

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

SEPARAÇÃO REGIONAL-RESIDUAL EM MAGNETOMETRIA ATRAVÉS
DE CAMADAS EQUIVALENTES

Tese Apresentada por

JESSÉ CARVALHO COSTA

como requisito parcial à obtenção do grau em

MESTRE EM CIÊNCIAS

Na área de

GEOFÍSICA

Conferido pelo Curso de Pós-Graduação em

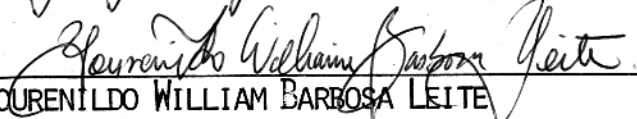
Geociências da

Universidade Federal do Pará

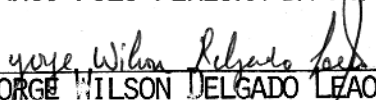
Aprovado: 28 de dezembro de 1987

Comitê de Tese


JOÃO BATISTA CORREIA DA SILVA (ORIENTADOR)


LOURENILDO WILLIAM BARBOSA LEITE


MARCO POLO PEREIRA DA BOA HORA


JORGE WILSON DELGADO LEÃO

SUMÁRIO

PAG

AGRADECIMENTOS

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

RESUMO	01
ABSTRACT	02
1. INTRODUÇÃO	03
2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO	08
2.1 Princípio da Camada Equivalente	08
2.2 Modelo para Separação Regional-Residual	08
2.3 Modelo Matemático	09
2.3.1 Formulação Contínua	09
2.3.2 Formulação Discreta	14
3. RESULTADOS COM DADOS SINTÉTICOS	20
3.1 Expressões para os Filtros no Domínio dos números de Onda	20
3.1.1 Filtro Correspondente ao Método Proposto	20
3.1.2 Filtro de Spector	21
3.1.3 Filtro de Syberg	23
3.2 Considerações Práticas sobre a Aplicação dos Filtros...	25
3.2.1 Filtros de Spector e Syberg	25
3.2.2 Filtro Proposto	25
3.2 Descrição dos Testes com Dados Sintéticos	27
3.3.1 Primeiro Teste	27
3.3.2 Segundo Teste	28
3.3.3 Terceiro Teste	29
3.4 Discussão dos Resultados	30
4. APLICAÇÃO A DADOS REAIS	53
4.1 Sumário Geológico	53
4.2 Separação Regional-Residual	54
4.2.1 Discussão dos Resultados	55
5. CONCLUSÕES	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
APÊNDICE	78

AGRADECIMENTO

Ao professor Dr. João Batista Correa da Silva, orientador desta tese, pelos ensinamentos, incentivo e paciência durante a elaboração deste trabalho.

Ao professor Ms. Jorge Wilson Delgado Leão , pelo acompanhamento , sugestões e desenvolvimento do software básico utilizado neste trabalho.

Aos professores, Dr. Lourenildo W. Barbosa Leite e Dr. Marco Polo Pereira da Boa Hora, membros da banca examinadora pela leitura crítica e sugestões à conclusão deste trabalho.

As colegas Simone da Graça Fraiha Lopes e Jacira Felipe Beltrão, pelas discussões e incentivo.

Aos professores, colegas e funcionários do CG pelos ensinamentos, incentivo e apoio no decorrer do trabalho.

A Glaydes Pereira Pimentel , pela gentileza e boa vontade na execução dos serviços datilográficos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para a elaboração deste trabalho.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS		PAG
01	- Modelo de camadas equivalentes	10
02	- Campo total no polo para primeiro teste com dados sintéticos	32
03	- Disposição das fontes rasas para o primeiro teste com dados sintéticos	33
04	- Disposição das fontes profundas para o primeiro teste com dados sintéticos	34
05	- Disposição das fontes em perfil para o primeiro teste com dados sintéticos	35
06	- Campos residual e regional teóricos para o primeiro teste com dados sintéticos.....	36
07	- Campos residual e regional calculados pelo método de Spector	37
08	- Campos residual e regional calculados pelo método de Syberg	38.
09	- Campos residual e regional calculados pelo método proposto	39
10	- Campo total no polo para o segundo teste com dados sintéticos	40
11	- Disposição das fontes rasas para o segundo teste com dados sintéticos	41
12	- Disposição das fontes profundas para o segundo teste com dados sintéticos	42
13	- Disposição das fontes em perfil para o segundo teste com dados sintéticos.....	43
14	- Campos residual e regional teóricos para o segundo teste com dados sintéticos	44
15	- Campos residual e regional calculados pelo método de Spector	45
16	- Campos residual e regional calculados pelo método de Syberg	46
17	- Campos residual e regional calculados pelo	

	método proposto	47
18	- Campo total no polo para o terceiro teste com dados sintéticos	48
19	- Disposição das fontes rasas para o terceiro teste com dados sintéticos	49
20	- Disposição das fontes profundas para o terceiro teste com dados sintéticos	50
21	- Disposição em perfil das fontes para o terceiro teste com dados sintéticos	51
22	- Campos residual e regional teóricos para o terceiro teste com dados sintéticos	52
23	- Campos residual e regional calculados pelo método de Spector	53
24	- Campos residual e regional calculados pelo método de Syberg	54
25	- Campos residual e regional calculados pelo método proposto	55
26	- Campo total reduzido ao polo de dados aeromagnéticos da Bacia do Médio Amazonas.....	60
27	- Campo residual calculado pelo método proposto	61
28	- Campo regional calculado pelo método proposto	62
29	- Principais feições lineares do campo residual	63
30	- Principais anomalias e feições lineares do campo regional	64

RESUMO

Os métodos atualmente empregados na separação regional-residual de anomalias de campo potencial podem ser classificados em quatro tipos: suavização visual, ajuste de polinômios e técnicas espectrais. O primeiro é bastante subjetivo e depende em grande parte da experiência do intérprete. Uma limitação de todos estes processos, exceto algumas técnicas espectrais, é sua dificuldade em incorporar informação a priori sobre a distribuição das fontes, exceto, indiretamente, através da exigência de suavidade para anomalia regional. O Método de filtragem entretanto, quando precedido da análise do espectro dos dados, pode levar em conta informação relevante sobre as fontes. Este é, contudo, operacionalmente complexo e depende em parte da experiência do intérprete.

Esta tese apresenta um novo método para separação regional-residual baseado no princípio da camada equivalente. As fontes do campo são consideradas concentradas em dois grupos com profundidades médias distintas, sendo o campo regional causado por uma camada equivalente de dipolos enquanto as fontes profundas são representadas por uma camada de monopolos magnéticos. O problema de separação de anomalias é então equivalente à determinação da distribuição de magnetização em cada camada. O caráter subdeterminado deste problema, particularmente na formulação discreta, permite que as fontes sejam estendidas muito além da área processada, o que minimiza o efeito de borda, facilitando o processamento de áreas densamente amostradas.

Testes com dados sintéticos mostram o desempenho do método proposto em relação aos métodos espectrais equivalentes. O método proposto é também aplicado a dados aeromagnéticos de Bacia do Médio Amazonas.

ABSTRACT

The currently employed methods for regional-residual separation of potential field anomalies may be grouped in four types: graphical smoothing, polynomial fitting and filtering. The first is very subjective and dependent on the interpreter experience. A disadvantage of all them, but the filtering method is the difficulty to incorporate a priori information about the sources besides the fact that the regional field is smoother than the residual field. The filtering method, however, when preceded by a spectral analysis of the data can incorporate relevant a priori information about the sources, but it is operationally complex.

This work presents a new method for regional-residual separation based on the equivalent layer technique. The sources are assumed to be concentrated at two different depths, being the shallow ones responsible for the residual field and the deep ones responsible for the regional field. The shallow sources are approximated by an equivalent layer of dipoles and the deep sources by an equivalent layer of magnetic poles. Then, the problem of regional-residual separation consists in computing the intensities of both the shallow and the deep equivalent layers. This is equivalent to the solution of a linear inverse problem which is formulated as an underdetermined least squares problem. This procedure minimizes the edge effect which makes this method particularly efficient in processing densely sampled areas.

Tests using synthetic data are presented in order to demonstrate the performance of the proposed method as compared with other filtering techniques in the wavenumber domain. The application of the proposed method to aeromagnetic data from the Middle Amazon Basin is also presented.

1. INTRODUÇÃO

A interpretação de dados de campo potencial pode ser qualitativa e/ou quantitativa. Em magnetometria, a interpretação qualitativa consiste na identificação de anomalias e feições lineares no mapa com os dados processados, ou dos mapas com os dados reduzidos ao polo, continuados para cima ou para baixo, ou do mapa pseudo-gravimétrico. A interpretação quantitativa por sua vez pertence a separação regional-residual e o modelamento das anomalias regionais e/ou residuais.

A separação regional-residual é a tentativa de discriminar as anomalias devidas a estruturas regionais, comumente associadas a fontes extensas e profundas, das anomalias devidas a estruturas locais, geralmente associadas a fontes pouco extensas e rasas. É iniciada já na fase de coleta dos dados, pois o intervalo de amostragem descarta anomalias com conteúdo espectral de alta energia acima da frequência de Nyquist, enquanto a dimensão da área total amostrada condiciona a extensão do que se postula como regional. Finalmente, o modelamento procura associar modelos geofísicos simples às anomalias regionais ou residuais e estimar os parâmetros que definem estes modelos para obter informação quantitativa sobre as fontes na subsuperfície.

O problema central da separação de anomalias de campo potencial é a insuficiência quantitativa na caracterização dos termos anomalia regional e anomalia residual, para cada conjunto de dados. Primordialmente, o regional foi definido qualitativamente como um campo suave conveniente associado aos dados, e o residual como a diferença entre os dados corrigidos e o regional. Os vários métodos de determinação do campo regional diferem nas técnicas e critérios para encontrar este campo suave.

O método mais antigo para obtenção do campo regional é o de suavização visual, que consiste na associação de um campo suave aos dados corrigidos, a partir da experiência, ou intuição, do intérprete sobre as feições supostamente regionais. O residual é calculado pela diferença entre os dados e o regional

ajustado. Neste processo informação a priori é incorporada, em primeiro lugar pela definição de regional como um campo suave e, em segundo lugar, pela integração de informação geológica pelo intérprete durante o processo de suavização. O caráter subjetivo, a difícil aplicação a dados bidimensionais (mapas) e a áreas ex ten sas, são duas sérias desvantagens desta técnica, dependendo da complexidade dos dados.

O trabalho de Griffin (1949), sugere um processo que mantém as características suaves para o campo regional, diminui a subjetividade e é de fácil aplicação a áreas extensas para da dos regularmente espaçados. Neste método o regional é de fini do tomando-se a média de "N" valores do campo sobre uma circunferência centrada no ponto onde se deseja calcular o regional. O resi dual é a diferença entre os dados corrigidos e o regional calculado. Aqui a informação a priori está na hipótese de suavidade para o campo regional controlada pela escolha do raio da circunferência sobre a qual será calculada a média dos dados. Esta es col ha é baseada na informação a priori disponível ao intérprete e está parcialmente relacionada à extensão das anomalias de interesse.

A tendência de empregar técnicas numéricas para separa ção regional residual, prosseguiu com o artigo de Agocs (1951), que propõe o método de ajuste de polinômios de pequeno grau (geralmente menor ou igual a três) aos dados através do método de mínimos quadrados como forma de se obter o campo regional. É interessante observar que o ajuste de uma função a um conjunto de dados através de mínimos quadrados pode ser entendido, a partir do método da máxima verossimilhança (Menke, 1984), pressupondo-se que o ruído presente nos dados é aleatório, aditivo, com média zero e identicamente distribuído com distribuição Gaussiana. Este resultado tem por consequência que o campo residual é uma amostragem de uma variável aleatória Gaussiana com média zero.

A hipótese de média nula para o campo residual pode ser contornada segundo o artigo de Skeels (1967) através da escolha das partes menos afetadas do campo observado para o ajuste. Esta escolha pode ser efetuada através de um ajuste preliminar, onde todos os dados são utilizados. Em seguida, as regiões de

maior resíduo são descartadas para um segundo ajuste. Ainda, apenas a hipótese de suavidade norteia a caracterização de anomalia regional, ficando a arbitrariedade do processo na escolha do grau do polinômio a ser ajustado, embora Oldham e Sutherland (1955) tenham determinado um critério menos subjetivo para a escolha do grau do polinômio, ajustando polinômios ortogonais (Chebichev) aos dados.

Na década de sessenta, com o advento dos computadores digitais e de algoritmos eficientes para o cálculo da transformada de Fourier discreta, o problema de separação de anomalias de campo potencial começou a ser abordado através de técnicas espectrais. O fundamento é que as funções de campo potencial obedecem razoavelmente às condições de Dirichlet (exceto a condição de periodicidade). Portanto as anomalias locais devem ter conteúdo espectral de maior energia na região de alta frequência do espectro, enquanto as anomalias regionais, por serem suaves, devem estar representadas na região de baixa frequência do espectro dos dados. A separação é efetuada através de convolução, no domínio espacial, ou de multiplicação do espectro dos dados por filtros "regionais" ou "residuais", geralmente filtros passa-baixa ou passa-alta, respectivamente, com frequência de corte especificada pelo intérprete com base no espectro da anomalia. Os trabalhos de Dean (1958), Fuller (1967) e Zurflueh (1967) mostram o emprego deste método. Os métodos de filtragem necessitam de dados amostrados sobre uma malha regular e pressupõe que os espectros das anomalias regionais e residuais se superpõe em uma região de baixa energia. Comparações entre o método de ajuste de polinômios e as técnicas de filtragem são feitas nos artigos de Zurflueh (1967) e Ulrych (1968).

Uma nova abordagem ao problema foi proposta por Spector (1968), levando em conta que frequentemente há uma superposição substancial no espectro entre as anomalias causadas por fontes rasas e as devidas a fontes profundas. Suas premissas restringem as fontes que geram o campo e não a forma das anomalias regionais e residuais. Neste trabalho é mostrado que o espectro de vários modelos (prismas, cilindros, etc) pode ser fatorado de modo que cada fator depende de um único parâmetro do modelo e que o

fator associado à profundidade é dominante. Também é mostrado que o estudo de distribuições complexas de fontes pode ser efetuado estatisticamente considerando as fontes grupadas em conjuntos distintos e associado um "prisma médio" representativo à cada conjunto. A informação a priori sobre o regional e o residual é então incorporada considerando-se que as fontes totais estão agrupadas em dois conjuntos distintos, um raso e outro profundo, e que o modelo representativo para as fontes rasas é um prisma de pequena espessura em relação a profundidade, enquanto um prisma de espessura infinita é o modelo mais representativo para as fontes profundas. Sob estas premissas básicas e outras condições simplificadoras, é construído um filtro casado, a partir do espectro médio dos dados reduzidos ao polo, que separa a contribuição de cada conjunto de fontes tomados como sendo os causadores dos campos residual e regional. Este método é, sem dúvida, muito mais justificável teoricamente e, embora as hipóteses sobre as fontes sejam muito restritivas e, portanto, nem sempre aplicáveis a todas as condições geológicas, sempre que elas forem razoáveis, esta abordagem será mais adequada que as anteriores. O emprego deste método necessita que os dados sejam reduzidos ao polo sobre uma malha regular.

O artigo de Syberg (1972) está baseado em duas críticas ao trabalho de Spector (1968). Em primeiro lugar, que se pressupõe que a média azimutal do espectro é representativa para efeito de separação das anomalias, devido as simplificações feitas sobre os modelos postulados e, em segundo, que a escolha de uma camada de dipolos para modelar o campo devido a fontes rasas e uma camada de monopólos para modelar o campo causado pelas fontes profundas substitui a informação estatística. Para chegar à expressão para o filtro casado de separação são necessárias hipóteses sobre o espectro da distribuição de magnetização das fontes. O filtro é desenhado interativamente sobre setores angulares do espectro de amplitude dos dados a fim de levar em conta as variações azimutais do espectro.

Outras abordagens alternativas ao problema de separação regional-residual citadas por Grant (1972) são: o modelamento direto, que tem a limitação de só poder ser efetuado em perfis

e o método de Strakhov (Strakhov, 1964; Strakhov e Lapina, 1967), que consiste em determinar um filtro linear que produza uma estimativa ótima, no sentido dos mínimos quadrados, de um espectro suavizado a partir do espectro dos dados, através da eliminação de componentes de ruído em quantidade determinada. A principal diferença, ainda segundo Grant (1972), entre o método de Strankhov e o método de Spector é que, no primeiro, o objetivo é modificar o espectro e, no segundo, o objetivo é fatorá-lo. Uma aplicação do método de Strakhov é apresentada por Naidu (1967).

Uma abordagem recente dada ao problema de separação regional-residual por Jacobsen (1987), utiliza como modelo uma distribuição uniforme de camadas sob o semi-espaco com densidade de magnetização aleatória e não correlacionadas entre si. Postula então como campo residual o campo produzido pelas camadas acima de um nível Z_0 e o campo regional o campo produzido pelas camadas abaixo do nível Z_0 . Estimativas destes campos são obtidas através de filtro de Wiener, cuja expressão no domínio dos números de onda é idêntica em forma ao filtro de continuação para cima.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um método de sepearação regional-residual, para dados aeromagnéticos, que leve em conta a presença de ruído aleatório nos dados, que mantenha em parte a informação a priori dos métodos de Spector (1968) e Syberg (1972) e, ao mesmo tempo, não apresente suas limitações que são as premissas sobre o caráter aleatório não correlacionado, das fontes regionais e residuais, o efeito de borda, que dificulta o processamento de áreas extensas, e as inconveniências operacionais do método interativo de Syberg.

A separação regional-residual é então formulada como um problema linear inverso e subdeterminado, o que permite contornar estas limitações, através do algoritmo proposto por Leão e Silva (1987). O campo observado é interpretado utilizando-se duas camadas equivalentes, uma de dipolos, mais rasa, e outra de monopólos, mais profunda, para modelar o campo das fontes locais e regionais respectivamente, como no método de Syberg (1972) e mais uma função arbitrária, para levar em conta a presença de ruído aleatório.

2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

2.1 - Princípio da Camada Equivalente

O método proposto para separação de anomalias aeromagnéticas utiliza o princípio da camada equivalente (Grant e West, 1965) na construção do modelo para fontes residuais e para fontes regionais. O artigo de Bodvarsson (1971) mostra que a componente total do campo magnético, medida sobre uma superfície sem fontes pode ser explicada por uma camada equivalente de dipolos situadas acima das fontes que geram o campo anômalo. As conclusões de Henderson (1970) implicam que uma camada de monopólos também consegue reproduzir completamente a anomalia de campo magnético total em uma região que não contenha fontes.

Como uma anomalia magnética real T^0 pode ser interpretada como a superposição de vários efeitos anômalos, ou seja,

$$T^0 = \sum_{i=1}^N T_i \quad (2.1)$$

e, como cada componente T pode ser interpretado por uma camada equivalente de monopólos ou dipolos podemos explicar o campo observado através de uma combinação arbitrária de camadas equivalentes.

→ 2.2 - Modelo para Separação Regional-Residual^R

O método proposto para separação de anomalias aeromagnéticas, parte dos dados reduzidos ao polo, e supõe que as fontes que produzem as anomalias estão separadas em dois grupos com profundidades médias bem distintas. Também supõe que o conjunto das fontes mais rasas possuem pequena espessura, enquanto que a espessura das fontes profundas é muito grande em relação à profundidade média do topo.

Nestas condições modelamos as fontes rasas por uma camada equivalente de dipolos, devido a pouca espessura deste con

junto de fontes. Já as fontes profundas são modeladas por uma camada de monopólos por possuírem grandes espessuras. Este modelo pode ser associado a situações geológicas de grande interesse tais como: bacias sedimentares onde os sedimentos foram depositados sobre uma superfície irregular do embasamento e, posteriormente, sofreram intrusão de rochas vulcânicas na forma de soleiras e diques.

2.3 - Modelo Matemático

O problema de se representar um campo magnético observado através de duas camadas equivalentes, como descrito na seção anterior não possui solução única, mesmo considerando-se conhecidas as profundidades de cada camada. Para garantir a unicidade é necessário que, além de se suporem conhecidas tais profundidades, vínculos sejam impostos sobre as distribuições superficiais de magnetização de ambas as camadas. Neste trabalho, postulamos o vínculo de menor norma Euclidiana para as distribuições superficiais de magnetização computadas a partir do campo observado.

A fim de levar em conta o ruído aleatório e a possível interferência de fontes fora da área amostrada, na formulação discreta, introduzimos uma função adicional $R_k(\bar{r})$ parametrizada por "k", que funciona como um estabilizador da solução, e modela as componentes que não podem ser explicadas pelas camadas.

2.3.1 - Formulação Contínua

A solução de problema proposto na seção anterior é construída considerando-se $T^0(\bar{r})$ o campo anômalo reduzido ao polo, medido sobre uma superfície sem fontes. Tomando-se $p_1(\bar{r}_1'; h_1)$ e $p_2(\bar{r}_2'; h_2)$ como as distribuições superficiais de magnetização nas camadas de dipolos e monopólos, respectivamente e $R_k(\bar{r})$ como uma função arbitrária que modela o ruído. Neste caso o modelo (figura 1) é expresso na seguinte forma,

$$T^0(\bar{r}) = \iint_{-\infty}^{+\infty} G(\bar{r} - \bar{r}_1') p_1(\bar{r}_1') dx_1' dy_1' + \iint_{-\infty}^{+\infty} G(\bar{r} - \bar{r}_2') p_2(\bar{r}_2') dx_2' dy_2' + R_k(\bar{r}) \quad (2.2)$$

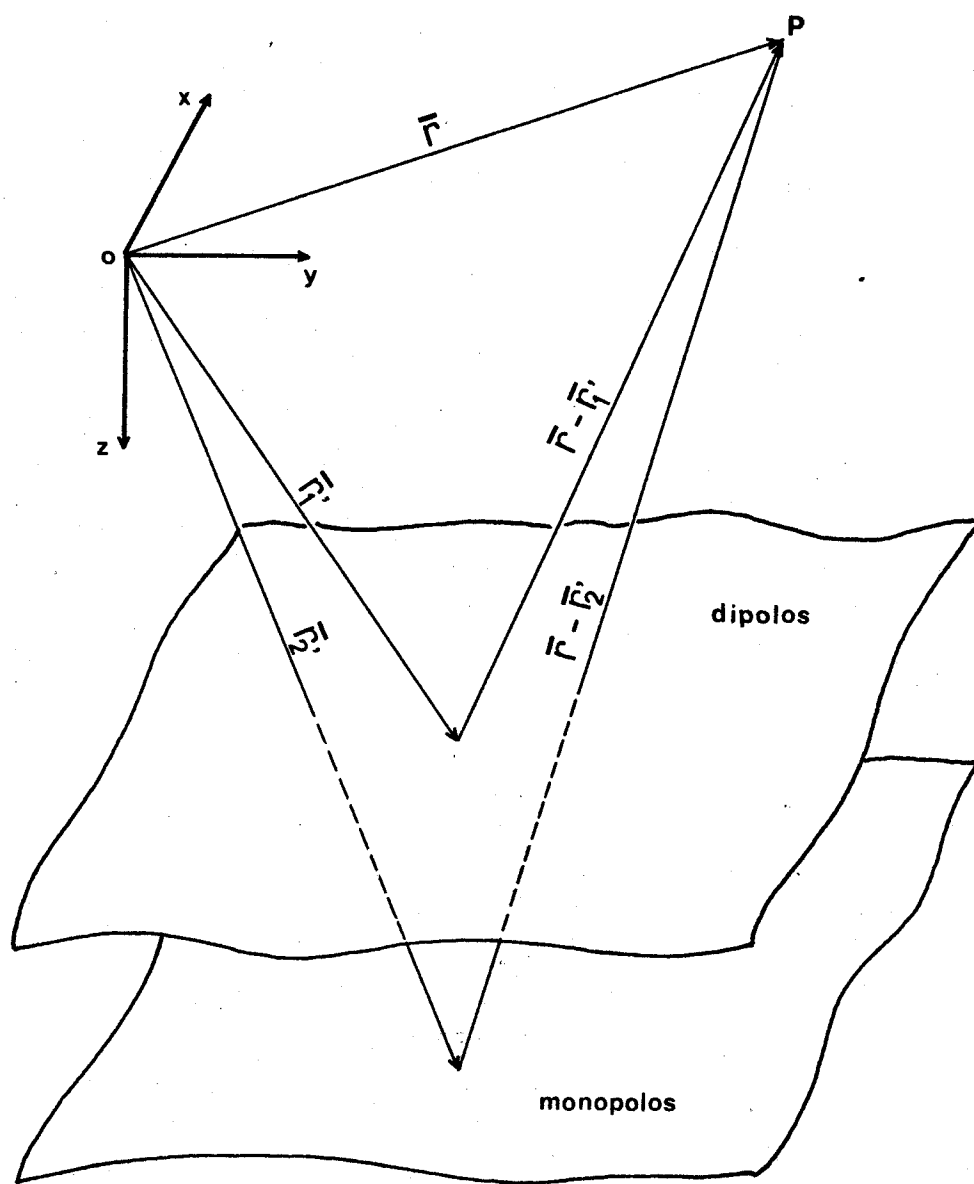


FIG.01 - Modelo de Camadas Equivalentes.

onde,

$$G_1(\bar{r}-\bar{r}'_1) = -\hat{k} \cdot \nabla (\hat{k} \cdot \nabla (1/(\bar{r}-\bar{r}'_1))) \quad (2.3)$$

e

$$G_2(\bar{r}-\bar{r}'_2) = -\hat{k} \cdot \nabla (1/(\bar{r}-\bar{r}'_2)) \quad (2.4)$$

onde $\hat{k}$ é o versor na direção da coordenada z . A camada de dipolos a profundidade h_2 ($h_2 > h_1$), e ∇ é o operador gradiente em relação as coordenadas de observação. O campo considerado regional é então,

$$T_{reg} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_2(\bar{r}-\bar{r}'_2) p_2(\bar{r}'_2) dx' dy' \quad (2.5)$$

e o campo residual é portanto

$$T_{reg} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_1(\bar{r}-\bar{r}'_1) p_1(\bar{r}'_1) dx' dy' \quad (2.6)$$

A determinação destes campos é obtida a partir da solução do problema,

$$\text{Min} (||p_1||^2 + ||p_2||^2 + ||p_3||^2) \quad (2.7-a)$$

sujeito ao vínculo,

$$T^0(\bar{r}) = G_1 * p_1 + G_2 * p_2 + G_3 * p_3 \quad (2.7-b)$$

onde o símbolo $*$ indica a operação de convolução e

$$G_3(x,y;x',y') = k \delta(x-x') \delta(y-y'), \text{ sendo } R_k(x,y) = G_3 * p_3 \quad (2.7-c)$$

onde $\delta(u)$ é a função delta de Dirac.

As soluções devem, necessariamente tornar o funcional abaixo estacionário. (Krasnov et ali, 1984),

$$\begin{aligned}
 F(p_1, p_2, p_3, L) = & \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \{ p_1^2(x', y') + p_2^2(x', y') + p_3^2(x', y') \} dx' dy' + \\
 & + \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} L(x, y) \{ T^0(x, y) - \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \{ G_1(\bar{r} - \bar{r}'_1) p_1(x', y') + \\
 & + G_2(\bar{r} - \bar{r}'_2) p_2(x', y') + G_3(x - x'; y - y') p_3(x', y') \} dx' dy' \} dx dy
 \end{aligned} \quad (2.8)$$

onde $L(x, y)$ é o multiplicador de Lagrange em cada ponto definido pelo par de coordenadas (x, y) . Pode-se demonstrar que (vide apêndice) a condição $\delta F(p_1, p_2, p_3, L) = 0$, onde δF é a variação do funcional F , implica nas seguintes relações,

$$p_1(x', y') = (1/2) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} L(x, y) G_1(\bar{r}'_1 - \bar{r}) dx dy, \quad (2.9)$$

$$p_2(x', y') = (1/2) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} L(x, y) G_2(\bar{r}'_2 - \bar{r}) dx dy \quad (2.10)$$

e

$$p_3(x', y') = (1/2) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} L(x, y) G_3(\bar{r}' - \bar{r}) dx dy. \quad (2.11)$$

Substituindo as equações (2.9), (2.10) e (2.11) em (2.7b) temos,

$$\begin{aligned}
 T^0(\bar{r}) = & (1/2) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \{ G_1(\bar{r} - \bar{r}'_1) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G_1(\bar{r}'_1 - \bar{r}'') L(x', y') dx' dy' + \\
 & + G_2(\bar{r} - \bar{r}'_2) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G_2(\bar{r}'_2 - \bar{r}'') L(x', y') dx' dy' + \\
 & + G_3(x - x''; y - y'') \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G_3(x' - x''; y' - y'') L(x', y') dx' dy' \} dx'' dy''.
 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Considerando que $L(x, y)$ é absolutamente integrável, podemos efetuar a transformada de Fourier da expressão (2.12) em relação às variáveis x, y . Observando que as integrais que aparecem nesta equação são convoluções, temos,

$$F\{T^0(x,y)\} = (1/2)F\{G_1*(G_1*L) + G_2*(G_2*L) + G_3*(G_3*L)\} \quad (2.13)$$

onde $F\{.\}$ representa a transformada de Fourier.

A partir do teorema da convolução (Bracewell, 1965), obtemos,

$$F\{T^0(x,y)\} = (1/2)\{(F\{G_1\})^2 + (F\{G_2\})^2 + (F\{G_3\})^2\} \cdot F\{L\} \quad (2.14)$$

e portanto,

$$F\{L\} = (2F\{T^0(x,y)\}) / \{(F\{G_1\})^2 + (F\{G_2\})^2 + (F\{G_3\})^2\}. \quad (2.15)$$

Substituindo este resultado na transformada de Fourier das equações (2.9) e (2.10), segue que

$$F\{p_1\} = (1/2)F\{G_1\} \cdot F\{L\} = F\{G_1\}F\{T^0\} / \{(F\{G_1\})^2 + (F\{G_2\})^2 + (F\{G_3\})^2\} \quad (2.16)$$

$$F\{p_2\} = (1/2)F\{G_2\} \cdot F\{L\} = F\{G_2\}F\{T^0\} / \{(F\{G_1\})^2 + (F\{G_2\})^2 + (F\{G_3\})^2\}. \quad (2.17)$$

As transformadas de Fourier inversas $\hat{p}_1$ e $\hat{p}_2$ destas expressões constituem portanto a solução do problema.

As estimativas do campo regional e do campo residual são obtidas a partir das expressões,

$$\hat{T}_{res} = G_1 * \hat{p}_1 \quad \text{e} \quad \hat{T}_{reg} = G_2 * \hat{p}_2$$

e portanto, levando em conta o teorema da convolução aplicado as equações acima, e ainda, que $F\{G_3\} = k$, segue finalmente que

$$F\{\hat{T}_{res}\} = \frac{(F\{G_1\})^2}{\{(F\{G_1\})^2 + (F\{G_2\})^2 + k^2\}} \cdot F\{T^0\} \quad (2.18)$$

e

$$F\{\hat{T}_{reg}\} = \frac{(F\{G_1\})^2}{\{(F\{G_1\})^2 + (F\{G_2\})^2 + k^2\}} \cdot F\{T^0\}. \quad (2.19)$$

A transformada de Fourier inversa das duas expressões acima, produz estimativas dos campos regional e residual.

É importante salientar que as equações (2.18) e (2.19), representam um processo de filtragem do campo T^0 onde, os filtros de separação das anomalias residual e regional são dados pelas expressões abaixo,

$$H_{\text{res}} = \frac{(F\{G_1\})^2}{\{(F\{G_1\})^2 + (F\{G_2\})^2 + \kappa^2\}} \quad (2.20)$$

$$H_{\text{reg}} = \frac{(F\{G_2\})^2}{\{(F\{G_1\})^2 + (F\{G_2\})^2 + \kappa^2\}} \quad (2.21)$$

2.3.2 Formulação discreta

Para o tratamento de dados reais é necessária uma formulação discreta equivalente ao problema abordado na seção anterior. Para dados observados, o campo é amostrado irregularmente e, em geral, é posteriormente interpolado sobre uma malha retangular. Neste caso, as duas camadas equivalentes são representadas por distribuições discretas de fontes magnéticas. A primeira, representando as fontes rasas, é formada por uma distribuição de bipolos, com separação entre os monopólos de sinais opostos e profundidade estabelecidas. A segunda, é uma camada de monopólos, com profundidade também postulada a priori, representando as fontes profundas. As duas camadas possuem extensão finita que deve entretanto ser maior que a da janela de observação a fim de atenuar o efeito de borda e levar em conta a presença de possíveis fontes interferentes fora da região amostrada. Nestas condições o modelo correspondente a equação (2.2) é expresso pelo sistema de equações abaixo,

$$T_i^0 = \sum_{j=1}^{M1} G_{ij}^{\text{res}} p_j^{\text{res}} + \sum_{j=1}^{M2} G_{ij}^{\text{reg}} p_j^{\text{reg}} + \kappa p_i^r \quad i=1, \dots, N \quad (2.22)$$

onde, T_i^0 é a i -ésima observação, G_{ij}^{res} é um elemento da matriz de sensibilidade da camada de bipolos, G_{ij}^{reg} , é um elemento da matriz de sensibilidade para camada de monopolos, p_j^{res} ($j=1, \dots, M1$) é o valor da intensidade de magnetização para camada de bipolos e p_j^{reg} ($j=1, \dots, M2$), o vetor de intensidade de magnetização para camada de monopolos, p_i^r , é o vetor que leva em conta o ruído presente nos dados, não modelados pelas duas camadas, κ é um parâmetro que estima a amplitude do ruído que se considera para os dados. Em notação matricial,

$$\bar{T}^0 = \bar{G}_{res} \bar{p}_{res} + \bar{G}_{reg} \bar{p}_{reg} + \kappa \cdot \bar{I} \bar{p}_r \quad (2.23)$$

com,

$$\bar{G}_{res} = (G_{ij}^{res})_{N \times M1}; \quad \bar{G}_{reg} = (G_{ij}^{reg})_{N \times M2} \quad (2.24)$$

$\bar{I}$ é a matriz identidade de ordem N e,

$$\bar{T}^0 = (T_i^0)_{N \times 1}; \quad \bar{p}_{res} = (p_j^{res})_{M1 \times 1}; \quad \bar{p}_{reg} = (p_j^{reg})_{M2 \times 1}; \quad \bar{p}_r = (p_i^r)_{N \times 1};$$

Por hipótese consideramos que o campo residual seja dado por,

$$\bar{T}_{res} = \bar{G}_{res} \cdot \bar{p}_{res} \quad (2.25)$$

e o campo regional,

$$\bar{T}_{reg} = \bar{G}_{reg} \cdot \bar{p}_{reg} \quad (2.26)$$

Como pela própria natureza do modelo ($M1+M2+N$), o problema de se estimar $\bar{p}_{res}$ e $\bar{p}_{reg}$ a partir de $\bar{T}$ é subdeterminado. Temos portanto, que impor vínculos sobre a solução para que ela seja única. Seguindo a formulação contínua, exigiremos que a solução tenha norma Euclidiana mínima, isto é,

$$\text{Min } (\bar{p}_{\text{res}}^T \bar{p}_{\text{res}} + \bar{p}_{\text{reg}}^T \bar{p}_{\text{reg}} + \bar{p}_r^T \bar{p}_r) \quad (2.27a)$$

sujeito a,

$$\bar{T}^0 = \bar{G}_{\text{res}} \bar{p}_{\text{res}} + \bar{G}_{\text{reg}} \bar{p}_{\text{reg}} + \kappa \cdot \bar{I} \bar{p}_r \quad (2.27b)$$

ou ainda,

$$\text{Min } \bar{p}^T \bar{p} \quad (2.28a)$$

sujeito a,

$$\bar{T}^0 = \bar{G} \cdot \bar{p} \quad (2.28b)$$

com, $\bar{p}^T = (\bar{p}_{\text{res}}^T | \bar{p}_{\text{reg}}^T | \bar{p}_r^T)$ e $\bar{G} = (\bar{G}_{\text{res}} | \bar{G}_{\text{reg}} | \kappa \cdot \bar{I})$

cujas a solução é (Menke, 1984),

$$\hat{\bar{p}} = \bar{G}^T (\bar{G} \bar{G}^T)^{-1} \cdot \bar{T}^0 \quad (2.29)$$

por tanto o campo residual estimado é dado por,

$$\hat{\bar{T}}_{\text{res}} = (\bar{G}_{\text{res}} | \bar{O} | \bar{O}) \cdot \hat{\bar{p}} = \bar{G}_{\text{res}} \bar{G}_{\text{res}}^T (\bar{G}_{\text{res}} \bar{G}_{\text{res}}^T + \bar{G}_{\text{reg}} \bar{G}_{\text{reg}}^T + \kappa^2 \bar{I})^{-1} \cdot \bar{T}^0, \quad (2.30)$$

onde $\bar{O}$ representa a matriz nula, e o campo regional estimado,

$$\hat{\bar{T}}_{\text{reg}} = (\bar{O} | \bar{G}_{\text{reg}} | \bar{O}) \cdot \hat{\bar{p}} = \bar{G}_{\text{reg}} \bar{G}_{\text{reg}}^T (\bar{G}_{\text{res}} \bar{G}_{\text{res}}^T + \bar{G}_{\text{reg}} \bar{G}_{\text{reg}}^T + \kappa^2 \bar{I})^{-1} \cdot \bar{T}^0. \quad (2.31)$$

Nas equações (2.30) e (2.31) acima, a matriz a ser invertida é dada por,

$$\bar{B} = (\bar{G}_{\text{res}} \bar{G}_{\text{res}}^T + \bar{G}_{\text{reg}} \bar{G}_{\text{reg}}^T + \kappa^2 \bar{I}). \quad (2.32)$$

esta matriz é da ordem do número de observações e, portanto, o processamento de áreas densamente amostradas, se efetuado diretamente, requer a inversão de matrizes de ordem elevada, o que tornaria esta abordagem ineficiente. Porém, como a matriz $\bar{B}$ só depende da posição relativa entre as fontes equivalentes e destas em relação às observações, em uma malha regular, o processamento pode ser realizado por parte, tomando-se janelas pequenas adjacentes e processando cada janela sequencialmente. Este procedimento reduz a ordem da matriz a ser investida e a inversão da matriz $\bar{B}$ é efetuada uma única vez.

Para reduzir o efeito de borda, devido ao tamanho pequeno da janela de observações para cálculo, somente um ponto da janela é processado (Leão e Silva, 1987) e portanto as expressões se reduzem à forma,

$$\hat{T}_{res}^i = \bar{g}_{res}^T \bar{G}_{res}^T (\bar{G}_{res} \bar{G}_{res}^T + \bar{G}_{reg} \bar{G}_{reg}^T + \kappa^2 \bar{I})^{-1} \bar{T}_i^0 \quad (2.33)$$

$$\hat{T}_{reg}^i = \bar{g}_{reg}^T \bar{G}_{reg}^T (\bar{G}_{res} \bar{G}_{res}^T + \bar{G}_{reg} \bar{G}_{reg}^T + \kappa^2 \bar{I})^{-1} \bar{T}_i^0 \quad (2.34)$$

onde $\bar{g}_{res}^T$ e $\bar{g}_{reg}^T$ são os vetores linha das matrizes $\bar{G}_{res}$ e $\bar{G}_{reg}$ respectivamente correspondentes ao i-ésimo ponto processado, e $\bar{T}_i^0$ é o vetor contendo as observações cujos valores processados são $\hat{T}_{res}^i$ e $\hat{T}_{reg}^i$. Portanto, para dados regularmente espaçados, as equações (2.33) e (2.34) podem ser escritas na forma,

$$\hat{T}_{res}^i = \bar{S}^T \bar{T}_i^0 \quad (2.35)$$

e

$$\hat{T}_{reg}^i = \bar{G}^T \bar{T}_i^0 \quad (2.36)$$

onde os operadores,

$$\bar{S}^T = \bar{g}_{res}^T \bar{G}_{res}^T (\bar{G}_{res} \bar{G}_{res}^T + \bar{G}_{reg} \bar{G}_{reg}^T + \kappa^2 \bar{I})^{-1} \quad (2.37)$$

e

$$\bar{G}^T = \bar{g}_{reg}^T \bar{G}_{reg}^T (\bar{G}_{res} \bar{G}_{res}^T + \bar{G}_{reg} \bar{G}_{reg}^T + \kappa^2 \bar{I})^{-1} \quad (2.38)$$

são invariantes para qualquer ponto i . Assim, aplicando-se os operadores $\bar{S}^T$ e $\bar{G}^T$ por toda a área, de modo semelhante a uma convolução discreta, obtemos os mapas com os campos residual e regional estimados.

O número de fontes equivalentes utilizadas no cálculo é tal que as camadas se estendam muito além da janela de observações, o que atenua o efeito de borda, eliminando a necessidade de se estender, artificialmente, a área a ser processada como acontece nos métodos espectrais. A escolha de janelas tão pequenas como 11×11 pontos permite o rápido processamento de áreas densamente amostradas.

A determinação do parâmetro κ que aparece nestas equações, obedeça a critérios análogos aos descritos por Hoerl e Kennard (1970) para determinação do parâmetro λ no método Ridge Regression. Tanto neste caso como naquele, o objetivo é a estabilização dos estimadores pela adição de um termo constante aos valores diagonais da matriz a ser invertida, o que em nosso problema corresponde a levar em conta o ruído presente nos dados.

Para padronizar a escolha do parâmetro κ , a matriz

$$\bar{A} = \bar{G}_{res} \bar{G}_{res}^T + \bar{G}_{reg} \bar{G}_{reg}^T \quad (2.39)$$

é normalizada de modo que cada elemento a'_{ij} seja definido como

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{(a_{ii} \cdot a_{jj})^{1/2}} \quad (2.40)$$

onde a_{ij} são os elementos da matriz $\bar{A}$. Portanto, definindo os elementos d_{ii} da diagonal da matriz de normalização como

$$d_{ii} = (a_{ii})^{-1/2} \quad (2.41)$$

temos então,

$$\bar{\bar{A}}' = \bar{\bar{D}} \bar{\bar{A}} \bar{\bar{D}} \quad (2.42)$$

e

$$\bar{\bar{A}} = \bar{\bar{D}}^{-1} \bar{\bar{A}}' \bar{\bar{D}}^{-1} \quad (2.43)$$

considerando estes resultados e o fato que a normalização deve ser removida, os operadores $\bar{S}^T$ e $\bar{G}^T$ tomam a forma,

$$\bar{S}^T = \bar{g}_{\text{res}}^T \bar{G}_{\text{res}}^T \bar{\bar{D}} (\bar{\bar{D}} \bar{\bar{A}} \bar{\bar{D}} + \kappa^2 \bar{\bar{I}})^{-1} \bar{\bar{D}} \quad (2.44)$$

e

$$\bar{G}^T = \bar{g}_{\text{reg}}^T \bar{G}_{\text{reg}}^T \bar{\bar{D}} (\bar{\bar{D}} \bar{\bar{A}} \bar{\bar{D}} + \kappa^2 \bar{\bar{I}})^{-1} \bar{\bar{D}} \quad (2.45)$$

que são as expressões utilizadas para o cálculo das transformações representadas pelas equações (2.35) e (2.36).

3. RESULTADOS COM DADOS SINTÉTICOS

Com a finalidade de verificarmos o desempenho do método proposto, este foi aplicado a dados magnéticos obtidos a partir de modelos sintéticos, simulando situações geológicas não só onde as hipóteses postuladas sobre as fontes são aproximadamente corretas como também em casos onde tais hipóteses são violadas. A estes dados foram aplicados, além do método apresentado, os processos de Spector (1968) e de Syberg (1972), para separação de anomalias residuais e regionais.

3.1 Expressões para os Filtros no Domínio dos Números de Onda

Para compararmos melhor o desempenho destes processos é conveniente que eles sejam analisados no domínio dos números de onda. Como os filtros de Spector (1968) e Syberg (1972) são originalmente especificados no domínio dos números de onda, determinaremos a expressão do filtro proposto neste domínio.

3.1.1 Filtro Correspondente ao Método Proposto.

Da equação (2.19), o filtro para obtenção do campo regional é dado por,

$$H_{\text{reg}} = \frac{1}{1 + \{(F\{G_1\})^2 + \kappa^2\} / (F\{G_2\})^2} \quad (3.1)$$

Como o método é aplicado aos dados reduzidos ao polo, segue que ,

$$G_1(\vec{r}, \vec{r}') = -\vec{k} \cdot \nabla \{ \vec{k} \cdot \nabla ((x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2)^{-1/2} \} \quad (3.2)$$

isto é, se a profundidade da camada de dipolos é h_1

$$G_1(\vec{r}, \vec{r}') = -(\partial^2 / \partial z^2) \{ ((x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-h_1)^2)^{-1/2} \} \quad (3.3)$$

dã mesma maneira, se a camada de monopolos está a uma profundidade h_2 , segue que,

$$G_2(\bar{r}, \bar{r}') = -(\partial/\partial z) \{ ((x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-h_2')^2)^{-1/2} \} \quad (3.4)$$

Utilizando o resultado (Bhattacharyya, 1965) que,

$$F\{(x^2 + y^2 + z^2)^{-1/2}\} = r^{-1} \exp(-|z|.r) \quad , \quad r = (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (3.5)$$

onde u e v são os números de onda nas direções x e y , respectivamente, e tendo em vista as equações (3.3) e (3.4), e ainda que o operador $(\partial^n/\partial z^n)$ no domínio dos espaços para funções harmônicas corresponde à multiplicação por $(-r)^n$ no domínio dos números de onda, segue portanto que

$$F\{G_1\} = -r \cdot \exp(-|z-h_1|.r) \quad (3.6)$$

e

$$F\{G_2\} = \exp(-|z-h_2|.r) \quad (3.7)$$

Finalmente, substituindo as equações (3.6) e (3.7) na equação (3.1), e fazendo $z=0$, obtemos

$$H_{\text{reg}}(r) = \{1 + r^2 (\exp(-2h_1.r) + \kappa^2) / \exp(-2h_2.r)\}^{-1} \quad (3.8)$$

Semelhantemente, o filtro para a obtenção da anomalia residual é, segundo a equação (2.18),

$$H_{\text{res}}(r) = \{1 + (\exp(-2h_2.r) + \kappa^2) / (r^2 \exp(-2h_1.r))\}^{-1} \quad (3.9)$$

3.1.2 Filtro de Spector

O filtro casado de separação obtido por Spector (1968) está baseado em considerações estatísticas sobre a distribuição das fontes magnéticas na subsuperfície. Aquele autor considera que

as fontes estão distribuídas em dois conjuntos. O primeiro grupo, constituído de fontes de pequena espessura, modelaria as fontes rasas, tendo profundidade média h_0 e semi-largura média a_0 . O segundo conjunto de fontes possuindo espessura infinita com profundidade média H_0 e semi-largura média A_0 , representaria as fontes profundas. A partir considerações estatísticas, a cada conjunto de fontes é associado um prisma médio, ou seja, um prisma cujos parâmetros representam os valores médios das respectivas propriedades para o conjunto particular de fontes considerado. A componente radial média do espectro de amplitude do campo magnético produzido por cada conjunto de fontes, no polo, pode ser aproximada por (Spector, 1968),

$$F\{T\} = B \cdot f \cdot \exp(-hr) \cdot S(a, r) ; r = (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (3.10)$$

onde B é fator de amplitude, $f=1$ para prisma de espessura infinita e $f=r$, para prisma laminares, h é a profundidade média das fontes e $S(a, r)$ é o fator dependente da semi-largura média (a) das fontes.

A componente radial média do espectro de potência do campo observado é então aproximada pela expressão,

$$F\{T^0\} = \{B \cdot \exp(-H_0 r) + b \cdot r \cdot \exp(-h_0 r)\}^2 \quad (3.11)$$

onde os fatores associados à largura foram desprezados.

O logaritmo do espectro de potência normalizado médio é então,

$$\log(E_n) = \log\{\exp(-H_0 r) + (b/B)r \cdot \exp(-h_0 r)\}^2 \quad (3.12)$$

assim, como $h_0 < H_0$, na região de grandes números de onda o termo dominante na equação acima é o associado às fontes rasas,

$$E_2 = \{(b/B)\exp(-h_0 r)\}^2 . \quad (3.13)$$

A reta $y(r) = -2h_0 r - \log(b/B)^2$ é ajustada à função $\log(E_n) - \log(r^2)$, na região de grandes números de onda, e determinados então h_0 e (b/B) . Em seguida, o efeito das fontes rasas é retirado do espectro dos dados, através da operação,

$$E_H(r) = (E_n)^{1/2} - (b/B)r \cdot \exp(-h_0 r)^2. \quad (3.14)$$

Ao logaritmo desta função é ajustada a reta $y(r) = -2H_0 r$, de onde determina-se o valor H_0 . A partir deste modelo o espectro de amplitude radial médio das observações é dado por,

$$F\{T_0^0\} = B \exp(-H_0 r) \{1 + (b/B)r \cdot \exp(H_0 - h_0)r\} \quad (3.15)$$

e portanto, para obtermos os efeitos associados às fontes profundas devemos multiplicar o espectro dos dados pelo filtro,

$$H_{reg}(r) = \{1 + (b/B)r \cdot \exp(H_0 - h_0)r\}^{-1}. \quad (3.16)$$

Está é a expressão para o filtro de separação regional-residual obtida por Spector (1968). A anomalia residual é então obtida subtraindo-se o campo regional obtido após a filtragem dos dados reduzidos ao polo.

3.1.3 Filtro de Syberg

O método sugerido por Syberg (1972) está baseado no fato de que, as variações azimutais do espectro de amplitude das anomalias aeromagnéticas não podem ser explicadas sob as hipóteses de Spector (1968). O autor propõe então que o melhor modelo para levar em conta estas variações é aquele composto de duas camadas equivalentes. A primeira, uma distribuição de dipolos, que representaria as fontes rasas. A segunda, uma distribuição de mo

nopolos, representando o efeito das fontes profundas.

Para chegar à expressão do filtro é considerado que o espectro de amplitude da distribuição de magnetização em cada camada tem a forma: $M \cdot \exp(-kr)$, onde M e k são constantes e que o espectro de fase é aleatório. O autor presume então que o espectro de amplitude do campo observado, reduzido ao polo, é a soma dos efeitos de cada camada, isto é,

$$F\{T^0\} = F\{T_{dp}\} + F\{T_p\} \quad (3.17)$$

onde os índices identificam a contribuição da camada de monopolos (p) e de dipolos (dp). Desta forma o filtro para obtenção da anomalia regional é tal que,

$$H_{reg}(r) \cdot F\{T^0\} = F\{T_p\} \quad (3.18)$$

ou seja, substituindo $F\{T^0\}$ pela equação (3.17),

$$H_{reg}(r) = \{1 + F\{T_{dp}\} / F\{T_p\}\}^{-1} \quad (3.19)$$

ou ainda, considerando as hipóteses sobre o espectro da distribuição de magnetização e as transformadas da função de Green de cada camada, no polo, e substituindo na equação (3.18), a expressão final para o filtro obtido por Syberg (1972) é então,

$$H_{reg}(r, \theta) = \left\{ 1 + \sqrt{2} \frac{M_{dp}(\theta)}{M_p(\theta)} \cdot r \cdot \exp[(C_p(\theta) - C_{dp}(\theta)) \cdot r] \right\}^{-1} \quad (3.20)$$

onde

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v}{u}\right) ; C_p(\theta) = h_2 + k_p(\theta) \quad \text{e} \quad C_{dp}(\theta) = h_1 + k_{dp}(\theta) ,$$

sendo h_1 e h_2 as profundidades da camada de dipolos e monopolos, respectivamente. A dependência azimutal é introduzida para levar em conta as variações azimutais do espectro de amplitude da anomalia. Os parâmetros $M_p(\theta)$ e $C_p(\theta)$ são obtidos ajustando-se retas

logaritmo do espectro médio de amplitude normalizado dos dados, em setores angulares, na região de números de onda pequenos. $M_{dp}(\theta)$ e $C_{dp}(\theta)$, são determinados pelo ajuste de retas à função $\ln|F\{T^0\}| - \ln(r)$, obtida pela média nos mesmos setores angulares, na região de grandes números de onda do espectro de amplitude dos dados reduzidos ao polo.

3.2 Considerações Práticas sobre Aplicação dos Filtros

3.2.1 Filtros de Spector e Syberg

Na aplicação do método de Spector (1968) o espectro de amplitude radial médio foi obtido tomando-se a média do espectro em coroas circulares concêntricas de largura igual a três vezes a frequência fundamental. Na determinação do filtro de Syberg (1972) o espectro médio de amplitude dos dados reduzidos ao polo foi calculado pela média dos valores em setores angulares de 30° em intervalos radiais de três vezes a frequência fundamental.

As retas ajustadas ao logaritmo do espectro de amplitude médio normalizado, em cada método, foram obtidos pelo método dos mínimos quadrados, o que permite acelerar o processo de ajuste. Para minimizar o efeito de borda nestes dois processos, a área observada foi estendida artificialmente, repetindo-se os dados da borda paralelamente ao perfis de metade da distância da janela de observações.

3.2.2 Filtro Proposto

O filtro proposto (equações (3.8) e (3.9)) é função da profundidade de separação entre as camadas, que representa o grau de liberdade do problema sob as hipóteses postuladas.

Ao se estabelecer a profundidade de separação entre as camadas devemos ter em mente, que os resultados quantitativos das operações de separação regional-residual não são via de regra usados na interpretação quantitativa, embora qualitativamente estes resultados sejam muito úteis na discriminação de anomalias e aná

lise de feições estruturais. Sob a hipóteses consideradas não há uma profundidade de separações ótima entre as camadas, cada profundidade estabelecida produzira campos regionais e residuais que devem ser avaliados do ponto de vista de sua importância para a interpretação. Este fato traduz a ambiguidade inerente ao problema da separação de anomalias interferentes de dados do campo potencial que só pode ser reduzida com informação a priori adicional sobre as fontes.

Os testes com dados sintéticos indicam que, para distribuições de fontes confinadas em dois níveis distintos, resultados significativos foram obtidos quando a separação entre as camadas é igual ou maior que separação média entre as fontes causadoras do campo. Este resultado pode ser entendido a partir da análise de Spector (1968), da decomposição do espectro das anomalias, causadas por prismas verticais, em fatores dependendo de cada parâmetro definindo o modelo. Como observado por Spector (1968), se o efeito associado à largura média real das fontes não é considerado, o que ocorre no modelo de camadas proposto neste trabalho, a estimativa da profundidade a partir do decaimento do espectro de amplitude produzir valores maiores para este parâmetro quanto maior a largura média das fontes causadoras do campo. Estes valores superestimados são obtidos também na construção do filtro de Spector (1968) onde a diferença das profundidades dos dois conjuntos de fontes postulados, obtidos a partir do espectro, para a construção do filtro é maior do que a separação média real entre os dois conjuntos de fontes, nos mesmos testes sintéticos realizados com o método proposto.

Os critérios sobre a distância horizontal entre as fontes equivalentes em cada camada e sobre a separação dos polos de sinais opostos na camada de bipolos foram obtidos a partir de vários testes e também das considerações de Leão e Silva (1987) e Dampney (1969). Assim, tomamos a separação entre as fontes equivalentes em torno da metade da profundidade de cada camada e a distância entre os dois polos em cada bipolo da ordem de um décimo da profundidade desta camada.

3.3 Descrição dos Testes com Dados Sintéticos

Foram realizados vários testes com dados sintéticos produzidos por prismas verticais finitos, simulando as fontes rasas, e com prismas verticais de espessura infinita simulando as fontes profundas. Em todos os testes, o campo foi gerado em uma malha regular de 32 kmx32 km com dados espaçados de 1 km. Campos devido a fontes interferentes, localizadas na borda da área amostrada ou fora de seus limites, bem como o ruído aleatório Gaussiano, com média zero e desvio padrão de 1 nT, foram adicionados aos dados, para estudar o comportamento dos métodos em condições mais representativas de uma situação prática.

O "efeito de borda" inerente ao método proposto produz uma distorção nos dados da borda da malha das observações, ao longo de uma moldura retangular com espessura igual a metade das dimensões da janela utilizada para o processamento (no caso 10 kmx 10 km). Por esta razão os gráficos apresentados nos testes seguintes não contêm dados nesta região.

A seguir descrevemos os resultados de três testes que mostram o desempenho dos métodos.

3.3.1 Primeiro Teste

A figura 2 mostra os valores teóricos do campo total no polo produzido por 10 prismas. Cinco simulam as fontes rasas, com espessuras de 0,4 km, dimensões horizontais de 1 km a 2 km, e localizados entre 2 km e 3 km de profundidade. A distribuição destes prismas no plano horizontal encontra-se na figura 3. Os outros prismas, modelam um alto escalonado no embasamento, simulando as fontes consideradas regionais, com largura variando de 6 km a 24 km, na base e profundidade entre 4,8 km e 6 km. As figuras 4 e 5 ilustram a distribuição destas fontes no plano horizontal e vertical, respectivamente. A magnetização das fontes rasas varia de 2 a 3 A/m, enquanto a magnetização do embasamento é mantida fixa em 1 A/m. A figura 6 mostra o campo produzido por cada conjunto de fontes separadamente.

Neste teste a camada de bipolos foi colocada a 2,5 km de profundidade e a camada de monopolos a 8 km, o valor tomado para a constante k (equações (2.37) e (2.38)) foi 0,01.

A figura 7 apresenta o campo residual e o campo regional obtidos pelo método de Spector (1968). O campo residual e campo regional calculados pelo método de Syberg (1972) estão mostrados na figura 8. Os resultados com o método proposto estão na figura 9.

Podemos observar que método proposto é o que apresenta melhor resolução de todas as fontes. Sendo que as fontes rasas na borda da área afetam o campo regional estimado pelos métodos de Spector (1968) e Syberg (1972) de maneira significativa.

3.3.2 Segundo Teste

A figura 10 representa o campo total no polo produzido por 10 prismas. A distribuição destas fontes pode ser visualizada nas figuras 11, 12 e 13. Neste teste as fontes residuais dentro da janela de observações, são dois prismas pouco espessos adjacentes (A e B) com 10 km x 10 km e 10 km x 3 km de extensão horizontal, 100 m de espessura com profundidade de 1 km e 1,1 km e prisma de 2,5 km de espessura a 50m de largura que atravessa toda a área amostrada à profundidade de 1,5 km (C). Um prisma de 4km x 5km de dimensões horizontais, com 300 m de espessura a profundidade de 2,3 km está sobre a borda (D) e também um prisma fora da área observada com dimensões horizontais de 12 km x 12 km, a 2 km de profundidade e com 1km de espessura (E). A magnetização destas fontes residuais varia entre 0,75 e 1,5 A/m. Os prismas simulando um alto no embasamento estão dispostos de maneira escalonada entre 5 km e 6 km de profundidade com larguras variando de 10 km a 40 km na base. A magnetização destas fontes é de 1 A/m.

Neste teste a camada rasa está a 1,5 km e a camada profunda a 9 km, o valor de k é 0,01 no cálculo do regional e 0,1 no cálculo do residual.

A figura 14 mostra o campo de cada conjunto de fontes separadamente.

As figuras 15, 16 e 17 mostram os resultados da aplicação dos filtros de Spector (1968), Syberg (1972) e o método pro

posto, respectivamente, na separação dos campos regional e residual. Observamos que o campo residual calculado pelos três processos concordam razoavelmente com o residual teórico, sendo que o método de Spector (1968) apresenta a menor resolução da fonte direcional. O campo regional entretanto mostra importantes diferenças entre cada método. O regional calculado com o filtro de Spector (1968) sofre forte influência das fontes residuais. O método de Syberg (1972), embora produzindo um resultado melhor, mostra ainda as mesmas características do método de Spector. O resultado obtido com o método proposto, é o que apresenta menos distorções.

3.3.3 Terceiro Teste

O campo total no polo para este teste é mostrado na figura 18. As fontes residuais estão representadas por seis prismas. Dentro da janela de observações há dois prismas de 50m de largura que atravessam toda a área e tem 2,5 km espessura e 1,5 km de profundidade. Os outros quatro prismas representam as fontes interferentes sobre a borda e fora da janela de observações. Dois com dimensões horizontais de 12 km x 12 km de espessura e estão a 2km de profundidade. Outro com dimensões horizontais de 10 km x 10 km, espessura de 300 m a 2,7 km de profundidade. A magnetização destas fontes varia entre 0,75 a 1 A/m. As fontes regionais são as mesmas do teste anterior. As figuras 19 e 20 mostram a geometria das fontes regionais e residuais. A figura 22 apresenta os campos regional e residual teóricos.

Neste teste a disposição das camadas foi a mesma utilizada no segundo teste, o valor da constante k foi tomado 0,01 para obtenção do regional e 0,1 no cálculo do campo residual.

O resultado da aplicação dos métodos encontra-se nas figuras 23, 24 e 25. Os campos obtidos pelo método de Spector (1968) e pelo método de Syberg (1972) são praticamente idênticos, sendo que o campo residual apresenta pouca resolução das fontes direcionais, enquanto o regional apresenta-se fortemente distorcido pelo efeito das fontes rasas.

O campo residual obtido pelo método proposto apresenta as fontes direcionais bem definidas, com pouca interferência do ruído aleatório, enquanto o campo regional está fortemente atenuado e apresenta distorções causadas pelas fontes interferentes, localizadas nas borda da janela de observações.

3.4 Discussão dos Resultados

A partir da análise dos testes realizados, dentre os quais os três descritos acima, podemos estabelecer algumas conclusões. Nas condições postuladas sobre a distribuição das fontes, o método de Syberg e o método de camadas equivalentes proposto são os que produzem os melhores resultados, com vantagens para este último.

Devido à simplicidade do modelo considerado (duas camadas equivalentes) tanto no método de Syberg como no método proposto, há ambiguidade, na separação de fontes que, mesmo pouco profundas, possuam grande extensão horizontal em relação à extensão das fontes regionais. Este resultado pode ser entendido se considerarmos a interação entre os efeitos associados à extensão horizontal das fontes e sua profundidade no espectro de amplitude de corpos prismáticos como mostrou Spector (1968), o que leva a que, na separação entre os campos, parte da anomalia produzida por estas fontes apareçam no mapa regional e parte no mapa residual. Mesmo nestas situações o método proposto foi o que apresentou os melhores resultados como demonstrado pelo segundo e pelo terceiro testes. Esta característica do método apresentado pode ser melhor entendida através das expressões para os filtros no domínio dos números de onda, equações (3.8), (3.16) e (3.20). Verificamos da inspeção destas equações que, se as profundidades médias consideradas para os dois conjuntos de fontes postuladas são as mesmas em todos os três processos, o filtro obtido pelo método proposto é o que produz maior discriminação entre os números de onda associados a anomalia de cada conjunto de fontes isoladamente.

A presença de fontes direcionais rasas afeta muito os métodos de Spector (1968) e Syberg (1972), como mostra o terceiro teste, onde os efeitos das fontes direcionais aparecem no campo regional.

As fontes interferentes rasas não direcionais distorcem o campo regional, com a diferença de que só as fontes rasas de grande extensão horizontal é que afetam o método proposto, o que não acontece com os métodos espectrais, como mostra o primeiro teste. Este resultado é consequência da introdução artificial de dados para ampliar a janela de observação a ser processada a fim de minimizar o fenômeno de Gibbs (Hamming, 1977). Além disso, observa-se que o método proposto é o que menos desloca a posição horizontal da anomalia regional.

Outra característica do método proposto é a possibilidade de um tratamento mais adequado ao ruído aleatório presente nos dados, como pode ser observado em todos os testes. Este resultado é decorrente do fato dos filtros de Spector (1968) e Syberg (1972) não levarem este efeito em consideração a não ser descartando parte do espectro de alta frequência dos dados, o que não elimina todas as componentes do ruído aleatório, que tem efeito em todo o espectro.

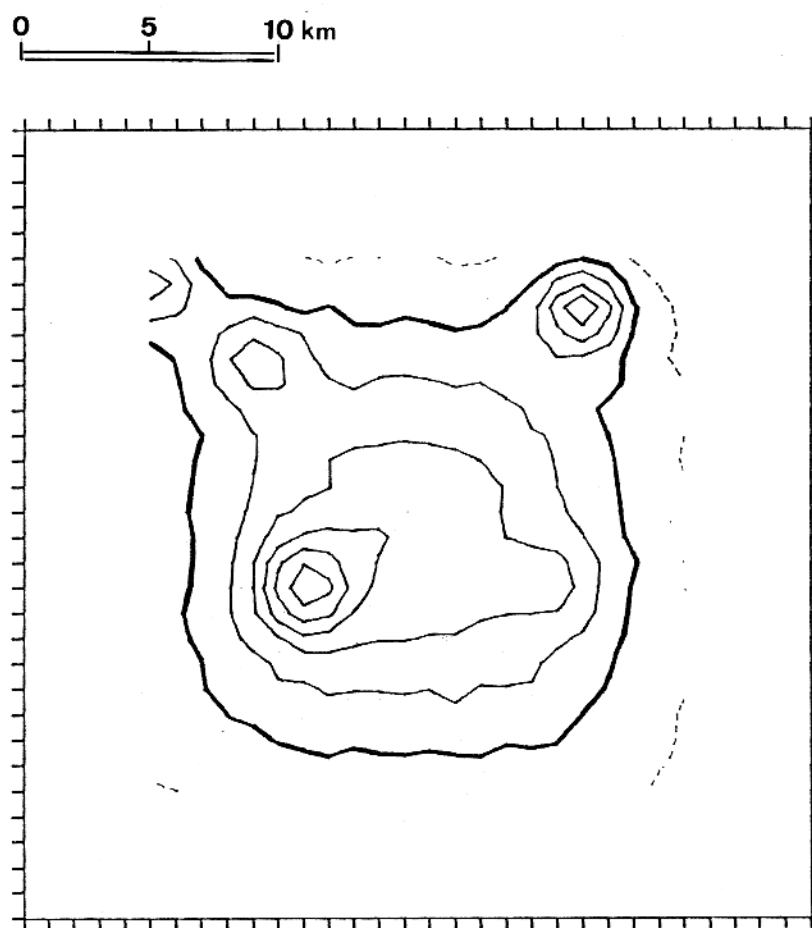


FIG.02 - Campo total no polo produzido por prismas simulando um alto no embasamento mais fontes rasas, utilizado no primeiro teste. Linha grossa=50 nT; linha fina > 50 nT ; linha tracejada < 50 nT. Intervalo de contorno de 10 nT.

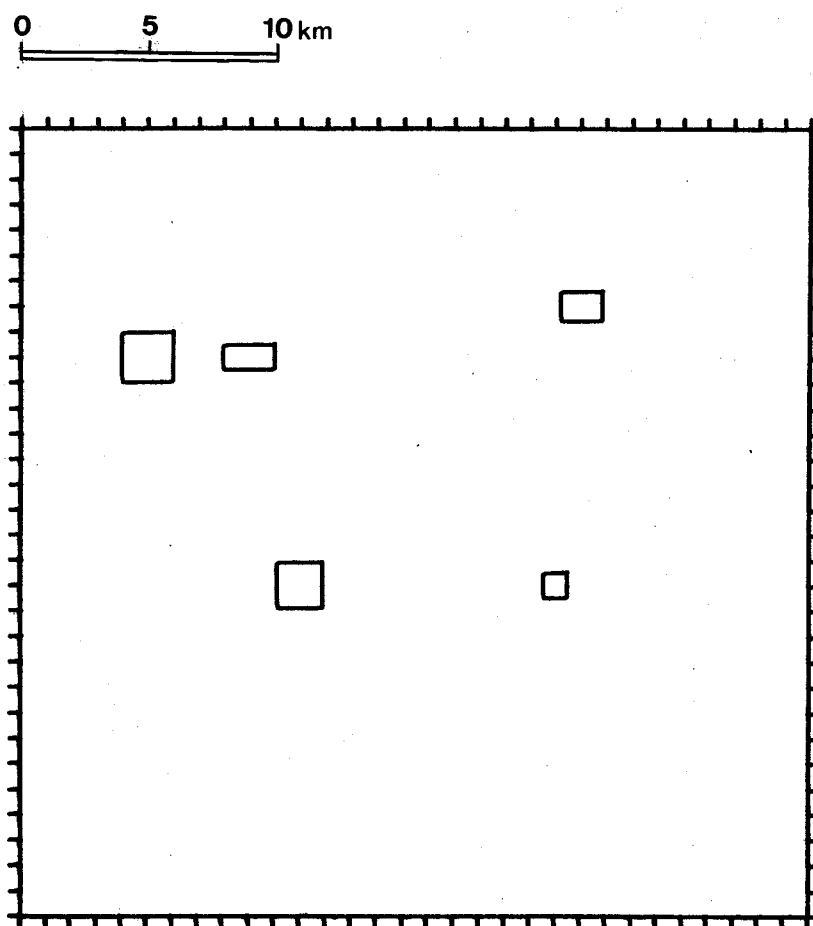


FIG.03 - Disposição dos prismas rasos para o primeiro teste.

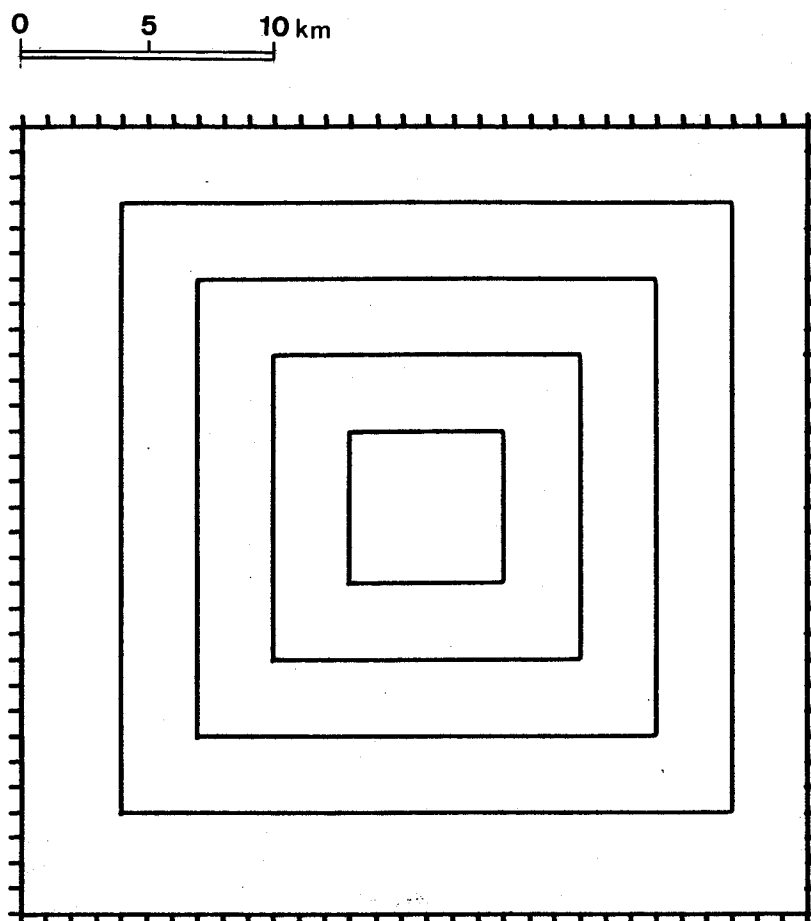


FIG.04 - Disposição dos prismas profundos simulando um alto no embasamento para o primeiro teste.

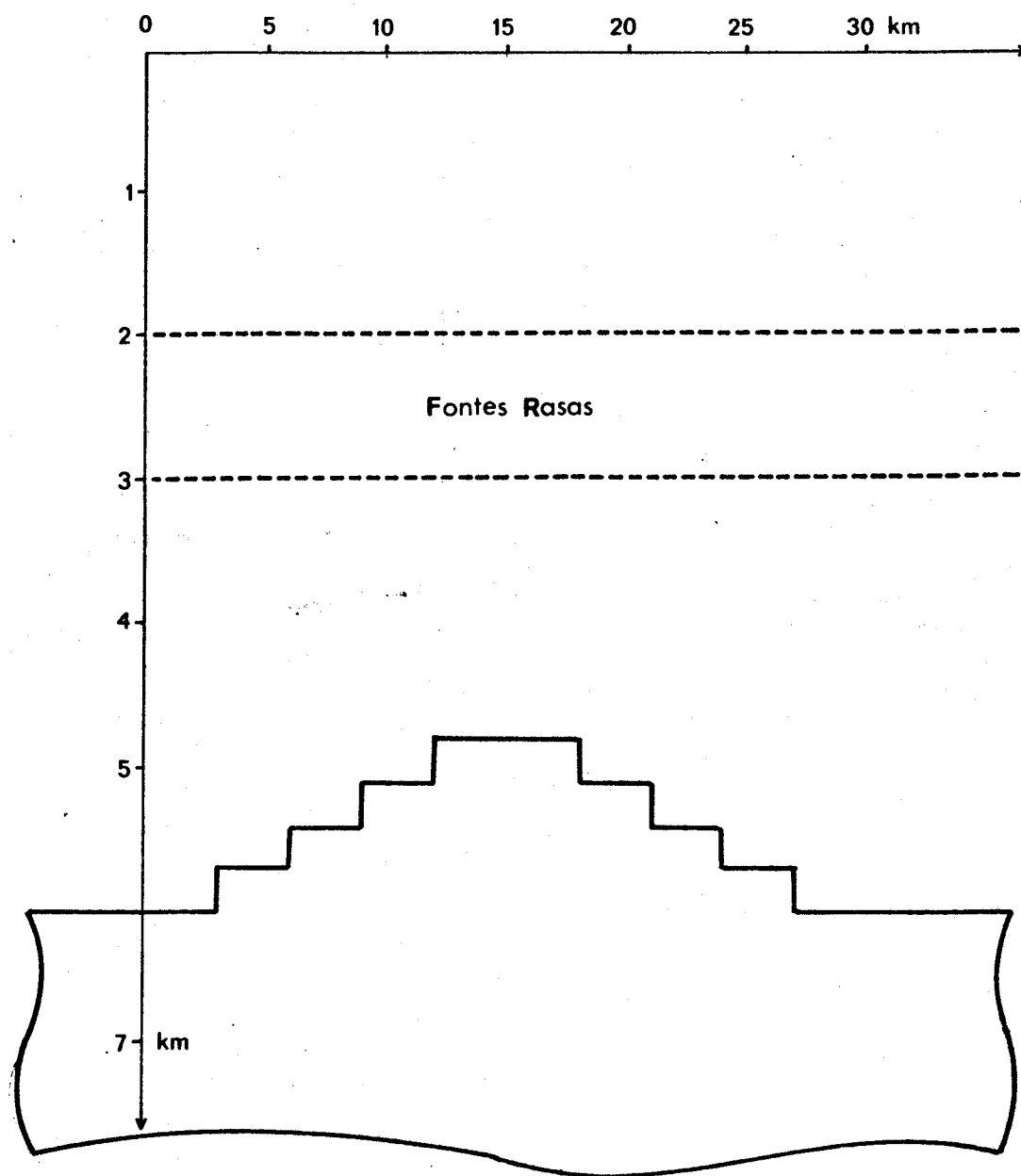
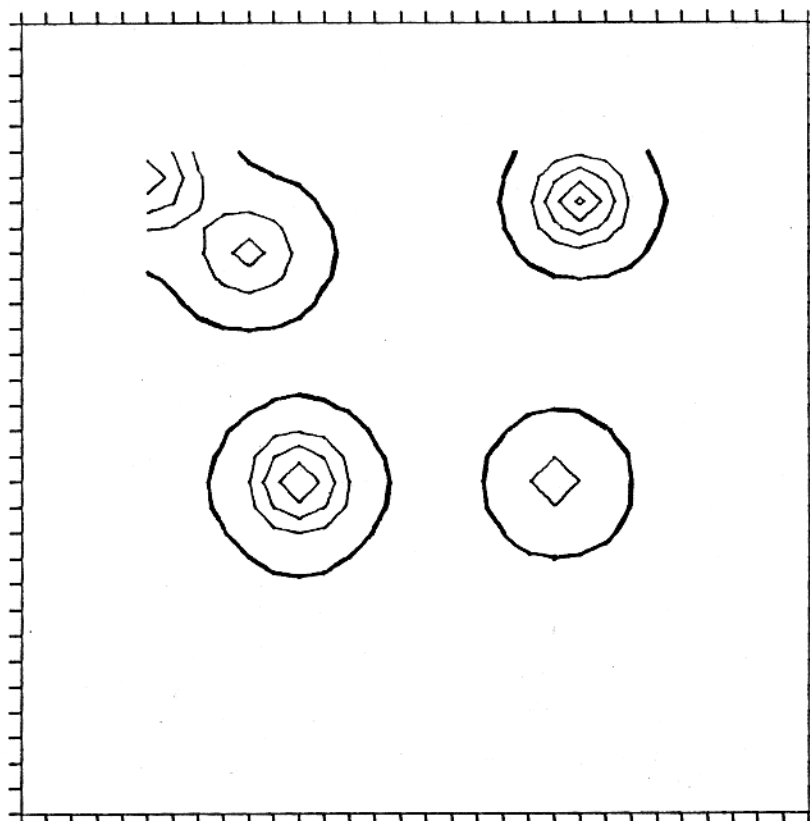


FIG.05 - Disposição das fontes em perfil para o primeiro teste.



0 5 10 km

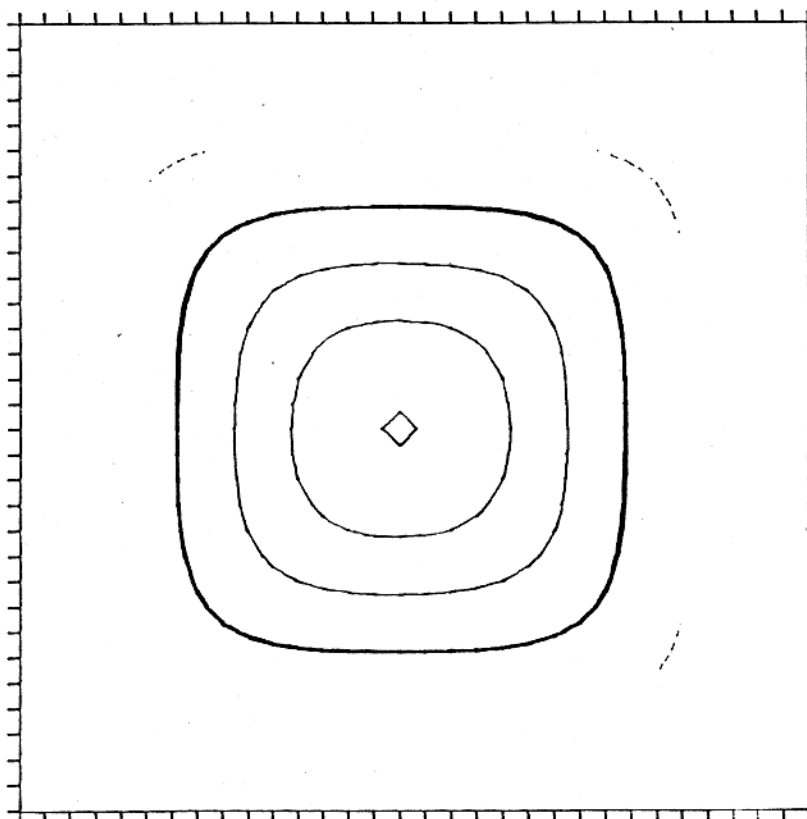
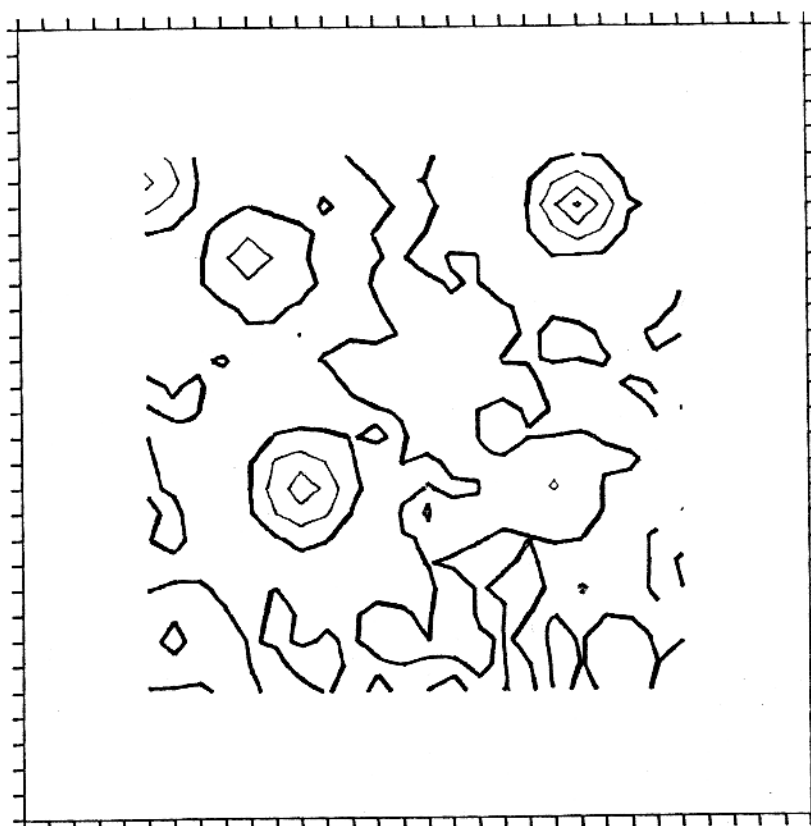


FIG.06 - Acima: campo das fontes rasas para o primeiro teste.
 Linha grossa=0nT; linha fina 0nT.
 Abaixo: campo das fontes profundas para o primeiro teste.
 Linha grossa=50nT; linha fina>50nT; linha tracejada<50nT.
 Intervalo de contorno de 10nT.



0 5 10 km

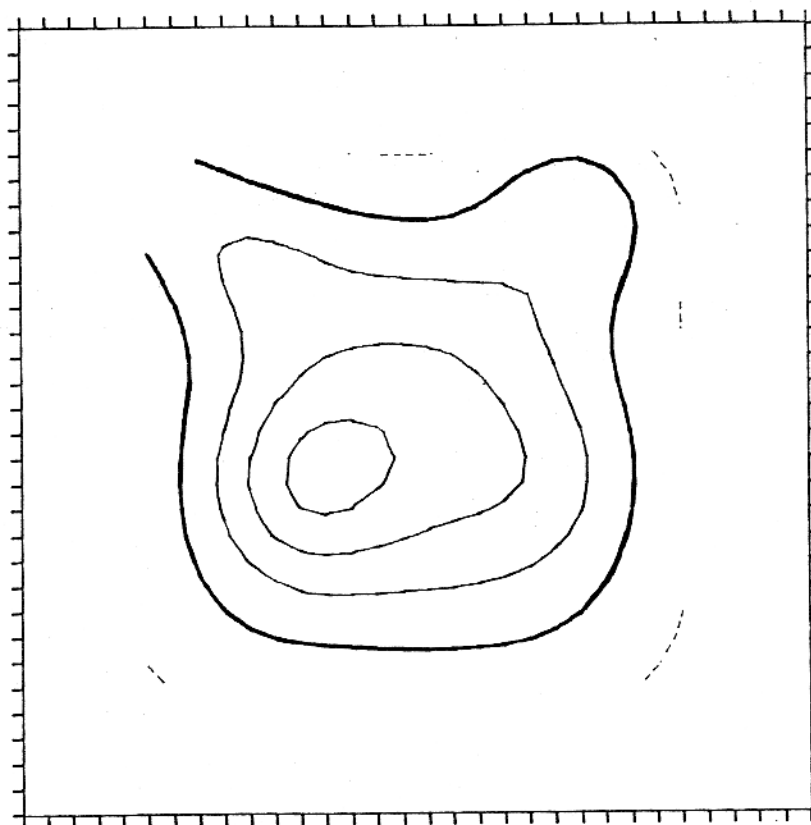


FIG.07 - Acima: campo residual obtido pelo método de Spéctor.
 Linha grossa=0 nT; linha fina>0 nT.
 Abaixo: campo regional obtido pelo método de Spéctor.
 Linha grossa=50nT; linha fina>50nT; linha tracejada<50nT.
 Intervalo de contorno de 10nT.

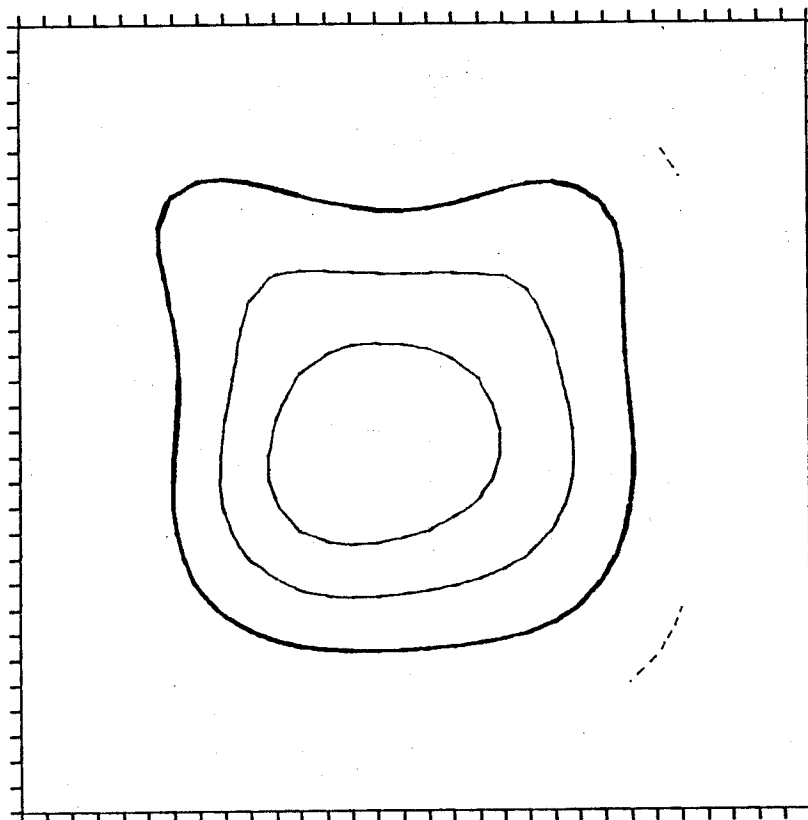
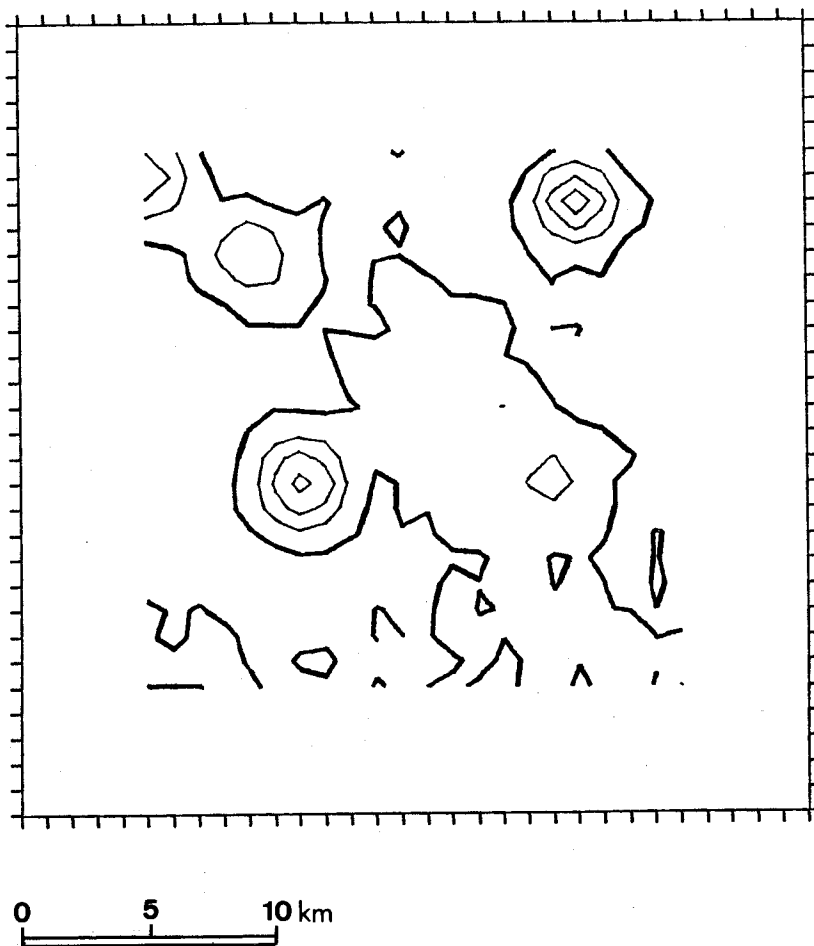
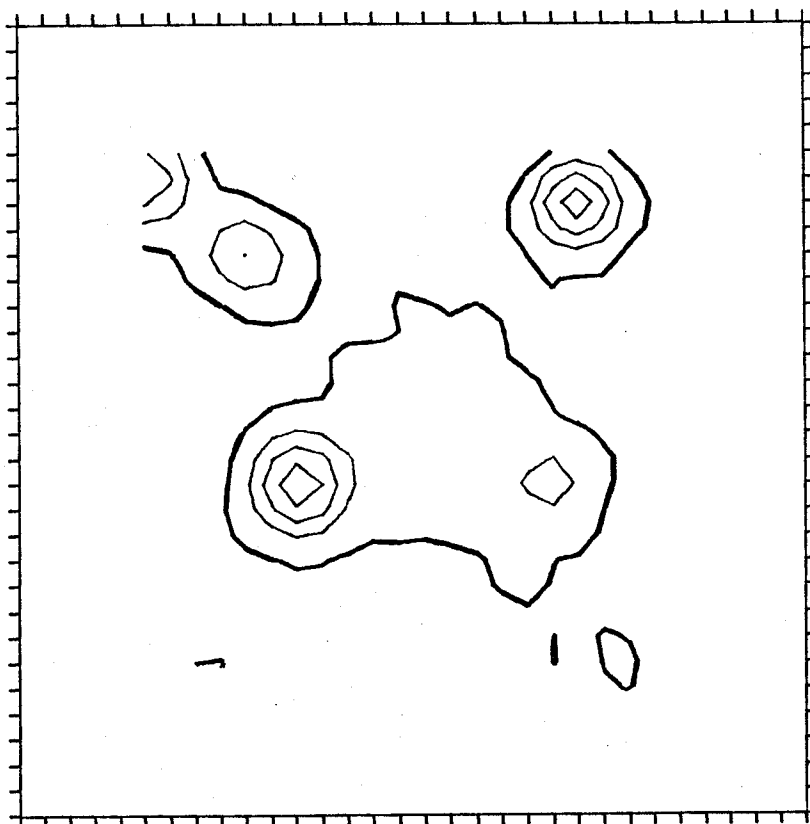


FIG.08 - Acima: campo residual obtido pelo método de Syberg.
 Linha grossa=0nT; linha fina>0 nT.
 Abaixo: campo regional obtido pelo método de Syberg.
 Linha grossa=50nT; linha fina>50nT; linha tracejada<50nT.
 Intervalo de contorno de 10nT.



0 5 10 km

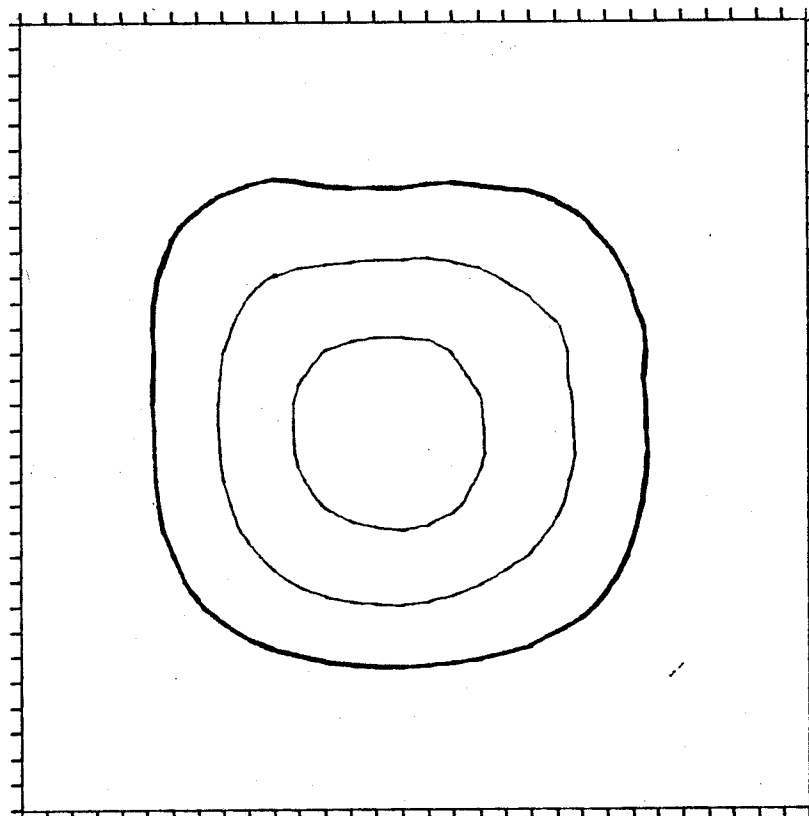


FIG.09 - Acima: campo residual obtido pelo método proposto.
 Linha grossa=0 nT; linha fina>0nT.
 Abaixo: campo regional obtido pelo método proposto.
 Linha grossa=50nT; linha fina>50nT; linha tracejada<50nT.
 Intervalo de contorno de 10nT.

0 5 10 km

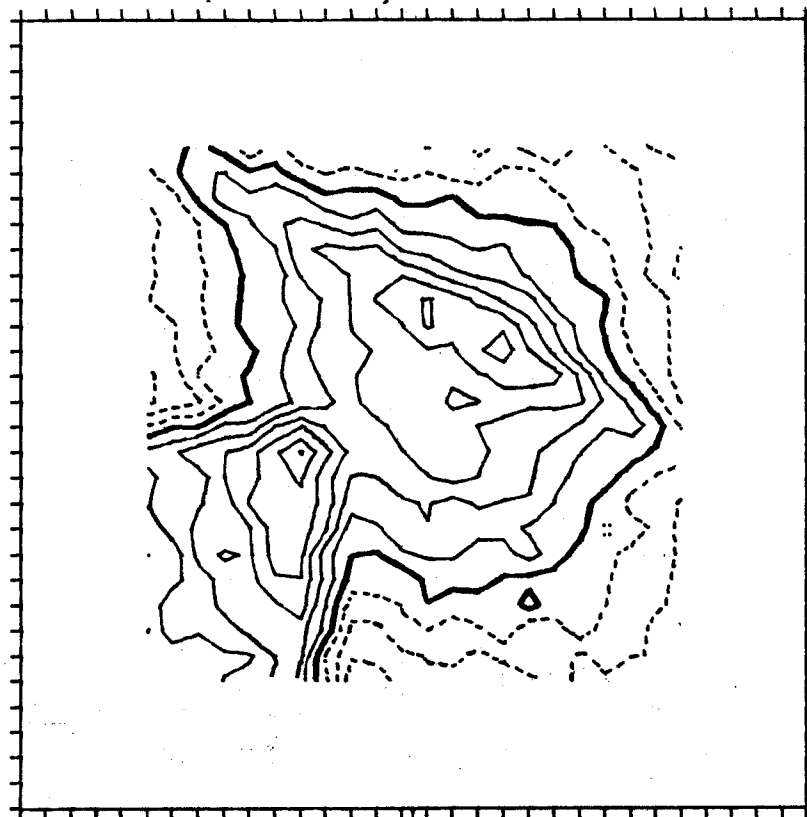


FIG.10 - Campo total no polo produzido por prismas simulando um alto no embasamento mais fontes rasas e fontes interferentes, usado no segundo teste. Linha grossa=50 nT ; linha fina 50nT; linha tracejada 50nT. Intervalo de contorno de 3nT.

0 5 10 km

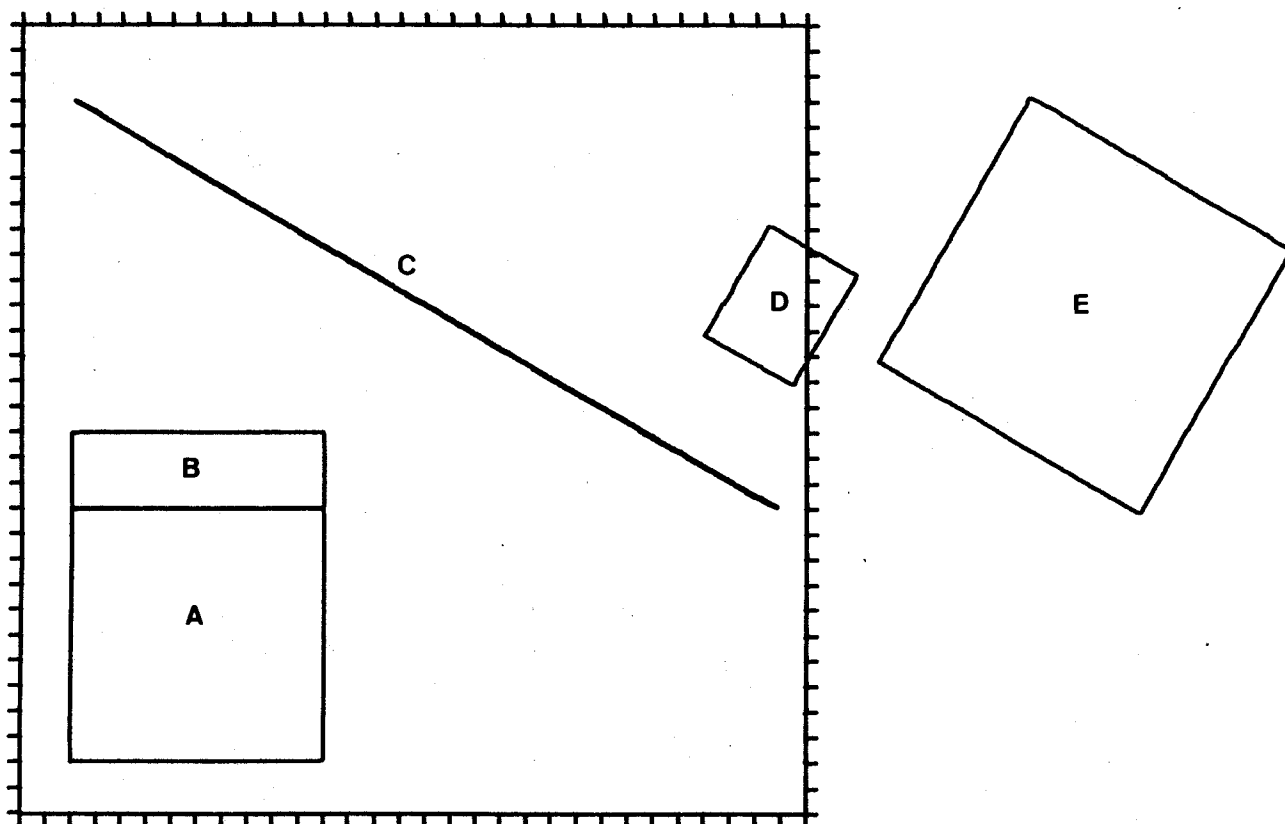


FIG.11 - Disposição dos prismas rasos para o segundo teste.

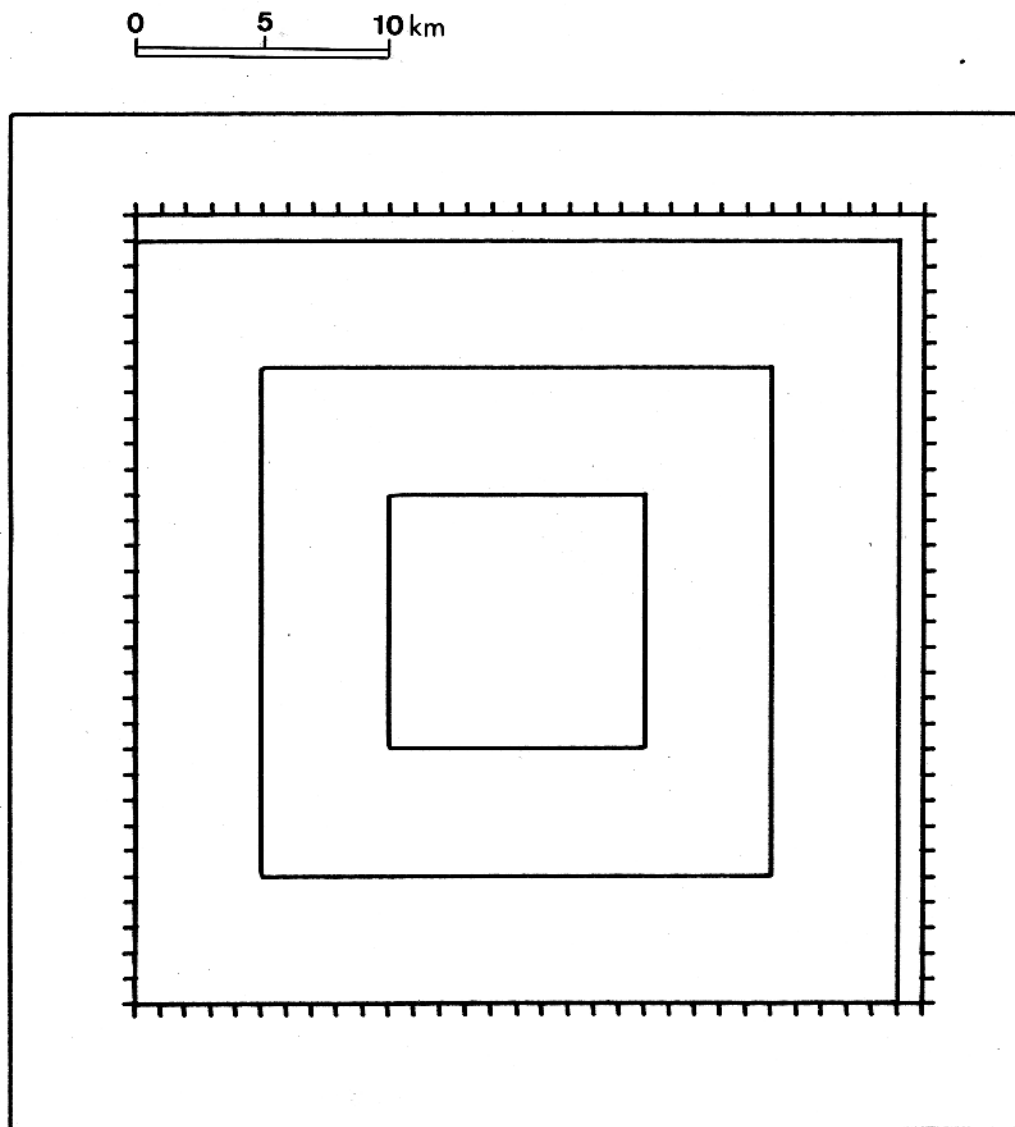


FIG.12 - Disposição dos prismas simulando um alto no embasamento.

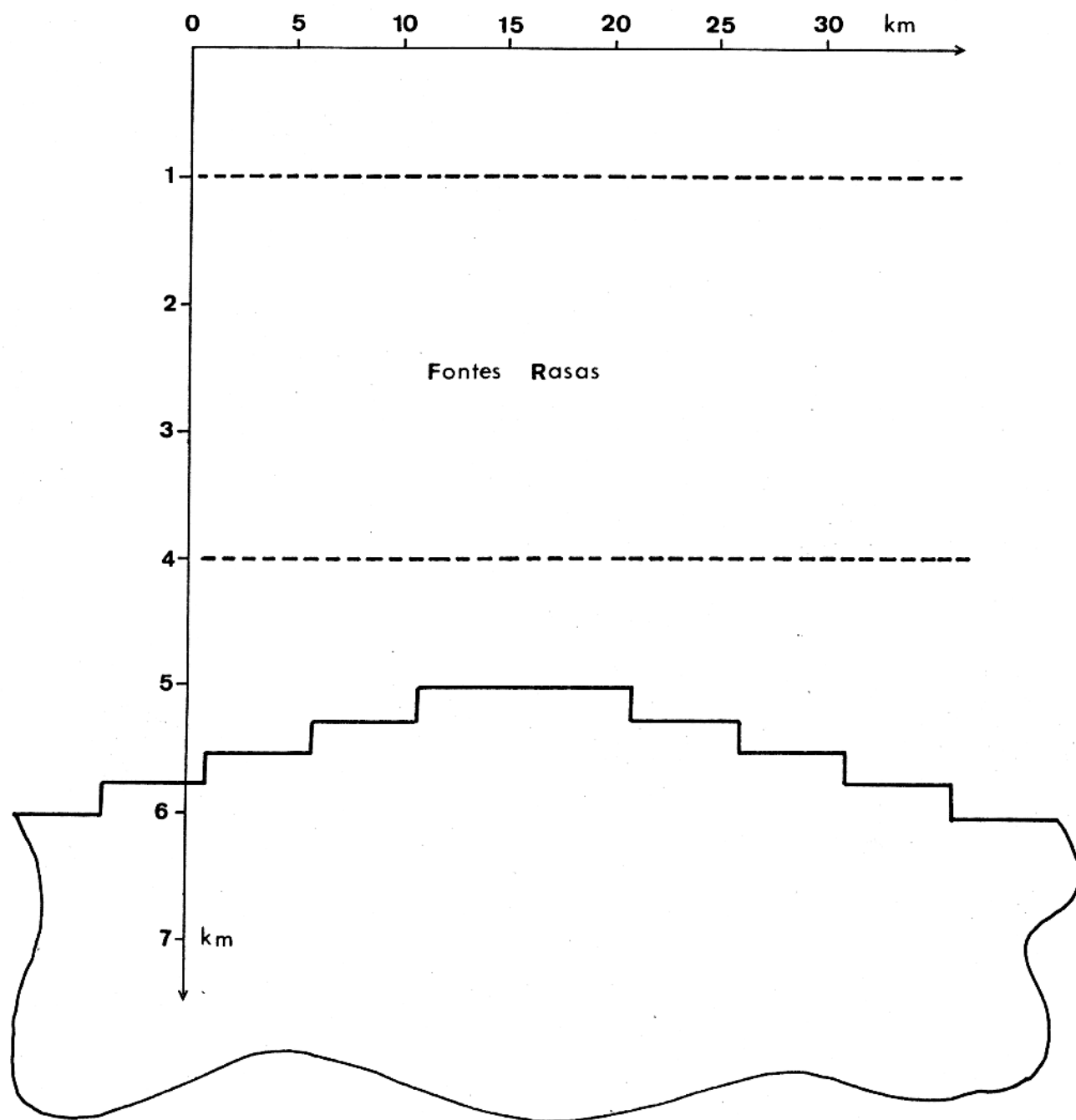
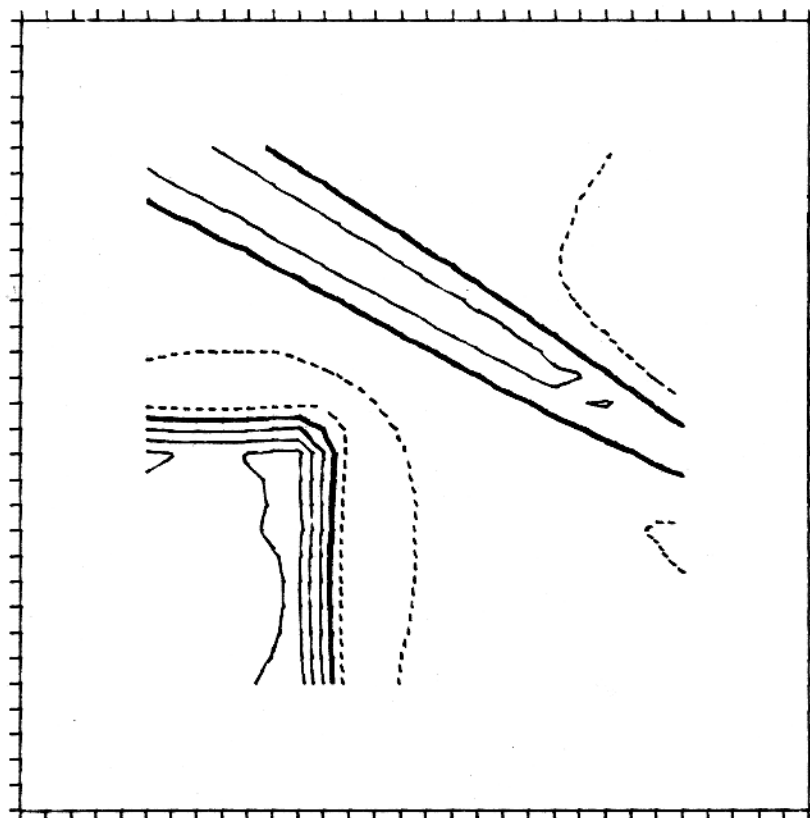


FIG.13 - Disposição das fontes em perfil para o segundo teste.



0 5 10 km

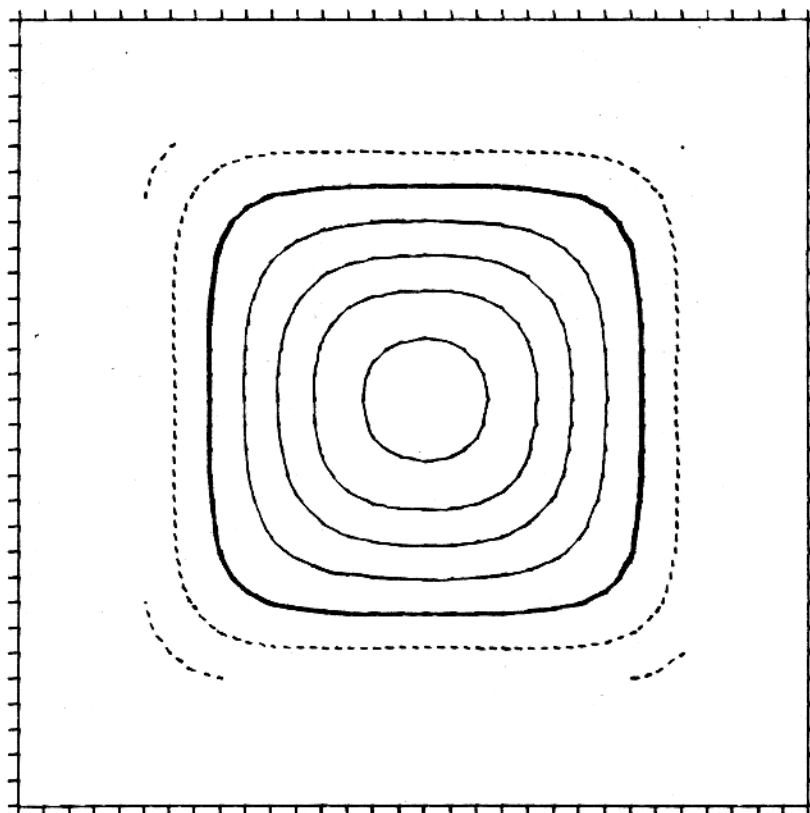
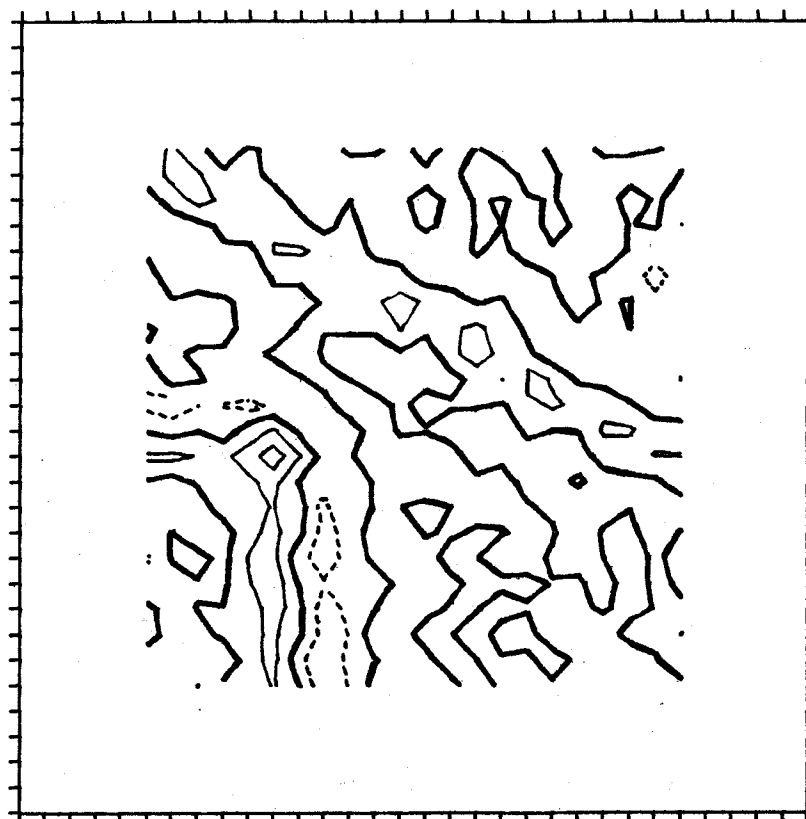


FIG.14 - Acima: campo das fontes rasas para o segundo teste.
 Linha grossa=0nT; linha fina>0nT; linha tracejada< 0nT.
 Abaixo: campo das fontes profundas para o segundo teste.
 Linha grossa=50nT; linha fina>50nT; linha tracejada<50nT.
 Intervalo de contorno de 3nT.



0 5 10 km

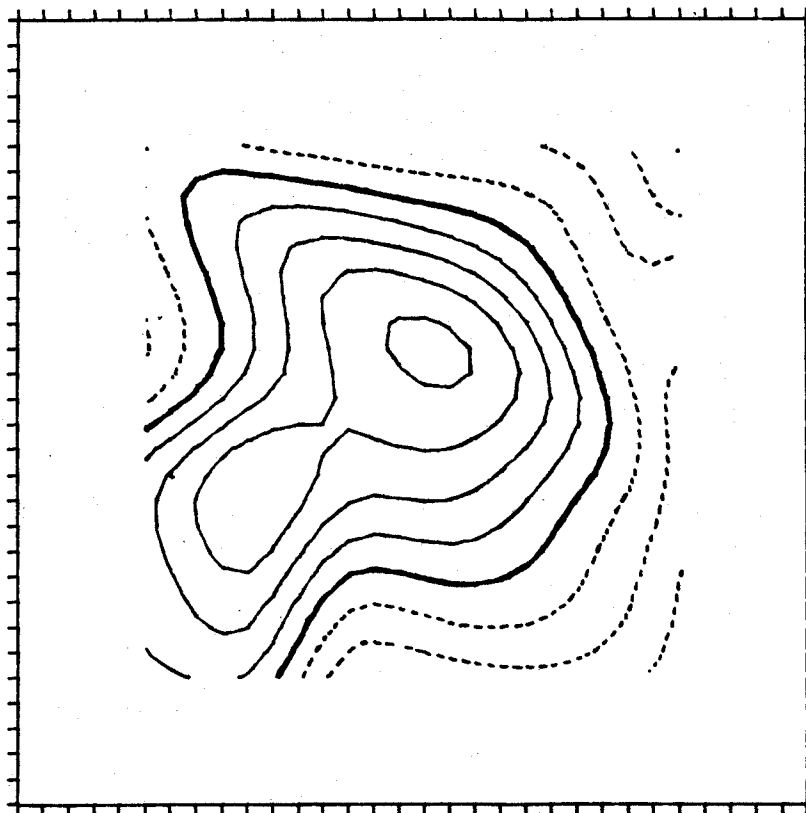
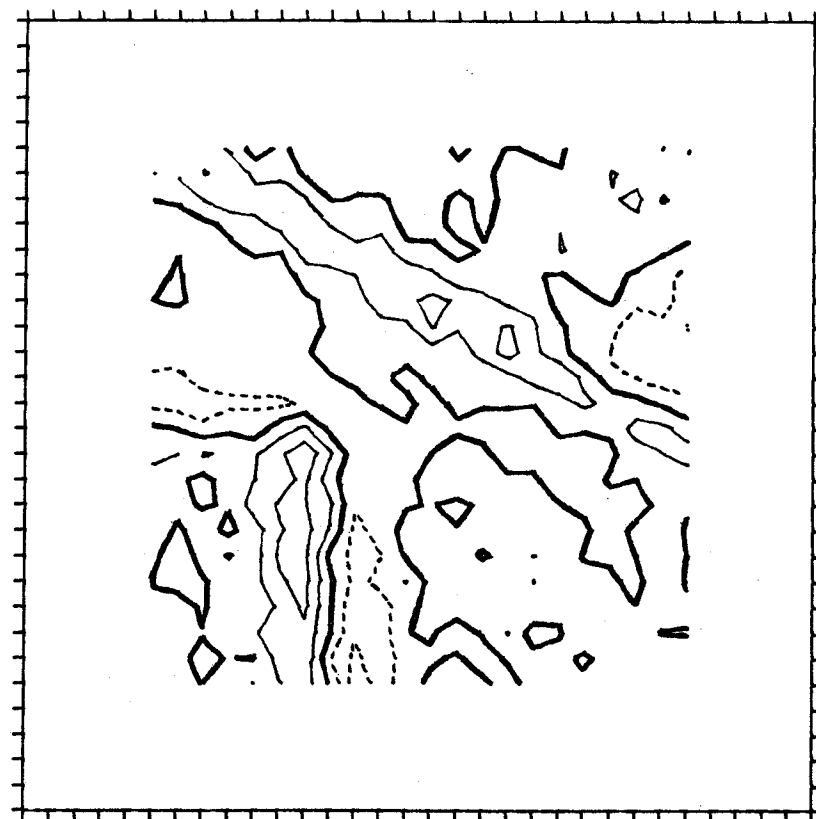


FIG.15 - Acima: campo residual obtido pelo método de Spector. Linha grossa=0nT; linha fina>0nT; linha tracejada<0nT. Abaixo: campo regional obtido pelo método de Spector. Linha grossa=50nT; linha fina>50nT; linha tracejada<50nT. Intervalo de contorno de 3nT.



0 5 10 km

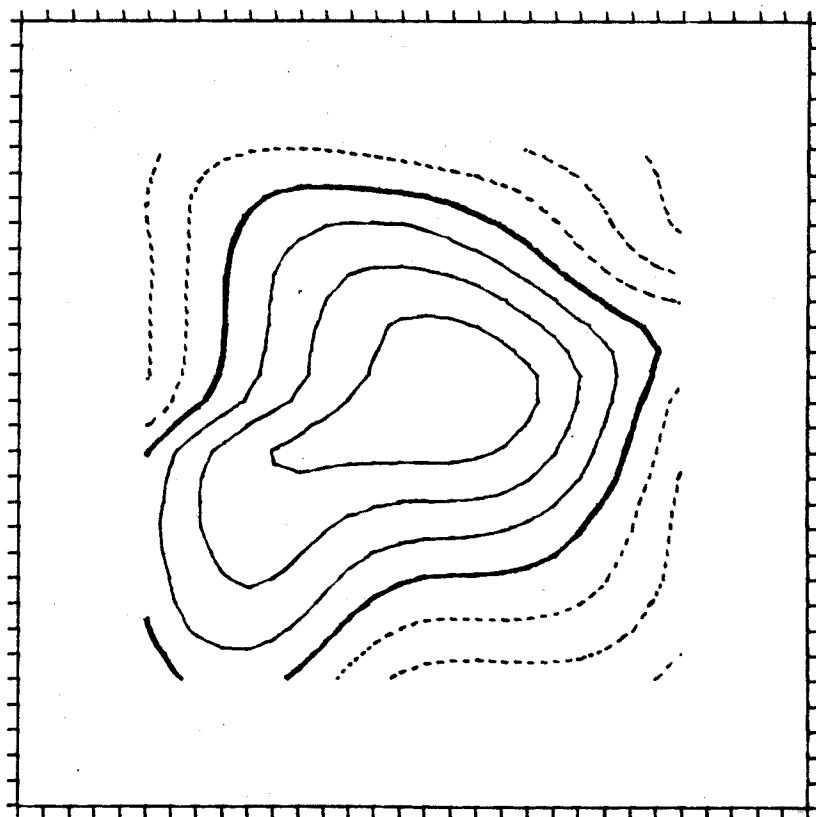
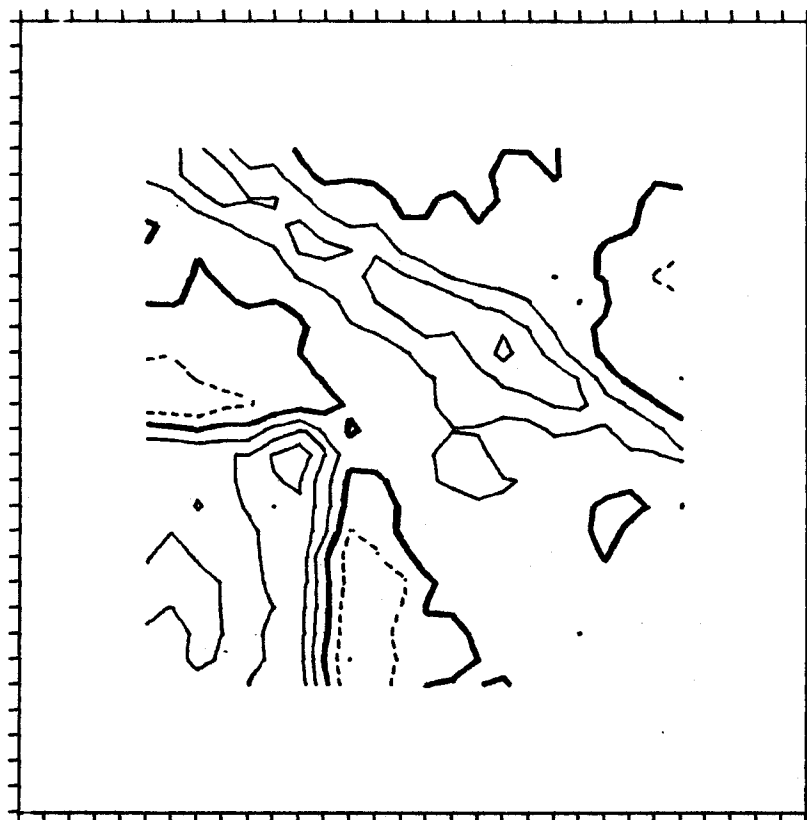


FIG.16 - Acima: campo residual obtido pelo método de Syberg. Linha grossa=0nT; linha fina>0nT; linha tracejada<0nT. Abaixo: campo regional obtido pelo método de Syberg. Linha grossa=50nT; linha fina>50nT; linha tracejada<50nT. Intervalo de contorno de 3nT.



0 5 10 km

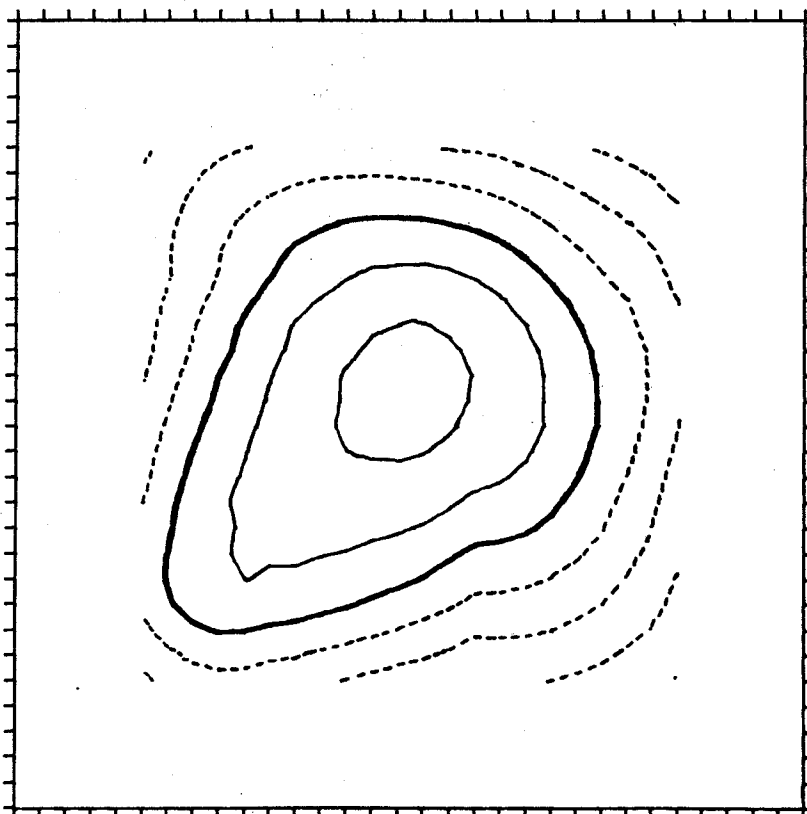


FIG.17 - Acima: campo residual calculado pelo método proposto. Linha grossa=0nT; linha fina>0nT; linha tracejada<0nT. Abaixo: campo regional obtido pelo método proposto. Linha grossa=50nT; linha fina>50nT; linha tracejada<50nT. Intervalo de contorno de 3nT.

0 5 10 km

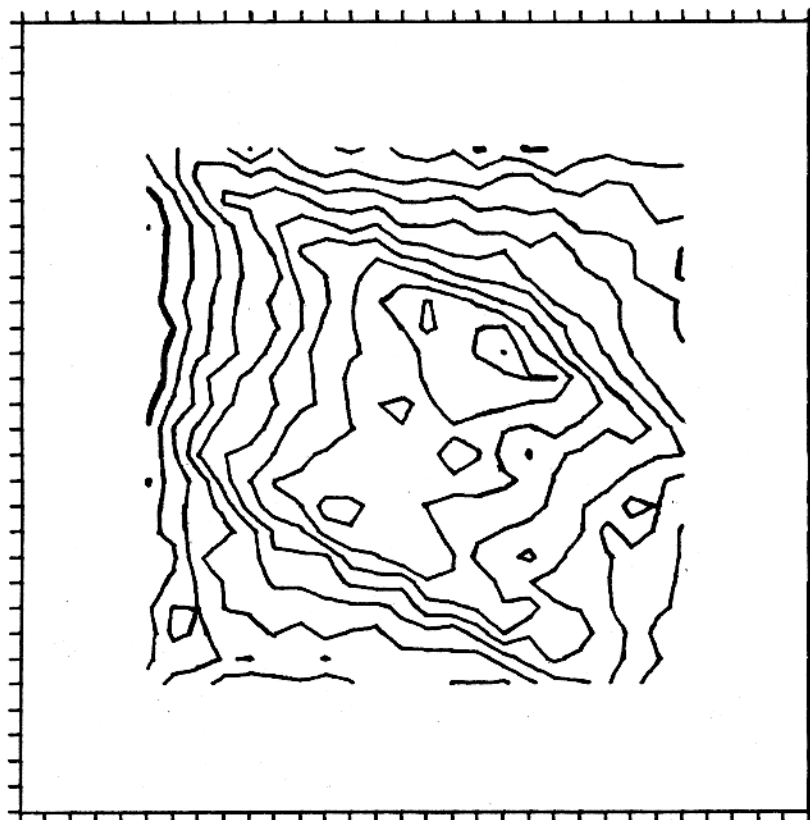


FIG.18 - Campo total no polo produzido por prismas simulando um alto no embasamento mais fontes rasas e fontes interferentes usado no terceiro teste. Linha grossa = 50nT ; linha fina 50nT; linha tracejada 50nT. Intervalo de contorno de 3nT.

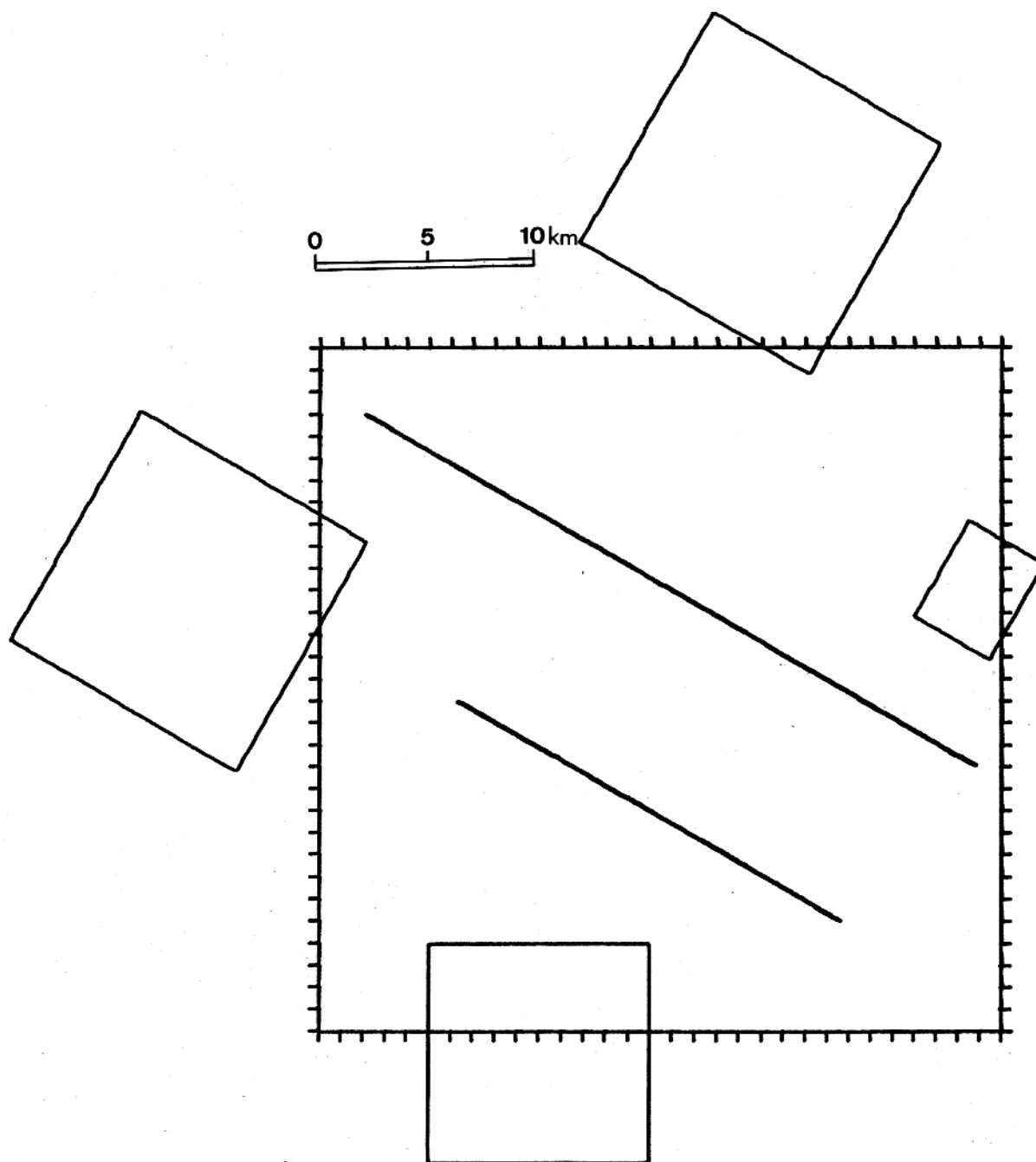


FIG.19 - Disposição das fontes rasas e fontes interferentes para o terceiro teste.

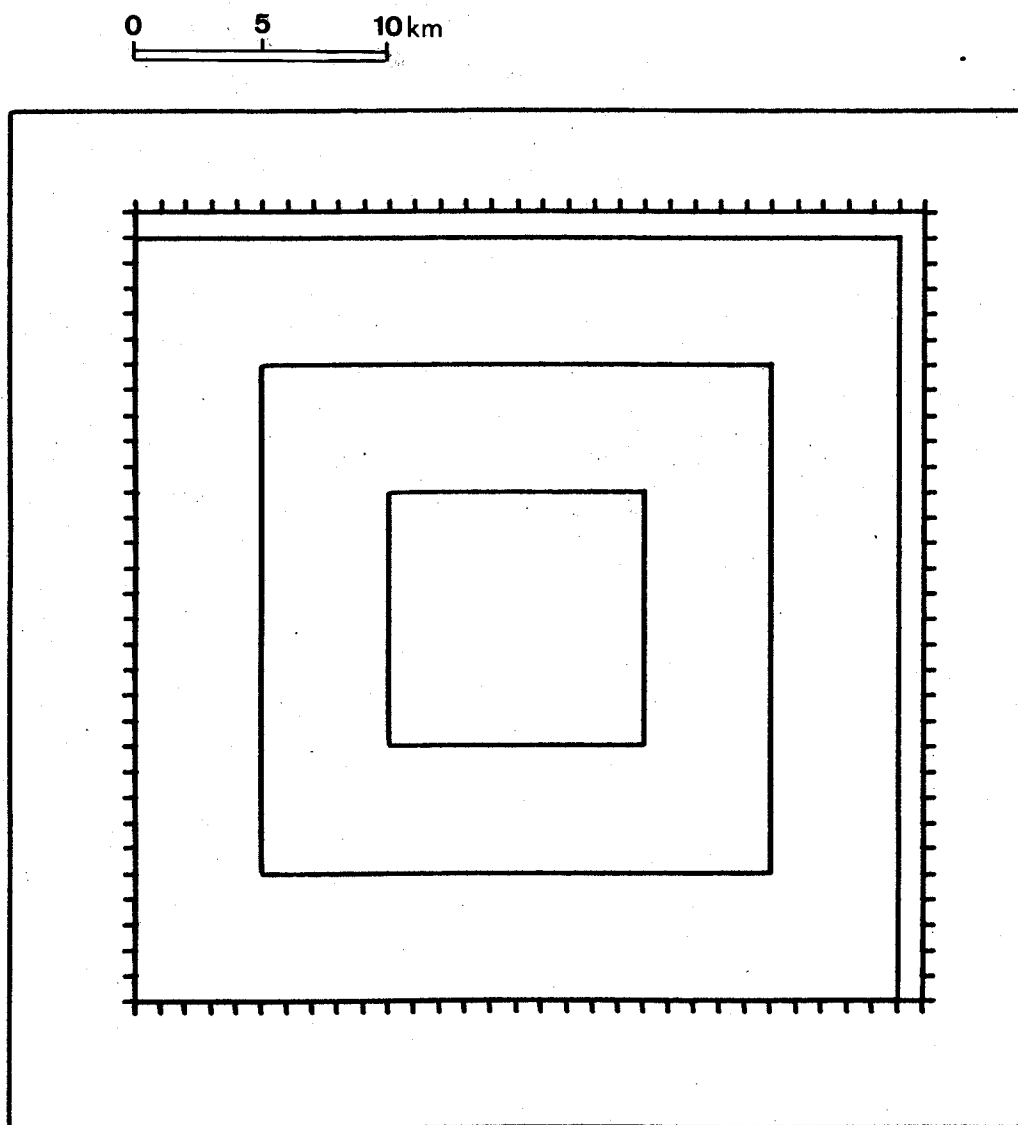


FIG.20 - Disposição dos prismas profundos, simulando um alto no embasamento, utilizada no terceiro teste.

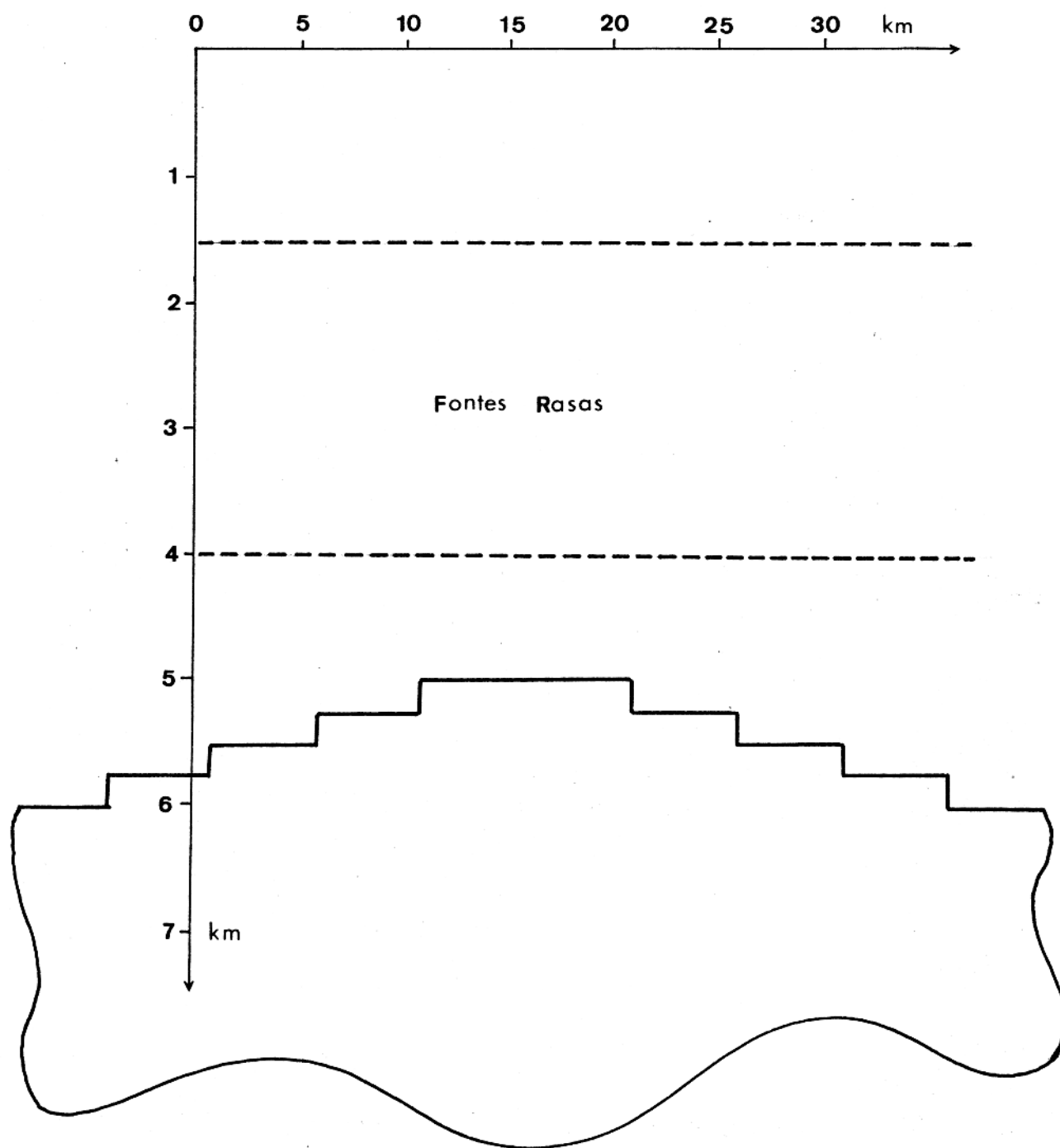
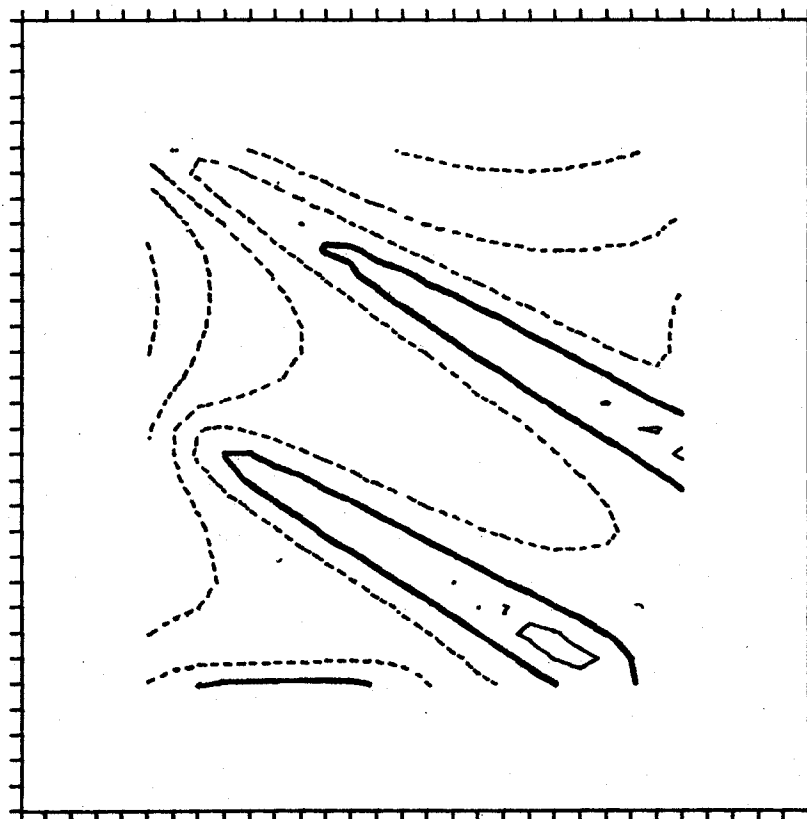


FIG.21 - Disposição das fontes em perfil para o terceiro teste .



0 5 10 km

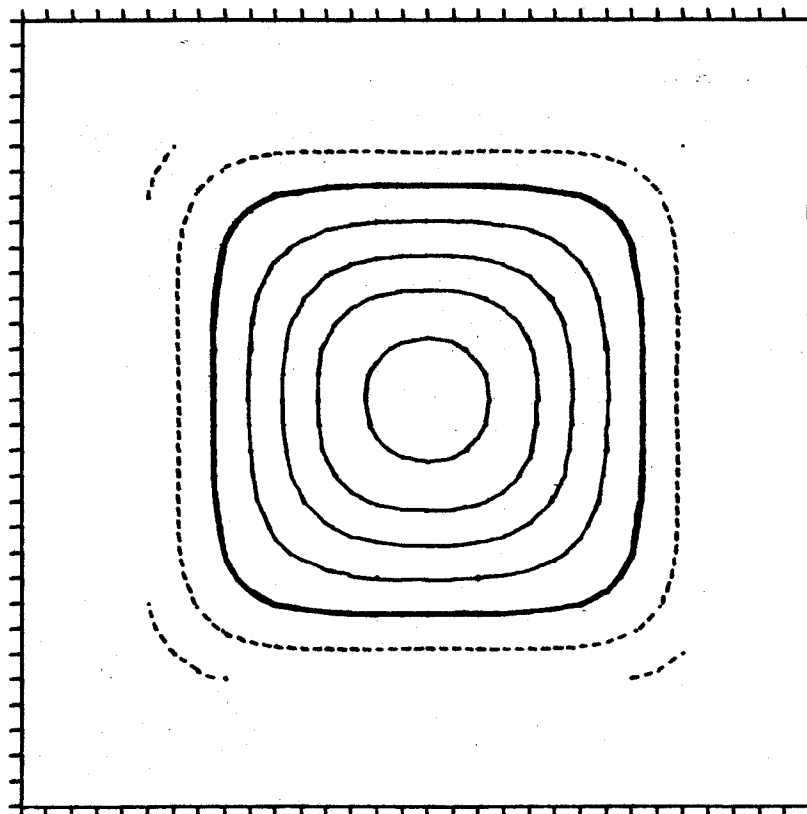
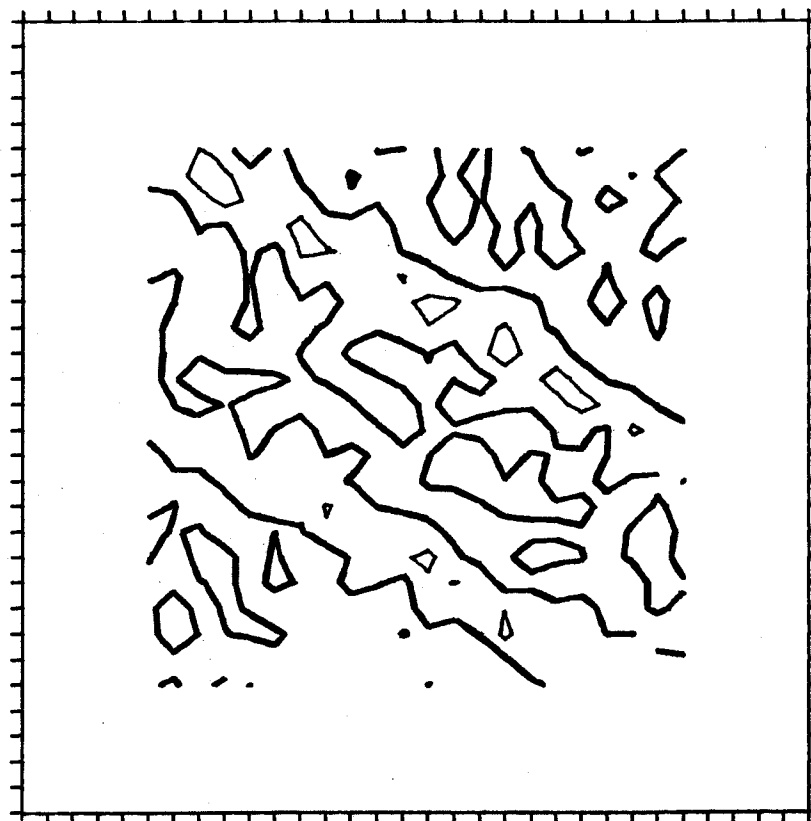


FIG.22 - Acima: campo das fontes rasas para o terceiro teste. Linha grossa=0nT; linha fina>0nT; linha tracejada<0nT. Abaixo: campo das fontes profundas para o terceiro teste. Linha grossa=50nT; linha fina>50nT; linha tracejada<50nT. Intervalo de contorno de 3nT.



0 5 10 km

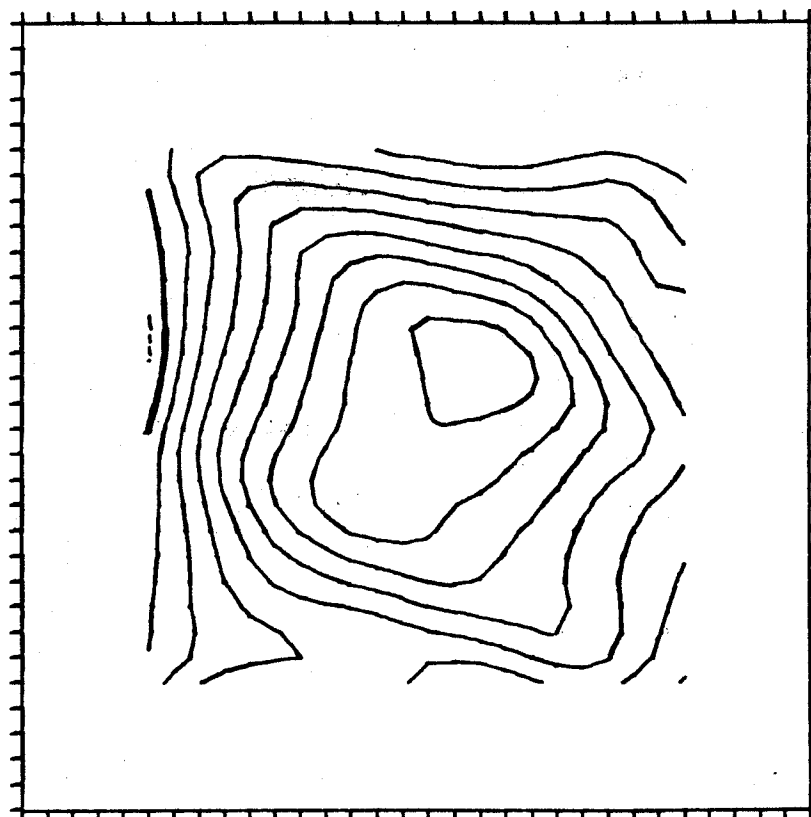
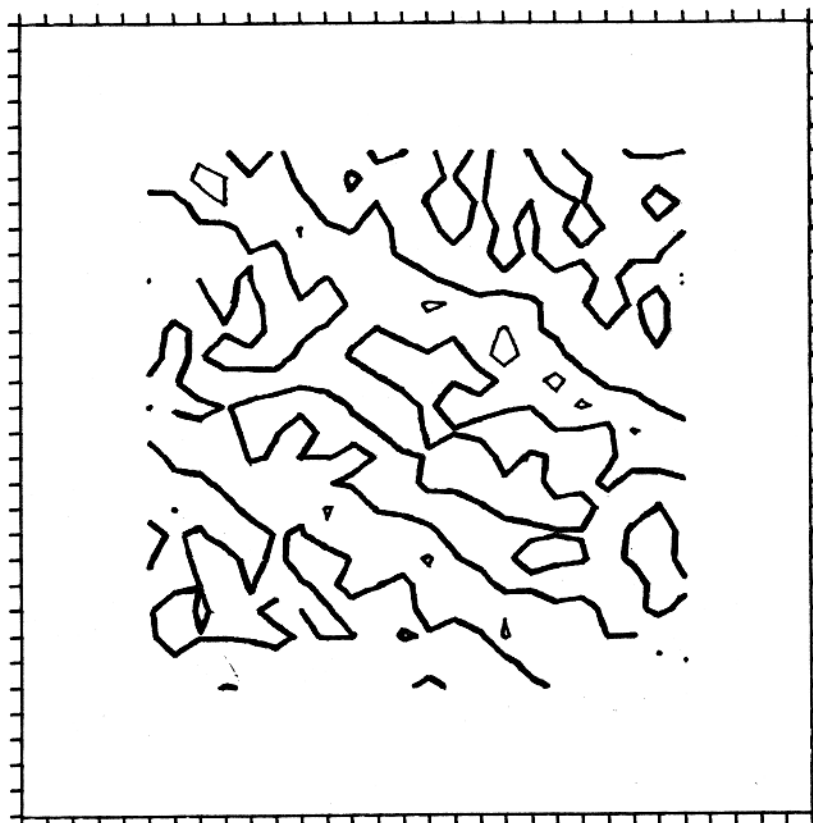
A horizontal scale bar with three segments labeled 0, 5, and 10 km.

FIG.23 - Acima: campo residual calculado pelo método de Spector. Linha grossa=0nT; linha fina>0nT; linha tracejada<0nT. Abaixo: campo regional calculado pelo método de Spector. Linha grossa=50nT; linha fina>50nT; linha tracejada<50nT. Intervalo de contorno de 3nT.



0 5 10 km

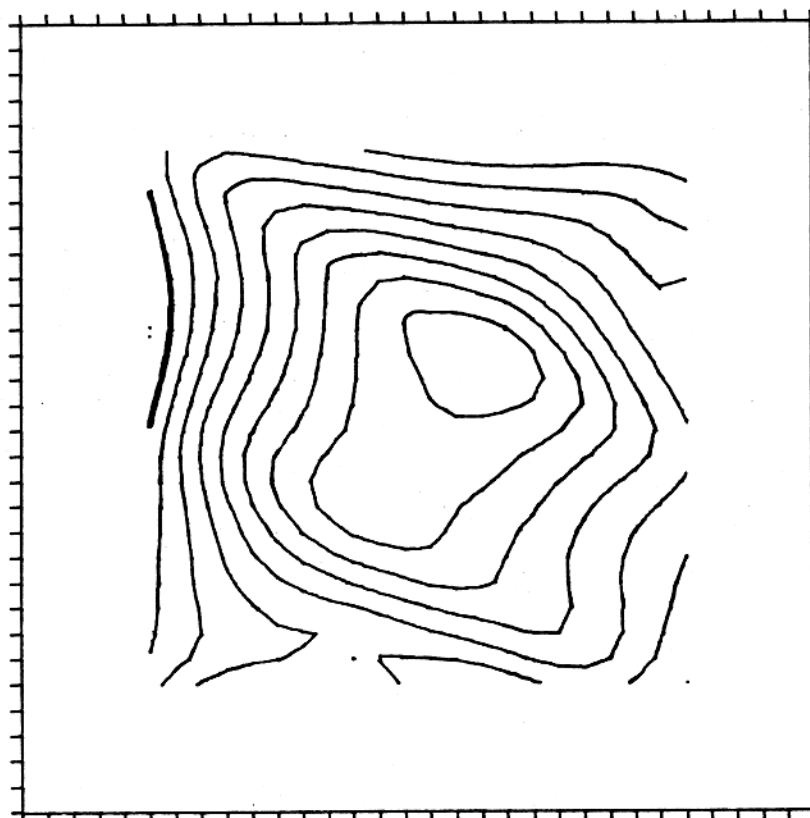
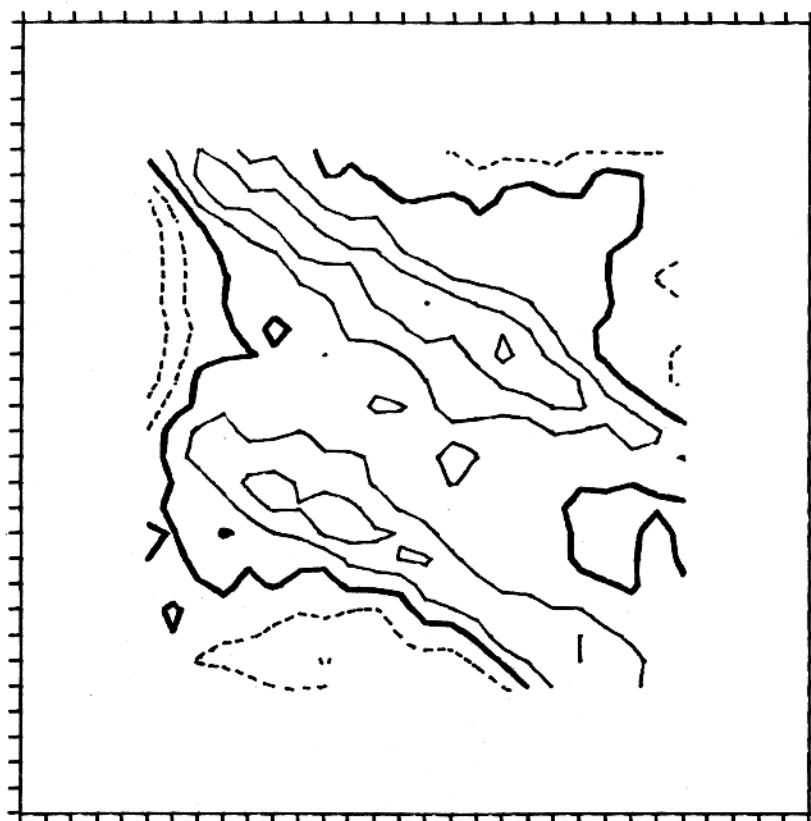


FIG.24 - Acima: campo residual calculado pelo método de Syberg. Linha grossa=0nT; linha fina>0nT; linha tracejada<0nT. Abaixo: campo regional calculado pelo método de Syberg. Linha grossa=50nT; linha fina>50nT; linha tracejada<50nT. Intervalo de contorno de 3nT.



0 5 10 km

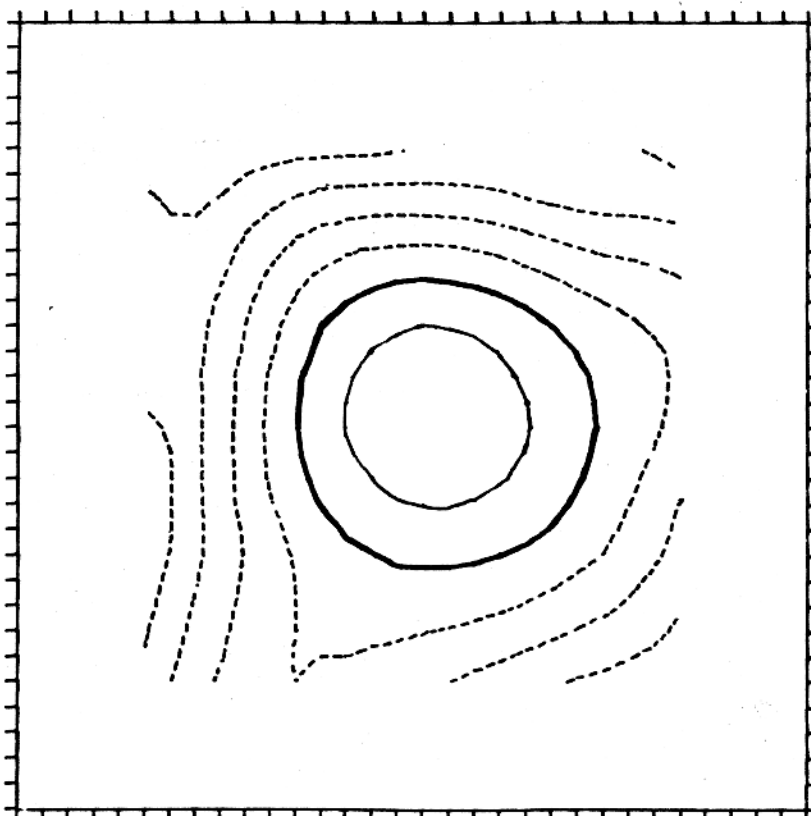


FIG.25 - Acima: campo residual calculado pelo método proposto. Linha grossa=0nT; linha fina>0nT; linha tracejada<0nT. Abaixo: campo regional calculado pelo método proposto. Linha grossa=50nT; linha fina>50nT; linha tracejada<50nT. Intervalo de contorno de 3nT.

4. APLICAÇÃO DE DADOS REAIS

O método proposto para separação regional-residual foi aplicado em dados aeromagnéticos de uma área a sudoeste de Manaus, entre as latitudes $2,7^{\circ}\text{S}$ e $4,5^{\circ}\text{S}$ e longitudes 60°W e $62,5^{\circ}\text{W}$. As linhas foram voadas na direção N-S, espaçadas em média de 2km. A altitude barométrica de voo foi de 400m, a inclinação do campo o geomagnético é de $18,5^{\circ}\text{N}$ e declinação $6,0^{\circ}\text{W}$. Os dados foram digitalizados a partir de cartas na escala 1:100.000, com intervalos de contorno de 10 T, em uma malha quadrada de 278x193 pontos espaçados de 1 km (Silva, 1976).

Os dados foram reduzidos ao polo através do método de camada equivalente (Leão e Silva, 1987) pressupondo magnetização na mesma direção do campo geomagnético e o mapa resultante está apresentado na figura 26.

4.1 Sumário Geológico

A área do levantamento, abrangendo cerca de 52.000 km², situa-se na borda leste do Alto do Purus que separa as bacias do Alto e Médio Amazonas. A espessura média do pacote sedimentar, nesta área é de 3,5 km, atingindo até 5 km em alguns locais (Andrade e Cunha, 1971). A seguir descrevemos a estratigrafia ainda segundo Andrade e Cunha (1971).

O embasamento consiste de migmatitos, granitos e granodioritos, riolitos pórfiros e intrusões andesíticas. O pacote sedimentar foi depositado durante transgressões e regressões marinhas. Os registros do período Ordoviciano estão restritos sobre o Alto do Purus e consistem de sedimentos fluviais na porção inferior e superior e marinhos na porção média, constituindo a bacia Prosperança-Acarí.

A primeira transgressão marinha data do Siluriano e está registrada pela formação Trombetas constituída de arenitos, folhelhos e siltitos. O soerguimento do Alto do Purus, no Siluriano Superior, marcou o final deste evento.

Outra transgressão marinha ocorreu no início do Devoniano Inferior. O período deposicional se estende até o Carbonífero Inferior e estão registrados pelas formações Maecurú (arenitos), Ererê (siltitos e folhelhos) e Curuá (siltitos e diamictitos).

No Carbonífero Inferior, ocorreu vulcanismo básico, com intrusão do magma, através de diáclases, formando soleiras e diques. Durante este período houve novo soerguimento do Alto do Purus iniciando outro ciclo de regressão marinha.

Entre o Carbonífero Superior e o Permiano ocorreu a última transgressão marinha na Bacia Amazônica registrada pela formação Monte Alegre (carbonatos e evaporitos). A deposição no Permiano consistiu predominantemente de sedimentos de origem continental registrados pelos siltitos da Formação Suncuduri.

Os períodos Triássico e Jurássico estão marcados por intenso magmatismo básico formado diques e soleiras. As soleiras de diabásio, que se estendem por quase toda a área iniciam a 400m e vão até 600m de profundidade (Andrade e Cunha, 1971), com os diques ocorrendo a profundidade maiores.

O Cretáceo e o Terciário estão registrados por arenitos e folhelhos de origem continental da Formação Alter do Chão. O Quaternário está marcado pelos depósitos aluvionais, ao longo dos rios.

4.2 Separação Regional-Residual

Os mapas regional e residual foram obtidos a partir do mapa reduzido ao polo mostrado na fig.26. A camada de bipolos foi estabelecida a 2km de profundidade, com separação entre os monopolos que formam cada bipolo de 200m. A separação entre os doublets equivalentes foi de 1km. A camada de monopolos utilizada está a 9km de profundidade, com separação entre os monopolos de 4,5km. Os mapas residual e regional obtidos, são mostrados nas figuras 27 e 28. As figuras 29 e 30 mostram as feições lineares nos mapas residual e regional.

4.2.1 Discussão dos resultados

Observando-se o mapa regional, vemos que as feições lineares principais ocorrem na direção NE-SW assinalados na figura com lineamentos menos marcantes na direção NW-SE. Anomalias de grande amplitude e extensão ocorrem na área e estão numeradas na figura . A presença de grandes áreas com contornos negativos caracteriza a possível ocorrência de forte remanência na área.

As feições mais marcantes do mapa residual são lineamentos que estão indicados na figura . Observamos que as direções predominantes são NW-SE e NE-SW sendo que algumas feições lineares na direção E-W são também aparentes. Verificamos portanto forte correlação entre as direções de lineamentos presentes no mapa regional com algumas do mapa residual. Esta correlação também é evidenciada pelas anomalias 1 e 2 indicadas na figura que estão fortemente correlacionada com as anomalias 1 e 2 da figura .

Esta correlação entre os dois mapas pode ser interpretada de duas maneiras. Em primeiro lugar, considerando-se que as premissas nas quais se baseia o método proposto para separação das anomalias não são suficientes, o que certamente é verdade, como é o caso da remanência que não foi levada em conta no processo de redução ao polo, assim como o efeito associado à extensão das anomalias, que foi discutido nos testes sintéticos, o que faz com que parte do sinal seja transmitido do mapa regional para o residual, ou vice-versa. Também a disposição das fontes pode não se adequar às premissas estatísticas de Spector (1968) implicitamente postuladas no modelo de camadas, de que as fontes estejam confinadas a dois níveis distintos. Em segundo lugar, é razoável considerarmos que os grandes lineamentos do mapa regional indiquem zonas de fraqueza intracrustais as quais quando reativadas controlariam os processos intrusivos na área o que levaria a forte correlação entre as fontes magnéticas rasas e profundas.

O efeito da transmissão de sinal entre os dois mapas é bem evidente nas anomalias 1 e 2, que se apresentam como grandes

intrusões intracrustais atingindo possivelmente a base do pacote sedimentar. As anomalias 2 e 9 estão correlacionadas com anomalias gravimétricas da área (Silva, 1976), o que reforça a hipótese de grandes massas intrusivas. A correlação entre as feições lineares parece indicar eventos que estão correlacionados estruturalmente, o que é corroborado pela informação gravimétrica (Hasui et ali, 1984).

As grandes anomalias, 9 e 10, parecem ter sido bem separadas estando possivelmente associadas a processos geológicos que ocorrem em grandes profundidades, como indica a informação gravimétrica (Silva, 1976).

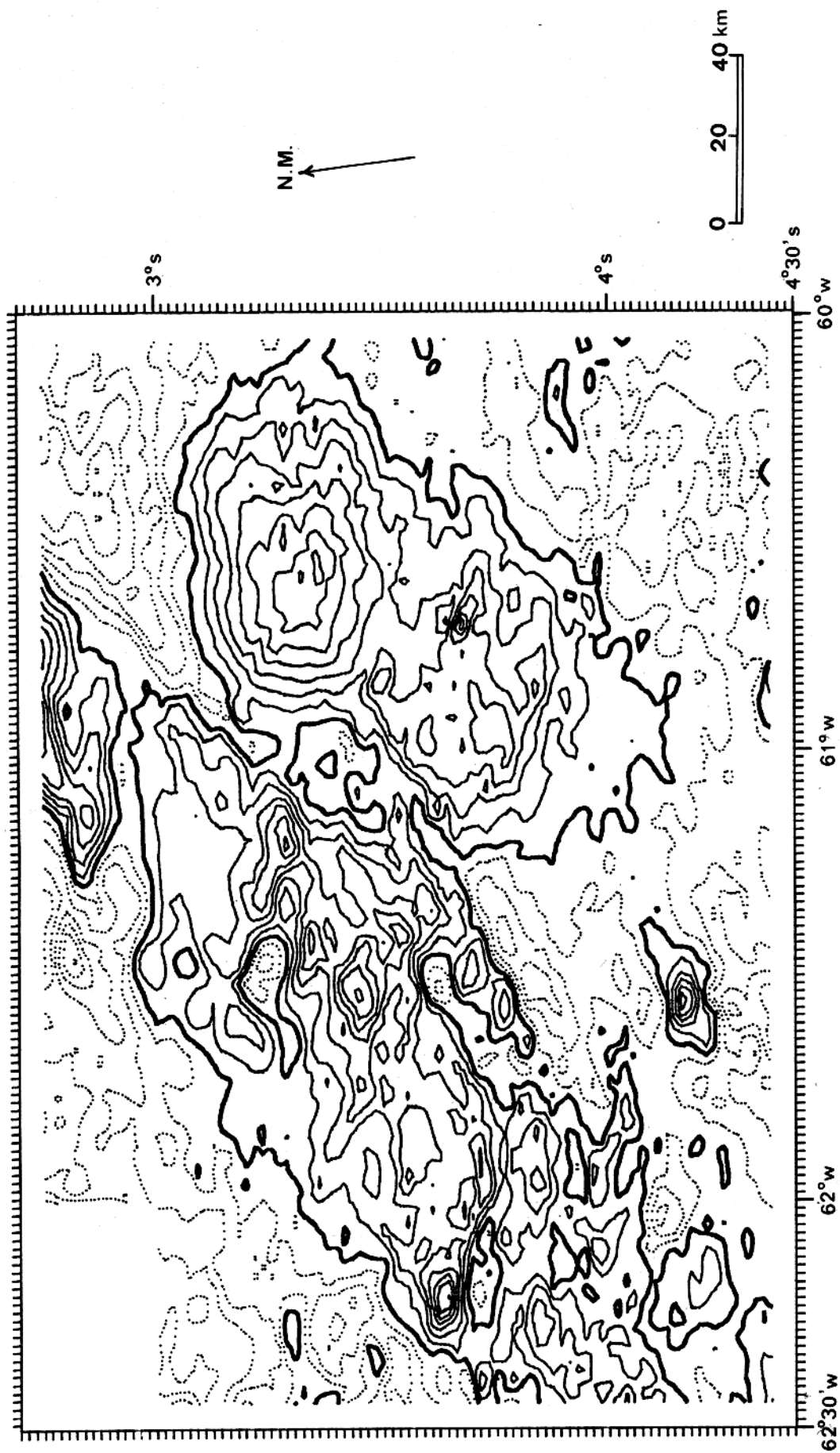


FIG.26 - Campo total reduzido ao polo da área a sudoeste de Manaus.
 Linha grossa=50nT; linha fina>50nT; linha tracejada<50nT.
 Intervalo de contorno de 50nT.

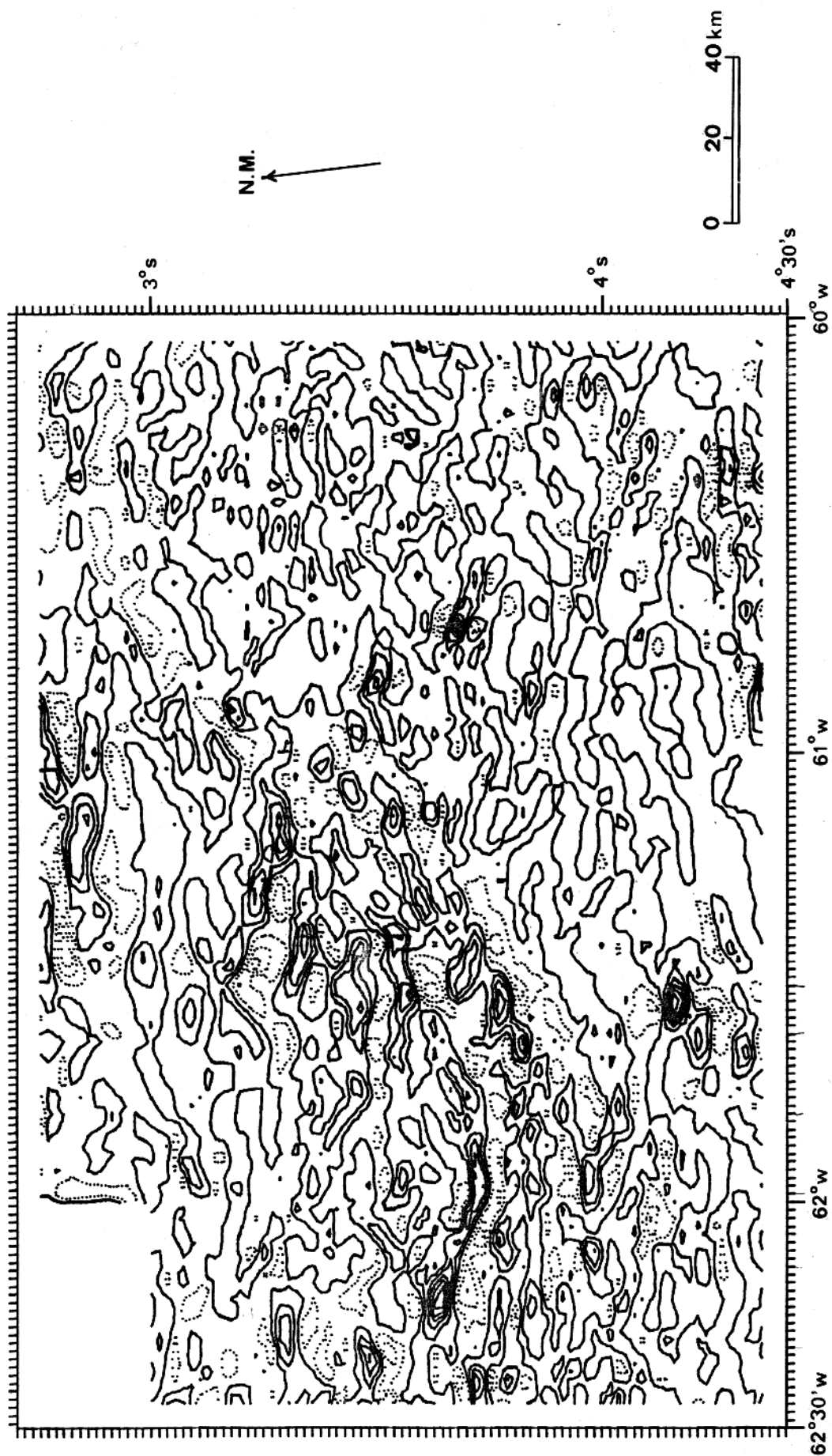


FIG.27 - Campo residual da área a sudoeste de Manaus calculado pelo método proposto.
 Linha contínua > 0nT; linha pontilhada < 0nT.
 Intervalo de contorno de 25nT.

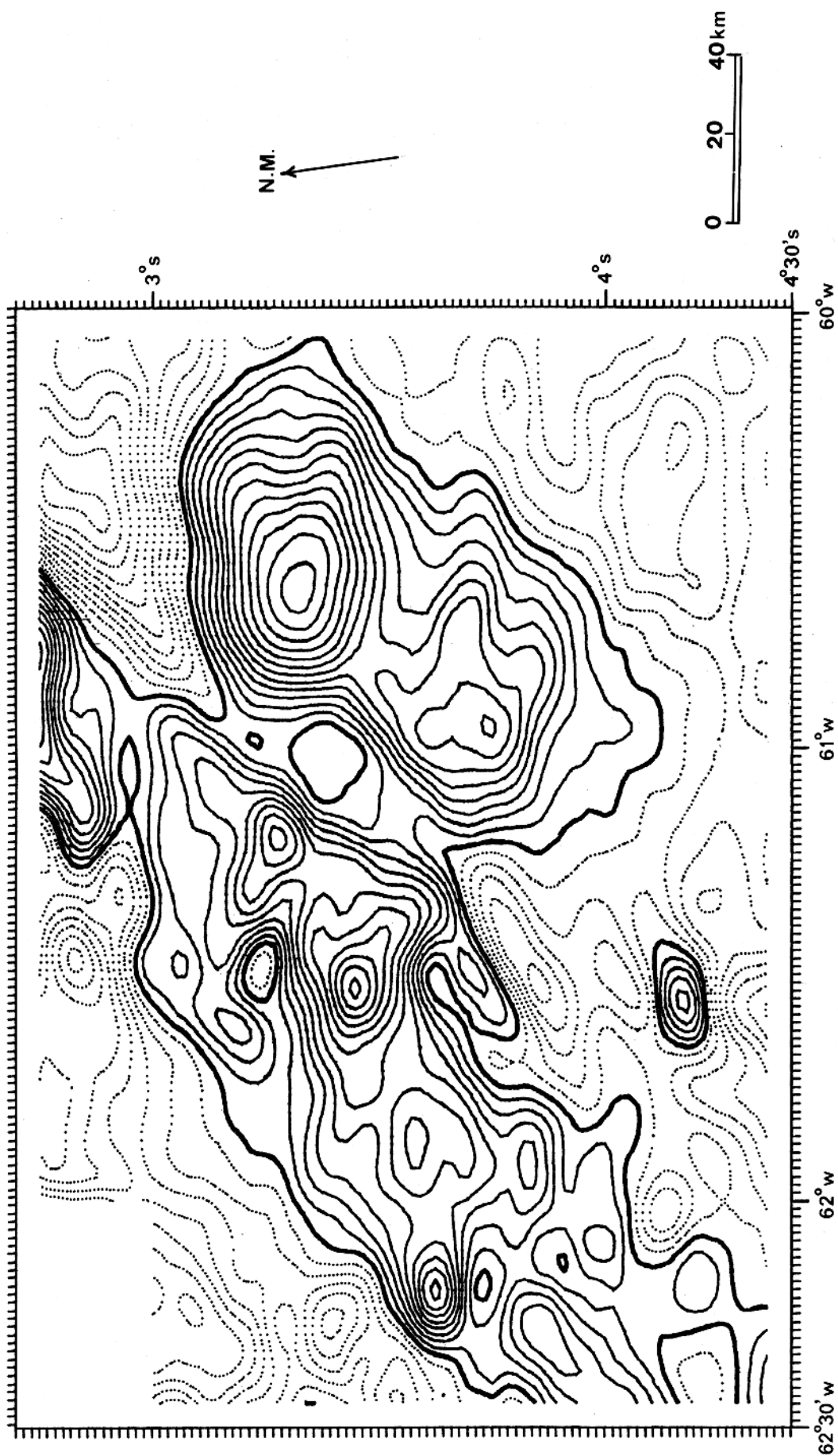


FIG.28 - Campo regional da área a sudoeste de Manaus calculado pelo método proposto. Intervalo de contorno de 25nT. Linha grossa= 0 nT; linha fina 0 nT; linha tracejada 0 nT.

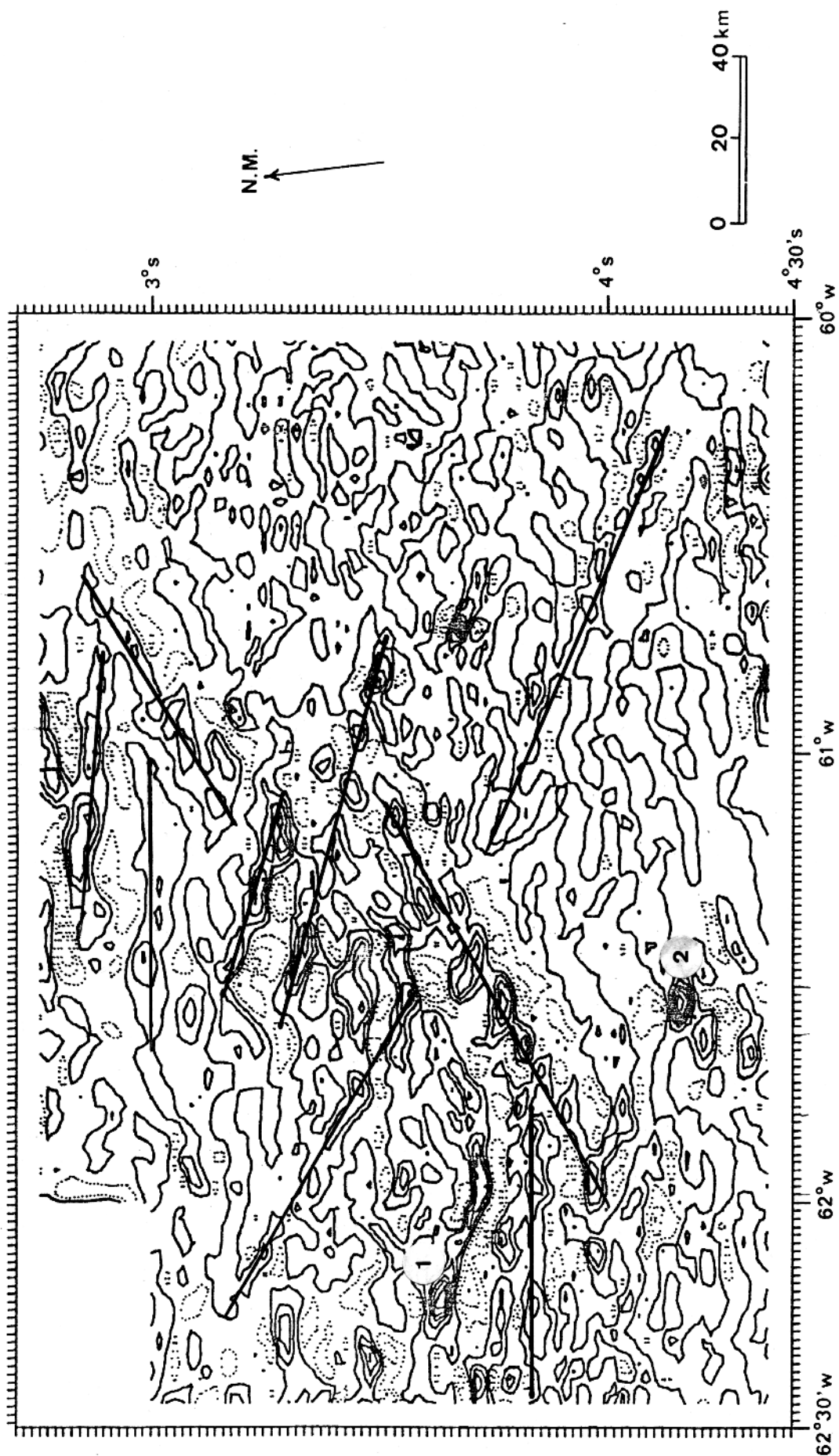


FIG.29 - Feições direcionais marcantes no mapa residual da área sudoeste de Manaus obtido pelo método proposto. Intervalo de contorno 25 nT. Linha contínua >0nT; linha tracejada <0nT

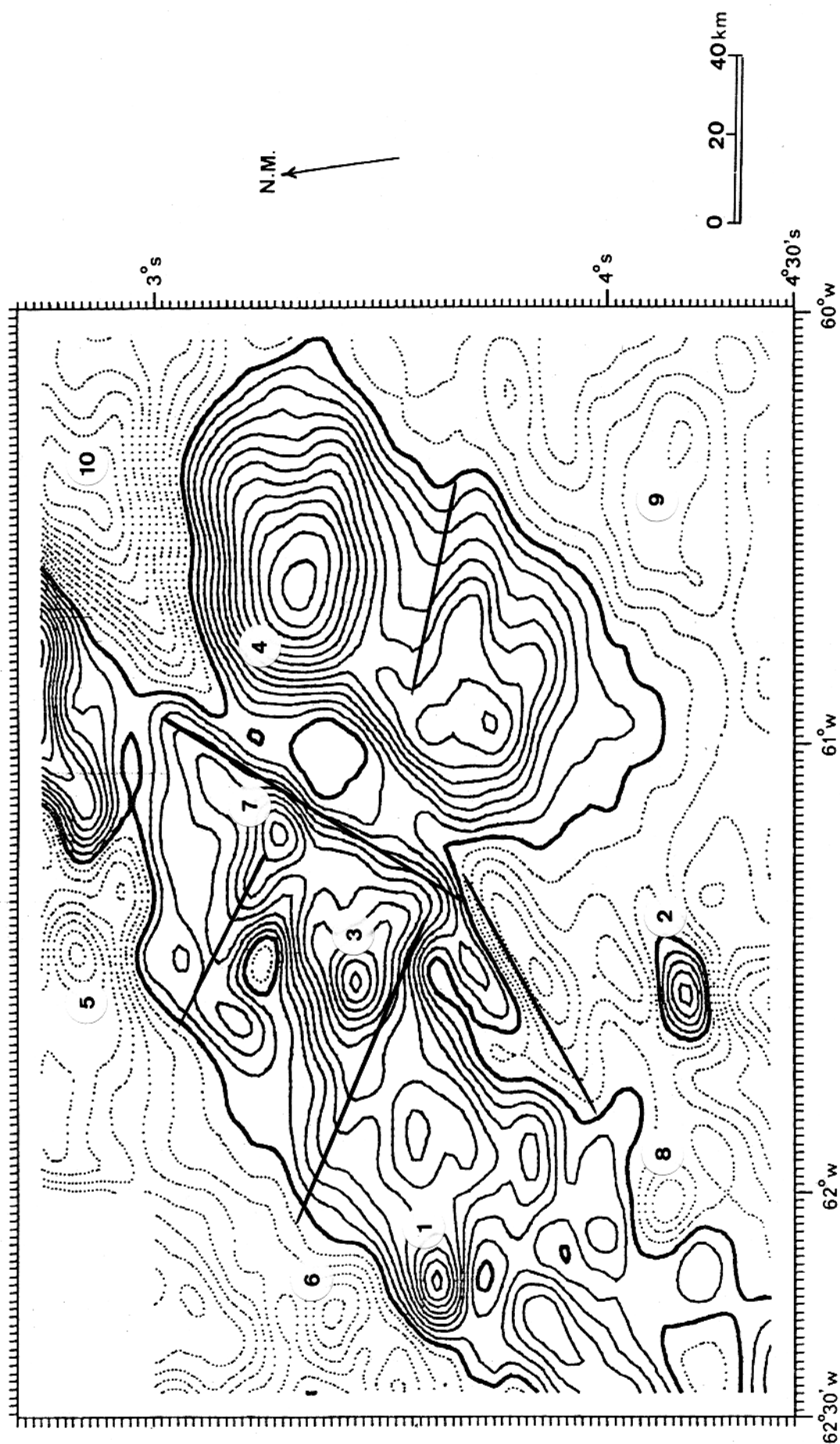


FIG.30 - Feições direcionais marcantes e principais anomalias no campo regional da área a sudoeste de Manaus calculado pelo método proposto. Intervalo de contorno 25 nT. Linha grossa=0 nT; linha fina> 0 nT; linha tracejada<0 nT.

5. CONCLUSÕES

O método proposto para separação de anomalias regionais e residuais em magnetometria apresentado possui as seguintes propriedades:

1. Incorpora informações a priori sobre a distribuição de fontes na subsuperfície de maneira simples, especificamente, através da qualidade das fontes presumidas, dipolos para fonte rasas e monopolos para fontes profundas, e através da profundidade de separação entre as camadas. Este método não necessita ainda de hipóteses adicionais sobre a distribuição de magnetização nas camadas como o método de Syberg (1972).
2. Não depende de uma análise espectral dos dados para estabelecer um filtro específico e, portanto, se presta a padronização do processamento.
3. Permite o rápido processamento de áreas densamente amostradas, além de minimizar o efeito de borda, devido a formulação do problema na forma subdeterminada.
4. Produz resultados equivalentes ou melhores que os métodos de Spector (1968) e Syberg (1972), sob as condições pressupostas para a distribuição de fontes na subsuperfície, como demonstra os testes com dados sintéticos.
5. Apresenta resultados superiores aos de Syberg (1972) e Spector (1968) quando aplicado a área contendo fontes interferentes fora da janela de observações.
6. Permitir levar em conta, de forma simples, o ruído aleatório presente nos dados.
7. É numericamente estável.

Estas propriedades, ao nosso entender, justificam o

uso deste método no processamento de grandes áreas densamente amostradas, sendo desnecessário a partição dessas áreas para o processamento, além de que, este procedimento, juntamente com o trabalho de Leão e Silva (1987), permitem o tratamento de todo o processamento de dados de campo potencial como um problema inverso subdeterminado, formulado de modo a produzir transformações e justificadas fisicamente.

REFERÊNCIAS

- AGOCS, W.B. - 1951 - Least squares residual anomaly determination. *Geophysics*. 16:686-696.
- ANDRADE, C.A.C.; CUNHA, F.M.B. - 1971 - Revisão geológica da Bacia Paleozóica do Amazonas. In: *Anais do XXV Congresso Brasileiro de Geologia*, São Paulo, v.3, p.93-112.
- BHATTACHARYYA, B.K. - 1965 - Two-dimensional harmonic analysis as a tool for magnetic interpretation. *Geophysics*. 30:829-857.
- BODVARSSON, G. - 1971 - Approximation methods for equivalent strata. *Journal of Geophysical Research*. 76:3932-3939.
- BRACEWELL, R.H. - 1965 - The Fourier transform and its applications. New York, Mc Graw-Hill Book. 381p.
- CLARKE, G.K.C. - 1969 - Optimum second-derivative and downward-continuation filters. *Geophysics*. 34:424-437.
- DAMPNEY, C.N.G. - 1969 - The equivalent source technique. *Geophysics*, 34(1):39-53.
- DEAN, W.C. - 1958 - Frequency analysis for gravity and magnetic interpretation. *Geophysics*. 23:97-127.
- FULLER, B.D. - 1967 - Two-dimensional frequency analysis and design of grid operators. In: *Society of Exploration Geophysicists, Mining Geophysics*. Tulsa. v.2, p.658-708.
- GRANT, F.S. - 1972 - Review of data processing and interpretation in gravity and magnetics, 1964-71. *Geophysics*. 37(4):647-661.
- GRANT, F.S. ; WEST, G.F. - 1965 - Interpretation theory in applied geophysics. New York, Mc Graw-Hill. 583p.
- GRIFFIN, W.R. - 1949 - Residual gravity in theory and practice. *Geophysics*. 14(1):39-59.
- HAMMING, R.W. - 1977 - Digital filters. New Jersey, Englewood Cliffs. 226p.
- HASUI, Y.; HARALYI, N.; SCHOBENHAUS, C. - 1984 - Elementos geofísicos e geológicos da região Amazônica. Subsídios para o modelo geotectônico. In: *Anais do Symposium Amazônico*, Manaus. p.129-147.
- HENDERSON, R.G. - 1970 - On the validity of the use of upward continuation integral for magnetic intensity data. *Geophysics*, 35(5):916-919.

- HOERL, A.E.; KENNARD, R.W. - 1970 - Ridge regression : biased estimation for non orthogonal problems and applications to non orthogonal problems. *Technometrics* , 12:55-82.
- JACOBSEN, B.H. - 1987 - A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps. *Geophysics*, 52(8):1138-1148.
- KRASNOV, M.L.; MAKARENKO, G.I.; KISELIOV, A.I. - 1984 - *Cálculo variacional*. Moscou, Editora MIR. 216p.
- LEÃO, J.W.D.; SILVA, J.B.C. - 1987 - Discrete linear transformations applied to densely sampled potential field data. *Geophysics*, submetida para publicação.
- MENKE, W. - 1984 - *Geophysical data analysis: discrete inverse theory*. Orlando, Academic Press. 260p.
- NAIDU, P.S. - 1967 - Two-dimensional Strakhov's filter for extraction of a potential field signal. *Geophysical Prospecting* . 15:135-150.
- OLDHAM, C.H.G. ; SUTHERLAND, D.B. - 1955 - Orthogonal polynomials : their use in estimating the regional effect. *Geophysics* . 20(2):295-306.
- SILVA, J.B.C. - 1976 - Desenvolvimento de técnicas de filtragem e sua aplicação a dados aeromagnéticos da Bacia Amazônica. Tese de Mestrado. Belém, UFPa/CG. 188p.
- SKEELS, D.C. - 1967 - What is residual gravity?. *Geophysics* . 32:872-876.
- SPECTOR, A. - 1968 - Spectral analysis of aeromagnetic maps. Tese de Doutorado. Toronto, Universidade de Toronto. 189p.
- SPECTOR, A.; GRANT, F.S. - 1970 - Statistical model for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*. 35:293-302.
- STRAKHOV, V.N. - 1964 - The smoothing of observed values of potential fields, I-II. *Geophysics*. 10:1479-1493, 11:1334-1653.
- STRAKHOV, V.N.; LAPINA, M.I. - 1967 - A method of smoothing potential fields. *Izv., Earth Physics*. 8:40-57.
- SYBERG, F.J.R. - 1972 - A Fourier method for the regional-residual problem of potential fields. *Geophysical Prospecting*. 20:47-75.
- ULRYCH, T.J. - 1968 - Effect of wavelength filtering on the shape of the residual anomaly. *Geophysics*. 33(6):1015-1018.

ZURFLUEH, E.G. - 1967 - Application of two-dimensional
wavelength filtering. Geophysics. 36(6):1015:1035.

linear

APÊNDICE

Desejamos determinar o extremo do funcional,

$$F(p_1, p_2, p_3, L) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \left(\sum_{j=1}^3 (p^j)^2 \right) dx' dy' + \\ + \iint_{-\infty}^{+\infty} L(x, y) \{ T^0(x, y) - \iint_{-\infty}^{+\infty} \left(\sum_{j=1}^3 G^j p^j \right) dx' dy' \} dx dy .$$

A condição necessária é que $\delta F_i = 0$, onde δF_i é a diferencial de F em relação a p_i ($i=1, 2, 3$) (Krasnov et al., 1973). Considerando o acréscimo do funcional F em relação a uma variação δp_i , temos

$$F_i = F(p_i + \delta p_i) - F(p_i) \quad i=1, 2, 3 \\ \Delta F_i = \iint_{-\infty}^{+\infty} \left(\sum_{j=1}^3 (p^j + \delta p_i)^2 \right) dx' dy' + \iint_{-\infty}^{+\infty} L(x, y) \{ T^0(x, y) - \iint_{-\infty}^{+\infty} \sum_{j=1}^3 G^j (p^j + \delta p_i) dx' dy' \} dx dy - \\ - \iint_{-\infty}^{+\infty} \left(\sum_{j=1}^3 (p^j)^2 \right) dx' dy' - \iint_{-\infty}^{+\infty} L(x, y) \{ T^0(x, y) - \iint_{-\infty}^{+\infty} \sum_{j=1}^3 G^j p^j dx' dy' \} dx dy .$$

A expressão acima simplifica para:

$$\Delta F_i = \iint_{-\infty}^{+\infty} 2p_i \delta p_i dx' dy' - \iint_{-\infty}^{+\infty} L(x, y) \{ \iint_{-\infty}^{+\infty} G_i \delta p_i dx' dy' \} dx dy + \iint_{-\infty}^{+\infty} p_i^2 dx' dy' ,$$

como todas as funções são contínuas podemos trocar a ordem de integração na segunda parcela desta expressão e obtemos,

$$\Delta F_i = \iint_{-\infty}^{+\infty} \{ 2p_i - \iint_{-\infty}^{+\infty} G_i L(x, y) dx dy \} \delta p_i dx' dy' + ||\delta p_i||^2 .$$

O último termo da expressão acima tende a zero quando $||\delta p_i|| \rightarrow 0$ e a primeira parcela é linear em p_i . Logo (Krasnov et al., 1973),

$$\delta F_i = \iint_{-\infty}^{+\infty} \{ 2p_i - \iint_{-\infty}^{+\infty} G_i L(x, y) dx dy \} \delta p_i dx' dy' .$$

Se portanto a condição de extremo implica, em consequência do teorema fundamental do cálculo variacional, em que,

$$p_i = (1/2) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G_i L(x,y) dx dy \quad i=1,2,3$$

que são as soluções do problema em função de $L(x,y)$.