bacia do Solimões (esses testes estarão descritos nos dois próximos capítulos), variando-se o valor de λ em cada teste, pôde-se determinar o valor para λ que dá ao método um funcionamento numericamente mais estável.

CAPÍTULO 4

TESTES COM ANOMALIAS SINTÉTICAS

4.1 Prisma vertical semi-infinito

Uma primeira avaliação da metodologia descrita no capítulo anterior foi feita usando-se um prisma vertical semi-infinito como modelo para aplicação de testes. Nesses testes foram analisadas a estabilidade e a resolução da metodologia diante de variações dos valores de λ e ϕ_N . λ é o valor adicionado na diagonal principal da matriz a ser invertida e ϕ_N é um valor médio que se espera obter para o índice estrutural (o significado desses fatores está descrito com maiores detalhes no capítulo 3, seção 3.1). Também nesses testes, foi analisada a ambigüidade inerente à falta de informações sobre a direção do vetor magnetização (esse tipo de ambigüidade está descrito no capítulo 1, seção 1.3). Dessa forma, usando-se um prisma vertical semi-infinito como modelo, com inclinação do vetor magnetização de 45° e declinação de 30° , submetido a um campo geomagnético com 15° de inclinação e -5° de declinação, foram realizados vários testes, variando-se os valores de λ e ϕ_N . Após esses testes, foram feitos novos testes com o prisma retangular, porém, adotando-se o campo magnético total vertical e horizontal (com declinação de 30°).

Em todos os testes feitos nessa seção, o corpo prismático é vertical, semi-infinito e seu topo está a 4 km de profundidade, com base quadrada de 10 km de lado e susceptibilidade magnética de 0,0055 UCGS. A intensidade do campo geomagnético é de 25.000 gamas.

O tamanho da janela usada é um outro fator muito importante na estabilidade e na resolução do método. Os fatores que devem ser levados em conta na escolha das dimensões da janela são os seguintes: espaçamento do grid, dimensões do(s) corpo(s) que se esperam estimar e interferência entre fontes. Como neste modelo não há fontes que interfiram na anomalia magnética do prisma, a escolha da janela fica condicionada ao espaçamento do grid e às dimensões do corpo. Os testes serão feitos usando-se um grid de observações com $0,2 \times 0,2$ km de espaçamento e uma janela com 1×1 km (5×5 observações), que é um pequeno tamanho em relação ao prisma usado como modelo.

Nos primeiros 5 testes, usando-se como modelo o prisma descrito acima, com inclinação do vetor magnetização de 45° e declinação de 30° (Figura 6), $\phi_N=0,0$ (foi demonstrado no capítulo 2, seção 2.3, que o índice estrutural é aproximadamente zero nas proximidades dos vértices do

prisma), $\phi_{z_0}=3,0$ (com uma diferença de 25% de z_0) e variando-se o valor λ em cada teste (10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} e 10^{-1}). As Figuras 7, 8, 9, 10 e 11 mostram os resultados desses testes. O critério adotado para se aceitar ou rejeitar uma solução foi o valor do índice estrutural estimado. Foram aceitas todas as estimativas cujo índice estrutural estimado esteja entre 0,0 e 1,0. Esse critério será usado em todos os demais testes nesse capítulo. Nessas Figuras, o quadrado desenhado com linha grossa no centro da área representa a posição e forma do prisma, e o quadrado com linha grossa, desenhado no canto superior esquerdo da área, representa as dimensões da janela usada. Cada solução encontrada é representada por uma cruz, localizada na posição de coordenadas $\hat{x}_o$, $\hat{y}_o$, com seu tamanho proporcional a $\hat{z}_o$. A análise visual dessas Figuras nos permite verificar a dispersão das estimativas no plano XY. Para uma melhor análise das estimativas de profundidade, são mostradas para cada teste, juntamente com a Figura, o número de estimativas cujo índice estrutural estimado está entre 0 e 1, a média aritmética e o desvio padrão das estimativas de profundidade de $\bar{\tau}_o$ para uma área de 30 x 30 km com o prisma ao centro e para 4 áreas com 4 x 4 km ao redor de cada vértice do prisma (essas áreas estão indicadas nas Figuras por quadrados desenhados com linha tracejada). Outros 5 testes foram feitos com o mesmo modelo, usando-se os mesmos valores para λ e ϕ_{z_0} usados nestes últimos testes e $\phi_N = 0,7$. Os resultados desses 5 testes estão mostrados nas Figuras 12, 13, 14, 15 e 16.

Dessa forma, analisando-se os resultados dos testes que usaram $\phi_N=0,0$, pode-se verificar que, nesse caso, o método não tem resolução para estimar a profundidade do corpo e que a ambigüidade causada pela inclinação do vetor magnetização está fortemente presente. Analisando-se agora os resultados obtidos com o uso de $\phi_N = 0,7$, apesar de presente a ambigüidade causada pela inclinação do vetor magnetização, essa é menos intensa e o método adquire melhor resolução. Nesse caso, as estimativas do índice estrutural estabilizaram-se com $\lambda = 10^{-2}$ (Figura 15). Com $\lambda = 10^{-1}$ as estimativas de $\bar{\tau}_o$ tornam-se muito tendenciosas, dando muitas soluções falsas (Figura 16).

Dois outros testes foram feitos com esse mesmo modelo acima, usando-se $\phi_N = 0,5$, $\phi_{z_0}=3,0$ e janela de 1 x 1 km, com $\lambda = 10^{-2}$ e $\lambda = 10^{-1}$, respectivamente. As Figuras 17 e 18 mostram os resultados desses testes. Os resultados numéricos desses dois últimos testes não foram melhores do que nos testes em que se usou $\phi_N = 0,7$.

Para analisar melhor a ambigüidade causada pela inclinação do vetor magnetização, foram feitos testes com o modelo do prisma retangular, com o campo total vertical e horizontal, respectivamente. A Figura 19 mostra a anomalia magnética causada pelo prisma com vetor magnetização vertical, submetido a um campo geomagnético vertical, com intensidade de magnetização igual a 25.000 gamas. As Figuras 20, 21 e 22 mostram os resultados dos testes sobre esse modelo usando-se $\phi_N = 0,0$, $\phi_N = 0,5$ e $\phi_N = 0,7$ respectivamente, $\phi_{z_0} = 3,0$ e $\lambda = 10^{-2}$, com janela de 1 x 1 km. A Figura 23 mostra o campo magnético para o prisma vertical semi-infinito, com vetor magnetização horizontal e declinação de 30° , submetido a um campo geomagnético também horizontal, e as Figuras 24, 25 e 26 mostram os resultados para testes sobre este modelo, usando-se $\phi_N = 0,0$ e $\phi_N = 0,5$, $\phi_N = 0,7$, respectivamente, $\phi_{z_0} = 3,0$ e $\lambda = 10^{-2}$ com janela de 1 x 1 km.

A ambigüidade do tipo mostrado nas Figuras 1a e 1b está presente, sempre que o campo total não é vertical. Quanto às estimativas de z_0 , fica claro que quando foi usado $\phi_N = 0,0$, tais estimativas não são boas, concordando com as conclusões de Thompson (1982) e Reid et al. (1990), de que o uso de índices estruturais próximos de zero dão estimativas ruins para a profundidade. Quando foi usado $\phi_N = 0,5$, a forma do prisma foi melhor estimada, porém sua profundidade não foi bem estimada. A profundidade do prisma foi melhor estimada quando foi usado $\phi_N = 0,7$.

A aplicação do teorema de Euler independe da inclinação do vetor magnetização, porém, a distribuição das estimativas de $\bar{r}_0$ aproximam estruturas sob os máximos e sobre os mínimos das anomalias magnéticas, como se o método estivesse sempre assumindo um vetor magnetização vertical. Quando o vetor de magnetização do corpo é vertical, a forma do corpo foi bem estimada, sendo que quando foi usado $\phi = 0,0$, as bordas do corpo foram bem estimadas, mas as profundidades estimadas foram ruins. Se a área em estudo não for de baixa latitude, uma redução ao polo em muito ajudaria a diminuir a ambigüidade causada pela falta de informações sobre o vetor de magnetização inerente ao método. Nas áreas de latitudes muito baixa, a redução ao polo não deve ser efetuada devido a instabilidade que a baixa inclinação do campo geomagnético acarretaria nessa operação.

4.2 Interferência entre fontes

É esperado que a interferência entre fontes contribua para aumentar a ambigüidade do problema inverso. Com o objetivo de analisar o efeito da interferência entre fontes, foi gerado o campo magnético para o modelo representado na Figura 27, o qual é formado por corpos prismáticos semi-

infinitos retangulares e verticais, com diferentes direções para o vetor de magnetização e diferentes profundidades. O campo geomagnético considerado possui inclinação de 15° , declinação de -5° e intensidade de 25.000 gamas. Os retângulos desenhados com linha grossa representam os corpos prismáticos, e os retângulos desenhados com linha tracejada representam áreas as quais terão indicadas o número de estimativas de $\bar{\tau}_o$ que possuem $\hat{N}$ entre 0,0 e 1,0, a média aritmética e o desvio padrão para as estimativas de profundidade dentro de cada uma dessas áreas em cada teste. Em todos os corpos a susceptibilidade magnética é constante e igual a 0,0055 UCGS. O campo magnético foi calculado para um grid de observações com $0,2 \times 0,2$ km de espaçamento, que está representado pela Figura 28.

Para se analisar a instabilidade das soluções nesse modelo com interferência entre fontes, foram feitos 5 testes com valores diferentes para λ (10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} e 10^{-1}), mantendo-se fixos os valores par $\phi_N = 0,7$, $\phi_{z_o} = 2,5$ e usando-se janela com 1×1 km (5×5 observações). Os resultados desses testes estão representados nas Figuras 29, 30, 31, 32 e 33 respectivamente.

Da mesma forma como ocorreu nos testes do prisma vertical, sem interferências de outras fontes (seção 4.1), as estimativas do índice estrutural se estabilizaram quando foi usado $\lambda = 10^{-2}$ (Figura 32), dando nesse teste melhor resolução ao método. Analisando-se esses resultados, relata-se que muitas soluções aparecem onde não há fonte. Isso ocorre devido, principalmente, à ambigüidade do tipo mostrado nas Figuras 1a e 1b (capítulo 1) e também devido à interferências entre fontes. Em locais onde a interferência entre fontes é mais intensa (como por exemplo, próximo ao ponto em que os corpos 3 e 4 estão em contato entre si), as estimativas não fazem sentido diante do modelo. Em locais onde não há forte interferência entre fontes, os corpos 3, 4 e 5 tiveram boa resolução. Os corpos 1 e 2 não tiveram boa resolução. No corpo 1, as estimativas de profundidade são melhores, porém não foi obtida uma boa aproximação para os limites laterais do corpo através da distribuição das estimativas de $\bar{\tau}_o$, devido a seu pequeno tamanho e à interferência dada pelo corpo 2. O corpo 2 teve sua direção bem estimada, mas sua pequena largura foi desprezada pelo método.

Outros dois testes foram feitos, usando-se $\phi_N = 0,0$, $\phi_{z_o} = 2,5$ e janela de 1×1 km (5×5 observações), no primeiro usando-se $\lambda = 10^{-2}$ e no segundo $\lambda = 10^{-1}$. As Figuras 34 e 35 mostram os resultados desses testes. Esses resultados confirmam que ϕ_N não deve ser zero.

O uso de uma janela adequada pode minimizar o efeito causado pela interferência entre

fontes. Com o objetivo de analisar esse enfoque, foram feitos mais dois testes sobre esse mesmo modelo, mantendo-se constante $\phi_N = 0,7$, $\phi_{z_0} = 2,5$ e $\lambda = 10^{-2}$, usando-se janelas de $0,8 \times 0,8$ km (4×4 observações) e 2×2 km (10×10 observações), respectivamente. A Figura 36 mostra os resultados para o teste com janela de 2×2 km. Tais resultados mostram um aumento do efeito causado pela interferência entre fontes, aumentando a ambigüidade. Usando-se a janela de $0,8 \times 0,8$ km, ocorreu uma grande perda de estabilidade, não dando nenhuma estimativa de $\bar{r}_0$ que tenha o valor do índice estrutural estimado entre 0,0 e 1,0.

Finalizando-se essa seção, as conclusões tiradas com os testes sobre esse modelo são as seguintes: não se deve escolher $\phi_N = 0,0$, sendo $\phi_N = 0,7$ uma boa escolha. Ao se escolher a janela a ser usada, devem ser levadas em conta as dimensões dos corpos e a interferência entre fontes. Janelas grandes ocasionam perda de resolução, enquanto que, janelas pequenas ocasionam instabilidade matemática. A matriz de pesos $\bar{W}$ usada funcionou bem para estabilizar o problema matemático inverso. A ambigüidade devido à falta de informações sobre o vetor de magnetização das fontes, não foi extinta e aumenta com a interferência entre fontes.

4.3 Efeito da interferência de soleiras

As soleiras de diabásio, são estruturas comuns entre estratos de bacias sedimentares intra-cratônicas. Embora o objetivo principal desse trabalho seja aplicar o teorema de Euler, para estimar a localização de fontes, que podem ser aproximadas por corpos prismáticos, serão feitos, nessa seção, testes com placas horizontais (representando soleiras), para se determinar o valor ótimo de ϕ_N para tais estruturas, com o objetivo de avaliar a influência das soleiras nas estimativas da localização e forma de corpos prismáticos, dadas pela metodologia acima desenvolvida. Outros testes serão feitos, com modelos constituídos por prismas e soleiras, para que o efeito da interferência, causado pelas soleiras, seja melhor analisado. Nesses testes, serão usados os valores de λ , ϕ_N e ϕ_{z_0} e janela que nos testes feitos anteriormente (com os corpos prismáticos) proporcionaram um melhor funcionamento numérico do método.

Para determinar o valor de ϕ_N , ótimo para se estimar as bordas de soleiras, foram feitos três testes, sobre um modelo constituído por uma soleira, usando-se $\phi_{z_0} = 3,0$, $\lambda = 10^{-2}$ e janela com 1×1 km de largura, variando-se o valor de ϕ_N em cada teste (0,0, 0,5 e 0,7, respectivamente). O valor de ϕ_{z_0} está bem distante do valor da profundidade da soleira, para que seja simulado uma

bacia com 3,0 km de profundidade, porém, como foi descrito no capítulo 3, a matriz de pesos usada ($\overline{W}$), deixa o parâmetro z_0 com muita liberdade para oscilar, dando menor peso a essa informação *a priori*. A soleira usada como modelo, é uma placa com base quadrada, com 20 km de lado, 0,3 km de espessura e 0,5 km de profundidade, com vetor magnetização com 15° de inclinação e -8° de declinação e susceptibilidade magnética de 0,0080 UCGS, submetida a um campo geomagnético com inclinação de 15° , declinação de -8° e intensidade de 25.000 gamas. O campo magnético gerado por esse modelo está representado pela figura 37. Os resultados desses três testes estão representados pelas Figuras 38, 39 e 40 respectivamente. Esses resultados mostram que, usando-se $\phi_N = 0,7$, o método apresenta menor ambigüidade, estimando melhor as bordas da soleira.

Para generalizar um pouco mais, foi gerado um modelo com duas soleiras de base quadrada, sobrepostas, a superior com 50 km de lado e 0,5 km de profundidade, e a inferior com 20 km de lado e 1,2 km de profundidade, tendo ambas 0,3 km de espessura, vetor magnetização com 15° de inclinação e -8° de declinação e susceptibilidade magnética de 0,0080 UCGS, submetido a um campo geomagnético com inclinação de 15° , declinação de -8° e intensidade de 25.000 gamas. O campo magnético gerado por esse modelo está representado pela Figura 41. Sobre esse modelo foram realizados três testes, semelhantes aos anteriores, cujos resultados estão representados pelas Figuras 42, 43 e 44. Tais resultados nos mostram que usando-se $\phi_N = 0,7$ a ambigüidade é menor do que usando $\phi_N = 0,5$ e $\phi_N = 0,0$.

Serão agora avaliados os efeitos das soleiras nas estimativas do prisma retangular semi-infinito. O prisma adotado para os testes a serem feitos com esse objetivo, foi o mesmo usado nos testes no início desse capítulo, e os valores de λ , ϕ_N e ϕ_{z_0} e janela escolhidos para esses testes foram 10^{-2} , 0,7 e 2,5 e janela de 1 x 1 km, respectivamente, os quais proporcionaram melhores resultados para o prisma isolado, sem interferência entre fontes e também para o modelo com interferência entre fontes (ver os resultados desses testes nas Figuras 15 e 32).

Sobre o prisma foi colocada uma soleira de 0,3 km de espessura e profundidade de 0,5 km, possuindo base quadrada, com 50 km de lado, susceptibilidade magnética de 0,0080 UCGS e vetor magnetização com inclinação de 15° e declinação de -8° . O campo geomagnético considerado foi de 25.000 gamas, com inclinação de 15° e declinação de -5° . O campo magnético gerado por esse modelo está representado na Figura 45. Sobre esse modelo, a partir de um grid com

espaçamento de $0,2 \times 0,2$ km, foi realizado o teste cujos resultados estão representados na Figura 46. As bordas da soleira estão a ~ 20 km afastadas das bordas do prisma, causando suaves perturbações na anomalia magnética causada pelo citado prisma, porém, comparando-se os resultados com os resultados mostrados na Figura 15, não ocorrem perturbações consideráveis nas estimativas de $\bar{\tau}_0$ nas proximidades do prisma. O nível de interferência da soleira sobre a anomalia causada pelo prisma, não foi suficiente para perturbar as estimativas de $\bar{\tau}_0$.

Num outro teste, foi colocado uma segunda soleira, com as mesmas características dessa primeira, a uma profundidade de 1,2 km. O campo magnético gerado por esse modelo está representado na Figura 47 e os resultados do teste realizado estão representados na Figura 48. Nesse segundo caso, pelo fato dessa segunda soleira ser mais profunda e estar mais próxima do prisma, as perturbações causadas por esta na anomalia magnética do prisma são mais fortes, porém, comparando a Figura 15 com a Figura 48, não há grandes perturbações nas estimativas de $\bar{\tau}_0$, tanto quanto à distribuição no plano XY, quanto às estimativas de profundidade do prisma.

Para tornar a análise do efeito das soleiras mais geral, foram feitos testes com o modelo da Figura 27, adicionando-se a esse modelo uma soleira com as mesmas propriedades físicas das soleiras usadas nos dois testes anteriores, profundidade de 0,5 km, com base quadrada e 100 km de lado. Os limites laterais a norte, oeste e leste dessa soleira, estão muito afastados dos prismas e o limite sul da soleira passa pela área, na sua porção sul, como indicado na Figura 49. Esse teste foi realizado com os mesmos valores para λ , ϕ_N e ϕ_z , e janela usados nos testes que proporcionaram melhores resultados para o prisma isolado, sem interferência entre fontes e também para o modelo com interferência entre fontes (10^{-2} ; 0,7; 2,5 e janela de 1×1 km, respectivamente, ver os resultados desses testes nas Figuras 15 e 32). O campo magnético gerado por esse modelo está representado na Figura 50 e os resultados para esse teste (foi usado um grid de observações de $0,2 \times 0,2$ km) estão representados na Figura 51. Esses resultados mostram que as estimativas dos corpos prismáticos perdem muito a sua resolução quando estão sob os limites de soleiras, sendo esses limites, o lado em que se situa um máximo ou um mínimo da anomalia magnética da soleira. Nesse caso a borda da soleira é bem estimada, porém, perde um pouco de resolução para a profundidade quando esta está sobre algum corpo magnetizado.

Num outro teste é colocada nesse modelo, uma segunda soleira abaixo dessa primeira, na

profundidade de 1,2 km, com as mesmas características da primeira. Os limites sul e leste dessa soleira estão muito longe dos prismas e os limites norte e oeste (que estão próximos dos prismas) estão indicados na Figura 52. O campo magnético para esse modelo está representado na Figura 53 e os resultados da aplicação do teste (feito da mesma forma que o teste anterior) estão na Figura 54. Os resultados desse teste, usando-se duas soleiras, se comportaram de maneira similar ao anterior, quando foi usada apenas uma soleira.

Ocorre, muitas vezes, que as soleiras são muito extensas, porém, possuem variações laterais de suas propriedades físicas. Como reflexo das variações, a magnetização dessas soleiras deve variar. Com o objetivo de se analisarem as estimativas de $\bar{r}_0$ sobre uma variação brusca da direção do vetor magnetização de uma soleira, foi gerado o seguinte modelo: uma soleira com 0,5 km de profundidade, espessura de 0,3 km, base retangular com 200 x 100 km de lado, com lado maior paralelo ao norte magnético (ver Figura 55), susceptibilidade magnética de 0,0080 UCGS, com a metade que está voltada para o sul com inclinação do vetor magnetização de 50° e declinação de -8° e outra metade, voltada para o norte, com inclinação do vetor de magnetização de 15° e declinação de -8° , submetida a um campo geomagnético de 25.000 gamas, com inclinação de 15° e declinação de -5° . O campo magnético gerado por esse modelo está representado pela Figura 56. Sobre o limite em que ocorre a mudança no vetor magnetização, foi feito um teste usando-se $\lambda = 10^{-2}$, $\phi_N = 0,7$, $\phi_{z_0} = 2,5$ e janela de 1 x 1 km. Os resultados desse teste estão representados na Figura 57. Exatamente no limite onde ocorre a mudança de direção do vetor de magnetização, boas estimativas para a profundidade da soleira são encontradas, porém, um pouco ao sul, ocorrem muitas estimativas sem sentido, diante do modelo, mostrando uma forte ambigüidade nesse caso.

Para generalizar um pouco mais o modelo, é colocado um prisma (o mesmo usado anteriormente) sob essa soleira, exatamente sob o limite em que ocorre a mudança da direção do vetor magnetização. A Figura 58 mostra a posição do prisma em relação a esse limite, a Figura 59 mostra a anomalia magnética para esse modelo e a Figura 60 mostra os resultados do teste realizado sobre a área em que está o prisma, mostrando que ocorre uma total perda de resolução tanto para o prisma quanto para a soleira e que a ambigüidade aumentou ainda mais.

Pode-se concluir, a partir desses testes, que a presença de soleiras ocasiona uma grande perda de resolução na estimativa de corpos prismáticos (observe Figuras 51, 54 e 60).

4.4 Análise geral dos resultados

Dos resultados obtidos nesses testes, fica evidenciado que em baixas latitudes, as bordas dos corpos prismáticos não ficam bem estimadas, e muitas estimativas de $\bar{r}_o$ são fictícias. Esse tipo de ambigüidade é devido à baixa inclinação do campo magnético, como pode ser observado na Figura 26. Para reconhecermos as estimativas fictícias, ao interpretarmos as estimativas de $\bar{r}_o$, devemos fazer uma análise dessas estimativas conjuntamente com o mapa de contorno do campo magnético observado.

Um erro nas estimativas de profundidade também deve ser considerado, principalmente em baixas latitudes. Nesses casos, pode-se esperar que alguns vértices tenham melhor resolução do que outros, dependendo da declinação do campo total. Um exemplo desse fator pode ser visto na Figura 26, onde os vértices NW e SE foram bem estimados e os outros dois foram mal estimados. O mesmo efeito pode ser visto na Figura 15, em que os vértices que estão sobre os mínimos da anomalia foram melhor estimados do que os restantes, sendo que as estimativas de profundidade do vértice NE teve melhor resolução do que o vértice NW. Quando o campo total é vertical, todos os vértices são estimados com a mesma resolução. Em baixas latitudes, não foi possível delinear os corpos prismáticos, porém, as estimativas de $\bar{r}_o$ nos fornecem aproximações, que são úteis por nos fornecerem uma primeira avaliação das fontes magnéticas.

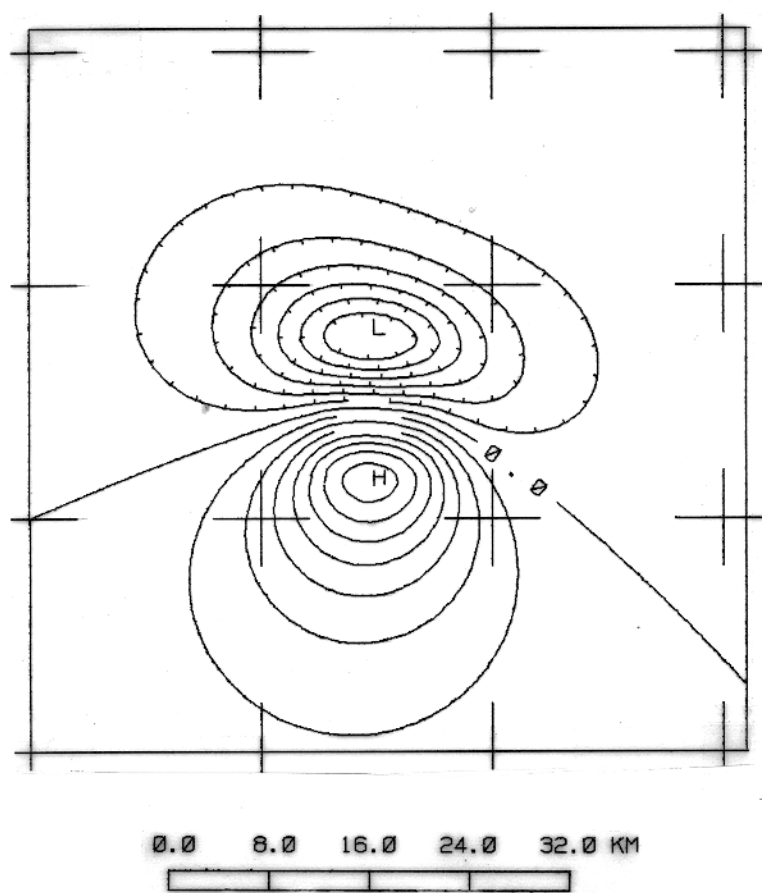
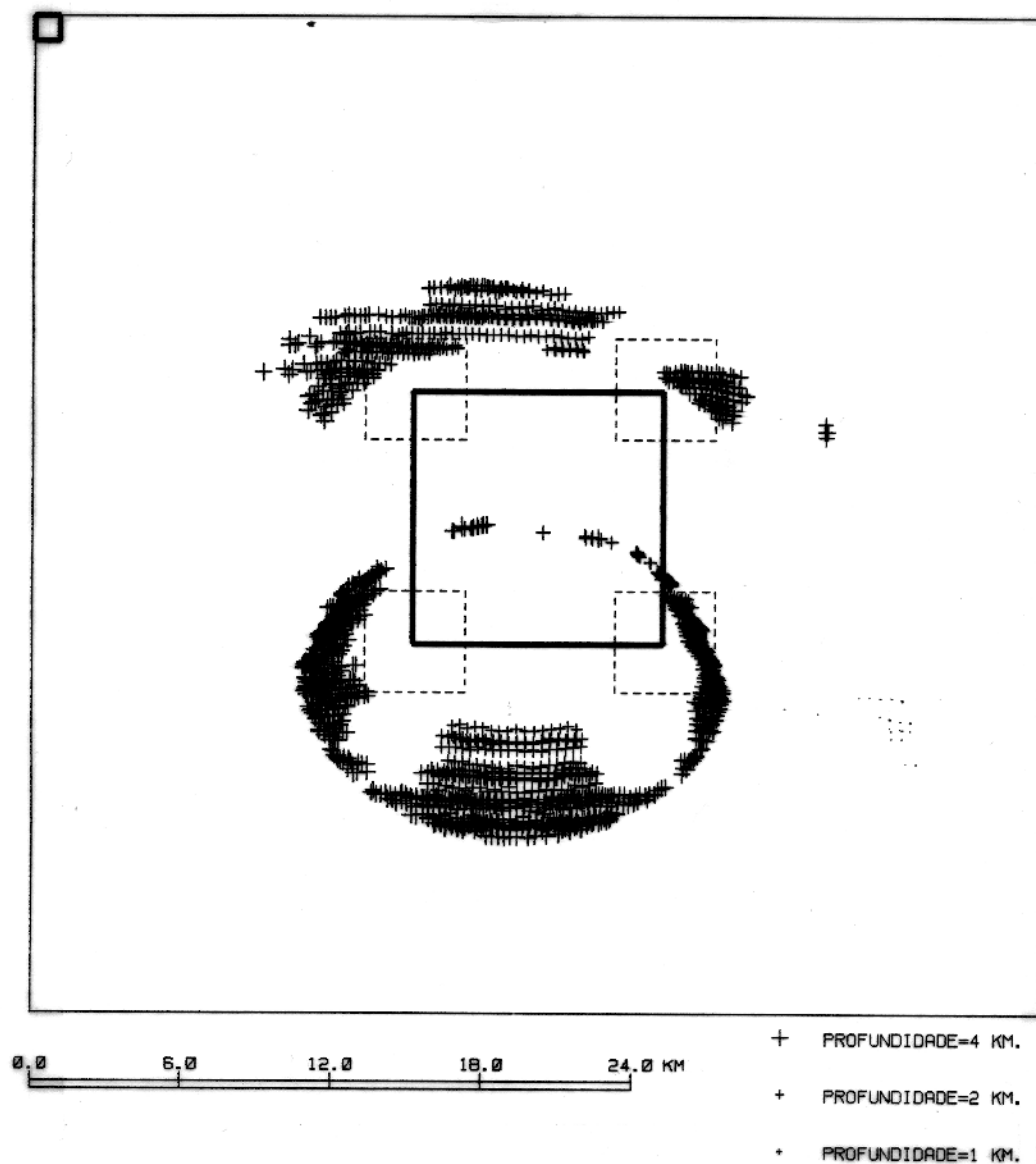
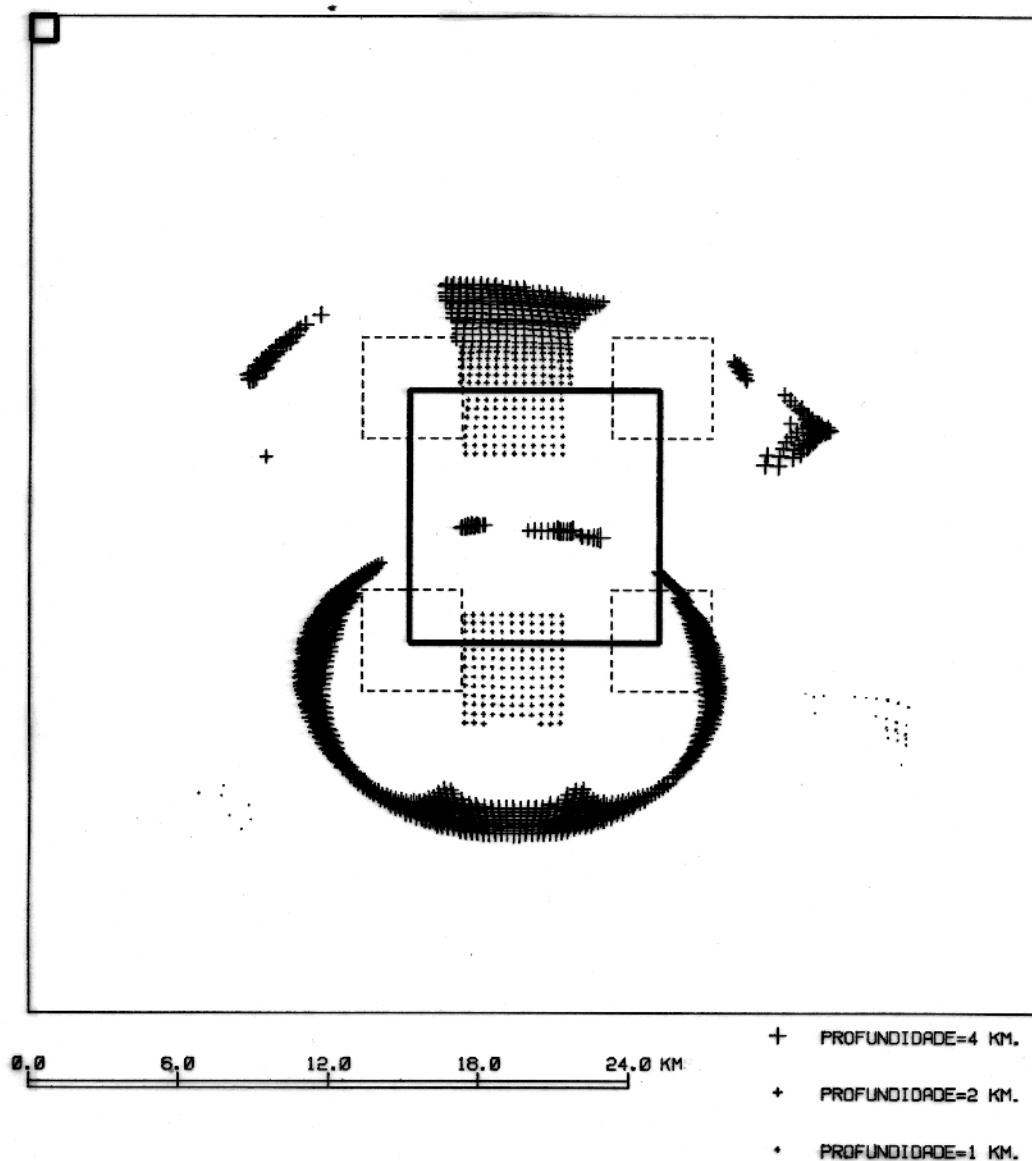


Figura 6: Anomalia magnética causada pelo prisma vertical semi-infinito, com inclinação e declinação do vetor magnetização igual a 45° e 30° , respectivamente, susceptibilidade magnética igual a 0,0055 UCGS e campo geomagnético igual a 25.000 gama, com inclinação de 15° e declinação de -5° . A profundidade do prisma é de 4 km e a sua largura de 10 x 10 km. (intervalo de contorno 10,0 gama).



	Nº de estimativas	Estimativas com $0,0 \leq \tilde{N} \leq 1,0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área total	22500	1845	3,65	4.0	8,16
Vértice SW	400	34	3,90	4.0	2.23
Vértice NW	400	61	3,42	4.0	4.16
Vértice NE	400	98	3,58	4.0	0.63
Vértice SE	400	142	3,41	4.0	5.76

Figura 7: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia magnética da Figura 6 (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,0$; $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-5}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).



	N° de estimativas	Estimativas com $0.0 < \hat{N} < 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área total	22500	1876	3.13	4.0	6.60
Vértice SW	400	0	-	4.0	-
Vértice NW	400	8	3.62	4.0	0.00
Vértice NE	400	0	-	4.0	-
Vértice SE	400	182	3.14	4.0	7.88

Figura 8: Estimativas de $\bar{\tau}_0$ para a anomalia magnética da Figura 6, (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,0$; $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-4}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).

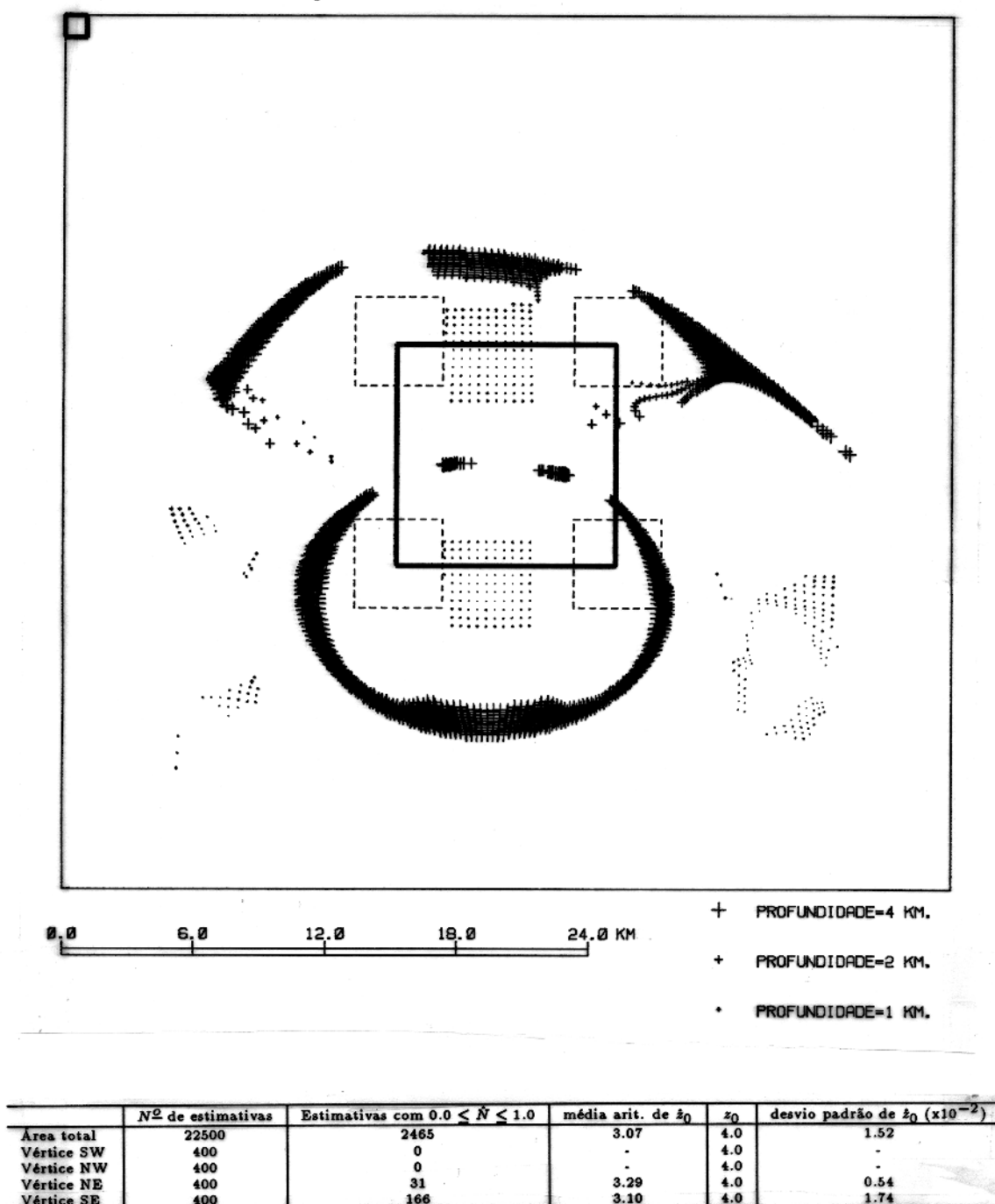


Figura 9: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia magnética da Figura 6, (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,0$; $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-3}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).

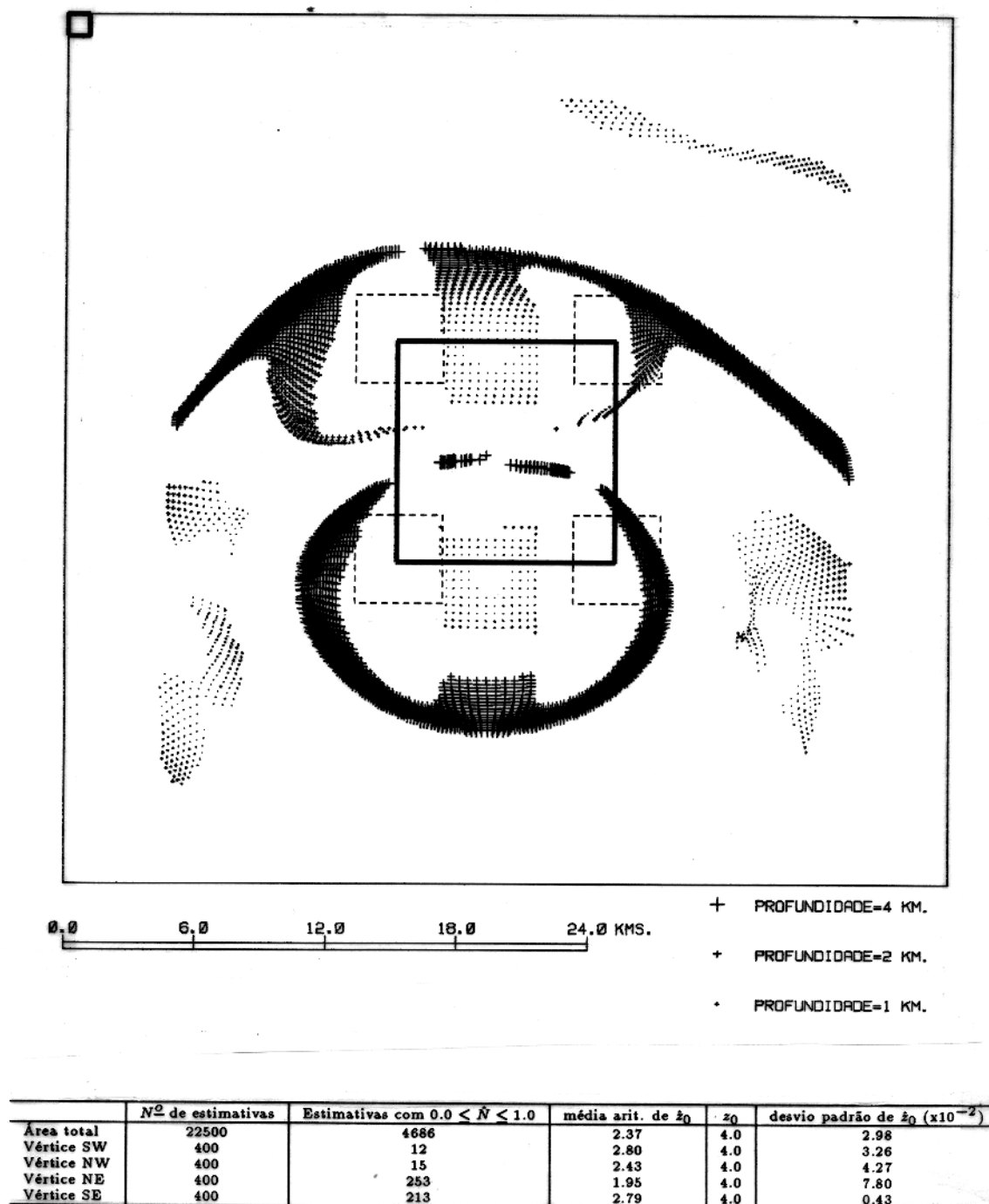
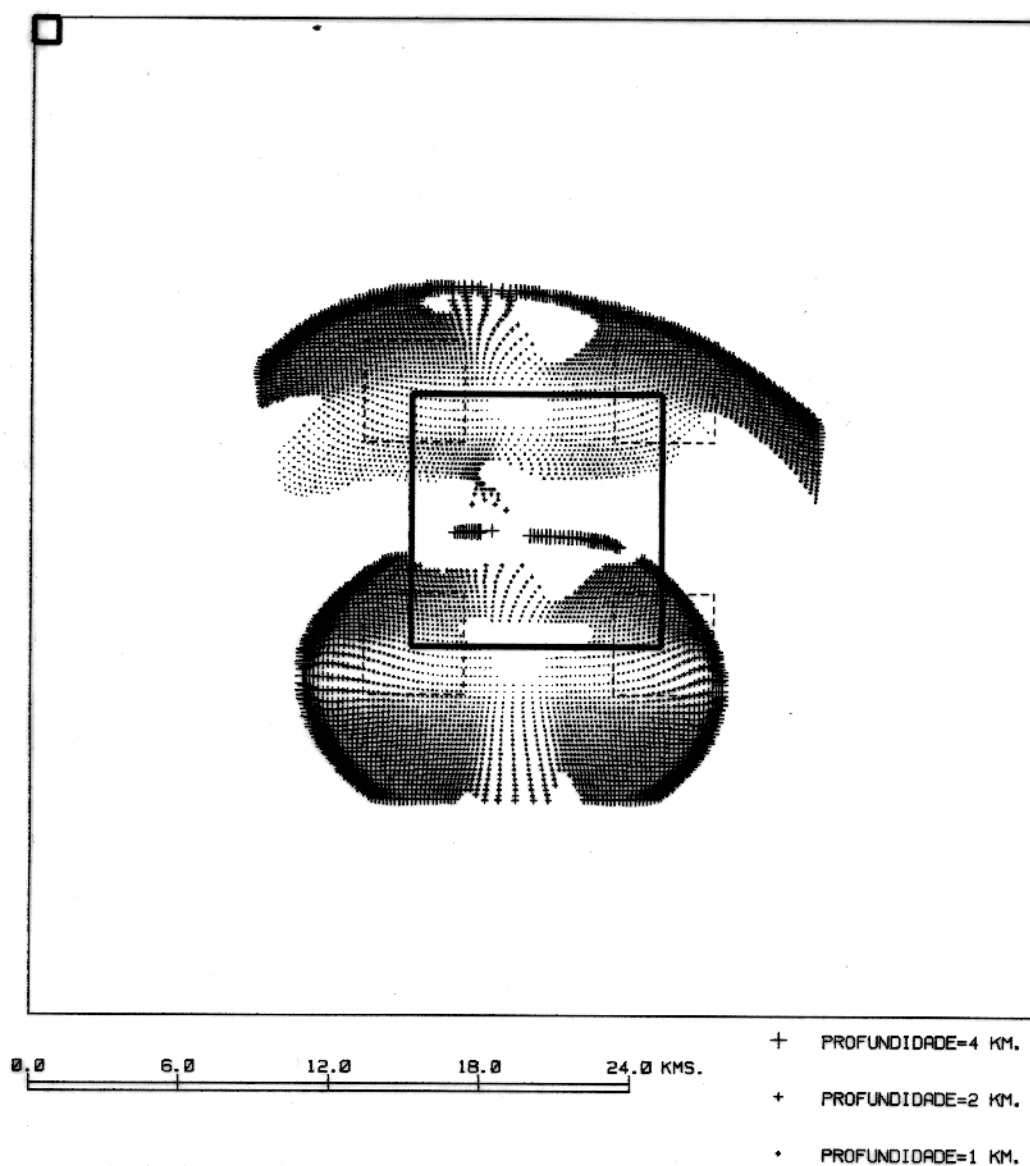


Figura 10: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia magnética da Figura 6, (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,0$; $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).



	N^0 de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \tilde{N} \leq 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área total	22500	6225	1.20	4.0	3.35
Vértice SW	400	400	0.66	4.0	0.08
Vértice NW	400	400	0.40	4.0	2.17
Vértice NE	400	396	0.91	4.0	2.19
Vértice SE	400	371	1.32	4.0	8.13

Figura 11: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia magnética da Figura 6, (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,0$; $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-1}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).

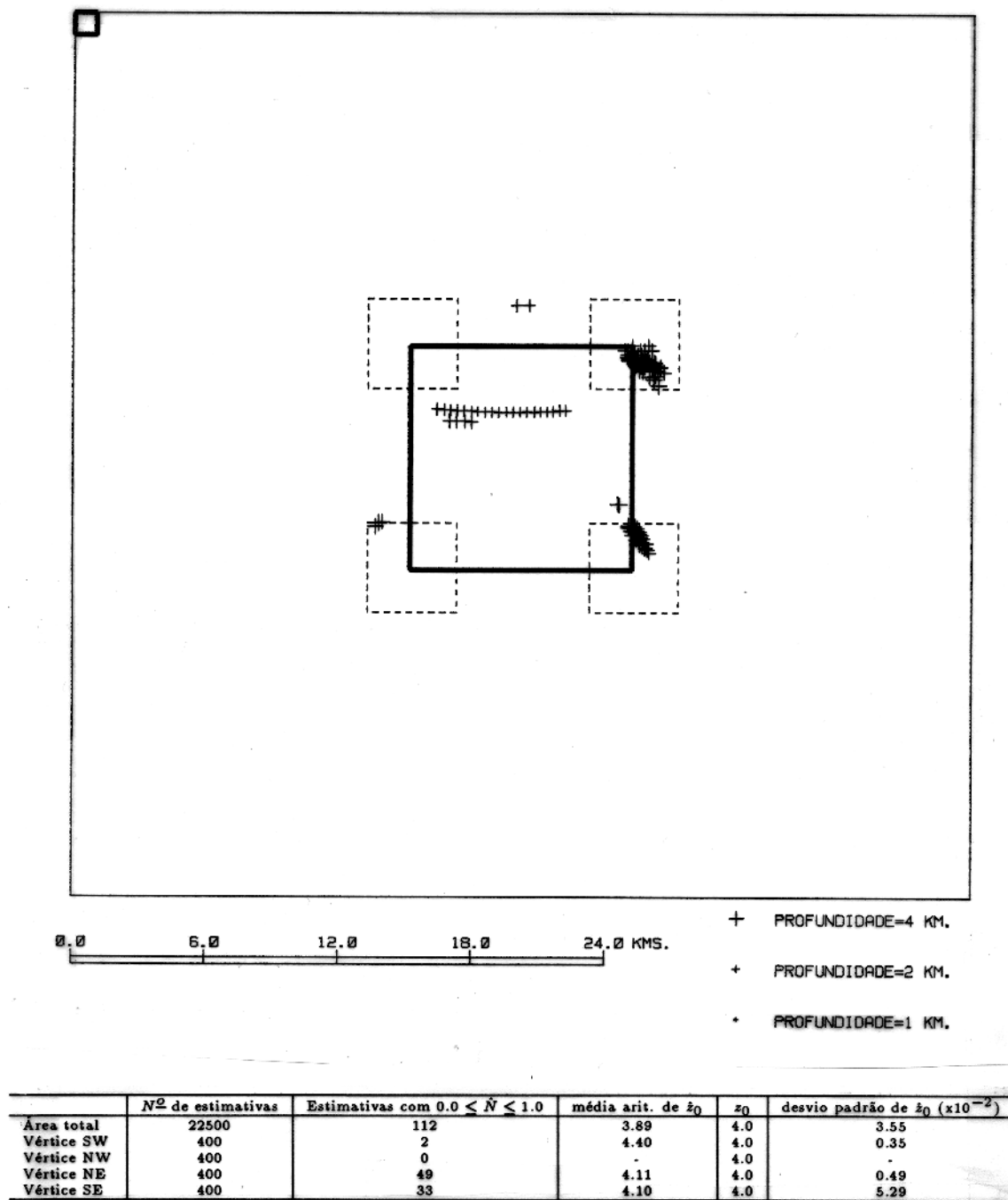
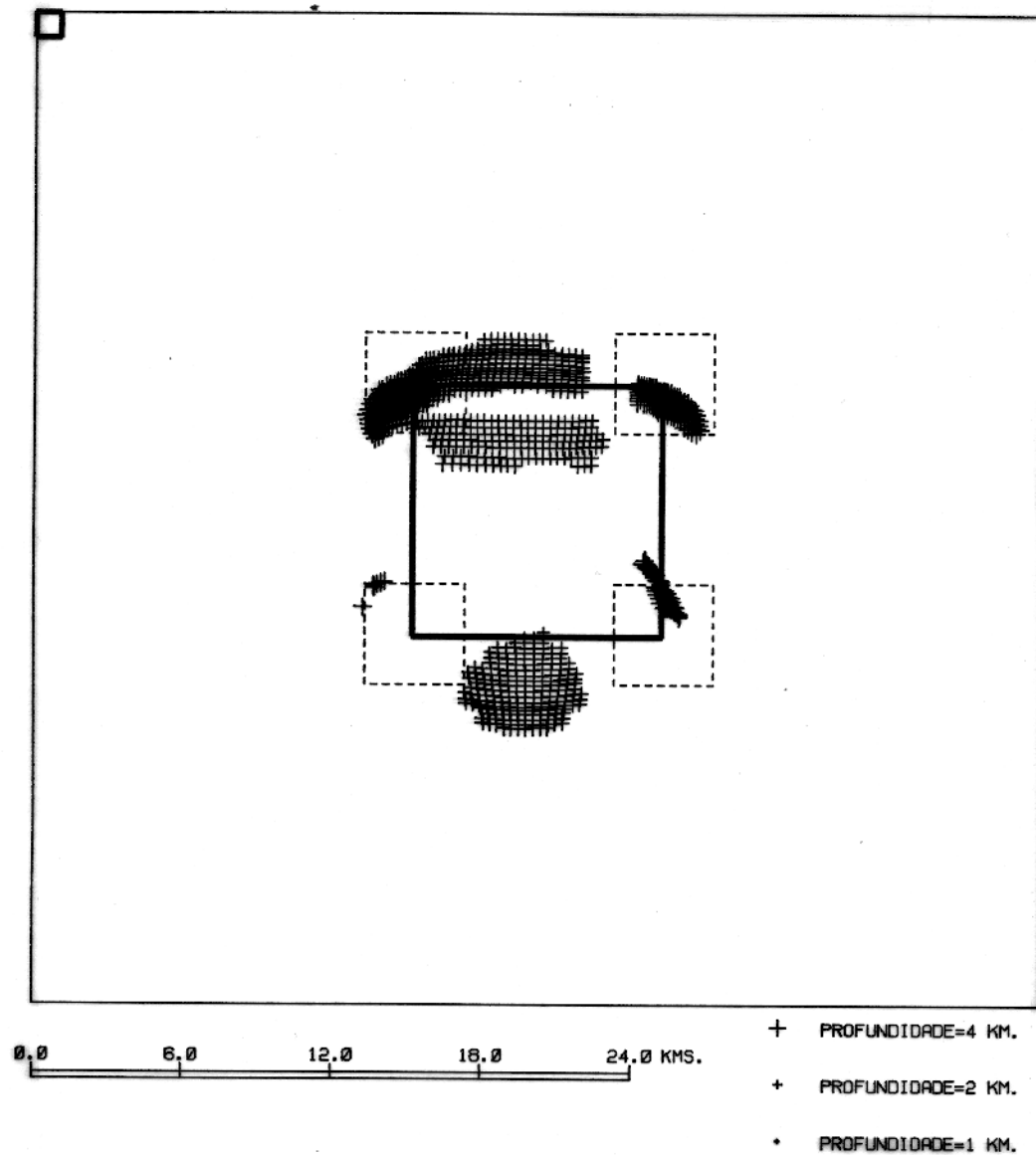
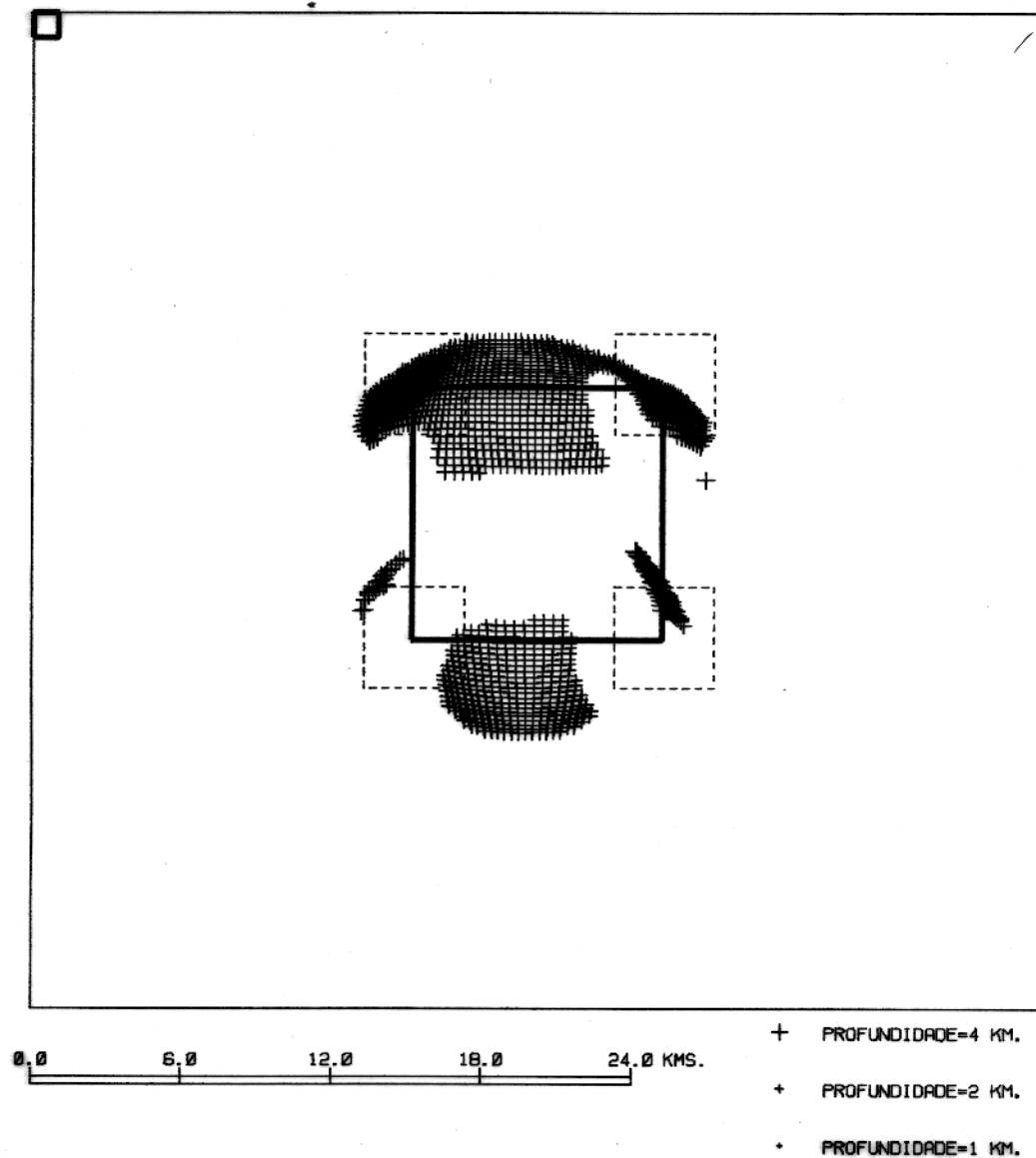


Figura 12: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia magnética da Figura 6, (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,7$, $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-5}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).



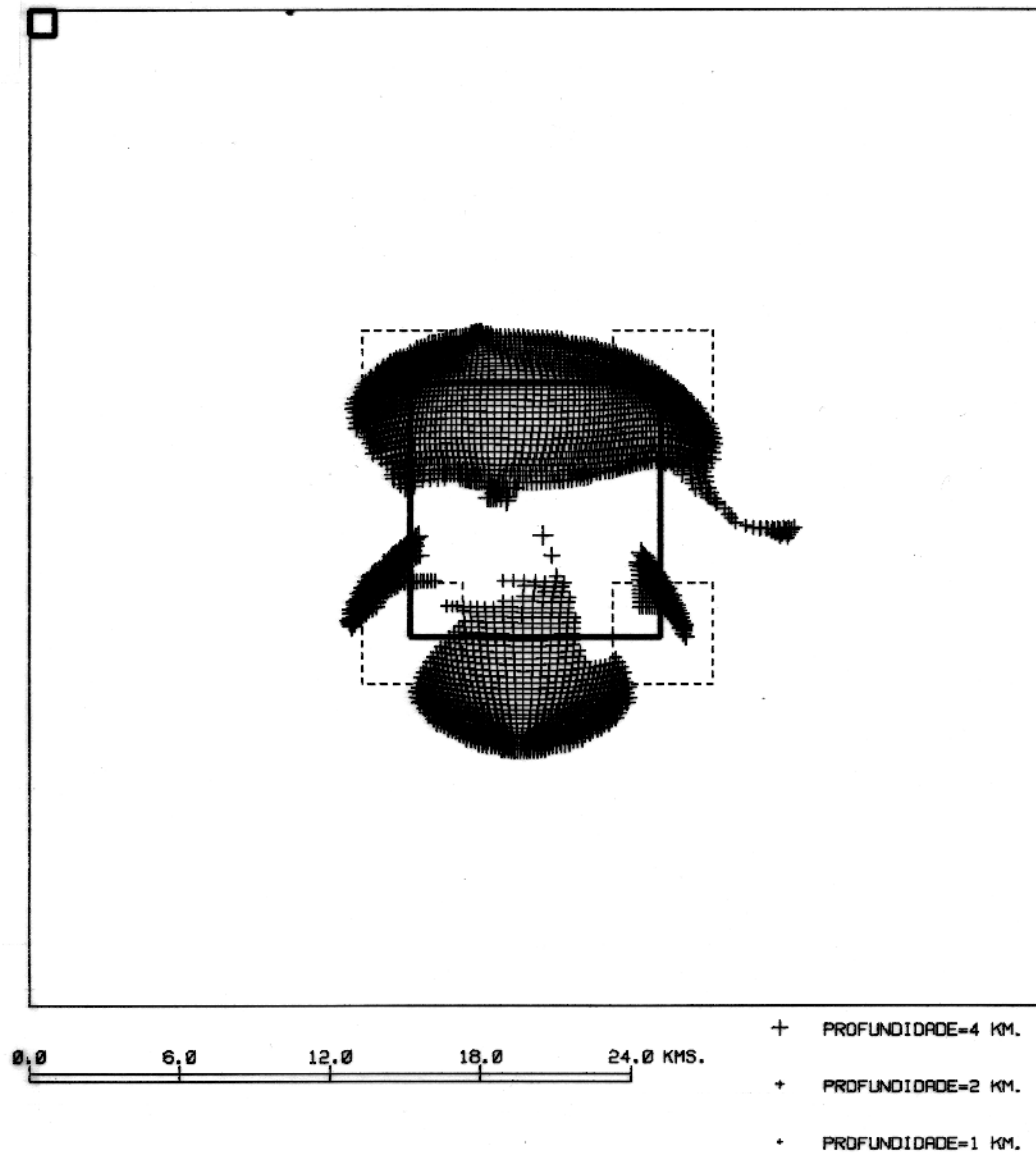
	N^2 de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \hat{N} \leq 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área total	22500	1118	3.60	4.0	1.63
Vértice SW	400	3	4.40	4.0	0.31
Vértice NW	400	260	3.75	4.0	2.06
Vértice NE	400	167	4.03	4.0	0.85
Vértice SE	400	82	4.25	4.0	5.11

Figura 13: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia magnética da Figura 6, (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,7$, $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-4}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).



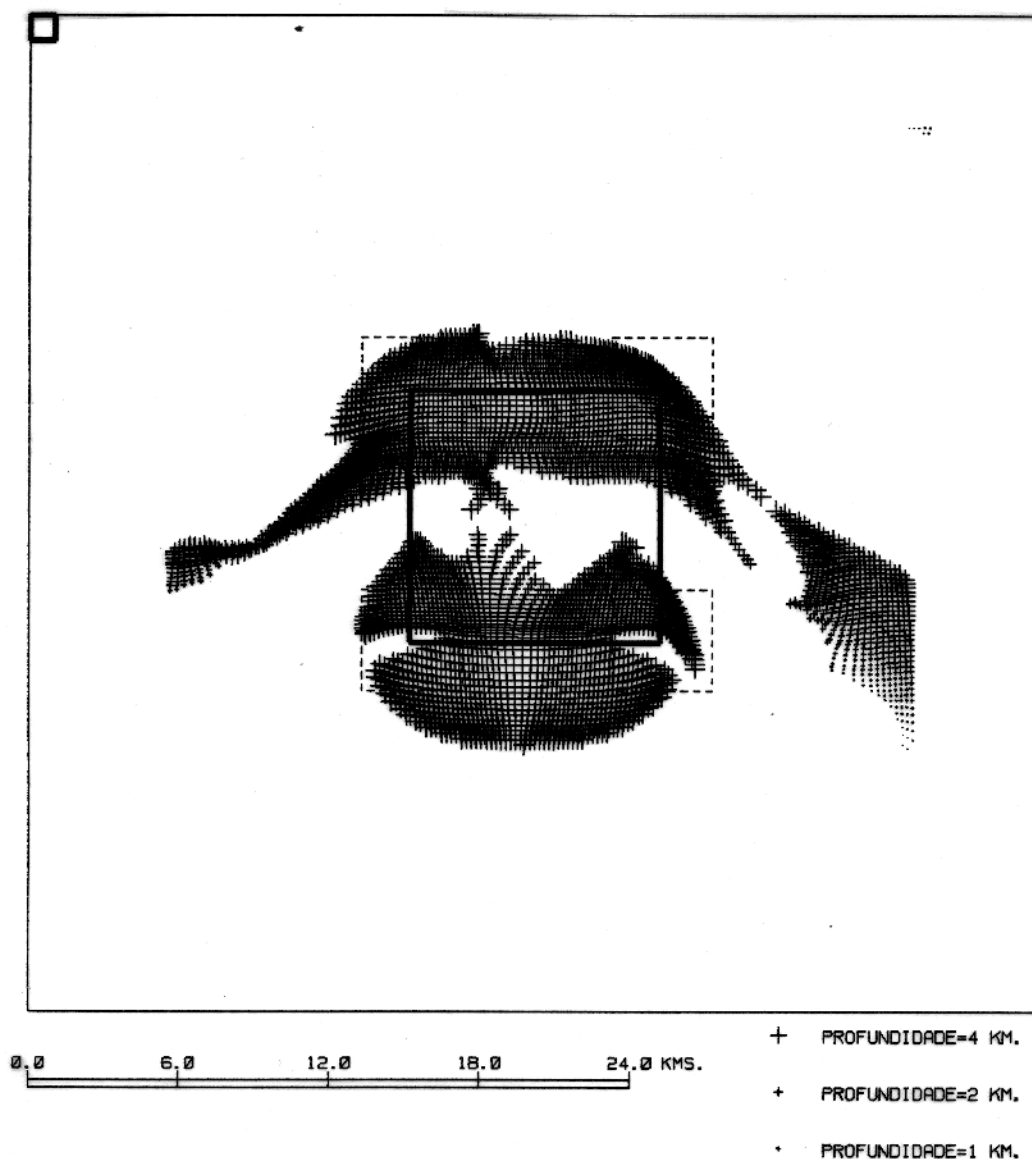
	N^2 de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \hat{N} \leq 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área total	22500	1592	3.44	4.0	2.58
Vértice SW	400	13	4.45	4.0	0.46
Vértice NW	400	291	3.59	4.0	1.06
Vértice NE	400	215	3.96	4.0	2.31
Vértice SE	400	105	4.28	4.0	4.71

Figura 14: Estimativas de $\bar{\tau}_0$ para a anomalia magnética da Figura 6, (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,7$, $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-3}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).



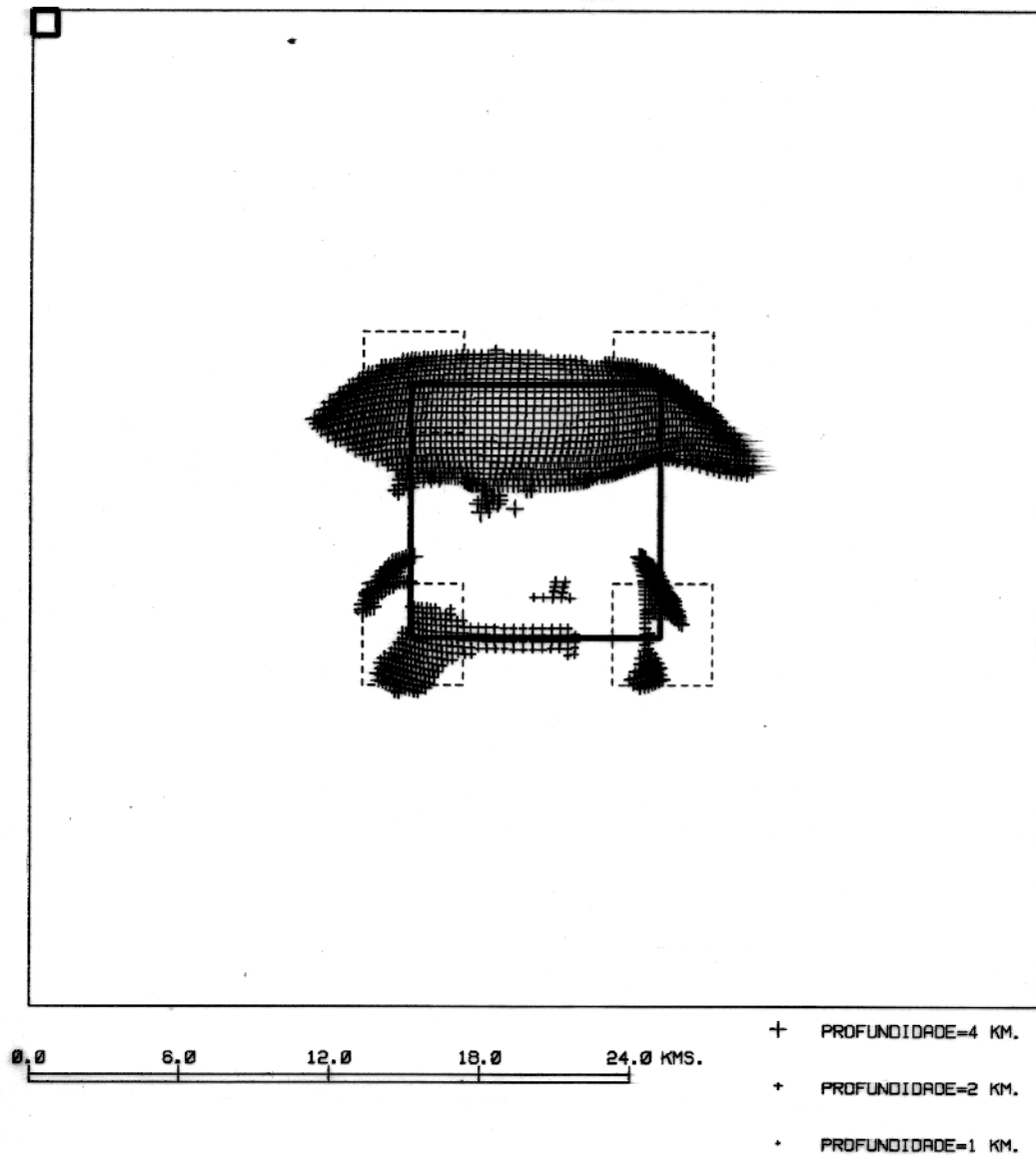
	N^2 de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \hat{N} \leq 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área total	22500	3148	3.65	4.0	0.54
Vértice SW	400	98	4.39	4.0	9.54
Vértice NW	400	380	3.58	4.0	0.07
Vértice NE	400	350	3.83	4.0	3.36
Vértice SE	400	163	4.18	4.0	1.16

Figura 15: Estimativas de $\bar{\tau}_0$ para a anomalia magnética da Figura 6, (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,7$, $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).



	N^2 de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \hat{N} \leq 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Area total	22500	4664	3.41	4.0	4.51
Vértice SW	400	308	3.41	4.0	1.94
Vértice NW	400	376	3.63	4.0	3.06
Vértice NE	400	323	3.99	4.0	5.03
Vértice SE	400	248	3.84	4.0	4.44

Figura 16: Estimativas de $\bar{\tau}_0$ para a anomalia magnética da Figura 6, (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,7$, $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-1}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).



	N^2 de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \hat{N} \leq 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área total	22500	2016	2.86	4.0	2.07
Vértice SW	400	159	3.05	4.0	5.90
Vértice NW	400	302	2.80	4.0	0.72
Vértice NE	400	237	3.06	4.0	5.09
Vértice SE	400	135	3.48	4.0	2.30

Figura 17: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia magnética da Figura 6, (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,5$, $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).

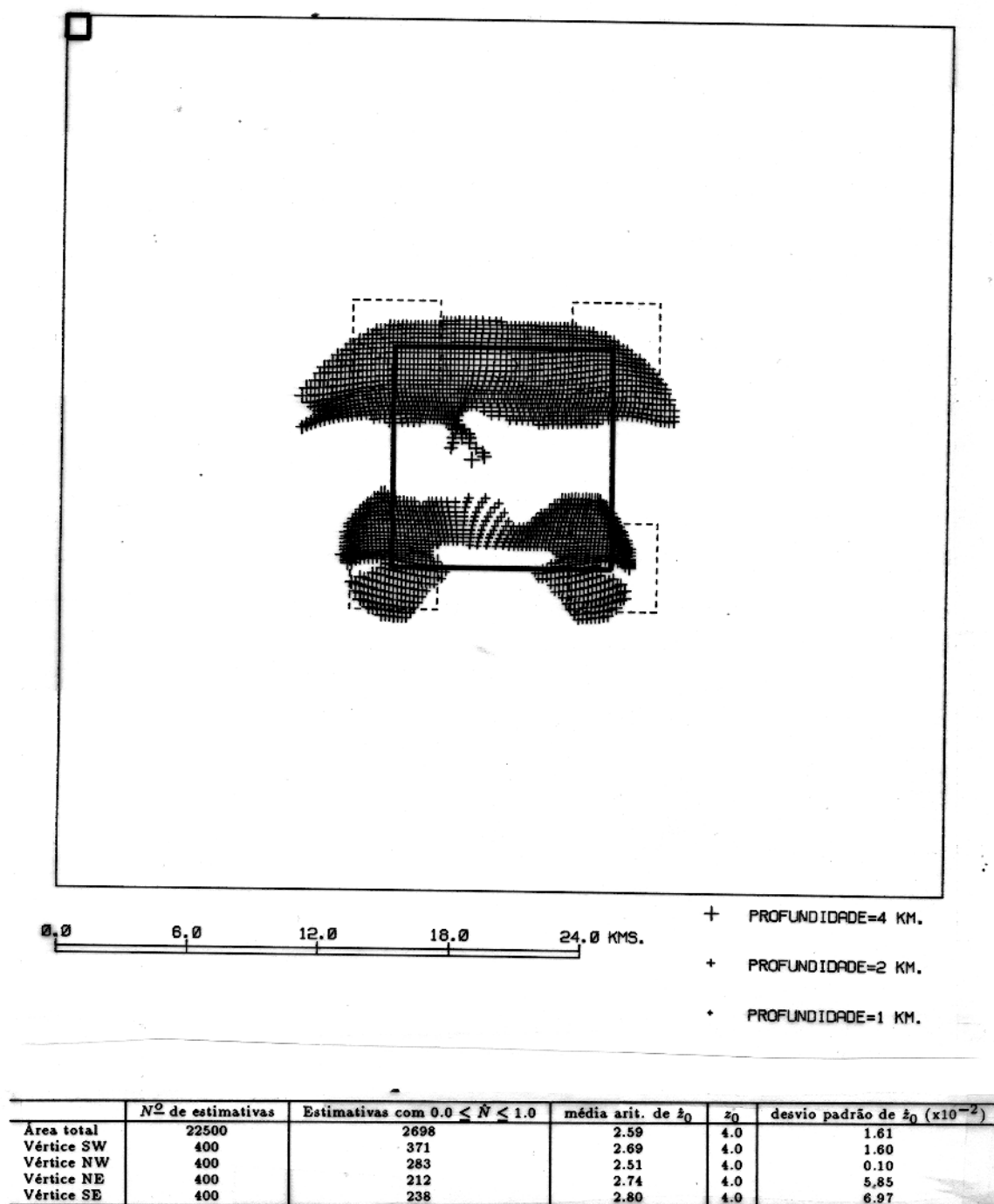


Figura 18: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia magnética da Figura 6, (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,5$, $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-1}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).

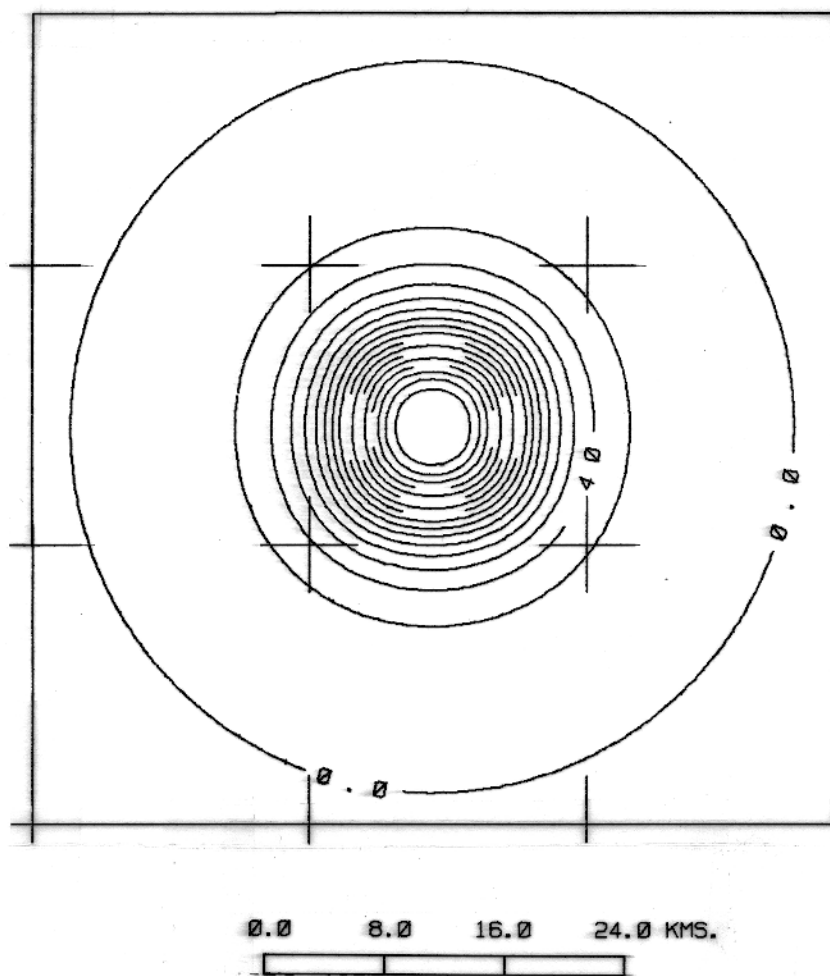
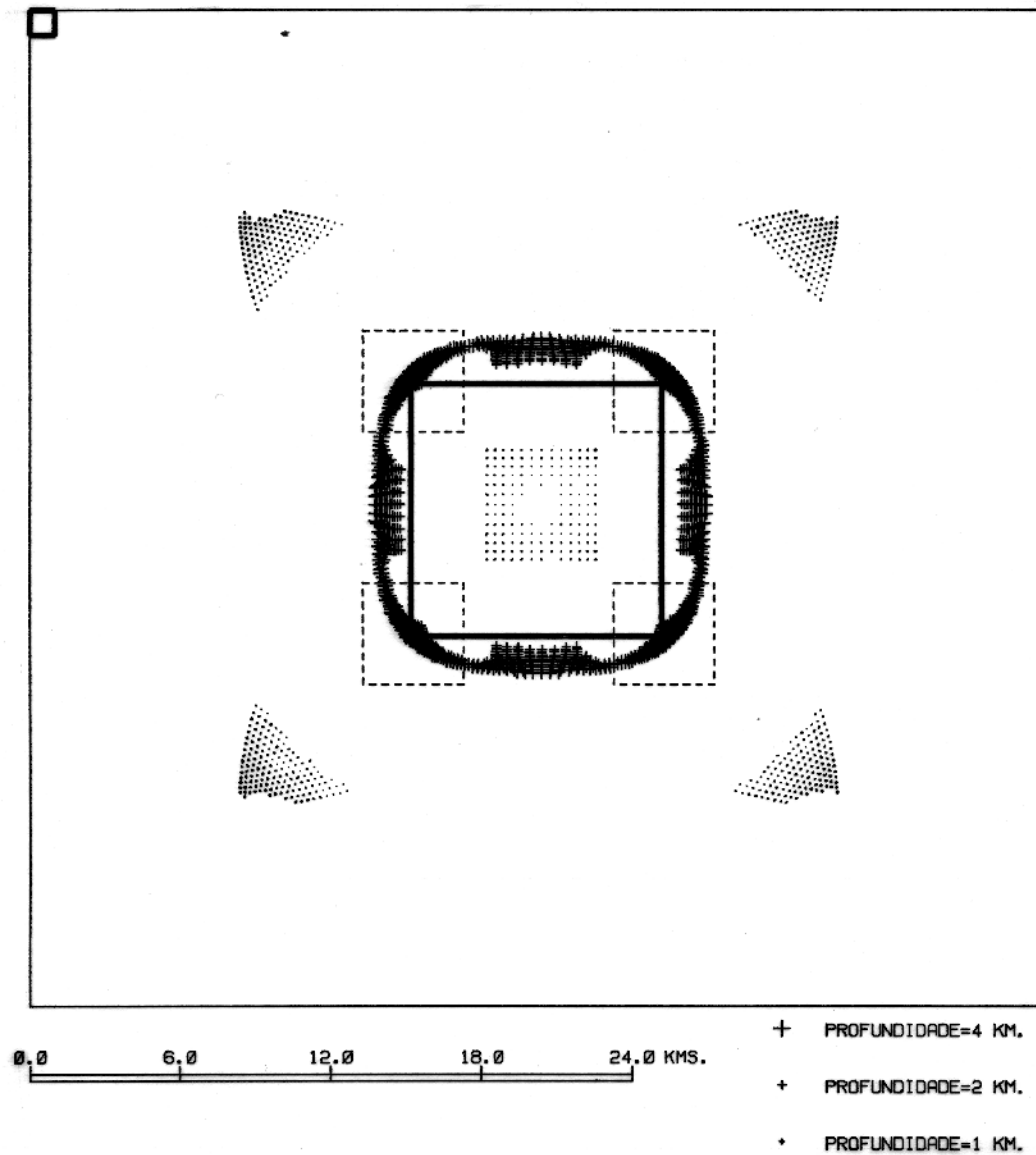
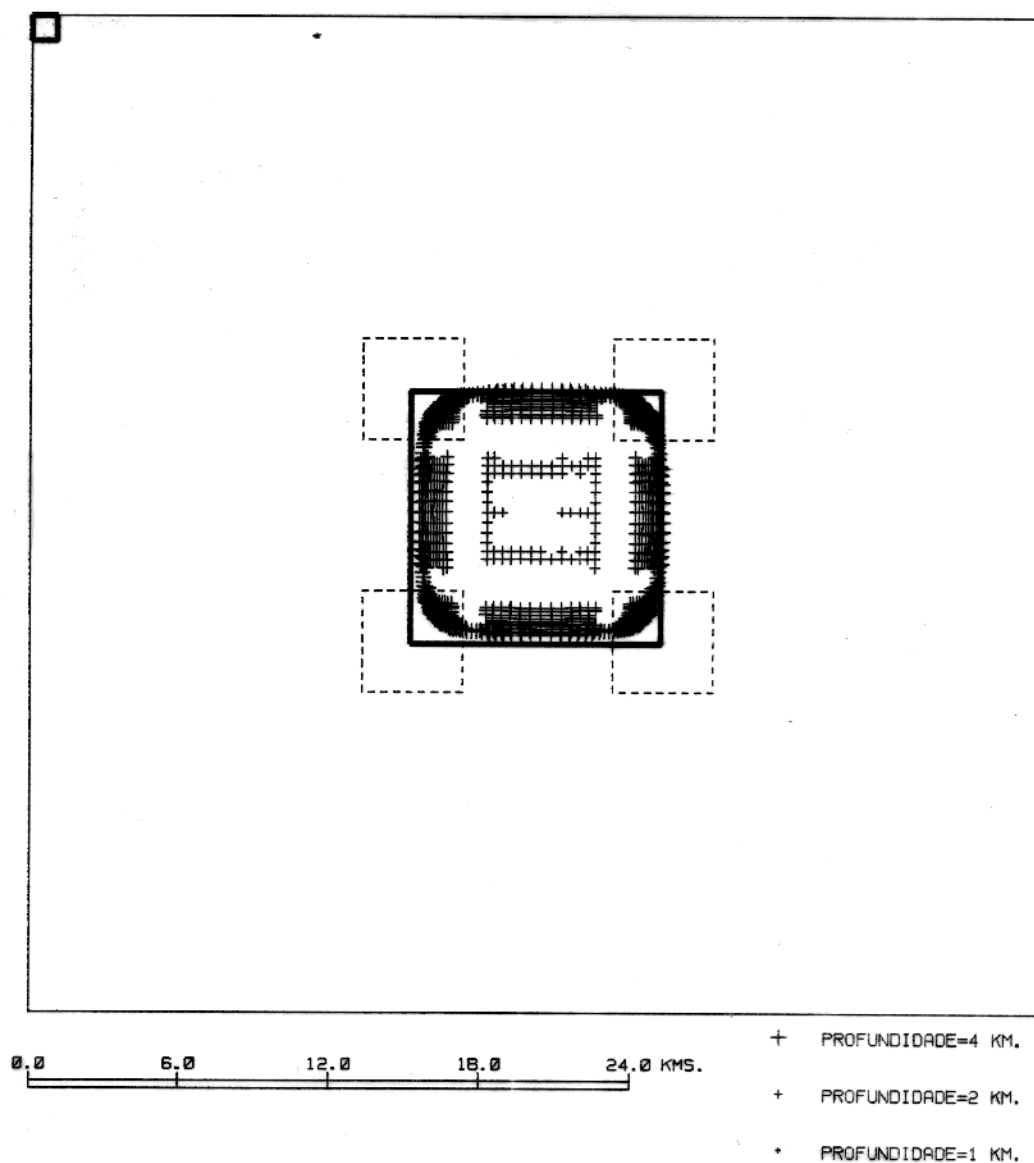


Figura 19: Anomalia magnética causada pelo prisma vertical semi-infinito, com magnetização vertical, considerando o campo geomagnético vertical, com intensidade de 25.000 gama. Susceptibilidade magnética igual a 0,0055 UCGS. A profundidade do prisma é de 4 km e a sua largura de 10 x 10 km. (intervalo de contorno 10,0 gama).



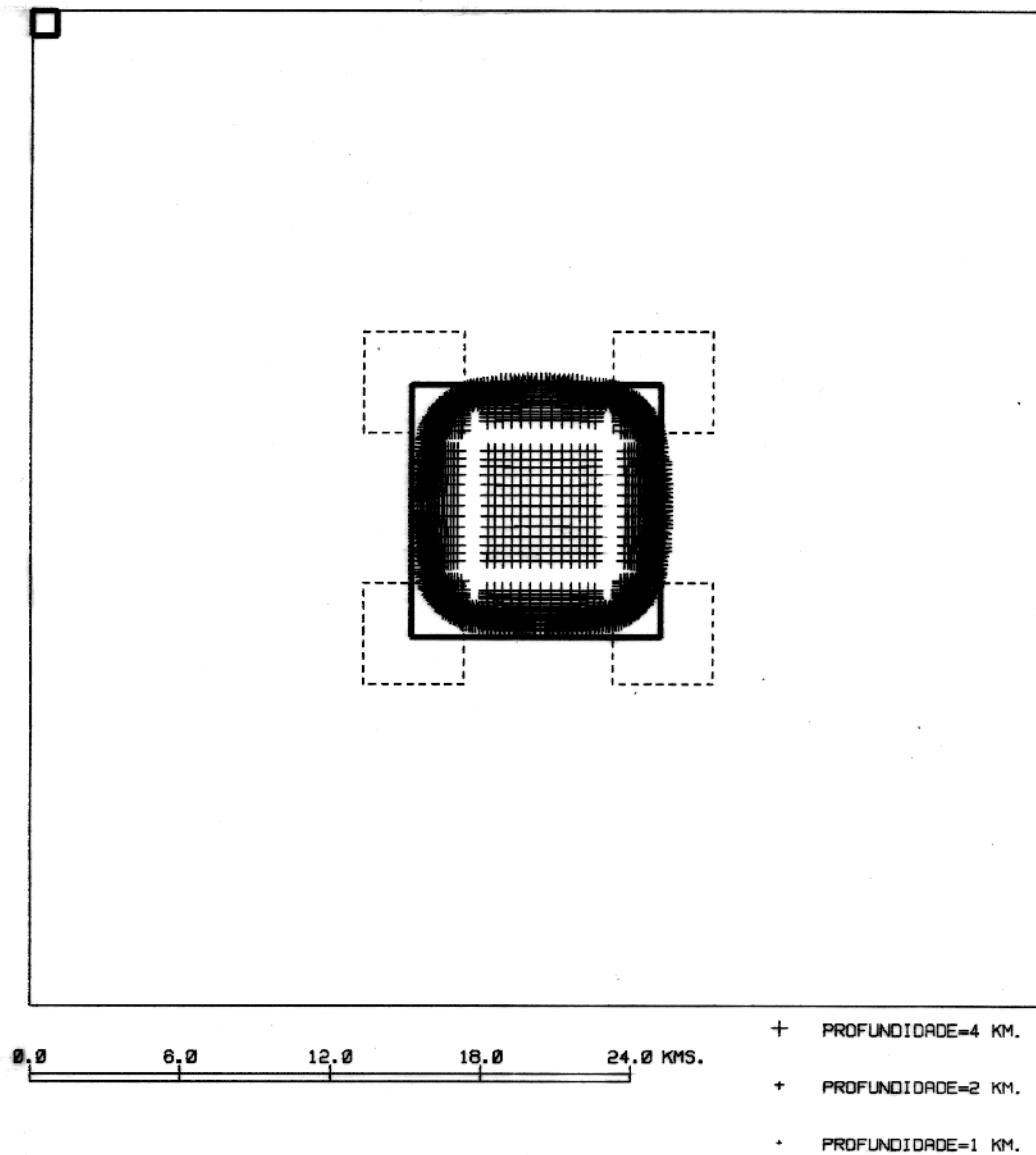
	N^2 de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \hat{N} \leq 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área total	12100	1869	1.86	4.0	3.33
Vértice SW	400	144	2.92	4.0	0.38
Vértice NW	400	146	2.91	4.0	0.13
Vértice NE	400	151	2.91	4.0	0.57
Vértice SE	400	145	2.91	4.0	0.69

Figura 20: Estimativas de $\bar{\tau}_0$ para a anomalia magnética da Figura 19, (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,0$; $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).



	Nº de estimativas	Estimativas com $0.0 < \hat{N} < 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área total	12100	1127	3.59	4.0	0.56
Vértice SW	400	45	3.45	4.0	2.58
Vértice NW	400	51	3.38	4.0	0.55
Vértice NE	400	60	3.39	4.0	0.20
Vértice SE	400	52	3.42	4.0	0.25

Figura 21: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia magnética da Figura 19, (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,5$; $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).



	Nº de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \hat{N} \leq 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área total	12100	2654	4.23	4.0	0.77
Vértice SW	400	141	4.26	4.0	2.96
Vértice NW	400	152	4.28	4.0	3.28
Vértice NE	400	166	4.29	4.0	4.44
Vértice SE	400	154	4.27	4.0	3.45

Figura 22: Estimativas de $\bar{\tau}_0$ para a anomalia magnética da Figura 19, (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,7$; $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).

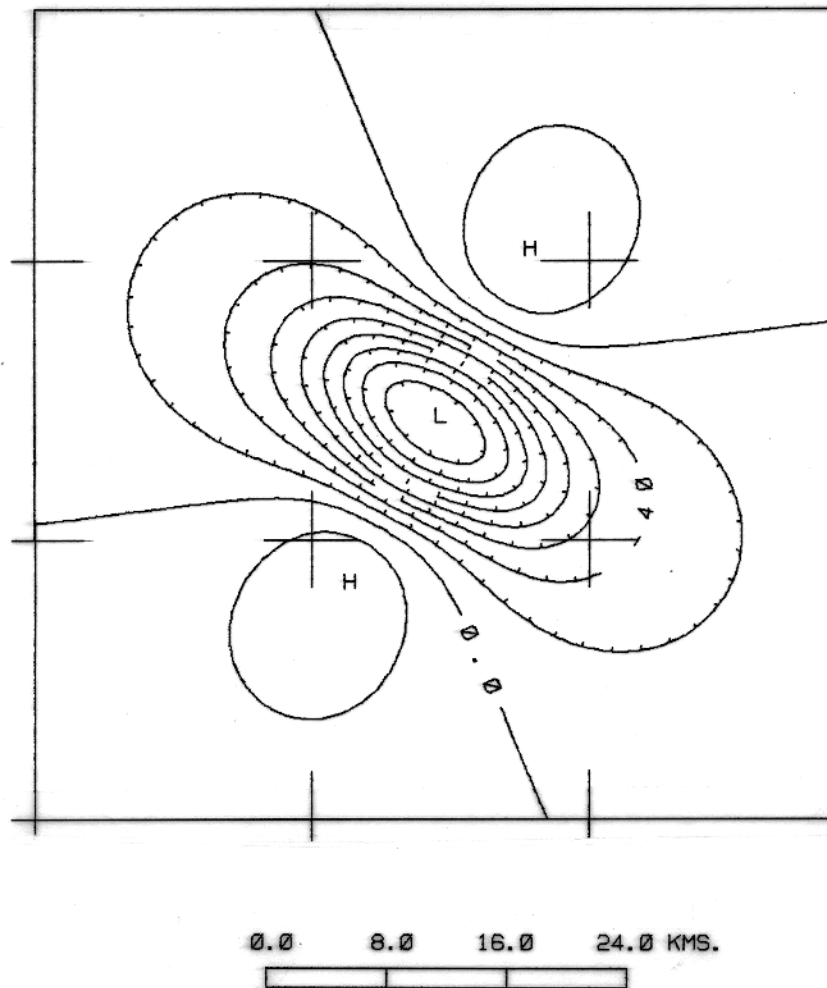
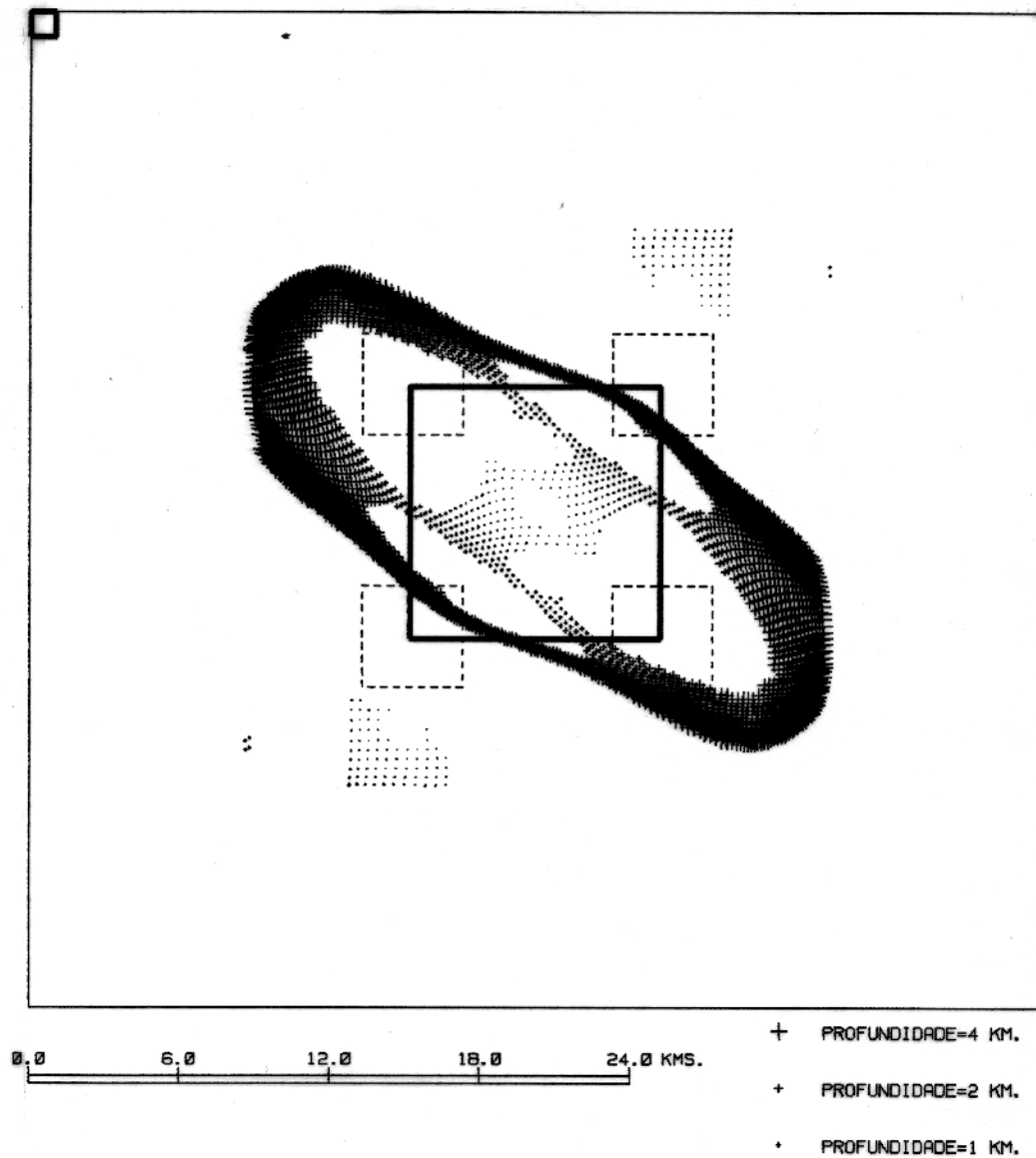
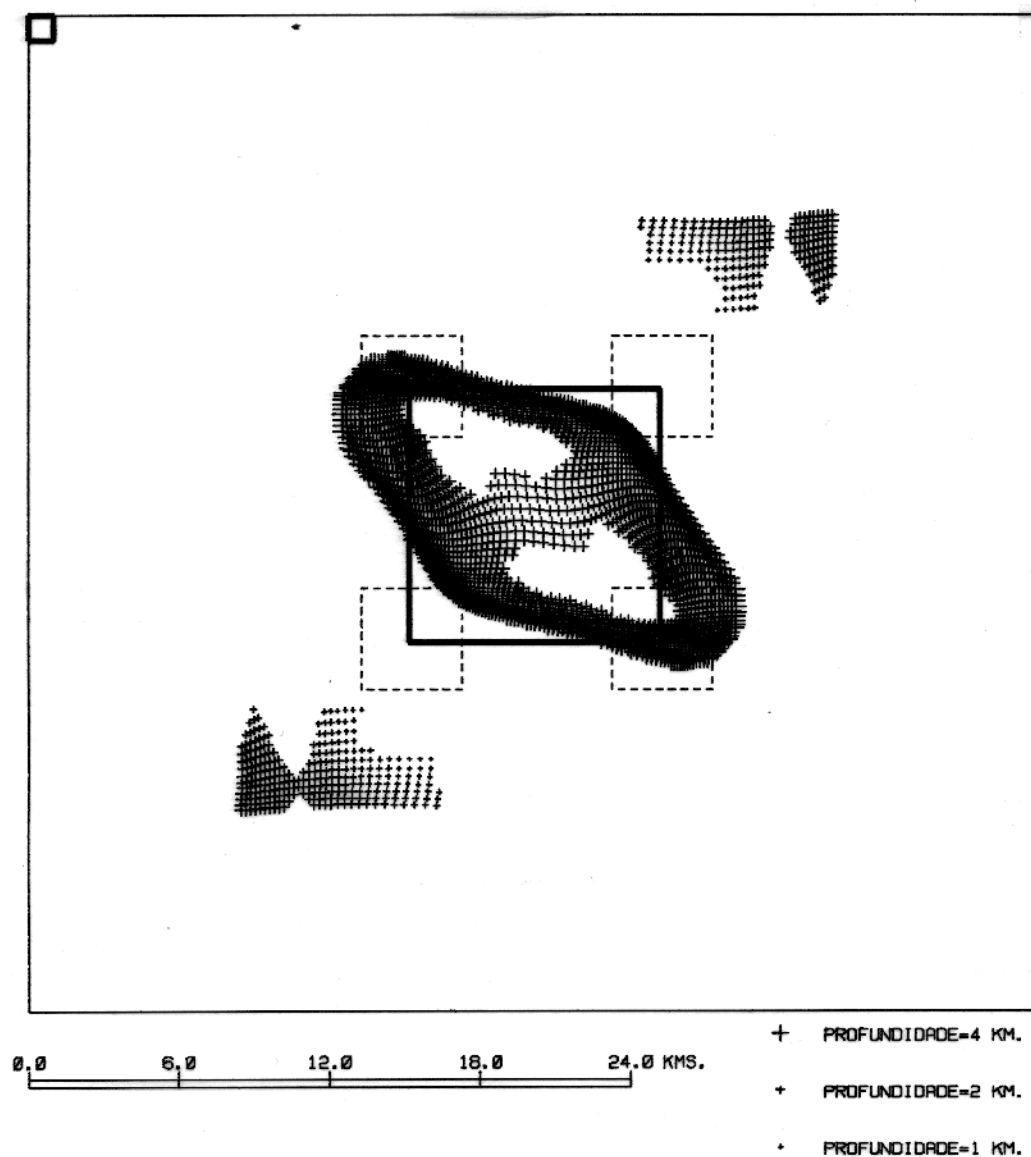


Figura 23: Anomalia magnética causada pelo prisma vertical semi-infinito, considerando o campo total horizontal, com declinação de 30° , susceptibilidade magnética igual a 0,0055 UCGS e o campo geomagnético considerado é horizontal, com declinação de 30° e intensidade de 25.000 gama. A profundidade do prisma é de 4 km e a sua largura de 10 x 10 km. (intervalo de contorno 10,0 gama).



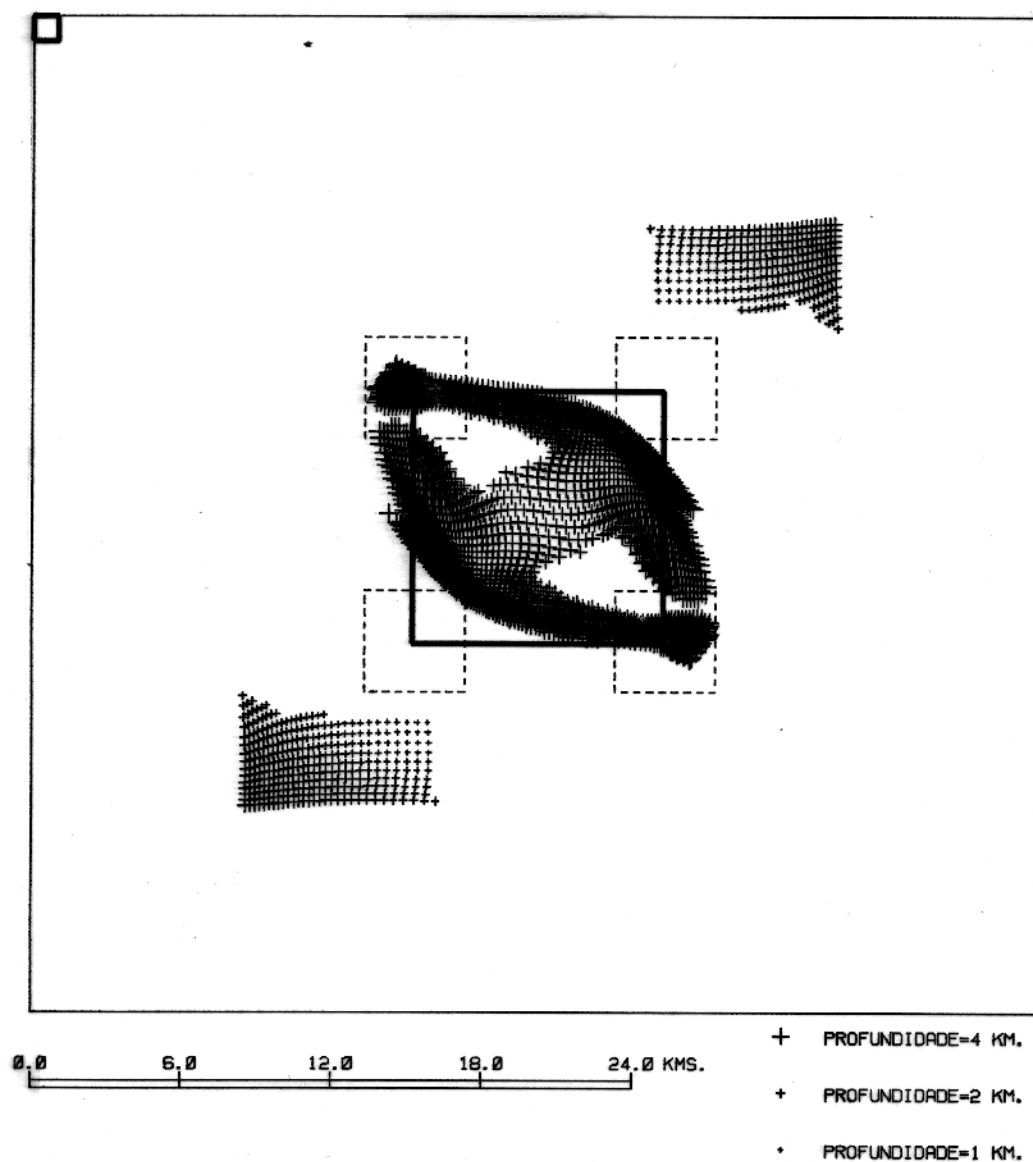
	N^2 de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \hat{N} \leq 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área total	12100	3734	3.07	4.0	2.86
Vértice SW	400	42	2.75	4.0	1.61
Vértice NW	400	129	2.54	4.0	3.28
Vértice NE	400	59	2.75	4.0	0.96
Vértice SE	400	155	2.56	4.0	6.83

Figura 24: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia magnética da Figura 23, (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,0$; $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).



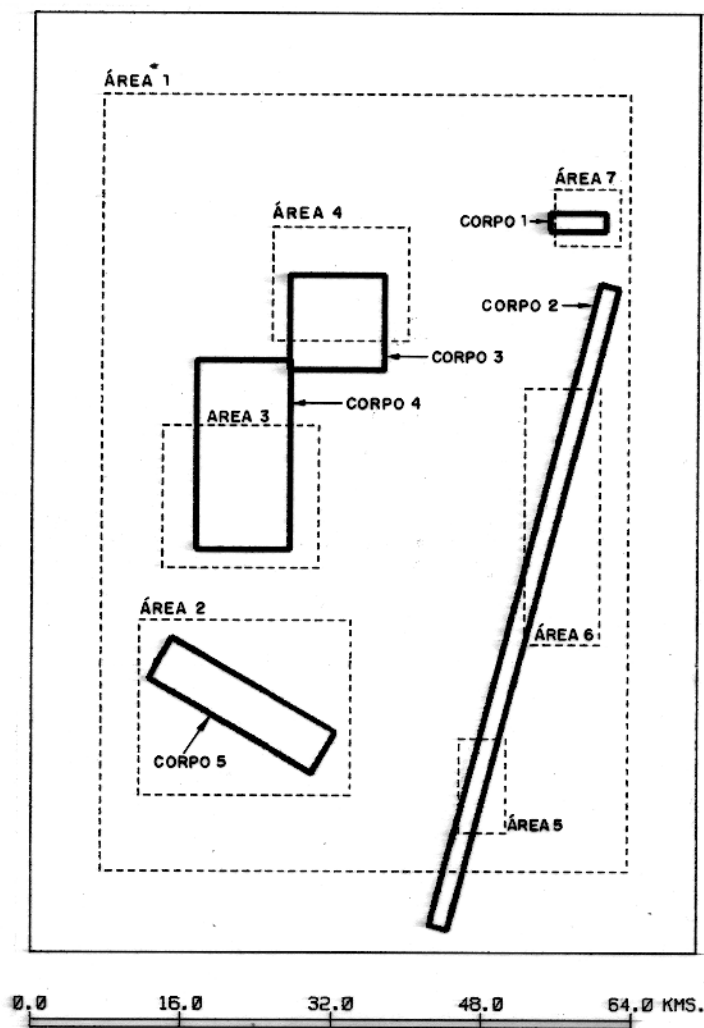
	N^2 de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \hat{N} \leq 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área total	12100	2892	3.25	4.0	0.57
Vértice SW	400	3	4.25	4.0	0.85
Vértice NW	400	277	3.69	4.0	0.57
Vértice NE	400	9	4.24	4.0	0.51
Vértice SE	400	267	3.65	4.0	2.76

Figura 25: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia magnética da Figura 23, (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,5$; $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).



	N^2 de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \bar{N} \leq 1.0$	média arit. de z_0	z_0	desvio padrão de z_0 ($\times 10^{-2}$)
Área total	12100	3261	3.89	4.0	0.92
Vértice SW	400	32	4.40	4.0	8.97
Vértice NW	400	261	4.40	4.0	0.61
Vértice NE	400	49	4.46	4.0	3.71
Vértice SE	400	267	4.38	4.0	3.49

Figura 26: Estimativas de $\bar{\tau}_0$ para a anomalia magnética da Figura 23, (prisma vertical semi-infinito), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,7$; $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).



	Inclinação do vetor magnetização	Declinação do vetor magnetização	Profundidade do topo (km)
Corpo 1	-5	25	2.5
Corpo 2	-10	230	1.0
Corpo 3	8	115	3.0
Corpo 4	12	115	3.0
Corpo 5	-8	240	4.0

Figura 27: Modelo sintético constituído por prismas verticais semi-infinitos. A intensidade do campo geomagnético da terra considerado é de 25.000 gama, com inclinação de 15° e declinação de -5° . Todos os prismas possuem susceptibilidade magnética constante e igual a 0,0055 UCGS. Os demais parâmetros de cada corpo estão na tabela acima. Os quadriláteros desenhados com linha grossa significam os corpos prismáticos e os com linha tracejada significam as áreas, as quais, em cada teste com esse modelo, tiveram todas as estimativas de $\bar{r}_0$ encontradas em seu interior analisadas (quantidade de estimativas totais, quantidade de estimativas com $\hat{N}$ entre 0,0 e 1,0, média aritmética e desvio padrão das estimativas de profundidade com $\hat{N}$ entre 0,0 e 1,0).

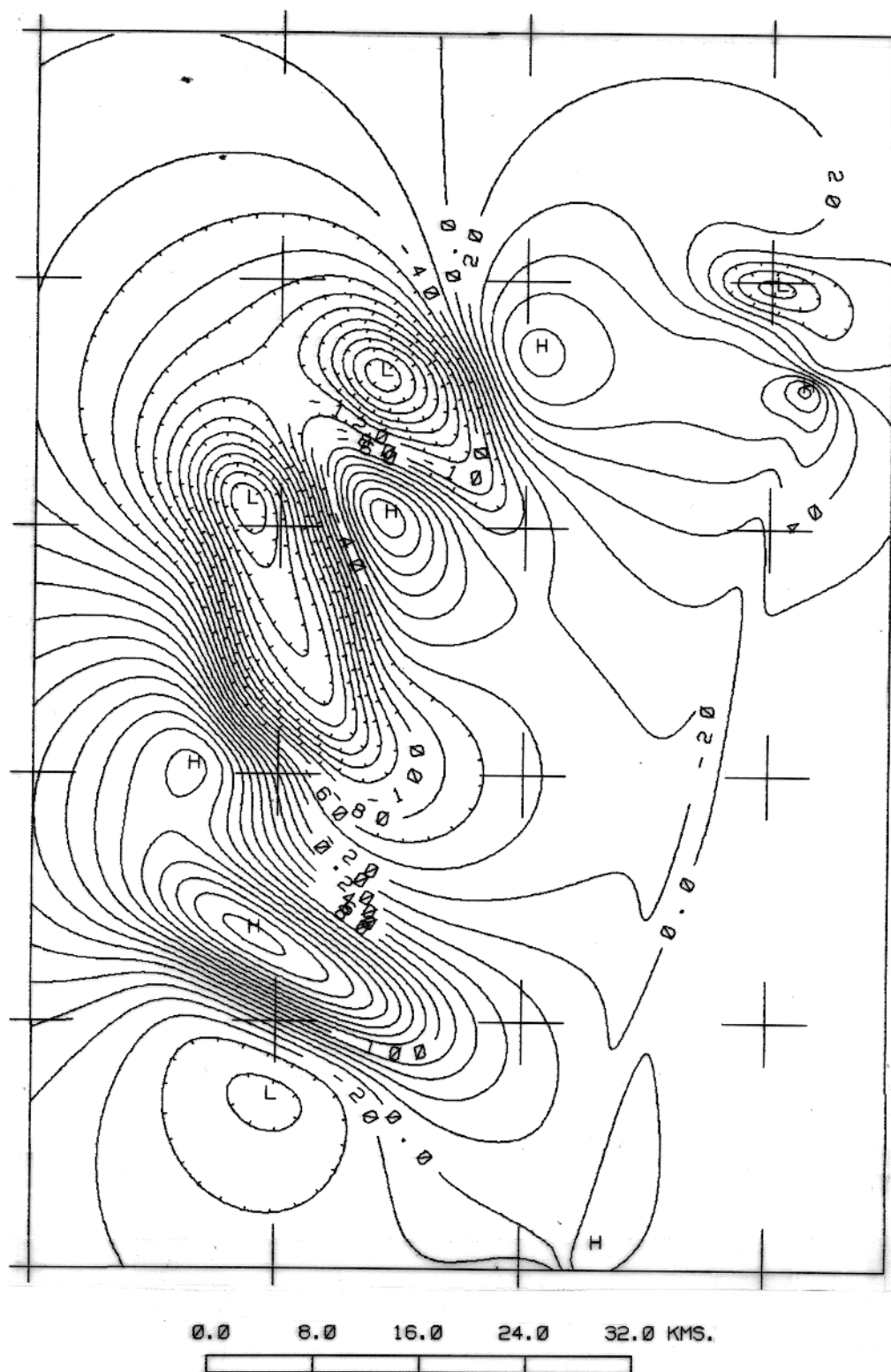
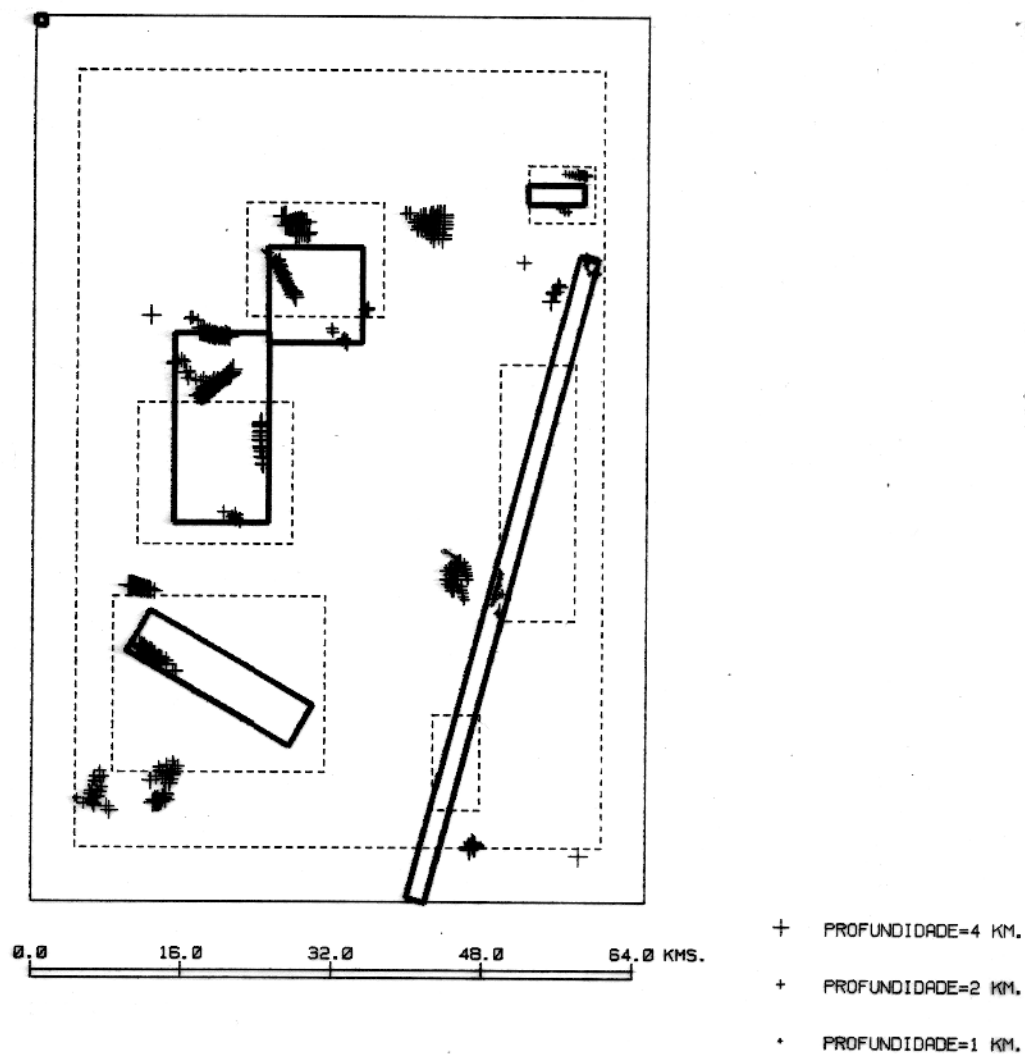
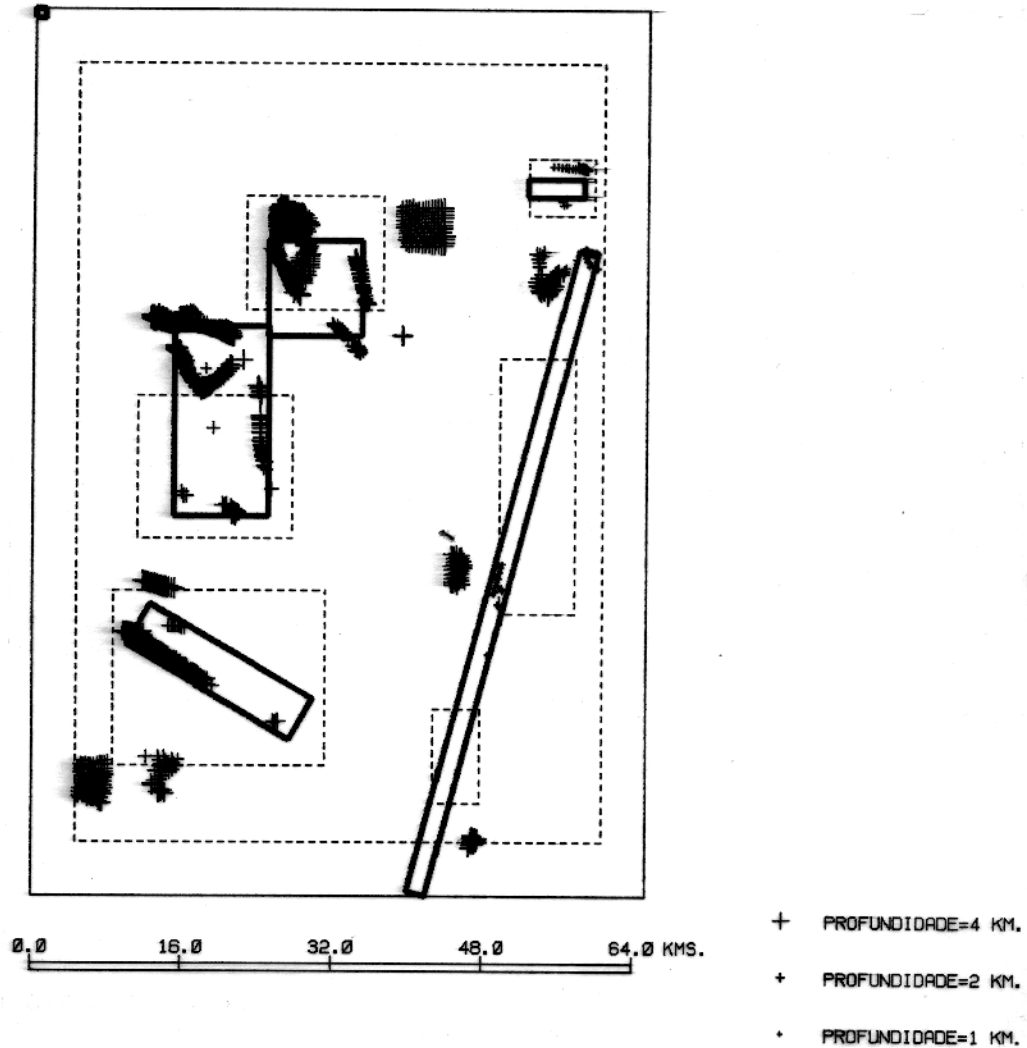


Figura 28: Campo magnético causado pelo modelo da Figura 27 (intervalo de contorno 10,0 gama).



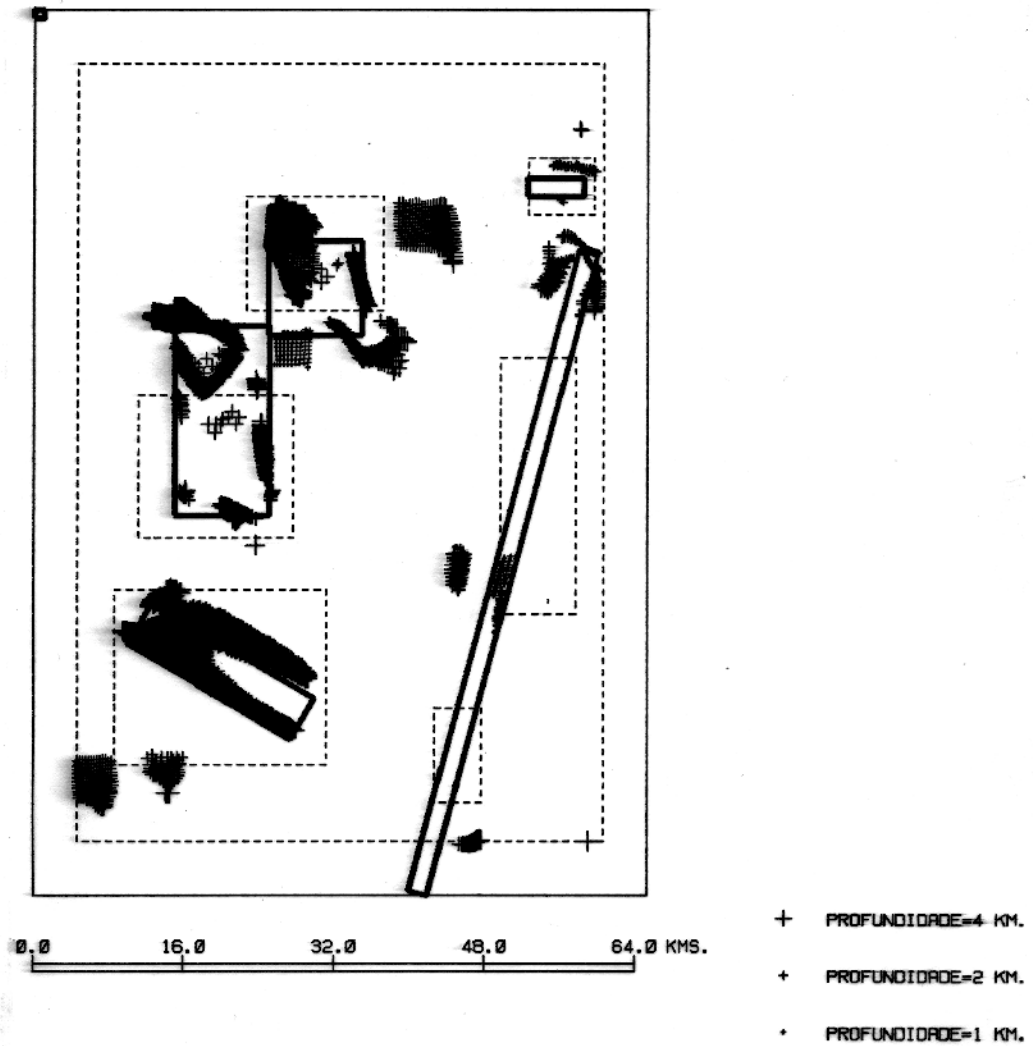
	Nº de estimativas	Estimativas com $0.0 < \hat{N} < 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área 1	114800	718	3.20	-	8.18
Área 2	10509	69	3.92	4.0	0.15
Área 3	6150	27	3.79	3.0	0.61
Área 4	4380	78	3.61	3.0	3.60
Área 5	1250	0	-	1.0	-
Área 6	5400	4	0.79	1.0	0.15
Área 7	1050	15	2.10	2.5	7.93

Figura 29: Estimativas de $\bar{r}_0$, para o modelo da Figura 27, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_0} = 2,5$; $\lambda = 10^{-5}$ e janela de 1 x 1 km de largura (5 x 5 observações).



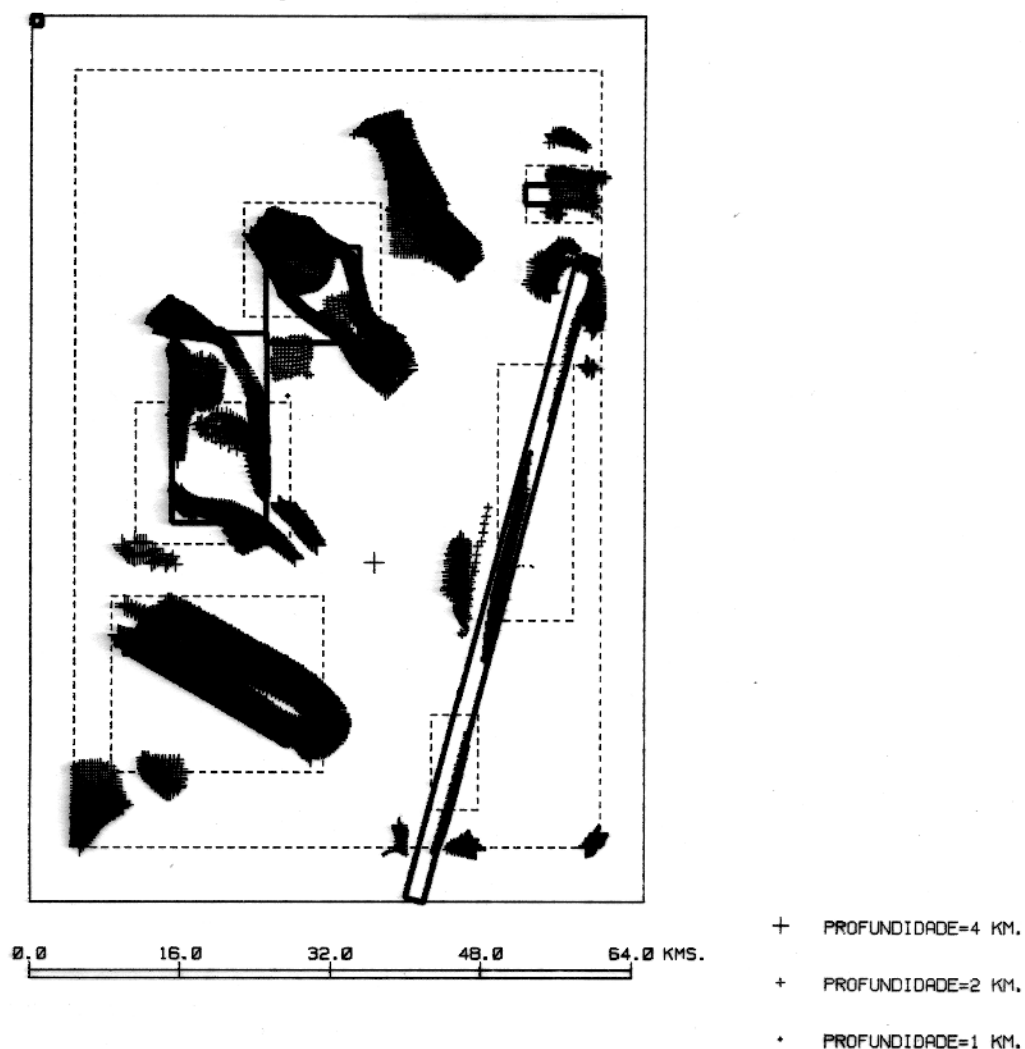
	N^2 de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \hat{N} \leq 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área 1	114800	2387	3.47	-	5.07
Área 2	10509	325	3.99	4.0	0.55
Área 3	6150	68	3.83	3.0	3.83
Área 4	4380	589	3.58	3.0	2.00
Área 5	1250	0	-	1.0	-
Área 6	5400	5	0.95	1.0	25.64
Área 7	71050	21	2.06	2.5	6.65

Figura 30: Estimativas de $\bar{r}_0$, para o modelo da Figura 27, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_0} = 2,5$; $\lambda = 10^{-4}$ e janela de 1×1 km de largura (5×5 observações).



	Nº de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \hat{N} \leq 1.0$	m'édia arit. de z_0	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área 1	114800	6169	3.39	-	3.02
Área 2	10509	2562	3.57	4.0	2.64
Área 3	6150	293	3.76	3.0	1.64
Área 4	4380	1078	3.42	3.0	6.45
Área 5	1250	0	-	1.0	-
Área 6	5400	27	1.15	1.0	21.09
Área 7	1050	36	2.00	2.5	7.23

Figura 31: Estimativas de $\bar{r}_0$, para o modelo da Figura 27, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_0} = 2,5$; $\lambda = 10^{-3}$ e janela de 1 x 1 km de largura (5 x 5 observações).



	N° de estimativas	Estimativas com $0.0 < \hat{N} \leq 1.0$	média arit. de z_0	z_0	desvio padrão de z_0 ($\times 10^{-2}$)
Área 1	114800	14219	3.30	-	1.39
Área 2	10509	4227	3.48	4.0	2.17
Área 3	6150	1321	3.76	3.0	1.16
Área 4	4380	1841	3.43	3.0	0.04
Área 5	1250	169	1.62	1.0	0.83
Área 6	5400	554	1.31	1.0	1.80
Área 7	1050	291	1.63	2.5	6.67

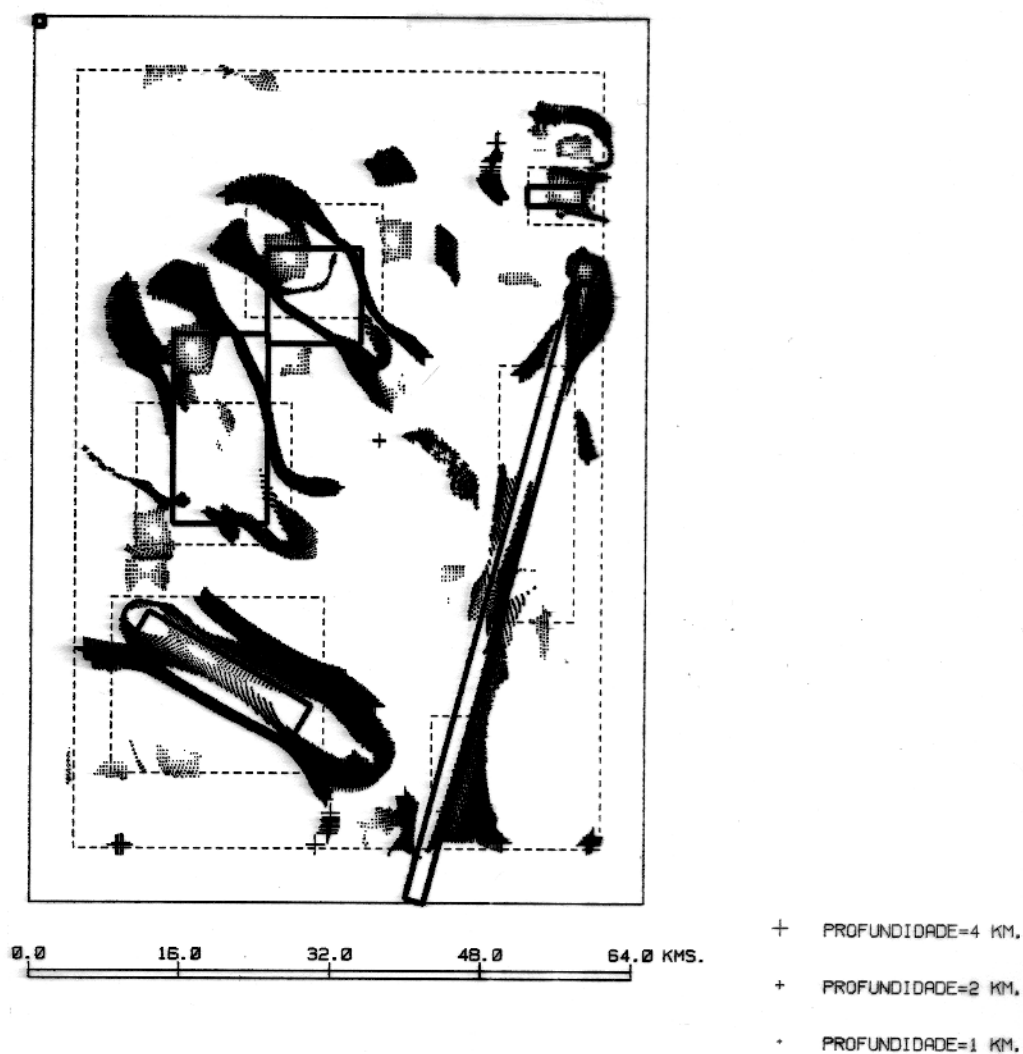
Figura 32: Estimativas de $\bar{r}_0$, para o modelo da Figura 27, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_0} = 2,5$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km de largura (5 x 5 observações).



- + PROFUNDIDADE=4 KM.
- + PROFUNDIDADE=2 KM.
- + PROFUNDIDADE=1 KM.

	Nº de estimativas	Estimativas com $0.0 < \hat{N} < 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área 1	114800	29177	3.15	-	0.70
Área 2	10509	4629	3.24	4.0	2.52
Área 3	6150	3684	3.53	3.0	2.40
Área 4	4380	2329	3.31	3.0	3.14
Área 5	1250	260	1.92	1.0	0.73
Área 6	5400	1395	1.39	1.0	2.30
Área 7	1050	706	1.64	2.5	3.28

Figura 33: Estimativas de $\bar{z}_0$, para o modelo da Figura 27, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_0} = 2,5$; $\lambda = 10^{-1}$ e janela de 1×1 km de largura (5×5 observações).



	Nº de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \hat{N} \leq 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área 1	114800	16948	1.70	-	1.31
Área 2	10509	3692	1.80	4.0	4.35
Área 3	6150	991	1.25	3.0	6.81
Área 4	4380	1318	1.96	3.0	0.47
Área 5	1250	570	0.84	1.0	0.36
Área 6	5400	540	0.65	1.0	1.10
Área 7	1050	260	0.75	2.5	8.01

Figura 34: Estimativas de $\bar{r}_0$, para o modelo da Figura 27, usando-se $\phi_N = 0,0$ e $\phi_{z_0} = 2,5$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1×1 km de largura (5×5 observações).



0.0 16.0 32.0 48.0 64.0 KMS.

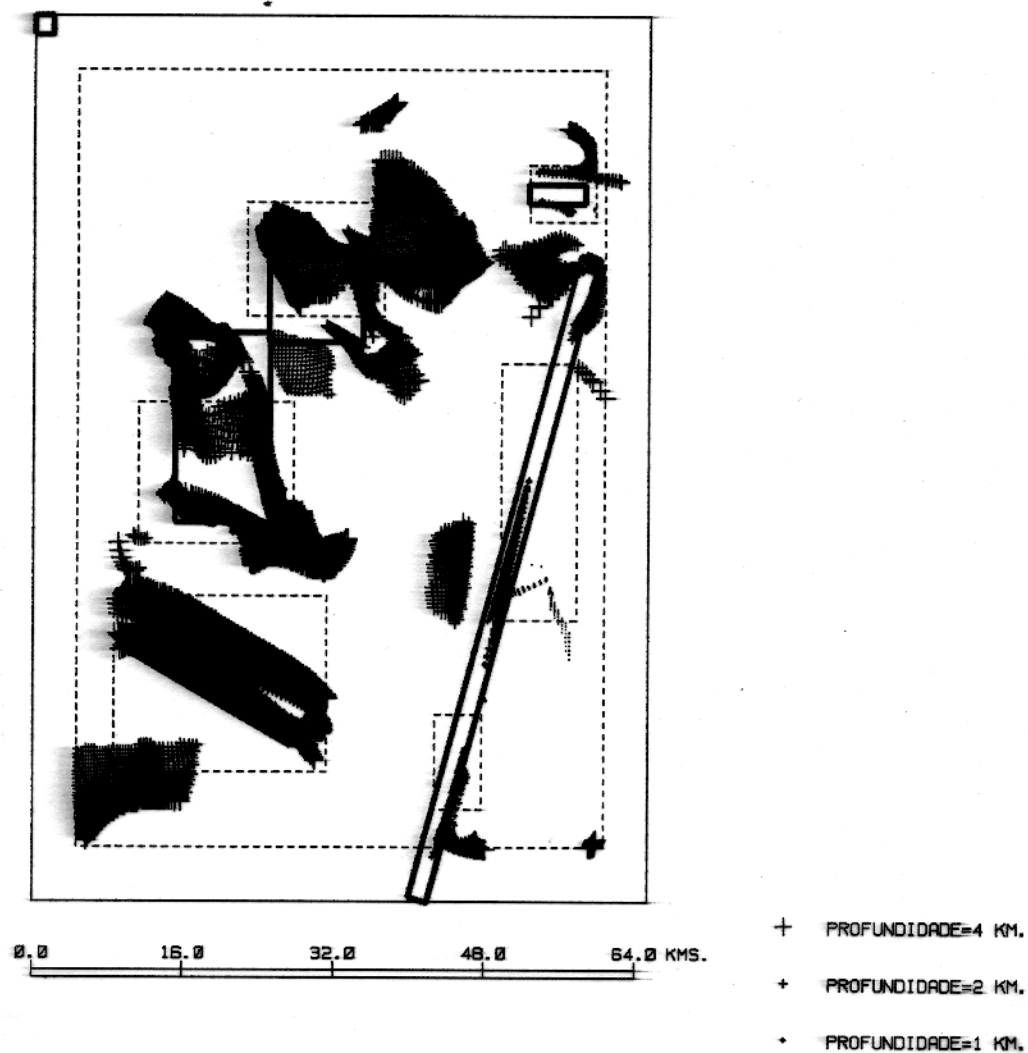
+ PROFUNDIDADE=4 KM.

+ PROFUNDIDADE=2 KM.

* PROFUNDIDADE=1 KM.

	N^2 de estimativas	Estimativas com $0.0 < \tilde{N} < 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área 1	114800	40756	0.94	.	1.26
Área 2	10509	5035	1.0	4.0	4.70
Área 3	6150	2263	0.98	3.0	5.16
Área 4	4380	2192	1.06	3.0	1.98
Área 5	1250	575	0.53	1.0	9.88
Área 6	5400	1316	0.46	1.0	1.14
Área 7	1050	433	0.68	2.5	4.82

Figura 35: Estimativas de $\bar{r}_0$, para o modelo da Figura 27, usando-se $\phi_N = 0,0$ e $\phi_{z_0} = 2,5$; $\lambda = 10^{-1}$ e janela de 1×1 km de largura (5×5 observações).



	N^2 de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \hat{N} \leq 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área 1	114800	12423	3.3	-	1.57
Área 2	10509	3981	3.52	4.0	2.23
Área 3	6150	1208	3.78	3.0	0.55
Área 4	4380	1537	3.42	3.0	1.12
Área 5	1250	127	1.52	1.0	9.04
Área 6	5400	286	1.23	1.0	7.50
Área 7	1050	262	1.55	2.0	7.54

Figura 36: Estimativas de $\bar{r}_0$, para o modelo da Figura 27, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_0} = 2,5$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 2 x 2 km de largura (10 x 10 observações).

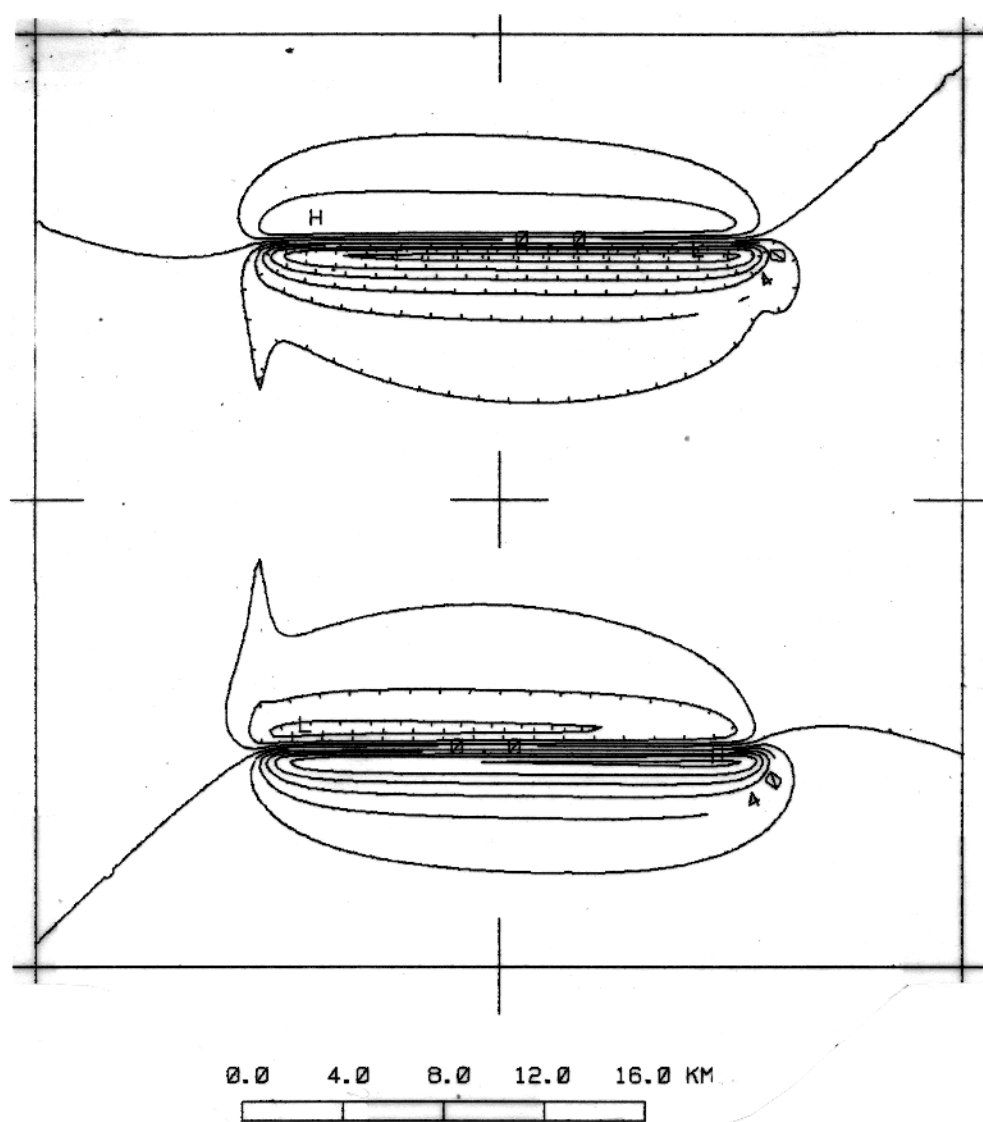


Figura 37: Anomalia magnética causada por uma soleira com 0,3 km de espessura, a uma profundidade de 0,5 km, vetor magnetização com inclinação de 15° e declinação de -5° e susceptibilidade magnética de 0,0080 UCGS. A área da soleira é de 20 x 20 km. O campo geomagnético é assumido como sendo de 25.000 gama, com inclinação de 15° e declinação de -5° (intervalo de contorno 10,0 gama).

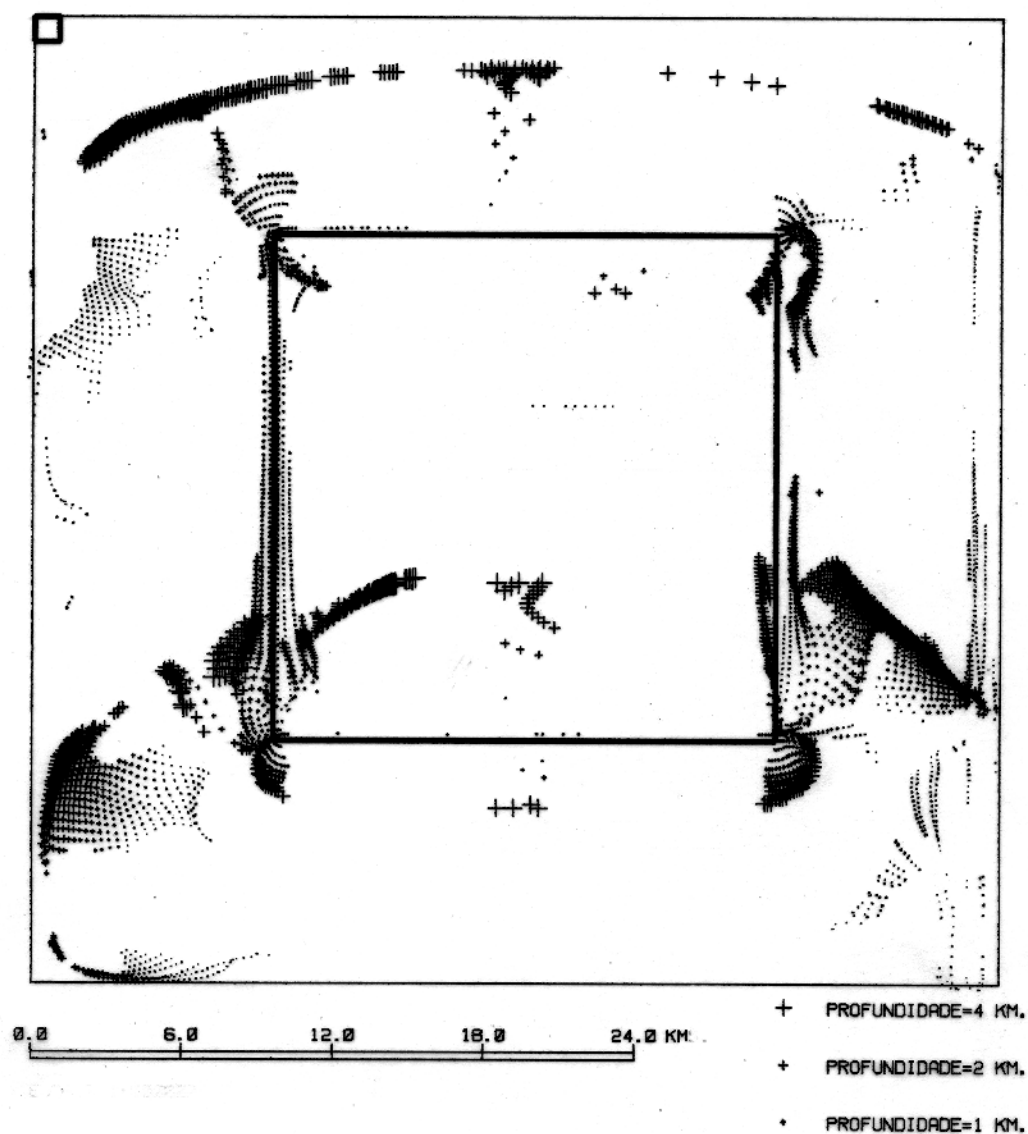


Figura 38: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia magnética da Figura 37, (soleira com 0,5 km de profundidade e 0,3 km de espessura), usando-se $\phi_N = 0,0$; $\phi_{z0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).

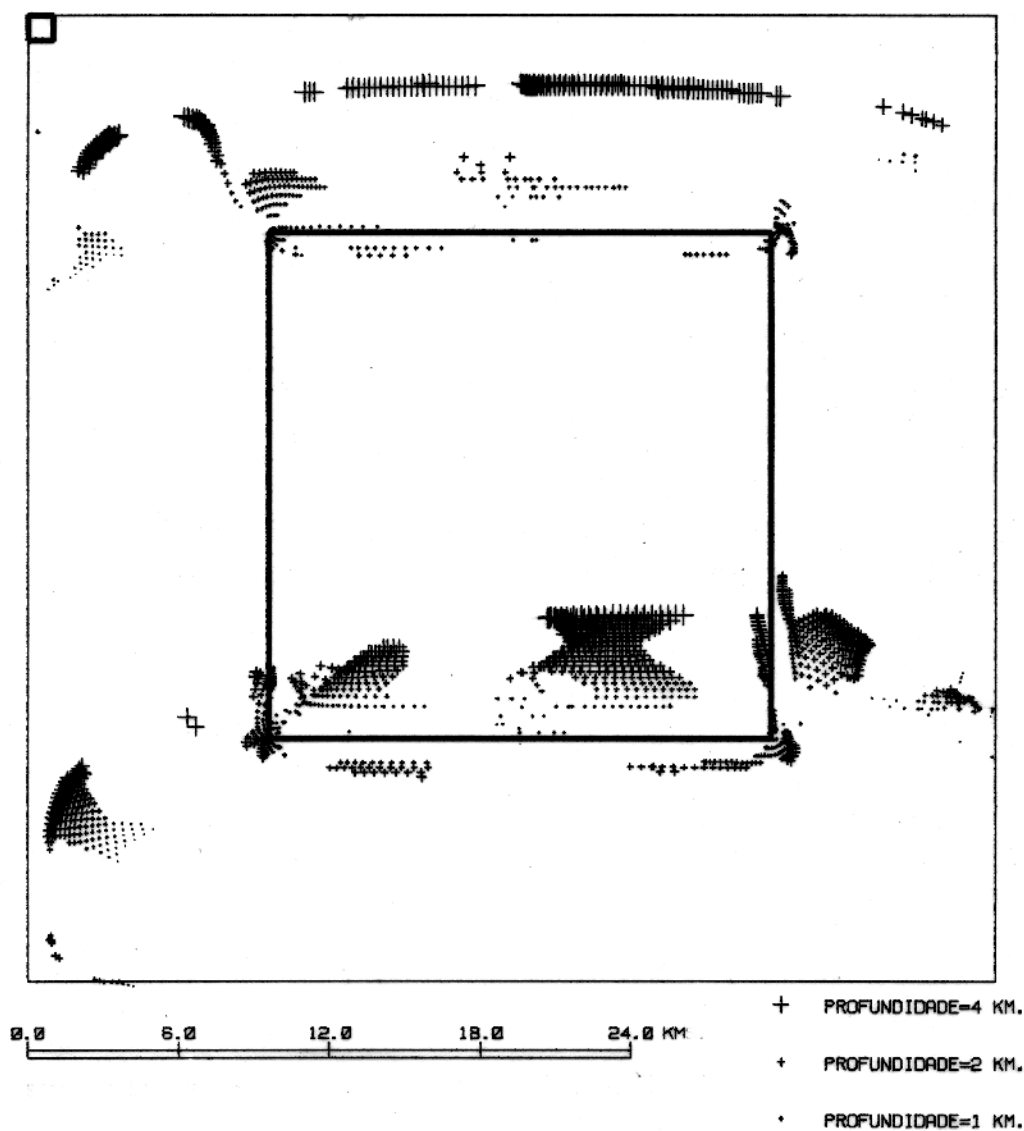


Figura 39: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia magnética da Figura 37, (soleira com 0,5 km de profundidade e 0,3 km de espessura), usando-se $\phi_N = 0,5$, $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).

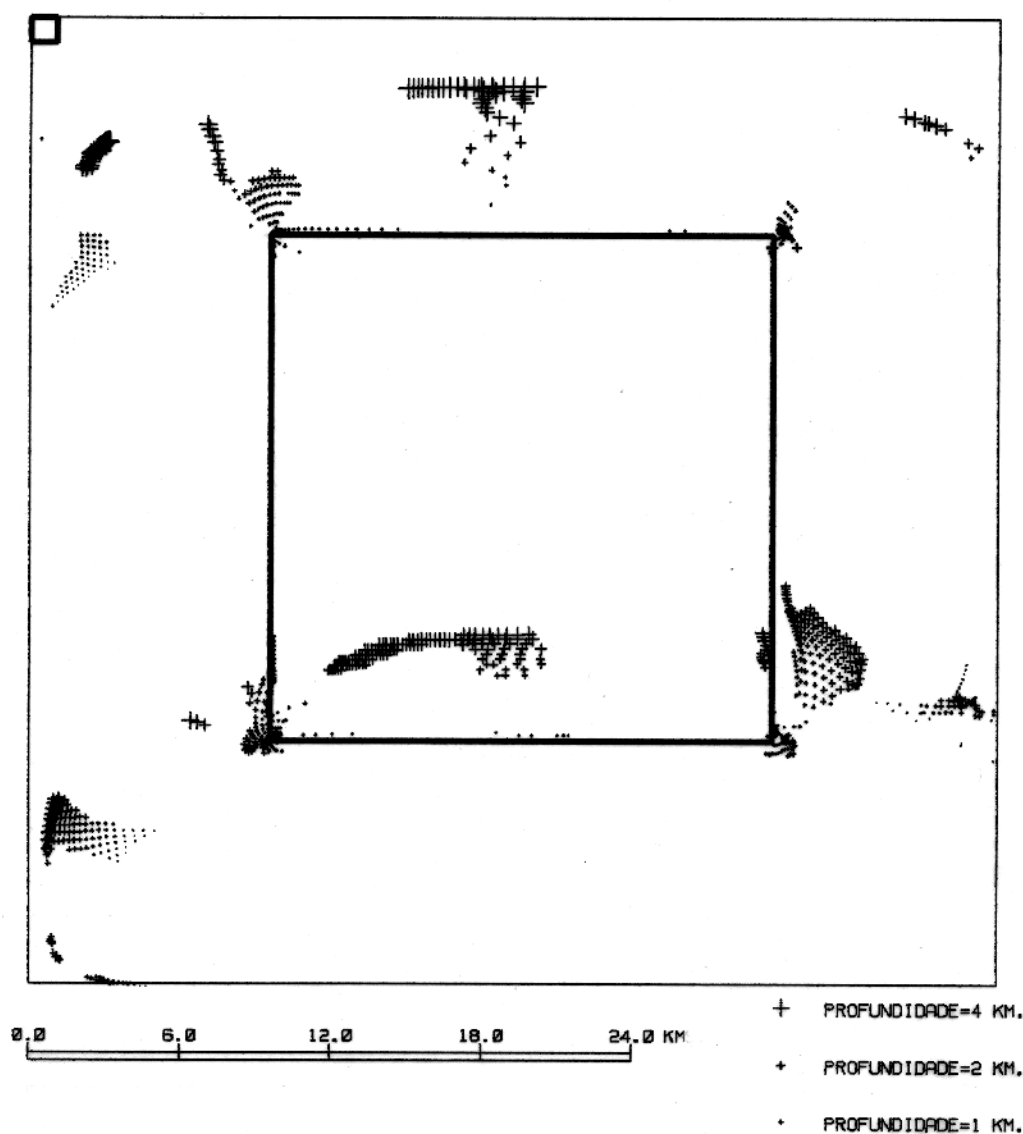


Figura 40: Estimativas de $\bar{\tau}_0$ para a anomalia magnética da Figura 37, (soleira com 0,5 km de profundidade e 0,3 km de espessura), usando-se $\phi_N = 0,7$, $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).

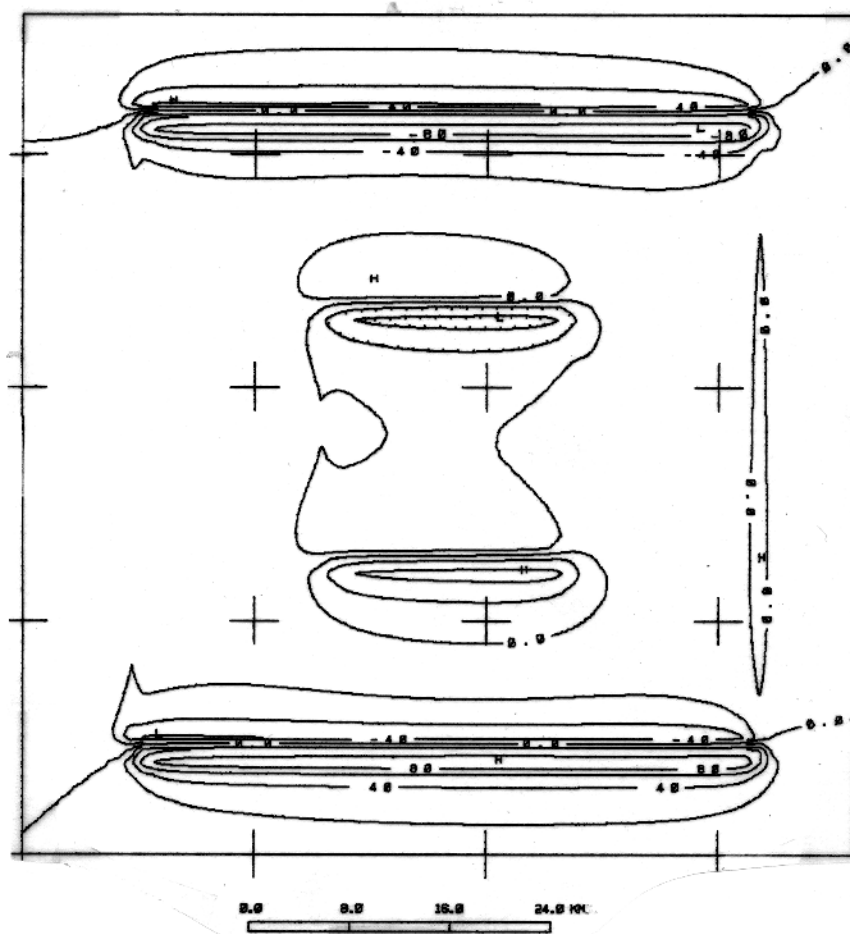


Figura 41: Anomalia magnética causada por duas soleiras sobrepostas, em profundidades de 0,5 km e 1.2 km respectivamente, ambas com 0,3 km de espessura, vetor magnetização com inclinação de 15° e declinação de -5° e susceptibilidade magnética de 0,0080 UCGS. A superior possui 50 x 50 km de área e a inferior 20 x 20 km. O campo geomagnético é assumido como sendo de 25.000 gama, com inclinação de 15° e declinação de -5° (intervalo de contorno 10,0 gama).

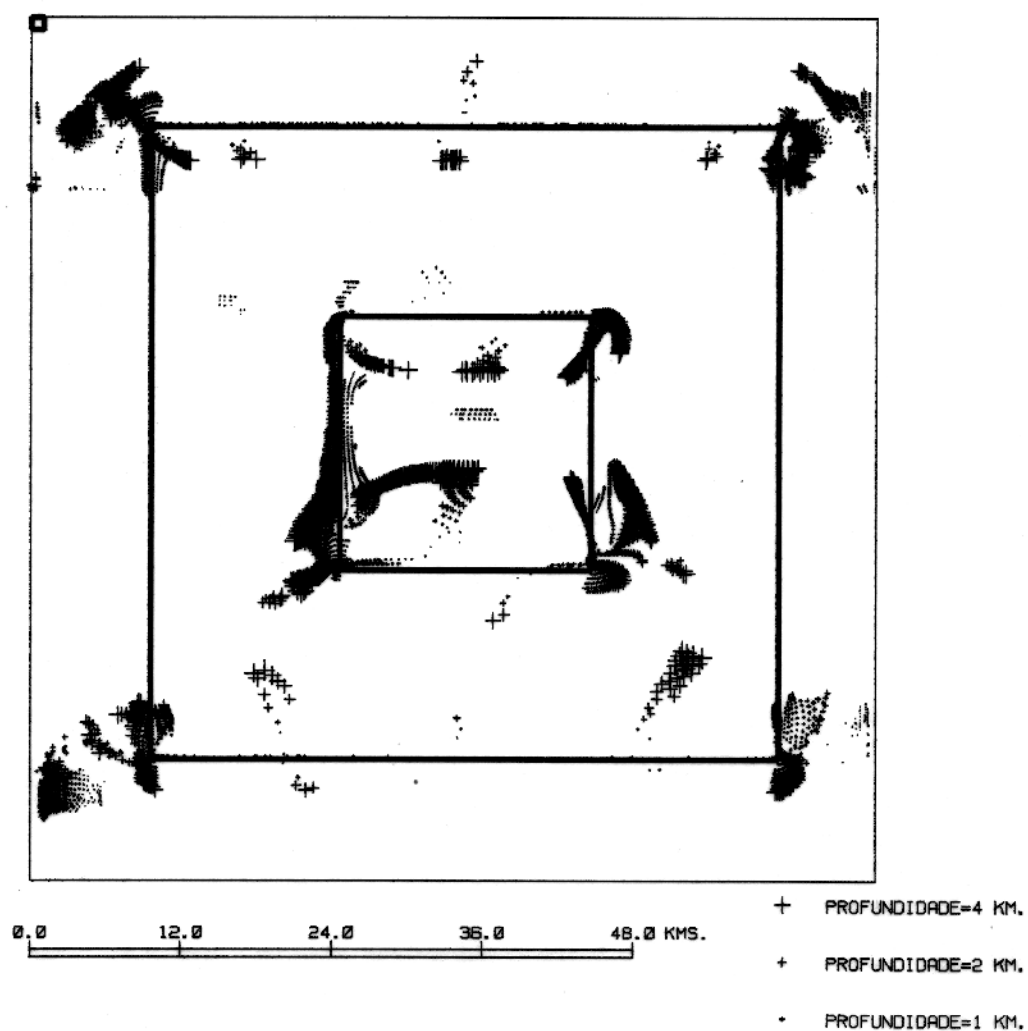


Figura 42: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia magnética da Figura 41, (duas soleiras sobrepostas), usando-se $\phi_N = 0,0$; $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km (5 x 5 observações).

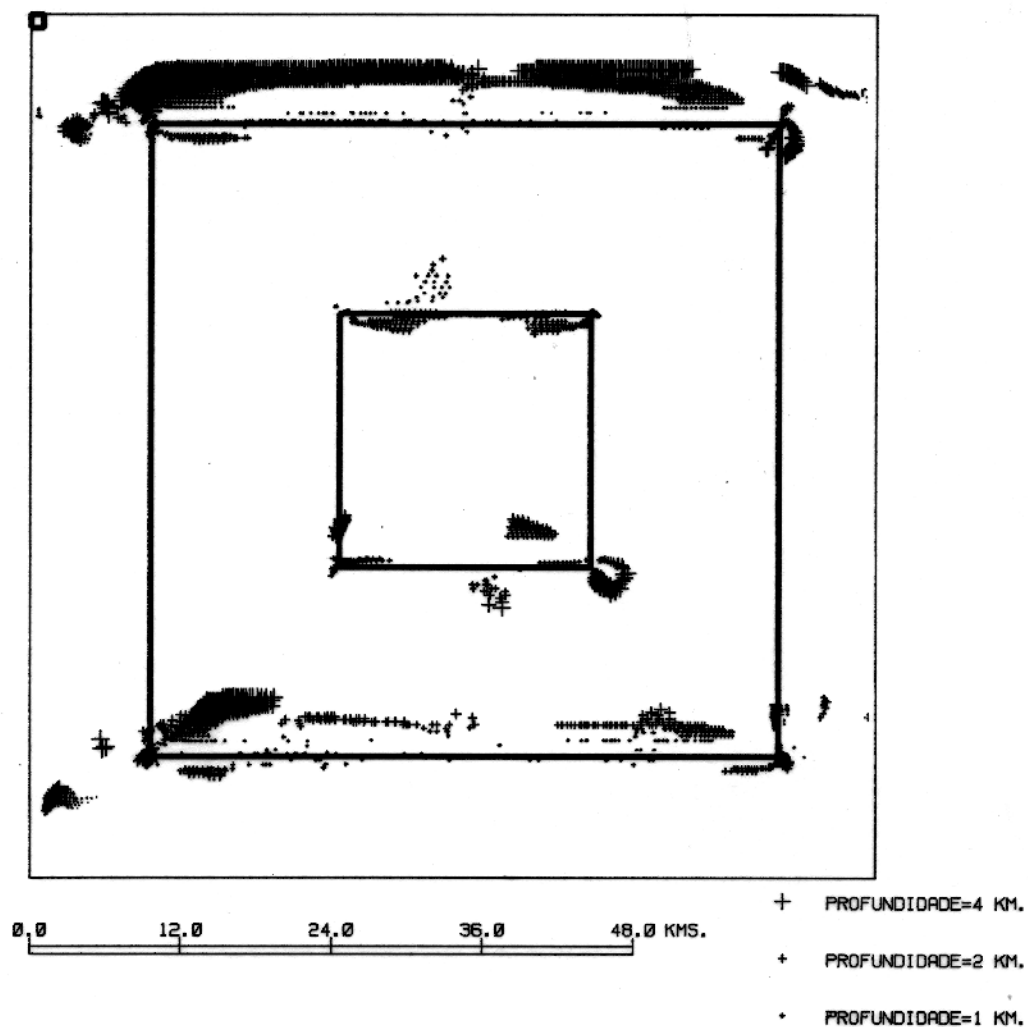


Figura 43: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia magnética da Figura 41, (duas soleiras sobrepostas), usando-se $\phi_N = 0,5$; $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1×1 km (5×5 observações).

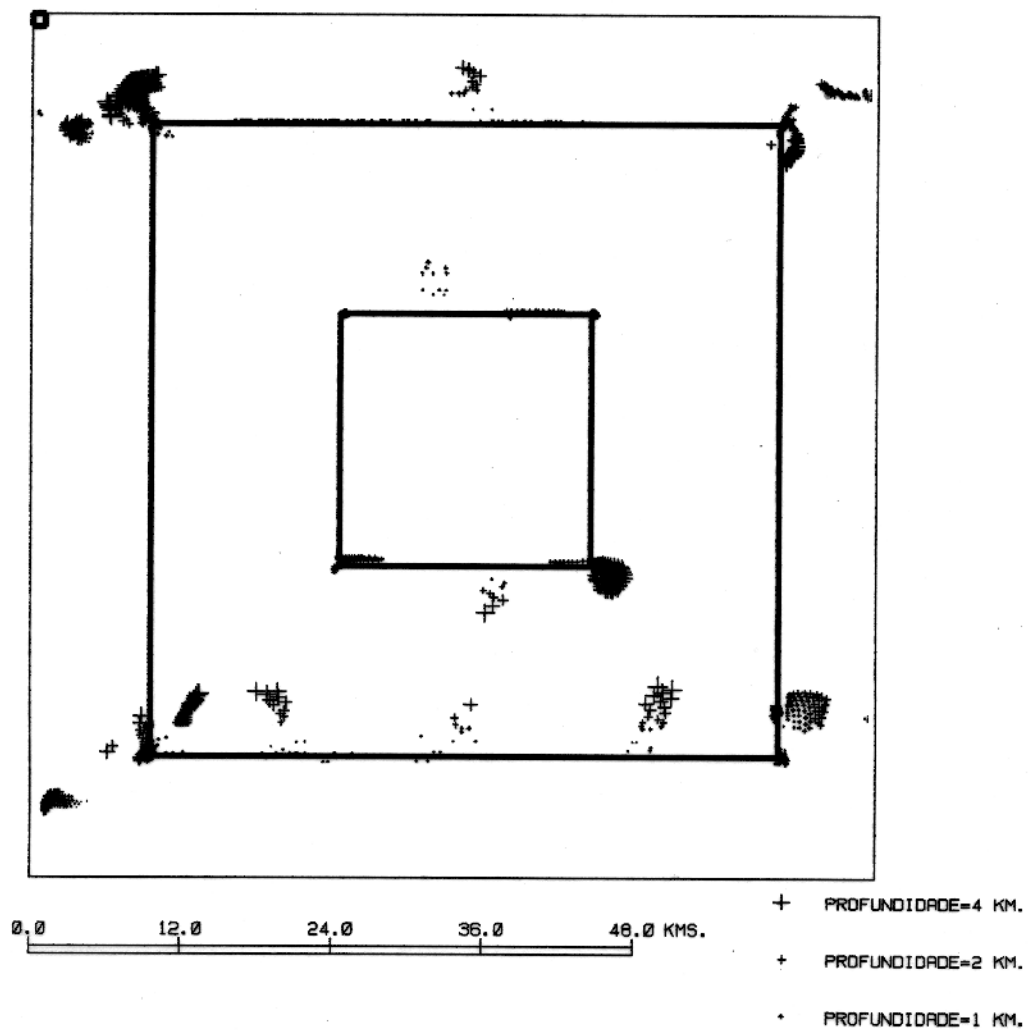


Figura 44: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia magnética da Figura 41, (duas soleiras sobrepostas), usando-se $\phi_N = 0,7$; $\phi_{z_0} = 3,0$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1×1 km (5×5 observações).

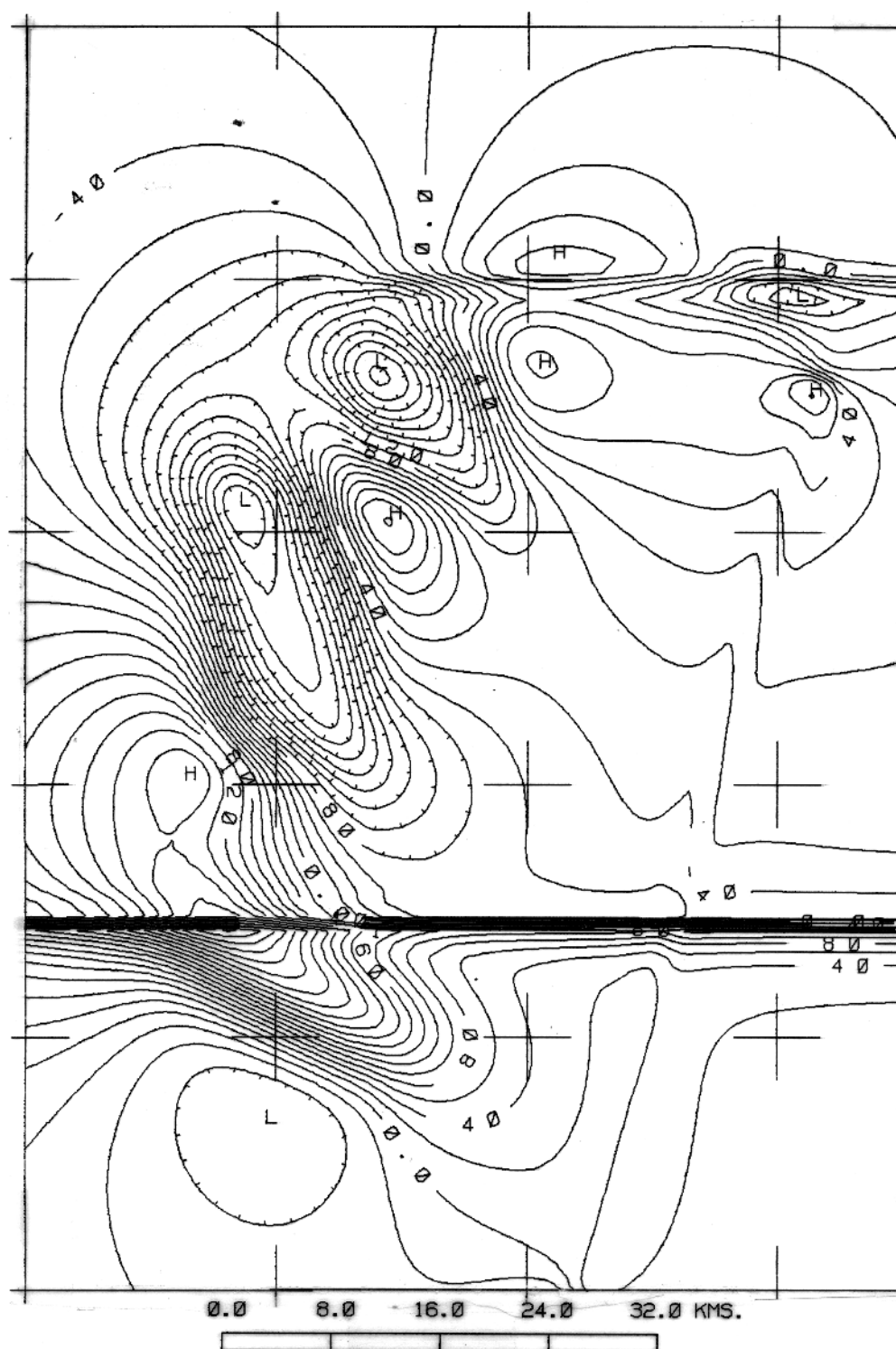
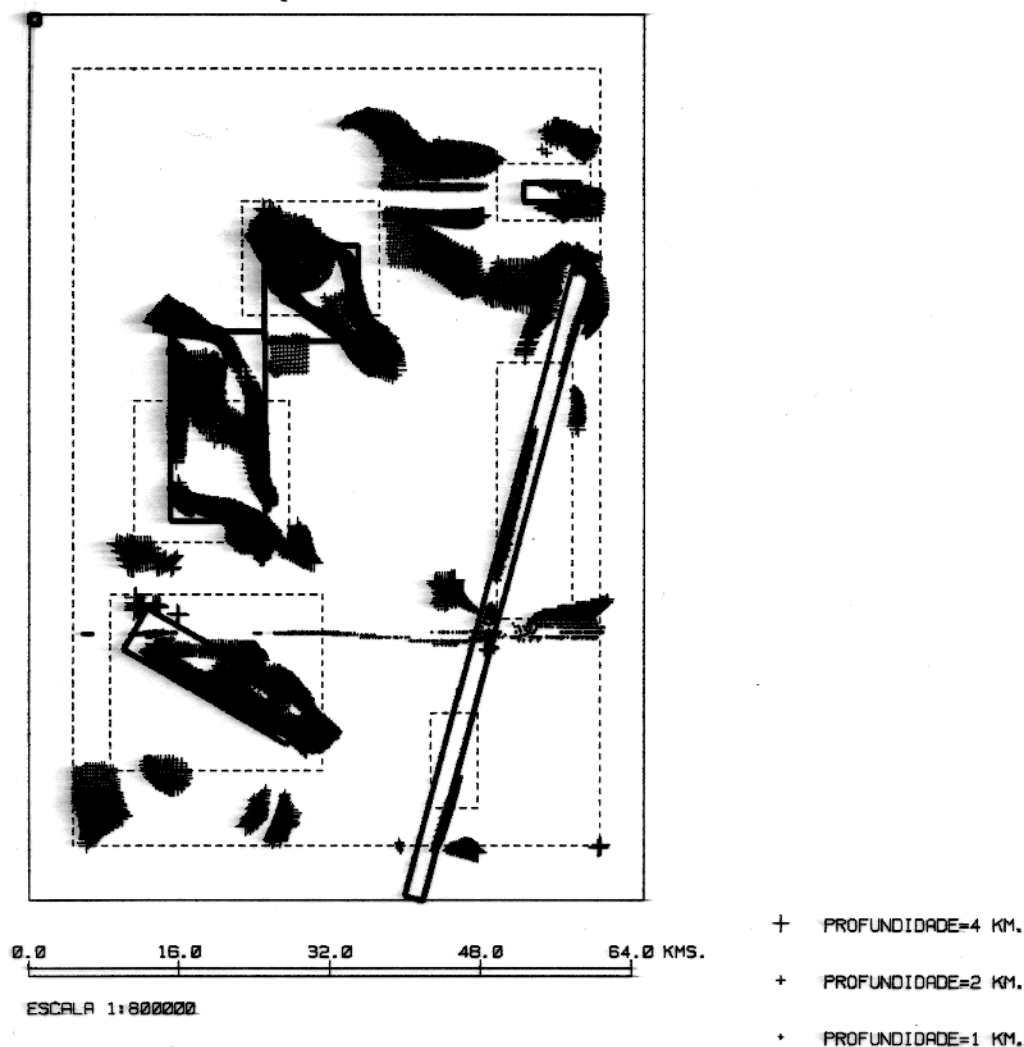


Figura 45: Anomalia magnética causada pelo prisma vertical semi-infinito, com inclinação e declinação do vetor magnetização igual a 45° e 30° , respectivamente, susceptibilidade magnética igual a 0,0055 UCGS, sobreposto por uma soleira com 300 m de espessura a uma profundidade de 500 m, vetor magnetização com inclinação de 15° e declinação de -5° e susceptibilidade magnética de 0,0080 UCGS. A extensão areal da soleira é de 50 x 50 km. O campo geomagnético é assumido como sendo de 25.000 gama, com inclinação de 15° e declinação de -5° (intervalo de contorno 10,0 gama).



	total de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \hat{N} \leq 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Area 1	114800	14092	3.07	-	0.89
Area 2	10509	2514	3.30	4.0	5.60
Area 3	6150	1468	3.83	3.0	0.35
Area 4	4380	1871	3.51	3.0	0.25
Area 5	1250	78	1.71	1.0	0.52
Area 6	5400	525	1.34	1.0	2.52
Area 7	1500	263	1.61	2.5	2.66

Figura 46: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia magnética da Figura 45 (prisma vertical semi-infinito sobreposto por uma soleira), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_0} = 2,5$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km de largura (5 x 5 observações).

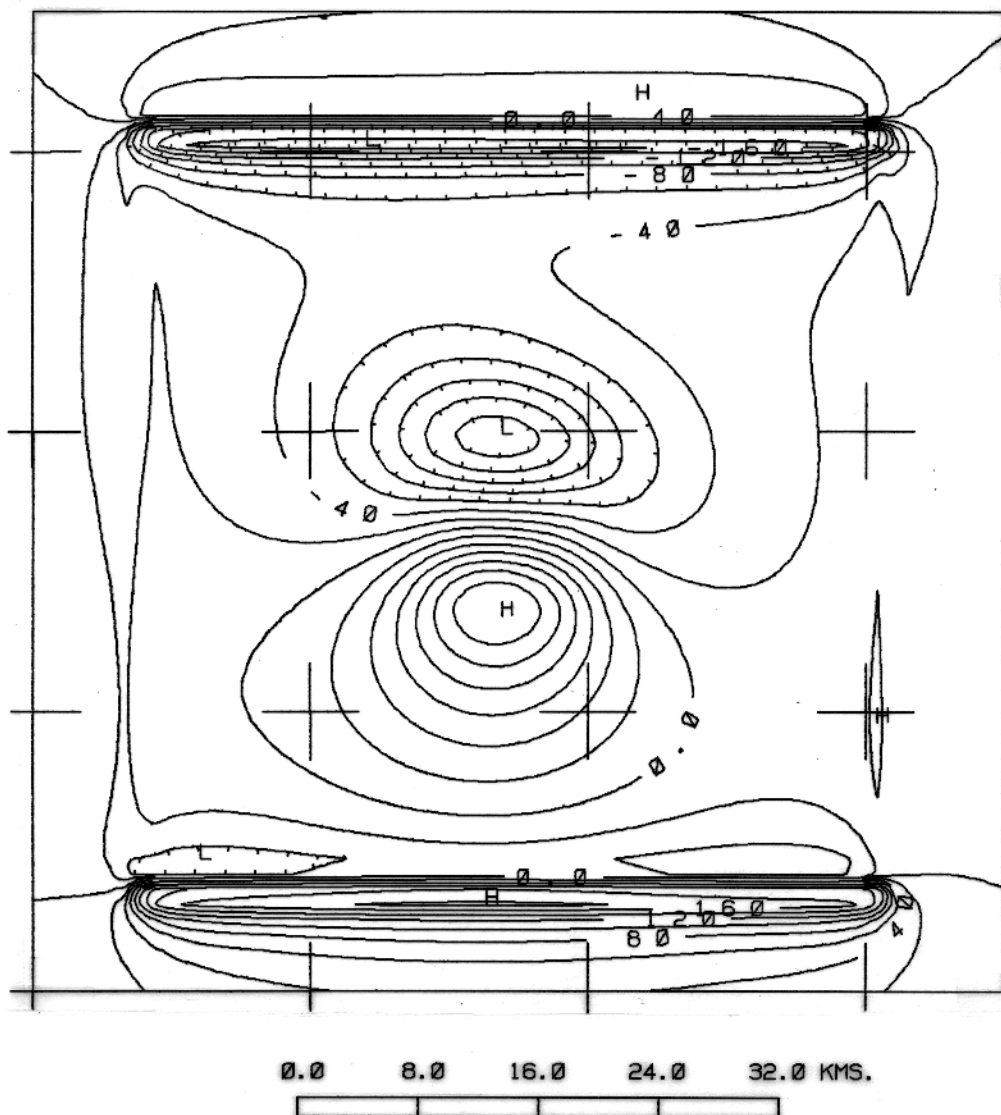


Figura 47: Anomalia magnética causada pelo prisma vertical semi-infinito, com inclinação e declinação do vetor magnetização igual a 45° e 30° , respectivamente, susceptibilidade magnética igual a 0,0055 UCGS, sobreposto por duas soleiras com 300 m de espessura com profundidades de 500 m e 1200 m, respectivamente, vetor magnetização com inclinação de 15° , declinação de -5° e susceptibilidade magnética de 0,0080 UCGS. A extensão areal das soleiras é de 50 x 50 km. O campo geomagnético é assumido como sendo de 25.000 gama, com inclinação de 15° e declinação de -5° (intervalo de contorno 10,0 gama).

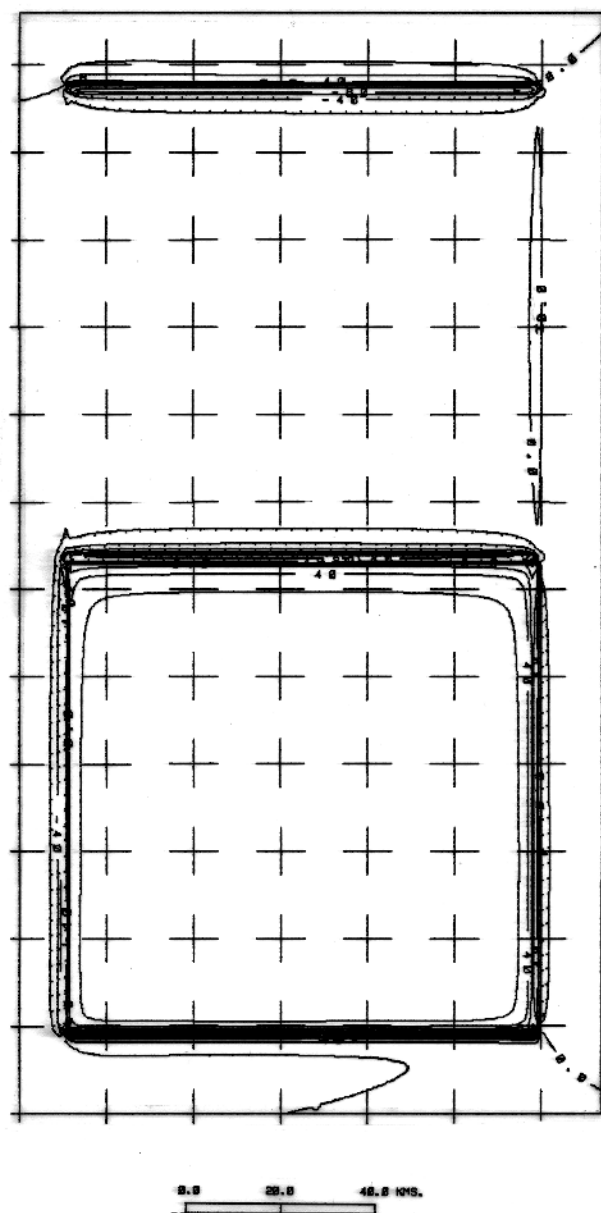


Figura 48: Estimativas de $\bar{\tau}_0$ para a anomalia magnetica da Figura 47 (prisma vertical semi-infinito sobreposto por duas soleira), numa área de 30 x 30 km com o prisma ao centro, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_0} = 2,5$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1 x 1 km de largura (5 x 5 observações).

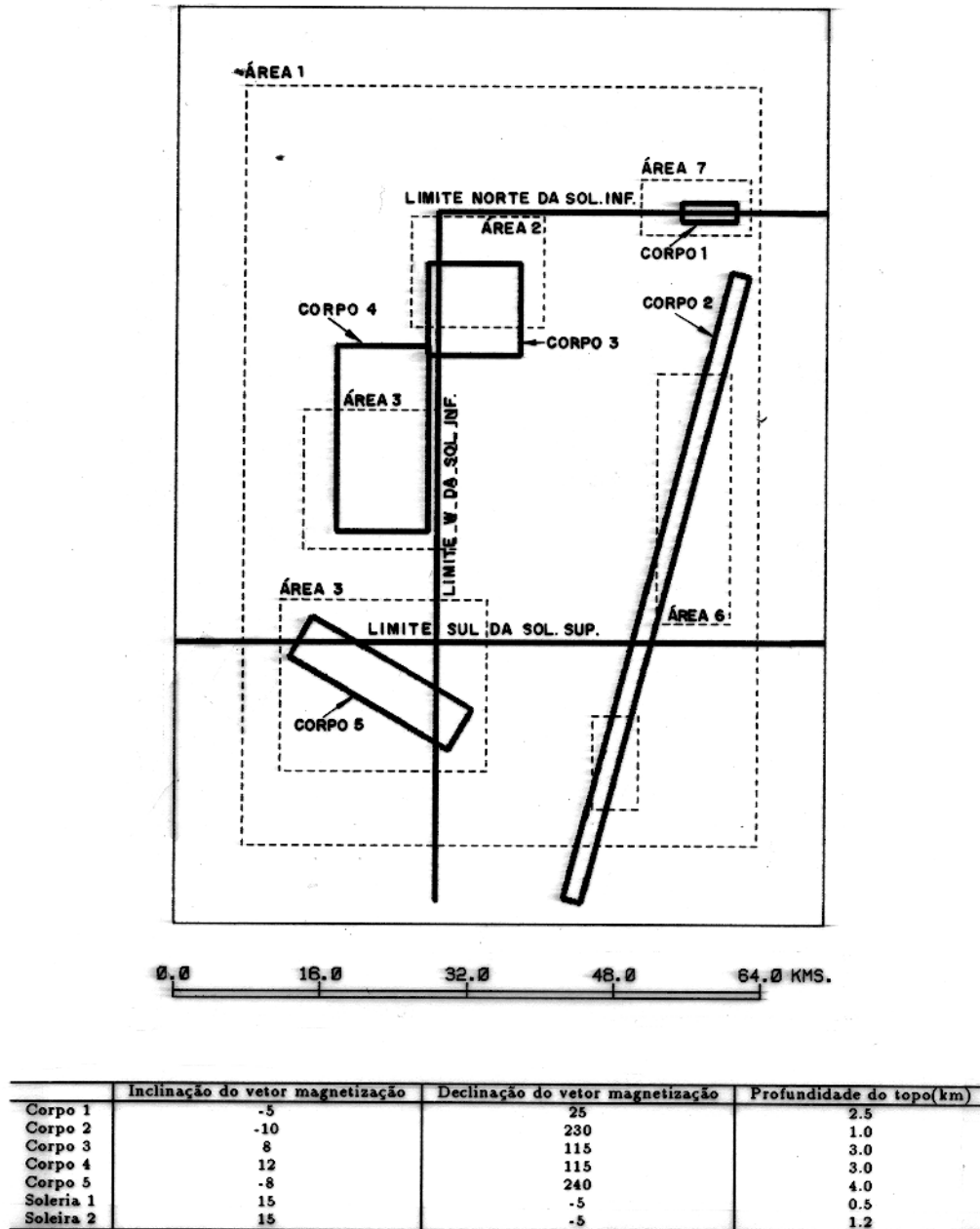


Figura 49: Modelo sintético constituído por prismas verticais semi-infinitos, sobrepostos por uma soleira com 300 m de espessura. A intensidade do campo geomagnético da terra considerado é de 25.000 gama, com inclinação de 15° e declinação de -5° . Todos os prismas possuem susceptibilidade magnética constante e igual a 0,0055 UCGS e a soleira possui susceptibilidade magnética de 0,0080 UCGS. Os demais parâmetros de cada corpo estão na tabela acima. Os quadriláteros desenhados com linha grossa significam os corpos prismáticos e os com linha tracejada significam as áreas, as quais em cada teste com esse modelo, tiveram todas as estimativas de $\bar{r}_0$ encontradas em seu interior analisadas (quantidade de estimativas totais, quantidade de estimativas com $\hat{N}$ entre 0,0 e 1,0, média aritmética e desvio padrão das estimativas de profundidade com $\hat{N}$ entre 0,0 e 1,0).

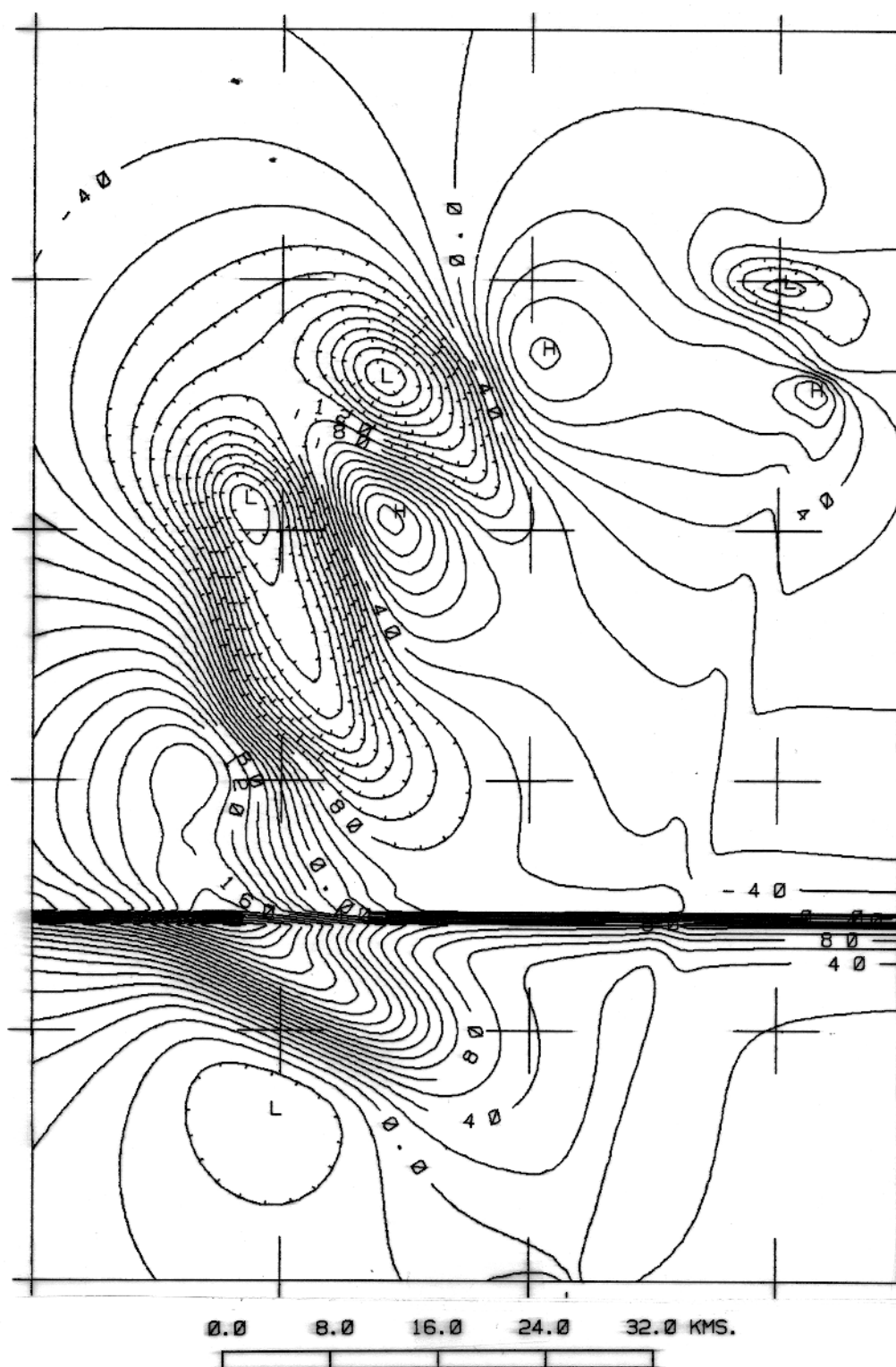
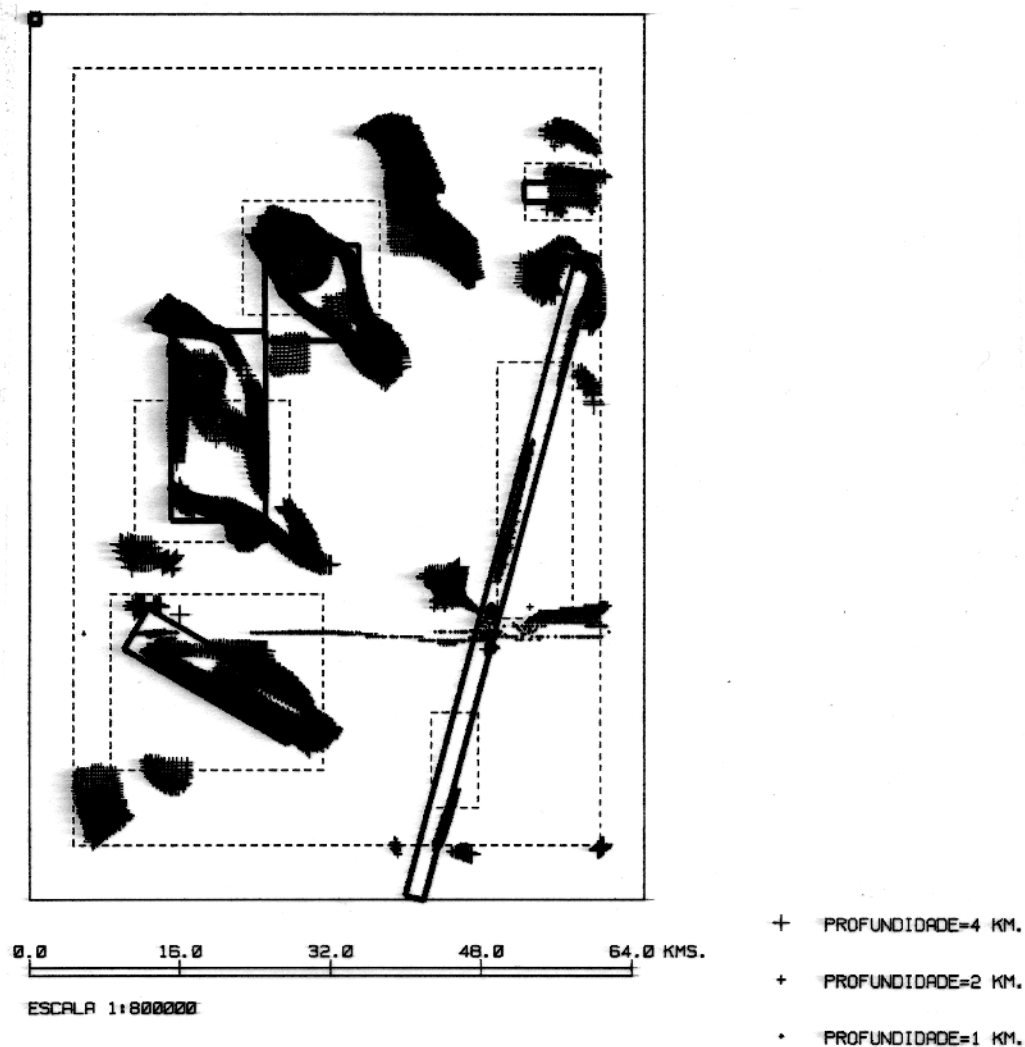


Figura 50: Campo magnético causado pelo modelo da Figura 49 (intervalo de contorno 10,0 gama).



	total de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \bar{N} \leq 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Area 1	114800	12910	3.18	-	0.16
Area 2	10509	2539	3.33	4.0	5.62
Area 3	6150	1404	3.80	3.0	0.40
Area 4	4380	1860	3.47	3.0	0.67
Area 5	1250	45	1.77	1.0	7.74
Area 6	5400	501	1.27	1.0	1.27
Area 7	1050	304	1.60	2.5	4.61

Figura 51: Estimativas de $\bar{r}_0$, para o modelo da Figura 49, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_0} = 2,5$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1×1 km de largura (5×5 observações).

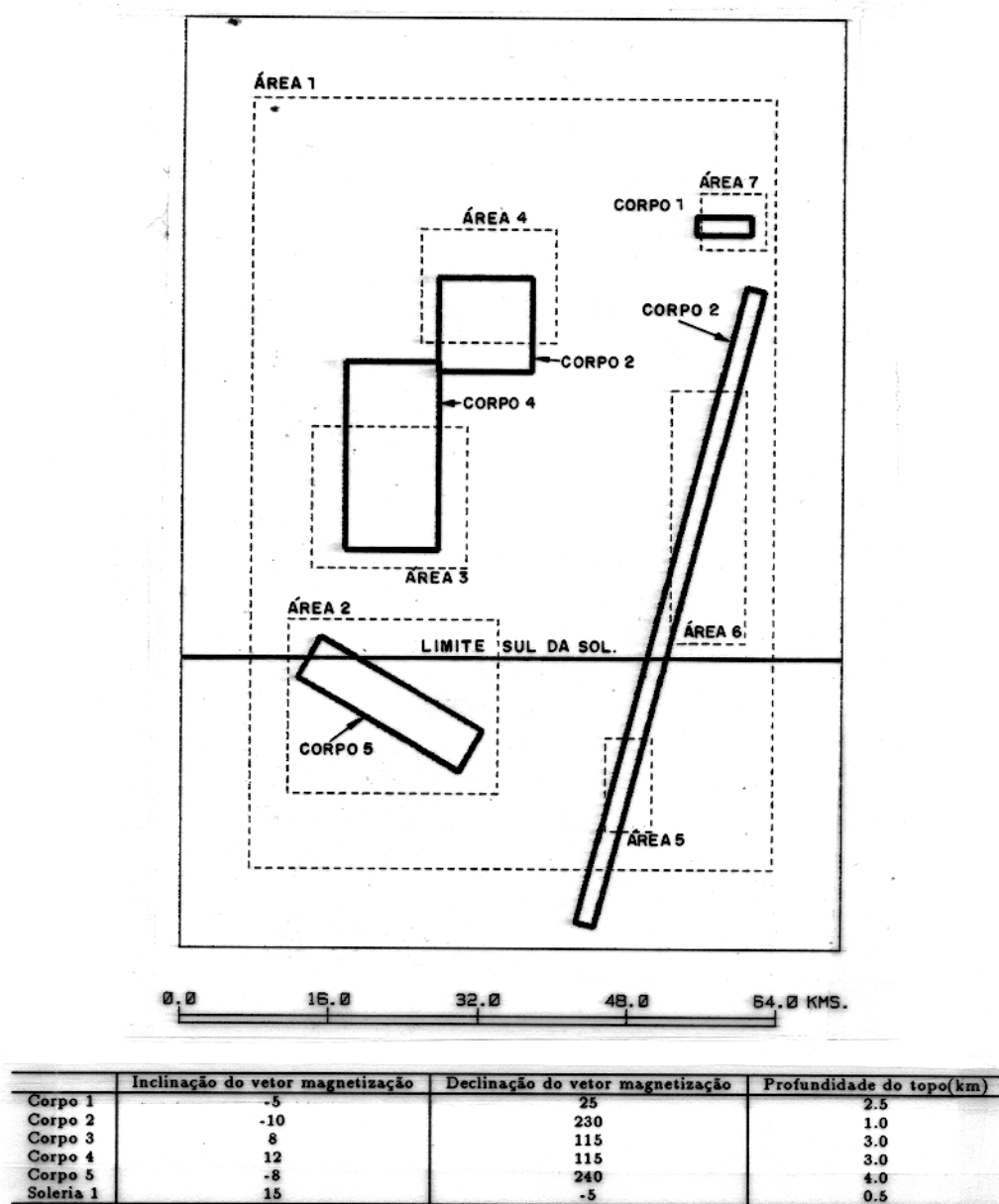


Figura 52: Modelo sintético constituído por prismas verticais semi-infinitos, sobrepostos por duas soleiras com 300m de espessura. A intensidade do campo geomagnético da terra considerado é de 25.000 gamas, com inclinação de 15° e declinação de -5° . Todos os prismas possuem susceptibilidade magnética constante e igual a 0,0055 UCGS e as soleiras possuem susceptibilidade magnética de 0,0080 UCGS. Os demais parâmetros de cada corpo estão na tabela acima. Os quadriláteros desenhados com linha grossa significam os corpos prismáticos e os com linha tracejada significam as áreas, as quais em cada teste com esse modelo, tiveram todas as estimativas de $\bar{\tau}_0$ encontradas em seu interior analisadas (quantidade de estimativas totais, quantidade de estimativas com $\hat{N}$ entre 0,0 e 1,0, média aritmética e desvio padrão das estimativas de profundidade com $\hat{N}$ entre 0,0 e 1,0).

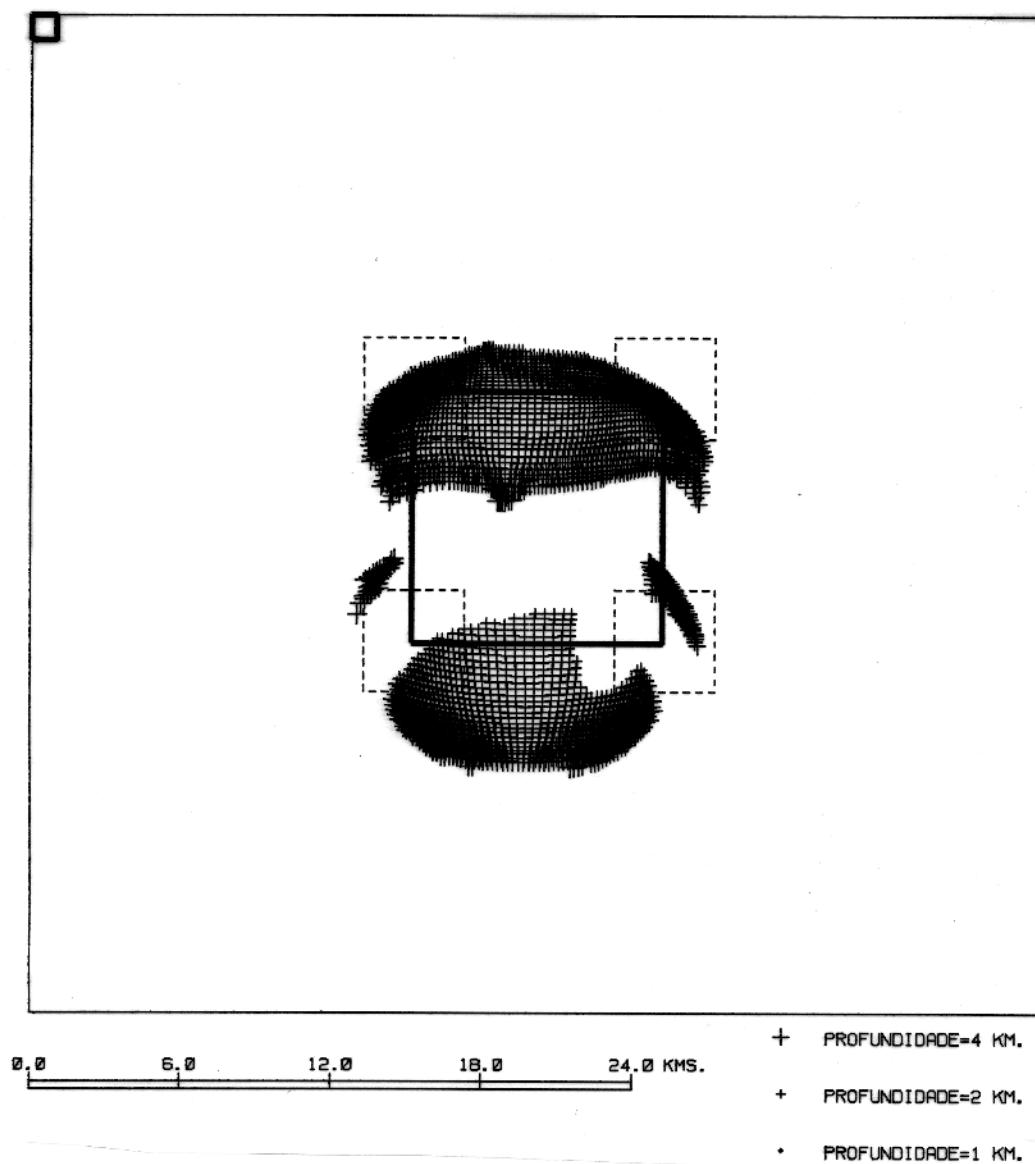
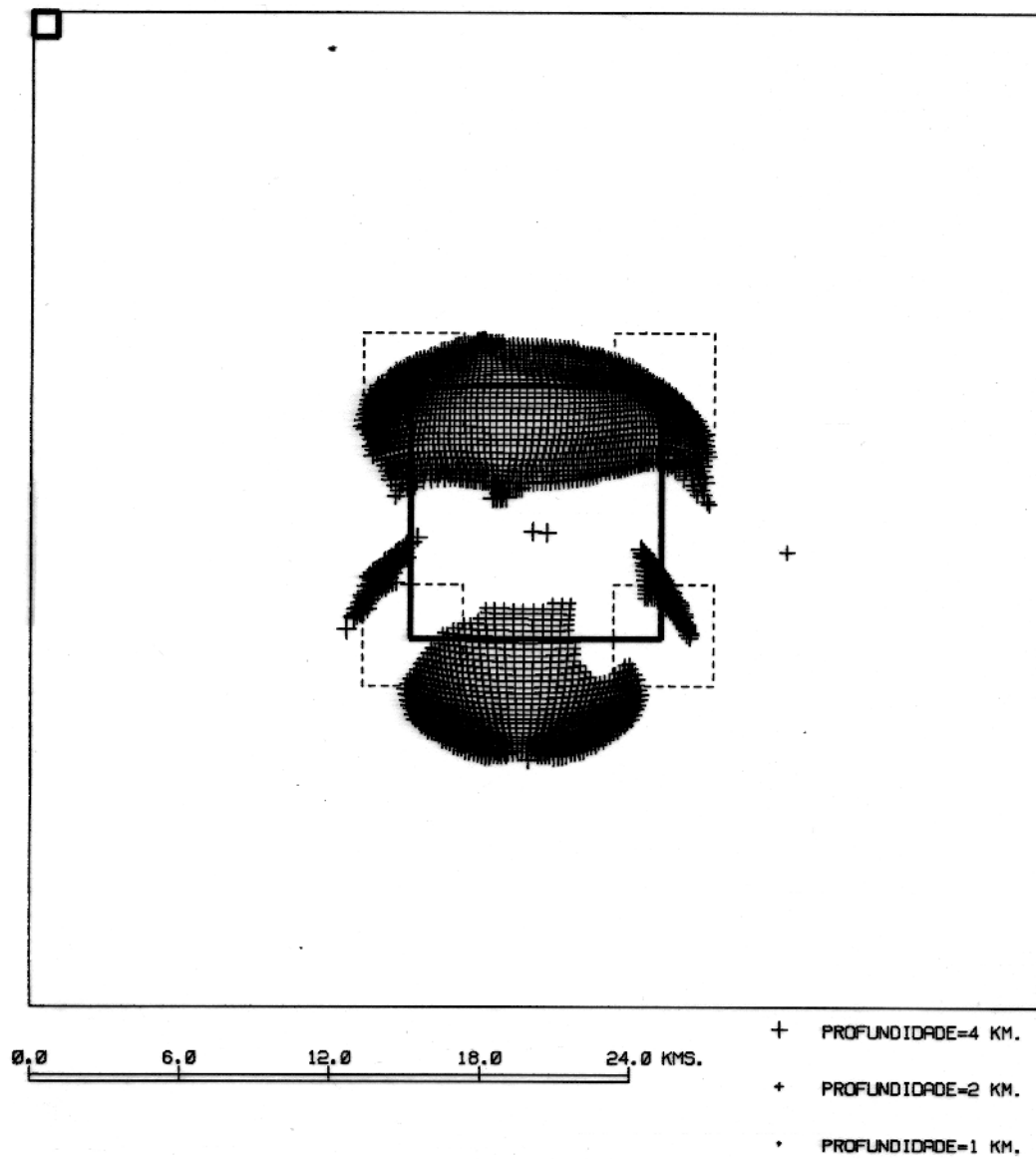


Figura 53: Campo magnético gerado pelo modelo da Figura 52 (intervalo de contorno: 10,0 gama).



	N^2 de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \hat{N} \leq 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Área total	22500	2965	3.69	4.0	0.10
Vértice SW	400	67	4.35	4.0	0.45
Vértice NW	400	370	3.65	4.0	0.31
Vértice NE	400	315	3.88	4.0	3.97
Vértice SE	400	136	4.24	4.0	1.40

Figura 54: Estimativas de $\bar{\tau}_0$, para o modelo da Figura 52, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_0} = 2,5$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1×1 km de largura (5×5 observações).

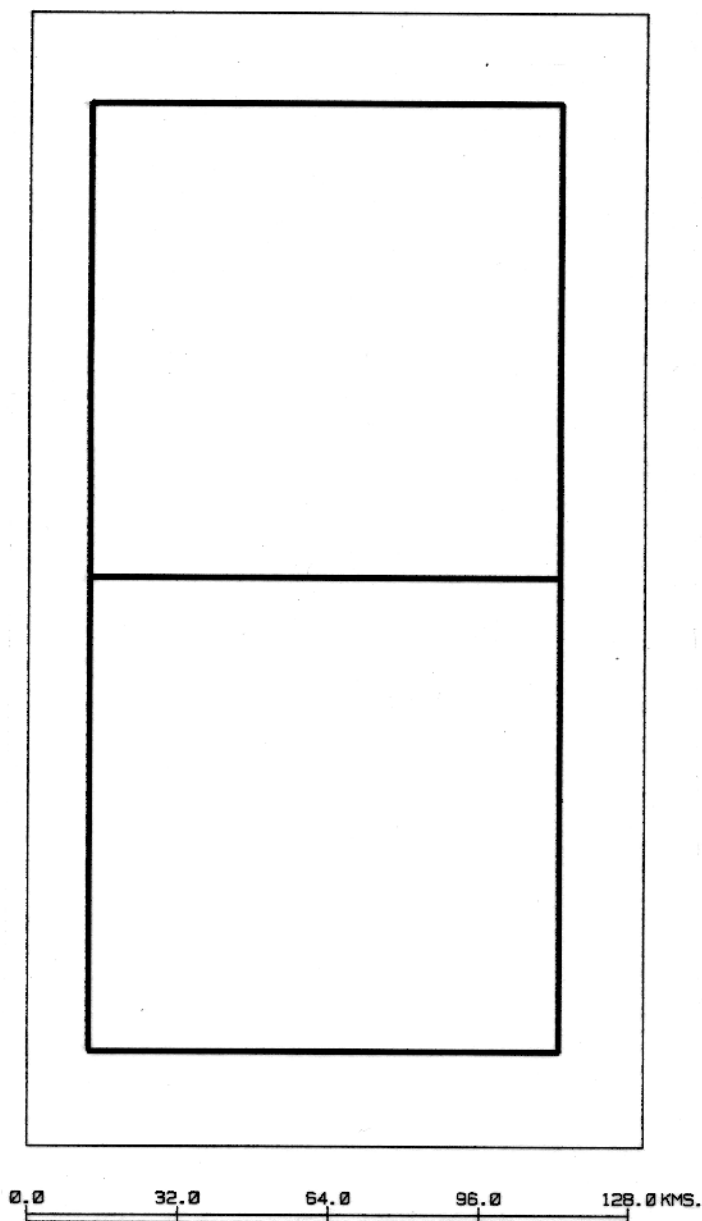


Figura 55: Posição da soleira com variação lateral da direção do vetor magnetização. Na metade da soleira voltada para o sul, a inclinação do vetor magnetização é de 50° e a declinação é de -8° e na metade da soleira voltada para o norte, a inclinação é de 15° e a declinação de -8° . O campo geomagnético considerado possui inclinação de 15° , declinação de -5° e com intensidade de 25.000 gamas.

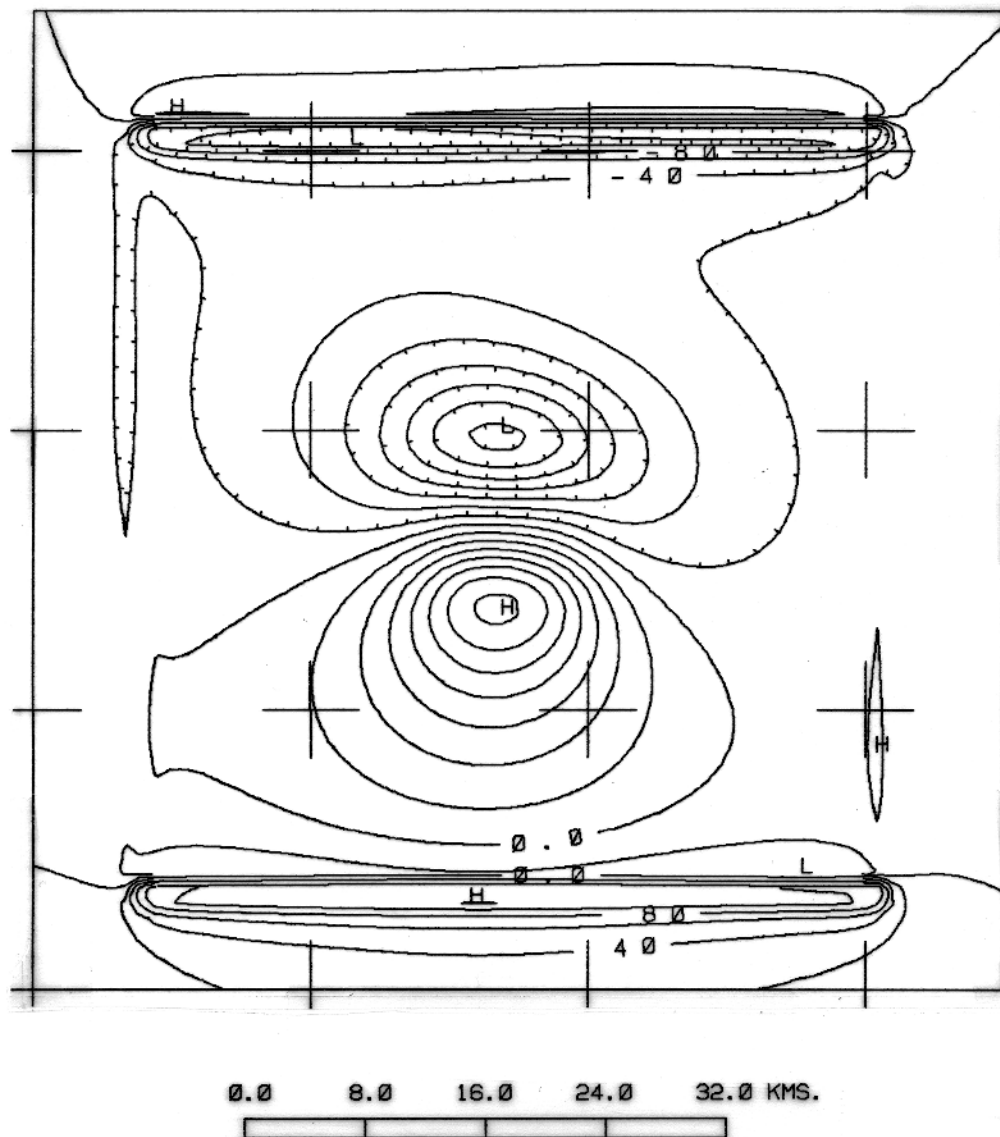
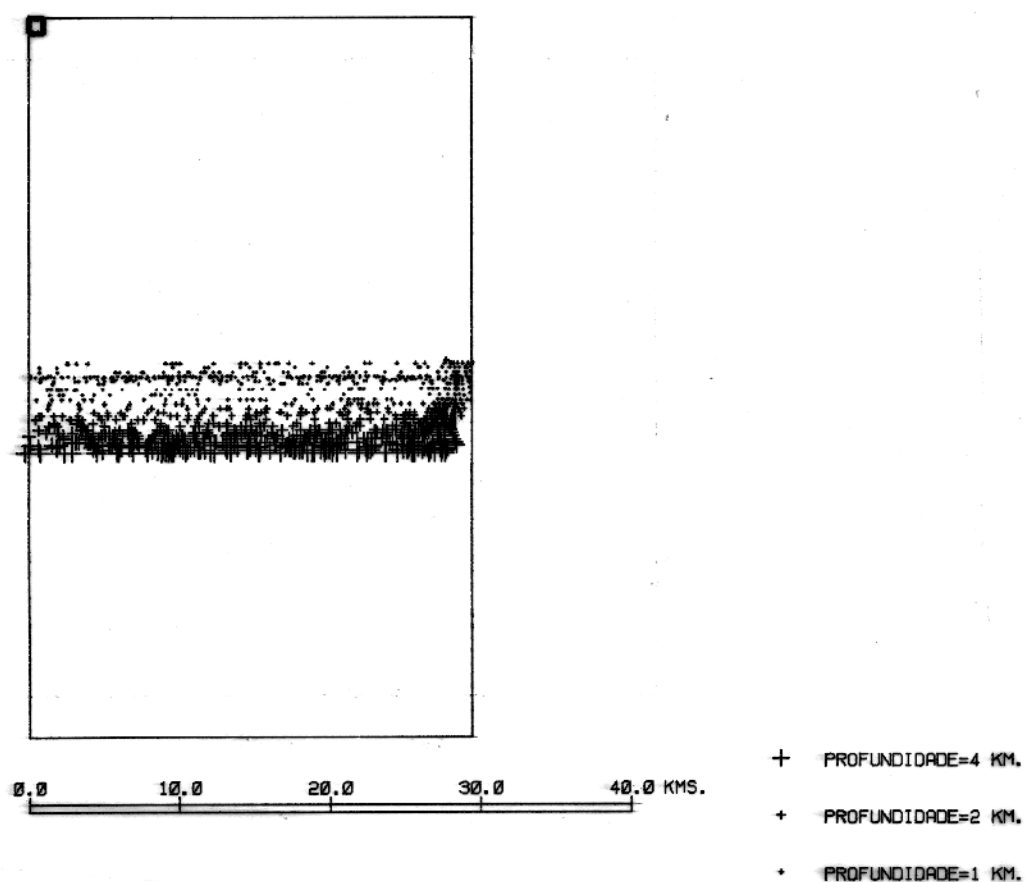


Figura 56: Campo magnético para o modelo da Figura 55 (intervalo de contorno 10,0 gama).



	total de estimativas	Estimativas com $0.0 \leq \hat{N} \leq 1.0$	média arit. de $\hat{z}_0$	z_0	desvio padrão de $\hat{z}_0$ ($\times 10^{-2}$)
Area total	30030	1182	1.76	0.5	3.75

Figura 57: Estimativas de $\bar{\tau}_0$ para a anomalia da Figura 56 (soleira com mudança lateral na inclinação do vetor magnetização), nas proximidades do limite em que ocorre a variação da inclinação do vetor magnetização, usando-se $\phi_N = 0,7$; $\phi_{z_0} = 2,5$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1×1 km (5×5 observações).

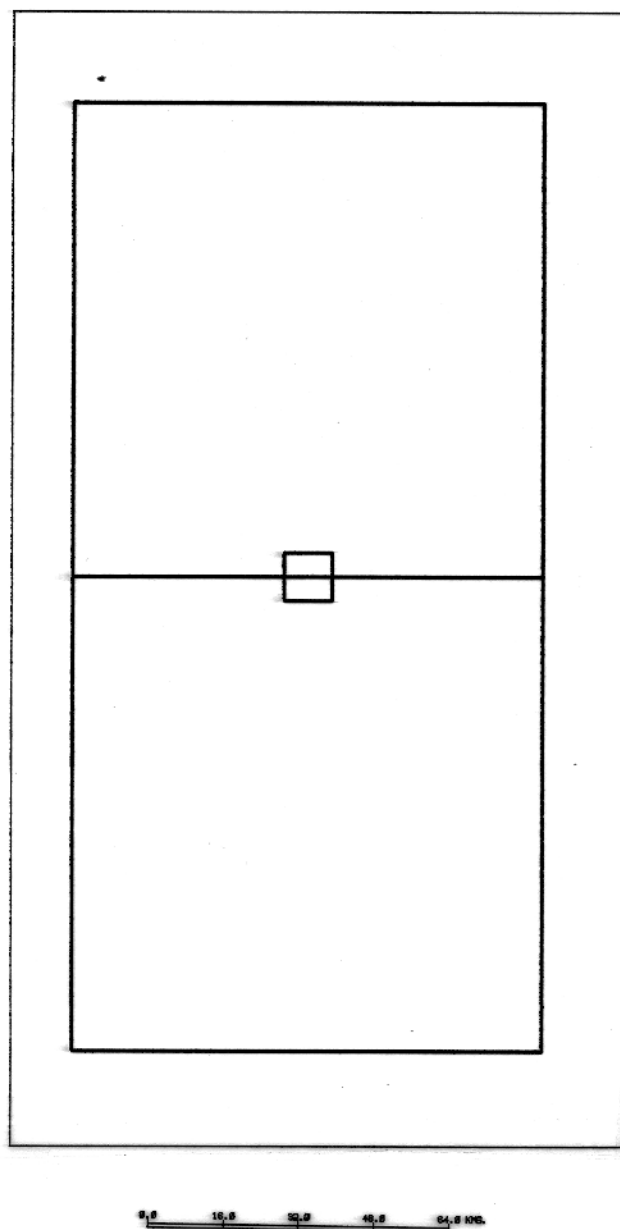


Figura 58: Posição do prisma vertical em relação à soleira com variação lateral da inclinação do vetor magnetização.

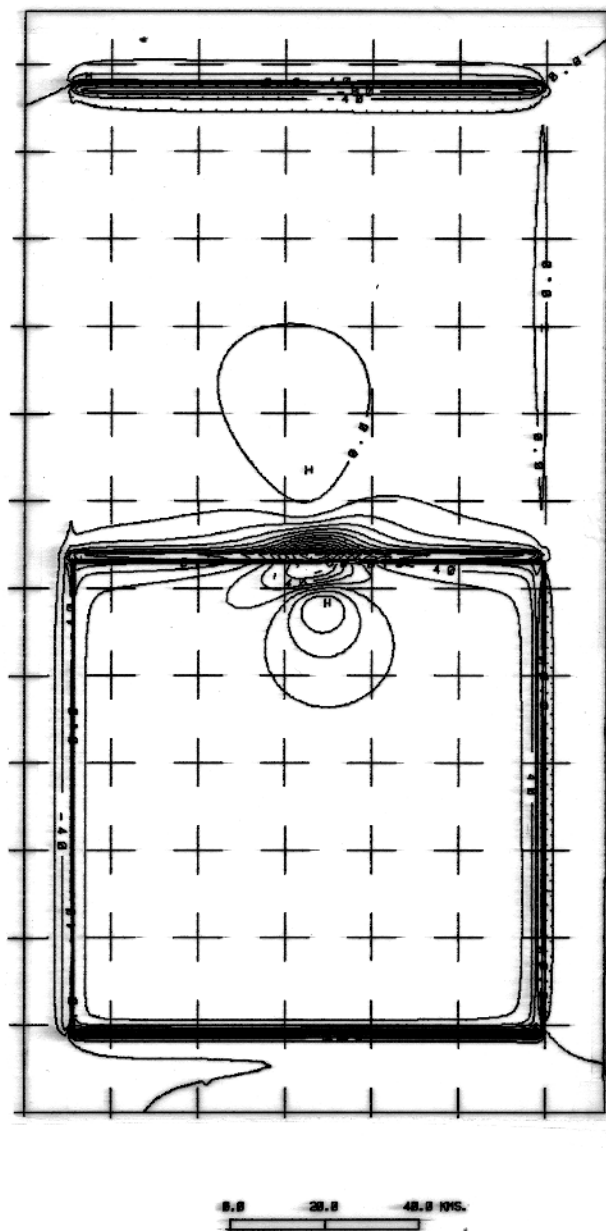


Figura 59: Campo magnético causado pelo modelo da Figura 58 (intervalo de contorno 10,0 gama).

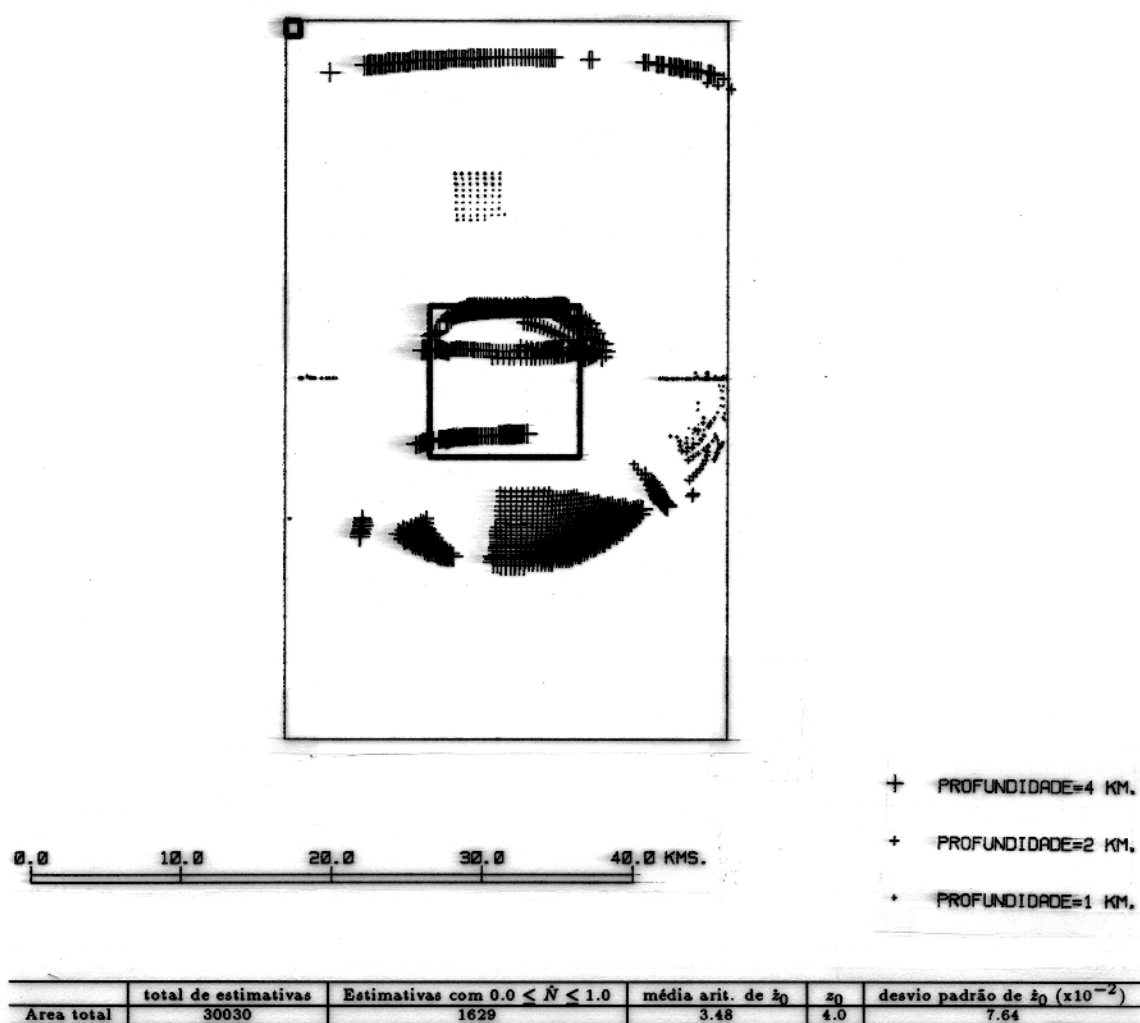


Figura 60: Estimativas de $\bar{r}_0$ para a anomalia da Figura 59 (soleira com mudança lateral na inclinação do vetor magnetização sobre um prisma vertical semi-infinito), nas proximidades do limite em que ocorre a variação da inclinação do vetor magnetização, usando-se $\phi_N = 0,7$; $\phi_{z_0} = 2,5$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de 1×1 km (5×5 observações).

CAPÍTULO 5

TESTES COM DADOS REAIS

5.1 Área escolhida para testes

Antes de fazer uma interpretação aeromagnética automática na bacia do Solimões, foi escolhida uma pequena área nessa bacia, possuidora de alguns poços que fornecem informações sobre a geologia de subsuperfície, para aplicação de testes com o método. Serão feitos testes com diferentes tamanhos de janelas e diferentes valores de λ , com a finalidade de determinar quais valores para λ e tamanho de janela fornecerão ao método uma melhor resolução e estabilidade matemática com dados da bacia do Solimões.

O campo magnético da área escolhida está representado pela Figura 61. A inclinação do campo geomagnético nessa área é de 15° , com declinação de -5° . Comentários a respeito do levantamento aeromagnético e da geologia regional serão feitos no próximo capítulo, referente a uma interpretação aeromagnética automática na bacia do Solimões. Uma forte anomalia magnética, com um máximo ao sul e um mínimo ao norte, é a feição dominante nesta área.

As informações provenientes de poços no sul da área revelam dois níveis de soleiras, um a 650 ± 80 m de profundidade, até 200 m de espessura e o segundo nível a 1200 ± 80 m de profundidade, com espessuras que chegam a 450 m, algumas vezes, ocorrendo um terceiro nível de soleira a 1450 ± 80 m, com espessuras que chegam a 200 m. A Figura 62 mostra a localização dos poços presentes nessa área.

A profundidade do embasamento no sul da área dada por estes poços é por volta de 2500 m, com um alto estrutural um pouco para leste.

5.2 Aplicação dos testes

Para determinar o melhor valor de λ a ser usado na interpretação aeromagnética automática a ser feita na bacia do Solimões, foram feitos testes com vários valores para λ (10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} e 10^{-1}) e janela com $1,5 \times 1,5$ km (4 x 4 observações). Os resultados estão representados nas Figuras 63, 64, 65, 66 e 67, respectivamente. Esses testes mostraram que, da mesma forma que nos testes com modelos teóricos, as estimativas do índice estrutural se estabilizaram com uso de

$\lambda = 10^{-2}$ (ver Figura 66). Nestes testes foram usados $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_0} = 2,5$ km e a matriz de pesos $\overline{W}$ usada, foi a mesma nos testes com modelos sintéticos, e foram aceitas as soluções que tiveram a estimativa do índice estrutural entre 0,0 e 1,0.

Para determinar o tamanho da janela que proporcione melhor resolução, foram feitos testes com janelas de 1 x 1 km (3 x 3 observações) e 2 x 2 km (5 x 5 observações), usando $\lambda = 10^{-2}$, $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_0} = 2,5$. A matriz de pesos foi a mesma usada anteriormente. As Figuras 68 e 69 mostram os resultados obtidos nestes dois testes. Uma melhor resolução foi obtida usando-se janela com 1,5 x 1,5 km (Figura 66).

5.3 Análise dos resultados

Uma análise feita sobre os resultados obtidos pelo teste que proporcionou melhores resultados (Figura 66), possibilitou obter uma aproximação das condições geológicas de sub-superfície. Tal aproximação será comparada diante da realidade dada pelas informações geológicas existentes, para avaliar a aplicabilidade do método.

Para ser feita uma interpretação qualitativa das estimativas de $\bar{\tau}_0$, foi adotada a seguinte estratégia:

- i - interpolar as estimativas de z_0 em um grid regularmente espaçado e gerar um mapa de contorno para esse grid;
- ii - analisar o mapa de contorno feito no item i, juntamente com o mapa com as estimativas de $\bar{\tau}_0$ para se ter visão da distribuição das fontes no plano XY e de suas profundidades, dando também uma idéia para os limites laterais das variações de profundidade. Como foi mostrado anteriormente, o uso da equação homogênea de Euler não fornece os limites laterais para os corpos prismáticos, mas fazendo-se esta análise conjunta (do mapa de contorno feito no item i e as estimativas de $\bar{\tau}_0$), consegue-se dividir a área em domínios em que predominam estimativas de profundidade com determinadas médias aritméticas;
- iii - analisar o mapa de estimativas de $\bar{\tau}_0$ juntamente com o mapa de contorno do campo magnético da área em estudo, para que o intérprete perceba as estimativas que podem ser dadas devido à ambigüidade causada pela baixa latitude da área em estudo, (é aconselhável que o mapa com as estimativas de $\bar{\tau}_0$ e o mapa de contorno feito no item i, sejam feitos em papel vegetal, para serem usados como "overlays" durante as etapas descritas nos itens ii e iii);

iv - desenhar um mapa de interpretação, mostrando níveis do embasamento e níveis de intrusões supra-embasamento.

Analisando-se os resultados mostrados na Figura 66, pode-se verificar a presença de muitas estimativas com profundidade entre 0,4 e 0,7 km (as dimensões do símbolo + são proporcionais à profundidade estimada z_0). Tais estimativas devem ser devido as mudanças na magnetização no nível de soleiras mais raso, ou de sua espessura, ou devido a falhas que deslocaram esse nível de soleiras, ou devido a outras intrusões, tais como diques. Outras estimativas com profundidades entre 1,0 e 2,0 km, provavelmente devido aos níveis de soleiras inferiores, ou outras intrusões. Estimativas entre 2,5 e 3,5 km, são provavelmente devido a intrusões intra-embasamento (as estimativas de fontes fictícias são diferenciadas de acordo com o item iii, descrito acima).

No extremo leste da área, as estimativas não são confiáveis, porque nessa região termina um aerolevantamento e se inicia outro, ambos com direção N-S para as linhas de vôo, dando alinhamentos N-S.

A forte anomalia magnética que predomina na área foi interpretada, através das estimativas de $\bar{\tau}_0$, como tendo uma fonte intra-embasamento, sendo que muitas intrusões supra-embasamento, que cortam o pacote sedimentar sobre esse corpo, provocam muitas interferências, dando assim muitas soluções com profundidades rasas, devido à interferência entre as fontes.

Na Figura 62, está representada uma interpretação dos resultados mostrados na Figura 58, indicando as profundidades médias dadas pelas estimativas de $\bar{\tau}_0$. Nessa Figura também está individualizada uma zona em que ocorre forte interferência, podendo ser, provavelmente um alinhamento composto por falhas geológicas e diques de diabásio.

Os resultados encontrados através deste teste mostraram-se satisfatórios para dar uma rápida avaliação da distribuição das fontes, permitindo uma interpretação geológica de caráter preliminar.

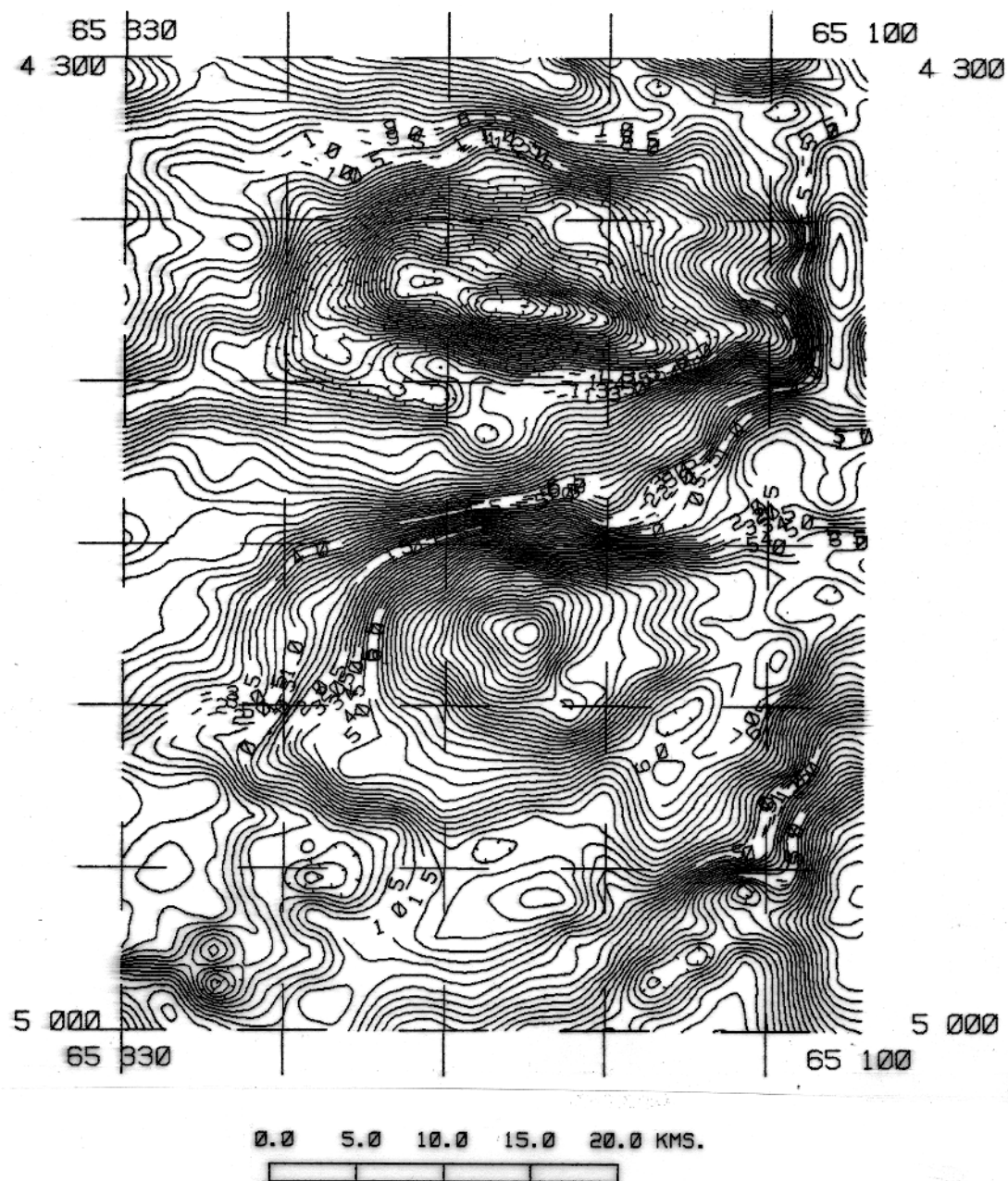


Figura 61: Campo magnético da área escolhida para testes do método com dados reais, na bacia do Solimões. (intervalo de contorno 5,0 gamas)

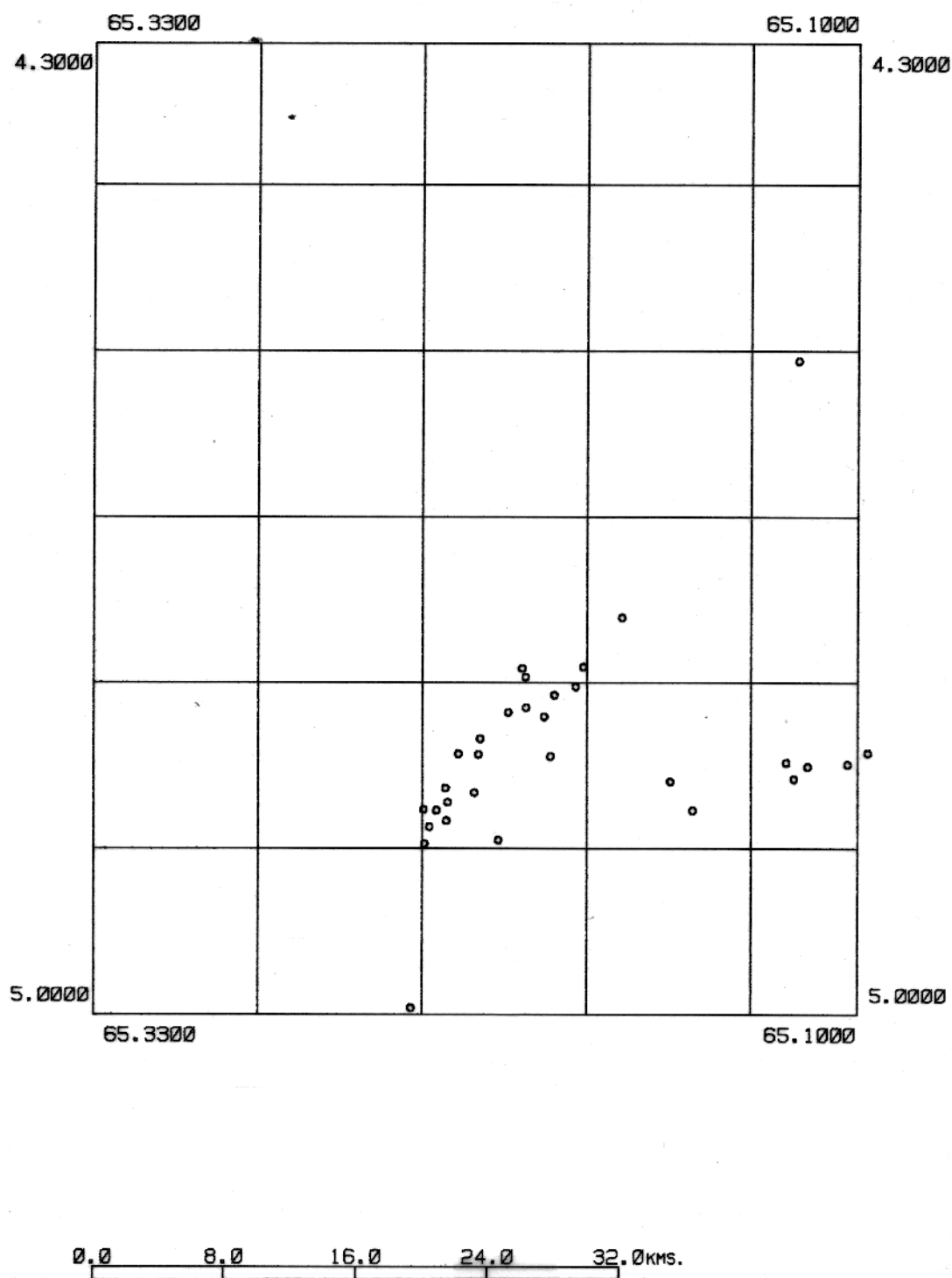


Figura 62: Localização dos poços presentes na área escolhida para testes do método na bacia do Solimões.

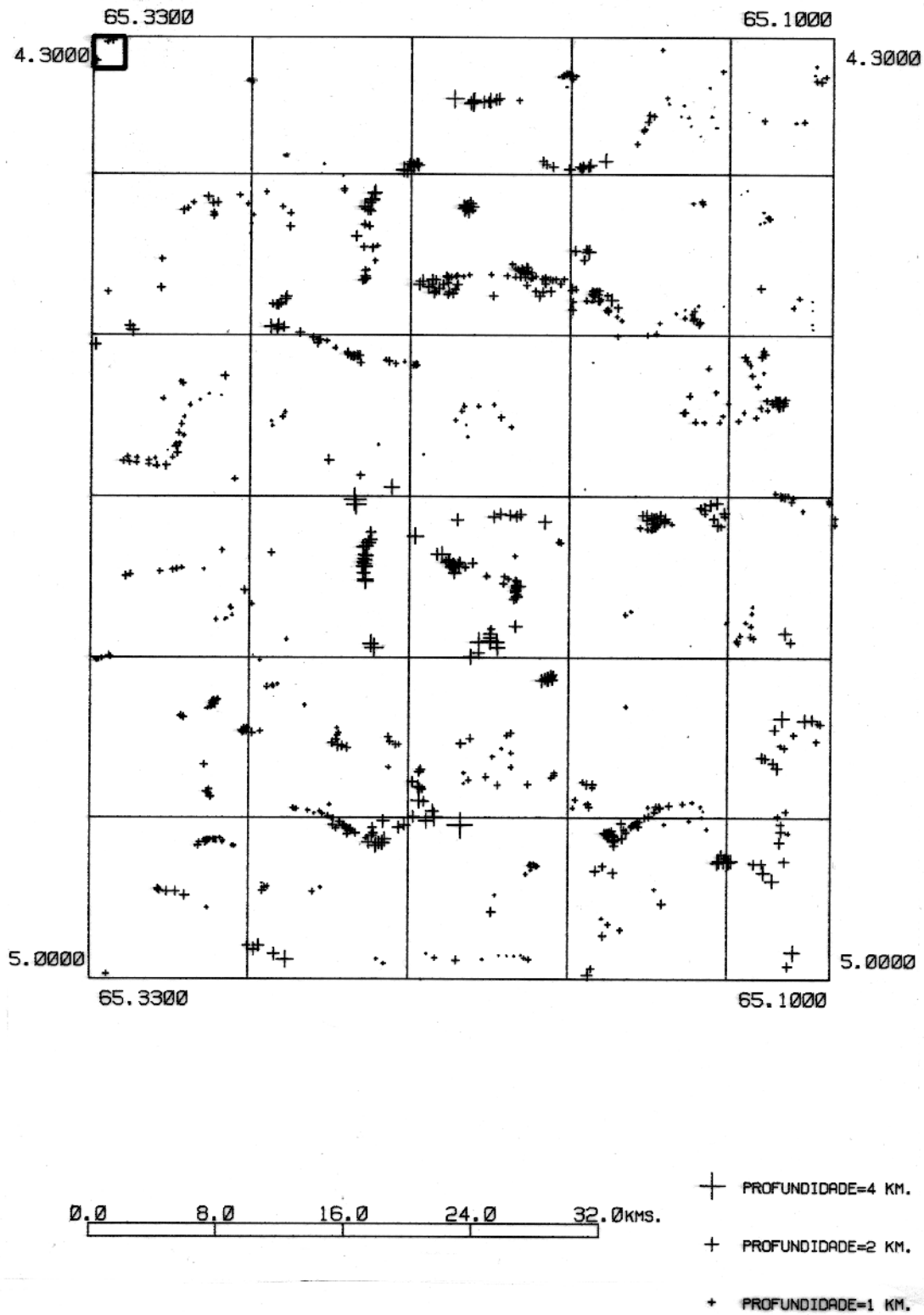


Figura 63: Estimativas de $\bar{r}_o$ para a área na bacia do Solimões escolhida para testes, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_o} = 2,5$; $\lambda = 10^{-5}$ e janela de $1,5 \times 1,5$ km de largura (4×4 observações).

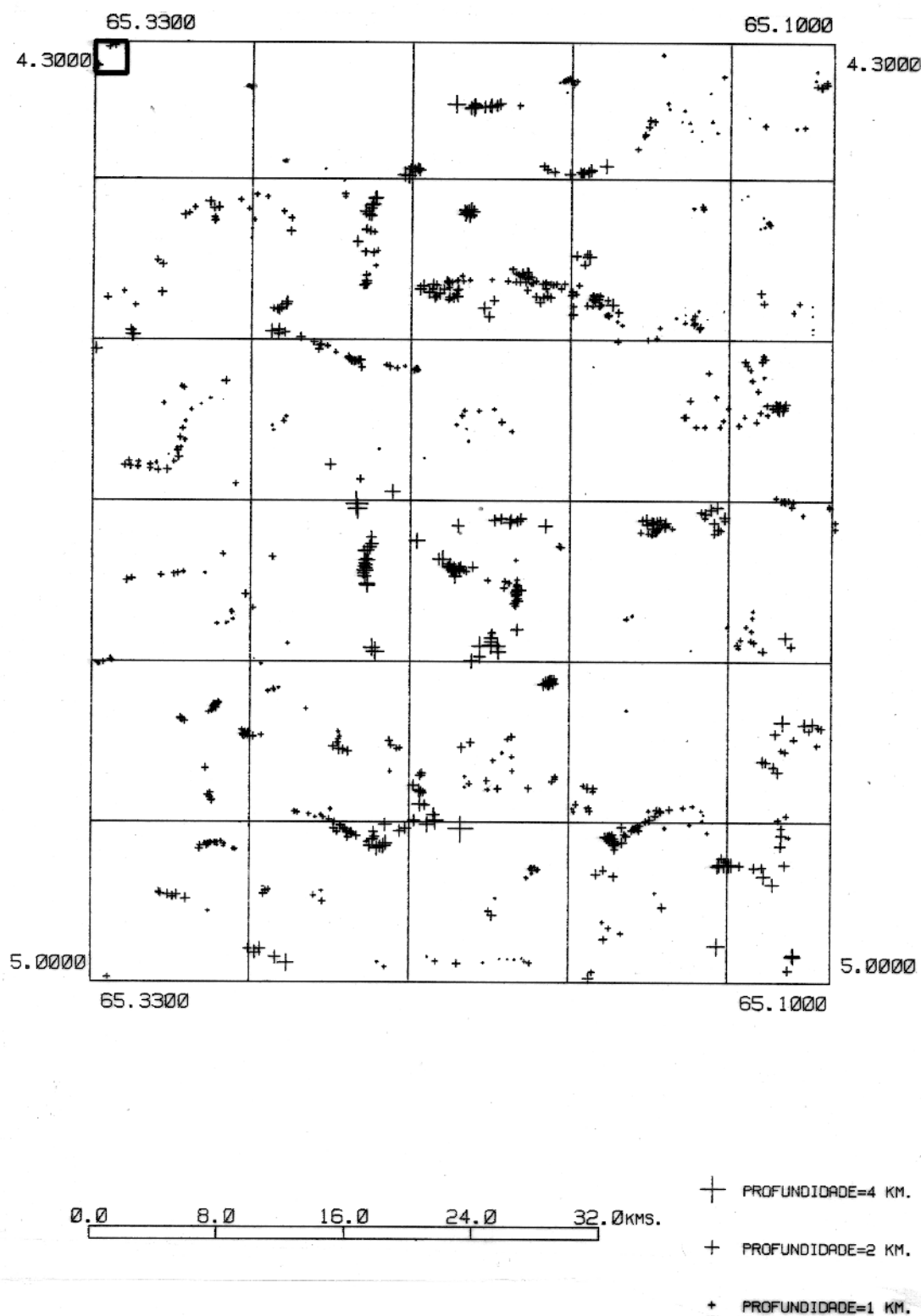


Figura 64: Estimativas de $\bar{r}_o$, para a área na bacia do Solimões escolhida para testes, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_o} = 2,5$; $\lambda = 10^{-4}$ e janela de $1,5 \times 1,5$ km de largura (4 x 4 observações).

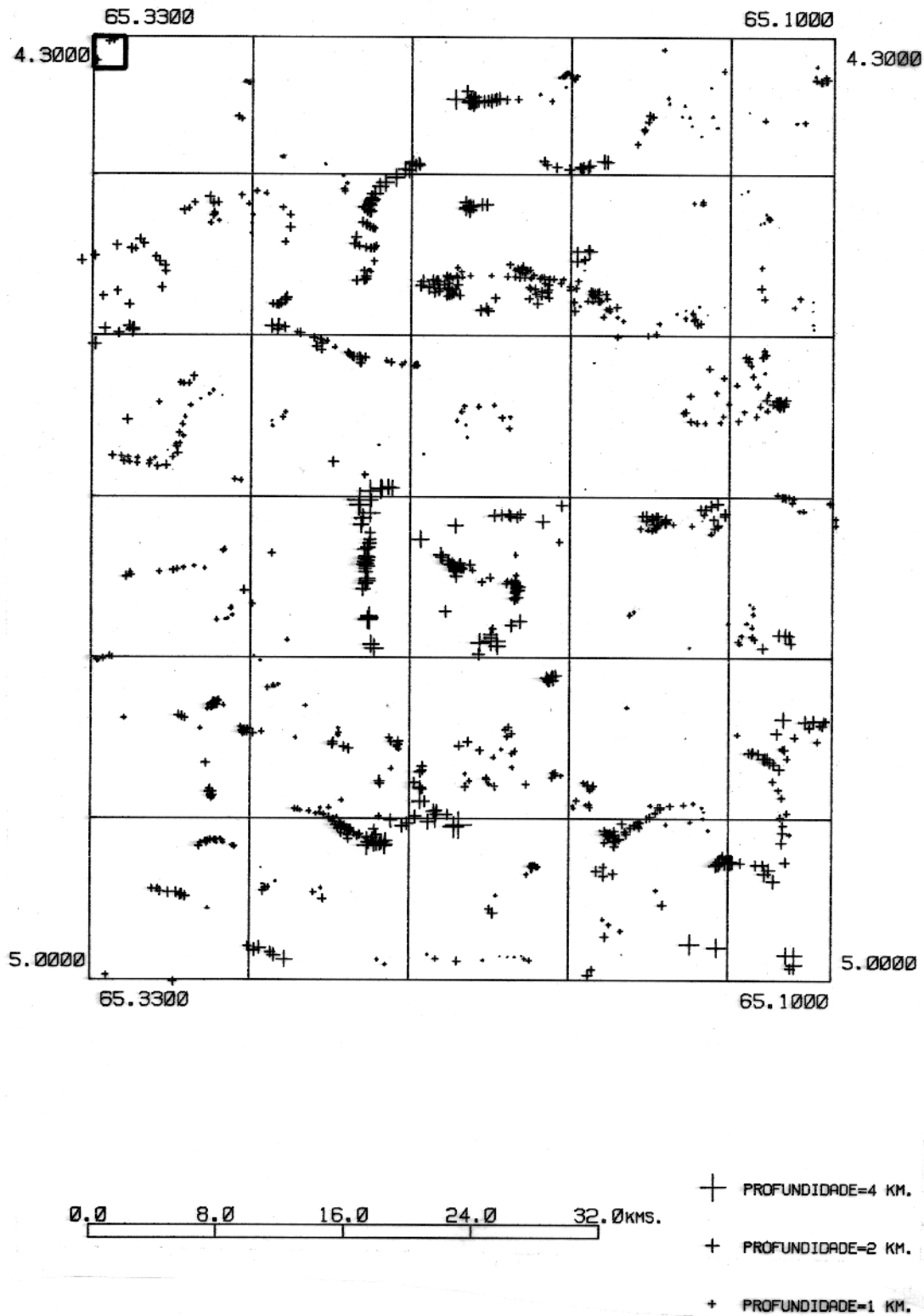


Figura 65: Estimativas de $\bar{r}_o$, para a área na bacia do Solimões escolhida para testes, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{zo} = 2,5$; $\lambda = 10^{-3}$ e janela de $1,5 \times 1,5$ km de largura (4 x 4 observações).

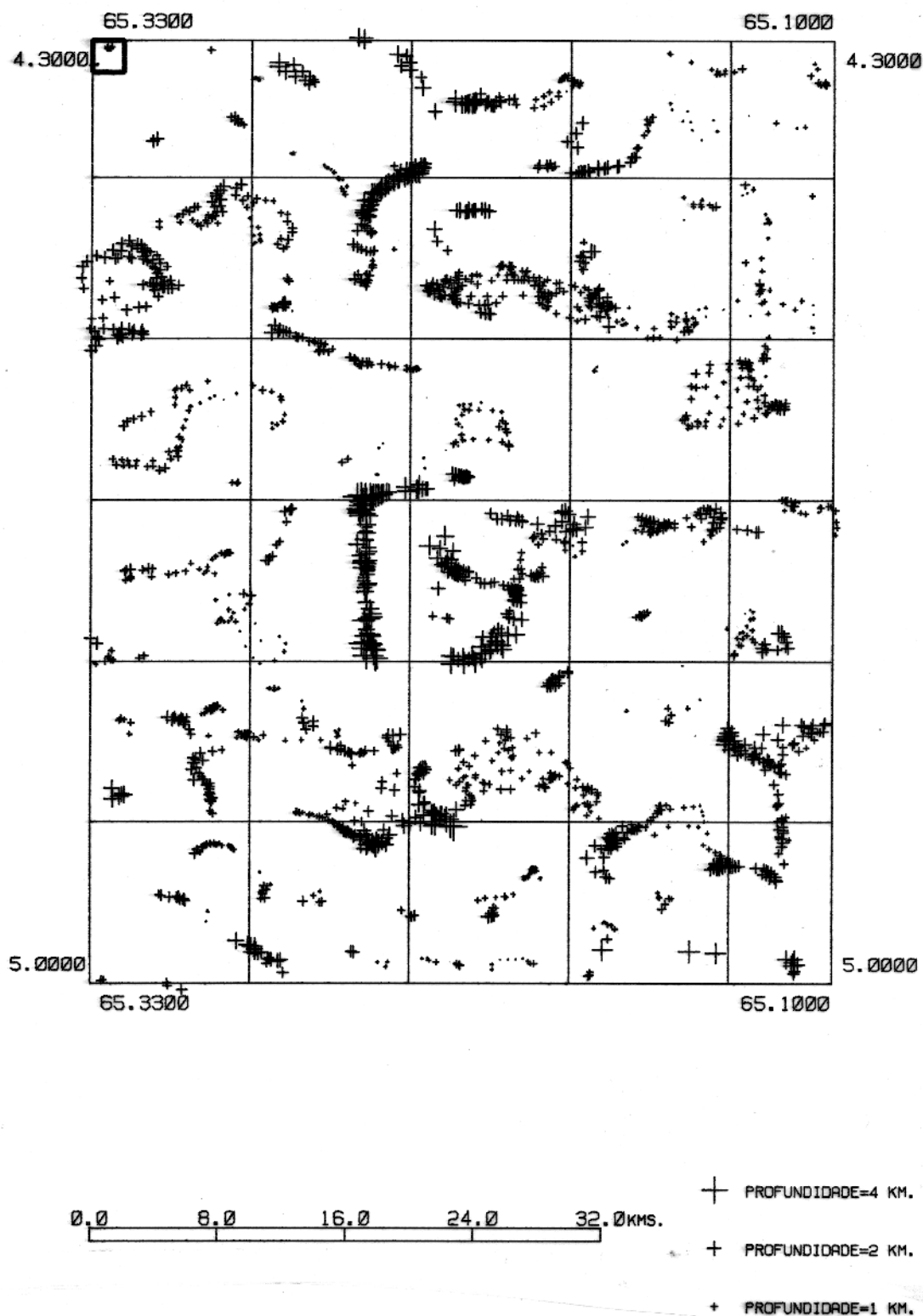


Figura 66: Estimativas de $\bar{r}_o$, para a área na bacia do Solimões escolhida para testes, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{zo} = 2,5$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de $1,5 \times 1,5$ km de largura (4×4 observações).

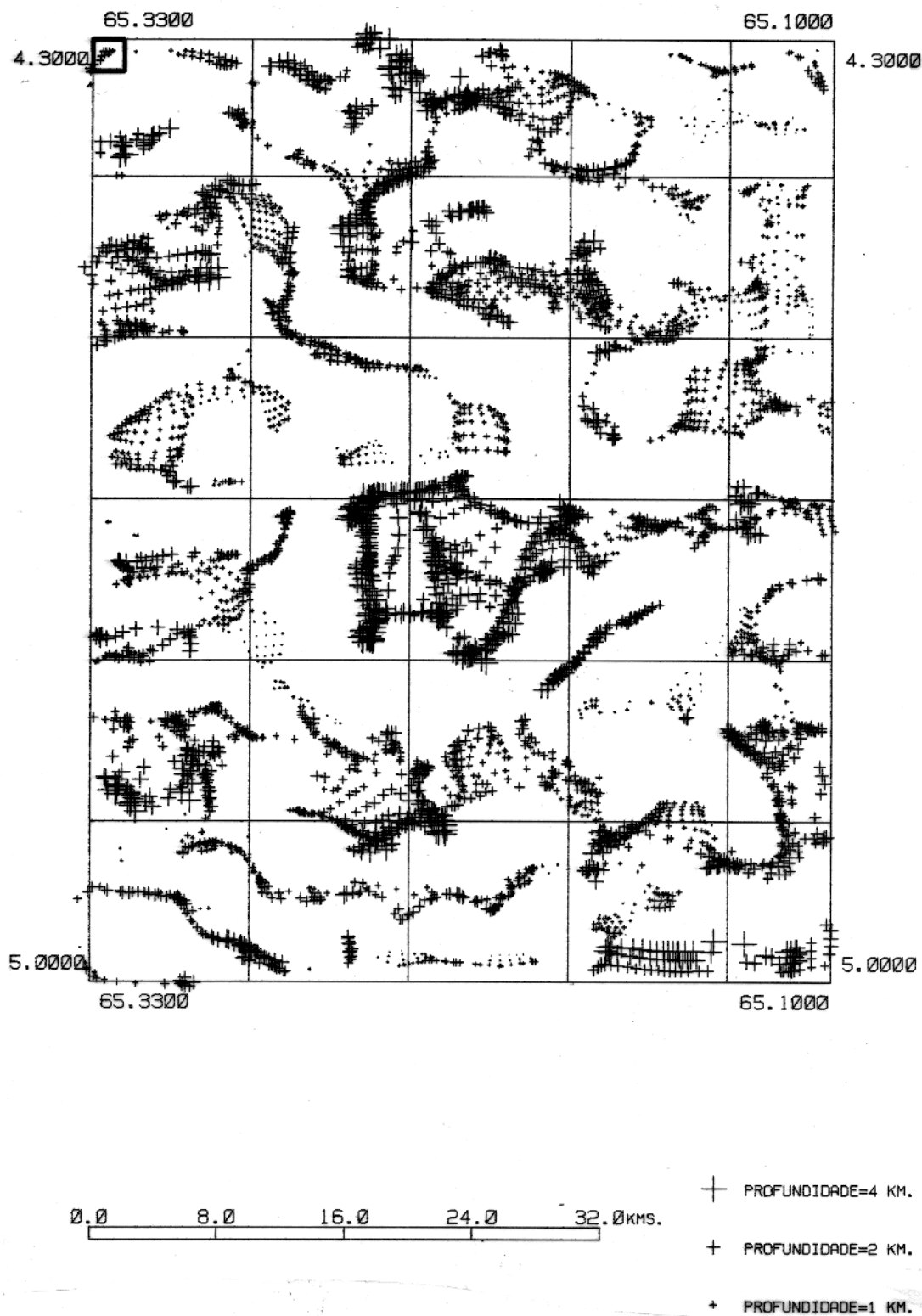


Figura 67: Estimativas de $\bar{r}_o$, para a área na bacia do Solimões escolhida para testes, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{zo} = 2,5$; $\lambda = 10^{-1}$ e janela de $1,5 \times 1,5$ km de largura (4×4 observações).

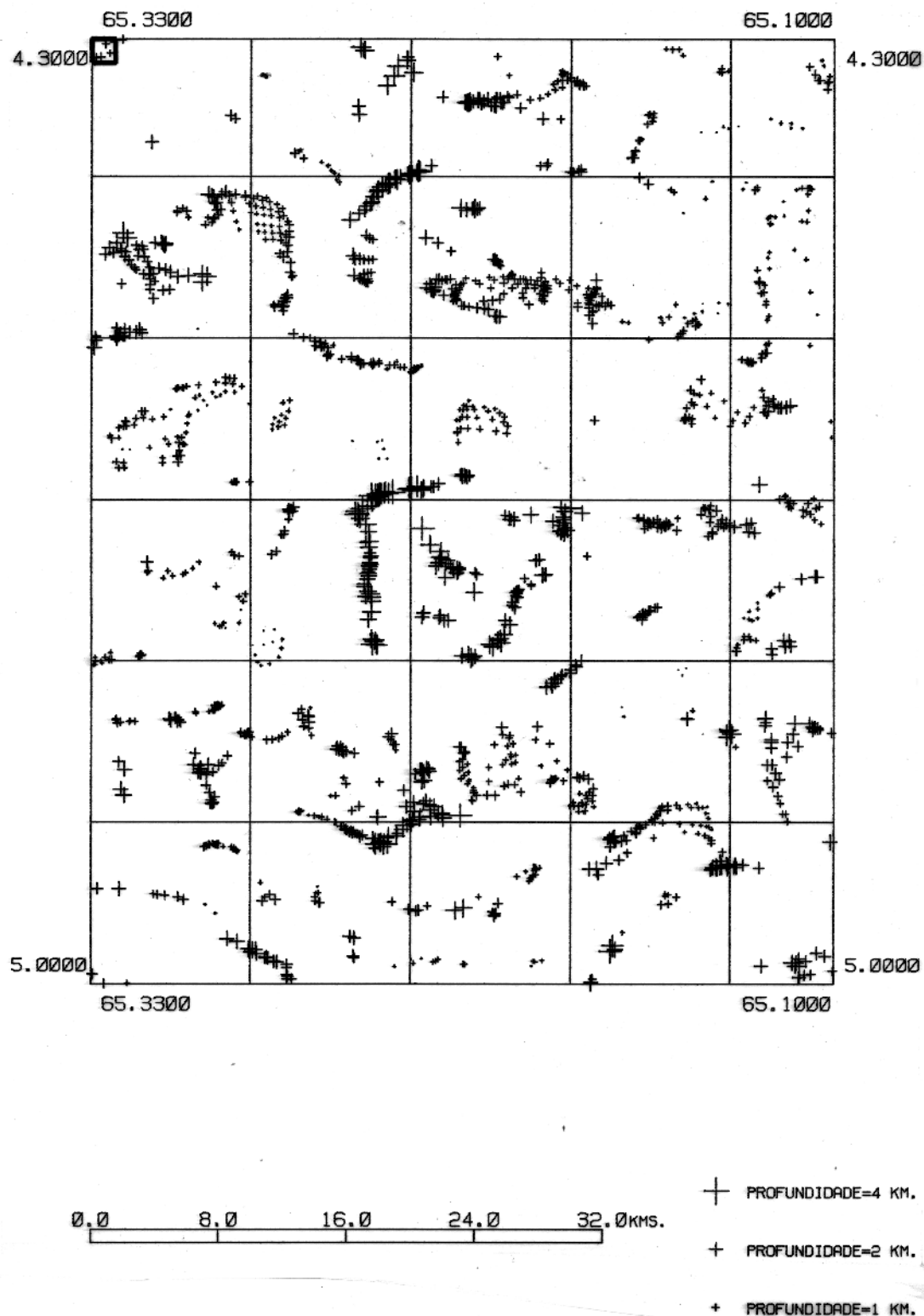


Figura 68: Estimativas de $\bar{r}_o$, para a área na bacia do Solimões escolhida para testes, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_o} = 2,5$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de $1,0 \times 1,0$ km de largura (3×3 observações).

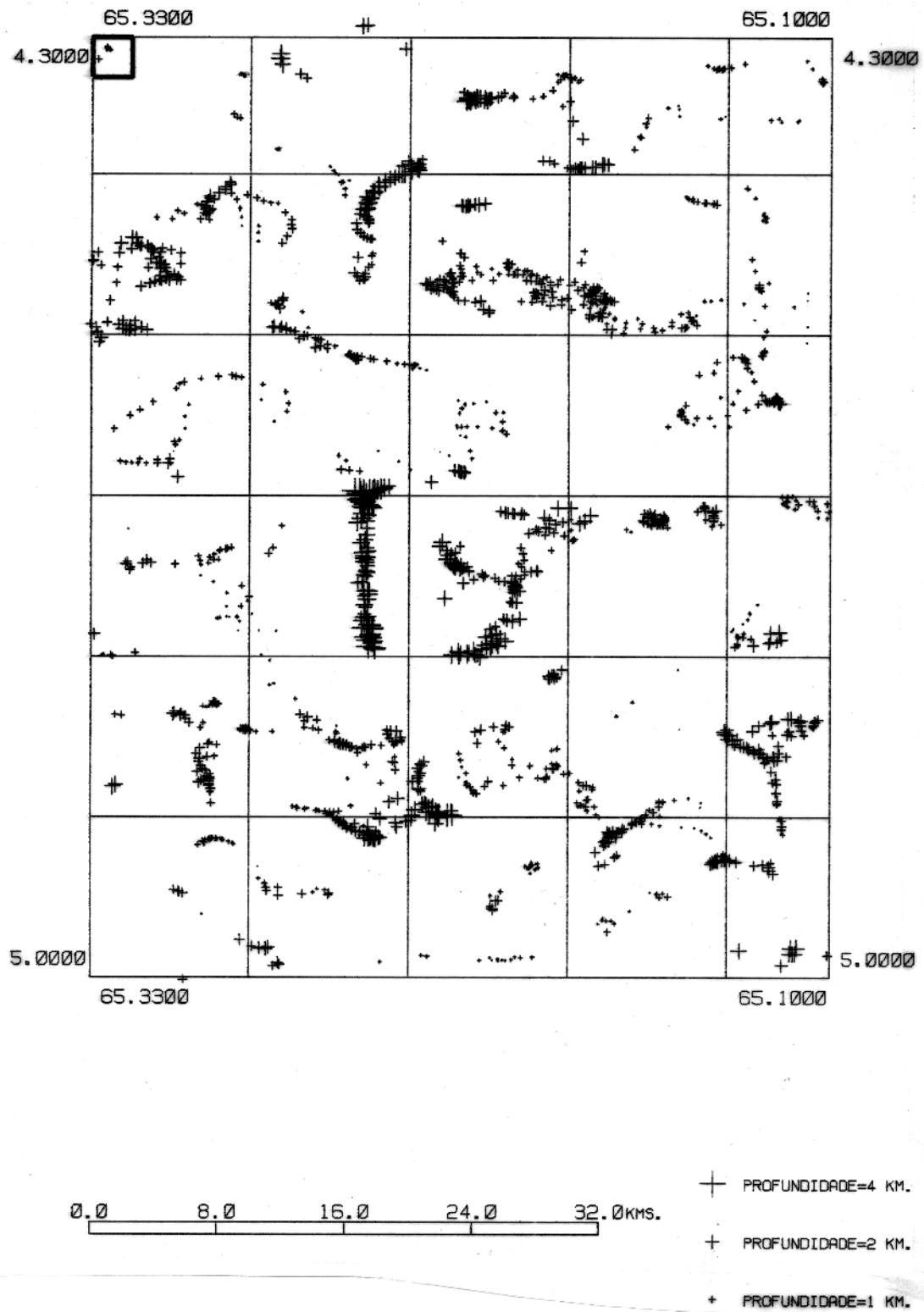


Figura 69: Estimativas de $\bar{\tau}_o$, para a área na bacia do Solimões escolhida para testes, usando-se $\phi_N = 0,7$ e $\phi_{z_o} = 2,5$; $\lambda = 10^{-2}$ e janela de $2,0 \times 2,0$ km de largura (5×5 observações).

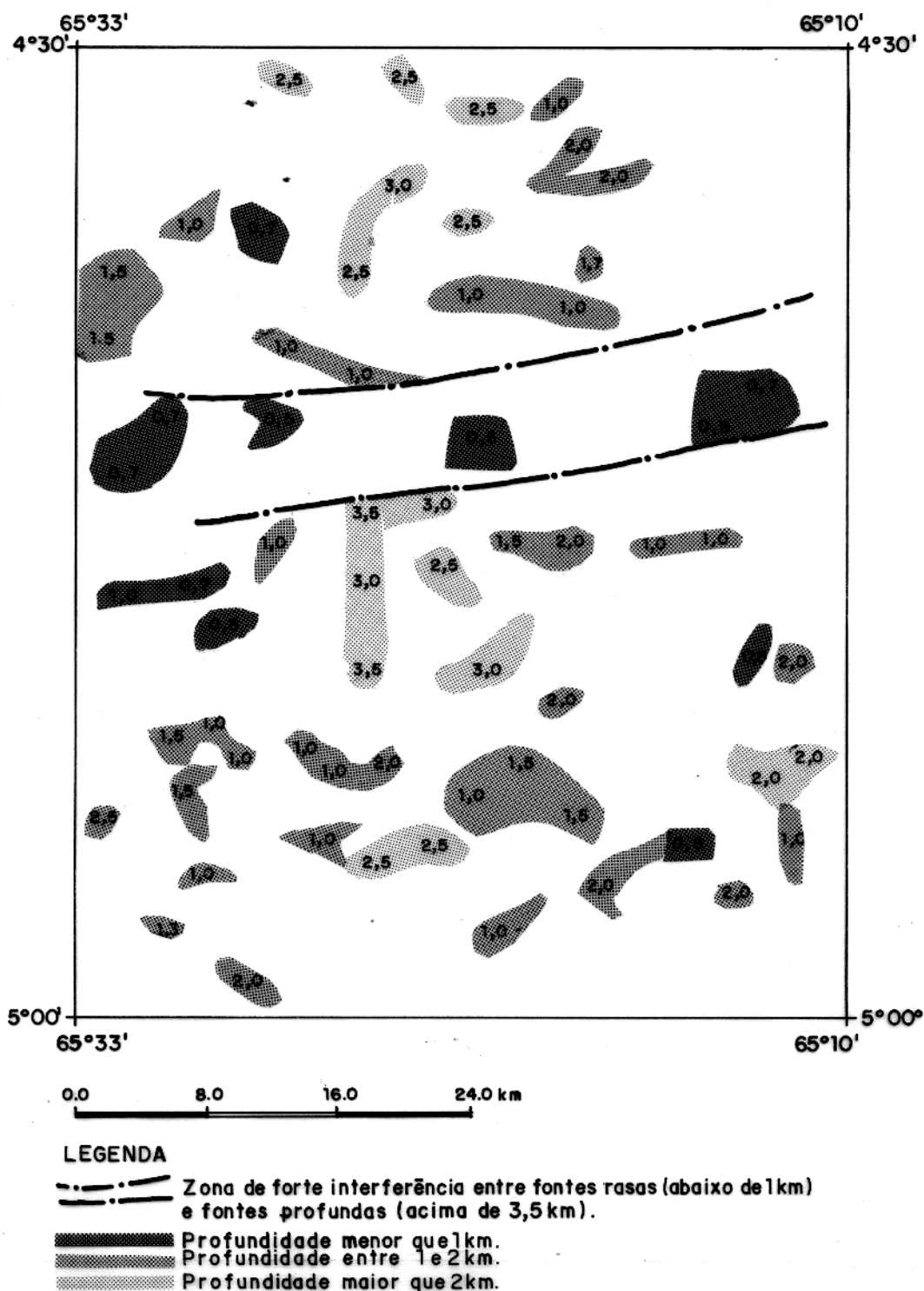


Figura 70: Interpretação para as estimativas de $\bar{\tau}_0$ mostradas na Figura 66. Foram estimadas profundidades de aproximadamente 3,5 km para a fonte da anomalia magnética que domina o centro da área. Numa faixa sobre esta anomalia, foram também estimadas fontes rasas, evidenciando fortes interferências, devido a intrusões rasas e falhamentos. Outras profundidades foram estimadas ao redor de 2,0 km, interpretadas como sendo a profundidade do embasamento pré-Cambriano.

CAPÍTULO 6

INTERPRETAÇÃO AEROMAGNÉTICA AUTOMÁTICA NA BACIA DO SOLIMÕES

6.1 Levantamento aeromagnético

Os dados utilizados para aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho foram obtidos da Petrobrás (Petróleo Brasileiro S.A.). A área estudada está contida na área do projeto Coari que levantou dados de intensidade magnética no ano de 1984.

As linhas de produção têm direção N-S e um espaçamento de 2,0 km e as linhas de controle direção E-W e espaçamento de 8 km. As observações foram tomadas a cada 50 m, com magnetômetro de precessão protônica, fabricado pela Geometric, modelo G-803, a uma altitude de 800 m.

6.2 Geologia regional

A bacia sedimentar do Amazonas representa uma sequência sedimentar com rochas paleozóicas, mesozóicas e cenozóicas, e intrusões básicas do Jurássico e Triássico, limitada ao sul pelo Escudo Brasileiro, ao norte pelo Escudo das Guianas, e a oeste estando em contato com sedimentos dobrados pela orogenia Andina. Possui uma forma alongada na direção ENE-WSW, ocupando toda a porção norte da América do Sul.

A evolução tectôno-sedimentar da seção paleozóica da Bacia do Amazonas confere-lhe a classificação do tipo I de Klemme (1980), "interior sag" (IS) na classificação de Kingston et al. (1983).

Segundo Porto et al. (1972), a aplicação do modelo de McGinis define razoavelmente a origem da bacia sedimentar do Amazonas, no que diz respeito às bacias do Médio e Baixo Amazonas. Segundo o referido modelo, inicialmente ocorre magmatismo ultrabásico no cráton de forma intrusiva e extrusiva, provocando arqueamento crustal e formação de bacias periféricas ao arqueamento. Ocorre então a formação de um rift na depressão originada do colapso dado pelo resfriamento das rochas ultrabásicas intra-embasamento. O equilíbrio isostático faz com que a subsidência se acentue no rift configurando uma bacia intra-cratônica. As áreas onde existiam as bacias periféricas passam a constituir arcos regionais. O Arco de Purús, por sua vez, determina

a formação da Bacia do Solimões, implicando numa evolução tectono-sedimentar diferenciada das bacias do Médio e Baixo Amazonas.

A evolução intra-cratônica alternou fases de subsidência e movimentação epirogenética. Segundo Esteves (1984), a sedimentação da bacia se deu nos seguintes ciclos sedimentares:

PRIMEIRO CICLO SEDIMENTAR - Ordoviciano-Siluriano inferior. Com a formação do rift, espessos depósitos sedimentares preenchem a bacia a leste do Arco de Purús, culminando no Siluriano inferior com a invasão marinha de leste (Figura 71a, 71b). A passagem do mar, de leste para oeste do Arco de Purús, fica registrada através de uma fina camada de sedimentos a oeste do arco, datada ao final deste ciclo. Cessada a invasão marinha, seguiram-se depósitos regressivos e movimentação epirogenética;

SEGUNDO CICLO SEDIMENTAR - Devoniano. A leste do Arco de Purús a fase de subsidência se inicia no Devoniano inferior com o estabelecimento de ambientes continentais que gradam a transicionais e marinhos, com invasão marinha de leste no Devoniano superior (Figura 71c). Cessada a transgressão marinha, depósitos regressivos marcam o início de novo processo de soerguimento. Menor subsidência a oeste do arco de Purús é verificada pela menor espessura de sedimentos (Figura 71d). Esses sedimentos, a oeste do Arco de Purús, jazem sobre sedimentos silurianos a norte, sobre sedimentos pré-cambrianos na porção centro-oeste e próximo a Carauari sobre o embasamento, onde há um suave arqueamento na direção NW-SE;

TERCEIRO CICLO SEDIMENTAR - Permo-Carbonífero. Inicia-se com sedimentos continentais, marcando uma ampla transgressão marinha vinda de oeste, determinando a partir do Arco de Tarauacá, um ambiente restrito (Figura 71e). A conexão entre a Bacia Amazônica e bacias africanas cessa com a formação do Arco de Gurupá. Após os depósitos evaporíticos, o ciclo sedimentar se encerra com a formação de "red-beds" (Formação Andirá) e movimentação epirogenética (Figura 71f). No Juro-triássico um expressivo magmatismo torna-se presente em toda a bacia, cortando a sequência sedimentar com diques e soleiras (Figura 71g). Estudos de Throuw (1982) datam o evento compressivo posterior à fase de magmatismo juro-triássico.

Esteves (1984) atribui a estruturação na Bacia do Solimões como decorrente de esforços atuantes no Juro-Cretáceo, relacionados a convergências entre a placa de Nazca, em direção à placa

sulamericana. Esses esforços na direção NW-SE, possivelmente deram origem aos dobramentos do Juruá, com direção NW-SE. Estudos de Mendigurem e Richter (1978) sobre os principais terremotos ocorridos na porção setentrional do continente sulamericano, concluíram a existência de esforços compressivos horizontais de direção NW-SE, os quais foram atribuídos pelos autores à forças de resistência das placas do Caribe ao norte e Nazca a oeste, diante da expansão da cadeia Meso-Atlântica. Tudo isto atesta que as rochas básicas Juro-triássicas intrudidas dentro da sequência sedimentar, foram dobradas juntamente com estratos no Neo-jurássico/Eo-cretáceo.

A sequência sedimentar da Bacia do Solimões possui quatro discordâncias erosivas (Ordoviciano, Siluriano/Devoniano, Devoniano/Carbonífero e Triássico-Jurássico/Cretácico), predominando sequências de arenito e folhelho na base e evaporitos na porção Carbonífero/Permiano. Intrusões básicas formam três níveis espessos de soleiras (750 ± 50 m, 1400 ± 100 m e 2350 ± 150 m) com espessuras de 400, 300 e 150 m, respectivamente (Figura 72). Os arcos estruturais são as mais importantes feições do condicionamento estrutural da bacia, bem como ao trapeamento de hidrocarbonetos. Estes arcos causam suaves dobramentos no pacote sedimentar. O nível mais profundo da bacia, de acordo com os estudos feitos até hoje, é de 3500 m.

Szatmari et al. (1975) postularam a presença do Alto de Jutai e calha do Juruá como reflexo da Orogênia Herciniana do Paleozóico superior. Levantamentos sísmicos (Jucá et al., 1977) em escala de semi-detelhe na Área do Juruá afirma a possibilidade da existência dessas estruturas, mapeando um alinhamento estrutural próximo do depocentro da Bacia do Solimões (Figura 73).

Segundo Szatmari (1983), a faixa de dobramentos do Juruá possui direções ENE-WSW, mas as estruturas de maior importância são NE-SW ao longo da Falha Pisco-Juruá, e os dobramentos Meso-cenozóicos, resultantes da subducção da Bacia de Nasca (em sua maioria Terciário), foram posteriores e quase perpendiculares à faixa de dobramentos do Juruá.

Caputo (1984) também afirma que a estruturação da bacia ocorreu após o magmatismo básico e o trend do Juruá foi criado por esforços compressivos na parte norte da América do Sul, tendo sua origem dada pela abertura do oceano Atlântico Sul.

6.3 Aplicação do método

É feito uma interpretação aeromagnética automática na Bacia do Solimões, numa área de

20,204 km², usando a metodologia desenvolvida, através de um grid de 0,5 x 0,5 km de espaçamento, janela com 1,5 x 1,5 km; $\phi_N = 0,7$; $\phi_{z_0} = 2,0$ e $\lambda = 10^{-2}$. Foram aceitas todas as soluções que tiveram o índice estrutural estimado entre 0,0 e 1,0.

O campo magnético da área estudada está no anexo 1, as estimativas de $\bar{\tau}_0$ encontradas estão mostradas no anexo 2.

6.4 Análise dos resultados

Observando as estimativas de $\bar{\tau}_0$ no anexo 2, é possível perceber que ocorrem regiões onde predominam estimativas rasas (com z_0 estimado abaixo de 1,0 km), regiões onde predominam estimativas profundas (com z_0 estimado acima de 3,0 km) e regiões onde não há predomínio de nenhuma profundidade. O conjunto dessas estimativas de $\bar{\tau}_0$, muitas vezes indicam estruturas que podem dar aproximações para a profundidade das intrusões intra-embasamento, intrusões supra-embasamento e lineamentos.

Analisando-se conjuntamente os anexos 1 e 2 com o mapa de contorno, feito a partir das estimativas de profundidade (tal como descrito no capítulo 5, seção 5.3), foi possível individualizar esses domínios e as estruturas dadas pelas estimativas de $\bar{\tau}_0$, como uma interpretação dos resultados dados pelo método. No anexo 3 está representado essa interpretação.

De acordo com as informações geológicas, é esperado que em toda a área deva haver níveis de soleiras. As estimativas de $\bar{\tau}_0$ rasas são interpretadas como, provavelmente, limites laterais de soleiras (que podem existir devido a falhas normais), possíveis variações laterais de magnetização das soleiras, possíveis variações na espessura das soleiras ou ainda devido a possível presença de outros corpos intrusivos, tais como diques. A distribuição no plano XY dessas estimativas de fontes rasas, revelam alinhamentos E-W, que podem significar a direção perpendicular à direção em que teriam ocorrido as variações na magnetização das soleiras, a direção de falhamentos de idade superior às soleiras e direção preferencial de diques supra-embasamento (Caputo & Silva, 1990).

As regiões individualizadas pelo predomínio de fontes com profundidades acima de 2,0 km, podem ser causadas por intrusões intra-embasamento.

No anexo 3, estão também representadas os alinhamentos dados pelas estimativas de $\bar{\tau}_0$ e os valores médios para as profundidades, dados pelo mapa de contorno feito a partir das estimativas de

profundidade. Essa interpretação mostra a tendência das estimativas de profundidade das fontes, que podem ser interpretadas como supra-embasamento ou intra-embasamento.

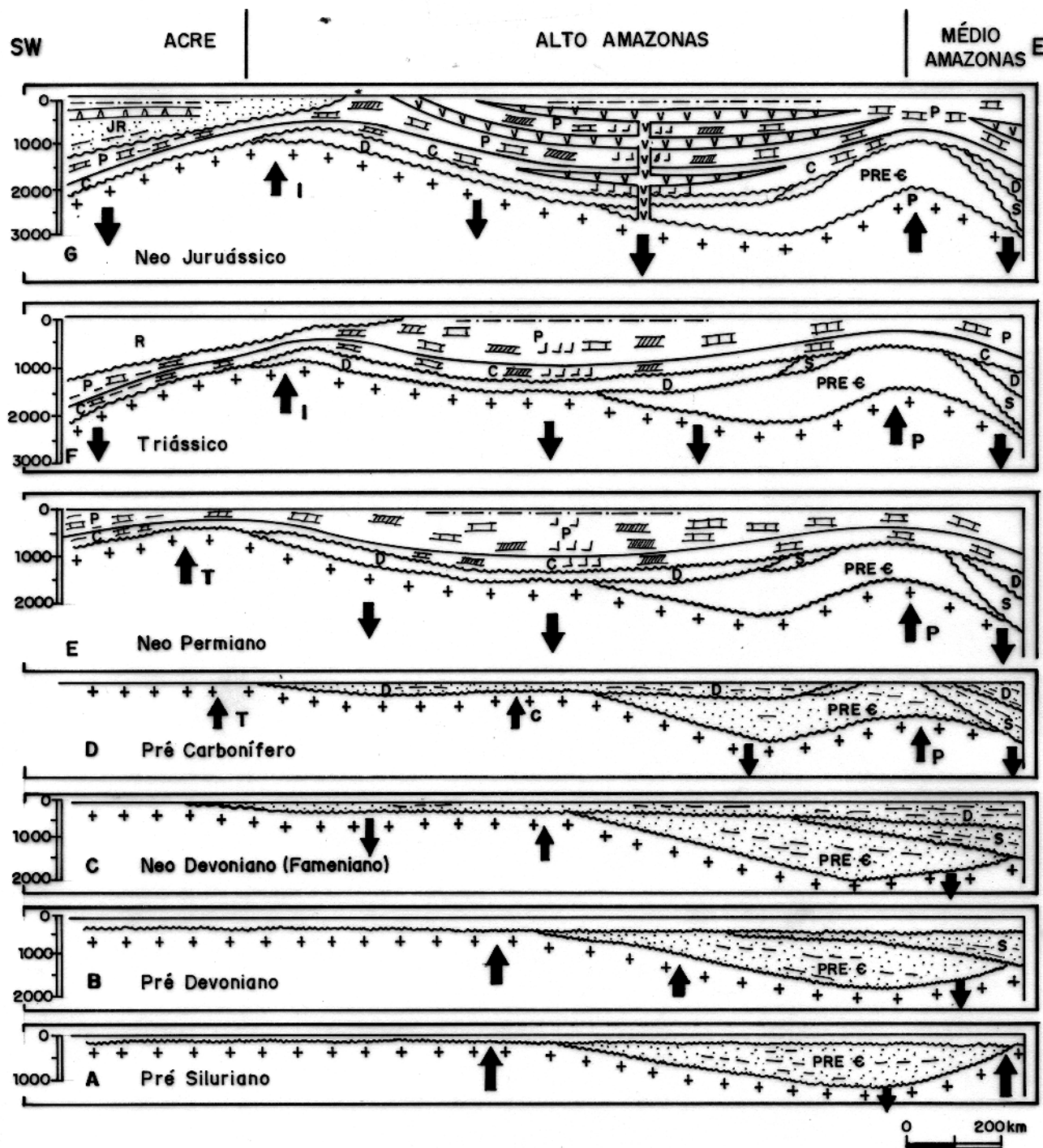


Figura 71: Evolução intracratônica da bacia Sedimentar do Amazonas (retirado de Esteves (1984))
P = Arco de Purús, T = Arco de Tamaracá, I = Arco de Iquitos, C = Alto de Caraurí.

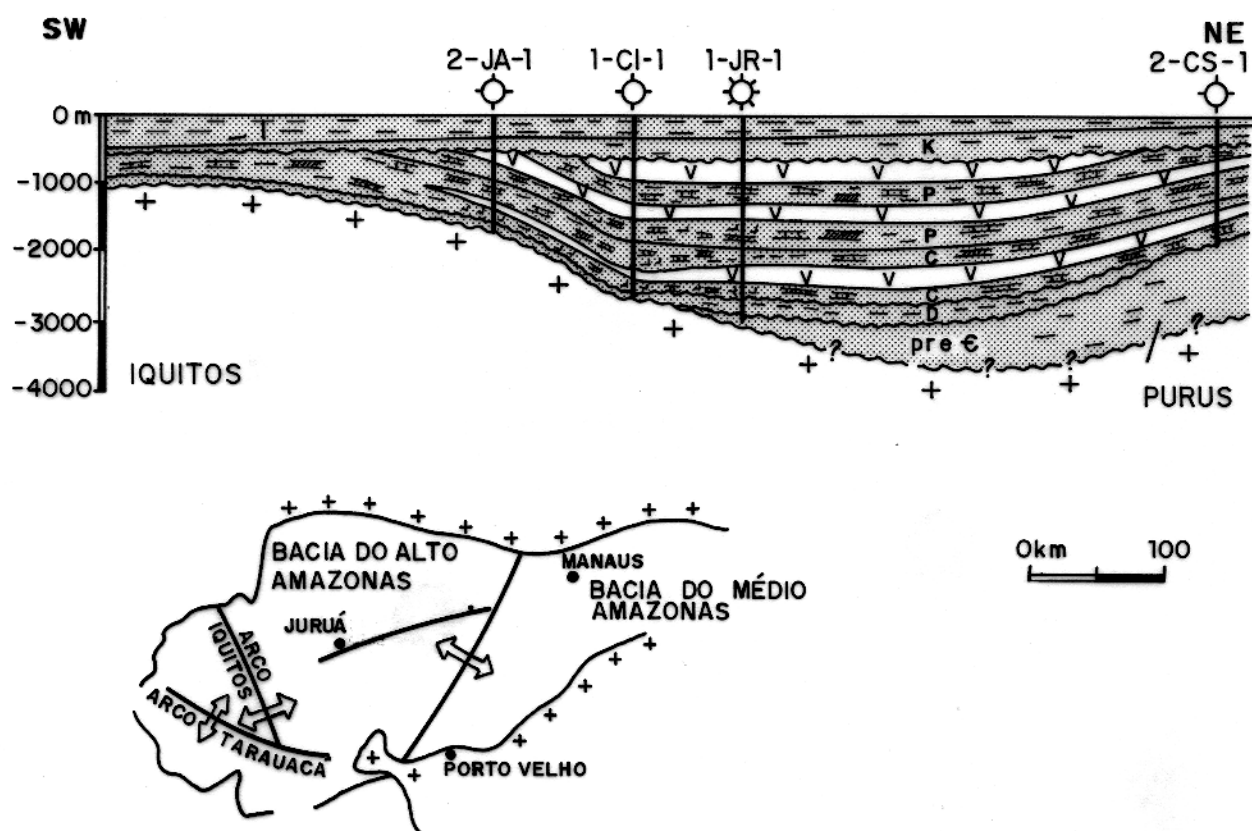


Figura 72: Sessão esquemática da bacia do Solimões mostrando os principais níveis de soleiras (retirado de Esteves (1984)).

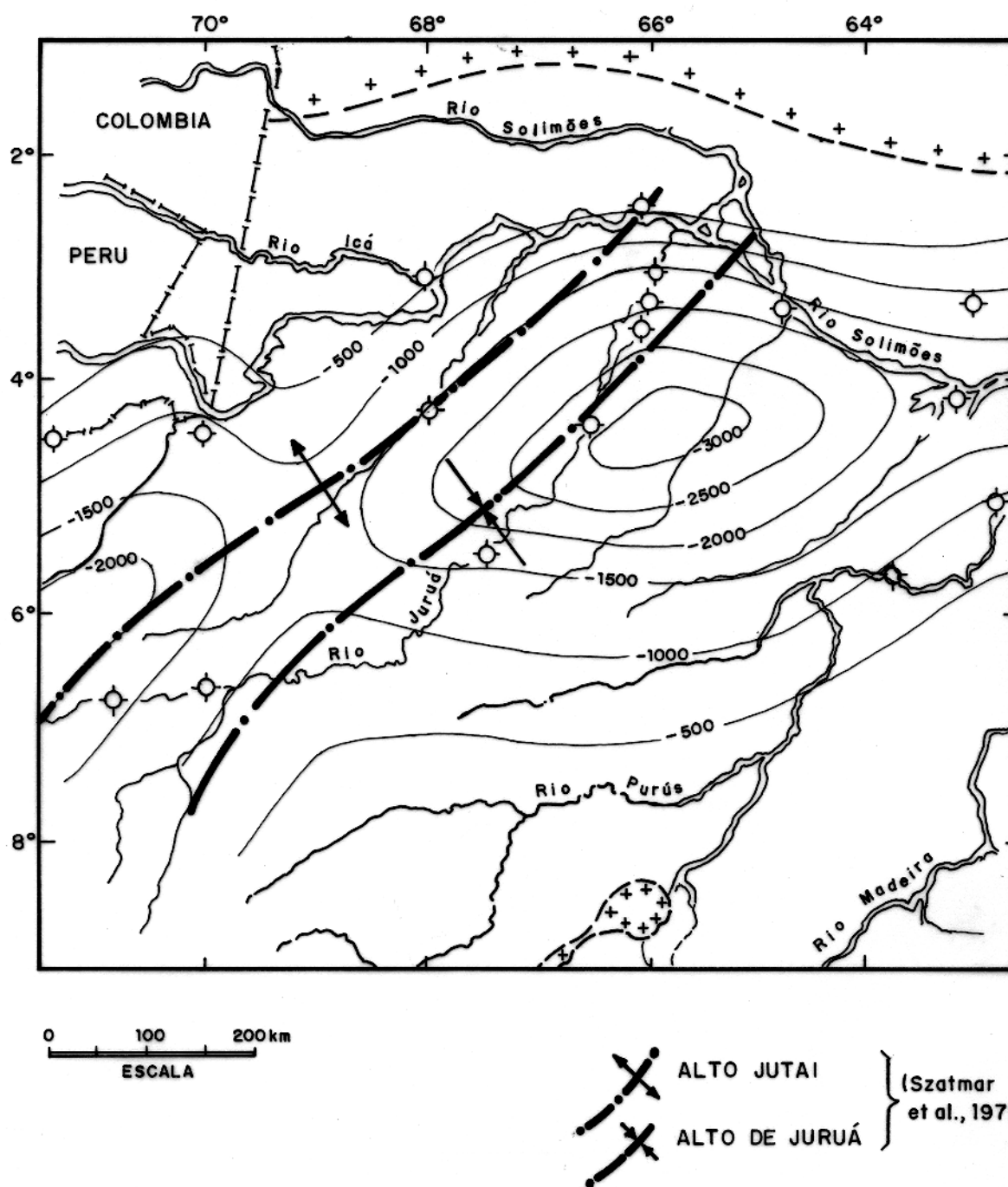


Figura 73: Alto de Jutai, Calha do Juruá e mapa de isopacas do embasamento (retirado de Jucá et al., (1977)).

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

7.1 O Método de interpretação automática

A metodologia desenvolvida mostrou-se eficiente no sentido de dar uma rápida avaliação de uma grande quantidade de dados. Os resultados obtidos são capazes de dar aproximações para as profundidades das fontes, mas quando o vetor magnetização não é aproximadamente vertical, não é possível determinar os limites laterais dos corpos.

A inclinação do vetor magnetização, apesar de não influenciar no valor do índice estrutural, é capaz de influenciar nas estimativas de $\bar{r}_o$, devido à ambigüidade causada pela falta de informação sobre o vetor magnetização. A ambigüidade é mínima quando o vetor magnetização é vertical. As ambigüidades, devido à falta de informação sobre o nível de base e intensidade de magnetização/volume do corpo, que são características dos métodos automáticos, foram minimizadas devido ao forte vínculo dado pela introdução de informação "a priori" sobre o índice estrutural. Desenvolvidos matemáticos mostraram que nas proximidades dos vértices de prismas, o valor do índice estrutural é aproximadamente zero. Porém, usando-se um valor médio esperado para o índice estrutural igual a zero, as soluções não fazem sentido diante dos modelos. Uma rápida análise na equação Homogênea de Euler torna claro que, colocando-se o valor do índice estrutural igual a zero, o problema se tornará muito ambíguo, principalmente nas proximidades das bordas dos corpos, dando estimativas ruins para z_o .

A necessidade de um grande volume de memória para o armazenamento de arquivos contendo os grids do campo magnético e suas derivadas, pode ser contornada, processando-se áreas pequenas, separadamente.

A escolha das dimensões da janela é muito importante para que se tenha uma boa resolução. Tal escolha deve levar em conta o espaçamento do grid, a interferência entre fontes e o tamanho dos corpos. O espaçamento do grid depende do espaçamento das observações nas linhas de vôo, espaçamento entre as linhas de vôo e qualidade das observações. O espaçamento entre as observações originais do levantamento e sua qualidade pode exigir que as derivadas sejam calculadas em um grid com espaçamento muito grande, limitando o uso do método. O método mostrou-se também

muito sensível à interferência entre fontes.

7.2 A interpretação automática na bacia do Solimões

A superposição de várias fontes magnéticas, devido à grande quantidade de intrusões de material básico e ultrabásico na bacia do Solimões, torna difícil estimar-se a profundidade do embasamento da bacia. Mesmo assim, é possível obter uma aproximação para a profundidade das fontes intra-embasamento quando não há presença de intrusões supra-embasamento.

As estimativas encontradas nos mostram as principais feições estruturais dentro da área, dando uma aproximação inicial para as profundidades das fontes e as direções preferenciais para as estruturas.

Essas aproximações encontradas para as profundidades do embasamento, ou de corpos intrusivos supra-embasamentos, e das principais direções de lineamentos, têm grande valor como primeira aproximação a serem usadas por métodos de inversão iterativos e para se ter uma avaliação sobre a distribuição das fontes, que serão úteis na elaboração de uma estratégia de pesquisa na área e em trabalhos de modelamento.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Douglas Patrick O'Brien pela dedicada orientação nessa tese de mestrado.

À Dra. Naomi Ussami e ao Dr. Marco Polo Pereira da Boa Hora, pelas sugestões e críticas que permitiram em muito melhorar esse trabalho.

Aos Prof. MsC. Jorge Wilson Delgado Leão pelo apoio computacional e ao professor João Batista Correa da Silva pelas discussões que em muito ajudaram na conclusão desse trabalho.

Aos colegas alunos dessa instituição pelas sempre válidas discussões técnicas.

Ao convênio UFPa/PETROBRAS/FADESP/CAPES/FINEP/CNPq pelo financiamento desse projeto.

REFERÊNCIAS

- BANBRICK, J., LETROS, S., STRANGWAY, D. W. ; GEISSMAN, J. 1982. Apparent magnetic anomalies susceptibility (SUSC) mapping in theory and practice: Technical Program. In: ANNUAL INTERNATIONAL MEETING AND EXPLORATION, 52, 1982. Abstract & Biographies. p. 238-241.
- BHATTACHARYYA, B. K. 1964. Magnetic anomalies due to prism-shapes bodies with arbitrary polarization: Geophysics. 29 : 517-531.
- CAPUTO, M. V. 1984. Origem do trend do Juruá e o arco do Jutai. Belém, Petrobras/DENOR (Rel. Interno).
- CAPUTO, M. V. & SILVA, O., B. 1990. Sedimentação e tectônica da bacia do Solimões: Origem e evolução das bacias sedimentares, Petrobras, p. 169-193.
- CLAERBOUT, J. F. 1976. Fundamentals of geophysical data processing. New York, McGraw-Hill Book, 274 p.
- ESTEVES, F. R. 1984. Mecanismo de placas da América Central-Pacífico Sul e sua influência na evolução tectono-sedimentar da bacia do Alto Amazonas durante o mesozóico. Manaus, Petrobras/DENOC, 14 p.
- GRADSHTEYN, I. S. & RYZHIK, I. M. 1965. Tables of integrals, series and products. New York, Academic Press,
- GRANT, F. S. 1973. Magnetic susceptibility mapping: the first year's experience In: ANN. INTERN. MTG. SOC. EXP. GEOPHYSICIST, 43, Mexico City, 1973.
- GUPTA, V. K. 1985. Mineral exploration aspects of gravity and aeromagnetic surveys in the Subdury Cobalt area, Ontario. Society of Exploration Geophysicists.
- HARTMAN, R. R., TESBEY, D. J.; FRIEDBERG, J. L. 1971. A system for rapid digital aeromagnetic interpretation: Geophysics, 36 : 891-918.
- HOERL, A. E. & KENNARD, R. W. 1971. Ridge regression: biased estimation for nonorthogonal problems. Technometrics, 12 : (1) : 55-67.

- HOOD, P. 1965. Gradient measurement in aeromagnetic surveying. *Geophysics*, 30 : 891-902.
- JAIN, S. 1976. An automatic method of direct interpretation of magnetic profiles. *Geophysics*, 41 : 531-541.
- JUCÁ, G. A. C., CARNEIRO, R. G. ; GOULARD, J. P. de M. 1977. Investigação sísmica na bacia do Alto Amazonas. Belém, Petrobras/DENOR. (Rel. Interno).
- KINGSTON, D. R., DISHROON, C. P. ; WILLIAMS, P. A. 1983. Global basin classification system: *Am. Assoc. Petr. Geol. Bull.*, 67 : 2175-2193.
- KLEMME, H. D. 1980. Petroleum basin - classification and characteristics. *J. Petr. Geol.*, 32 : 187-207.
- KU, C. C. & SHARP, J. 1983. Werner deconvolution for automatic interpretation and its refinement using Marquardt inverse modeling. *Geophysics*, 48 : 754-774.
- LAWSON, C. L. & HANSON, R. J. 1974. Solving least squares problems. New Jersey, Prentice-Hall, 340 p.
- LEÃO, J. W. D. & SILVA, B. C. 1989. Discrete linear transformation of potential field data. *Geophysics*, 54 : 497-507.
- MENDIGUREM, J. A. & RICHTER, F. M. 1978. On the origin of compressional interplate stresses in South America. *Revista Brasileira de Geociências*, 8 : 324-352.
- NABIGHIAN, M. N. 1972. The analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37 : 507-517.
- NABIGHIAN, M. N. 1974. Additional comments on the analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross section. *Geophysics*, 39 : 85-92.
- NABIGHIAN, M. N. 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transform: Fundamental relations. *Geophysics*, 49 : 780-786.
- NAUDY, H. 1971. Automatic determination of depth on aeromagnetic profiles. *Geophysics*, 14 : 812-830.

- O'BRIEN, D. P. 1971. CompuDepth, a new method for depth to basement computation. *Geophysics*, 38 : 187.
- PORTO, R. & ASMUS, H. E. 1972. Classificação das bacias sedimentares brasileiras segundo a tectônica de placas. In: CONGRESSO BRAS. GEOLOGIA, 26, Belém, 1972. *Anais... Belém, SBG. v. 2, p.*
- REFORD, M. S. 1980. Magnetic Method. *Geophysics*, 45 : 1640-1658.
- REID, A. B.; ALLSOP, J. M.; GRANSER, H.; MILLETT, A., J. ; SOMERTON, I. W. 1990. Magnetic interpretation in three dimensional using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55 : 80-91.
- SILVA, J. B. da & HOHMANN, G. W. 1984. Airborne magnetic susceptibility mapping. *Explor. Geophys.*, 15 : 1-13.
- SLACK, H. A., LYNCH, V. M., & LANGAN, L. 1967. The geomagnetic gradiometer. *Geophysics*, 32 : 877-892.
- STANLEY, J. M. 1977. Simplified magnetic interpretation of the geologic contact and thin dike. *Geophysics*, 42 : 1236-1240.
- SZATMARI, P. 1975. Evaporitos da bacia do Amazonas. Rio de Janeiro. Petrobras/DEXPRO, (Rel. Interno).
- SZATMARI, P. 1983. Amazon rift and Pisco Juruá: the relation to the separation in North America from Gondwana. *Geology*, 11 : 300-304.
- TELFORD, W.; W., GELDART, L. P.; SHERIF, R. E. ; REIS, D. A. 1976. *Applied Geophysics*. Cambridge, Cambridge University Press, 872 p.
- THOMPSON, D. T. 1982. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47 : 31-37.
- THROUW, R. A. J. 1982. Análise microtectônica em diabásio. Rio de Janeiro. Petrobras/CEN-PES, (Rel. Interno).

WERNER, S. 1953. Interpretation of magnetic anomalies at sheet-like bodies. Sver. Geol. Undersök, ser. C. C. Årsbok 43, N:06