

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS FEIÇÕES
LINEARES OBSERVADO EM DADOS AEROMAGNÉTICOS
DA BACIA DO PARANÁ**

por

SÉRGIO AUGUSTO MORAIS MACHADO

Engenheiro Geólogo (Universidade Federal de Ouro Preto – 1987)

Tese submetida como requisito parcial ao grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

em

GEOFÍSICA

ao

Colegiado do Curso de Pós-Graduação em

Geofísica

da

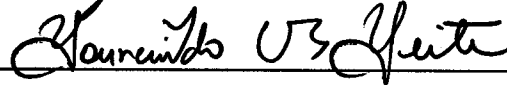
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Banca Examinadora :

Dr. Douglas Patrick O'Brien(Orientador)



Dr. Lourenildo W. Barbosa Leite



Dr. Marco Polo Pereira da Boa Hora



Data da Homologação : 28/12/1990

MACHADO, Sérgio Augusto Morais. Estudo do comportamento das feições lineares observado em dados aeromagnéticos da Bacia do Paraná. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1990. 144 p. il. Tese (Mestrado em Geofísica) – Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPa., 1990.

1. AEROMAGNETOMETRIA APLICADA – Bacia do Paraná. 2. FEIÇÕES LINEARES MAGNÉTICAS. 3. INTERPRETAÇÃO DE DADOS AEROMAGNÉTICOS.

ÍNDICE

Índice	i
Tabelas	iii
Lista de figuras	iii
Resumo	xi
Abstract	xii
CAPÍTULO 1. Introdução	01
CAPÍTULO 2. Interpretação qualitativa dos dados aeromagnéticos	03
2.1 Dados Observados	03
2.2 Considerações gerais	03
2.3 Interpretação dos mapas de contorno e especificação dos principais lineamentos magnéticos	04
CAPÍTULO 3. Modelamento das anomalias magnéticas das diferentes estruturas geológicas .	08
3.1 Principais modelos geofísicos relacionados às intrusões diabásicas	08
3.2 Um método para determinação da inclinação de magnetização total que utiliza a transformada de Hilbert	13
3.3 A aplicação do método que determina a inclinação de magnetização total aos grandes lineamentos da Bacia do Paraná	17
3.3.1 Generalidades	17
3.3.2 Rochas intrusivas dos grandes lineamentos	19
3.3.3 Tratamento dos dados aeromagnéticos	21
3.3.4 Os resultados da inclinação de magnetização total nos grandes lineamentos ...	22
3.3.5 Modelos hipotéticos para as principais inclinações de magnetização	23
3.3.6 O efeito térmico das intrusões diabásicas sobre as formações geradoras de hidrocarbonetos	25

CAPÍTULO 4. Geologia e arcabouço da Bacia do Paraná	26
4.1 Evolução tectono-sedimentar da bacia	26
4.2 Arcabouço estrutural da Bacia do Paraná	30
CAPÍTULO 5. Método das imagens sombreadas	33
5.1 Técnicas do relevo sombreado	33
CAPÍTULO 6. Descrição das imagens sombreadas	36
6.1 Feições observadas nas imagens	36
6.2 Estatística dos lineamentos representados na forma de roseta	38
CAPÍTULO 7. Contribuição das imagens de LANDSAT	39
7.1 Lineamentos nas imagens	39
CAPÍTULO 8. Integração das imagens sombreadas com as imagens de LANDSAT	42
CAPÍTULO 9. Conclusões e a contribuição dos lineamentos na evolução tectônica da Bacia do Paraná	44
Agradecimentos	46
Referências Bibliográficas	47
Apêndice A	52
Apêndice B	73
Apêndice C	77

TABELAS

Tab.1 – Principais especificações dos aerolevantamentos	87
Tab.2 – A magnetização das amostras coletadas próximas aos grandes lineamentos da Bacia do Paraná	105
Tab.A.1 – Testes para o campo anômalo do modelo bidimensional sem filtragem	54
Tab.A.2 – Testes para o campo anômalo do modelo bidimensional filtrado com passa-alta com 60km de comprimento de onda	55
Tab.A.3 – Resultados do levantamento estatístico realizado em áreas de 200km ² em torno dos lineamentos de Guapiara e Rio Alonzo	58
Tab.A.4 – Resultados do cálculo do centro do corpo bidimensional para o campo anômalo com interferência de dipolos	65
Tab.C.1 – Resultados do cálculo da inclinação de magnetização total e posição sentral para placas verticais com diferentes comprimentos	79

LISTA DE FIGURAS

Fig.1 – Mapa de localização dos projetos aeromagnéticos	86
Fig.2 – Mapa de localização da área estudada com as divisões em sub-áreas.	88
Fig.3 – Mapa de contorno dos dados aeromagnéticos com os principais lineamentos	89
Fig.4 – Mapa de contorno do campo magnético anômalo do projeto Arco de Campo Grande (sub-área 1)	90
Fig.5 – Mapa de contorno do campo magnético mostrando o pseudo-lineamento entre dois levantamentos distintos	91
Fig.6 – Mapa de contorno do campo magnético no embasamento com o lineamento de Guapiara (sub-área 5)	92

Fig.7 – Mapa de contorno do campo magnético mostrando o lineamento de Guapiara	93
Fig.8 – Mapa de contorno do campo magnético mostrando a região limitada entre os lineamentos São Jerônimo–Curiúva e Rio Alonzo	94
Fig.9 – Mapa de contorno do campo magnético mostrando o lineamento do Rio Piquiri	95
Fig.10 – Definição dos parâmetros da placa vertical bidimensional magnética	96
Fig.11 – Anomalia magnética da placa vertical mostrando o efeito do ângulo entre a direção da placa com o campo geomagnético na amplitude da anomalia. A placa apresenta direções N80°W, N60°W, N40°W e N20°W	97
Fig.12 – Anomalia magnética sintética com o alinhamento de duas placas verticais	98
Fig.13 – Mapa de contorno do campo magnético anômalo mostrando o detalhe da anomalia mapeada pelo projeto Arco de Campo Grande	99
Fig.14 – Anomalia magnética sintética do prisma semi–infinito vertical	100
Fig.15 – Geometria dos corpos bidimensionais	101
Fig.16 – Ângulos e distâncias para corpos bidimensionais usados no desenvolvimento do método para determinação da inclinação de magnetização	101
Fig.17 – Componentes da intensidade de magnetização para o dique fino semi–infinito sujeito a desmagnetização	102
Fig.18 – Direção de magnetização de todos os sítios estudados por Raposo e Ernesto (1989). Os símbolos vazios indicam polaridade normal e os cheios reversa	103
Fig.19 – Localização dos poços utilizados para coletar amostras de diabásio e basalto, próximo aos grandes lineamentos	104
Fig.20 – Representação esquemática dos resultados obtidos para as amostras de diabásio da Bacia do Paraná	106
Fig.21 – Latitudes atuais e paleomagnéticas ocupadas pelos sítios de amostragens segundo Ernesto (1985)	107

Fig.22 – Medida da polaridade de campo magnético terrestre para os últimos 250 m.a.	108
Fig.23 – Diagrama de roseta das inclinações de magnetização do lineamento de Guapiara ..	109
Fig.24 – Distribuição em mapa da inclinação de magnetização em mapa ao longo do lineamento de Guapiara	110
Fig.25 – Mapa de contorno do campo magnético mostrando em detalhe parte do lineamento de Guapiara	111
Fig.26 – Diagrama de roseta das inclinações de magnetização dos lineamentos do Rio Alonzo e São Jerônimo–Curiúva	112
Fig.27 – Distribuição em mapa da inclinação de magnetização ao longo dos lineamentos de São Jerônimo–Curiúva e Rio Alonzo	113
Fig.28 – Diagrama de roseta das inclinações de magnetização do lineamento do Rio Piquiri	114
Fig.29 – Efeito da desmagnetização na intrusão com inclinação de magnetização normal, resultando na magnetização próxima a vertical	115
Fig.30 – Modelo hipotético para a inclinação da magnetização resultante	116
Fig.31 – Localização da Bacia do Paraná no Brasil	117
Fig.32 – Mapa da profundidade do embasamento	118
Fig.33 – Coluna cronolitoestratigráfica da Bacia do Paraná mostrando a distribuição temporal e espacial das principais unidades litológicas numa seção hipotética SSE–NNW	119
Fig.34 – Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná	120
Fig.35 – Mapa de isópacas da Formação Ponta Grossa	121
Fig.36 – Mapa de isópacas das formações Itararé e Aquidauna	122
Fig.37 – Mapa de isópacas da Formação Irati	123
Fig.38 – Mapa de isópacas da Formação Pirambóia e Grupo Rosário do Sul	124

Fig.39 – Mapa de isópacas da Formação Botucatu	125
Fig.40 – Mapa de isópacas da Formação Serra Geral	126
Fig.41 – Mapa do arcabouço estrutural da Bacia do Paraná	127
Fig.42 – O elemento de superfície, mostrando a geometria e nomenclatura relevante	128
Fig.43 – Mapa de relevo sombreado da sub-área 6. A direção de iluminação possui 215° de azimute e 45° de elevação. A escala do mapa é 1:1.300.000	129
Fig.44 – Mapa de relevo sombreado da sub-área 6. A direção de iluminação possui 135° de azimute e 45° de elevação. A escala do mapa é 1:1.300.000	130
Fig.45 – Mapa de relevo sombreado da sub-área 3. A direção de iluminação possui 90° de azimute e 45° de elevação. A escala do mapa 1:1.600.000	131
Fig.46 – Mapa de relevo sombreado da sub-área 7. A direção de iluminação possui 90° de azimute e 45° de elevação. A escala do mapa é 1:1.300.000	132
Fig.47 – Mapa de relevo sombreado da área total estudada. A direção de iluminação possui 90° de azimute e 45° de elevação. A escala do mapa é 1:6.000.000	133
Fig.48 – Diagramas de rosetas dos lineamentos nas sub-áreas numeradas interpretado nas ima- gens sombreadas	134
Fig.49 – Diagrama de roseta das direções de lineamentos na parte centro-norte da área levantada, interpretado nas imagens sombreadas	135
Fig.50 – Diagrama de roseta das direções de lineamentos na parte centro-sul da área levantada, interpretado as imagens sombreadas	135
Fig.51 – Imagem de LANDSAT mostrando a região limitada pelos lineamentos de São Jerôni- mo-Curiúva e Rio Alonzo. Compare com a figura 43 e veja a resposta ao aerolevantamento desta região	136
Fig.52 – Imagem de LANDSAT mostrando parte do lineamento de Guapiara. Compare com a figura 45 e veja o lineamento de Guapiara representado na imagem sombreada	137

Fig.53 – Imagem de LANDSAT mostrando os lineamentos de direção NE–SW no embasamento. Compare com a figura 5 e veja a ausência dos lineamentos magnéticos de direção NW–SE (sub–área 5)	138
Fig.54 – Imagem de LANDSAT mostrando os lineamentos de direção NE–SW. Compare com a figura 43 e veja a ausência desses lineamentos e a presença dos lineamentos magnéticos de direção NW–SE nas imagens sombreadas	139
Fig.55 – Diagramas de rosetas dos lineamentos nas sub–áreas numeradas interpretados nas imagens de LANDSAT	140
Fig.56 – Diagrama de roseta das direções de lineamentos na parte centro–norte interpretados nas imagens de LANDSAT	141
Fig.57 – Diagrama de roseta das direções de lineamentos na parte centro–sul interpretados nas imagens de LANDSAT	141
Fig.58 – Diagrama de roseta das direções de lineamentos para a área a total interpretados nas imagens sombreadas	142
Fig.59 – Diagrama de roseta das direções de lineamentos para a área total interpretados nas imagens de LANDSAT	142
Fig.60 – Esquema de esforços atuantes durante os eventos Herciniano I e II	143
Fig.61 – Esquema de esforços atuantes no início da separação dos continentes durante o Jurássico e Cretáceo	144
Fig.1A – Modelo sintético bidimensional mostrando os parâmetros citados no texto	52
Fig.2A – Convenção adotada na determinação da direção do modelo sintético bidimensional	53
Fig.3A – Anomalia magnética do corpo bidimensional vertical	56
Fig.4A – Mapa de contorno do campo magnético mostrando o lineamento do Rio Piquiri centrado em várias janelas	59

Fig.5A – Desenho esquemático mostrando a área onde serão posicionadas as fontes interferentes	60
Fig.6A – Perfis da anomalia magnética do corpo bidimensional com magnetização vertical para baixo com a interferência de dipolos	62
Fig.7A – Perfis da anomalia magnética do corpo bidimensional com magnetização vertical para baixo com a interferência de prismas com magnetização	63
Fig.8A – Representação em diagrama de roseta do resultado da inclinação de magnetização para o corpo bidimensional com magnetização normal com interferência de dipolos	67
Fig.9A – Distribuição da inclinação de magnetização para o setor 1 apresentado na figura 8A	67
Fig.10A – Representação em diagrama de roseta do resultado da inclinação de magnetização para o corpo bidimensional com magnetização inversa com interferência de dipolos	68
Fig.11A – Distribuição da inclinação de magnetização para o setor 1 apresentado na figura 10A	68
Fig.12A – Representação em diagrama de roseta do resultado da inclinação de magnetização para o corpo bidimensional com magnetização vertical para baixo com interferência de dipolos	69
Fig.13A – Distribuição da inclinação de magnetização para o setor 1 apresentado na figura 12A	69
Fig.14A – Representação em diagrama de roseta do resultado da inclinação de magnetização para o corpo bidimensional com magnetização normal com interferência de prismas de base quadrada	70
Fig.15A – Distribuição da inclinação de magnetização para o setor 1 apresentado na figura 14A	70

Fig.16A – Representação em diagrama de roseta do resultado da inclinação de magnetização para o corpo bidimensional com magnetização inversa com interferência de prismas de base quadrada	71
Fig.17A – Distribuição da inclinação de magnetização para o setor 1 apresentado na figura 16A	71
Fig.18A – Representação em diagrama de roseta do resultado da inclinação de magnetização para o corpo bidimensional com magnetização vertical para baixo com interferência de prismas de base quadrada	72
Fig.19A – Distribuição da inclinação de magnetização para o setor 1 apresentado na figura 18A	72
Fig.1B – Diagramas de rosetas mostrando os resultados das inclinações de magnetização total dos lineamentos São Jerônimo–Curiúva e Rio Alonzo. O nível de corte adotado nestes testes foi de 10nT e os filtros pass–alta utilizados possuem comprimento de onda ($\lambda_{0,9}$) no intervalo de $10\text{km} \leq \lambda_{0,9} \leq 10\text{km}$	74
Fig.2B – Diagramas de rosetas mostrando os resultados das inclinações de magnetização total dos lineamentos São Jerônimo–Curiúva e Rio Alonzo. O nível de corte adotado nestes testes foi de 20nT e os filtros pass–alta utilizados possuem comprimento de onda ($\lambda_{0,9}$) no intervalo de $10\text{km} \leq \lambda_{0,9} \leq 10\text{km}$	75
Fig.1C – Desenho em planta da placa vertical, mostrando a posição no corpo onde foram realizados os cálculos	78
Fig.2C – Representação gráfica dos resultados da inclinação de magnetização para placas verticais com diferente comprimento (W). Neste exemplo a inclinação de magnetização da placa vertical é de 180°	80
Fig.3C – Desenho esquemático em planta da placa vertical centrado em uma janela espacial .	81
Fig.4C – Representação gráfica dos resultados da inclinação de magnetização calculada na vizinhança e ao longo da placa vertical. Neste exemplo a inclinação de magnetização da placa vertical é de 180°	83

Fig.5C – Representação gráfica dos resultados da amplitude calculada na vizinhança e ao longo da placa vertical indicada na figura 3C.	83
Fig.6C – Representação gráfica dos resultados da inclinação de magnetização calculada na vizinhança e ao longo da placa vertical. Neste exemplo a inclinação de magnetização da placa vertical é de 65°	84
Fig.7C – Representação gráfica dos resultados da amplitude calculada na vizinhança e ao longo da placa vertical indicada na figura 5C.	84
Fig.8C – Representação gráfica dos resultados da inclinação de magnetização calculada na vizinhança e ao longo da placa vertical. Neste exemplo a inclinação de magnetização da placa vertical é de 245°	85
Fig.9C – Representação gráfica dos resultados da amplitude calculada na vizinhança e ao longo da placa vertical indicada na figura 3C.	85

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS FEIÇÕES LINEARES
OBSERVADO EM DADOS AEROMAGNÉTICOS DA BACIA DO PARANÁ**
(TESE DE MESTRADO : dez./90)

SÉRGIO AUGUSTO MORAIS MACHADO

Orientador : Dr. Douglas Patrick O'Brien

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

RESUMO

O processamento dos dados aeromagnéticos em imagens revelou-se como um bom método de interpretação, que aqui denominamos de método das imagens sombreadas. A aplicação deste método foi feita em dados aeromagnéticos de uma área da Bacia do Paraná, com o objetivo de realçar os lineamentos que não são evidentes nos mapas de contorno.

Para subsidiar os nossos estudos, utilizamos imagens de LANDSAT porque muitos lineamentos presentes na bacia não possuem resposta ao levantamento aeromagnético. Com a integração destas duas imagens definimos duas direções dominantes para os lineamentos nos seguintes intervalos: $N40^{\circ}-60^{\circ}W$ e $N40^{\circ}-65^{\circ}E$. Com a definição deste padrão, obtivemos informações do arcabouço estrutural e, conseqüentemente, uma idéia da evolução tectônica da bacia.

A outra parte desenvolvida neste trabalho foi o cálculo do vetor de magnetização total nos principais lineamentos da bacia, e eles apresentaram um total de 5 inclinações de magnetização diferentes. Essas inclinações foram explicadas pela superposição do efeito da magnetização induzida, efeito de reversão do campo geomagnético, e o efeito da magnetização anisotrópica causada pela desmagnetização nos diques.

STUDY OF THE LINEAR FEATURES BEHAVIOR OBSERVED IN AEROMAGNETIC DATA IN THE PARANÁ BASIN

(MASTER THESIS : Dec./90)

SÉRGIO AUGUSTO MORAIS MACHADO

Adviser : Dr. Douglas Patrick O'Brien

Departamento de Geofísica – Centro de Geociências/UFPa

Caixa Postal 309 – Belém, PA, Brazil

ABSTRACT

The digital image processing of aeromagnetic data has proved to be an excellent method of interpretation. This technique is referred to as the shaded relief method. The method was applied to aeromagnetic data, over part of the Parana Basin, to enhance the lineaments that are not clearly seen on the original magnetic-anomaly maps.

To support our studies, we have used LANDSAT images, as many lineaments encountered in the basin are non-magnetic. This integration allowed definition of two dominant directions for the lineaments: $N40^{\circ} - 60^{\circ}W$ e $N40^{\circ} - 65^{\circ}E$. With the definition of this pattern, we obtained some information about the geological trends and, hence, an idea about tectonic evolution of the basin.

We also developed a procedure to compute the total magnetization vector of the principal lineament of the basin which showed five different inclinations of the magnetization vector. These inclinations are explained by a superposition of induced magnetization effects, field reversal effects, and effects of anisotropic magnetization caused by demagnetization within the dikes.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Este trabalho de tese tem a finalidade de aplicar um método de interpretação de dados potenciais denominado de método das imagens sombreadas, o qual foi desenvolvido no final da década de 70. A sua utilização é notável e a aplicação aqui feita será na interpretação dos lineamentos magnéticos presentes na Bacia do Paraná, a qual possui grandes lineamentos, sendo que muitos não são tão evidentes em mapa de contorno. O método das imagens sombreadas foi utilizado para realçar os lineamentos pouco evidentes.

Através de uma análise de literatura, notamos a importância que tem sido dada para este método, principalmente na literatura norte-americana, onde são numerosos os trabalhos que usaram este método, e abaixo procuramos apresentar alguns exemplos.

Hildenbrand (1985) desenvolveu um trabalho a nível regional, estudando os mapas magnéticos da parte central dos Estados Unidos. A utilização dos dados na forma digital permitiram a aplicação de uma grande variedade de técnicas, para realçar as anomalias e fornecer novas informações. O interesse particular neste trabalho eram as feições lineares magnéticas que podem refletir feições geológicas de escala continental. A utilização do método das imagens sombreadas foi importante, pois não só reconheceu os grandes lineamentos já definidos, mas também levantou a hipótese de outros possíveis lineamentos. Chandler (1985) utilizou o método das imagens sombreadas para estudar um enxame de diques que ocorre a nordeste do estado de Minnesota. Esse enxame de diques era pobremente conhecido, porque poucos são os diques que afloram. Ao empregar esta técnica, ele obteve detalhes estruturais que não eram evidentes em mapas de contorno. Guinness et al. (1983) aplicaram o método das imagens sombreadas em dados gravimétricos de uma área que possui um importante depósito mineral localizado no sul do estado de Missouri. Com as imagens eles determinaram duas lineações perpendiculares entre si, que foram denominadas de Baixo Gravimétrico Missouri e Fossa do Vale do Mississipi. Neste trabalho, eles usaram como base mapas geológicos, topográficos e imagens de satélite. As vantagens foram notáveis, quando eles sobrepuseram os dados coletados para uma base comum. Kowalik e Glenn (1987) descreveram de modo resumido o processamento dos dados aeromagnéticos na obtenção das imagens sombreadas,

e fizeram uma aplicação em três áreas diferentes, integrando as imagens sombreadas com imagens de LANDSAT. A combinação destas duas imagens aumentou a credibilidade na interpretação estrutural, pois um complementou o outro, e melhorou o entendimento geológico da área explorada.

Dods et al. (1985) do Serviço Geológico do Canadá, que a partir de 1977 iniciou um projeto para produzir mapas de anomalia magnética, com o objetivo de criar um banco de dados na escala de 1:250.000. Uma das principais utilizações destes dados tem sido a geração de mapas magnéticos pelo método das imagens sombreadas. Esse procedimento tem o intuito de realçar feições, tais como, diques e contatos que não são nítidos nos mapas de contorno.

O presente trabalho foi dividido em quatro partes principais. Na primeira apresentamos os dados aeromagnéticos e uma interpretação qualitativa dos mapas de contorno, com ênfase para os grandes lineamentos magnéticos. Na segunda parte, apresentamos os principais modelos geofísicos relacionadas às intrusões básicas e a seguir um novo método para determinar a inclinação de magnetização total, e sua aplicação aos grandes lineamentos da Bacia do Paraná. No desenvolvimento deste método, utilizamos as relações de simetria da transformada de Hilbert, e obtivemos um padrão facilmente distinguível para cada lineamento. Na terceira parte fizemos uma explanação da Geologia da Bacia do Paraná, com o objetivo de aumentar o conhecimento do leitor da área de estudo, mostrando as várias fases deposicionais que a bacia sofreu, e a seguir mostramos os principais elementos tectônicos da Bacia do Paraná, segundo as suas orientações (NW-SE, NE-SW e E-W). Na quarta parte discutimos o método das imagens sombreadas, e após isto fizemos uma descrição e análise das imagens sombreadas e as imagens de LANDSAT, observando as feições lineares, com a definição do seu padrão. Ainda nesta parte fizemos uma integração entre estas duas imagens, e finalmente apresentamos uma conclusão de todo o trabalho, indicando as contribuições dos lineamentos na evolução tectônica da Bacia do Paraná.

CAPÍTULO 2

INTERPRETAÇÃO QUALITATIVA DOS DADOS AEROMAGNÉTICOS

2.1. Dados Observados

Os dados aeromagnéticos foram fornecidos pela PETROBRÁS em fita magnética em forma digital, cobrindo uma área de aproximadamente 390.000 km^2 . Esses dados são o resultado de nove projetos diferentes, e a maioria destes foram coletados durante os anos de 1980 e 1981 pelo Consórcio CESP/IPT (PAULIPETRO).

Esses projetos possuem as seguintes denominações: Projeto Serra do Mar Sul, Projeto Bauru, Projeto Confluência Paraná-Parapanema, Projeto Botucatu, Projeto Rio Ivaí, Projeto Rio Iguaçu, Projeto Aporé e Projeto Arco de Campo Grande, cujas localizações estão indicadas na figura 1. As principais especificações técnicas de cada projeto estão reunidas na tabela 1.

Para fins do presente trabalho selecionou-se a área indicada na figura 2, a qual, foi subdividida em 8 áreas menores, pois a escala adotada para este trabalho foi de 1:500.000.

2.2. Considerações Gerais

As intrusões de rochas básicas são um fenômeno comum nas bacias sedimentares brasileiras, sendo que na Bacia do Paraná, milhares de diques e soleiras de diabásio, estão expostos e suas espessuras em geral são da ordem de dezenas de metros podendo chegar a centenas de metros (Zalán et al. 1986).

Os mapas de contorno que iremos discutir apresentam uma grande aleatoriedade do campo anômalo, devido a grande proximidade destas intrusões com a superfície e estas apresentam um campo magnético predominante sobre o campo gerado pelo embasamento.

Muitos termos que utilizaremos neste e nos próximos capítulos podem ser confusos, por possuírem um significado muito próximo. Por exemplo tem-se: lineamentos, feições lineares, lineações e alinhamentos. O termo lineamento foi dado originalmente por Hobbs (1904, in Soares et al., 1982), com modificações introduzidas por O'Leary et al. (1976) que define lineamento como uma feição linear mapeável simples ou composta, contínua ou descontínua, da superfície terrestre, cujas partes estão alinhadas em um arranjo retilíneo ou suavemente curvo e que difere distintamente dos padrões

de feições que lhes são adjacentes e, presumivelmente, reflete um fenômeno de subsuperfície.

Como as camadas na Bacia do Paraná são sub-horizontais todos os alinhamentos de feições lineares naturais corresponderiam a descontinuidades estruturais nestas camadas, logo são definidos como a lineamentos (Soares et al., 1982).

2.3. Interpretação dos Mapas de Contorno e Especificação dos Principais Lineamentos Magnéticos

Nesta primeira fase do trabalho, fizemos uma interpretação do mapa de contorno aeromagnético anômalo obtido a partir dos dados disponíveis. A interpretação qualitativa efetuada no mapa de contorno baseou-se na assinatura das anomalias quanto a sua forma, direção estrutural e polaridade, e sua principal finalidade foi a definição dos lineamentos geológicos, contatos de áreas de litologias diferentes e definição de áreas ou zonas anômalas.

A primeira vista, quatro lineamentos se destacam no mapa de anomalia magnética, sendo que estes possuem uma direção NW-SE (fig. 3). As anomalias que compõem esses lineamentos são respostas de densos enxames de diques de diabásio preenchendo zonas de falhamentos e fraturas associados ao Arco de Ponta Grossa, e possuem uma direção predominante N50°W e receberam as seguintes denominações (Ferreira, 1982): Guapiara, São Jerônimo-Curiúva, Rio Alonzo e Rio Piquiri.

As anomalias magnéticas isoladas são também facilmente observadas no mapa de contorno. Estas anomalias possuem curvas de contorno aproximadamente circulares ou elipsoidais, caracterizados pelo forte contraste de susceptibilidade magnética entre o corpo anômalo e a rocha encaixante. Estes corpos anômalos são representados por feições prismáticas correlacionáveis geologicamente a intrusões. A figura 4 apresenta uma anomalia típica de um corpo de forma prismática, mapeado pelo projeto aeromagnético Arco de Campo Grande, e que é interpretado por Zalán et al. (1986) como sendo de natureza alcalina.

Como o levantamento aeromagnético disponível da bacia é composta por vários projetos, e estes possuem diferentes especificações de aerolevantamento, foram feitas correções em relação a altura e direção de vôo para reduzir esses dados a uma malha comum. As correções executadas entre os dados foram satisfatórios, com exceção no limite entre os projetos Bauru e Confluência

Paraná–Paranapanema, na longitude 50° , onde observamos um pseudolineamento no mapa de contorno (fig. 5). A principal causa desta feição é a diferença na altitude de aerolevante utilizado nestes dois projetos, como pode ser visto na tabela 1.

A seguir, faremos uma discussão sucinta dos principais lineamentos magnéticos, analisando as suas assinaturas.

O lineamento de Guapiara é uma das faixas mais bem caracterizadas e foi descrita por Ferreira et al. (1981), o qual possui uma direção NW–SE, com um comprimento de aproximadamente 600 km e a largura bastante variada entre 20 e 100 km. Este lineamento começa no litoral sul do Estado de São Paulo (fig. 6), limitando o Arco de Ponta Grossa a nordeste, e se estende para o interior do Estado, atravessando terrenos pré–cambrianos penetrando na Bacia do Paraná até a altura da confluência dos rios Verde e Paraná.

As anomalias que compõem o lineamento de Guapiara apresentam variações na direção estrutural e na polaridade. A direção predominante das anomalias são aproximadamente $N45^{\circ} - 55^{\circ}W$, partindo do litoral sul de São Paulo até a longitude $50^{\circ}30'$ entre as latitudes 22° e 23° . Neste trecho as assinaturas magnéticas anômalas com polaridades normais são dominantes. A partir da longitude $50^{\circ}30'$ o lineamento muda um pouco de direção, e passa a ter $N60^{\circ} - 65^{\circ}W$ e apresenta uma assinatura com polaridade invertida (fig. 7). Duas bifurcações ocorrem nesta nova direção, e ambas ficam entre as longitudes 51° e 52° e latitudes 22° e 23° . A polaridade invertida apresentada pela anomalia é devido à presença da forte magnetização remanente (Raposo e Ernesto, 1989). A remanência está relacionada com a orientação do campo magnético presente durante a fase de cristalização e resfriamento dos magmas da sequência basáltica (Turcotte e Schubert, 1982), correspondendo a uma magnetização termo–remanente.

As modificações observadas na direção do lineamento e mudanças da polaridade da anomalia magnética, nos sugerem que o conjunto de fenômenos responsáveis pelo condicionamento tectônico dos diques deu–se em intervalos diferentes do tempo geológico, embora não haja constatação geocronológica.

No alinhamento de anomalias que apresentam uma magnetização normal, o campo anômalo apresenta uma amplitude na faixa de 160 nT a 260 nT, podendo atingir um máximo de 350 nT. Entre

as latitudes 49° e 50° e longitudes 23° e 24° , o lineamento possui uma pequena interrupção, devido ao lineamento na direção NE. As anomalias que apresentam uma polaridade invertida possuem uma menor amplitude, tendo em média 150 nT. A ocorrência de diques do lineamento diminuem, a medida que se desloca no sentido de SE para NW.

Os lineamentos São Jerônimo–Curiúva e do Rio Alonzo constituem num dos mais expressivos lineamentos da Bacia do Paraná. Ambos correspondem à parte norte e sul da charneira do Arco de Ponta Grossa, respectivamente. Esses lineamentos limitam uma área de grande concentração de diques de diabásio que se estendem para o sudeste até o litoral paranaense (Brasil–DNPM, 1974), denominado por Zalán et al. (1986) de Zona de falha Curitiba/Maringá, e ambos possuem uma direção aproximada de $N50^\circ W$.

No mapa de contorno do campo magnético anômalo observamos uma grande linearidade das anomalias na região entre os dois grandes lineamentos (fig. 8), sendo explicado como devido à grande continuidade dos diques (Ferreira, 1982). Raposo e Ernesto (1989) fizeram análises paleomagnéticas próxima a esta região, e os resultados mostraram que o sentido da magnetização nas rochas diabásicas são próximas às do campo atual, ou possui polaridade oposta, além disto, eles determinaram que estas rochas apresentam alta estabilidade magnética, devido a sua composição e textura, indicando uma magnetização remanente forte e estável. Assim, não constatamos grandes deformações na assinatura das anomalias, independente da polaridade apresentada, o que ocorre é a inversão nos máximos e mínimos das anomalias quando a polaridade é reversa.

Os diques desta região possuem uma direção aproximada de $N45^\circ - 55^\circ W$ e as anomalias magnéticas apresentam uma amplitude entre 100 e 200 nT, diminuindo à medida que se desloca de SE para NW.

Dos quatro lineamentos principais, o lineamento do Rio Piquiri é o que está localizado mais ao sul. O lineamento corta a latitude de 25° , na longitude $52^\circ 30'$, e a sua direção é de aproximadamente $N65^\circ W$ (fig. 9).

Uma característica bem percebida neste lineamento é a sua continuidade ao longo de toda extensão. A assinatura magnética das anomalias que compõem o lineamento apresentam polaridade invertida, com uma amplitude média de 200 nT e o seu traçado é típico de corpos diqueformes.

Ferreira (1982) sugere que devido os pequenos comprimentos de onda e as grandes amplitudes do lineamento magnético, os diques de diabásio são superficiais ou subaflorescentes.

CAPÍTULO 3

MODELAMENTO DAS ANOMALIAS MAGNÉTICAS DAS DIFERENTES ESTRUTURAS GEOLÓGICAS

Este capítulo foi subdividido em duas partes distintas. Na primeira parte, faremos a apresentação da formulação teórica para as anomalias magnéticas causadas por corpos geométricos simples usados para explicar as principais feições presentes nos mapas de contorno. Na segunda parte, apresentamos um método de determinação da inclinação de magnetização total, que independe do conhecimento dos demais parâmetros do corpo, na hipótese que o mesmo seja bidimensional.

3.1. Principais Modelos Geofísicos Relacionados às Intrusões Diabásicas

Zalán et al. (1985) fizeram um trabalho sucinto, de descrição dos estilos estruturais relacionados às intrusões magmáticas básicas ocorridas nas bacias sedimentares brasileiras. A Bacia do Paraná apresenta inúmeras formas de corpos ígneos, pois o magmatismo ocorrido foi intenso e durou por um longo período.

Antes de relacionarmos os corpos ígneos mais comuns na bacia com modelos geométricos simples, apresentaremos um desenvolvimento da expressão geral do campo magnético em coordenadas cartesianas.

O campo magnético anômalo $h_\alpha(x, y, z)$ na direção $\hat{\alpha}$ produzido por uma distribuição de magnetização $\vec{m}(x', y', z')$ no volume V , possui a seguinte expressão geral (Silva, 1988),

$$h_\alpha = -\frac{\partial}{\partial \hat{\alpha}} \int_V \vec{m}(\vec{r}') \cdot \nabla \left(\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \right) dv. \quad (1)$$

Em coordenadas cartesianas, a expressão (1) é reescrita como,

$$h_\alpha = -\frac{\partial}{\partial \hat{\alpha}} \int \int \int \vec{m}(x', y', z') \cdot \vec{G}(x, y, z; x', y', z') dx' dy' dz', \quad (2)$$

onde,

$$\vec{G}(x, y, z; x', y', z') = \nabla \left\{ \frac{1}{[(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2]^{1/2}} \right\}.$$

Pra simplificar, a magnetização $\vec{m}(x', y', z')$ dos corpos possuem a mesma direção. Neste caso,

$$\vec{m}(x', y', z') = m(x', y', z')\vec{\beta}. \quad (3)$$

Substituindo 3 em 2 obtém-se,

$$h_\alpha = -\frac{\partial}{\partial \hat{\alpha}} \iiint m(x', y', z')\vec{\beta} \cdot \nabla \left\{ \frac{1}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{1/2}} \right\} dx' dy' dz', \quad (4)$$

fazendo,

$$\vec{\beta} \cdot \nabla = \frac{\partial}{\partial \hat{\beta}} = \left[l \frac{\partial}{\partial x} + m \frac{\partial}{\partial y} + n \frac{\partial}{\partial z} \right] \quad e \quad \frac{\partial}{\partial \hat{\alpha}} = \left[L \frac{\partial}{\partial x} + M \frac{\partial}{\partial y} + N \frac{\partial}{\partial z} \right],$$

finalmente temos,

$$h_\alpha = -\frac{\partial}{\partial \hat{\alpha}} \frac{\partial}{\partial \hat{\beta}} \iiint m(x', y', z') \frac{1}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{1/2}} dx' dy' dz', \quad (5)$$

sendo que L, M, N, l, m e n são os cossenos diretores dados por:

$$\begin{cases} L = \cos(I_o) \cos(D) \\ M = \cos(I_o) \sin(D) \\ N = \sin(I_o) \end{cases} \quad e \quad \begin{cases} l = \cos(i) \cos(d) \\ m = \cos(i) \sin(d) \\ n = \sin(i) \end{cases}$$

onde I_o e D são respectivamente a inclinação e a declinação do campo de medida, i e d são respectivamente inclinação e declinação da magnetização total do corpo.

Nos mapas de contorno apresentados no capítulo anterior, a feição magnética mais comum são os lineamentos, devido a grande ocorrência de diques de diabásio que se estendem por dezenas de quilômetros. O modelo geométrico simples que corresponde ao caso de diques ou falhas preenchidas por rochas de grande extensão é a placa vertical bidimensional, cuja expressão do campo magnético pode ser obtido no trabalho de Hjelt (1973) por exemplo, e o seu desenvolvimento, é feito a partir da expressão (5), considerando somente a magnetização induzida. Neste caso $L=l$, $M=m$ e $N=n$ e a expressão tem a seguinte forma:

$$F_i = b(k) \tan^{-1} Q + c(k) \left(\frac{1}{2} \right) \ln R, \quad (6)$$

onde,

$$Q = \frac{Q_1 - Q_2}{I + Q_1 Q_2}, \quad (7)$$

$$Q_1 = \frac{z_o d}{z_o^2 + a_i(a_i - d)}, \quad Q_2 = \frac{z_2 d}{z_2^2 + a_{2i}(a_{2i} - d)},$$

$$R = \frac{z_o^2 + a_i^2}{z_o^2 + (a_i - d)^2} \cdot \frac{z_2^2 + (a_{2i} - d)^2}{z_2^2 + a_{2i}^2},$$

$$a_i = x_i - x_o + d/2,$$

$$a_{2i} = a_i,$$

$$z_2 = z_o + h.$$

As expressões b e c da equação (6) diferem para as componentes do campo vertical (z), horizontal (h) e total anômalo (t),

$$\begin{cases} b_z = 2kT_o \sin(I_o) \\ c_z = (2kT_o \cos(I_o) \sin(\alpha))/(1 + Nk) \end{cases}$$

$$\begin{cases} b_h = \sin(\alpha)c_z \\ c_h = -\sin(\alpha)b_z \end{cases}$$

$$\begin{cases} b_t = \sin(I_o)b_z + \cos(I_o) \sin(\alpha)c_z \\ c_t = \sin(I_o)c_z - \cos(I_o) \sin(\alpha)b_z \end{cases}$$

onde T_o e I_o são a intensidade e inclinação do campo geomagnético e α é a direção da placa. O denominador de c_z contém o fator de desmagnetização N , o qual terá valores entre 2π e 4π , dependendo da largura da placa (Gay, 1963). O efeito de desmagnetização será discutido na próxima seção. Os parâmetros presentes nas expressões anteriores estão representados na figura 10.

A figura 11 mostra as respostas da placa vertical para diversas direções, onde a inclinação do campo é de -25° , a declinação é de -15° , a magnetização do corpo é de 2 A/m, a largura 1,5km e a profundidade do topo e da base são de 1 e 5 km respectivamente. Nesta figura observamos que a placa vertical orientada perpendicularmente ao campo geomagnético, dá anomalia com maior amplitude, do que aquelas que fazem um ângulo agudo pequeno. Com base neste modelo, seriam raras as feições magnéticas na direção norte-sul que se destacarão na área do levantamento.

Na figura 12 temos um exemplo de anomalia sintética para duas placas verticais alinhadas cujos parâmetros foram os mesmos adotados para a figura 11. Observe a semelhança com os campos anômalos apresentados na figura 8. Com isto, podemos supor que os lineamentos presentes na bacia são resposta de uma sequência de placas verticais e sub-verticais. Neste exemplo, o campo anômalo teórico não possui interferências de fontes vizinhas, a direção da magnetização dos corpos possuem a mesma do campo indutor e o meio em que ele se encontra é homogêneo.

O segundo modelo geométrico simples é o prisma vertical que corresponde na área estudada a intrusões de grande espessura, cuja expressão teórica do seu campo foi desenvolvida no trabalho de Bhattacharyya (1964) a partir da expressão (5), considerando a presença de magnetização remanente. E esta tem a seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{F(x, y, 0)}{I_p} = & \left[\frac{x_{23}}{2} \log \left(\frac{r_o - x_1}{r_o + x_1} \right) + \frac{x_{13}}{2} \log \left(\frac{r_o - y_1}{r_o + y_1} \right) - \right. \\ & - x_{12} \log(r_o + h) - lL \tan^{-1} \left(\frac{x_1 y_1}{x_1^2 r_o h + h^2} \right) - \\ & \left. - mM \tan^{-1} \left(\frac{x_1 y_1}{r_o^2 + r_o h + x_1^2} \right) + Nn \tan^{-1} \left(\frac{x_1 y_1}{r_o h} \right) \right]_{x_i, y_i}^{x_s, y_s} \end{aligned} \quad (8)$$

sendo que x_s e y_s são os limites superiores e x_i e y_i os limites inferiores de x_1 e y_1 , respectivamente, L , M e N os cossenos diretores do campo geomagnético, l , m e n os cossenos diretores da magnetização total, I_p a intensidade de magnetização e h é a profundidade do topo do prisma em relação ao nível de observação. Temos também as seguintes relações:

$$x_{12} = Lm + Ml,$$

$$x_{13} = Ln + Nl,$$

$$x_{23} = Mn + Nm,$$

$$r_o = x_1^2 + y_1^2 + h^2.$$

A anomalia de maior amplitude causada por um corpo prismático na Bacia do Paraná foi mapeada pelo projeto Arco de Campo Grande, e ela está ilustrada em detalhe na figura 13. Segundo Zalán et al. (1986) este corpo anômalo está a grande profundidade e possui grande espessura, esta afirmação foi aceita para o modelo, apesar de não sabermos como o autor citado fez tal cálculo. Nos mapas de contorno que ilustraram o capítulo 2 podemos observar dezenas de anomalias similares a esta. Na figura 8, estas anomalias ocorrem ao norte do lineamento de São Jerônimo-Curiúva e

ao sul do lineamento do Rio Alonzo, sendo que todas apresentam uma assinatura magnética com polaridade inversa.

Para o modelamento semi-quantitativo da anomalia ilustrada na figura 13, usamos informações geológicas mencionadas no parágrafo anterior, e geofísica baseado na assinatura do campo magnético, e propusemos um corpo prismático a grande profundidade, grande espessura e com forte magnetização remanente. O campo indutor foi tomado considerando o valor do IGRF na data do levantamento e da posição da anomalia ilustrada na figura 13. A magnitude do campo IGRF foi de 23.778 nT, a inclinação de -18° e declinação de -14° . As propriedades magnéticas do modelo foram obtidas por tentativa e erro, e os valores adotados não se prenderam a nenhum critério quantitativo, mas sim a concordância de padrão visual entre a anomalia teórica ilustrado na figura 14 e medida pelo aerolevanteamento. O corpo teórico possui 20km X 30km de lado, sendo que o maior lado está orientado segundo N-S, a profundidade do topo é de 4km e da base de 20km. A intensidade de magnetização (I_p) foi de 178 nT e a magnetização total possui 30° de inclinação e 35° de declinação. A magnetização total tem orientação diferente do campo atual, esta componente do campo anômalo é comum para muitos corpos da bacia, como diques e soleiras

O campo anômalo para o modelo mostra ao norte um campo anômalo positivo fraco (fig. 14), a sua ausência na anomalia medida (fig. 13) é devido a um outro corpo anômalo localizado ao norte que interfere no campo total, apesar disto, o resultado obtido apresenta boa concordância visual com as características da anomalia medida.

3.2. Um Método para Determinação da Inclinação de Magnetização Total que Utiliza a Transformada de Hilbert

O conhecimento da inclinação de magnetização total nos corpos magnetizados, pode ser de grande importância, uma vez que este parâmetro dá informação sobre a orientação do campo magnético predominante durante o período em que eles se formaram. Desta forma, podemos esclarecer uma fase evolutiva da área que esses corpos pertencem.

O método que apresentamos a seguir, pode ser aplicado quando as anomalias puderem ser escritas como soma de funções analíticas, cujas parcelas se relacionam através de uma transformada de Hilbert. A aplicação da transformada de Hilbert na interpretação das anomalias magnéticas, tem sido demonstrado por alguns autores desde o início dos anos 70 (O'Brien, 1972; Nabighian, 1972; Stanley e Green, 1976; Mohan et al., 1982).

A figura 15 apresenta um corpo prismático bidimensional magnetizado, onde o sistema de coordenadas escolhido obedece a regra da mão direita, sendo que os eixos x e y são a normal e a paralela, respectivamente ao corpo, e o eixo z é positivo no sentido para cima e perpendicular a ambos. Este sistema de coordenadas também foi adotado por Banerjee e Das Gupta (1977) e Telford (1987), mas outros autores como Bhattacharyya (1964) adotaram o sistema de coordenadas onde o eixo z é positivo no sentido para baixo. Na figura 16 estão representados os ângulos, as distâncias e os parâmetros usados no desenvolvimento matemático do método que apresentaremos a seguir.

As componentes do campo magnético para o prisma vertical, foram modificadas da expressão apresentada por Telford et al. (1987, página 189), e são escritas da seguinte forma:

$$H_z = 2M_x \ln \left(\frac{r_1}{r_3} \right) - 2M_z (\phi_1 - \phi_3), \quad (9)$$

$$H_x = 2M_z \ln \left(\frac{r_1}{r_3} \right) + 2M_x (\phi_1 - \phi_3). \quad (10)$$

Sendo que H_z e H_x são respectivamente a componente vertical e horizontal do campo magnético. A expressão apresentada pelo autor citado, considera somente a magnetização induzida, onde M_x e M_z possuem as seguintes relações:

$$M_x = kH_o \sin \beta,$$

$$M_z = kZ_o,$$

onde k é a susceptibilidade magnética, β é a direção do prisma vertical, H_o e Z_o são respectivamente a componente horizontal e vertical do campo magnético. Neste trabalho, além da magnetização induzida consideramos também a magnetização remanente, como apresentado na figura 15, assim M_x e M_z são respectivamente a componente horizontal e vertical da magnetização total.

A intensidade do campo total causado pelo corpo obedece a seguinte expressão,

$$T = H_x \sin D \cos I + H_z \sin I. \quad (11)$$

onde D e I são respectivamente a declinação e inclinação do campo total, e para efeito de cálculo, adotamos a declinação em relação a direção do prisma vertical, como mostra a figura 15.

Desenvolvendo a expressão (11) com a substituição das expressões (9) e (10), obtemos a seguinte expressão para o campo total,

$$T = A(x, z)M_1 + B(x, z)M_2, \quad (12)$$

onde:

$$M_1 = 2M_z \sin(D) \cos(I) + 2M_x \sin(I), \quad (13)$$

$$M_2 = 2M_x \sin(D) \sin(I) - 2M_z \sin(I), \quad (14)$$

$$A(x, z) = \ln \left(\frac{r_1}{r_3} \right), \quad (15)$$

$$B(x, z) = \phi_1 - \phi_3. \quad (16)$$

As funções A e B formam um par de transformadas de Hilbert (Mohan et al., 1982), isto é,

$$H(A) = B, \quad (17)$$

$$H(B) = -A, \quad (18)$$

onde o operador H significa a operação da transformada de Hilbert (ver O'Brien, 1972; Nabighian, 1974), e pode ser definida pela seguinte relação,

$$H(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(x')}{(x - x')} dx'. \quad (19)$$

As relações dadas pelas equações (17) e (18) são conhecidas (Kanasewich, 1975, página 146), e podemos escrever,

$$H(T) = B(x, z)M_1 - A(x, z)M_2. \quad (20)$$

Usando as equações (12) e (20), obtemos as seguintes expressões:

$$M_1T - M_2H(T) = (M_1^2 + M_2^2) A(x, z), \quad (21)$$

$$M_2T + M_1H(T) = (M_1^2 + M_2^2) B(x, z). \quad (22)$$

A função (21) é assimétrica (ímpar), enquanto a função (22) é simétrica (par), em relação ao ponto X_0 localizado no centro do corpo (fig. 16). Apesar de termos considerado somente o prisma vertical, Mohan et al. (1982) apresentam em seu trabalho o campo total para outros tipos de modelos bidimensionais, cujas parcelas se relacionam através da transformada de Hilbert, equivalente a expressão (12) em nosso desenvolvimento.

A orientação do vetor de magnetização pode ser calculada conhecendo-se somente a posição central do corpo. Não é necessário determinar os outros parâmetros do corpo que causou a anomalia.

As funções T e $H(T)$ (equações (11) e (20), respectivamente) podem ser decompostas em partes simétricas e assimétricas em relação ao ponto central do corpo, isto é,

$$T = T_s + T_a, \quad (23)$$

$$H(T) = H_s(T) + H_a(T), \quad (24)$$

sendo que os índices (s) e (a), referem-se às partes simétricas e assimétricas. Para que a equação (22) exista, as constantes M_1 e M_2 devem satisfazer a seguinte equação,

$$M_2T_a + M_1H_a(T) = 0. \quad (25)$$

Similarmente, como uma consequência das definições (17) e (18) a próxima equação também deverá ser satisfeita,

$$M_1T_s - M_2H_s(T) = 0, \quad (26)$$

e podemos obter a seguinte relação a partir da expressão (25),

$$\alpha = -\tan^{-1} \left\langle \frac{H_a(T)}{T_a} \right\rangle = \tan^{-1} \left(\frac{M_2}{M_1} \right). \quad (27)$$

A notação $\langle \rangle$ significa o valor médio da razão entre $H_a(T)$ e T_a . Esta forma para cálculo de α diminui o nível de ruído nos dados.

Finalmente, podemos resolver o ângulo ϕ que determina a inclinação de magnetização, usando as expressões (13), (14) e (27):

$$\tan \phi = \frac{\sin I - \alpha \sin D \cos I}{\sin D \cos I + \alpha \sin I}. \quad (28)$$

Na determinação do centro do prisma vertical usamos o desenvolvimento de Nabighian (1972), onde ele mostra que o valor máximo do sinal analítico fica no ponto central, isto é, se o prisma tiver pequena largura. O sinal analítico é obtido das equações (12) e (20) e tem a seguinte forma,

$$a(x) = |A(x, z)|^2 = T^2(x, z) + H^2(T(x, z)). \quad (29)$$

No caso em que o prisma possui uma grande largura, o seu sinal analítico apresenta um mínimo local no ponto central.

A derivada da equação (29) em relação a x pode ser escrita da seguinte forma,

$$\frac{\partial a}{\partial x} = (M_1^2 + M_2^2) \left[\frac{\partial A^2}{\partial x} + \frac{\partial B^2}{\partial x} \right], \quad (30)$$

A é uma função assimétrica e B é uma função simétrica, representados pelas expressões (15) e (16) respectivamente, assim sendo esta função se anula somente na parte central do prisma, independente se o sinal analítico possui um valor máximo ou um mínimo local.

O cálculo da inclinação de magnetização total pela expressão (28) e a determinação do ponto central do corpo bidimensional foram testados em modelos teóricos, com e sem ruídos, e os seus resultados estão no apêndice A.

3.3. A Aplicação do Método que Determina a Inclinação de Magnetização Total aos Grandes Lineamentos da Bacia do Paraná

Esta seção foi subdividida em seis partes diferentes: na primeira parte apresentamos alguns conceitos visando um melhor entendimento para as discussões posteriores, como a razão de Königsberger, que é frequentemente usada no estudo da magnetização remanente, e o efeito de desmagnetização que é comum para corpos diqueiformes de pequena largura e apresentam um valor alto para a magnetização remanente; na segunda parte, selecionamos alguns trabalhos que referem sobre as rochas intrusivas dos grandes lineamentos, apresentando a composição mineralógica predominante, uma vez que esta informação é importante por servir de subsídio para definir alguns modelos que propomos para os resultados obtidos da inclinação de magnetização; na terceira parte apresentamos o tratamento que os dados aeromagnéticos receberam, para eliminar o efeito das fontes profundas antes de calcular a inclinação de magnetização total; na quarta parte apresentamos os resultados da inclinação de magnetização total nos grandes lineamentos; na quinta parte propomos alguns modelos hipotéticos para a inclinação de magnetização calculadas, baseando-se nas características das rochas intrusivas e no efeito de desmagnetização e na sexta parte discutimos o efeito térmico das intrusões sobre as formações geradoras de hidrocarboneto, baseando-se na distribuição em mapa da inclinação de magnetização.

3.3.1. Generalidades

O conhecimento das propriedades magnéticas das rochas é de fundamental importância para a análise das anomalias registradas nos aerolevamentos. Os mapas de anomalia magnética que mostramos no capítulo 2 apresentam muitas assinaturas com polaridade inversa indicando que a magnetização remanente das rochas diabásicas contribui com uma parte significativa na expressão magnética.

Königsberger (1938, in: Hood, 1964) definiu uma relação entre a magnetização remanente e induzida, denominada de razão Königsberger, ou seja, $Q=R/kT$, onde R é a intensidade da magnetização remanente, k é a susceptibilidade e T é o valor do campo usado como referência.

Além da magnetização remanente e induzida, um outro efeito que ocorre nos diques diabásicos é a desmagnetização, no qual o campo resultante dentro do corpo é diferente da ori-

entação do campo indutor, resultando na redução do campo magnético induzido no corpo (Telford et al., 1987).

De um modo geral a desmagnetização tem a seguinte forma:

$$\vec{T}_1 = \frac{1}{1 + Nk} \vec{T}_o,$$

onde N é um fator que depende da geometria do corpo, \vec{T}_o é o campo indutor, \vec{T}_1 é o campo magnético dentro do corpo e k é a susceptibilidade magnética do corpo.

Para um corpo diqueforme com susceptibilidade k , a susceptibilidade aparente tem a seguinte expressão geral:

$$k_a = \frac{k}{1 + Nk}.$$

Para a susceptibilidade magnética longitudinal (k_e) N é zero, e a transversal (k_t) N é igual a 4π . Então teremos as seguintes expressões:

$$k_e = k,$$

$$k_t = \frac{k}{1 + 4\pi k}.$$

A susceptibilidade longitudinal aparente permanece constante, enquanto que a transversal decai (Gay, 1963). A relação aparente da componente transversal para a longitudinal é definido como constante de redução, C , e possui a seguinte expressão (ver figura 17):

$$C = \frac{k_t}{k_e} = \frac{1}{1 + 4\pi k}.$$

Gay (1963) descreve ainda que a desmagnetização produz um efeito similar tanto para a magnetização induzida quanto para a magnetização remanente, e segundo Telford et al. (1987) este efeito é significativo em rochas que contenham mais de 5%–10% de magnetita.

3.3.2 Rochas intrusivas dos grandes lineamentos

Os trabalhos selecionados a seguir tem como principal objetivo apresentar as propriedades magnéticas das rochas diabásicas que compõem os grandes lineamentos, mostrando como eles possuem uma forte magnetização remanente sendo esta uma importante propriedade para compor os modelos que propomos para as inclinações de magnetização que foram calculadas.

A Formação Serra Geral corresponde às rochas vulcânicas mesozóicas (Jurássico–Cretáceo) que ocorreu na Bacia do Paraná, como resultado de um intenso vulcanismo que afetou o sul do Brasil e parte da Argentina, Paraguai e Uruguai, cobrindo uma área de aproximadamente $1.200.000 \text{ km}^2$ (Ernesto, 1985). O principal constituinte da Formação Serra Geral é o magma basáltico e compreende também diques de diabásio. A maior concentração de diques ocorre na região central do Arco de Ponta Grossa, limitada pelos alinhamentos aeromagnéticos do Rio Alonzo e São Jerônimo–Curiúva.

A maioria dos trabalhos existentes na literatura sobre os diques do Arco de Ponta Grossa apontam os mesmos como condutos alimentadores responsáveis pelo derramamento de lava, dentre eles podemos citar Fúlfaro et al. (1982) e Ferreira et al. (1981). Entretanto, Piccirillo et al. (1989), mostraram geoquimicamente que os diques são de datas distintas das rochas vulcânicas das regiões central e sul da bacia.

Raposo e Ernesto (1989) realizaram um estudo paleomagnético destas intrusões, visando a determinação da direção de magnetização remanente das amostras. No primeiro caso, a maioria das amostras mostraram alta estabilidade magnética, até pelo menos $60 \mu\text{T}$, o que significa que os minerais magnéticos presentes nas amostras possuem alta coercitividade primária. Na desmagnetização térmica as amostras retiveram parte de sua remanência até pelo menos 580°C , indicando que os minerais portadores da magnetização são principalmente titano–magnetita altamente oxidantes, cuja presença foi também observada pela microscopia em seções polidas. Os resultados obtidos para a direção de magnetização foram representados por estes autores em projeção de Wulff (fig. 18), onde se verifica a existência de direções de magnetização com polaridade normal e reversa, que se dispõem aproximadamente segundo dois polos. Este fato nos indica que o resfriamento dos corpos intrusivos e a conseqüente aquisição da magnetização termo remanente (MTR) ocorreram durante pelo menos dois episódios distintos.

Schult (1970) fez um importante trabalho nas rochas intrusivas e extrusivas das três principais bacias paleozóicas brasileiras, a do Amazonas, Maranhão e Paraná. Para as três bacias, o autor utilizou amostras de poço e descobriu que não existe uma variação significativa da intensidade de magnetização com a profundidade, mas observou que ocorre uma variação na inclinação de magnetização indicando idades diferentes para as rochas basálticas. Ainda neste trabalho, o autor fez algumas análises para as amostras da Bacia do Paraná e concluiu que não há diferença na composição química e mineralógica entre as rochas intrusivas e extrusivas, e que devido as diferentes condições de cristalização, as rochas intrusivas possuem grãos mais grosseiros. Na figura 19 estão indicados os poços utilizados para coletar as amostras localizados nas proximidades dos grandes lineamentos. Os resultados obtidos das amostras para a inclinação da magnetização, intensidade da magnetização remanente, susceptibilidade e a razão de Königsberger estão na tabela 2. A figura 20 mostra de forma esquemática os resultados obtidos para estes mesmos parâmetros, de todas as amostras de diabásios analisados na Bacia do Paraná. Um importante dado que retiramos desta ilustração são os altos valores da razão de Königsberger, confirmando a forte magnetização remanente nos diques.

Ferreira et al. (1984) desenvolveram um trabalho no Arco de Ponta Grossa, com objetivo de estudar uma nova ocorrência do magmatismo mesozóico descoberto a partir de dados aeromagnéticos do novo projeto Anta Gorda, e também discutir sucintamente as investigações magnéticas, petrográficas e geocronológicas realizadas. Tentando com isso revisar a evolução tectônica dos lineamentos estruturais associados ao Arco de Ponta Grossa, com ênfase no condicionamento das rochas alcalinas dos estados de São Paulo e Paraná. No estudo petrográfico das rochas intrusivas, eles determinaram uma porcentagem relativamente alta para a titano-magnetita (7%), que é um dos principais constituintes ferromagnéticos. Esta presença da titano-magnetita na composição da rocha é suficiente para que ocorra o efeito da desmagnetização dos corpos bidimensionais de pequena largura. Num trabalho anterior desenvolvido por Ferreira et al. (1981), eles observaram manifestações subaflorante do vulcanismo alcalino e alcalino-ultrabásico, condicionado ao lineamento estrutural de Guapiara em terrenos pré-cambrianos. Desta forma, é de se esperar que outros focos vulcânicos da mesma natureza devam existir ao longo do lineamento.

3.3.3 Tratamento dos dados aeromagnéticos

Antes de calcular a inclinação de magnetização total na área em estudo, selecionamos o lineamento de interesse para efetuarmos o processamento dos dados aeromagnéticos, cuja descrição apresentamos a seguir.

O processamento do campo anômalo foi feito em uma janela espacial de comprimento C com a mesma direção do lineamento escolhido, limitado por uma abertura transversal L . Mantendo-se fixo o centro da janela calculamos a média aritmética do campo na direção longitudinal (paralelo ao lineamento) e atribuímos este valor ao centro da janela. A janela espacial se move com intervalo de 1km, e o processo é repetido. Para todos os lineamentos estudados o comprimento longitudinal C foi de 10km e a abertura transversal L variou em cada perfil. Esta operação tem por objetivo minimizar os efeitos da interferência de fontes desconhecidas, lineamentos com orientações diferentes da direção escolhida e parte dos ruídos. A média é calculada pela seguinte expressão:

$$\bar{t}(y) = \sum_{i=1}^N \frac{t(x_i, y)}{N}$$

onde N é o número de pontos, e neste trabalho é igual a 10 e $t(x_i, y)$ é o campo anômalo na região limitada pela janela espacial de comprimento C .

Após o cálculo da média do campo anômalo, fizemos uma filtragem deste campo com objetivo de eliminar o efeito das fontes regionais, já que o nosso interesse são os lineamentos e estes são considerados predominantemente rasos em toda bacia, devido as características apresentadas nos mapas de contorno. O melhor filtro passa-alta é aquele que não distorce o espectro de frequência e preserva as altas frequências, ou pelo menos se ocorrer alguma distorção que esta não comprometa os cálculos posteriores. Baseando-se nesta observação, optamos pelo filtro passa-alta na forma do filtro Butterworth apresentado por Kanasevich (1975), mas com uma diferença fundamental, o nosso filtro é de fase zero e a sua resposta na amplitude é definido da seguinte forma,

$$A(\lambda) = \frac{\left(\frac{\lambda_{0,9}}{\lambda}\right)^2}{1 + \left(\frac{\lambda_{0,9}}{\lambda}\right)^2},$$

onde o valor escolhido para $\lambda_{0,9}$ dará uma amplitude ($A(\lambda)$) igual a 0,9.

O próximo passo do processamento iniciou com a decomposição em partes pares e ímpares

do campo filtrado e da transformada de Hilbert deste campo. Somente as partes ímpares (assimétricas) são empregadas no cálculo da amplitude, o qual é definida pela seguinte expressão:

$$a(x) = \sqrt{T_i^2(x, z) + H_i^2(T(x, z))}.$$

As anomalias que possuem uma amplitude acima de um determinado patamar é que são utilizadas no cálculo da inclinação de magnetização total, as outras anomalias não são consideradas. Neste trabalho, o patamar é denominado de nível de corte, e o seu emprego teve como objetivo a diminuição de parte dos ruídos, pseudofontes causada pela filtragem (ver apêndice A), efeito de borda dos lineamentos e anomalias fracas.

Os critérios adotados para a escolha do comprimento de onda do filtro passa-alta e do nível de corte estão descritos no apêndice B.

3.3.4 Os resultados da inclinação de magnetização total nos grandes lineamentos

Raposo e Ernesto (1989) fizeram datações radiométricas em oito diques distribuídos por várias áreas do Arco de Ponta Grossa, utilizando o método K-Ar (em plagiocásio, feldspato e rocha total) e encontraram idades variáveis entre 114–142 Ma. Este intervalo corresponde a passagem do período Jurássico para o Cretáceo, quando o continente sul-americano localizava-se próximo ao equador, e que segundo Ernesto (1985), sofreu uma deriva de norte para o sul durante a ocorrência do vulcanismo. A variação da latitude foi determinado no estudo da paleolatidade de várias amostras coletadas na Bacia do Paraná, como pode ser visto na figura 21. Durante este período (Juro-Cretáceo) o campo magnético terrestre sofreu algumas reversões (fig. 22), mas com predominância da polaridade inversa (Bucha, 1979). Nos resultados que obtivemos para a inclinação de magnetização total nos grandes lineamentos, houve também a predominância da inclinação de polaridade inversa, como veremos a seguir, e eles foram apresentados em mapas e em diagramas de rosetas.

O lineamento de Guapiara é o mais extenso de toda a bacia e, como descrito anteriormente, apresenta um traçado heterogêneo em toda a sua extensão, principalmente em relação às polaridades do campo anômalo. As inclinações de magnetização calculadas ao longo do lineamento apresenta duas classes dominantes, sendo representado em diagrama de roseta (fig. 23). A magnetização com polaridade inversa é a principal e, secundariamente, a magnetização vertical positiva. Na figura

24 está representado a distribuição da inclinação de magnetização em mapa, onde a inclinação de magnetização vertical positiva é dominante tornando parcialmente inversa à medida que se desloca de SE para NW ao longo do lineamento. Compare as figura 24 e 25 e veja que as anomalias com magnetização inversa apresentam um maior desenvolvimento do sinal positivo a sul do corpo e as que possuem uma magnetização vertical positivo apresentam o sinal negativo a sul do corpo e sinal positivo ao norte. Este fato indica que a colocação dos corpos intrusivos ou, ao menos, seu resfriamento, e a consequente aquisição da magnetização remanente térmica, ocorreram durante pelo menos dois episódios distintos.

Os lineamentos do Rio Alonzo e São Jerônimo—Curiúva limitam uma área de grande concentração de diques de diabásio e estão localizados no eixo do Arco de Ponta Grossa. O mapa de contorno do campo magnético anômalo apresenta—se bastante complexo em termos da polaridade do campo. A magnetização de polaridade normal é dominante (fig. 26), vindo a seguir a magnetização vertical positivo e negativo e finalmente uma outra inclinação que segundo o nosso modelo corresponde a uma resultante entre a magnetização vertical positivo com a magnetização de polaridade inversa que a denominaremos de magnetização mista. Na figura 27 está representado a distribuição da inclinação de magnetização em mapa, que corresponde à sub—área 6. Observa—se que no lineamento do Rio Alonzo a inclinação da magnetização é predominantemente vertical negativo e os lineamentos centrais possuem uma inclinação de magnetização normal.

O lineamento do Rio Piquiri possui uma continuidade bem visível e o seu traçado é homogêneo na sua extensão, em se tratando de direção estrutural e polaridade do campo anômalo. Como analisado no mapa de contorno (fig. 9) sua inclinação de magnetização apresenta uma polaridade praticamente inversa e também uma grande parte do lineamento com magnetização vertical negativa. O diagrama de roseta que ilustra este resultado está representado na figura 28.

3.3.5 Modelos hipotéticos para as principais inclinações de magnetização

Os modelos hipotéticos a serem apresentados a seguir, se baseiam nas características das rochas intrusivas que apresentam uma alta estabilidade magnética, devido a sua composição e textura, indicando assim uma magnetização remanente forte e estável (Raposo e Ernesto, 1989).

Os lineamentos que possuem uma inclinação de magnetização de polaridade normal, podem

indicar duas situações diferentes. A primeira é que a intrusão pode ter ocorrido num período em que o campo geomagnético possuía a inclinação atual, ocorrendo neste caso uma soma da magnetização remanente e induzida. Na segunda situação a intrusão ocorreu num período em que o campo geomagnético indutor poderia ser reverso ou normal, com a magnetização remanente apresentado-se muito fraca ou praticamente desprezível, obtendo desta forma somente o efeito da magnetização induzida. Este último modelo tem menor possibilidade de ocorrência, por causa das características petrográficas das rochas intrusivas descritas anteriormente.

Os lineamentos que possuem uma magnetização de polaridade inversa nos indicam que as intrusões ocorreram no período em que o campo magnético terrestre possuía este mesmo sentido. Como as rochas intrusivas possuem uma magnetização remanente forte e estável (Raposo e Ernesto, 1989), não são constatadas grandes deformações na assinatura do campo anômalo, independente da polaridade apresentada, o que ocorre é a inversão nos máximos e mínimos das anomalias quando a polaridade é inversa (veja a figura 8).

Os lineamentos que apresentam uma magnetização vertical positiva ou negativa foram formadas no período em que o campo geomagnético apresentava-se com polaridade normal ou inversa, respectivamente. A verticalização da magnetização pode ser devido ao efeito da desmagnetização. Para que ele ocorra, as intrusões devem possuir uma quantidade suficiente de magnetita (acima de 5%) na sua composição, e o mais importante, elas devem ter uma pequena largura. A primeira condição é satisfeita, pois segundo um trabalho realizado por Ferreira et al. (1984) foi determinado um conteúdo de 7% de magnetita na composição das rochas intrusivas, numa área do Arco de Ponta Grossa. Para a segunda condição, nós a consideramos como possível, baseado na assinatura magnética apresentada nos mapas de contorno, embora haja necessidade de um trabalho de campo para confirmá-la. A situação de um corpo intrusivo com o efeito de desmagnetização devido a magnetização remanente está representado na figura 29.

Para os lineamentos que possuem uma inclinação de magnetização que denominamos de mista, apresentaremos a seguinte situação hipotética. Considerando que ocorra uma intrusão quando o campo magnético terrestre possuía polaridade inversa dominante, obtendo desta forma uma magnetização termo-remanente. Após a sua consolidação ocorre um segundo evento com várias intrusões penetrando a primeira, quando o campo magnético terrestre era predominantemente

normal. Segundo estas hipóteses, a ocorrência de intrusões de pequena largura intrudidas num dique é coerente, pois tal situação foi observada em trabalho de campo realizado na Bacia do Paraná (Meister, E.M., comunicação verbal). Agora quanto a orientação do campo terrestre, seria necessário um estudo paleomagnético das rochas intrusivas ligadas ao primeiro e ao segundo evento. Mas considerando tal situação hipotética, a resultante obtida para a inclinação de magnetização mista é devido a componente inversa para as rochas do primeiro evento e a componente vertical positiva para as rochas intrusivas do segundo evento devido ao efeito da desmagnetização. Este modelo está ilustrado na figura 30.

3.3.6 O efeito térmico das intrusões diabásicas sobre as formações geradoras de hidrocarbonetos

Os resultados das inclinações de magnetização apresentadas em mapa, mostraram que na região limitada pelos lineamentos São Jerônimo—Curiúva e Rio Alonzo elas variaram na sua extensão e lateralmente e para os lineamentos de Guapiara e Rio Piquiri elas variaram na sua extensão, indicando que as intrusões ocorreram num período diferente para cada trecho do lineamento.

Segundo Milani et al. (1989) na Bacia do Paraná existem pacotes pelíticos com características de geradores de hidrocarbonetos, que correspondem aos folhelhos da Formação Vila Maria, Formação Ponta Grossa e a Formação Irati. Baseando-se na distribuição da inclinação de magnetização mencionada anteriormente e considerando só o efeito térmico destas intrusões sobre tais formações, na região limitada pelos lineamentos São Jerônimo—Curiúva e Rio Alonzo, haveria possibilidade de ocorrência de gás, devido a intensidade e ao longo período de tempo que estas intrusões ocorreram, a possibilidade de gerar hidrocarbonetos seria nas proximidades dos lineamentos de Guapiara e Rio Piquiri, pois o efeito térmico das intrusões que compõem esses lineamentos não teria sido tão prolongado e talvez tenha sido suficiente na maturação da matéria orgânica. Nesta situação hipotética devemos lembrar que consideramos somente o efeito térmico das intrusões não considerando a profundidade que os pacotes pelíticos se encontram e nem as suas propriedades geoquímicas.

CAPÍTULO 4

GEOLOGIA E O ARCABOUÇO ESTRUTURAL DA BACIA DO PARANÁ

Este capítulo foi subdividido em duas partes distintas. Na primeira parte descrevemos a evolução tectono-sedimentar da bacia, com o objetivo de localizar no tempo o importante evento magnético que atingiu toda a bacia. Para esta descrição, fizemos uma análise de literatura englobando vários autores, listados a seguir: Almeida e Melo, 1981; Mühlmann e Guazelli, 1981; Ferreira, 1982; Fúlfaro et al., 1982; Bacoccoli et al., 1983; Petri e Fúlfaro, 1983; Bacoccoli e Aranha, 1984; Cordani et al., 1984; Schobbenhaus et al., 1984; Zalán et al., 1986; Zalán et al., 1987; Molina et al. 1989. Na segunda parte apresentamos os principais elementos tectônicos da Bacia do Paraná, que são divididos em 3 grupos de acordo com as suas orientações geográficas.

4.1. Evolução Tectono-Sedimentar da Bacia

A Bacia do Paraná é uma entidade geotectônica estabelecida no interior da plataforma Sul-Americana, e possui cerca de $1.600.000 \text{ km}^2$. A porção brasileira representa aproximadamente $1.000.000 \text{ km}^2$, e o eixo estrutural da bacia tem direção NNE que é quase paralela ao Rio Paraná (fig. 31) (Schobbenhaus et al., 1984).

Segundo Zalán et al. (1986), a origem da Bacia do Paraná é do fim do ciclo Brasileiro (Ordoviciano Superior), e a sua atual configuração é o resultado de movimentações epirogenéticas representadas por arqueamentos e depressões que durante a evolução estiveram ativos em diferentes épocas e em diferentes áreas. O preenchimento sedimentar da bacia é predominantemente siliciclástico, sendo capeado por um dos maiores derrames de lavas basálticas ocorrido na crosta continental do planeta (Zalán et al., 1987).

O embasamento da Bacia do Paraná é composta por rochas ígneas e metamórficas com idades entre 700 e 450 Ma, pertencente ao ciclo de reativação Brasileira, estendendo-se do Pré-Cambriano Superior ao Eopaleozóico. A figura 32 mostra o mapa da profundidade do embasamento da bacia, medida através de vários trabalhos geofísicos, como sísmica de reflexão e sondagens magnetotelúricas-MT.

A estratigrafia da Bacia do Paraná consiste basicamente de cinco sequências deposicionais principais, que variam em idade do Siluriano ao Cretáceo. A figura 33 apresenta a coluna crono-

litoestratigráfica da bacia e sua correlação com os eventos tectônicos e magmáticos que afetaram a América do Sul durante o Fenerozóico. A figura 34 apresenta o mapa geológico simplificado da bacia.

Os primeiros sedimentos da Bacia do Paraná pertencem à sequência Siluriana, com as formações Ivaí, Vila Maria e Furnas. A composição litológica e fossilífera desta sequência indica que ela foi depositada em condições marinhas, provavelmente um ambiente litorâneo, com alguma influência glacial.

A sedimentação da sequência Siluriana foi interrompida por um pulso tectônico andino, conhecido como orogenia Caledoniana (Siluriano Superior–Devoniano Inferior). Um soergimento geral nas três bacias cratônicas brasileiras é bem indicativo deste pulso no Brasil. O surgimento do Arco de Assunção como um alto topográfico foi uma das mais importantes consequências desta orogenia na Bacia do Paraná.

A sequência Devoniana é representada por um ciclo tectônico sedimentar completo, com transgressão marinha, realizada a partir do Devoniano Inferior e regressão no Devoniano Superior. Esta sequência é totalmente abrangida pela Formação Ponta Grossa, que é composta basicamente de arenitos esbranquiçados.

Segundo Petri e Fúlfaro (1983), no final da sedimentação do período Devoniano a Bacia do Paraná entra em movimento positivo, com falhamento e remoção de parte da coluna sedimentar anteriormente depositada, em decorrência da orogenia Eoherciniana (denominada também de pulso Herciniano I). As sequências Silurianas e Devonianas foram submetidas a um esforço de compressão no sentido NE–SW. Em termos de mega estrutura, observamos na figura 35 a presença dos eixos deposicionais e arcos intrabaciais paralelos entre si e orientados para noroeste, ou seja com direção ortogonal à dos esforços atuantes na área (Bacoccoli e Aranha, 1984).

Entre os períodos Devonianos e Carbonífero, a principal mudança ocorrida é o aparecimento de um paleoarco, precursor do Arco de Ponta Grossa. A Bacia somente volta a mostrar caráter negativo no Carbonífero Superior e Permiano.

A sequência Permo–Carbonífero representa um novo ciclo transgressivo–regressivo completo, e é a sequência mais espessa da Bacia do Paraná, composta pelo grupo Itararé e as formações

Aquidauana, Rio Bonito, Palermo, Tatuí, Irati, Teresina, Corumbataí e Rio do Rasto.

O Permiano foi o período mais estável e as formações depositadas nesta época mostram grande uniformidade litológica, com variações de espessura pouco pronunciada. Em termos de tectonismo, esta sequência é marcada por uma atividade moderada a forte no seu estágio inicial (Formação Itararé e Rio Bonito), atingindo uma significativa quietude tectônica durante o intervalo Irati–Rio do Rasto, apesar das altas taxas de sedimentações atribuídas às Formações Rio do Rasto e Terezina. Esta quietude foi abruptamente interrompida pela violenta colisão continental que uniu a Patagônia à América do Sul (orogenia Finiherciniana, Permiano Superior/Triássica Inferior, ou Herciniano II), devido a isto a sedimentação parou e permitiu que fenômenos erosivos atuassem em toda a bacia. As isópacas das formações Itararé–Aquidauana e Irati sugerem que no Permo–Carbonífero persistiu o esquema de esforços anteriormente mencionado (figuras 36 e 37).

A sequência Triássica é composta pela Formação Pirambóia de ocorrência em quase toda a bacia, sendo que no Rio Grande do Sul ela grada, lateralmente, para o Grupo Rosário do Sul (fig. 38). Baseado nas características litológicas e estruturais, o ambiente de deposição foi classificado de continental úmido e oxidante, sendo principalmente fluvial, em canais meandantes e planícies de inundação com pequenas lagoas esparsas.

Na sequência Juro–Cretáceo ocorreu a deposição das formações Botucatu e Serra Geral. As características litológicas e sedimentares da unidade, indicam deposição eólica em ambiente desértico, com desenvolvimento de rios meandantes e pequenas lagoas, sob condições climáticas oxidantes. O vulcanismo basáltico iniciou sua atividade quando imperavam essas condições desérticas. A Formação Serra Geral começou a se depositar no final do período Jurássico, e se estende no Cretáceo. Litologicamente, a formação é composta por pequenas lentes e camadas de arenito, intercalando-se com derrames, sendo que a maioria dos derrames são de natureza básica. Os basaltos que fazem parte da litologia da Formação Serra Geral datam do Juro–Cretáceo, quando intenso vulcanismo afetou quase toda a bacia. Neste tempo, houve a formação de grandes soleiras e lavas preenchendo fraturas e falhas, sendo que essas são expressas na superfície pelos grandes lineamentos, o qual são muito bem observados em mapa de contorno do campo magnético. Os diques de diabásio são comuns, cortando não só os sedimentos, mas também extensas áreas do Pré–Cambriano. A maior concentração de diques aparece na região do Arco de Ponta Grossa,

principalmente no flanco norte, abrangendo parte do Paraná e São Paulo (Ferreira, 1982). Os mapas de isópacas das formações Botucatu e Serra Geral, estão representados nas figuras 39 e 40, respectivamente.

Cessados os derrames de lavas da Formação Serra Geral, que marcaram o final dos eventos deposicionais e vulcânicos generalizados na área da Bacia do Paraná, observou-se uma tendência geral para o soerguimento epirogênico em toda a Plataforma Sul-Americana. A porção norte da Bacia do Paraná, entretanto, comportou-se como uma área negativa relativamente aos soerguimentos marginais e à zona central da bacia, marcando o início de uma fase de embaciamentos localizados em relação à área da bacia como um todo (Almeida e Melo, 1981).

Na área deprimida, iniciou a deposição basal dos sedimentos da Sequência Cretáceo/Terciário, que aparece recobrimo as lavas basálticas. Por ordem, as formações depositadas foram: Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília, que foram depositados num ambiente predominantemente continental fluvial (Zalán et al., 1986).

Após a separação entre a África e a América do Sul há 112 Ma, a evolução estratigráfica da Bacia do Paraná, praticamente se extinguiu. Entretanto, a evolução estrutural não foi interrompida, o que indica os depósitos pós-lava do Cretáceo e do Terciário. Eles refletem o gradual soerguimento da região costeira, no sudeste do Brasil, além de movimentos verticais ao longo de elementos tectônicos da direção NW (zonas de falha Curitiba-Maringá e Guapiara) e E-W (lineamento de São Sebastião).

4.2. Arcabouço Estrutural

Na figura 41 estão enumerados os principais elementos tectônicos da Bacia do Paraná, e abaixo estão listados os seus respectivos nomes. Um marcante padrão de feições lineares em forma de X pode ser observado (Zalán et al., 1986). Estas feições podem ser divididas em 3 grupos, de acordo com suas orientações (NW–SE, NE–SW e E–W):

Direção NW–SE

- 1– Arco do Alto Paranaíba
- 2– Flexura de Goiânia
- 3– Baixo de Ipiacú/Campina Verde
- 4– Arco de Campo Grande
- 5– Zona de Falha de Guapiara
- 6– Falha de Santo Anastácio
- 7– Falha de São Jerônimo–Curiúva
- 8– Arco de Ponta Grossa
- 9– Zona de Falha Curitiba/Maringá
- 10– Falha do Rio Alonzo
- 11– Zona de Falha Cândido de Abreu/Campo Mourão
- 12– Lineamento do Rio Piquiri
- 13– Zona de falha Caçador
- 14– Sinclinal de Torres
- 15– Arco do Rio Grande

Direção NE–SW

- 16– Lineamentos Transbrasiliano
- 17– Lineamento Araçatuba
- 18– Falha de Guaxupé
- 19– Falha de Jacutinga
- 20– Zona de Falha Taxaquara

- 21– Zona de Falha Lancinha/Cubatão
- 22– Zona de Falha Blumenau/Soledade
- 23– Falha do Leão
- 24– Falha de Açotea
- 25– Arco de São Vicente–Cuiabá
- 26– Arco de Bom Jardim de Goiás

Direção E–W

- 27– Lineamento Cassilândia
- 28– Lineamentos Moji–Guaçu/Dourados
- 29– Lineamento de São Sebastião
- 30– Lineamento de Taquara Verde
- 31– Lineamento de Bento Gonçalves

As duas direções mais importantes são as orientações NW–SE e NE–SW, que podem constituir falhas simples ou extensas zonas de falhas (Zalán et al., 1986).

No trabalho que Soares et al. (1982) realizaram na Bacia do Paraná utilizando imagens LANDSAT e Radar, este mesmo padrão dos elementos tectônicos foi reconhecido. Eles identificaram formas retilíneas com alta concentração de lineamentos, separando-os em três grupos de direções NW (variando de $N25^{\circ}W$ a $N65^{\circ}W$) e dois grupos de direções NE (variando entre $N35^{\circ}E$ e $N60^{\circ}E$). Para estes autores, estas zonas estruturais representariam áreas com maior mobilidade tectônica em comparação às áreas adjacentes, e também concluíram que estes elementos tectônicos representam zonas de fraqueza do embasamento e que vários deles controlaram a sedimentação durante a evolução da bacia e também que as zonas de direções NW–SE estão intensamente intrudidas por diques de diabásio, enquanto as direções NE são carentes destas feições.

O padrão observado por Zalán et al. (1986) e Soares et al. (1982) é próximo aos nossos resultados, como veremos nos capítulos 6 e 7. Com as imagens sombreadas, as direções NW variam de $N40^{\circ}W$ a $N65^{\circ}W$ e as direções NE variam de $N40^{\circ}E$ a $N65^{\circ}E$. Com as imagens de LANDSAT, as direções NW variam de $N40^{\circ}W$ a $N60^{\circ}W$ e as direções NE variam de $N35^{\circ}E$ a $N50^{\circ}E$.

Segundo Zalán et al. (1986), os movimentos ao longo destas zonas estruturais tiveram componentes tanto horizontais quanto verticais e estes movimentos por sua vez nunca coincidiram no tempo. Quando as falhas NW-SE estavam altamente ativas, as falhas NE-SW não estavam, e vice-versa.

CAPÍTULO 5

MÉTODO DAS IMAGENS SOMBREADAS

Neste capítulo apresentaremos a técnica para a obtenção do relevo sombreado a partir dos dados aeromagnéticos. As imagens sombreadas obtidas são tratadas como se fossem uma superfície topográfica, iluminada de uma dada direção simulando vales e montanhas.

As imagens do campo magnético anômalo iluminado artificialmente podem permitir uma melhor interpretação, porque pode-se enfatizar feições que não aparecem em mapa, comparando com os mapas de contorno preto e branco ou colorido. Por exemplo, muitos diques produzem anomalias magnéticas que não são muito bem definidas, porque possuem uma amplitude relativamente pequena, mas ao utilizarmos este método, podemos realçá-los não só com o uso da iluminação artificial, mas também aplicando um exagero vertical na superfície do campo.

Para a obtenção das imagens sombreadas, os dados aeromagnéticos foram reformatados para que pudéssemos utilizar os programas posteriores. Esta passagem é desnecessária se o arquivo de dados estiver formatado convenientemente. Com o arquivo reformatado, fizemos uma interpolação sobre uma malha regularmente espaçada. Para as sub-áreas utilizamos uma malha regular com 1km de espaçamento e para toda área levantada, utilizamos uma malha de 5km.

Nas áreas que não possuem cobertura aeromagnética, o campo é interpolado, obtendo-se curvas de contorno bastante suave. Neste caso, após fazermos a malha dos dados, utilizamos um procedimento para eliminar o campo interpolado, obtendo assim, curvas do campo anômalo somente nas regiões que tinham sido aerolevantadas.

5.1. Técnicas do Relevo Sombreado

As imagens dos dados aeromagnéticos foram reproduzidas com 256 tonalidades diferentes, conforme as características da estação gráfica "Raster-Technologies, Model one/80" (1986), variando do preto ao branco. Apesar de trabalharmos com as imagens na escala de cinza, outros autores utilizaram imagens coloridas na interpretação, revelando vantagens no seu uso.

As diferentes tonalidades obtidas nas imagens variam com a direção de iluminação, e a técnica consiste basicamente no cálculo da intensidade da luz refletida em um ponto de observação

de um elemento da superfície, estando a fonte de luz numa posição distante (o sol é considerado como a fonte). A aplicação desta técnica em relevo topográfico é bastante complicada, pois deve-se observar os seguintes fatores: iluminação mútua de elementos da superfície, sombreamento para elementos vizinhos, textura da superfície de reflectância e espalhamento na atmosfera. A aplicação que fizemos teve o propósito de enfatizar as feições magnéticas desejadas, por isso os fatores citados anteriormente não foram considerados. A técnica do relevo sombreado está ilustrado na figura 42, mostrando a geometria e os parâmetros utilizados no seu desenvolvimento, segundo Horn e Bachman (1978, in Dods et al., 1985)

As imagens produzidas na estação gráfica são compostas por milhares de pixels, e cada pixel pode ser considerado como um elemento da superfície, sendo que o sistema referencial escolhido possui três componentes (x, y e z), e $z=f(x,y)$ uma equação da superfície. Os gradientes horizontais são calculados da seguinte forma,

$$p = \frac{\partial z}{\partial x} \quad e \quad q = \frac{\partial z}{\partial y}$$

Nos mapas topográficos o eixo vertical corresponde à elevação, mas neste caso ele corresponde ao campo magnético anômalo. O vetor normal unitário \vec{n} da superfície elementar tem as seguintes componentes,

$$\left(\frac{p}{\sqrt{p^2 + q^2 + E^2}}, \frac{q}{\sqrt{p^2 + q^2 + E^2}}, \frac{-E}{\sqrt{p^2 + q^2 + E^2}} \right),$$

E é o exagero vertical.

O vetor do elemento da superfície para a fonte tem os seguintes cossenos diretores $(\cos(\theta) \cos(\phi), \sin(\theta) \cos(\phi), \sin(\phi))$ sendo definido pelo vetor \vec{s} . Neste caso o vetor que relaciona o elemento da superfície e a fonte luminosa é dado por uma inclinação e declinação. A intensidade de iluminação é representado pela função $R(x,y)$ que corresponde ao produto entre \vec{n} e \vec{s} na forma,

$$R(x, y) = \vec{n} \cdot \vec{s} = \frac{p \cos(\theta) \cos(\phi) + q \sin(\theta) \cos(\phi) - E \sin(\phi)}{\sqrt{p^2 + q^2 + E^2}}$$

Sendo que $R(x,y)$ varia da cor branca para a cor preta, passando pelas tonalidades de cinza, de acordo com:

$$R(x, y) = \begin{cases} \vec{n} \cdot \vec{s} & \text{se } \vec{n} \cdot \vec{s} > 0 \\ 0 & \text{se } \vec{n} \cdot \vec{s} \leq 0 \end{cases}$$

A primeira relação define as áreas da imagem de cor branca até o cinza mais escuro e a segunda relação define a área de cor preta. Numa região da imagem onde o relevo anômalo apresenta-se muito acidentado com vales e montanhas, ocorre o máximo contraste entre as cores preto e branco. A cor branca corresponde à superfície normal em relação a direção da fonte luminosa ($\vec{n} \cdot \vec{s} = 1$) e a cor preta é a sombra da superfície normal ($\vec{n} \cdot \vec{s} \leq 0$). Um fator importante para a obtenção de uma boa imagem é o nível de saturação (S), que corresponde a porcentagem da área branca (b) mais a área preta (p) em relação a área total da imagem (A) ($S=(p+b)/A$). O seu valor depende principalmente do exagero vertical do campo anômalo (E) e secundariamente da direção de iluminação. Através de alguns testes, constatamos que para se obter uma boa imagem o nível de saturação deve estar entre 5 e 10%, obtendo assim uma boa resolução, tanto nos tons de cinza quanto nas cores preto e branco. A imagem com uma alta saturação apresenta-se praticamente em preto e branco, suprimindo neste caso os tons de cinza. Já as imagens que possuem uma saturação inferior ao intervalo mencionado anteriormente, apresentam-se com uma tonalidade de cinza predominante e constante, apresentando assim, feições não muito bem definidas.

A escolha do zênite e azimute da fonte de iluminação vai depender da direção do lineamento que se deseja realçar. Os lineamentos realçados são perpendiculares à direção de iluminação.

CAPÍTULO 6

DESCRIÇÃO DAS IMAGENS SOMBREADAS

As imagens sombreadas foram produzidas na estação gráfica "Raster-Technologies, Model one/80" com 256 tonalidades diferentes. Devido à impossibilidade da sua reprodução em papel diretamente do computador optamos pela fotografia da tela. As fotografias foram ampliadas na escala de 1:500.000, por ser esta a mesma escala das imagens de LANDSAT que trabalhamos.

O objetivo na interpretação destas imagens é a definição do padrão dos lineamentos magnéticos para toda área em estudo, como também uma integração com os lineamentos observados nas imagens de LANDSAT.

As imagens que tratamos possuem uma saturação no intervalo entre 5% a 9%, o que resultou numa boa definição dos lineamentos presentes. Apesar das distorções e perda de nitidez ocorrida na ampliação das fotografias, os resultados que obtivemos foram satisfatórios para a interpretação.

A metodologia da interpretação visual das imagens é semelhante à interpretação de imagens de Radar, uma vez que elas possuem um aspecto idêntico como veremos a seguir.

6.1. Feições Observadas nas Imagens

O relevo do campo anômalo magnético observado nas imagens possuem fortes lineamentos, principalmente nas direções NE-SW e NW-SE. Para o realce desses lineamentos, fizemos o exagero vertical do campo e a variação a direção de iluminação, sendo este o fator mais importante.

Para cada sub-área estudada, temos imagens com quatro direções diferentes de iluminação, para que assim pudéssemos obter informações de todas as direções possíveis dos lineamentos. Por exemplo, com a iluminação na direção E-W, podemos realçar os lineamentos na direção N-S. Na figura 43, correspondente à sub-área 6, a direção de iluminação está no sentido S55°W, realçando assim os lineamentos de direção NW-SE. Estes fortes lineamentos NW-SE apresentados, são os lineamentos do Rio Piquiri ao sul e São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonzo ao norte. A figura 44 pertence à mesma sub-área, mas com a direção de iluminação no sentido S45°E, realçando os lineamentos de direção NE-SW e, conseqüentemente, suprimindo os lineamentos na direção NW-SE. Comparando estas figuras com a figura 8 do mapa de contorno, nota-se os lineamentos que foram

realçados.

Na sub-área 3 ocorre o encontro de quatro coberturas diferentes de aerolevante pertencentes aos projetos Bauru, Confluência Paraná-Paranapanema, Rio Ivaí e Botucatu, correspondentes ao primeiro, segundo, terceiro e quarto quadrante, respectivamente. Na tabela 1 estão as principais especificações dos aerolevantes para cada projeto, e na figura 45 podemos observar o contato entre esses 4 projetos devido às diferentes direções e altura dos aerolevantes. É nítida a diferença entre os relevos anômalos apresentados por cada projeto.

Uma outra feição que pode ser observada nas imagens são as linhas de vôo, e estas podem ser confundidas com os lineamentos. As linhas de vôo quando são observadas nas imagens indicam erros de compilação, e estas podem ser causadas por diversos motivos, uma delas seria o seu deslocamento. Nas imagens elas podem ser vistas para qualquer direção de iluminação, mas são mais nítidas quando a iluminação é perpendicular à sua direção. Na figura 46, correspondente à sub-área 7, temos a cobertura do projeto Rio Iguaçu com a direção das linhas de vôo N-S. Para esta figura a direção de iluminação é E-W com 7% de saturação.

Dos lineamentos mais expressivos nas imagens, destacam-se principalmente os de direção geral NE-SW, observados em toda área estudada cuja principal ocorrência está presente no embasamento. O outro é a de direção NW-SE que são os grandes lineamentos associados ao Arco de Ponta Grossa.

Na figura 47 está representado a imagem de toda área da Bacia que possui cobertura aeromagnética na escala de 1:6.000.000. A direção de iluminação é E-W possuindo 5% de saturação. É nítida a continuidade apresentada pelos grandes lineamentos. Segundo Ferreira (1982) esses lineamentos de direção NW estão ligados à reativação de estruturas do embasamento, haja visto ser possível observá-los desde os terrenos mais antigos fora da bacia.

O padrão em X (NE e NW) dos lineamentos é evidente, principalmente a leste onde o embasamento com direção preferencial NE apresenta-se cortado pelo lineamento de Guapiara de direção NW. Os lineamentos E-W também são definidos, mas estes não possuem uma continuidade tão marcante quanto os lineamentos NE e NW. Esta direção é melhor observada na região mais ao norte na área de cobertura do projeto Arco de Campo Grande.

6.2. Estatística dos Lineamentos Representados na Forma de Roseta

Devido ao grande número de lineamentos interpretados nas imagens, fizemos um tratamento estatístico como apresentado por Zalán et al. (1986) para obtermos informações das principais direções de ocorrências, usando a seguinte expressão,

$$C(j, j + s) = \sum_{i=1}^n L_i,$$

onde C é o comprimento acumulado dos lineamentos medidos (L_i) segundo faixas direcionais; $j=0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, \dots, 170^\circ, 175^\circ, 180^\circ$, correspondente aos setores da roseta; s é o intervalo utilizado, neste caso utilizamos 5° ; n é o número de lineamentos de cada faixa.

Após a determinação de C, para cada faixa direcional construímos rosetas que possibilitaram encontrar as modas das famílias dominantes. A moda é definida como o valor que ocorre com maior frequência e conseqüentemente representa o valor que tem maior probabilidade de ocorrência (Spiegel, 1978). Realizamos este procedimento para as sub-áreas e para a área total.

Os lineamentos podem sofrer pequenas modificações nas suas direções, e estes apresentam-se bastante espessos nas imagens de escala 1:500.000, comparado com os traços que os identifica na transparência de interpretação.

A figura 48 mostra as rosetas para cada sub-área onde podemos ver as modas das direções dos lineamentos predominantes, onde a maioria das sub-áreas possuem uma distribuição bimodal. Nas figuras 49 e 50 fazemos a mesma representação para a parte centro-norte e centro-sul, respectivamente, da área total.

Na análise das figuras 49 e 50 vemos que os lineamentos na direção NW são os mais marcantes, e estes estão num intervalo de $N40^\circ \pm 10^\circ W$. Os lineamentos de direção NE apresentam com uma defasagem aproximada de 90° e estão num intervalo de $N40^\circ - 65^\circ E$. Além disso, temos os lineamentos E-W que são muito bem definidos nas imagens de algumas sub-áreas.

Nas sub-áreas 2, 3, 5 e 6 ocorre a predominância dos lineamentos de direção NW-SE devido à presença dos lineamentos de Guapiara, São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonzo. Nas sub-áreas 1, 4, 7 e 8 os lineamentos de direção NE-SW possuem uma presença marcante devido à reativação do embasamento na evolução da bacia.

CAPÍTULO 7

CONTRIBUIÇÃO DAS IMAGENS DE LANDSAT

Utilizamos cópias fotográficas das imagens de LANDSAT no canal 5 ($0.6-0.7\mu$) na escala de 1:500.000, cobrindo uma área de aproximadamente 400.000 km^2 pertencente à Bacia do Paraná e ao embasamento exposto. A boa reflectância de solos e rochas expostas na faixa do canal 5 faz com que este canal seja o mais utilizado no mapeamento de unidades fotogeológicas.

A metodologia de interpretação visual das imagens de LANDSAT foi descrita por Paradella (1977), onde ele apresenta uma vasta referência no assunto. De um modo geral, ela se assemelha aos moldes clássicos da fotointerpretação.

Foram identificadas feições pela observação e análise de elementos tais como, rede de drenagem, feições geomórficas e tonalidades de cinza.

Soares et al. (1982) fizeram um trabalho importante na Bacia do Paraná utilizando imagens de LANDSAT e Radar. O principal objetivo foi a caracterização de feições lineares, e com isto tentaram associá-las com áreas anômalas, indicativas de possíveis estruturas traçadoras de hidrocarbonetos.

7.1 Lineamentos nas Imagens

Nas imagens os lineamentos são expressos por elementos retilíneos do relevo e da drenagem, e também por feições lineares de caráter estritamente tonal. Nas suas análises, os lineamentos devido às feições geomórficas são as mais frequentes. Em geral, esses alinhamentos são feições topograficamente negativas, representados principalmente pelos cursos de rios. Os lineamentos expressos por tonalidades nas imagens caracterizam-se por contraste mais claro ou mais escuro de níveis de cinza em relação às tonalidades de feições adjacentes. São lineamentos simples, descontínuos, necessitando-se certa familiaridade com as imagens para não confundi-las com outras de natureza artificial, como limites de plantações, estradas, ruídos eletrônicos impressos, comumente presentes nas imagens. Eles refletem quase sempre uma propriedade dos materiais em subsuperfície, daí a sua importância sobretudo quando suas direções concordam com as direções dos alinhamentos de expressões geomórficas (Soares et al., 1982).

Devido as suas dimensões, a maioria dos lineamentos retratam um caráter estrutural regional. Os lineamentos de direção geral NW–SE são os mais expressivos da área, e suas principais ocorrências estão associados ao Arco de Ponta Grossa, sendo que a região limitada pelos lineamentos São Jerônimo–Curiúva e Rio Alonzo e parte do lineamento de Guapiara são os mais evidentes (figuras 51 e 52, respectivamente). Os lineamentos com direção NE–SW tem a sua principal ocorrência na faixa aflorante do embasamento (fig. 53) e com menor frequência nos sedimentos paleozóicos na bacia. Já os lineamentos de direção E–W não são muito bem caracterizados, por que as imagens de LANDSAT possuem as linhas de imageamento próximas a E–W, dificultando assim as observações nesta direção.

Uma dificuldade com a interpretação dos lineamentos nas imagens, é que grande parte da bacia e do embasamento são densamente povoados, impedindo a visualização de determinados tipos de feições geológicas, como mostra a figura 54, neste caso os lineamentos foram interpretados nos cursos de rios.

Apesar de não obtermos evidências diretas nas imagens de LANDSAT existem muitos trabalhos publicados que demonstram que os lineamentos observados refletem um controle fundamental por fenômenos geológicos, dentre eles podemos citar Bacoccoli et al. (1983) e Offield et al. (1977).

Devido à propriedade de retilinidade destes lineamentos que interceptam unidades de relevos distintos, Soares et al. (1982) interpretam que eles estendam-se essencialmente na vertical em profundidade. Porém, pode-se presumir que um grande número dos lineamentos mapeados na Bacia não sejam falhas, pelo menos em superfície, e sim faixas concentradas de fraturas.

O tratamento estatístico para os lineamentos das imagens de LANDSAT foi o mesmo realizado para os lineamentos das imagens sombreadas. Nas figuras 55, 56 e 57 estão representadas as distribuições em rosetas calculadas para as sub-áreas, e a seguir tem-se a apresentação para a parte centro-norte e centro-sul, respectivamente. Os lineamentos subdividem-se em duas direções principais, com os intervalos $N40^{\circ} - 60^{\circ}W$ e $N35^{\circ} - 50^{\circ}E$. Estas direções podem sofrer pequenas modificações, devido a erros nas escalas e direções das latitude e longitude nas imagens. As imagens de LANDSAT que utilizamos foram tiradas em datas diferentes e num intervalo superior a 1 ano.

Soares et al. (1982) definiram seis direções estruturais, as quais foram individualizados segundo sua frequência de ocorrência. Os lineamentos mapeados concentram-se preferencialmente em faixas, cuja distribuição e forma de ocorrência mostram claramente a existência de regionalização das direções, permitindo uma compartimentação estrutural regional, embora com limites difusos.

Apesar das limitações das imagens que estudamos, os nossos resultados foram próximos aos obtidos por Soares et al. (1982). Para uma melhor comparação, fizemos uma representação estatística dos lineamentos para as mesmas áreas, observados nas figura 56 e 57, que correspondem a parte centro-norte e centro-sul da área, respectivamente.

Os lineamentos mapeados concentram-se em faixas, e para fins de referência foram atribuídos nomes a estas faixas.

Três direções são coincidentes na parte centro-norte com as direções interpretadas por Soares et al. (1982) que são: direção médio Ivaí, médio Paraná e médio Pitanga. Na parte centro-sul são apenas duas: direção médio Ivaí e médio Paraná.

A direção médio Ivaí ($N45^\circ \pm 5^\circ E$) é característica da região de influência do Arco de Ponta Grossa. A esta direção pertence aos enxames de diques de diabásio e aos falhamentos dos flancos e das charneiras do Arco. Raramente esta direção está presente na faixa de cobertura sedimentar pós-vulcânica.

A direção médio Paraná ($N35^\circ \pm 5^\circ E$) é característica da faixa entre a terminação do Arco de Ponta Grossa e o eixo da Bacia do Paraná. É paralela à direção do eixo da Bacia e às direções estruturais do embasamento.

A direção médio Pitanga ($N60^\circ \pm 5^\circ E$) caracteriza-se pela sua maior concentração em faixas restritas a sudeste e na parte central da área estudada.

CAPÍTULO 8

INTEGRAÇÃO DAS IMAGENS SOMBREADAS COM AS IMAGENS DE LANDSAT

A integração de dados geofísicos e geológicos na interpretação de feições estruturais é muito empregada, principalmente quando se utiliza dados de campos potenciais devido a ambiguidade intrínseca associada à interpretação de anomalias gravimétricas e magnéticas (Al-Chalabi, 1971). Como exemplo, citamos o trabalho desenvolvido por Miranda e Boa Hora (1984) na região de Santarém, Estado do Pará, cujo objetivo era verificar o relacionamento das direções morfoestruturais registrados em imagens de sensoriamento remoto com as grandes feições identificadas pela aeromagnetometria.

A integração das imagens sombreadas com imagens de LANDSAT já foi utilizada por diversos autores, e este método de interpretação demonstrou ser muito rápido e eficiente para a obtenção de maiores informações estruturais. Dentre os vários autores, podemos citar Guinness et al. (1983) e Kowalik et al. (1987).

As interpretações das imagens foram feitas em transparências. Um critério rápido que utilizamos para a comparação das duas interpretações foi através da superposição das transparências. Com este critério vimos que muitas feições que apresentam uma forte anomalia magnética possuem evidências na superfície. Observe as figuras 45 e 52, onde está representado o lineamento de Guapirara na imagem sombreada e na imagem de LANDSAT, respectivamente. A região limitada pelos lineamentos São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonzo também são evidentes nas duas imagens, observe as figuras 44 e 51. O último exemplo, são os lineamentos de direção NW-SE do embasamento observado nas imagens de LANDSAT (fig. 53) e nas imagens sombreadas. Em outros casos é comum a presença de padrões estruturais que não tem expressão magnética e aparecem nas imagens de LANDSAT, e outros que aparecem somente em dados magnéticos. Isto ocorre em muitas regiões da área estudada, um exemplo que citamos são os lineamentos de direção NE-SW observado nas imagens de LANDSAT (fig. 54), que correspondente ao segundo quadrante da sub-área 6 (entre as latitudes 23° e 24° e longitudes 52° e 53°), para esta mesma região, a imagem sombreada mostra fortes lineamentos magnéticos de direção NW-SE (veja a figura 43).

Uma outra forma para análise dos lineamentos foi a comparação das rosetas para cada

sub-área, representados pelas figuras 48 e 55. Nas sub-áreas 1, 7 e 8 verificamos que as direções dominantes dos lineamentos são diferentes para cada tipo de imagem. Uma das possíveis causas é a ausência de resposta magnética para os lineamentos NW-SE mapeadas nas imagens de LANDSAT. As coincidências dos lineamentos são observados nas outras sub-áreas com destaque para as sub-áreas 3 e 6 onde tem a ocorrência de três dos quatro grandes lineamentos.

Nas figuras 58 e 59 temos a representação estatística para os totais de lineamentos observados na área estudada, e verificamos que os padrões NE e NW são dominantes nas duas imagens. A principal diferença é a direção E-W que é marcante nas imagens sombreadas e a sua representatividade nas imagens de LANDSAT é praticamente nula.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES E A CONTRIBUIÇÃO DOS LINEAMENTOS NA EVOLUÇÃO TECTÔNICA DA BACIA DO PARANÁ

Os levantamentos aeromagnéticos realizados na Bacia do Paraná mostraram que esse método é bastante útil no estudo dessa bacia. Para esse trabalho foram reunidos 8 projetos diferentes, e com a junção destes dados fizemos os mapas de contorno e as imagens sombreadas do campo magnético anômalo. Através dos mapas de contorno das imagens sombreadas e das imagens de LANDSAT, estudamos os extensos lineamentos magnéticos de direção NW-SE que foram descritos por outros autores (Ferreira et al., 1981; Ferreira, 1982 e Bacoccoli et al., 1983). Utilizando os recursos do método das imagens sombreadas no campo magnético anômalo, muitos outros lineamentos que eram pouco evidentes nos mapas de contorno tornaram-se mais nítidos, com o uso do exagero vertical e das diferentes direções de iluminação. As imagens de LANDSAT foram utilizadas para subsidiar os nossos estudos, uma vez que muitos lineamentos presentes nestas imagens não possuem resposta ao aerolevanteamento (compare as figura 43 e 54), e outros são evidentes (compare as figuras 45 e 52) ou possuem uma resposta fraca, devido a orientação das estruturas anômalas que possuem uma direção N-S ou fazem um ângulo inferior a 30° com o campo geomagnético. Com a integração destas duas imagens definimos um padrão para os lineamentos da bacia, os quais possuem duas direções dominantes nos seguintes intervalos: $N40^\circ - 60^\circ W$ e $N40^\circ - 65^\circ E$. Com a definição deste padrão obtivemos um esclarecimento do arcabouço estrutural, e conseqüentemente, uma idéia da evolução tectônica da bacia.

No estudo do comportamento das feições lineares observamos nas transparências muitos lineamentos de direção NW interceptando e às vezes deformando os lineamentos de direção NE. Baseando-se nesta observação e no padrão apresentado pelos lineamentos, podemos concluir que os lineamentos de direção NW-SE são posteriores em relação aos lineamentos de direção NE-SW. Assim sendo, de todos os modelos tectônicos propostos para a Bacia do Paraná, o modelo de Bacoccoli e Aranha (1984) é o que melhor explica os resultados que obtivemos. Segundo esse modelo, a Bacia do Paraná teria sofrido a influência de dois pulsos hercínios provocados por esforços compressoriais (fig. 60), e a maior evidência disto são os lineamentos NE-SW que são predominantes no embasamento aflorante e os grandes dobramentos desenvolvidos ortogonalmente

à direção dos esforços compressionais de direção NE–SW como: Arco de Ponta Grossa, Arco de Campo Grande, Arco do Rio Grande e Sinclinal de Torres (fig. 41). Ainda segundo o modelo adotado, no início da separação dos continentes africano e sul–americano em consequência do próprio movimento de deriva, teria havido na área da Bacia do Paraná e nas suas proximidades, como o embasamento e bacias costeiras, o desenvolvimento de nova direção de cisalhamento NW–SE (fig. 61), além da reativação de zonas de cisalhamento hercínios leste–oeste. Os grandes lineamentos representariam tanto o alinhamento de dique quanto as zonas de cisalhamento nessa direção.

Na interpretação qualitativa que realizamos nos mapas de contorno, vimos que o lineamento magnético é a feição mais comum, com corpos anômalos representados por placas verticais bidimensional correlacionáveis geologicamente aos diques. Grande parte dos lineamentos apresentam assinaturas magnéticas com polaridade inversa, causada pela forte magnetização remanente das rochas diabásicas.

O método da transformada de Hilbert para calcular a inclinação de magnetização total foi aplicado nos grandes lineamentos e obtivemos 5 inclinações diferentes no total. Essas inclinações foram explicadas pela superposição do efeito da magnetização induzida, efeito de reversão do campo geomagnético, e o efeito da desmagnetização. Na região limitada pelos lineamentos São Jerônimo–Curiúva e Rio Alonzo obtivemos 4 inclinações diferentes de magnetização (fig. 26). Observa-se na figura 27, onde está representado a distribuição da inclinação de magnetização em mapa, como esta área é complexa, com inclinações de magnetização calculadas variando ao longo da sua extensão e lateralmente, sugerindo que as intrusões ocorreram por um longo período de tempo. O lineamento de Guapiara apresenta duas inclinações de magnetização dominantes (fig. 23). Na figura 24 está representado a distribuição de magnetização calculada ao longo do lineamento. Esta ilustração mostra o trecho em que a magnetização vertical positiva é dominante, ocorrendo uma reversão da polaridade do campo, na continuação do lineamento para NW e para SE. Este comportamento da inclinação de magnetização nos indicam que as intrusões ocorreram num período diferente para cada trecho do lineamento, e este não foi reativado no evento seguinte, o qual gerou as intrusões em outro trecho do lineamento.

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. Douglas Patrick O'Brien pelo estímulo, disponibilidade e principalmente pela orientação.

Ao prof. Dr. Lourenildo W. B. Leite pela sua minuciosa revisão visando o engrandecimento deste trabalho.

Ao outro membro da comissão examinadora Dr. Marco Polo P. da Boa Hora pela análise crítica e correção deste trabalho.

Ao Prof. Jorge Wilson Delgado Leão pela atenção e o apoio computacional recebido.

Ao convênio UFFa/PETROBRÁS/FADESP/CAPES/FINEP/CNPq pelo apoio financeiro e concessão da bolsa de estudo.

E finalmente ao colega Carlos Alberto Mendonça pelo apoio computacional e a João dos Santos Protázio, Walter Eugênio de Medeiros e Jessé Carvalho Costa pelas críticas e sugestões recebidas durante a redação da tese.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-CHALABI, M., 1971, Some studies relating to nonuniqueness in gravity and magnetic inverse problems. *Geophysics*, 36 (5) 835-855.
- ALMEIDA, F.F.M. & MELO, M.S., 1981, Mapa geológico do estado de São Paulo escala 1:500.000. São Paulo. IPT/DMGA (Publicação IPT, 1184).
- BACOCOLI, G.; ARANHA, L.G.F.; JINNO, K., 1983, Os lineamentos catarinenses da Bacia do Paraná. Rio de Janeiro. PETROBRÁS/SUPEX (Rel. Int.).
- BACOCOLI, G. & ARANHA, L.G.F., 1984, Evolução estrutural fanerozóica do Brasil meridional. Rio de Janeiro. PETROBRÁS/DEPEX/SEDOC, (Rel. Int.).
- BANERJEE, B. & DAS GUPTA, S.P., 1977, Gravitational attraction of a rectangular parallelepiped. *Geophysics*, 42 (5) 1053-1055.
- BHATTACHARYYA, B.K., 1964, Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization. *Geophysics*, 29 (4) 517-531.
- BRASIL. DNPM., 1974, Carta geológica do Brasil ao milionésimo. Folha Asunción-sg.21, Folha Curitiba-sg.22. Brasília. 81p.
- BUCHA, V., 1979, Model of the world plate tectonics since the early palaeozoic. In McELHINNY, M.W.; KHRAMOV, A.N.; OZIMA, M.; VALENCIO, P.A., Ed., Global reconstruction and the geomagnetic field during the Palaeozoic. Japan/Tokyo, Center for Academic Publications, Inc. 47-60.
- CHANDLER, V.W., 1985, Interpretation of Precambrian geology in Minnesota using low-altitude, high-resolution aeromagnetic data. In: HINZE, W., Ed., The utility of regional gravity and magnetic anomaly Maps. Tulsa, Society of exploration geophysicists, p. 375-391.
- CORDANI, V.G.; NEVES, B.B.B.; FUCK, R.A.; PORTO, R.; THOMAZ FILHO, A.; CUNHA, F.M.B., 1984, Estudos preliminares de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. Rio de Janeiro. PETROBRÁS/CENPES. (Bol. Téc.).

- DODS, S.D.; TESKEY, D.J.; HOOD, P.J., 1985, The new series of 1:1.000.000-scale magnetic anomaly maps of the Geological Survey of Canada: Compilation techniques and interpretation. In: HINZE, W., Ed., The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps. Tulsa, Society of Exploration Geophysicists, p. 69-87.
- ERNESTO, M., 1985, Paleomagnetismo da Formação Serra Geral contribuição ao estudo do processo de abertura do Atlântico Sul. Tese de doutorado, Departamento de Geofísica, Universidade de São Paulo (USP).
- FERREIRA, F.J.F.; MORAES, R.A.V.; FERRARI, M.P.; VIANA, R.B., 1981, Contribuição ao estudo do alinhamento estrutural de Guapiara. Anais do 3º Simpósio Regional de Geologia, Curitiba, 1, 226-240.
- FERREIRA, F.J.F., 1982, Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa. Tese de Mestrado. Instituto de Geociência, Universidade de São Paulo (USP).
- FERREIRA, F.J.F.; DAITX, E.C.; MORAES, M.C., 1984, Nova manifestação do magmatismo Mesozóico associado ao Arco de Ponta Grossa. O complexo gabróide Barra do Estrela. Anais do 33º Congresso Brasileiro de Geologia, 4, 1693-1706.
- FRANÇA, A.B. & POTTER, P.E., 1984, Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte 1). B. Geoci. PETROBRÁS, 2 (2/4) 147-191.
- FÚLFARO, V.J.; SAAD, A.R.; SANTOS, M.V.; VIANNA, R.B., 1982, Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geociência, 12 (4) 590-611.
- GAY, S.P., 1963, Stand curves for interpretation of magnetic anomalies over long tabular bodies. Geophysics, 28 (2) 161-200.
- GUINNESS, E.A.; ARVIDSON, R.E.; LEFF, C.E.; EDWARDS, M.H.; BINDSCHADLER, D.L., 1983, Digital image processing applied to analysis of geophysical and geochemical data for southern Missouri. Econ. Geol. 78, 654-663.

- HILDENBRAND, T.G., 1985, Magnetic terranes in the central United States determined from the interpretation of digital data. In: HINZE, W., Ed., The utility of regional gravity and magnetic anomaly Maps. Tulsa, Society of Exploration Geophysicists, p. 248–266.
- HJELT, S.E., 1973, Experiences with automatic magnetic interpretation using the plate model. *Geophys. Prosp.*, 21, 243–265.
- HOOD, P., 1964, The Königsberger ratio and the dipping–dyke equation. *Geophysical Prospecting*, 12 (4) 440–456.
- KANASEWICH, E.R., 1975, Time sequence analysis in geophysics. The University Alberta Press, Canada.
- KOWALIK, W.S. & GLENN, W.E., 1987, Image processing of aeromagnetic data and integration with Landsat images for improved structural interpretation. *Geophysics*, 52 (7) 875–884.
- MILANI, E.J.; KINOSHITA, E.M.; ARAÚJO, L.M., CUNHA, P.R.C., 1989, Bacia do Paraná: possibilidades petrolíferas da calha central. in: I Seminário de Interpretação Exploratória. Rio de Janeiro. PETROBRÁS/DEPEX. p.35–44.
- MIRANDA, F.P. & BOA HORA, M.P.P., 1984, Interpretação integrada de dados aeromagnéticos e de sensoriamento remoto na região de Santarém (PA). *Anais do 33º Congresso Brasileiro de Geologia*, 3, 1979–1992.
- MOHAN, N.L., SUNDARARAJAN, N.; RAO, S.V.S., 1982, Interpretation of some two–dimensional magnetic bodies using Hilbert transform. *Geophysics*, 47 (3) 376–387.
- MOLINA, E.C.; USSAMI, N.; SÁ, N.C.; BLITZKOW, D., 1989, Interpretação dos dados gravimétricos da parte norte da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociência*, 19 (2) 187–196.
- MÜHLMANN, H. & GUAZELLI, W., 1981, Bacia do Paraná. Aspectos estratigráficos–estruturais. Possibilidades de petróleo. Rio de Janeiro. PETROBRÁS/DEPEX/SEDOC. (Bol. Téc.).
- NABIGHIAN, M.N., 1972, The analytic signal of two–dimensional magnetic bodies with polygonal cross–section: its properties and use for automated interpretation. *Geophysics*, 37 (3) 507–517.

- NABIGHIAN, M.N., 1974, Additional comments on the analitic signal of two-dimensional bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, 39 (1) 85-92.
- O'BRIEN, D.P., 1972, ComputeDepth, a new method for depth to basement computation. Presented at the 42nd Annual International SEG Meeting, in Anaheim, California. Abstract, *Geophysics* 38 (1) 187.
- OFFIELD, T.W.; ABBOTT, E.A.; GILLESPIF, A.R.; LOGUERCIO, S.O., 1977, Structure mapping on enhanced Landsat images of southern Brazil: tectonic control of mineralization on speculations on metallogeny. *Geophysics*, 42 (3) 482-500.
- O'LEARY, D.W.; FRIEDMAN, J.D.; POHN, H.A., 1976, Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. *Geol. Soc. Bull.*, 87, 1463-1469.
- PARADELLA, 1977, Estudo do maciço de Poços de Caldas através de imagens LANDSAT com ênfase em mineralizações radioativas. Tese de Mestrado, INPE. São José dos Campos, São Paulo.
- PETRI, S. & FÚLFARO, V.J., 1983, *Geologia do Brasil: Fanerozóico*. São Paulo, Ed. Thomas Queiroz. EDUSP.
- PICCIRILLO, E.M.; MELFI, A.J.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; BELLINI, G. ERNESTO, M.; MARQUES, L.S.; NARDY, A.J.R.; PACCA, I.G.; ROISEMBERG, A.; STOLFA, D., 1989, Continental flood vulcanism from the Paraná Basin (Brazil). In Mac DOUGAL, J.D. Ed., *Continental flood basalts*. Kluwer Acad., p. 195-238.
- RAPOSO, M.I.B. & ERNESTO, M., 1989, Rochas intrusivas básicas do Arco de Ponta Grossa: resultados paleomagnéticos preliminares. *Revista Brasileira de Geociências*, 19 (3) 393-400.
- RASTER-TECHNOLOGIES, 1986, *Model One/80 Programming Guide*. Raster-Technologies Inc. Two Robbins Road Westford, Mass. USA.
- SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; DERZE, G.R.; ASMUS, H.E., 1984, *Geologia do Brasil*. Brasília. DNPM. (mapa escala 1:2.500.000).
- SCHULT, A., 1970, Natural magnetization of deep core samples of basaltic rocks from Brazil. *Zeitschrift für Geophysik*, 36, 267-286.

- SHUEY, R.T. & PASQUALE, A.S., 1973, End corrections in magnetic profile interpretation. *Geophysics*, 38 (3) 507-512.
- SILVA, J.B.C., 1988, Notas de aula da disciplina Métodos Potenciais, ministrada no curso de pós-graduação em geofísica da UFPa.
- SOARES, P.C.; BARCELLOS, P.E.; CSORDAS, S.M.; MATTOS, J.T.; BALLIEIRO, M.G.; - MENESES, P.R., 1982, Lineamentos em imagens de Landsat e radar e suas implicações no conhecimento tectônico da bacia do Paraná. Atas do 2º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Brasília, 1, 143-156.
- SPIEGEL, M.R., 1978, Probabilidade e estatística. Ed. McGraw-Hill do Brasil, Ltda. São Paulo
- STANLEY, J.M. & GREEN, R., 1976, Gravity and the interpretation of truncated plates. *Geophysics*, 41 (4) 1230-1235.
- TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E.; KEYS, D.A., 1987, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- TURCOTTE, D.L. & SCHUBERT, G., 1982, Geodynamics applications of continuum physics to geological problems. Ed. John Wiley & Sons. New York.
- ZALÁN, P.V.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; ASTOLFI, M.A.M.; APPI, V.T.; WOLFF, S.; VIEIRA, I.S.; MARQUES, A., 1985, Estilos estruturais relacionados as intrusões magmáticas básicas em rochas sedimentares. *B. Téc. PETROBRÁS*, 28 (4) 221-230.
- ZALÁN, P.V.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; WOLFF, S.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T.; NETO, E.V.S.; CERQUEIRA, J.R.; ZANOTTO, O.A.; PAUMER, M.L.; MARQUES, A., 1986, Análise da Bacia do Paraná. Rio de Janeiro. PETROBRÁS/DEPEX/CENPES. (Rel. Int. no. 1035-5765).
- ZALÁN, P.V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; VIEIRA, I.S.; ASTOLFI, M.A.M.; APPI, V.T.; ZANOTTO, O.A., 1987, A divisão tripartite do Siluriano da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 17 (3) 242-252.

APÊNDICE A

Testes realizados do método para calcular a inclinação de magnetização total em modelos sintéticos bidimensionais

Com objetivo de avaliar o desempenho do método para cálculo da inclinação de magnetização total, o mesmo foi aplicado a diversos modelos sintéticos bidimensionais com e sem ruído, e esses possuem diferente direção (ϕ) e inclinação de magnetização total (θ).

O campo geomagnético adotado apresenta uma declinação de -15° e inclinação de -25° , que são os valores médios para a Bacia do Paraná. Para o modelo sintético, consideramos que a altura de medida (Z_1) foi de 1km em relação a profundidade do topo do corpo bidimensional e a sua largura (L) foi de 2,5km. A largura do corpo bidimensional foi estimada através da comparação entre a anomalia magnética sintética de duas placas verticais apresentado na figura 12 com a configuração das anomalias que compõem os lineamentos, mesmo sabendo que existem muitos corpos interferentes. Abaixo está ilustrado o modelo sintético juntamente com os seus parâmetros.

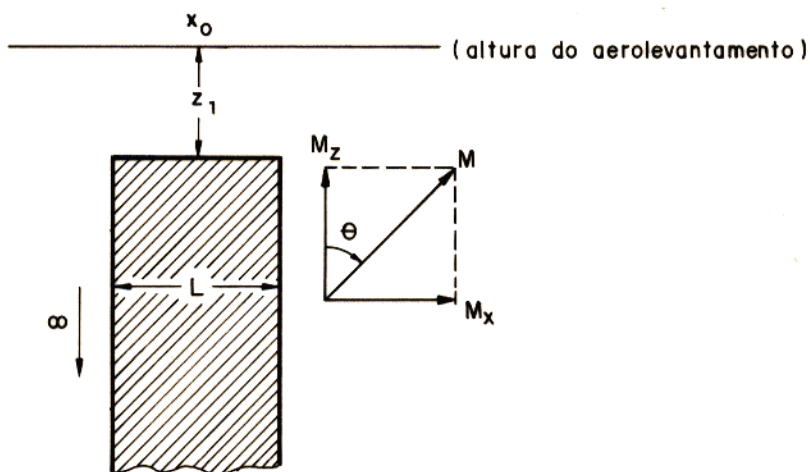


Fig 1A – Modelo sintético mostrando os parâmetros citados no texto.

onde: $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ e M_x e M_z são as componentes da magnetização total, que é a resultante da magnetização induzida mais a magnetização remanente, e neste exemplo a sua unidade é arbitrária.

A escolha da direção do modelo sintético obedeceu a seguinte convenção:

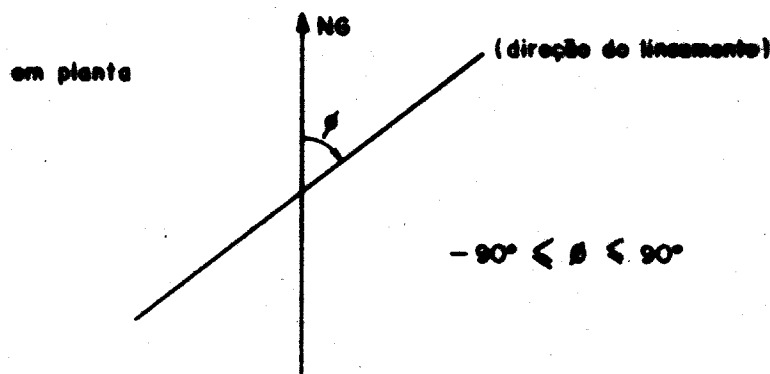


Fig 2A – Convenção adotada na determinação da direção do modelo sintético bidimensional.

O primeiro teste calculou a inclinação de magnetização total no campo anômalo do modelo sintético sem ruído e sem a filtragem do campo regional, e os seus resultados estão listados na tabela A.1. O segundo teste calculou a inclinação de magnetização total para o campo anômalo filtrado com o passa-alta descrito na seção 3.3.3, e este possui 60km de comprimento de onda ($\lambda_{0,9}$). Os resultados dos testes estão listados na tabela A.2.

Observe os resultados nas duas tabelas e veja que os valores dos parâmetros calculados são próximos aos do modelo, e conseqüentemente, houve uma pequena diferença entre eles. Estes resultados indicam que o campo anômalo filtrado com o passa-alta, praticamente preservou a faixa de frequências altas sem distorcê-las, como pode ser observado na figura 3A a boa concordância dos dois campos na proximidade do ponto central do corpo. Os campos ficam um pouco deslocados à medida que nos afastamos da borda do corpo, sendo que o campo filtrado apresenta um decaimento mais acentuado devido a eliminação de parte das baixas frequências. Para os dois campos plotados na figura 3A a direção do corpo sintético foi de 45° e a inclinação de magnetização foi de 360° (vertical para cima).

No cálculo da inclinação de magnetização total e da posição central do modelo no campo filtrado, foram registradas mais duas pseudofontes devido às distorções do campo anômalo causada

TABELA A.1 – TESTES PARA O CAMPO ANÔMALO DO MODELO BIDIMENSIONAL
SEM FILTRAGEM

TESTE	RUÍDOS	ϕ	x_o (km)	x_o (calculado)	θ	θ (calculado)
1	não	45°	201,25	201,18	45°	46,91°
2	não	45°	201,25	201,19	90°	91,84°
3	não	45°	201,25	201,18	135°	136,95°
4	não	45°	201,25	201,17	180°	181,93°
5	não	45°	201,25	201,18	225°	226,92°
6	não	45°	201,25	201,19	270°	271,83°
7	não	45°	201,25	201,18	315°	316,95°
8	não	45°	201,25	201,18	360°	1,94°
9	não	-45°	201,25	201,18	45°	47,00°
10	não	-45°	201,25	201,19	90°	91,80°
11	não	-45°	201,25	201,18	135°	136,86°
12	não	-45°	201,25	201,17	180°	181,85°
13	não	-45°	201,25	201,18	225°	227,00°
14	não	-45°	201,25	201,19	270°	271,80°
15	não	-45°	201,25	201,18	315°	316,86°
16	não	-45°	201,25	201,18	360°	1,85°

TABELA A.2 – TESTES PARA O CAMPO ANÔMALO DO MODELO BIDIMENSIONAL FILTRADO COM UM PASSA–ALTA COM 60KM DE COMPRIMENTO DE ONDA ($\lambda_{0,9}$)

TESTE	RUÍDOS	ϕ	x_o (km)	x_o (calculado)	AMP. ¹	θ	θ (calculado)
1	não	45°	201,25	201,19	2,03	45°	46,55°
2	não	45°	201,25	201,19	1,43	90°	91,28°
3	não	45°	201,25	201,18	2,02	135°	137,21°
4	não	45°	201,25	201,17	1,44	180°	182,36°
5	não	45°	201,25	201,19	2,03	225°	226,55°
6	não	45°	201,25	201,19	1,43	270°	271,28°
7	não	45°	201,25	201,18	2,02	315°	317,21°
8	não	45°	201,25	201,17	1,44	360°	2,35°
9	não	-45°	201,25	201,18	1,42	45°	46,91°
10	não	-45°	201,25	201,20	0,99	90°	91,16°
11	não	-45°	201,25	201,18	1,40	135°	136,83°
12	não	-45°	201,25	201,17	1,00	180°	182,37°
13	não	-45°	201,25	201,18	1,42	225°	226,91°
14	não	-45°	201,25	201,20	1,00	270°	271,16°
15	não	-45°	201,25	201,18	1,40	315°	316,83°
16	não	-45°	201,25	201,17	1,00	360°	2,37°

1 – AMP.= amplitude definido por $a(x) = \sqrt{T_i^2(x, z) + H_i^2(T(x, z))}$, onde i é a componente ímpar da função próximo ao ponto central do modelo.

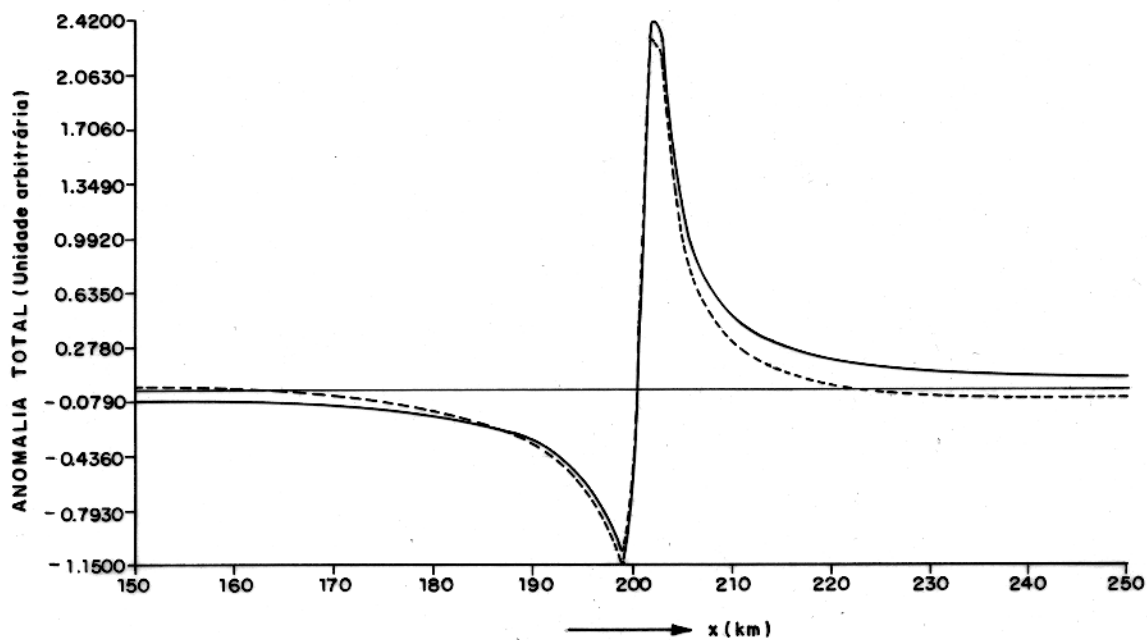


Figura 3A — Anomalia magnética do corpo bidimensional vertical.

Legenda: — Anomalia não filtrada
 ---- Anomalia filtrada com o filtro passa-alta descrito na seção 3.3.3, com o comprimento de onda ($\lambda_{0.9}$) de 60 km.

Parâmetros do corpo bidimensional:

$\theta = 45^\circ$
 $\theta = 360^\circ$
 $z_1 = 1.0 \text{ km}$
 $L = 2.5 \text{ km}$

pela filtragem. Para o modelo com 45° de direção (ϕ) e 360° de inclinação de magnetização (θ), a posição central da primeira pseudofonte está a 89,4km e a segunda a 305,9km. Um outro parâmetro calculado foi a amplitude e neste trabalho é definida pela seguinte expressão:

$$a(x) = \sqrt{T_i^2(x, z) + H_i^2(T(x, z))},$$

onde i é a componente ímpar do campo total ($T(x, z)$) e da transformada de Hilbert deste campo na proximidade da fonte anômala. As amplitudes foram 0,001525 e 0,001655 para a primeira e a segunda pseudofonte, respectivamente e para o modelo foi de 1,44 (veja a tabela A.2). Observe que a amplitude das pseudofontes possuem uma ordem de grandeza inferior a amplitude do modelo, por isso elas poderiam ser eliminadas se utilizássemos o nível de corte no processamento do campo anômalo, como apresentado no apêndice B, pois assim evitamos que elas sejam incluídas no resultado final.

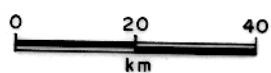
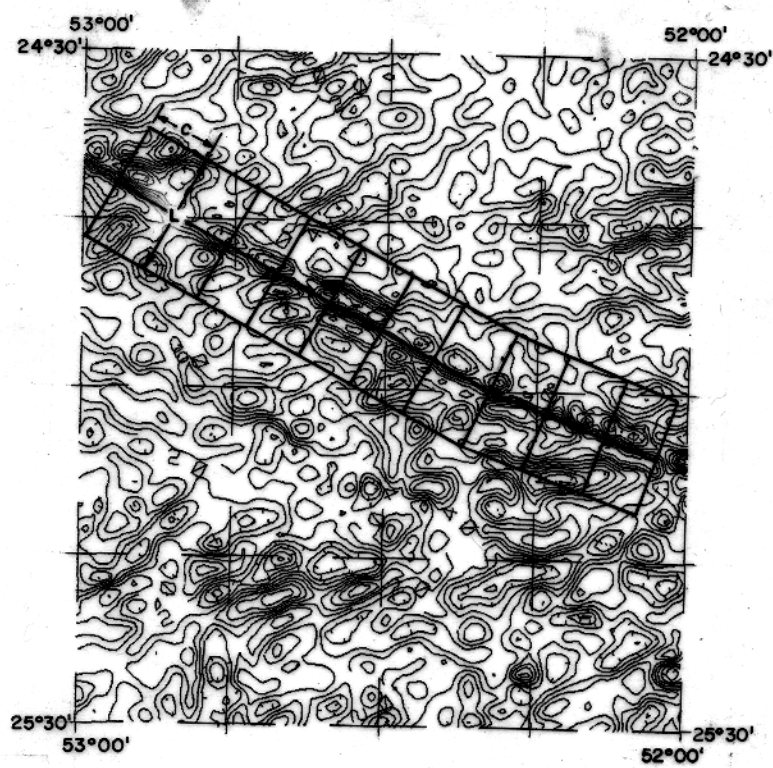
O terceiro teste foi aplicado ao campo anômalo de um corpo bidimensional somado ao campo de corpos tridimensionais distribuídos na sua vizinhança simulando ruído geológico, o qual denominaremos de fontes interferentes. Este modelo foi adotado baseando-se nos mapas de contorno apresentados no capítulo 2, onde pode-se observar feições anômalas causadas por corpos tridimensionais na vizinhança dos grandes lineamentos.

No modelo sintético as fontes interferentes podem ser representadas por dipolos verticais ou prismas de lado quadrado, e o seu posicionamento foi feito de forma aleatória, obedecendo uma distribuição de probabilidade uniforme, isto é, cada ponto da área tem a igual probabilidade de se ter uma fonte interferente. Já o número de fontes interferentes por área, as amplitudes do seu campo anômalo e a dimensão lateral quando se trata de prismas verticais, obedecem uma distribuição gaussiana onde os parâmetros estatísticos (média e desvio padrão) foram obtidos de uma análise dos dados reais, além disto o campo anômalo pode ter uma polaridade normal ou inversa, e esta é determinada de forma aleatória com distribuição de probabilidade uniforme. A distribuição das fontes interferentes foi feita na mesma profundidade, sendo que a profundidade do topo está a 0,5km em relação a altura de medida e a profundidade da base está a 2,5km do mesmo referencial. Com esse modelo para as fontes interferentes, queremos simular as mudanças da magnetização que ocorrem na formação Serra Geral.

Para a obtenção dos parâmetros estatísticos das fontes interferentes e do lineamento, fizemos uma análise em mapas de contorno magnético na escala de 1:200.000 que mostram os lineamentos de Guapiara e do Rio Piquiri, o qual foram centrados numa janela espacial como apresentado na figura 4A, onde C possui 10km e L é igual a 20km, obtendo-se desta forma áreas com 200km^2 . O comprimento longitudinal de 10km da janela será a mesma para o processamento do campo anômalo que apresentaremos na seção 3.3.3, e 20km para o comprimento L foi adotado porque julgamos que 10km seja a máxima distância para que as fontes vizinhas interfiram no cálculo da inclinação de magnetização total do lineamento. Em cada área foi determinado o número de fontes interferentes, com a amplitude do seu campo anômalo e a amplitude da anomalia do lineamento, independente se estes possuem uma polaridade normal ou inversa. Durante a análise dos mapas de contorno magnético, vimos que as formas das anomalias das fontes interferentes são parecidas com a do modelo do prisma vertical (fig. 14) assim, consideramos que o prisma vertical tem uma base quadrada, cuja dimensão lateral aproximada foi obtida diretamente dos mapas. Após a realização destes levantamentos, calculamos as médias e o desvio padrão considerando todas as áreas (tabela A.3).

TABELA A.3 – RESULTADOS DO LEVANTAMENTO ESTATÍSTICO REALIZADO EM ÁREAS DE 200KM^2 EM TORNO DOS LINEAMENTOS DE GUAPIARA E RIO ALONZO

	No. de fontes interf.	Amp. da an. das fontes interf. (nT)	Amp. da an. do lin. (nT)	Dim. lateral do prisma vert. (km)
Média (\bar{M})	3,590	62,105	211,360	1,880
Desvio padrão (σ)	0,887	23,220	27,930	0,360



IC: 20 nT

Figura 4A - Mapa de contorno do campo magnético mostrando o lineamento do Rio Piquiri centrado em várias janelas.

Na construção dos modelos sintéticos o corpo bidimensional manteve-se com a mesma direção (N45°W), sendo que a amplitude do seu campo anômalo obedece uma distribuição gaussiana (veja a amplitude média da anomalia do lineamento na tabela A.3) e o seu valor é fixo em cada modelo. Durante a construção dos modelos, ocorre uma normalização da amplitude da anomalia das fontes interferentes em relação a amplitude da anomalia do corpo bidimensional.

A metodologia adotada na construção deste terceiro modelo propicia diversas combinações para o número e distribuição das fontes interferentes, amplitudes e polaridade do seu campo, e também a amplitude do campo do corpo bidimensional. Em consequência disto obteremos diversos modelos com diferentes resultados para a inclinação de magnetização total e a posição central do corpo bidimensional, o qual serão representados pela média e o desvio padrão.

Os parâmetros geométricos do corpo bidimensional são os mesmos adotados nos dois primeiros testes, e ele está centrado numa janela que possui 400km de largura e 30km de comprimento. As fontes interferentes serão distribuídas próximo ao corpo bidimensional na região limitada pela linha tracejada longitudinal apresentada na figura 5A.

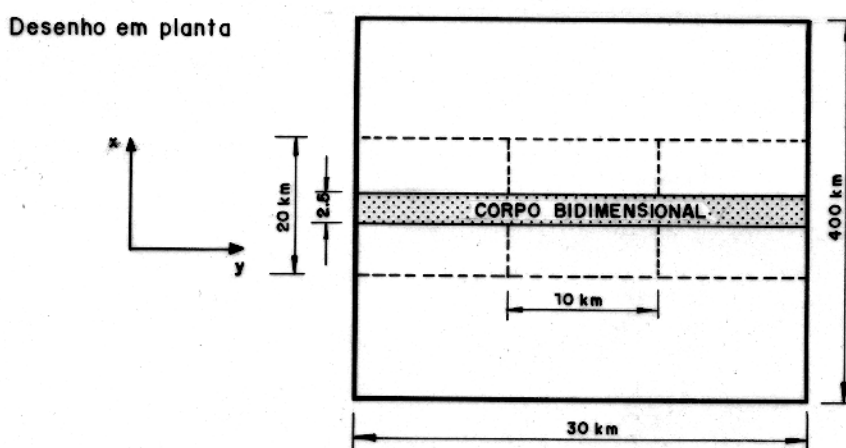


Figura 5A – Desenho esquemático mostrando a área onde serão posicionadas as fontes interferentes (desenho fora de escala).

Além dos parâmetros geométricos do corpo bidimensional, mais dois parâmetros do modelo são mantidos fixos para cada bateria de testes, que são: tipo de fontes interferentes (dipolos ou

prismas de base quadrada) e a magnetização do corpo bidimensional (normal, inversa ou vertical para baixo). Desta forma, teremos inicialmente um total de 6 modelos o qual serão testados 50 vezes cada um, pois os outros parâmetros do modelo, citados anteriormente, não são fixos e podem alterar a cada teste, obtendo assim diferentes resultados para a inclinação de magnetização e posição central do corpo bidimensional.

Antes de calcular a inclinação de magnetização total e a posição central do corpo bidimensional em cada teste, calculamos a média aritmética do campo anômalo do corpo bidimensional com ruído numa janela espacial móvel de 10km de comprimento, limitado por uma abertura transversal de 20km (fig. 5A). Mantendo-se fixo o centro da janela, calculamos a média aritmética do campo na direção longitudinal (paralelo ao corpo bidimensional) em 11 perfis espaçados de 1 em 1km e atribuímos este valor ao centro da janela. A janela espacial se move com intervalo de 1km, e o processo é repetido. Esta operação também foi realizada nos dados aeromagnéticos e está descrita na seção 3.3.3, e o seu principal objetivo é minimizar o efeito das fontes interferentes. Para exemplificar esta operação, apresentamos as figura 6A e 7A. A figura 6A mostra os perfis da anomalia magnética do corpo bidimensional com magnetização vertical para baixo com interferência de dipolos, onde os três primeiros perfis correspondem aos perfis extremos (perfis 1 e 11) e ao perfil médio (perfil 5) da janela espacial. O último perfil no desenho corresponde à média aritmética dos 11 perfis da janela. Observe que o seu traçado apresenta uma grande diminuição do ruído no campo anômalo do corpo bidimensional. Já na figura 7A temos vários perfis da anomalia magnética do mesmo corpo bidimensional utilizado para a figura 6A, mas com a interferência de prismas com magnetização. Observe que o último perfil calculado pela média aritmética dos 11 perfis da janela, também mostra uma grande diminuição do ruído no campo anômalo do corpo bidimensional.

O primeiro modelo testado mostra o corpo bidimensional com magnetização normal com a interferência de dipolos. Durante a realização dos testes para este modelo e os próximos que iremos apresentar, houve variações na posição e número das fontes interferentes, amplitude e polaridade do seu campo e também na amplitude do campo anômalo do corpo bidimensional. A figura 8A apresenta o resultado final dos testes em diagrama de roseta onde mostra uma grande percentagem para o setor 1, o qual representa o corpo bidimensional, e com menor percentagem está o setor 2, que representa os ruídos, além disto estão indicados os valores da amplitude média para cada setor,

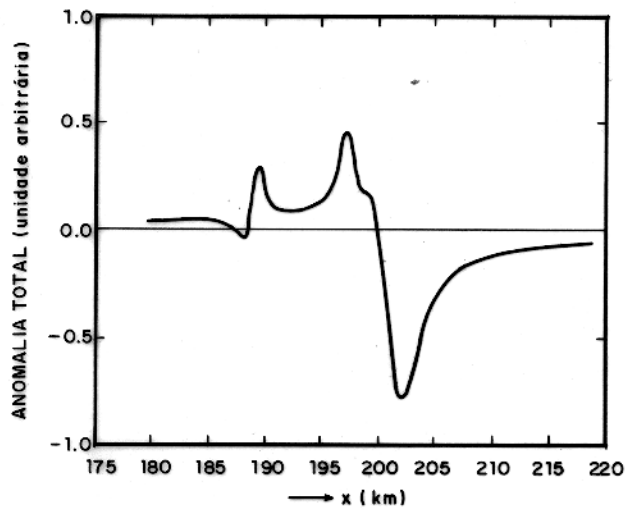


Fig. 6 A.1

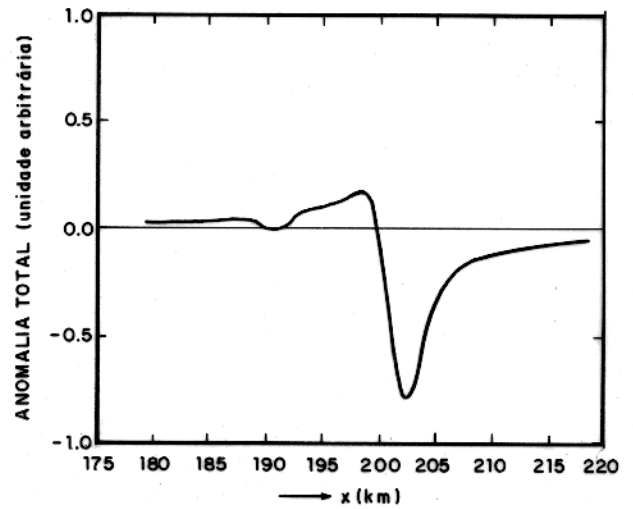


Fig. 6 A.2

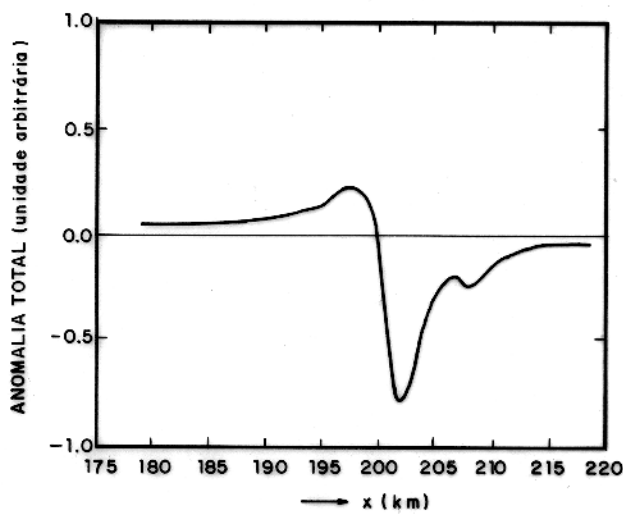


Fig. 6 A.3

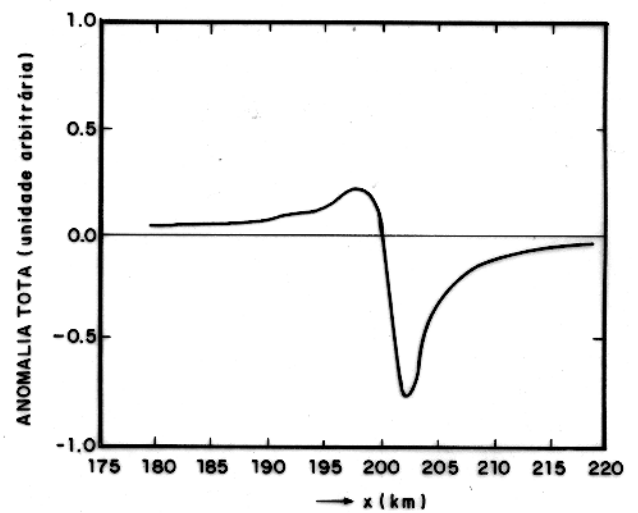


Fig. 6 A.4

Figura 6 A – Perfis da anomalia magnética do corpo bidimensional com magnetização vertical para baixo com a interferência de dipolos (veja apêndice A). As três primeiras figuras (6A.1, 6A.2 e 6A.3) correspondem aos perfis extremos e central da janela longitudinal apresentado na figura 5A. A última figura (6A.4) corresponde ao perfil da média aritmética dos 11 perfis da janela. O centro do corpo bidimensional está a 201,25 km.

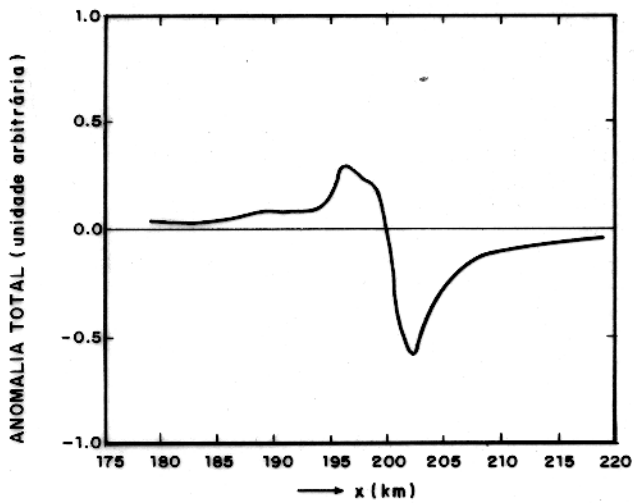


Fig. 7A.1

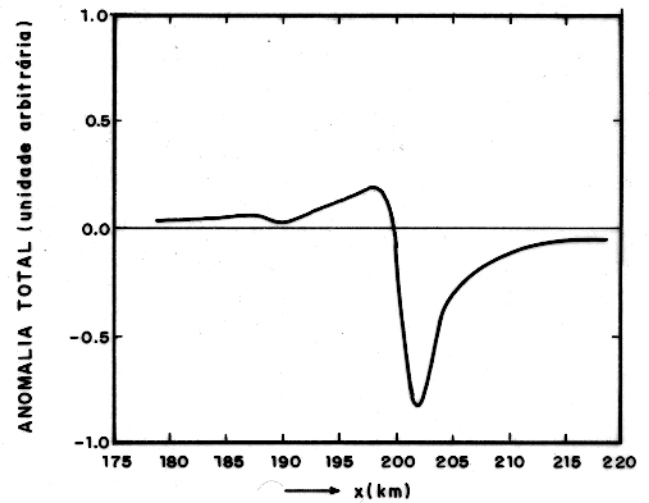


Fig. 7A.2

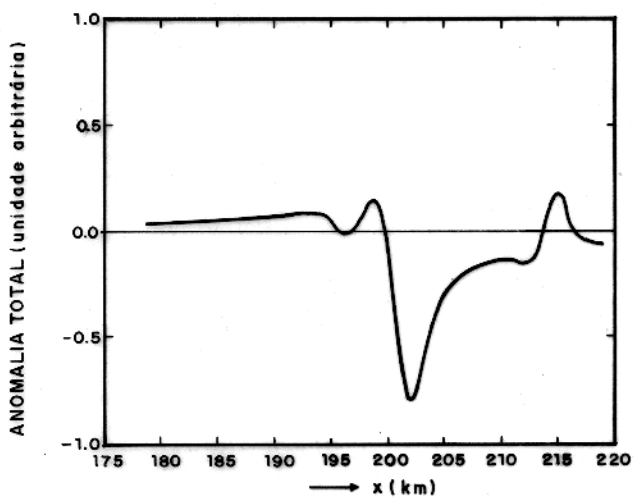


Fig. 7A.3

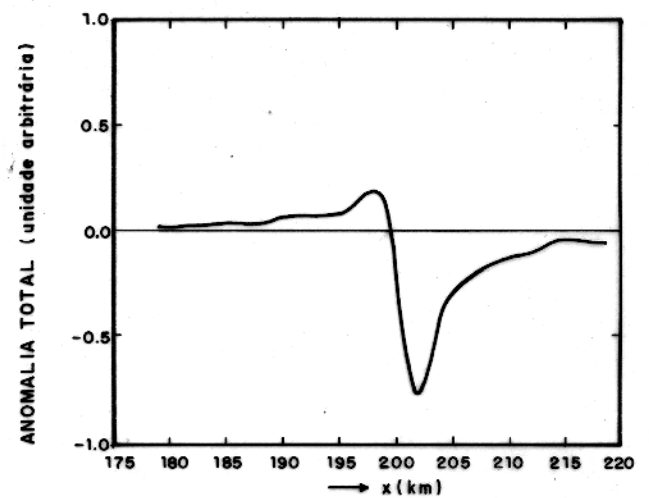


Fig. 7A.4

Figura 7A - Perfis da anomalia magnética do corpo bidimensional com magnetização vertical para baixo com a interferência de prismas com magnetização. As três primeiras figuras (7A.1, 7A.2 e 7A.3) correspondem aos perfis extremos e central da janela longitudinal apresentado na figura 5A. A última figura (7A.4) corresponde ao perfil da média aritmética dos 11 perfis da janela. O centro do corpo bidimensional está a 201,25 km.

a qual foi definido anteriormente. Baseando-se no resultado apresentado na figura 8A, podemos ver que o cálculo da média aritmética na janela longitudinal não foi suficiente para eliminar todos os ruídos (veja o setor 2). Se aplicássemos também o nível de corte que está descrito na seção 3.3.3 ao campo anômalo do modelo, o ruído seria praticamente eliminado, porque há uma grande diferença no valor da amplitude para o corpo bidimensional (setor 1) em comparação com a amplitude do ruído (setor 2). A figura 9A mostra que os resultados da inclinação de magnetização do setor 1 apresentam uma distribuição próxima a gaussiana, com uma média igual a $-24,10^\circ$ e desvio padrão igual a 0,701. Os resultados da inclinação de magnetização para os modelos do terceiro teste não obedeceram a convensão mostrada na figura 1A, a convensão adotada está indicada no diagrama de roseta da figura 8A.

O segundo e o terceiro modelo mostram o corpo bidimensional com magnetização inversa e vertical para baixo, respectivamente e ambos estão com a interferência de dipolos. A figura 10A apresenta o resultado final dos testes em diagrama de roseta para o segundo modelo, onde mostra que durante a inversão do campo anômalo para obter a inclinação de magnetização, o resultado mostrou também uma grande percentagem para o setor 1, que corresponde ao corpo bidimensional. A figura 11A mostra os resultados da inclinação de magnetização do setor 1, o qual possui uma distribuição próxima a gaussiana, e sua média é igual a $24,36^\circ$ e o desvio padrão é igual a 0,972. A figura 12A apresenta de forma idêntica o resultado final para o terceiro modelo, indicando uma grande percentagem para o setor 1, que também representa o corpo bidimensional. A figura 13A mostra os resultados da inclinação de magnetização do setor 1, e este também possui uma distribuição próxima a gaussiana, com uma média igual a $87,47^\circ$ e desvio padrão igual a 0,631. Nestes dois teste, podemos ver que as amplitudes apresentadas nas figuras 10A e 12A para o corpo bidimensional (setor 1) apresentam uma grande diferença comparado com a amplitude do ruído (setor 2), por isto eles podem ser eliminados do resultado final com a aplicação do nível de corte no campo anômalo.

Durante o cálculo da inclinação de magnetização total realizou-se também o cálculo da posição central do corpo bidimensional para os três modelos apresentados anteriormente. A determinação do centro do corpo é feita a partir do sinal analítico (equação 29 da seção 3.2) envolvendo uma operação não linear. Neste caso é difícil prever se o método é funcional, pois em geral a inversão não linear é complexa e normalmente não leva em conta a interferência de outros corpos.

Apesar destas restrições, os resultados que obtivemos foram bons (tabela A.4) e estes sugerem que os ruídos dos modelos não tiveram influência neste cálculo.

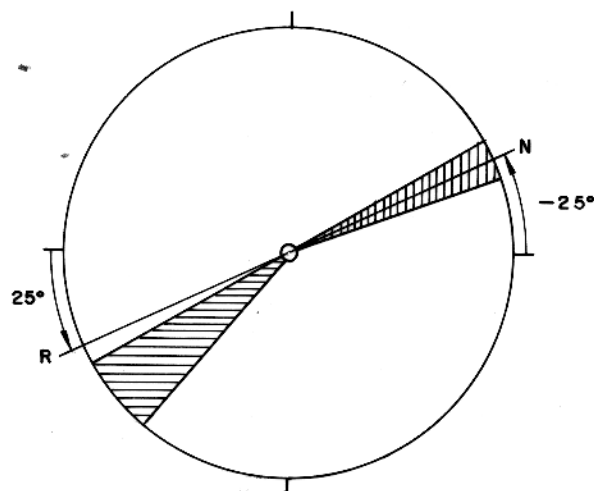
TABELA A.4 – RESULTADOS DO CÁLCULO DO CENTRO DO CORPO BIDIMENSIONAL PARA O CAMPO ANÔMALO COM INTERFERÊNCIA DE DIPOLOS

Tipo de ruído	Centro do corpo (x_o) (km)	Magnetização do corpo bidimensional	x_o (calculado) (km)	Desv. padrão
Dipolo	201,25	normal (-25°)	201,18	0,0714
Dipolo	201,25	inversa (25°)	201,19	0,1129
Dipolo	201,25	vertical para baixo (90°)	201,17	0,0875

Os três últimos modelos mostram o corpo bidimensional com magnetização normal, inversa e vertical para baixo com a interferência de prismas de base quadrada. Esses últimos modelos são mais próximos da realidade comparado com os modelos discutidos anteriormente, pois se observarmos os mapas de contorno apresentados no capítulo 2, veremos que é comum a presença de fontes tridimensionais próximo aos lineamentos. Os resultados para esses novos modelos foram apresentados na mesma forma que fizemos para os modelos anteriores, onde o setor 1 representa o corpo bidimensional e o setor 2 os ruídos. O setor 1 do diagrama de roseta indicado nas figuras 14A, 16A e 18A mostram uma menor percentagem do resultado da inclinação de magnetização em comparação com os modelos anteriores, e os setores 2 apresentam um maior espalhamento dos resultados. O aumento da área do setor 2 mostra que os prismas com magnetização causaram maiores distorções no campo anômalo do corpo bidimensional, apesar do cálculo da média aritmética efetuada no campo do modelo com a finalidade de eliminar a interferência destas fontes. Apesar do espalhamento do resultado no setor 2 para os três modelos, o mesmo não interferiu no bom resultado para os setores 1, além disto, os setores 2 apresentaram uma amplitude bem menor em comparação com o setor 1,

sendo assim, eles podem ser eliminados do cálculo da inclinação de magnetização com o uso do nível de corte durante o processamento do campo. As figuras 15A, 17A e 19A mostram que os resultados da inclinação de magnetização do setor 1 apresentam uma distribuição próxima a gaussiana, sendo que para a figura 15A a média é de $-24,83^\circ$ e o desvio padrão é de 1,810; para a figura 17A a média é de $24,61$ e o desvio padrão é de 1,979 e finalmente para a figura 19A a média é de $87,07^\circ$ e o desvio padrão é de 1,980.

Com base nos resultados que obtivemos para todos os modelos, podemos concluir que a presença de ruídos geológicos e pseudoanomalias causadas pela filtragem não comprometeram os resultados, pois através do processamento do campo anômalo apresentado na seção 3.3.3, os ruídos podem ser praticamente eliminados sem que ocorra distorções significativas no campo da fonte bidimensional. No apêndice C faremos uma discussão da influência do comprimento da placa vertical no cálculo da inclinação de magnetização.



LEGENDA	SETOR	INTERVALO P/ INCL. DE MAG.	PERCENTAGEM DO SETOR	AMPLITUDE
	1	- 20° - 30°	94,3 %	0,364
	2	30° - 50°	5,7 %	0,022

Figura 8A - Representação em diagrama de roseta do resultado da inclinação de magnetização para o corpo bidimensional com magnetização normal com interferência de dipolos.

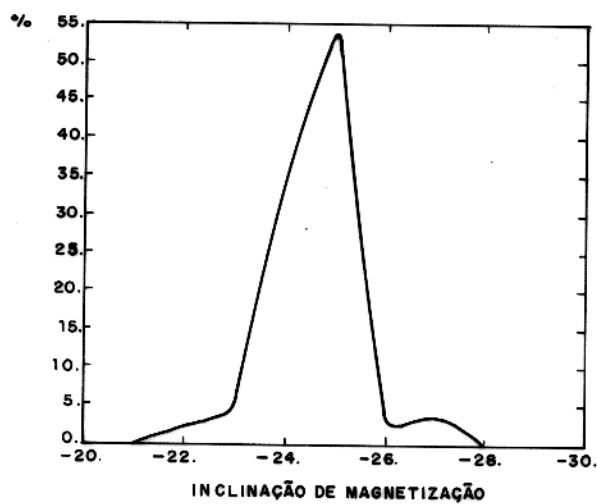
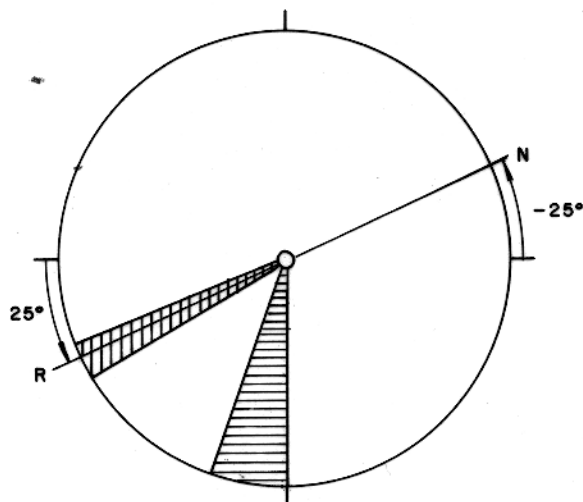


Figura 9A - Distribuição da inclinação de magnetização para o setor 1 apresentado na fig. 8A.



LEGENDA	SETOR	INTERVALO P/ INCL. DE MAG.	PERCENTAGEM DO SETOR	AMPLITUDE
	1	20° 30°	94,5 %	0,365
	2	70° 90°	5,5 %	0,015

Figura 10A - Representação em diagrama de roseta do resultado da inclinação de magnetização para o corpo bidimensional com magnetização inversa com interferência de dipolos.

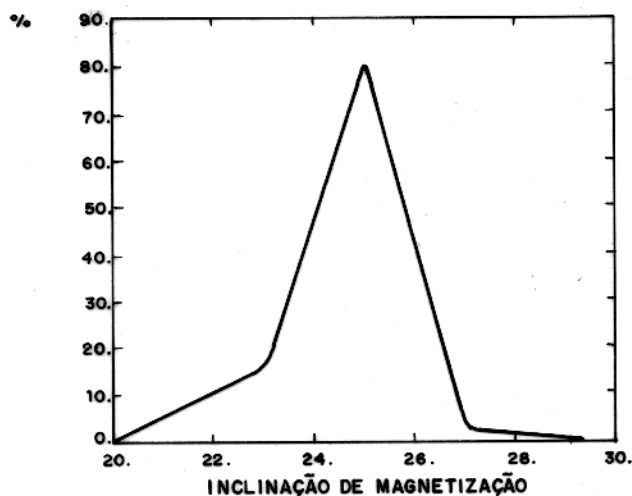
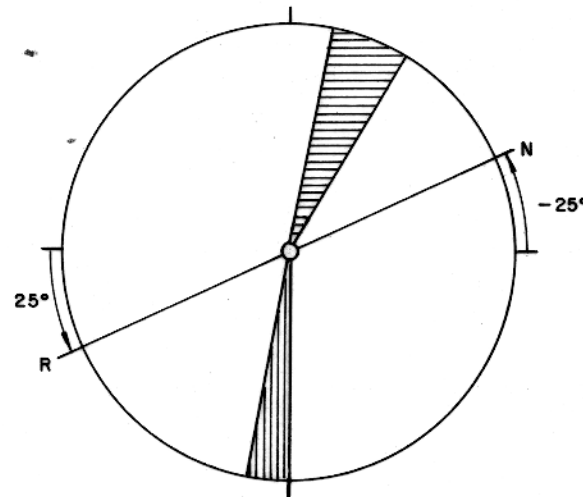


Figura 11A - Distribuição da inclinação de magnetização para o setor 1 apresentado na fig. 10 A.





LEGENDA	SETOR	INTERVALO P/ INCL. DE MAG.	PERCENTAGEM DO SETOR	AMPLITUDE
	1	80° 90°	96,2 %	0,365
	2	-70° -80°	3,8 %	0,016

Figura 12A - Representação em diagrama de roseta do resultado da inclinação de magnetização para o corpo bidimensional com magnetização vertical para baixo com interferência de dipolos.

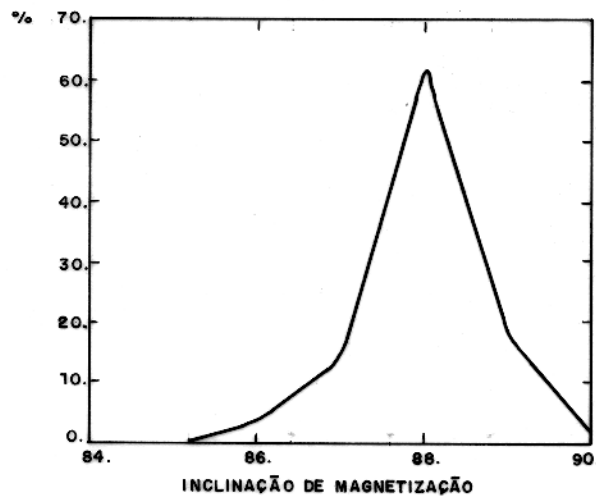
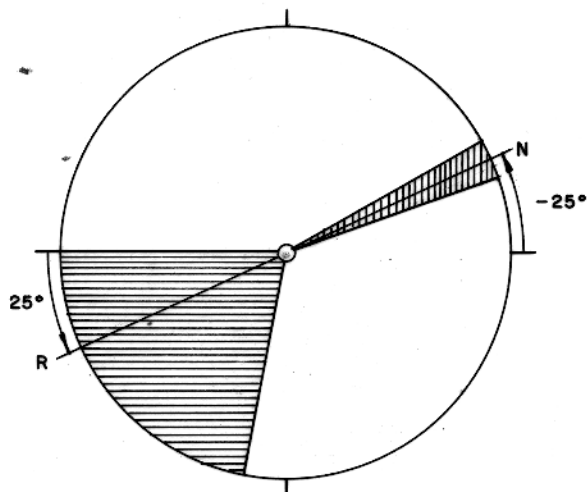


Figura 13A - Distribuição da inclinação de magnetização para o setor 1 apresentado na fig. 12 A.



LEGENDA	SETOR	INTERVALO P/ INCL. DE MAG.	PERCENTAGEM DO SETOR	AMPLITUDE
	1	-20° - 30°	69,4 %	0,365
	2	0° - 80°	30,6 %	0,022

Figura 14A - Representação em diagrama de roseta do resultado da inclinação de magnetização para o corpo bidimensional com magnetização vertical normal com interferência de prismas de base quadrada.

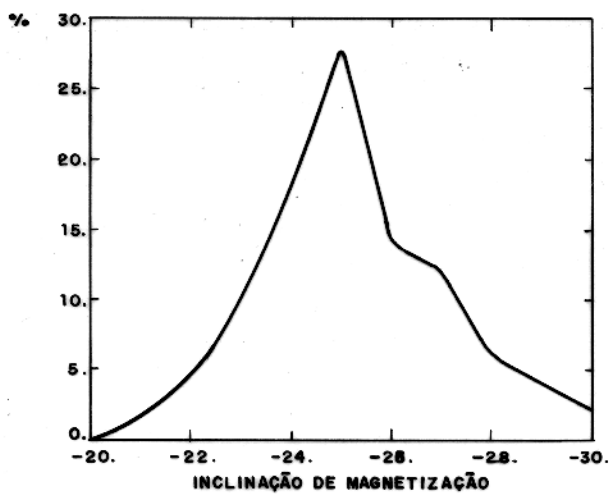
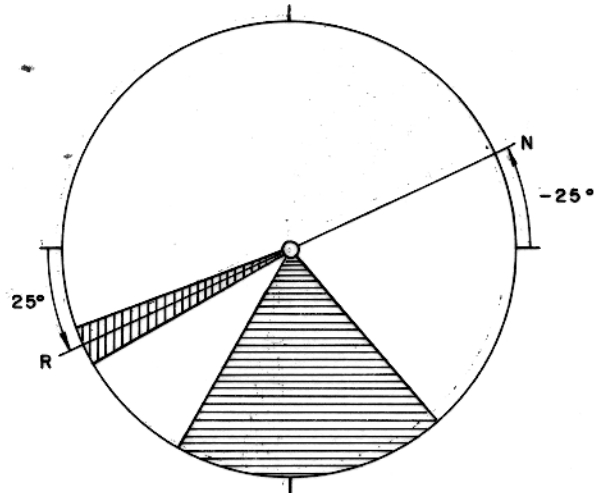


Figura 15A - Distribuição da inclinação de magnetização para o setor 1 apresentado na fig. 14A.



LEGENDA	SETOR	INTERVALO P/ INCL. DE MAG.	PERCENTAGEM DO SETOR	AMPLITUDE
	1	20° 30°	74,4 %	0,337
	2	60° 130°	25,6 %	0,026

Figura 16A - Representação em diagrama de roseta do resultado da inclinação de magnetização para o corpo bidimensional com magnetização inversa com interferência de prismas de de base quadrada.

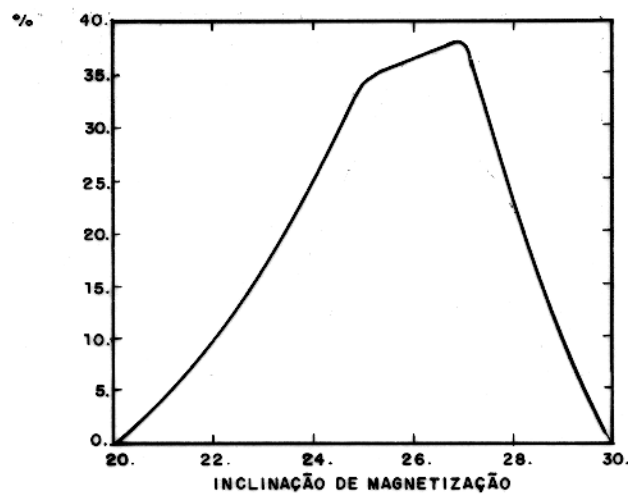
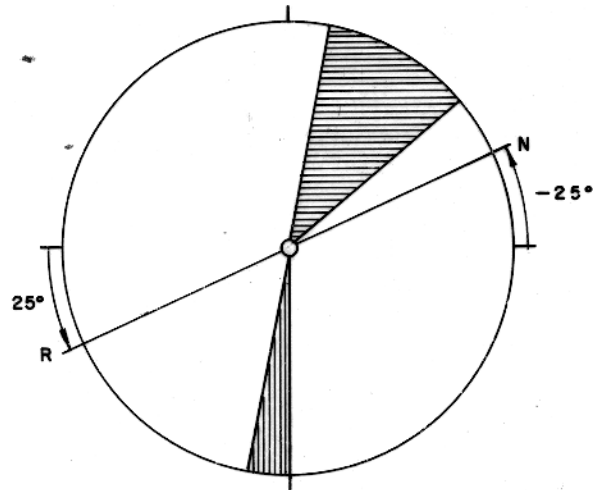


Figura 17A - Distribuição da inclinação de magnetização para o setor 1 apresentado na fig. 16A.



LEGENDA	SETOR	INTERVALO P/ INCL. DE MAG.	PERCENTAGEM DO SETOR	AMPLITUDE
	1	80° 90°	71,8 %	0,383
	2	-50° -80°	28,2 %	0,026

Figura 18A - Representação em diagrama de roseta do resultado da inclinação de magnetização para o corpo bidimensional com magnetização vertical para baixo com interferência de prismas de base quadrada.

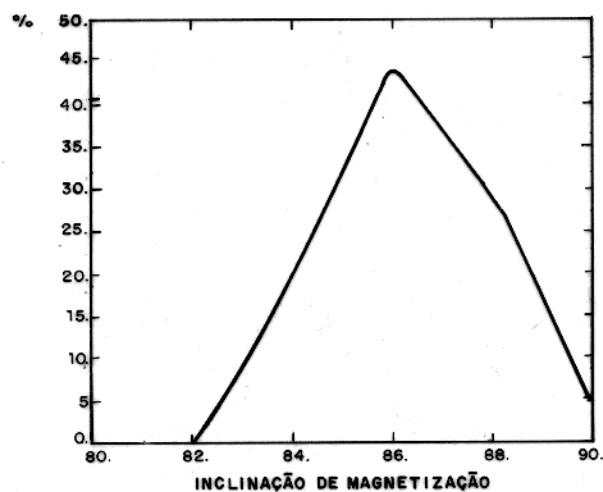


Figura 19A - Distribuição da inclinação de magnetização para o setor 1 apresentado na fig.18A.

APÊNDICE B

Testes realizados para a escolha do comprimento de onda ($\lambda_{0,9}$) do filtro passa-alta e do nível de corte no processamento do campo observado

O cálculo da inclinação de magnetização total foi realizado após o processamento do campo observado com o filtro tipo passa-alta descrito na seção 3.3.3 e da aplicação do nível de corte. O objetivo da filtragem com o passa-alta é na eliminação do efeito do campo regional e do nível de corte foi na eliminação de parte dos ruídos, pseudofontes causada pela filtragem (ver anexo A), efeito de borda dos lineamentos e anomalias fracas. O comprimento de onda ótimo ($\lambda_{0,9}$) e o nível de corte foram determinados pelo critério de estabilidade e da distribuição dos resultados em diagrama de roseta no cálculo da inclinação de magnetização total, utilizando-se um procedimento de tentativa e erro.

A seguir, apresentamos um exemplo da determinação do comprimento de onda ótimo e do nível de corte para o cálculo da inclinação de magnetização total realizado na região limitada pelos lineamentos São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonzo. Os resultados serão representados em diagrama de roseta para que assim possamos ver o seu comportamento para cada comprimento de onda e nível de corte adotado.

Primeiramente escolhemos o nível de corte, baseando-se na distribuição dos resultados em diagrama de roseta. As figuras 1B e 2B mostram os resultados para o nível de corte com 10 e 20 nT, respectivamente. Nas figuras, os setores que estão interno ao círculo central, possuem menos de 4% do resultado final. Observe que nos testes realizados com o nível de corte de 10nT o círculo central apresenta maior raio, indicando a participação de anomalias com menor amplitude no cálculo da inclinação de magnetização total em comparação com os testes que utilizaram 20nT. Estas anomalias podem ser ruídos, pseudofontes causada pela filtragem ou outros tipos de fontes que não são de nosso interesse, já que o estudo realizado neste trabalho são os grandes lineamentos, e esses possuem normalmente uma amplitude superior a 100nT. Baseando-se nesta observação escolhemos 20nT para o nível de corte, pois além disto os resultados apresentaram uma maior definição no padrão para cada comprimento de onda adotado.

Definido o nível de corte, o próximo passo foi a escolha do comprimento de onda ótimo ($\lambda_{0,9}$). A figura 2B mostra os resultados da inclinação de magnetização total para

$$10\text{km} \leq \lambda_{0,9} \leq 100\text{km}.$$

Os filtros contruídos com $10\text{km} \leq \lambda_{0,9} \leq 40\text{km}$ nos definiram dois resultados para a inclinação de magnetização total. - Apesar da relativa estabilidade obtida nesta faixa, continuamos os testes com os filtros de $50\text{km} \leq \lambda_{0,9} \leq 100\text{km}$, o qual apresentam uma mudança no padrão em relação ao grupo anterior e também uma estabilidade dos resultados neste intervalo.

A utilização dos filtros com $50\text{km} \leq \lambda_{0,9} \leq 100\text{km}$ acrescentou mais dois resultados aos calculados pelos filtros $10\text{km} \leq \lambda_{0,9} \leq 40\text{km}$. A ausência dos novos resultados para os filtros com $10\text{km} \leq \lambda_{0,9} \leq 40\text{km}$ pode nos indicar que houve uma eliminação do campo anômalo de fontes com grande largura, e conseqüentemente ocorreu uma amplificação do efeito de fontes rasas de pequena largura.

Após uma análise visual dos diagramas de roseta, concluímos que o filtro passa-alta com 80km de comprimento de onda é o que melhor define os quatro resultados para a inclinação de magnetização total, apesar do relativo espalhamento dos resultados em torno da inclinação definida. Utilizando o mesmo critério, para os lineamentos de Guapiara e Rio Piquiri, o nível de corte adotado para ambos foi também de 20nT e o comprimento de onda para o filtro passa-alta foi de 60km.

O espalhamento dos resultados da inclinação de magnetização observado nas rosetas tem como menor causa a presença de ruídos do levantamento aéreo, fontes interferentes e pseudofontes causadas pelo filtro passa-alta, como discutido no apêndice A, mas a principal causa é a falta da natureza bidimensional dos corpos anômalos, como veremos no apêndice C.

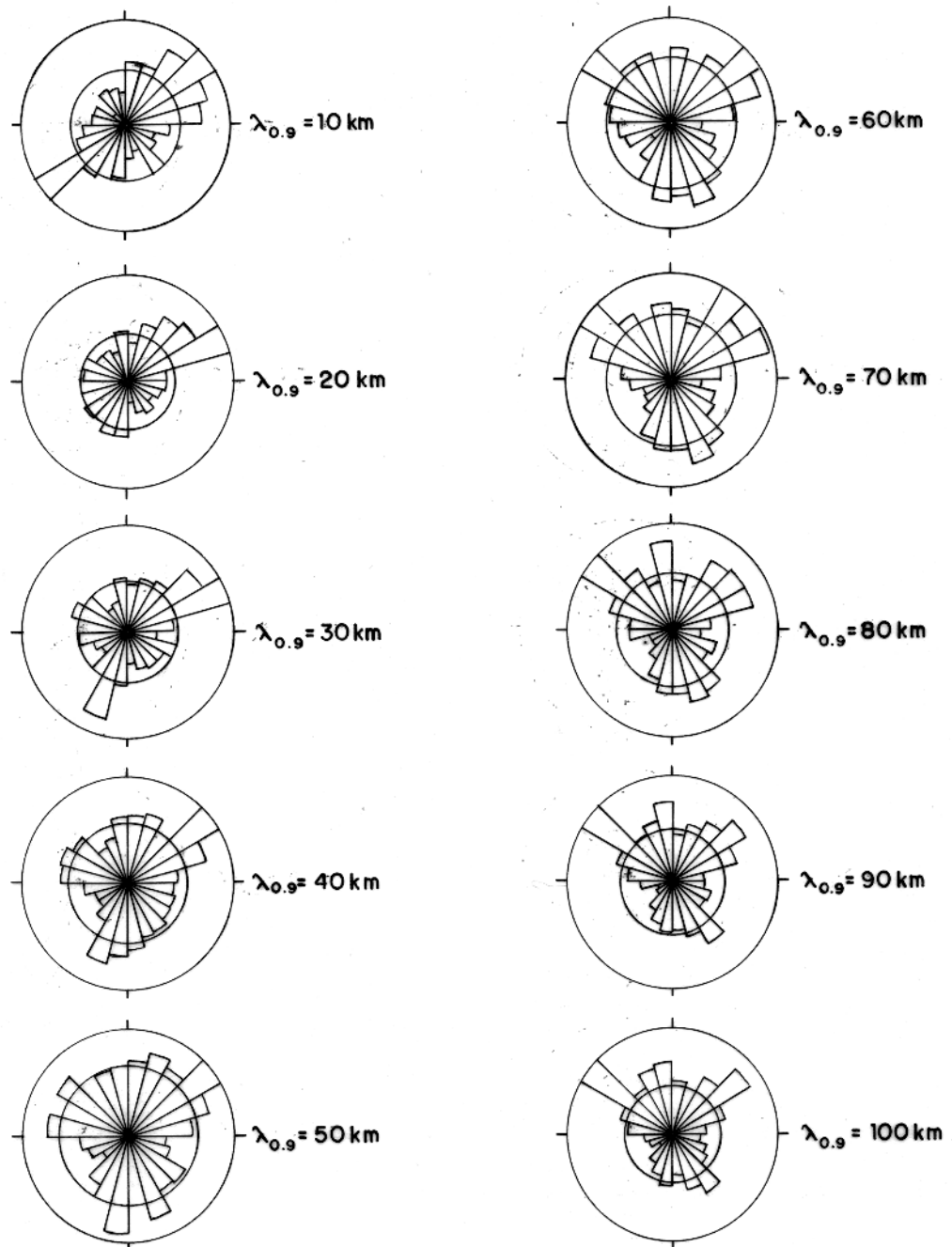


Figura 1B — Diagramas de rosetas mostrando os resultados das inclinações de magnetização total dos lineamentos São Jerônimo — Curiúva e Rio Alonzo. O nível de corte adotado nestes testes foi de $10nT_e$ e os filtros passa-alta utilizados possuem comprimento de onda ($\lambda_{0.9}$) no intervalo de $10\text{ km} \leq \lambda_{0.9} \leq 100\text{ km}$.

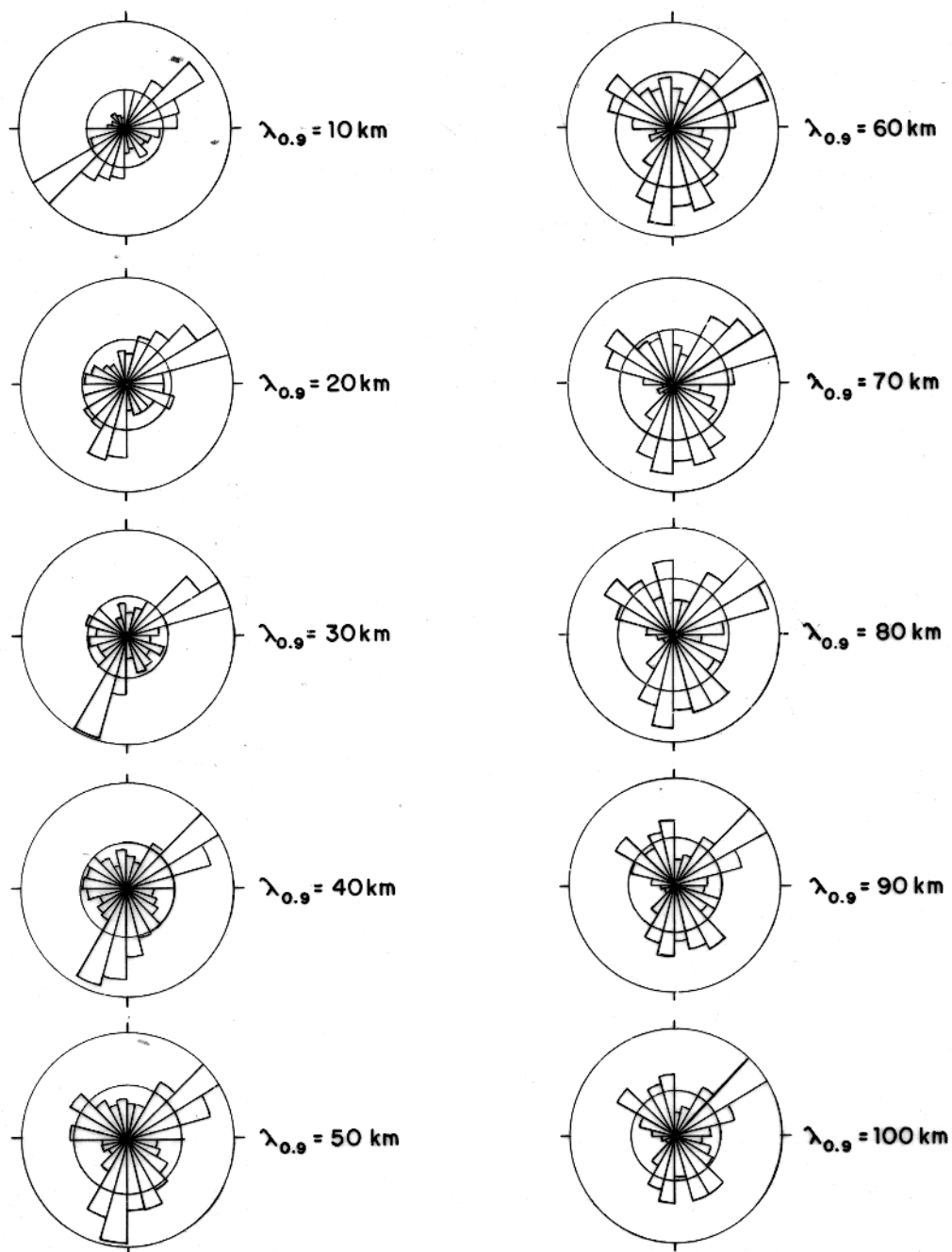


Figura 2B — Diagramas de rosetas mostrando os resultados das inclinações de magnetização total dos lineamentos São Jerônimo — Curiúva e Rio Alonzo. O nível de corte adotado nestes testes foi de 20nT e os filtros passa-alta utilizados possuem comprimento de onda ($\lambda_{0.9}$) no intervalo de $10 \text{ km} \leq \lambda_{0.9} \leq 100 \text{ km}$.

APÊNDICE C

A influência do comprimento da placa vertical no cálculo da inclinação de magnetização total e posição central do corpo anômalo

O resultado da inclinação de magnetização total apresentado no apêndice B para a região limitada pelos lineamentos de São Jerônimo—Curiúva e Rio Alonzo, mostrou quatro resultados diferentes, sendo que estes possuem uma distribuição em torno de 20° da inclinação definida. Neste apêndice vamos apresentar uma das possíveis causas da distribuição dos resultados da inclinação de magnetização em torno de um valor médio.

A princípio, julgamos que uma das causas é a presença de fontes interferentes na proximidade do lineamento ou qualquer outro tipo de ruído no campo anômalo magnético. No entanto, o apêndice A mostrou em vários testes que a presença de ruído no campo do modelo, não impediu a boa definição do resultado da inclinação de magnetização total e da posição central da fonte anômala, pois os ruídos podem ser praticamente eliminados durante o processamento do campo, através do cálculo da média aritmética numa janela longitudinal e da aplicação do nível de corte, porque eles possuem uma amplitude bem inferior ao do corpo anômalo. Para estes testes, a fonte anômala foi um corpo bidimensional de comprimento infinito, como apresentado na figura 15, no entanto sabemos que os lineamentos magnéticos são resposta de uma sequência de corpos planos verticais e sub-verticais e esses possuem comprimento limitado devido as condições de formação ou são truncados por outros corpos com direção diferente.

Baseado nesta observação, fizemos os cálculos da inclinação de magnetização total e do ponto central da placa vertical em dois modelos distintos. Para a realização dos testes o campo geomagnético adotado foi o mesmo do apêndice A, com declinação de -15° e inclinação de -25° . Os parâmetros geométricos dos modelos estão apresentados na figura 1A (apêndice A), onde Z é 1km e L é igual a 2,5km e a sua direção (ϕ) é igual a -45° .

Para o primeiro modelo, a magnetização da placa vertical é igual a 180° (vertical para baixo, segundo a convenção da figura 1A) e o seu comprimento variou para cada teste, sendo que os cálculos foram realizados somente no perfil central, como indicado no desenho em planta da placa vertical na figura 1C, e esse modelo é similar ao apresentado por Shuey e Pasquale (1973), onde eles consideram como $2\frac{1}{2}$ dimensão.

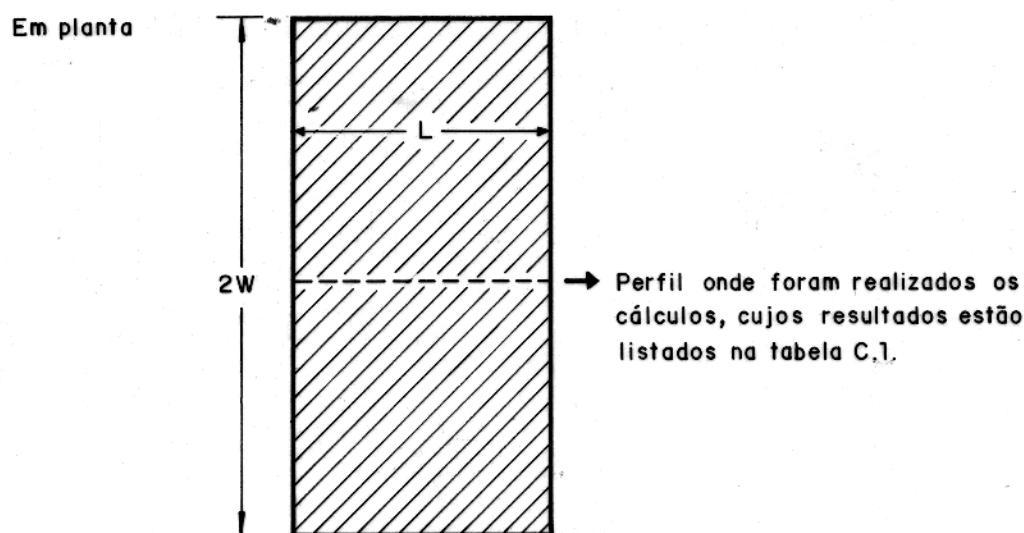


Figura 1C – Desenho em planta da placa vertical, mostrando a posição no corpo onde foram realizados os cálculos.

Antes dos cálculos, aplicamos o filtro passa-alta descrito na seção 3.3.3 no campo anômalo do modelo com um comprimento de onda ($\lambda_{0,9}$) igual a 60km. Os resultados dos cálculos estão listados na tabela C.1, sendo que W é o meio comprimento da placa vertical, como pode ser visto na figura 1C. Para uma melhor análise dos resultados, construímos um gráfico, onde as ordenadas são representadas pelas inclinações de magnetização calculadas e as abscissas correspondem ao meio comprimento da placa vertical (W) (fig. 2C).

Ao observarmos a tabela C.1, podemos ver que os resultados da posição central da placa vertical possuem uma boa estimativa para o seu valor, independente do comprimento da placa vertical, já a amplitude diminui à medida que o seu comprimento também diminui. A figura 2C, mostra que a inclinação de magnetização calculada afasta do valor real à medida que diminui o comprimento da placa vertical, no entanto, quando a placa vertical aumenta o seu comprimento tendendo para um corpo bidimensional o valor da inclinação torna-se bem próximo do valor real.

Para o segundo modelo a escolha do comprimento da placa vertical foi obtida após uma rápida análise nos mapas de contorno, e o seu valor foi estimado em 10km, o qual foi mantido constante durante a realização dos teste, ocorrendo somente a variação da inclinação de magnetização.

TABELA C.1 – RESULTADOS DO CÁLCULO DA INCLINAÇÃO DE MAGNETIZAÇÃO TOTAL E POSIÇÃO CENTRAL PARA PLACAS VERTICAIS COM DIFERENTES COMPRIMENTOS

TESTE	W (km)	ϕ	x_o (km)	x_o (calculado)	AMP. ¹	θ	θ (calculado)
1	100	-45°	201,25	201,19	0,900	180°	179,60°
2	50	-45°	201,25	201,21	0,885	180°	179,90°
3	30	-45°	201,25	201,23	0,867	180°	176,80°
4	20	-45°	201,25	201,25	0,846	180°	174,90°
5	15	-45°	201,25	201,27	0,827	180°	174,41°
6	10	-45°	201,25	201,30	0,794	180°	171,42°
7	9	-45°	201,25	201,30	0,785	180°	170,60°
8	8	-45°	201,25	201,30	0,770	180°	169,70°
9	7	-45°	201,25	201,30	0,760	180°	168,63°
10	6	-45°	201,25	201,31	0,744	180°	167,50°
11	5	-45°	201,25	201,31	0,724	180°	166,20°
12	4	-45°	201,25	201,31	0,695	180°	164,85°
13	3	-45°	201,25	201,30	0,654	180°	163,30°
14	2	-45°	201,25	201,28	0,585	180°	161,47°
15	1	-45°	201,25	201,29	0,428	180°	158,60°

1 – AMP.= amplitude definido por $a(x) = \sqrt{T_i^2(x, z) + H_i^2(T(x, z))}$, onde i é a componente ímpar da função próximo ao ponto central do modelo.

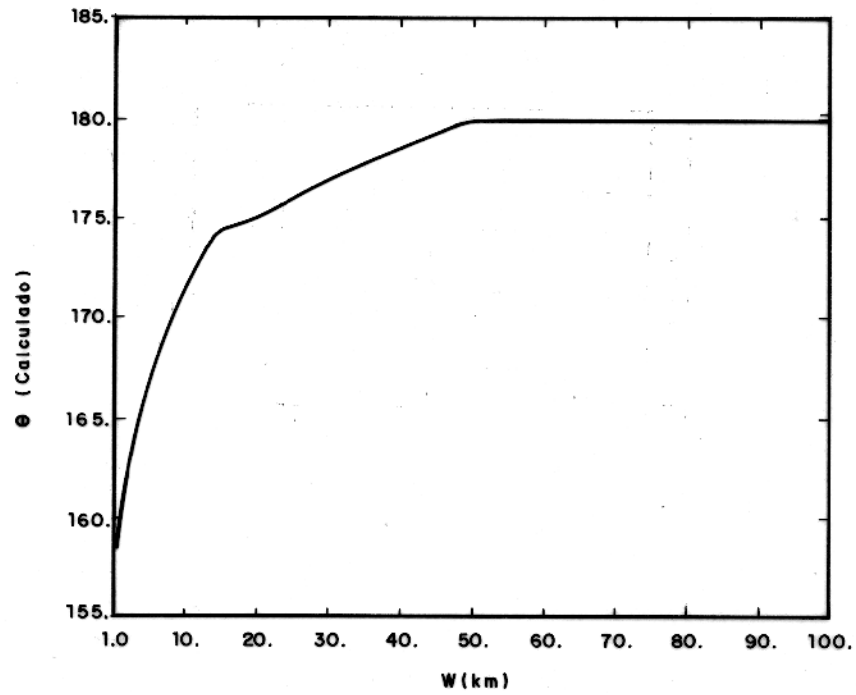


Figura 2C - Representação gráfica dos resultados da inclinação de magnetização para placas verticais com diferente comprimento (W). Neste exemplo a inclinação de magnetização da placa vertical é de 180°.

Os primeiros testes foram realizados no campo anômalo da placa vertical com a inclinação de magnetização vertical para baixo (180° , segundo a convenção da figura 1A), o qual está centrado numa janela espacial que possui 400km de largura e 30km de comprimento, como apresentado na figura 2C. O objetivo deste modelo é mostrar a distribuição dos resultados da inclinação de magnetização calculado no campo anômalo da placa vertical isolada, o qual está simulando um caso extremo, pois na Bacia do Paraná esses corpos ocorrem normalmente alinhados e o campo anômalo não possui variações significantes, como mostra o lineamento do Rio Piquiri.

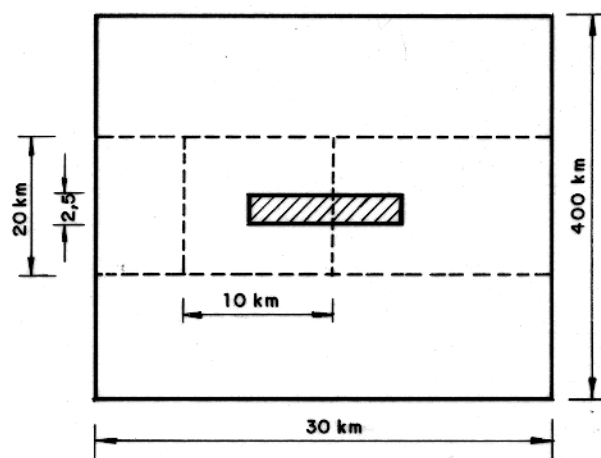


Figura 2C – Desenho esquemático em planta da placa vertical centrado em uma janela espacial (desenho fora de escala).

Antes de calcular a inclinação de magnetização, realizamos parte do processamento do campo anômalo feito para o terceiro modelo do apêndice A, isto é, inicialmente calculamos a média aritmética do campo anômalo da placa vertical numa janela espacial móvel de 10km de comprimento, limitado por uma abertura transversal de 20km (fig. 2C). Mantendo-se fixo o centro da janela, calculamos a média aritmética do campo na direção longitudinal (paralela a direção da placa vertical) e atribuímos este valor ao centro da janela. A janela espacial se move com intervalo de 1km, e o processo é repetido. No início desta operação a janela espacial encontra-se totalmente fora da placa vertical, mas a cada movimento ela vai se sobrepondo a placa e a operação só termina quando ela é ultrapassada. Após o cálculo da média do campo anômalo, fizemos uma filtragem deste campo com o filtro passa-alta descrito na seção 3.3.3, com 60km de comprimento de onda ($\lambda_{0,9}$).

O cálculo da inclinação de magnetização foi realizado a cada 1km apartir do centro da primeira janela localizado a 5km do lado esquerdo da placa vertical (fig. 2C), sendo que no final desta operação tivemos um total de 21 resultados. Os resultados da inclinação de magnetização que apresentaremos nas próximas figuras seguem a convensão mostrada na figura 1A, isto é 0° indica uma magnetização vertical para cima e 180° é vertical para baixo.

A figura 3C mostra uma representação gráfica com os resultados, onde as ordenadas são as inclinações de magnetização calculadas e as abscissas correspondem ao local onde elas foram calculadas, sendo que a origem passa pelo perfil central da placa vertical. Pelo traçado do gráfico podemos ver que o resultado da inclinação de magnetização se aproxima do valor real na vizinhança do centro da placa, e nesta mesma região ocorrem os maiores valores da amplitude como pode ser visto na figura 4C. A inclinação de magnetização calculada ao longo da placa sofre uma variação de $\pm 20^\circ$ em torno do valor real que é de 180° , já a representação gráfica da amplitude (fig. 4C) mostra uma distribuição similar a gaussiana, onde ocorre um forte decaimento à medida que se aproxima das bordas laterais da placa.

As próximas figuras ilustram o caso para a placa vertical com magnetização inversa (pela convensão é igual a 245°) e com magnetização normal (65°). Nestes dois exemplos, observe que as curvas possuem um traçado idêntico ao apresentado pelo primeiro, onde a inclinação de magnetização calculada ao longo da placa sofre uma variação aproximada de $\pm 20^\circ$ em torno de valor real e a amplitude apresenta os maiores valores na vizinhança do centro da placa.

Com base nestes dois exemplos é de se esperar que no cálculo da inclinação de magnetização total do campo observado ocorra um espalhamento dos resultados até com 20° de diferença, pois esta foi a maior variação ocorrida nos resultados dos cálculos ao longo da placa vertical como indicado no segundo modelo. E de acordo com o primeiro modelo, a menor variação dos resultados ocorrem para os campos anômalos de fontes com grande comprimento, pois estes se aproximam de um corpo bidimensional.

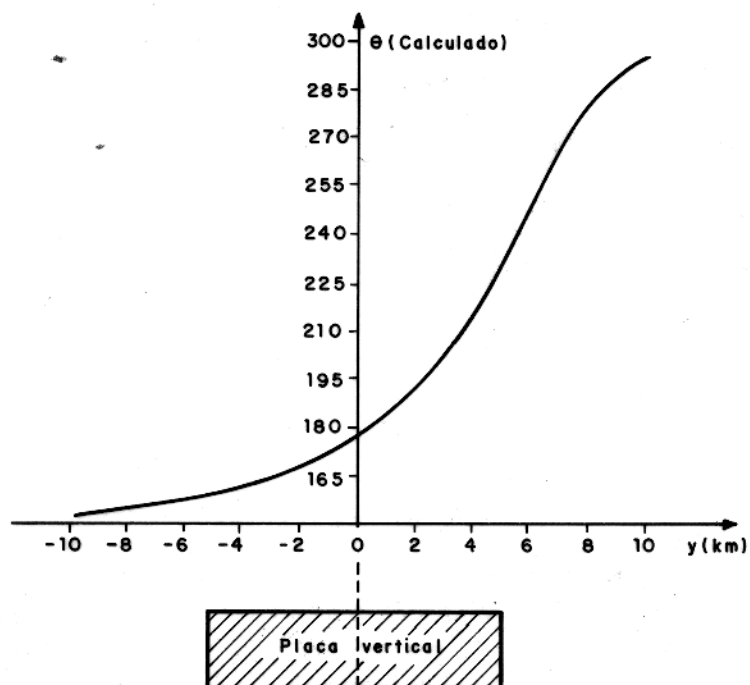


Figura 4c - Representação gráfica dos resultados da inclinação de magnetização calculada na vizinhança e ao longo da placa vertical. Neste exemplo a inclinação de magnetização da placa vertical é de 180° .

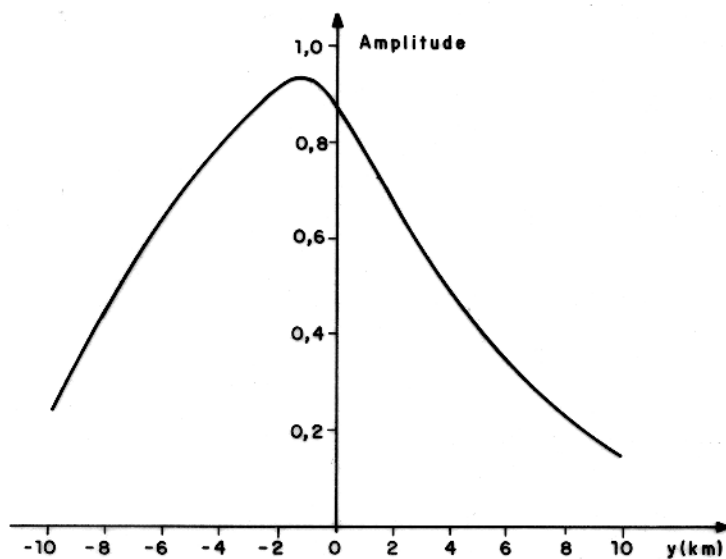


Figura 5c - Representação gráfica dos resultados da amplitude calculada na vizinhança e ao longo da placa vertical indicada na figura 4c.

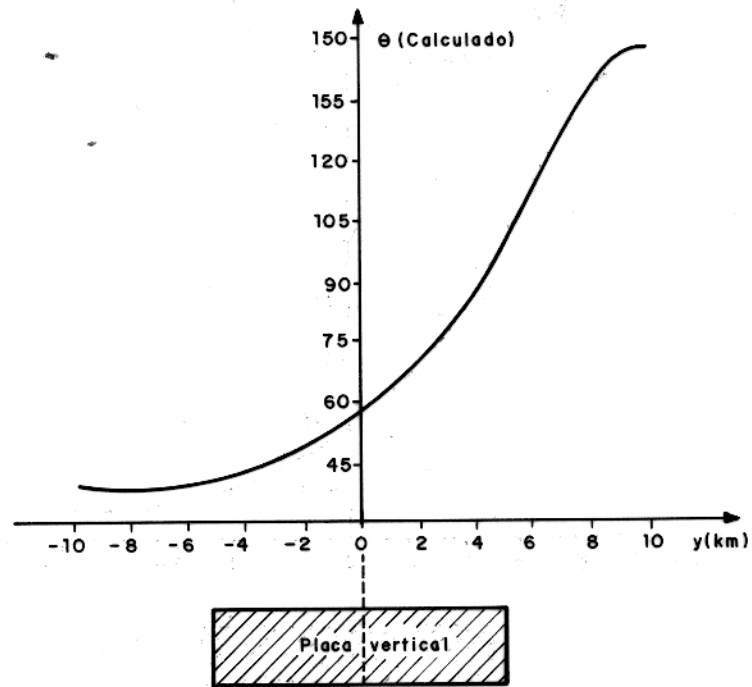


Figura 6c - Representação gráfica dos resultados da inclinação de magnetização calculada na vizinhança e ao longo da placa vertical. Neste exemplo a inclinação de magnetização da placa vertical é normal (65°).

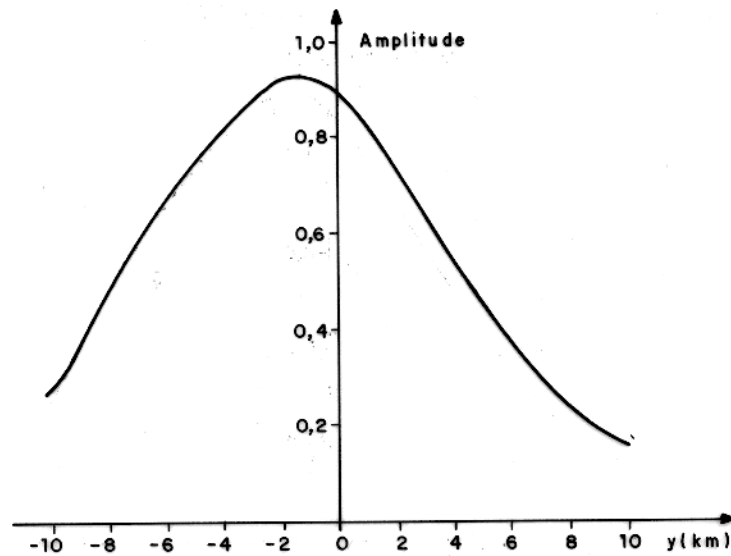


Figura 7c - Representação gráfica dos resultados da amplitude calculada na vizinhança e ao longo da placa vertical indicada na figura 6c.

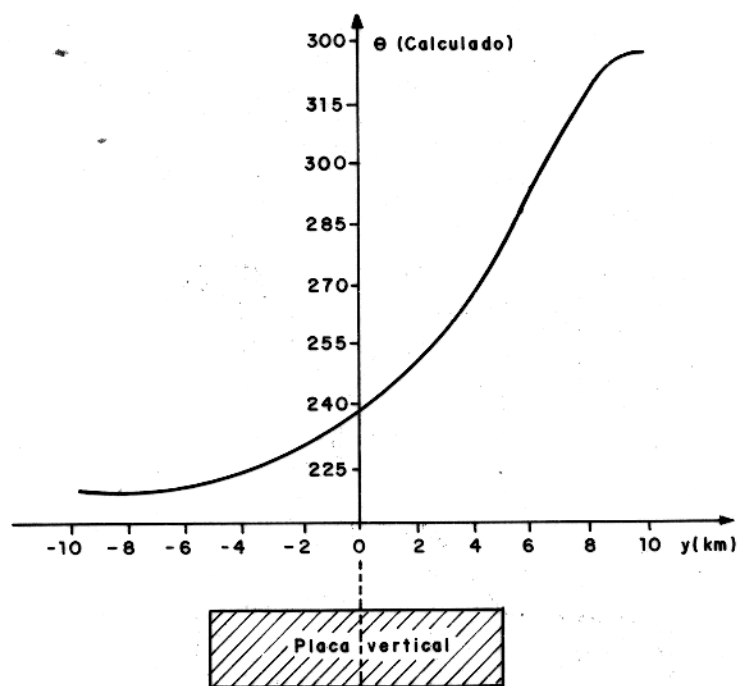


Figura 8c — Representação gráfica dos resultados da inclinação de magnetização calculada na vizinhança e ao longo da placa vertical. Neste exemplo a inclinação de magnetização da placa vertical é inversa (245°).

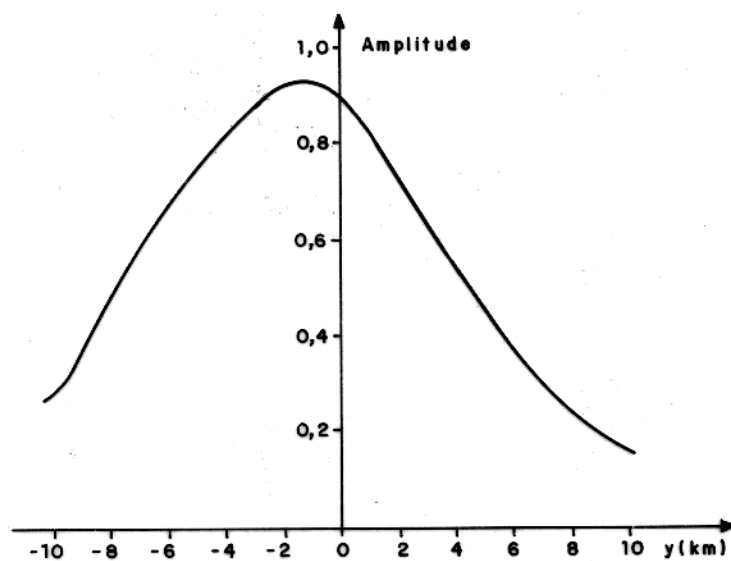


Figura 9c — Representação gráfica dos resultados da amplitude calculada na vizinhança e ao longo da placa vertical indicada na figura 8c.

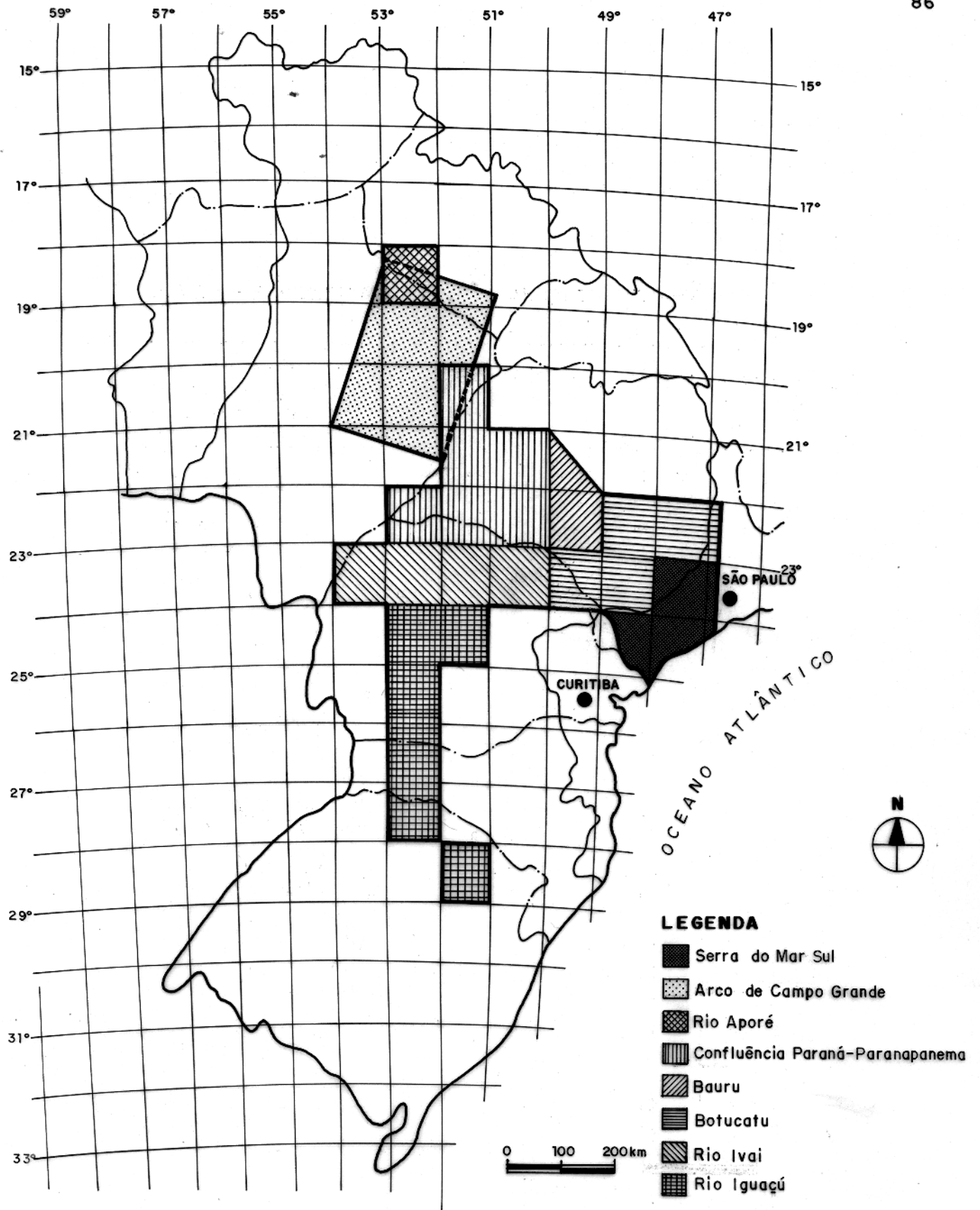


Figura 1 - Mapa de localização dos projetos aeromagnéticos.

(Modificado de Ferreira, 1982)

TABELA 1 — ESPECIFICAÇÕES DOS AEROLEVANTAMENTOS

PROJETO	DIREÇÃO DAS LINHAS DE VÔO	ESPAÇAMENTO DAS LINHAS DE VÔO (km)	ALTURA DE VÔO (m)	ANO	EXTENSÃO DA PERFILAGEM (km linear)	ÁREA LEVANTADA (km ²)
SERRA DO MAR DO SUL	N30°W	1	135	1976	46.000	50.000
ARCO DE CAMPO GRANDE	N15°E	3	1800(B)	1979	27.920	70.000
RIO APORE	N-S	2	400	1981	6.227	12.000
CONFLUÊNCIA PARANA-PARANA PANEMA	N45°E	2	400	1980	37.610	67.000
BAURU	N30°W	2	450	1979/80	11.383	19.200
BOTUCATU	N-S	2	450	1980	25.745	46.000
RIO IVAÍ	N-S	2	450	1981	25.726	48.000
RIO IGUAÇÚ	N-S	2	500	1981	41.166	74.000
TOTAIS					221.777	386.200

B = Altura barométrica (Altitude)

Fonte: PETROBRAS/DEPEX

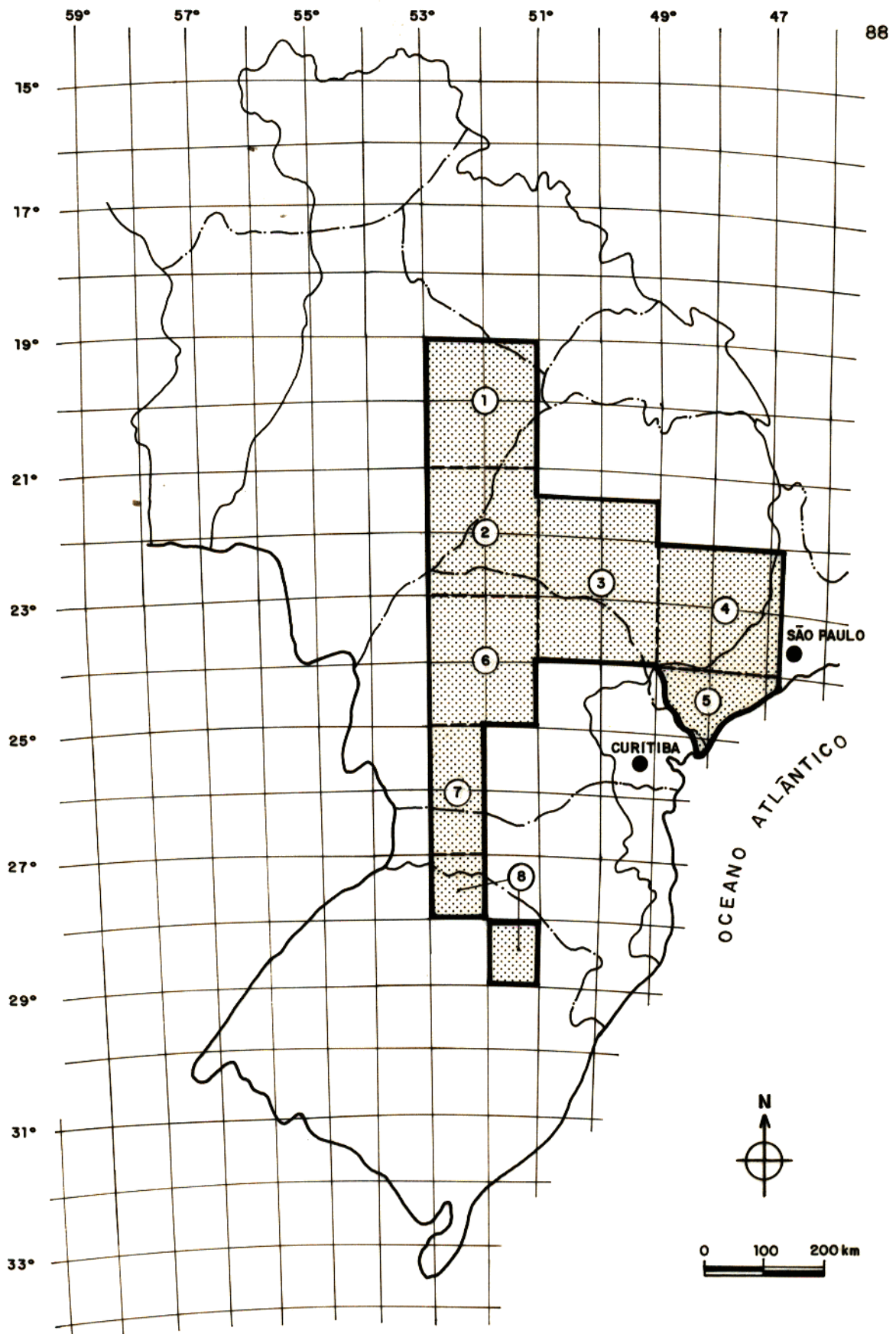


Figura 2 - Mapa de localização da área estudada com as divisões em sub-áreas. Numeradas de 1 a 8. (Modificado a partir de Ferreira, 1982).

Lineamento S. Jerônimo - Curitiba
Lineamento do R. Alonzo

Lineamento de Guapiara

Lineamento do R. Piquiri

Lineamento S. Jerônimo - Curitiba
Lineamento do R. Alonzo

Lineamento de Guapiara

Lineamento do R. Piquiri

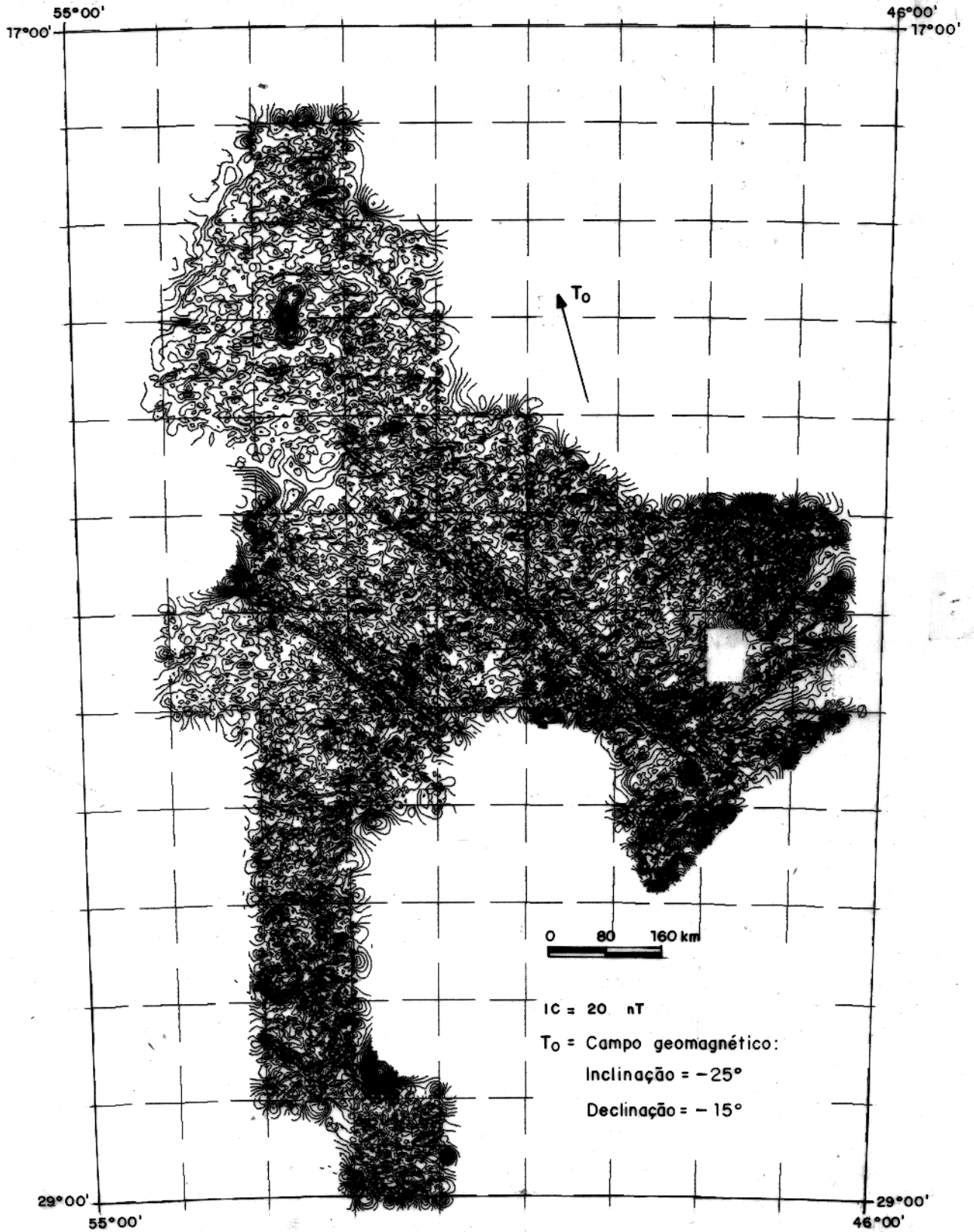


Figura 3 - Mapa de contorno dos dados aeromagnéticos com os principais lineamentos.

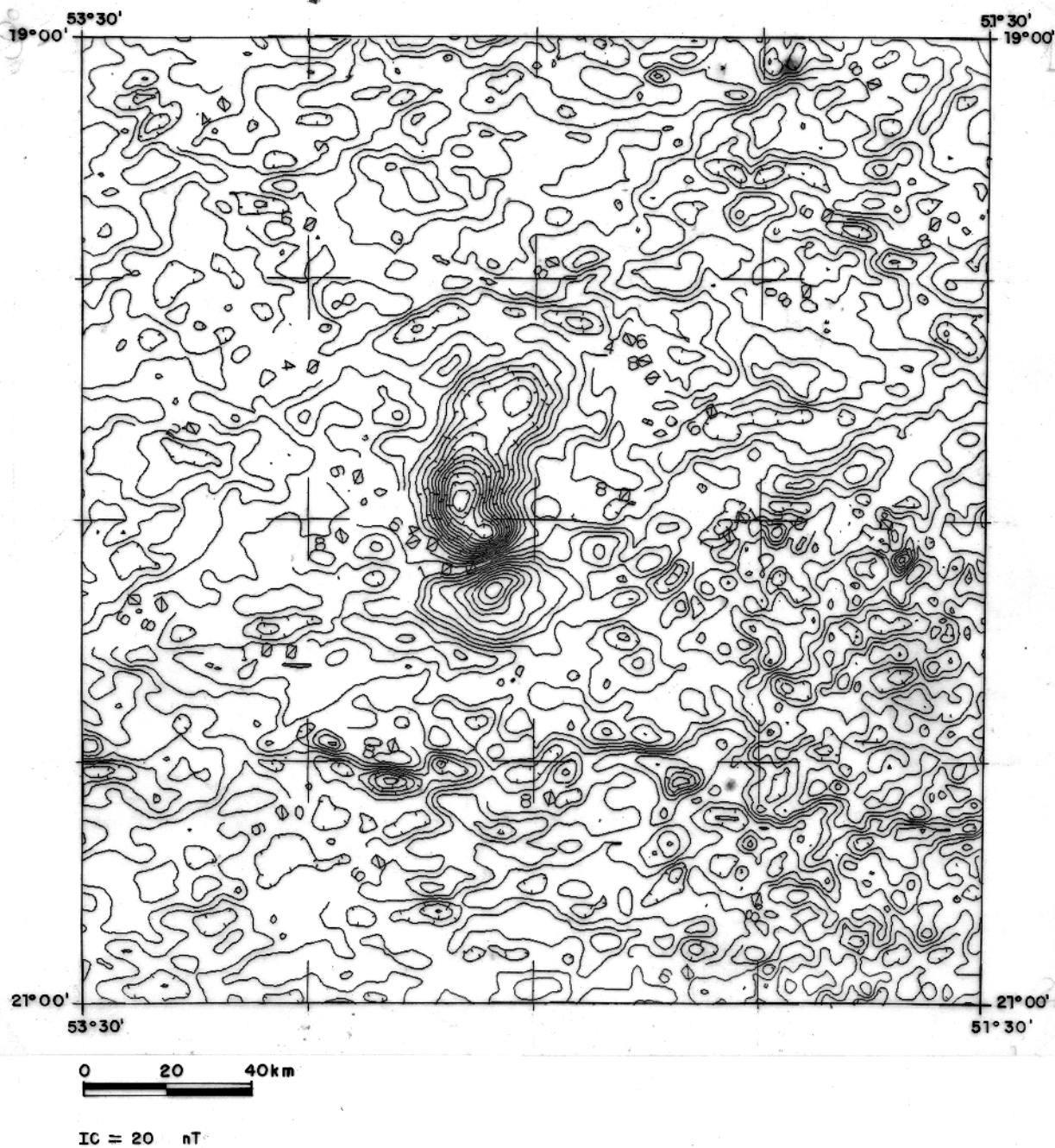
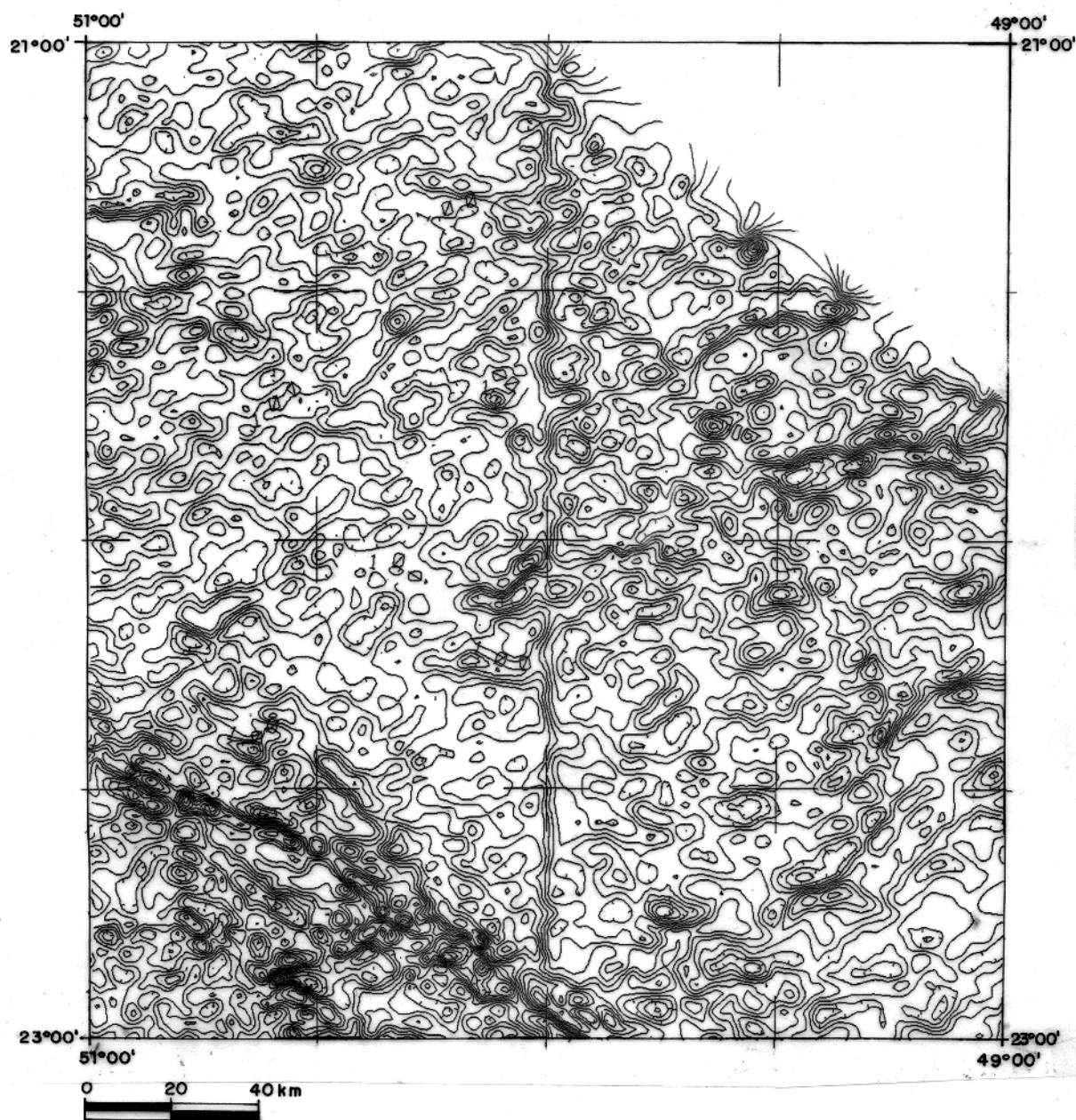
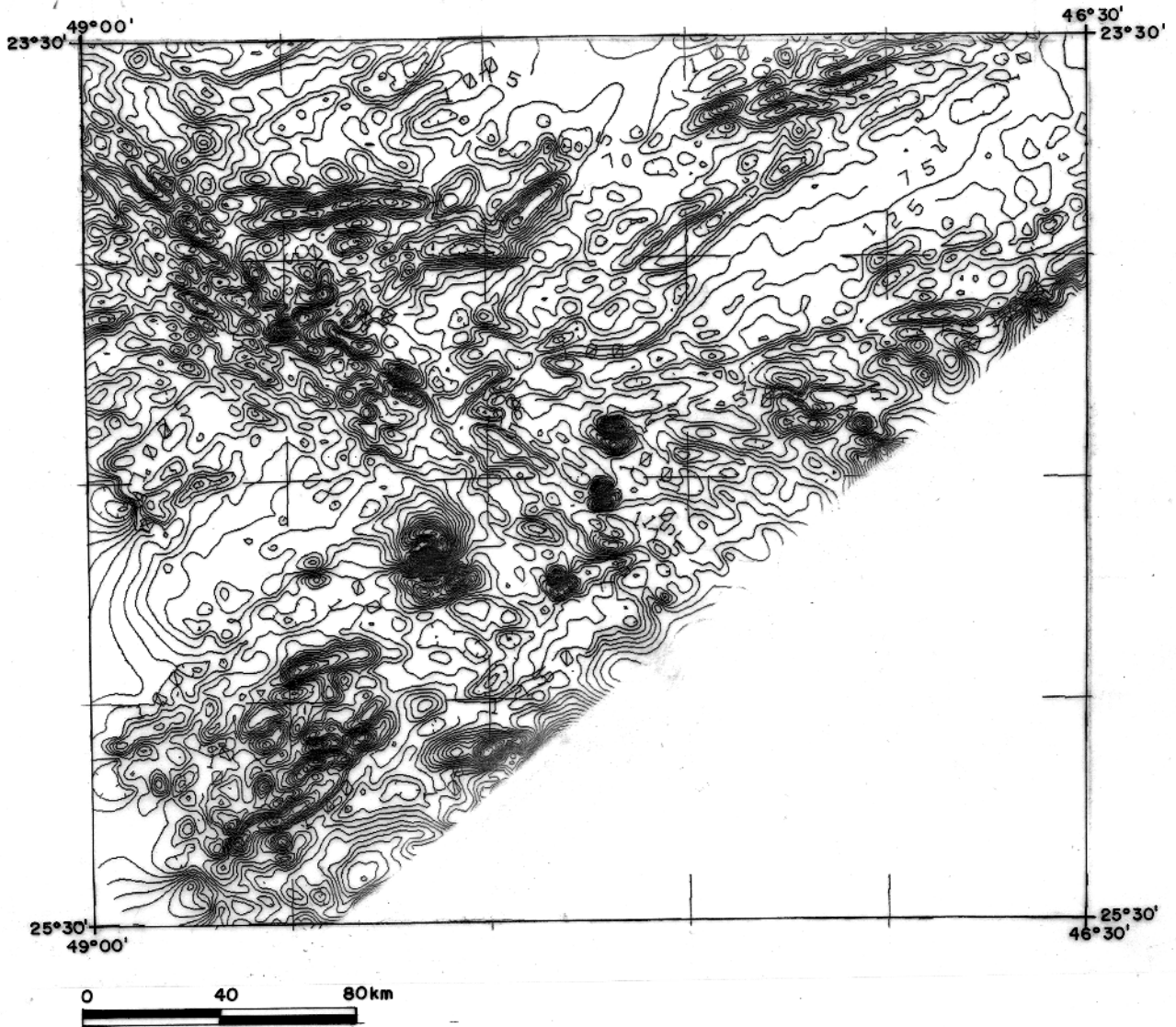


Figura 4 - Mapa de contorno do campo magnético anômalo do projeto Arco de Campo Grande.
(Sub-área 1).



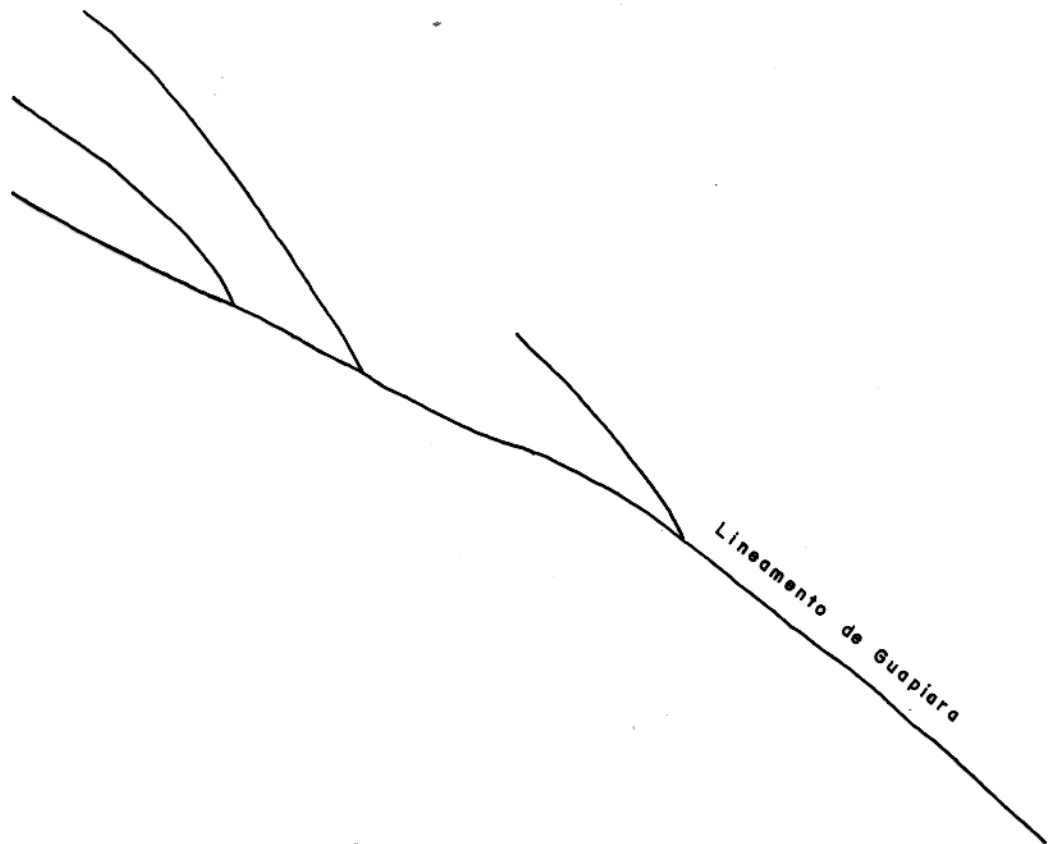
IC= 20 nT

Figura 5 - Mapa de contorno do campo magnético mostrando o pseudo-lineamento entre dois levantamentos distintos. (Sub-área 3).



IC 25 nT

Figura 6 – Mapa de contorno do campo magnético no embasamento com o lineamento de Guapiara.(Sub-área 5).



Lineamento de Guapira

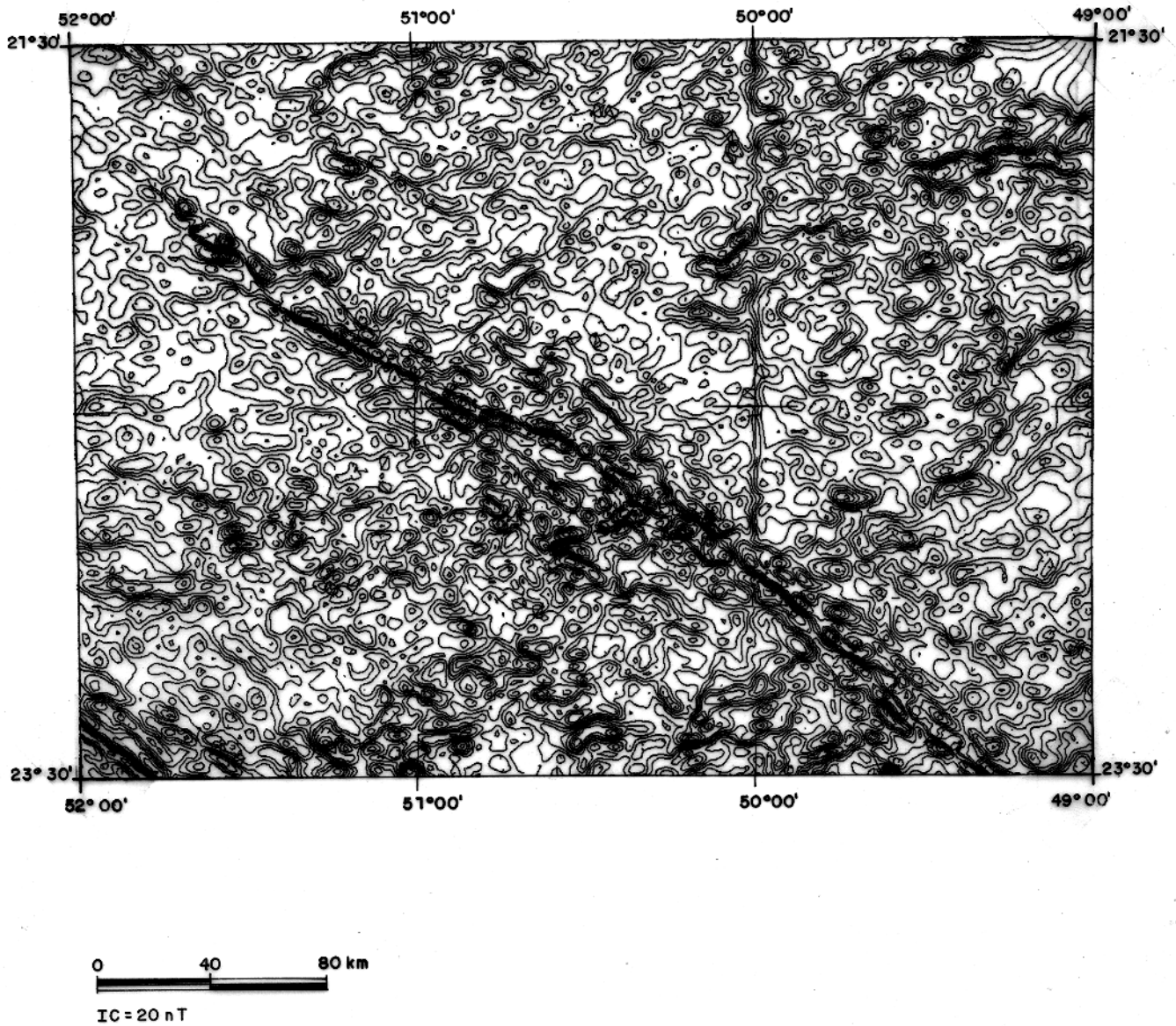
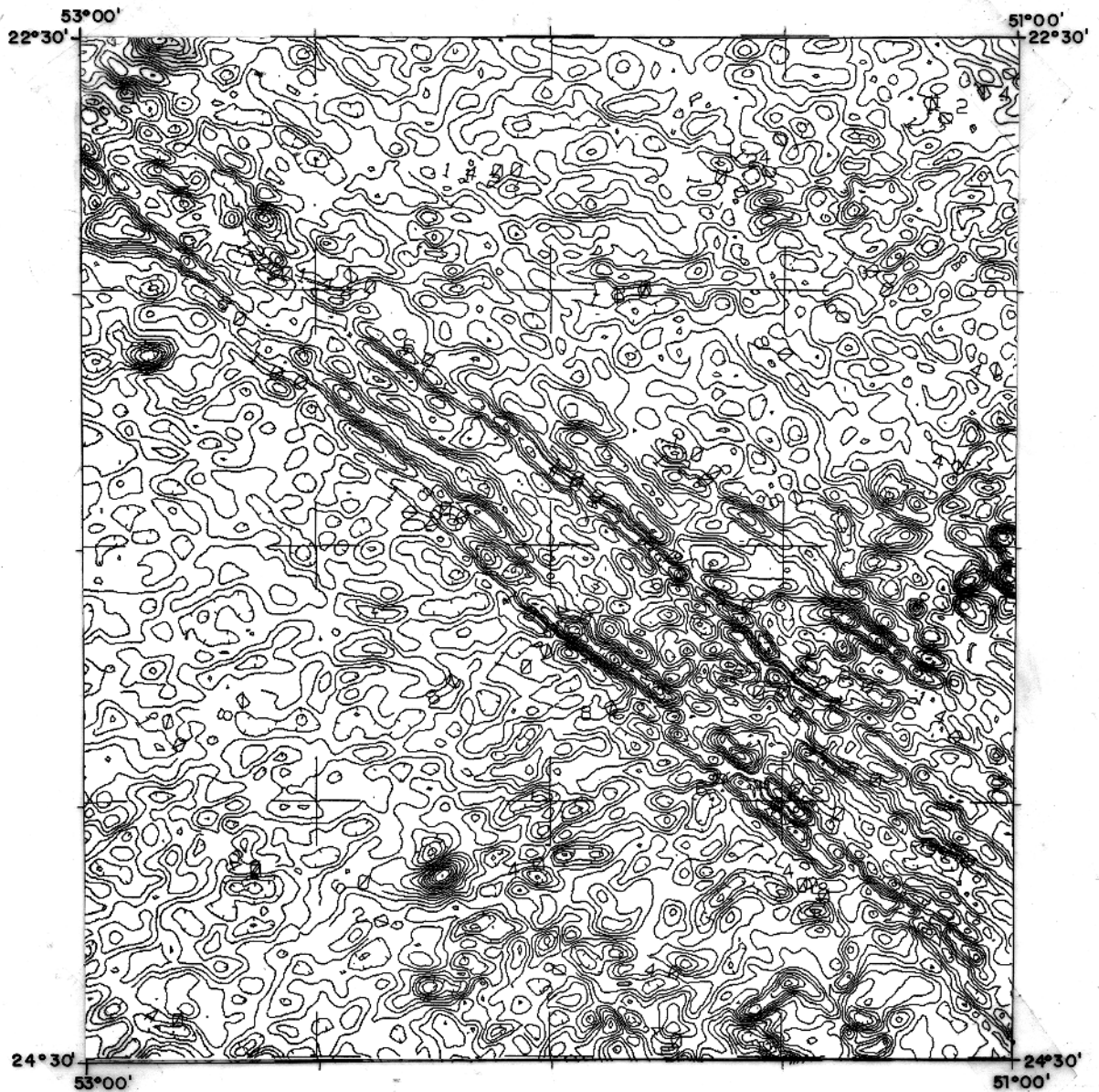


Figura 7 - Mapa de contorno do campo magnético mostrando o lineamento de Guapiara. (Sub-área 3).

Lineamento São Jerônimo - Curiúva

Lineamento do Rio Alonzo



0 20 40 km

IC=20 nT

Figura 8 – Mapa de contorno do campo magnético mostrando a região limitada entre os lineamentos São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonzo. (Sub-área 6). (Ver figura 38).

Lineamento do Rio Piquiri

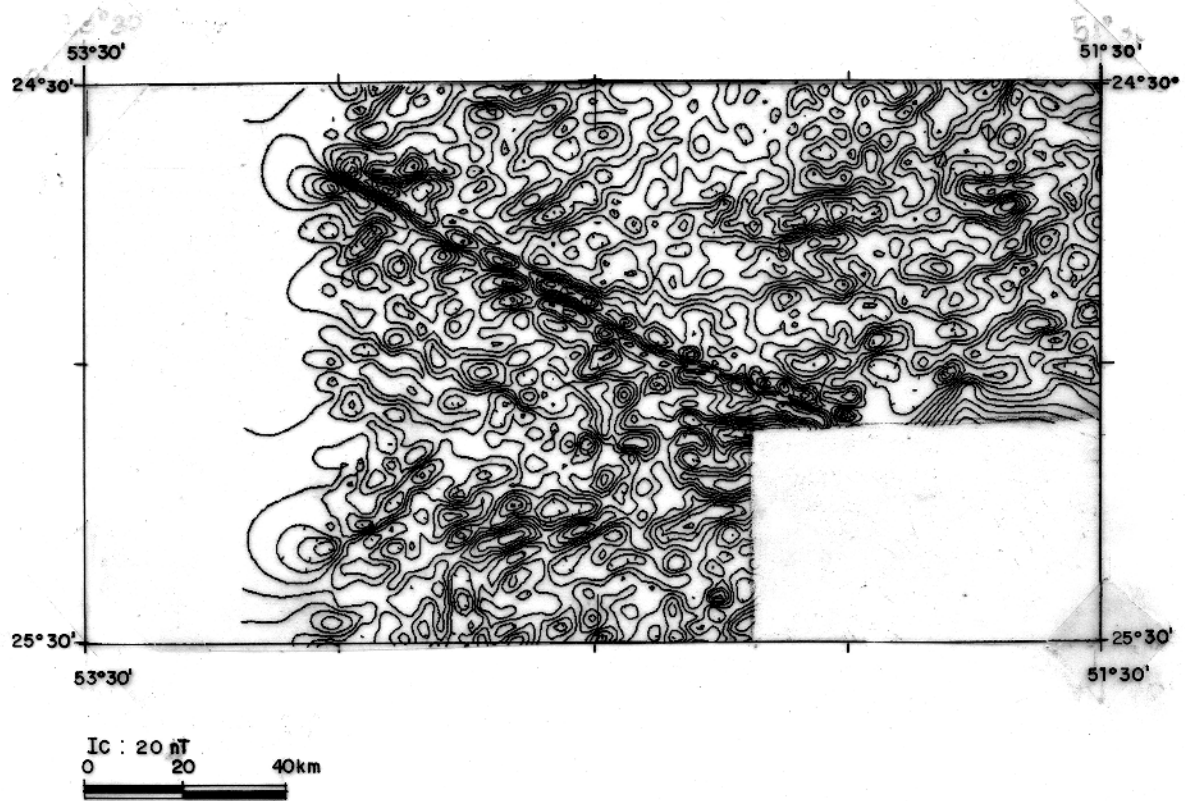
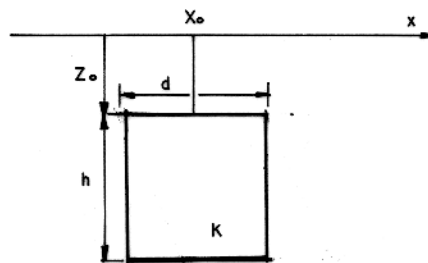
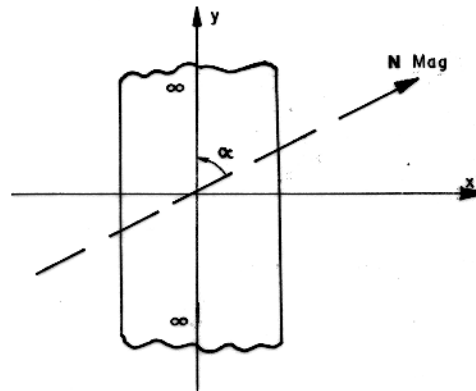


Figura 9 - Mapa de contorno do campo magnético mostrando o lineamento do Rio Piquiri.
(Sub-área 6).

a) Perfil



b) Em planta



Onde:

d = largura da placa.

x_0 = posição horizontal do centro da placa.

z_0 = profundidade do topo da placa.

h = espessura da placa.

k = susceptibilidade aparente

Figura 10- Definição dos parâmetros da placa vertical bidimensional magnética.

PARÂMETROS

Campo :

Inclinação = -25°

declinação = -15°

Corpo :

magnetização = 2 A/m

largura = 1,5 km

prof. do topo = 1 km

prof. da base = 5 km

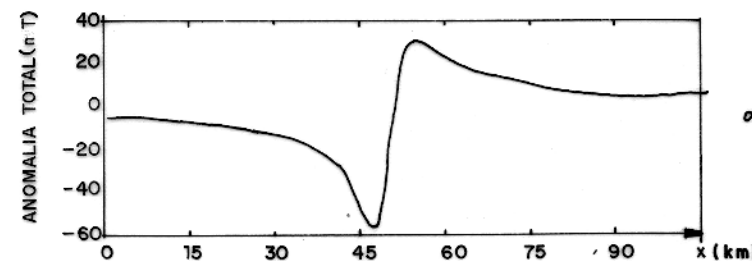
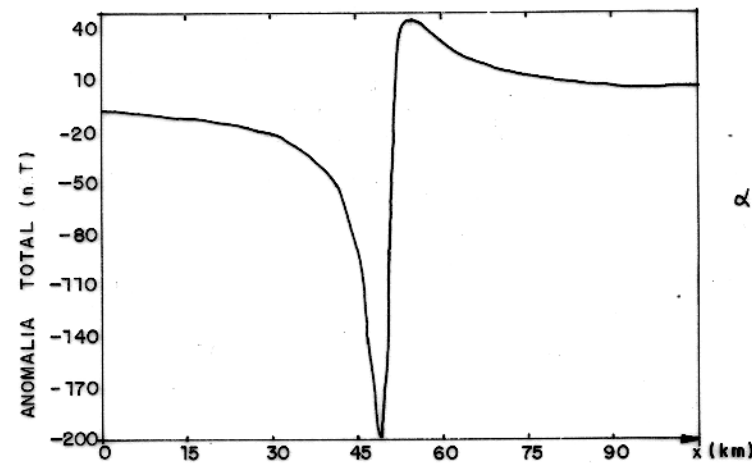
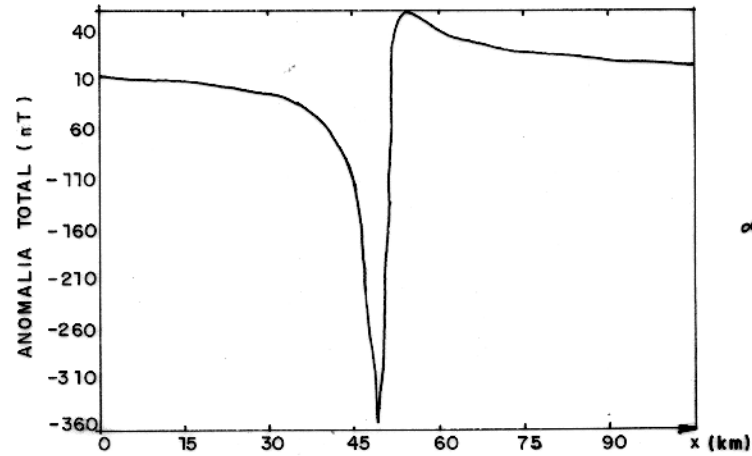
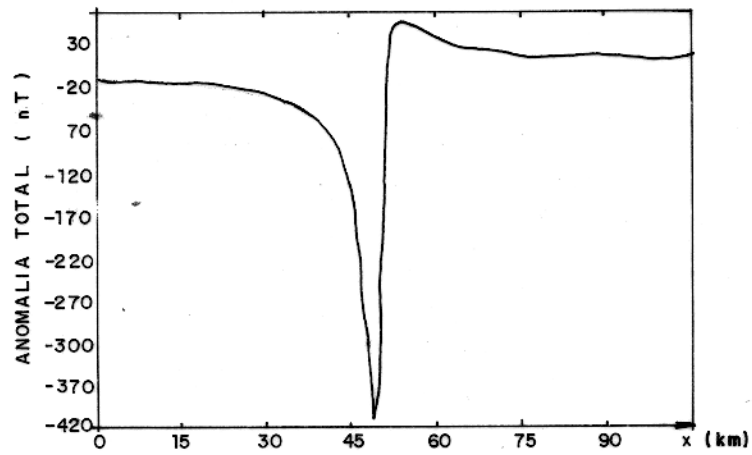


Figura 11 - Anomalia magnética da placa vertical mostrando o efeito do ângulo entre a direção da placa com o campo magnético na amplitude da anomalia. A placa apresenta direções N80°W, N60°W, N40°W e N20°W.

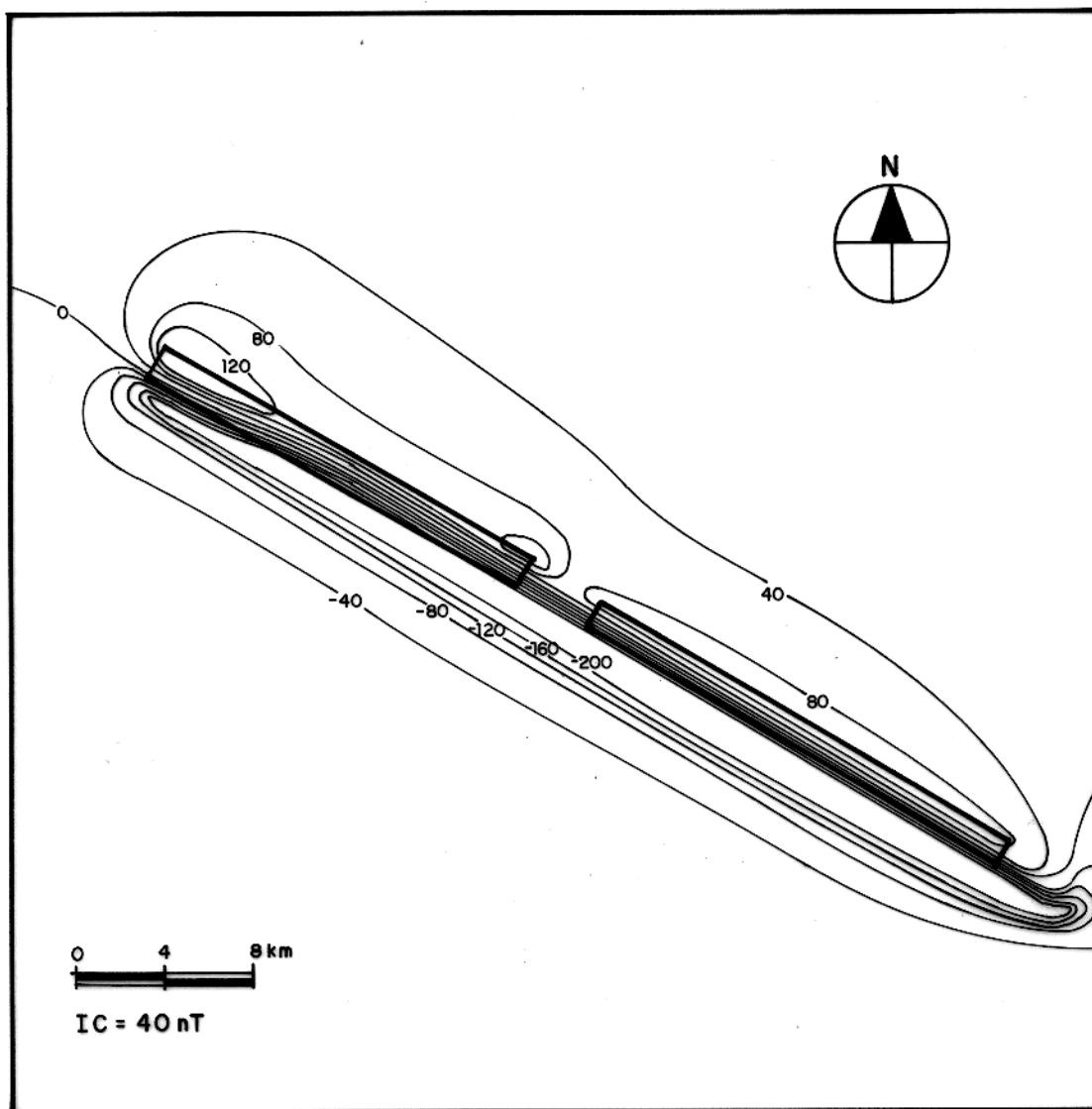


Figura 12 – Anomalia magnética sintética com o alinhamento de duas placas verticais. Os parâmetros utilizados para os corpos são os mesmos relacionados na figura 11.

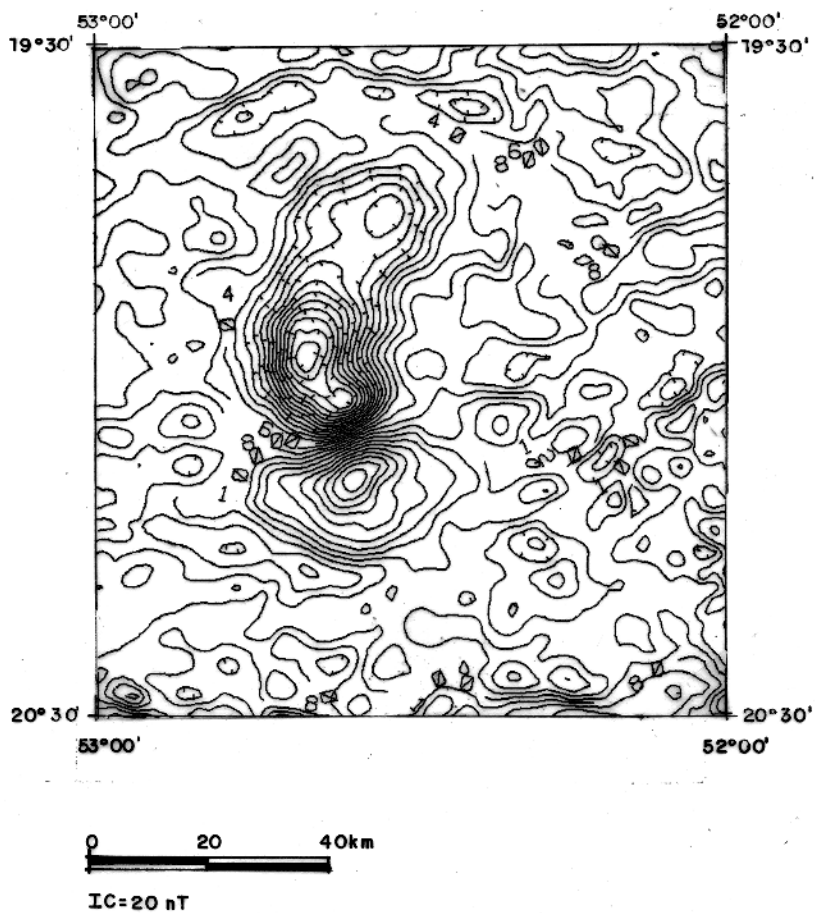


Figura 13 - Mapa de contorno do campo magnético anômalo mostrando o detalhe da anomalia mapeada pelo projeto Arco de Campo Grande.

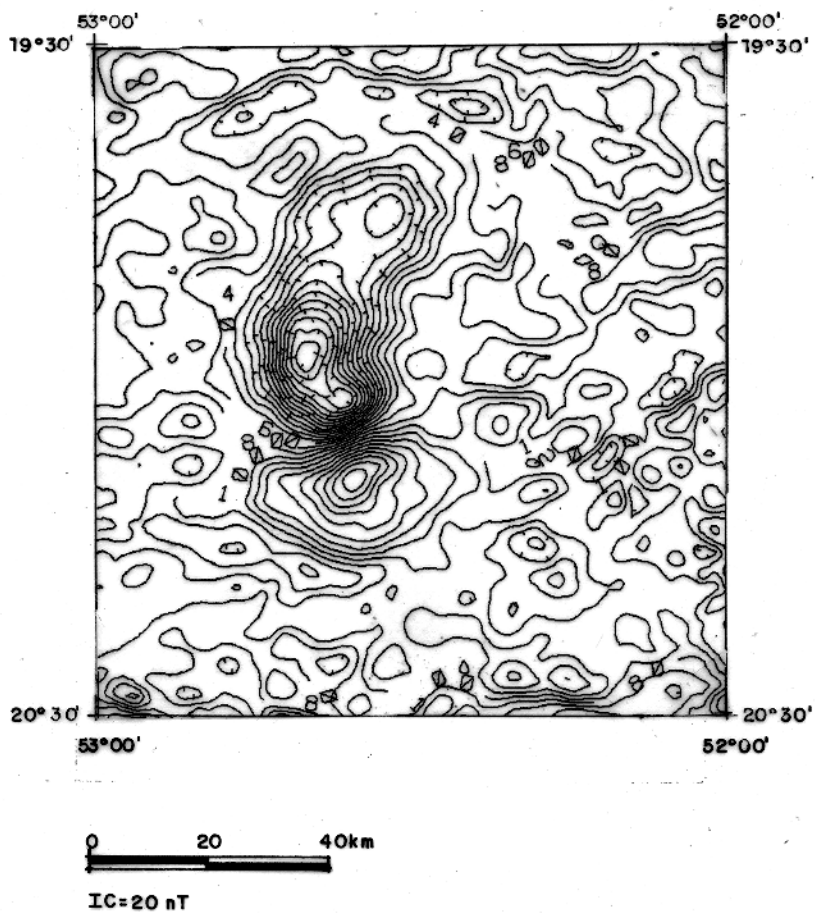


Figura 13 - Mapa de contorno do campo magnético anômalo mostrando o detalhe da anomalia mapeada pelo projeto Arco de Campo Grande.

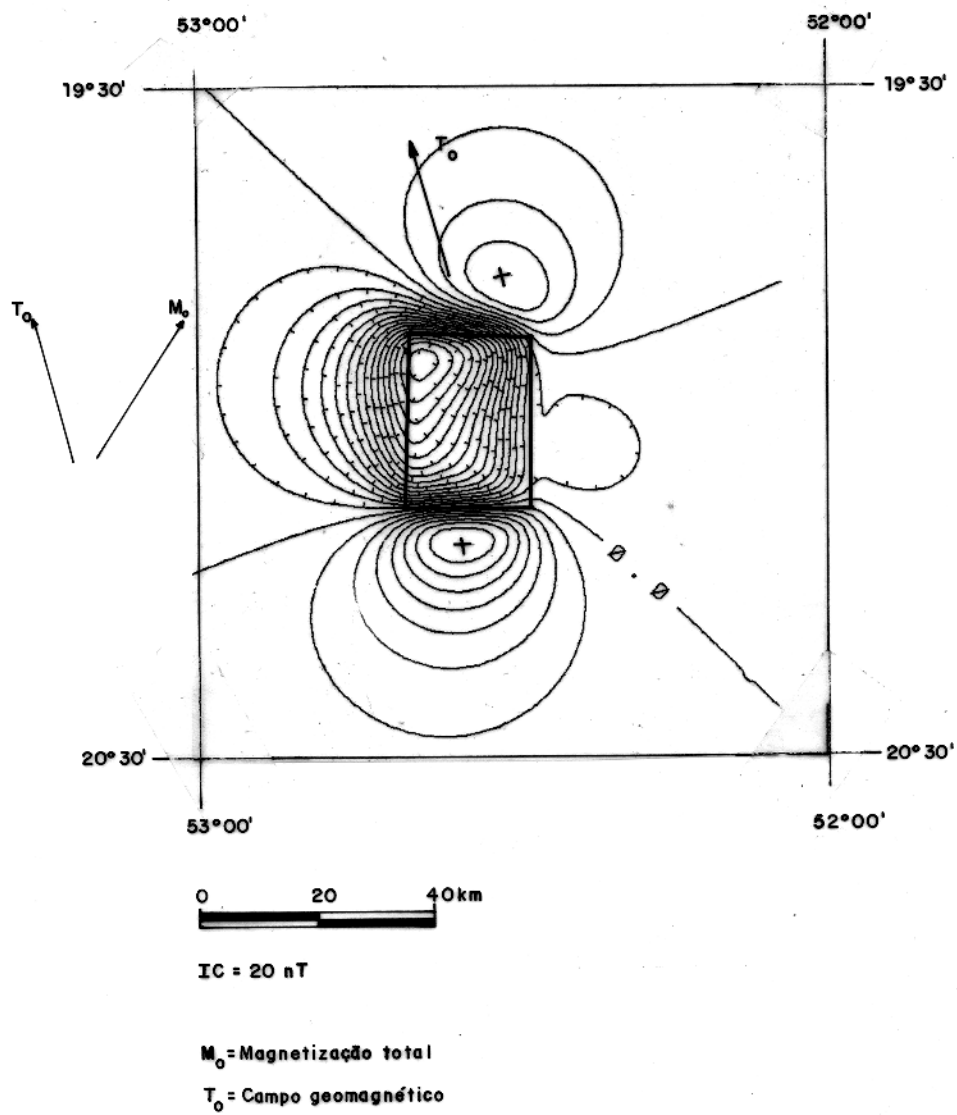


Figura 14 - Anomalia magnética sintética do prisma semi-infinito vertical.

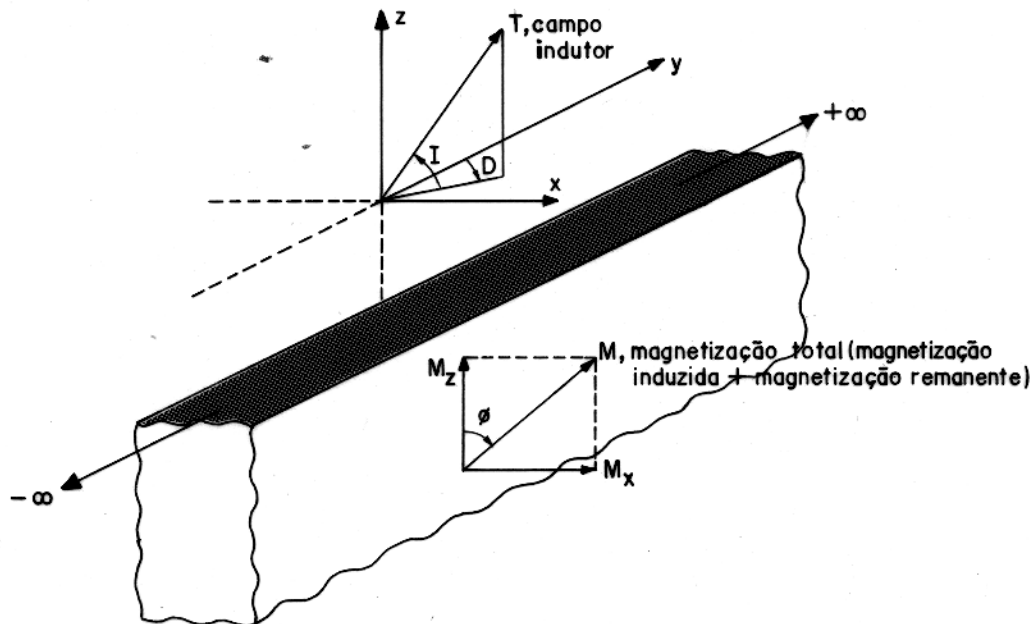


Figura 15 - Geometria dos corpos bidimensionais

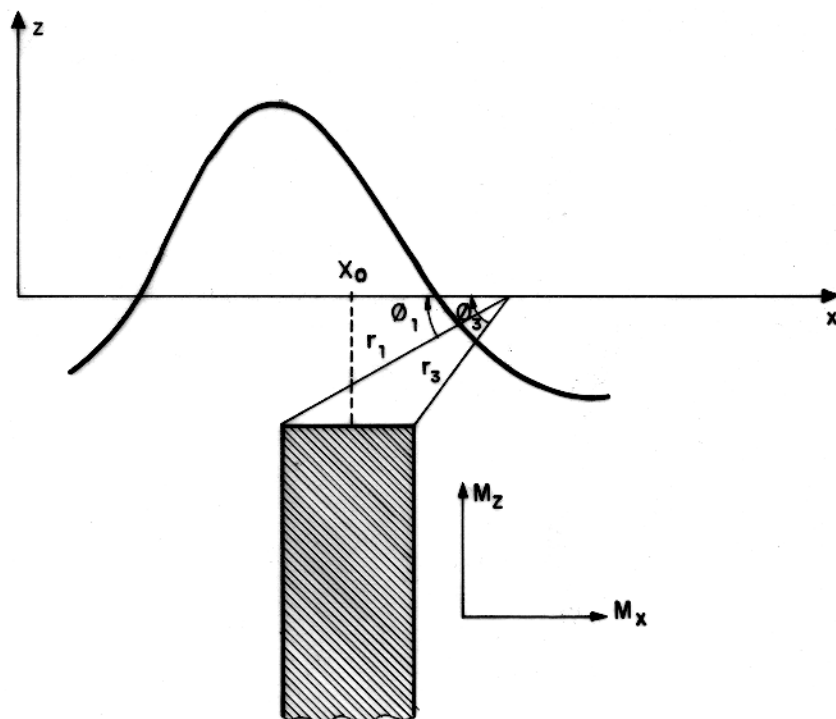
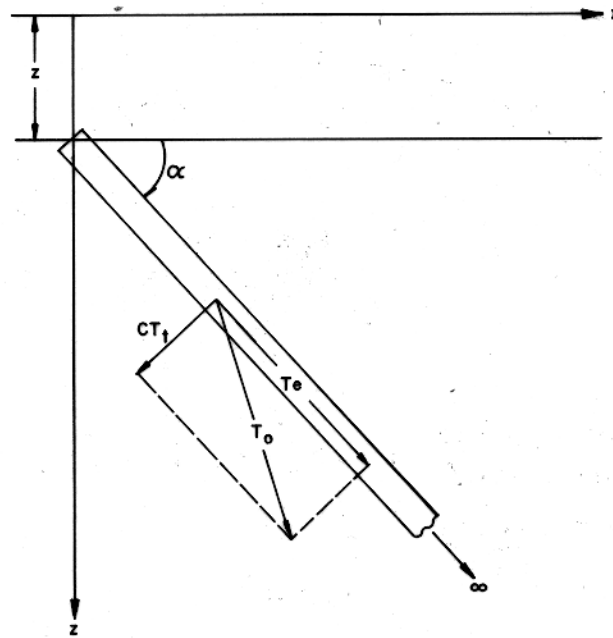


Figura 16 - Ângulos e distâncias para corpos bidimensionais usados no desenvolvimento do método para determinação da inclinação de magnetização.



- z - Profundidade do topo do dique
- α - Ângulo de mergulho do dique
- T_e - Componente longitudinal da intensidade da magnetização
- T_t - Componente transversal da intensidade de magnetização
- C - Constante de redução
- T_o - Componente resultante da intensidade da magnetização

Figura 17 - Componentes da intensidade de magnetização para o dique fino semi-infinito sujeito a desmagnetização (Modificado de Gay, 1963).

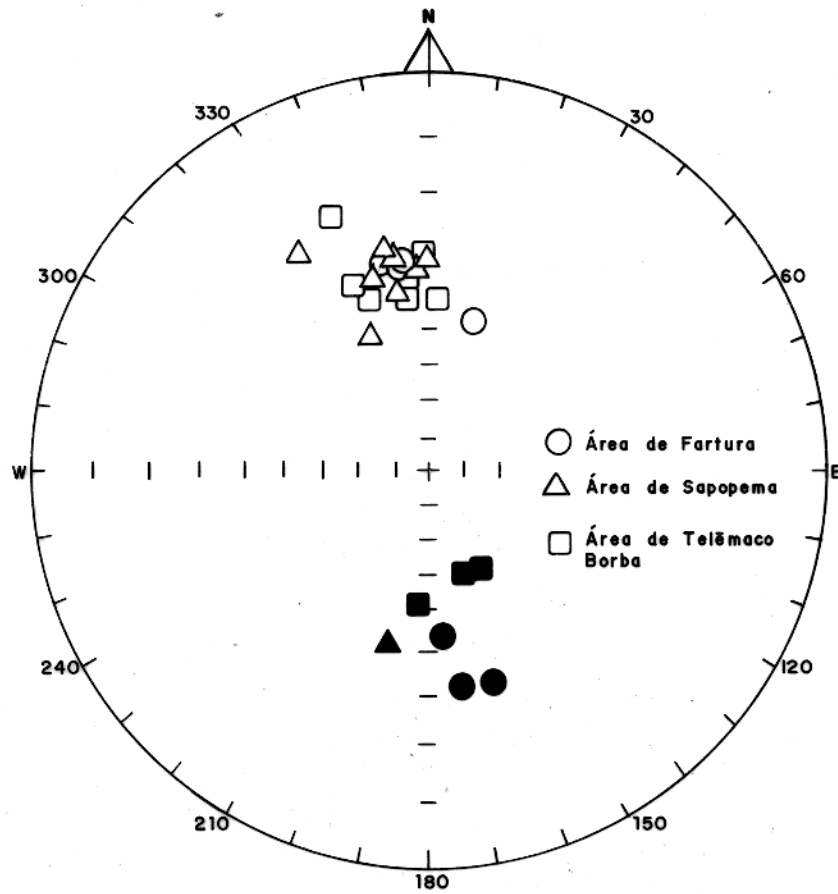


Figura 18 - Direção de magnetização de todos os sítios estudados por Raposo e Ernesto (1989). Os símbolos vazios indicam polaridade normal e os cheios reversa.

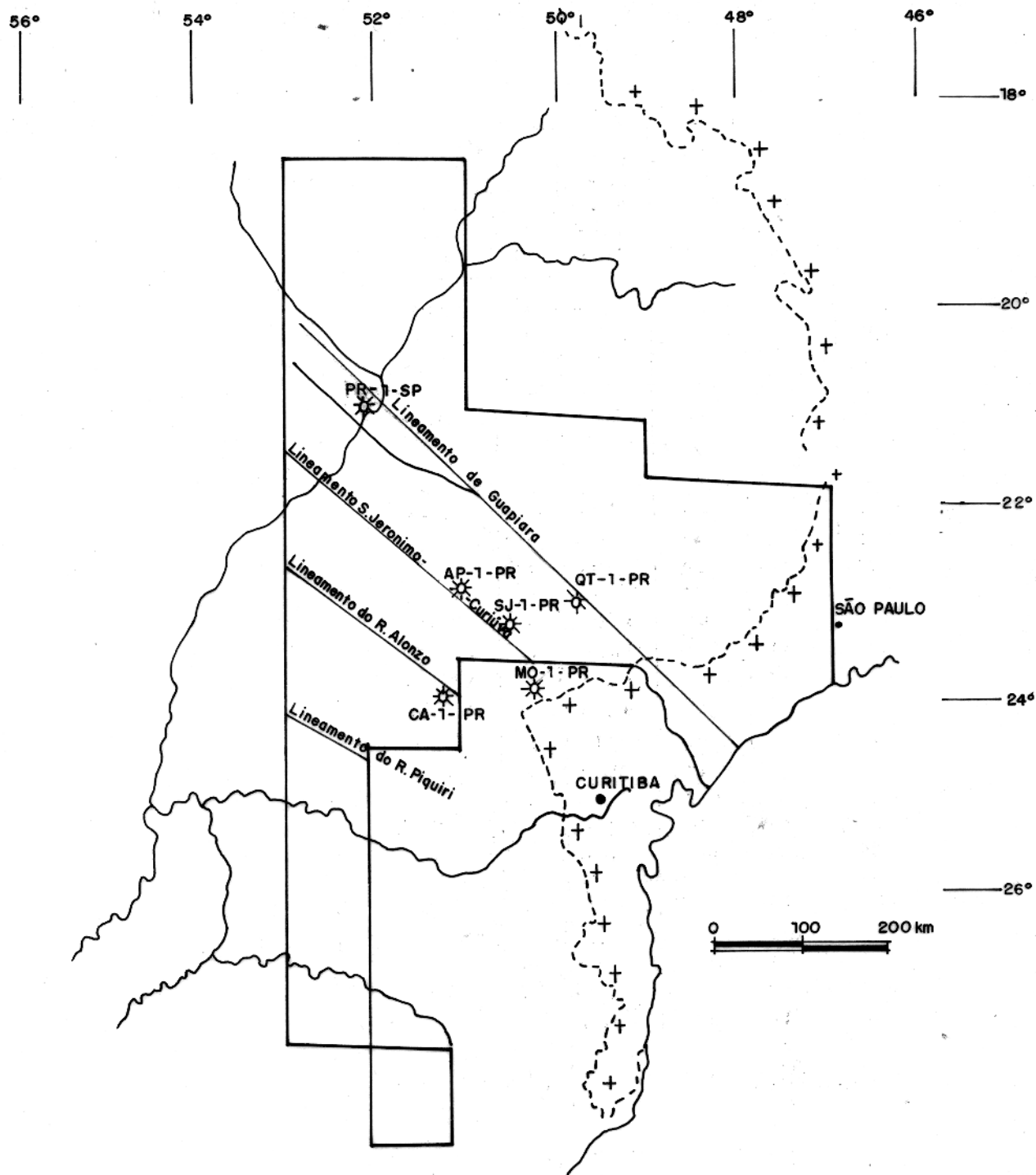


Figura 19 - Localização dos poços utilizados por Schult (1970) para coletar amostras de diabásio e basalto próximo aos grandes lineamentos.

TABELA 2 - A MAGNETIZAÇÃO DE AMOSTRAS COLETADAS PRÓXIMAS AOS GRANDES LINEAMENTOS DA BACIA DO PARANÁ

1 LOCALIZAÇÃO DO POÇO	2 TIPO DE AMOSTRA	3 PROFUNDIDADE (m)	4 N	5 i°	6 J(γ)	7 K.10 ⁴	8 Q
AP-1-PR 23°29'S 51°13'W 823m	1 B	235,5	4	+11,8	200	35	2,4
	2 B	652,5	4	-42,0	270	22	5,3
	3 B	1132,5	7	+14,9	160	29	2,4
	7 D	1633,7	4	-47,7	160	52	1,2
	10 D	2285,2	10	-76,1	140	54	1,1
CA-1-PR 24°32'S 51°28'W 482 m	23 D	1960,2	4	-65,7	230	46	2,1
	32 D	2782,5	1	-41,0	320	60	1,1
MO-1-PR 24°22'S 50°52'W 934 m	21 D	1931,8	1	-42,0	400	26	6,0
PR-1-SP 21°45'S 52°06'W 262 m	1 B	104,0	5	-27,1	610	27	10,0
	1 B	925,0	14	-46,7	850	29	16,0
	3 B	945,0	11	-19,2	810	24	17,0
	4 B	1135,0	4	-59,5	110	25	1,8
	5 B	1237,2	4	+35,4	480	50	4,2
	6 B	1318,9	3	+47,1	270	14	7,7
	7 B	1409,0	3	+16,9	220	13	6,8
	8 B	1475	3	+29,6	80	2,7	18
	9 B	1595	3	+16,2	100	12	3,4
	21 D	2443,5	2	-48,0	220	30	3,1
	23 D	2554,2	2	-70,0	260	47	2,3
29 D	3010,7	2	-61,0	55	1,1	>20	
29 D	3010,7	7	-65,5	40	0,8	>20	
QT-1-PR 23°37'S 49°57'W 530 m	9 D	1384,6	2	-51,0	700	31	8,9
SJ-1-PR 23°17'S 50°39'W 1047 m	1 D	115,8	11	-42,4	270	38	4,1
	9 D	826,6	2	-43,0	20	24	0,4

FONTE: Schult, 1970

Coluna 1 = Nome do poço, sua localização e altitude;

Coluna 2 = Número das amostras (a letra B indica que a amostra é de basalto e D de diabásio);

Coluna 3 = Profundidade amostrada;

Coluna 4 = Número de amostras medidas;

Coluna 5 = Inclinação média da magnetização remanente (o sinal negativo significa magnetização normal, o sinal positivo significa magnetização reversa);

Coluna 6 = Intensidade de magnetização remanente J_r em γ

Coluna 7 = Susceptibilidade K;

Coluna 8 = Razão Q (magnetização remanente dividido pela magnetização induzida para um campo indutor de 0,25 a Oe).

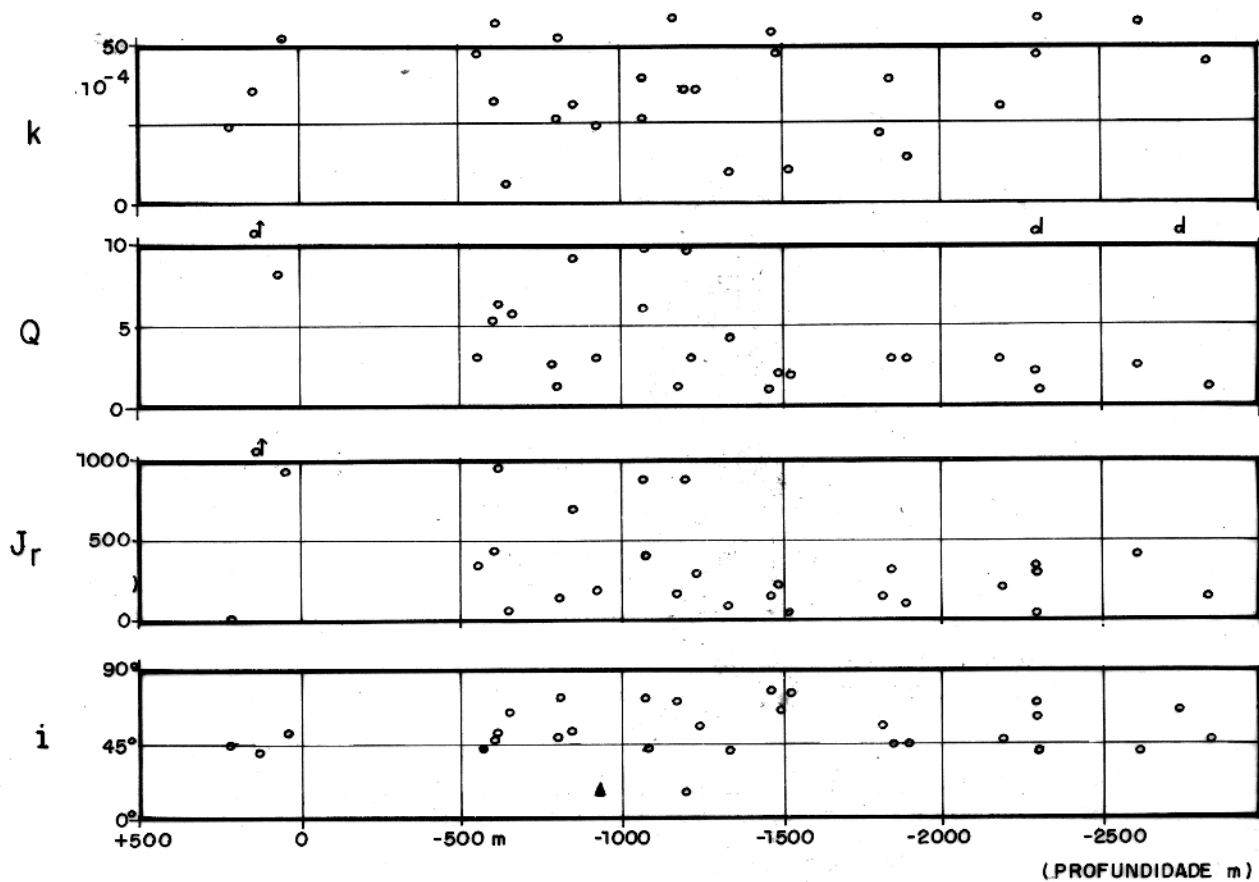


Figura 20 – Representação esquemática dos resultados obtidos para amostras de diabásio da Bacia do Paraná. O significado dos símbolos para a indução é:

- O = Amostra com magnetização normal
 - = Amostra com magnetização inversa
 - Δ = A orientação da magnetização é indeterminada,
 - k é a susceptibilidade,
 - Q é a razão de Königsberger,
 - J_r é a intensidade de magnetização remanente,
 - i é a inclinação média da magnetização remanente
- (Modificado de Schult, 1970)

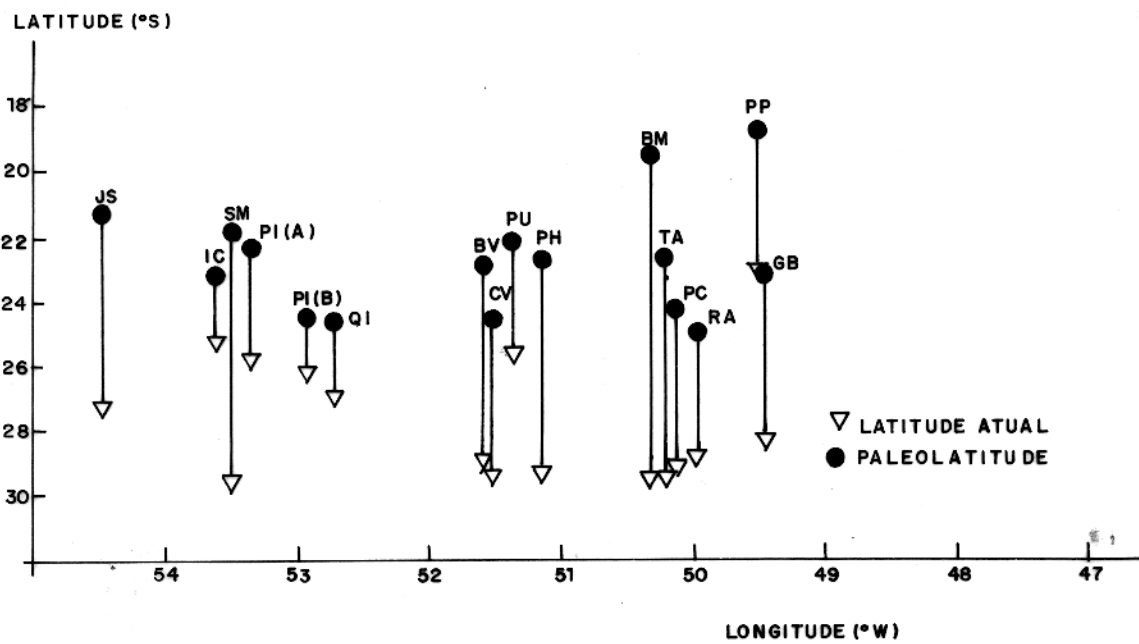


Figura 21 - Latitudes atuais e paleoláticas ocupadas pelos sítios de amostragem segundo Ernesto (1985). Sendo que JS, IC, SM, PI, QI, BV, CV, PU, PH, BM, TA, PC, RA, PP e GB correspondem às siglas dos locais de amostragem.

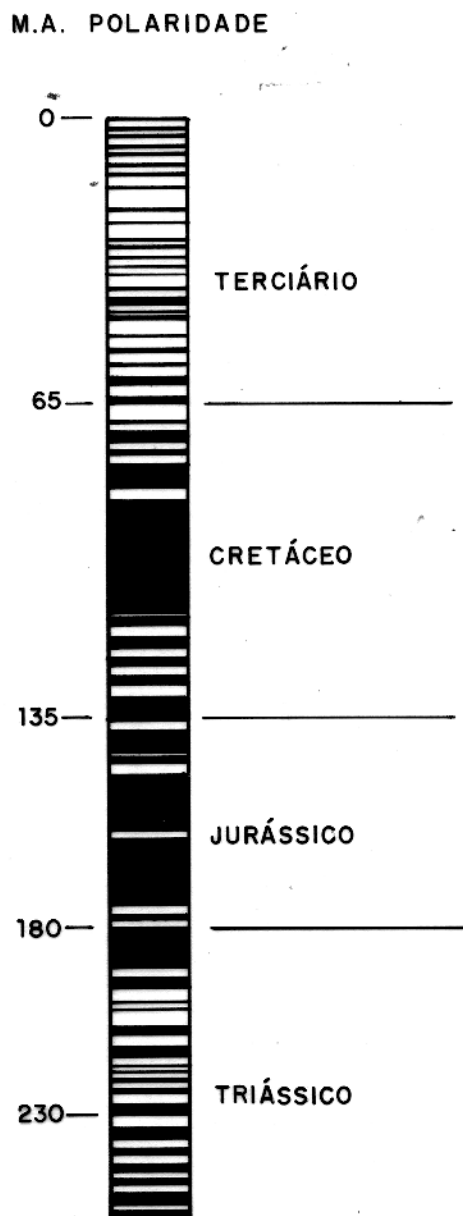


Figura 22 — Medida da polaridade do campo magnético terrestre para os últimos 250 milhões de anos. Os períodos sombreados são intervalos de polaridade predominantemente reverso. (Bucha, 1979).

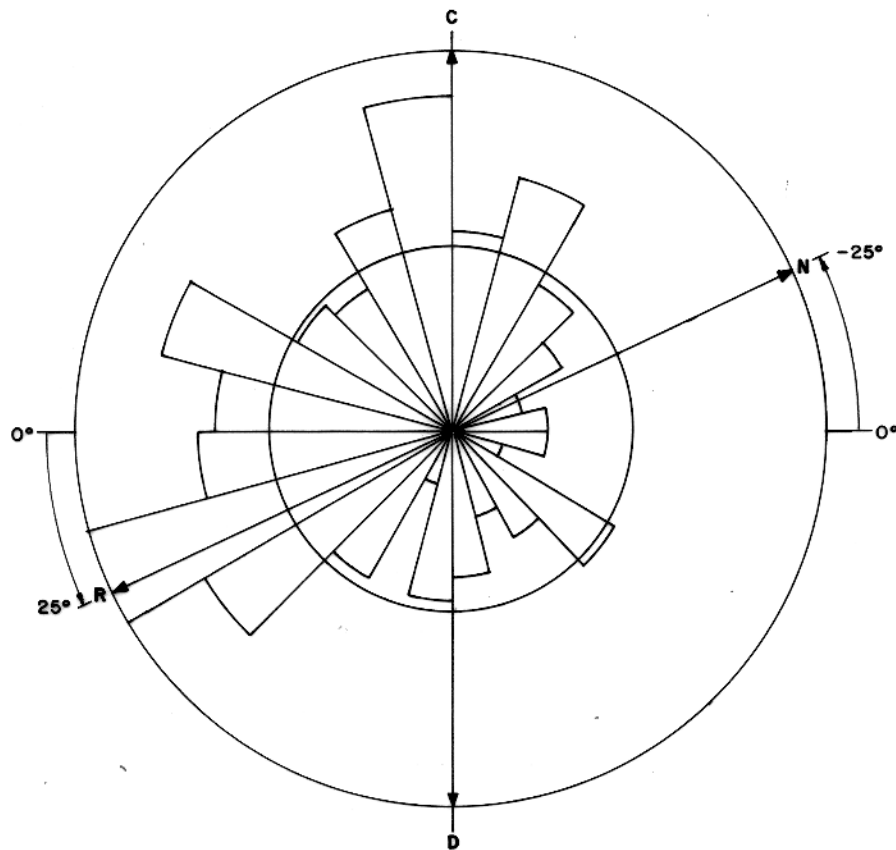


Figura 23— Diagrama de roseta das inclinações de magnetização do lineamento de Guapiara. N = magnetização com polarização normal, R = magnetização com polarização inversa, C = magnetização vertical positiva, D = magnetização vertical negativa. O raio do círculo central representa 4% do resultado final.

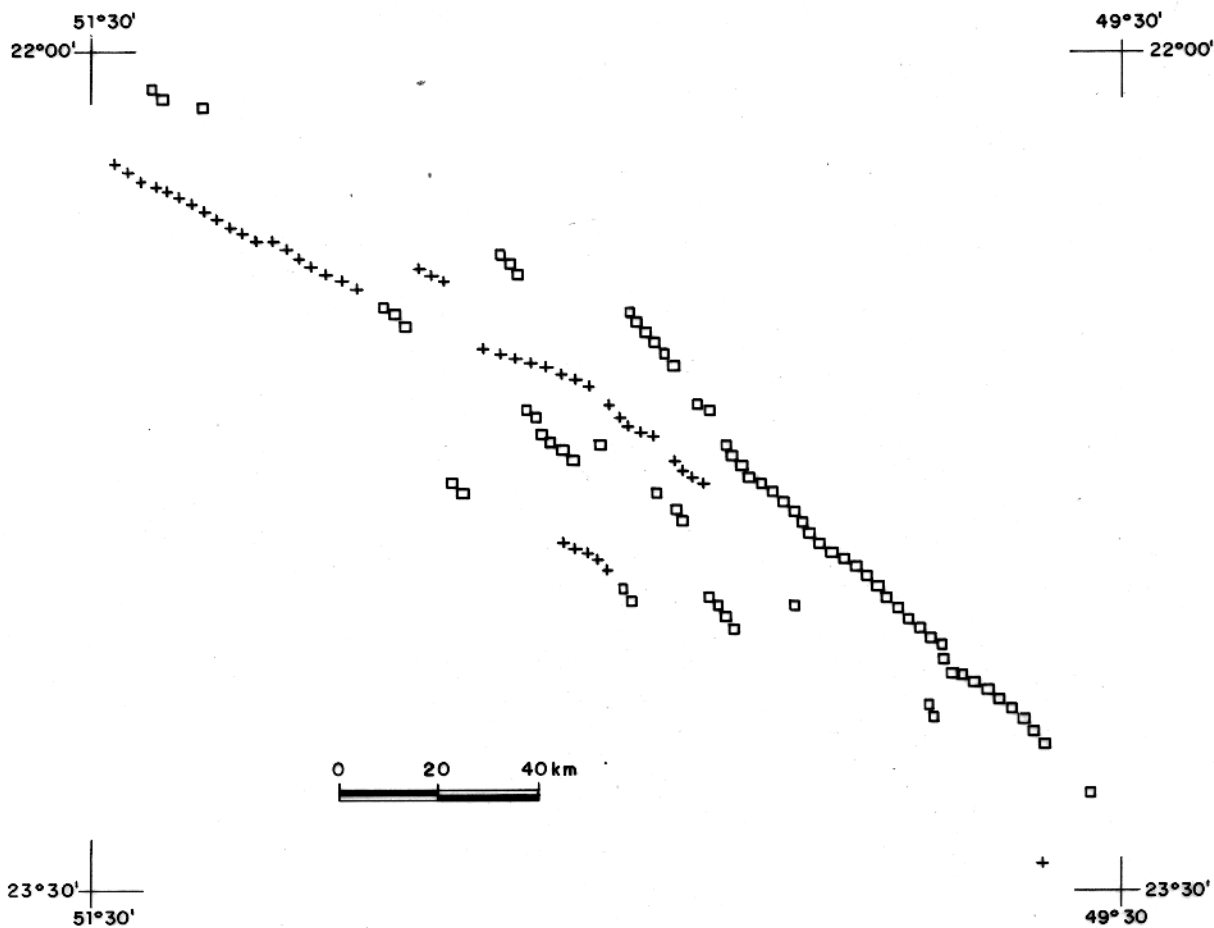


Figura 24 - Distribuição em mapa da inclinação de magnetização ao longo do lineamento de Guapiara. (Veja a figura 25).

Legenda: □ = Magnetização vertical positiva.
 + = Magnetização com polaridade inversa.

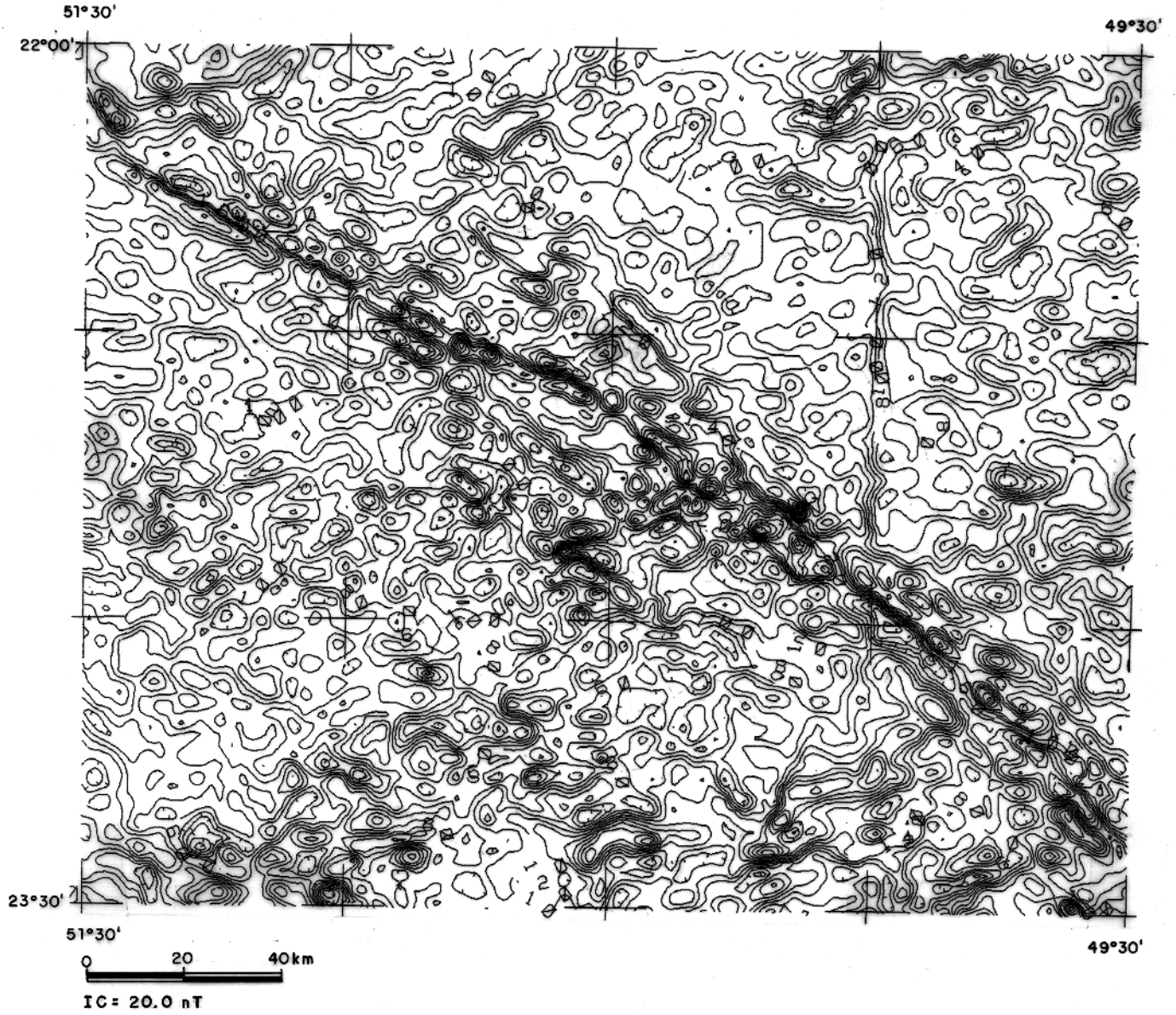


Figura 25 – Mapa de contorno do campo magnético, mostrando em detalhe parte do lineamento de Guapiara.

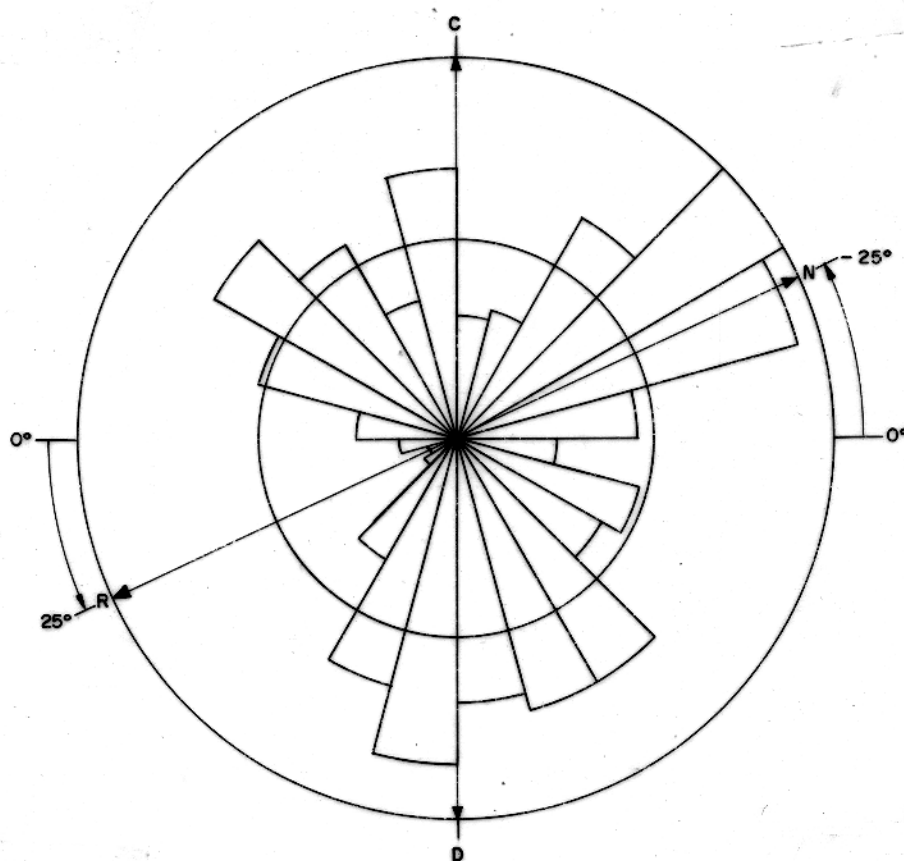


Figura 26 - Diagrama de roseta das inclinações de magnetização dos lineamentos do Rio Alonzo e São Jerônimo-Curiúva. N= magnetização com polarização normal; R= magnetização com polarização inversa; C= magnetização vertical positiva ; D= magnetização vertical negativa. O raio do círculo central representa 4% do resultado final.

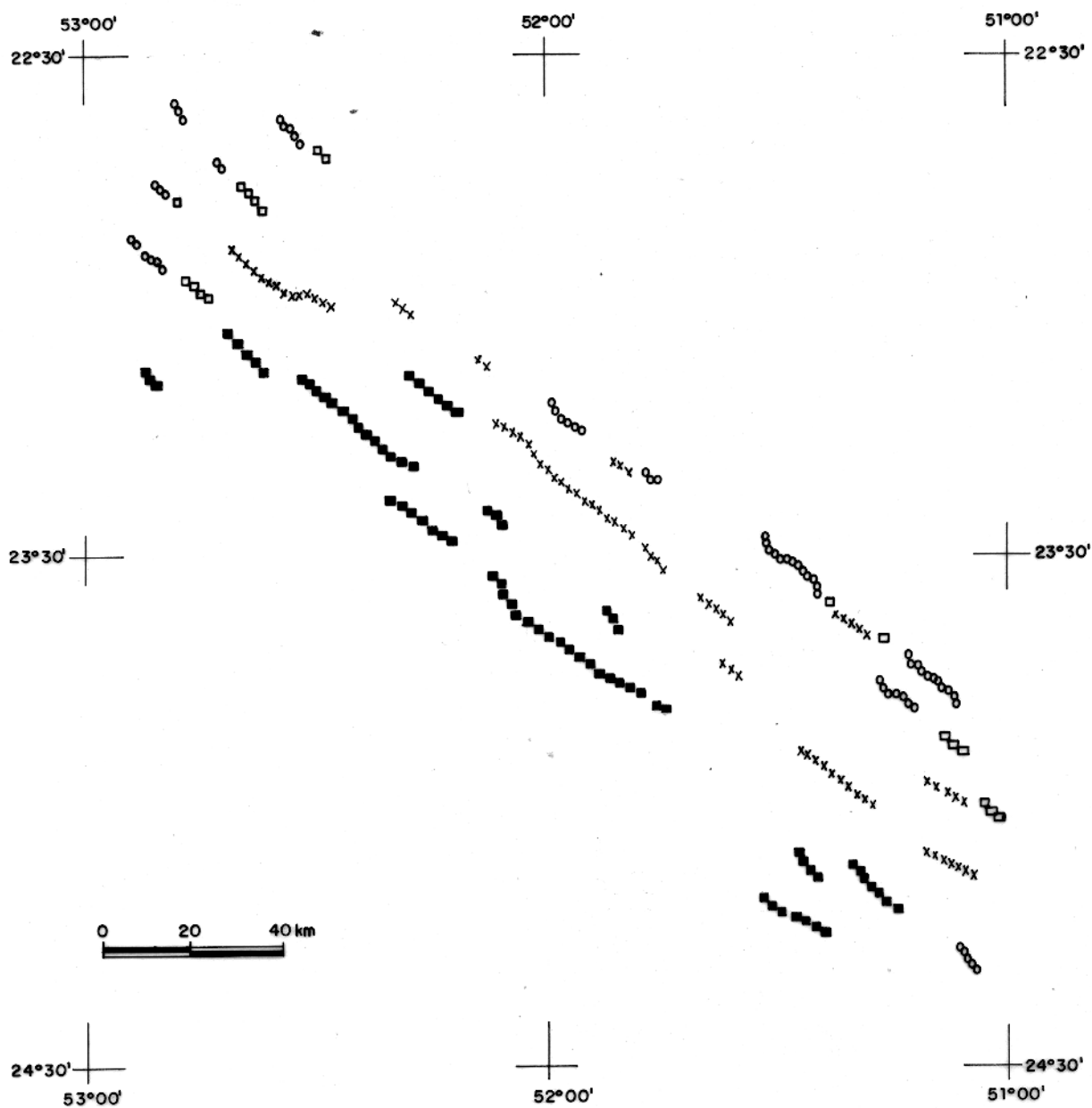


Figura 27 - Distribuição em mapa da inclinação de magnetização, ao longo dos lineamentos de São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonzo. (Veja a fig. 8).

Legenda: □ = Magnetização vertical positiva
 ■ = Magnetização vertical negativa
 X = Magnetização mista
 ○ = Magnetização com polaridade normal.

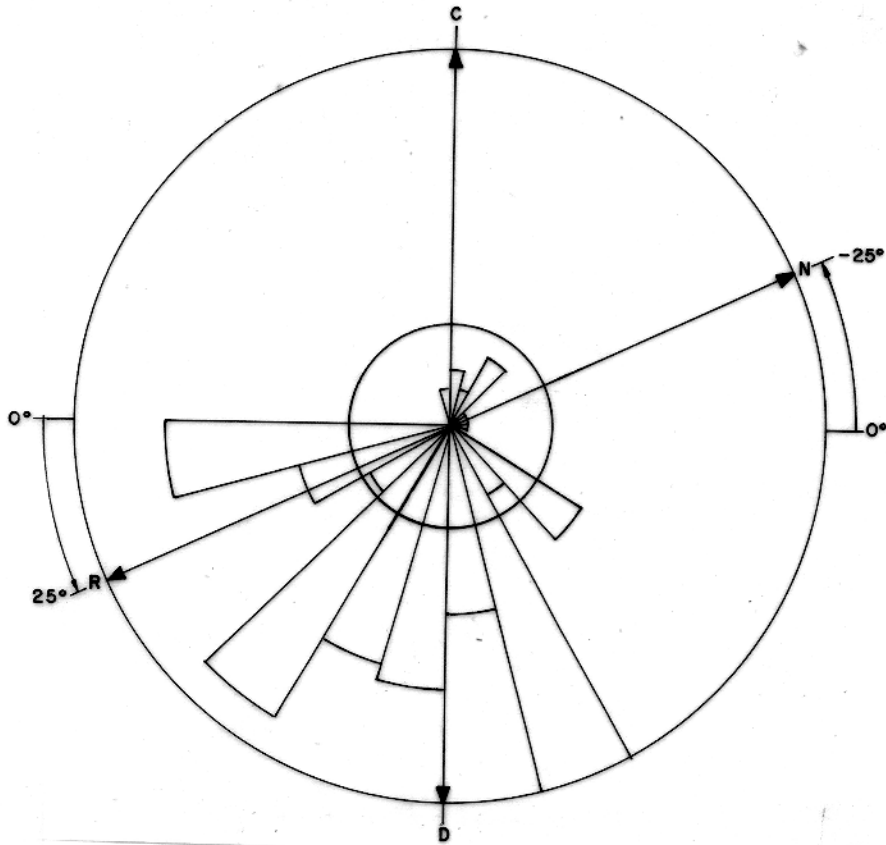
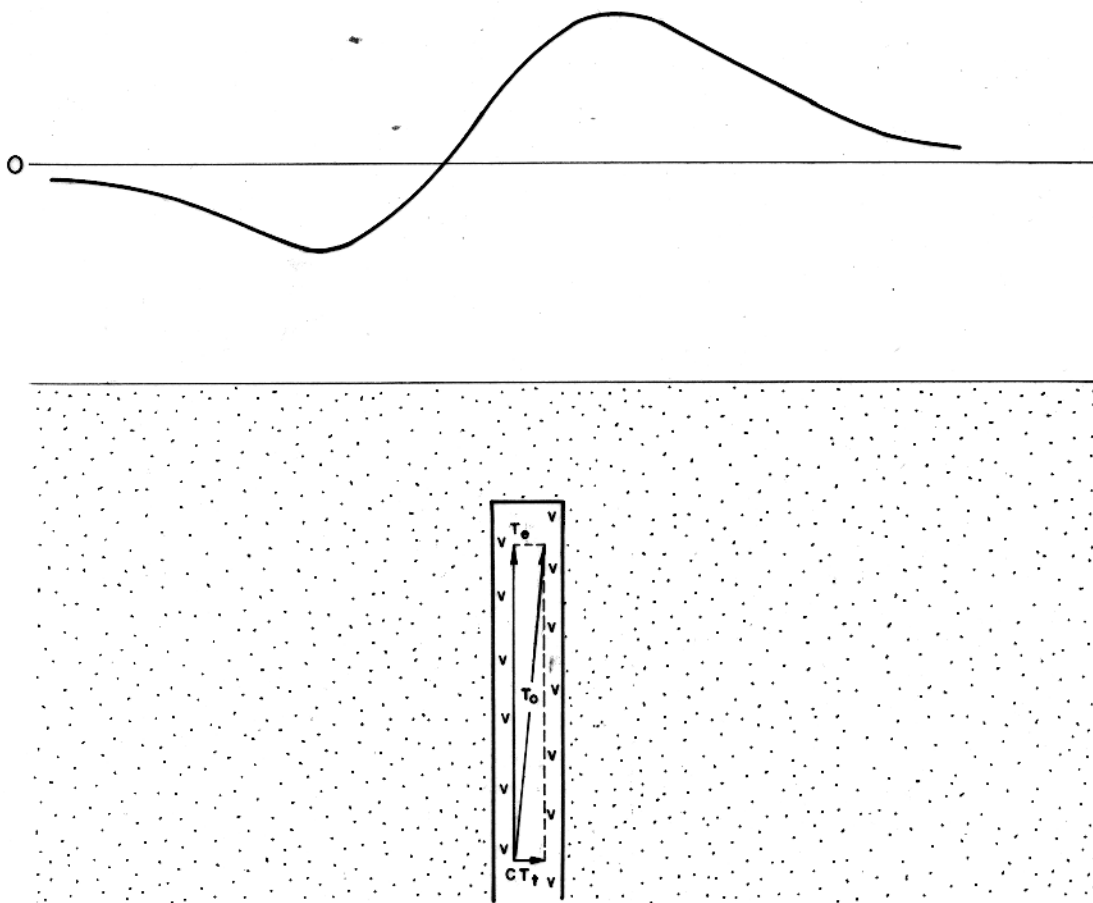


Figura 28 — Diagrama de roseta das inclinações de magnetização do lineamento do Rio Piquiri. N= magnetização com polarização normal; R= magnetização com polarização reversa; C = magnetização vertical positivo ; D = magnetização vertical negativo. O raio do círculo central representa 4% do resultado final.



LEGENDA

 Intrusão diabásica (> 5% Magnetita)


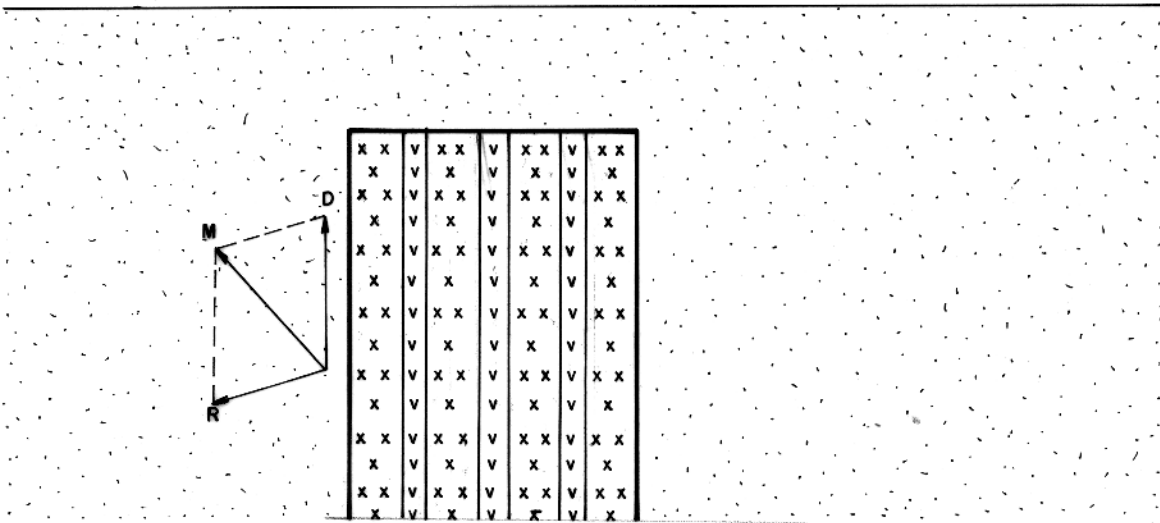
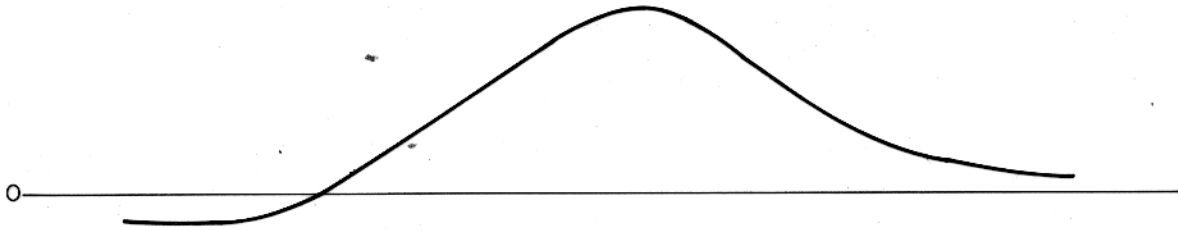
 Sedimentos

Figura 29 — Efeito da desmagnetização na intrusão, com inclinação de magnetização normal, resultando na magnetização próxima a vertical, onde:

- T_e = Componente longitudinal da magnetização
- T_t = Componente transversal da magnetização
- T_o = Componente resultante para a magnetização
- C = Constante de redução da magnetização.



LEGENDA




-  Intrusão diabásica primária
-  Intrusão diabásica secundária (> 5% Magnetita)
-  Sedimentos

Figura 30 — Modelo hipotético para a inclinação da magnetização resultante.
 D = magnetização vertical positivo, devido a desmagnetização; R = magnetização com polaridade inversa da intrusão hospedeira; M = magnetização mista.



Figura 31 – Localização da Bacia do Paraná no Brasil.

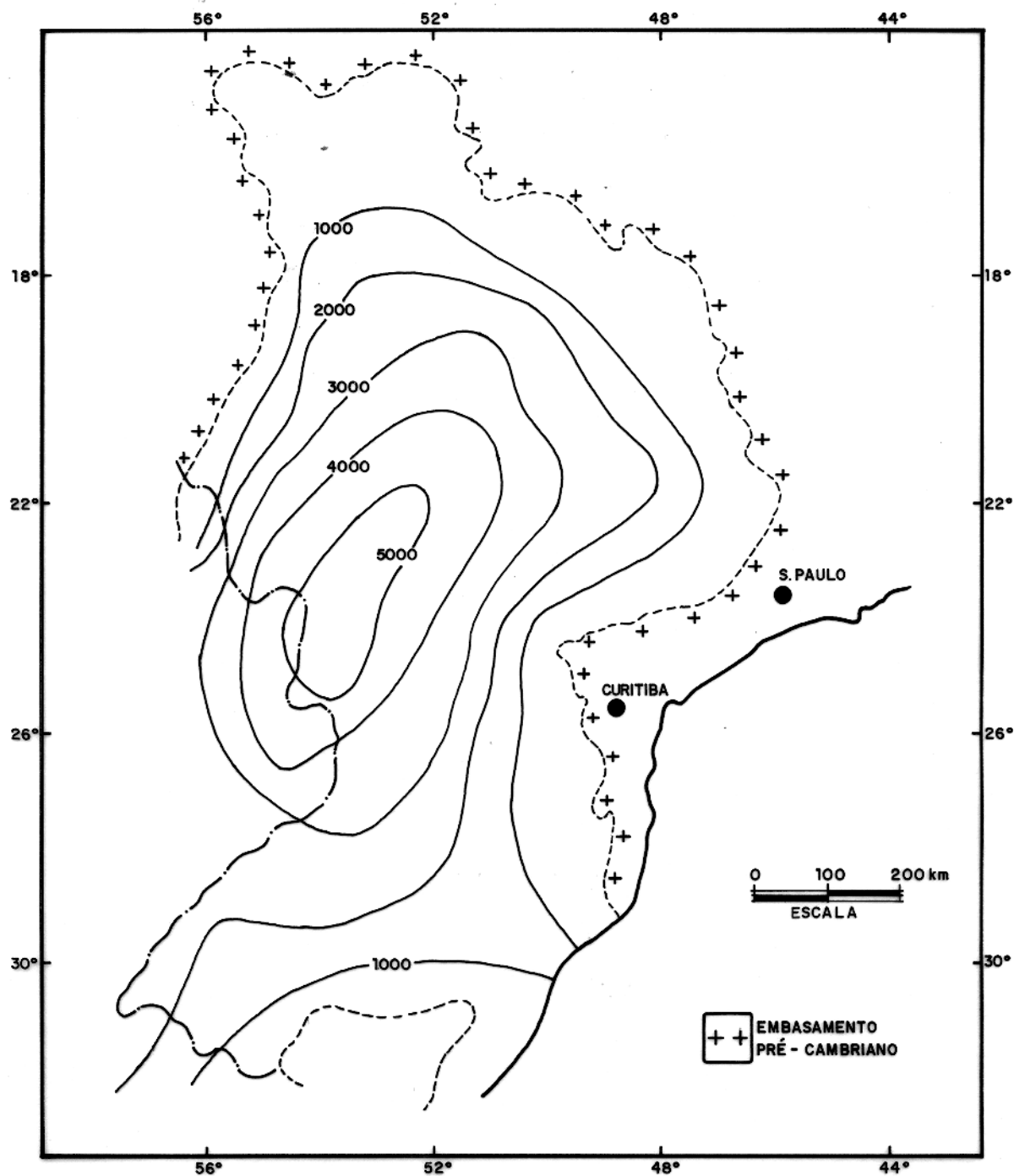


Figura 32 - Mapa da profundidade do embasamento. Contorno em metros. (Modificado de Molina et al., 1989).

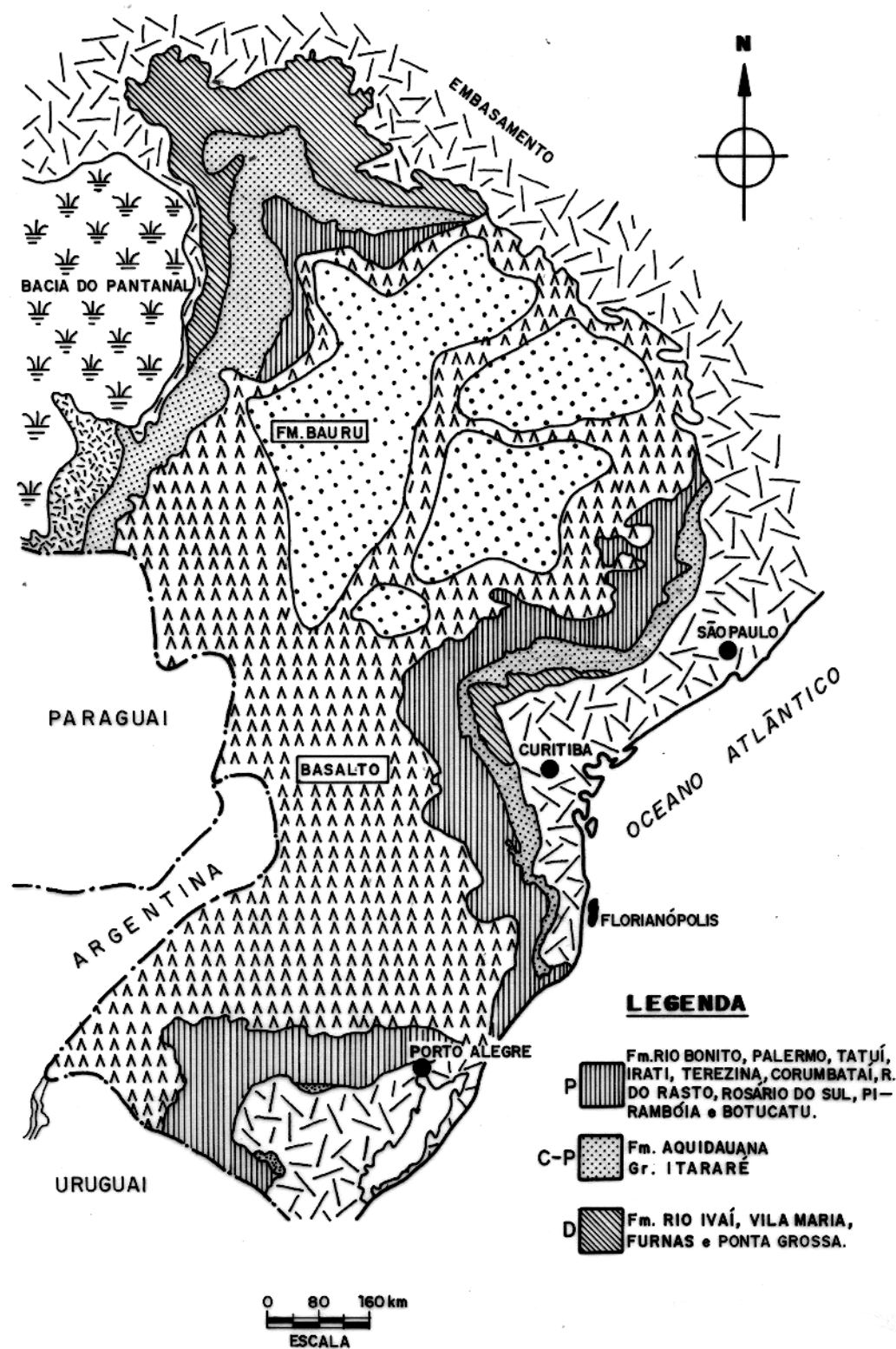


Figura 34—Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná.
(Modificado de França e Potter, 1984)

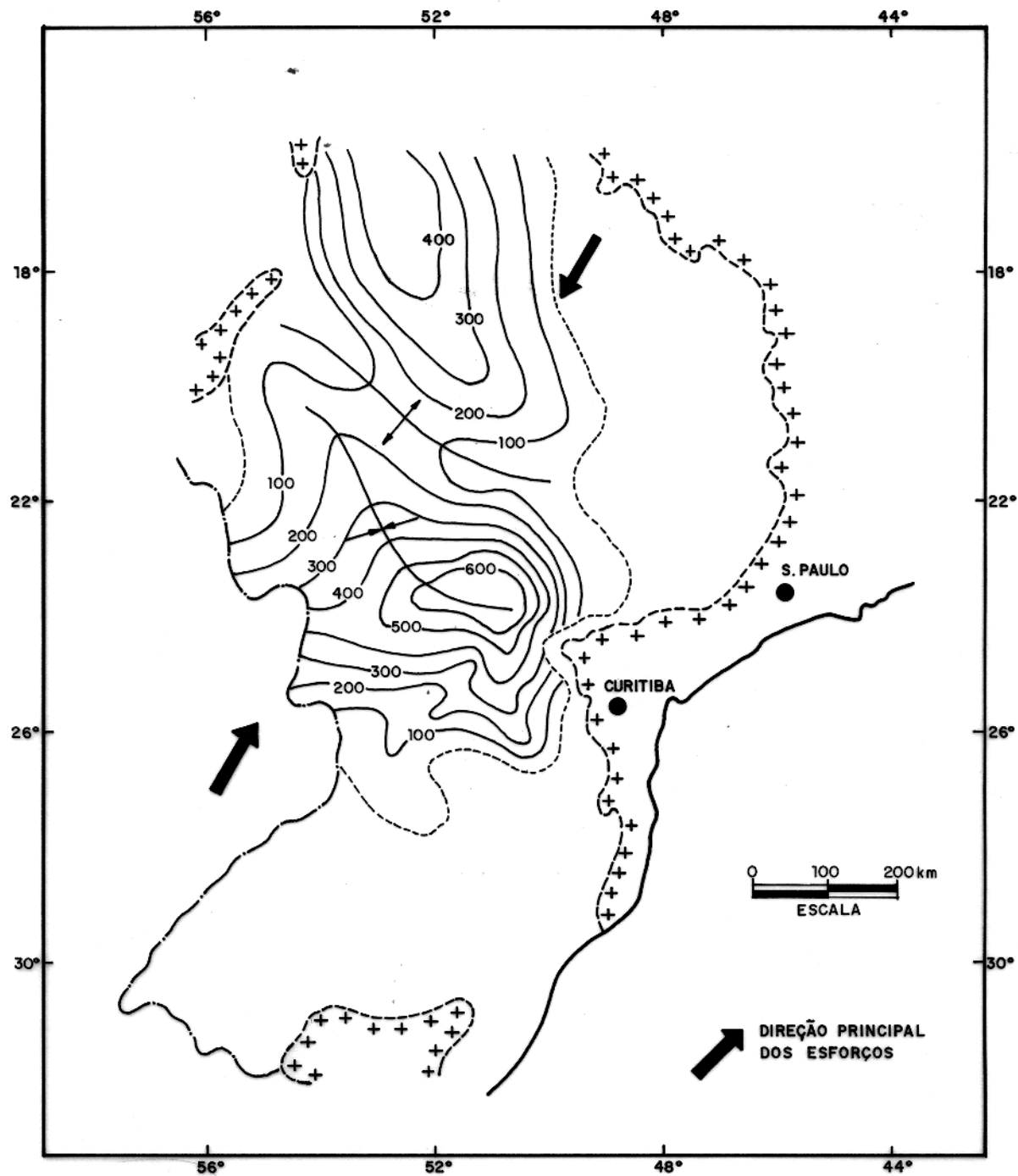


Figura 35 — Isópacas da Formação Ponta Grossa. Contorno em metros.
(Modificado de Bacocoli e Aranha, 1984).

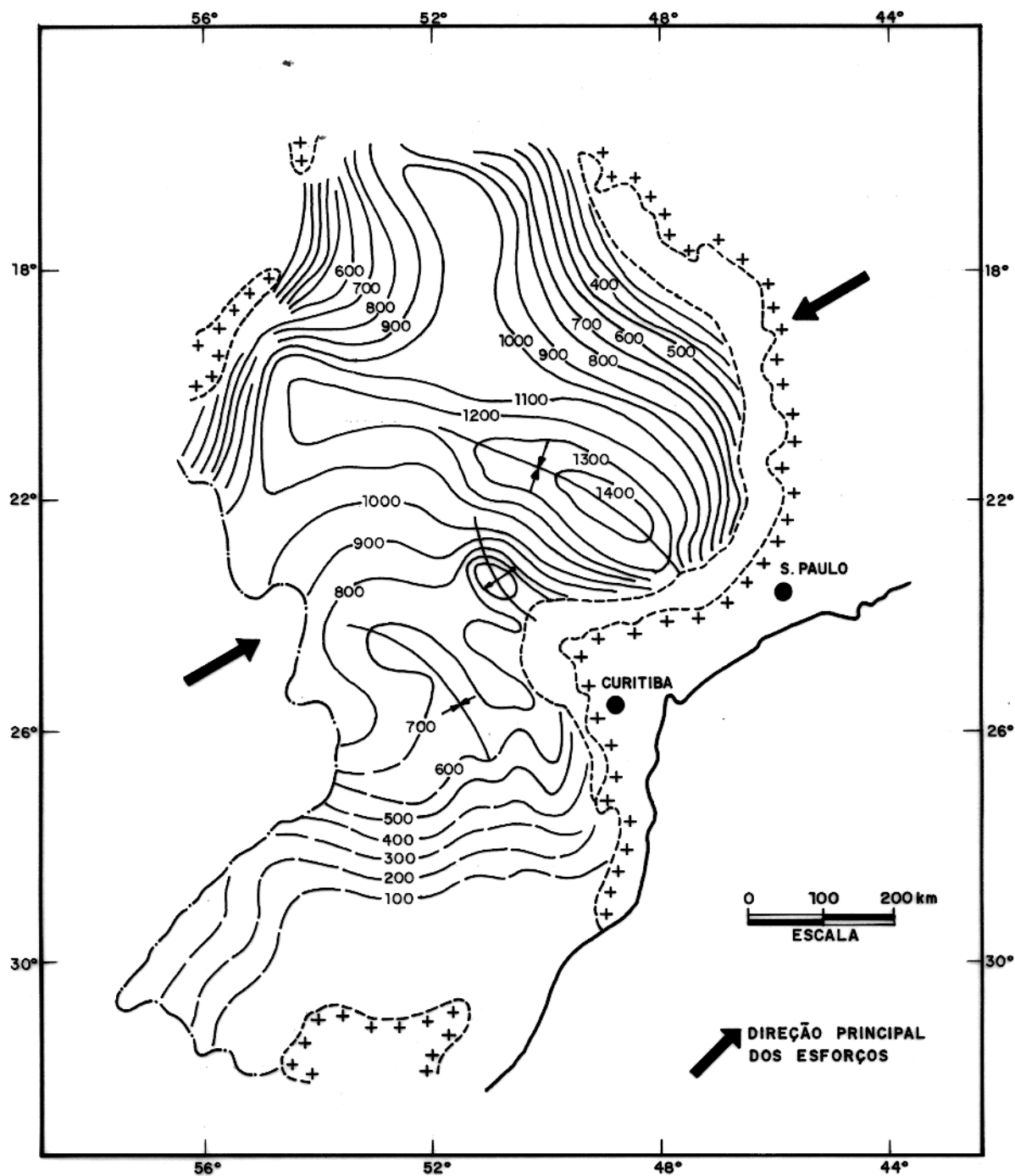


Figura 36—Isópachas das formações Itararé- Aquidauana. Contorno em metros.
(Modificado de Bacoccoli e Aranha, 1984).

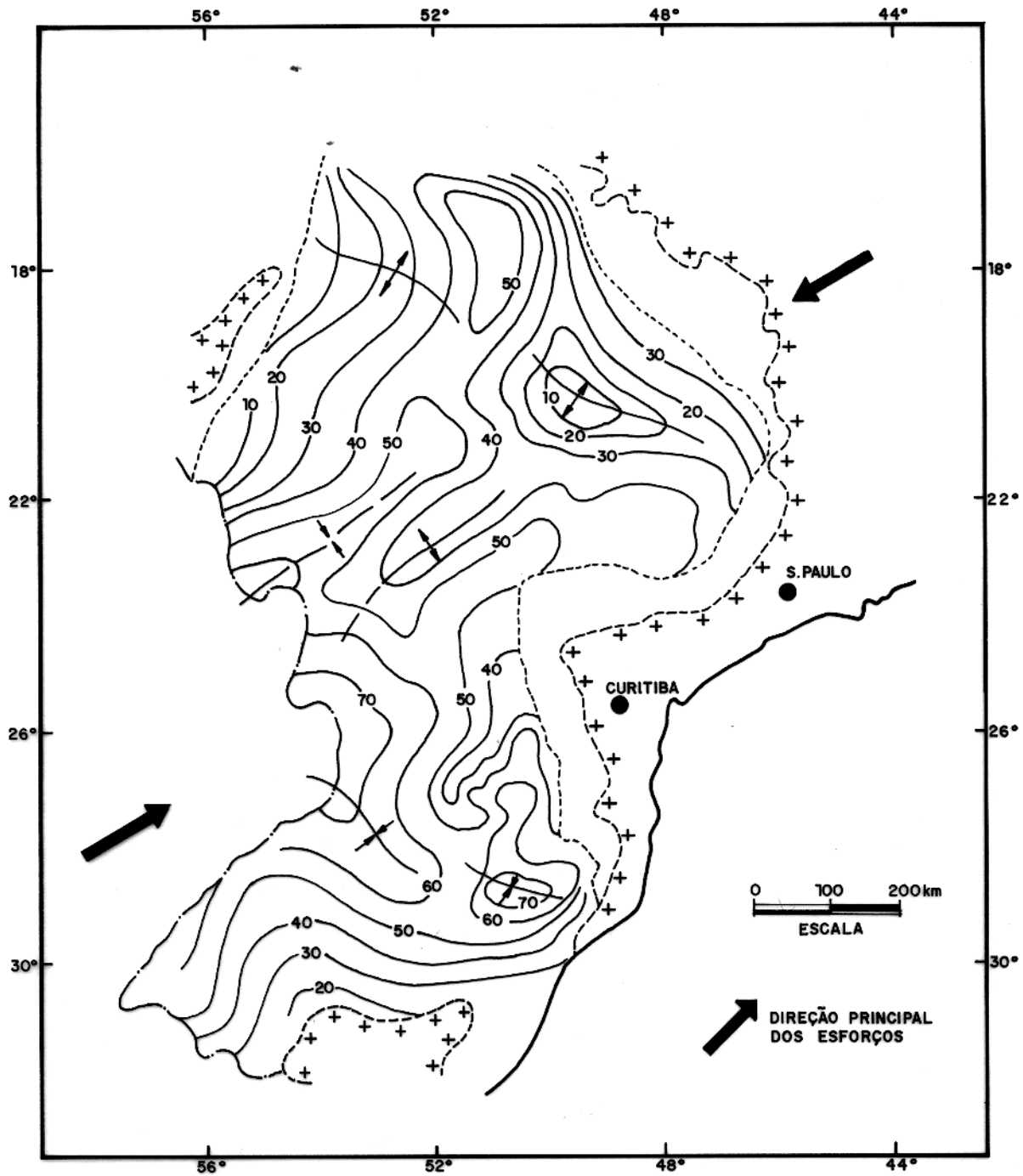


Figura 37 — Isópacas da Formação Irati: Contorno em metros.
(Modificado de Bacoccoli e Aranha, 1984).

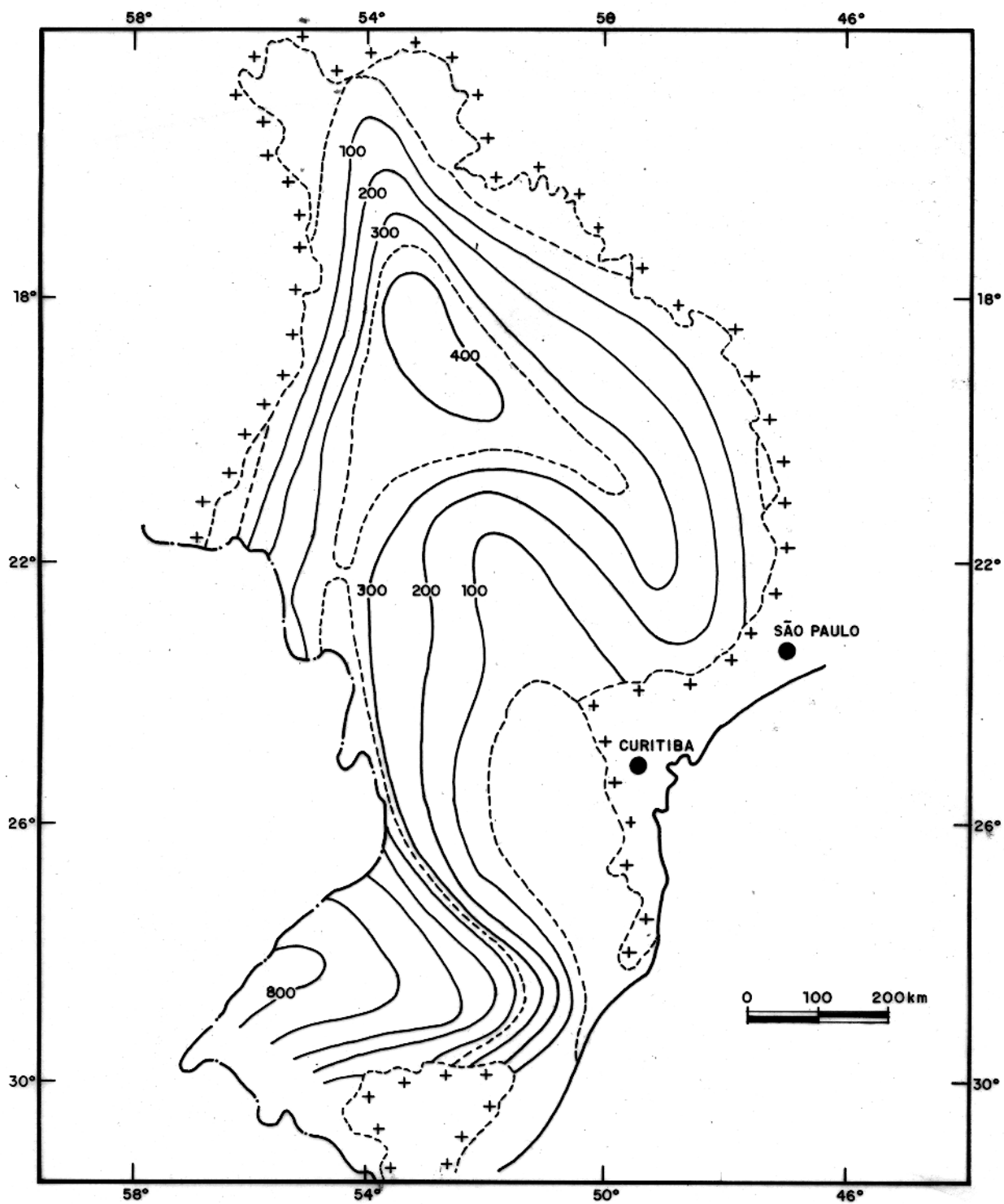


Figura 38 — Isópachas da Formação Pirambóia e Grupo Rosário do Sul. Contorno em metros. (Modificado de Ferreira, 1982).

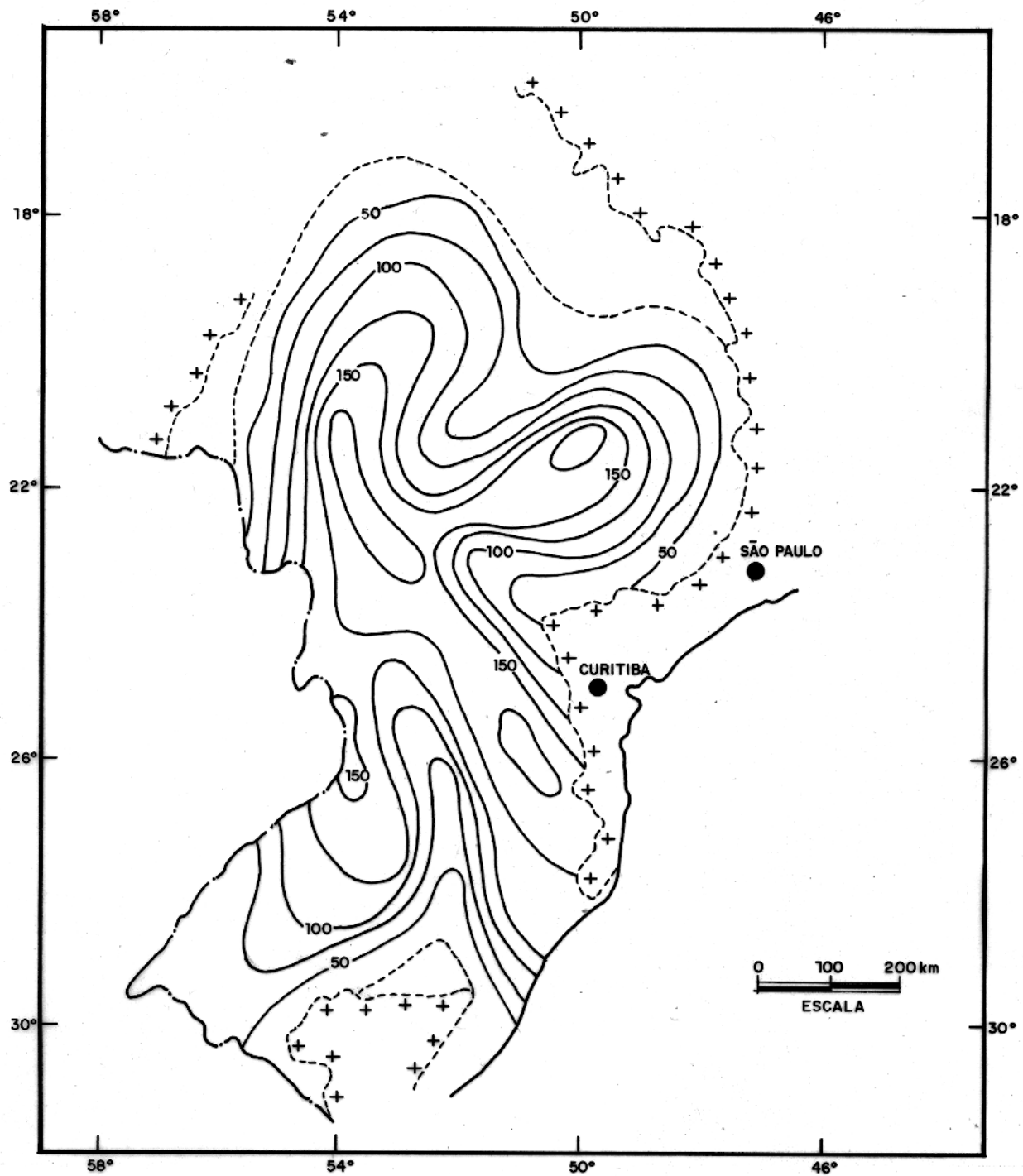


Figura 39 — Isópachas da Formação Botucatu. Contorno em metros.
(Modificado de Ferreira, 1982)

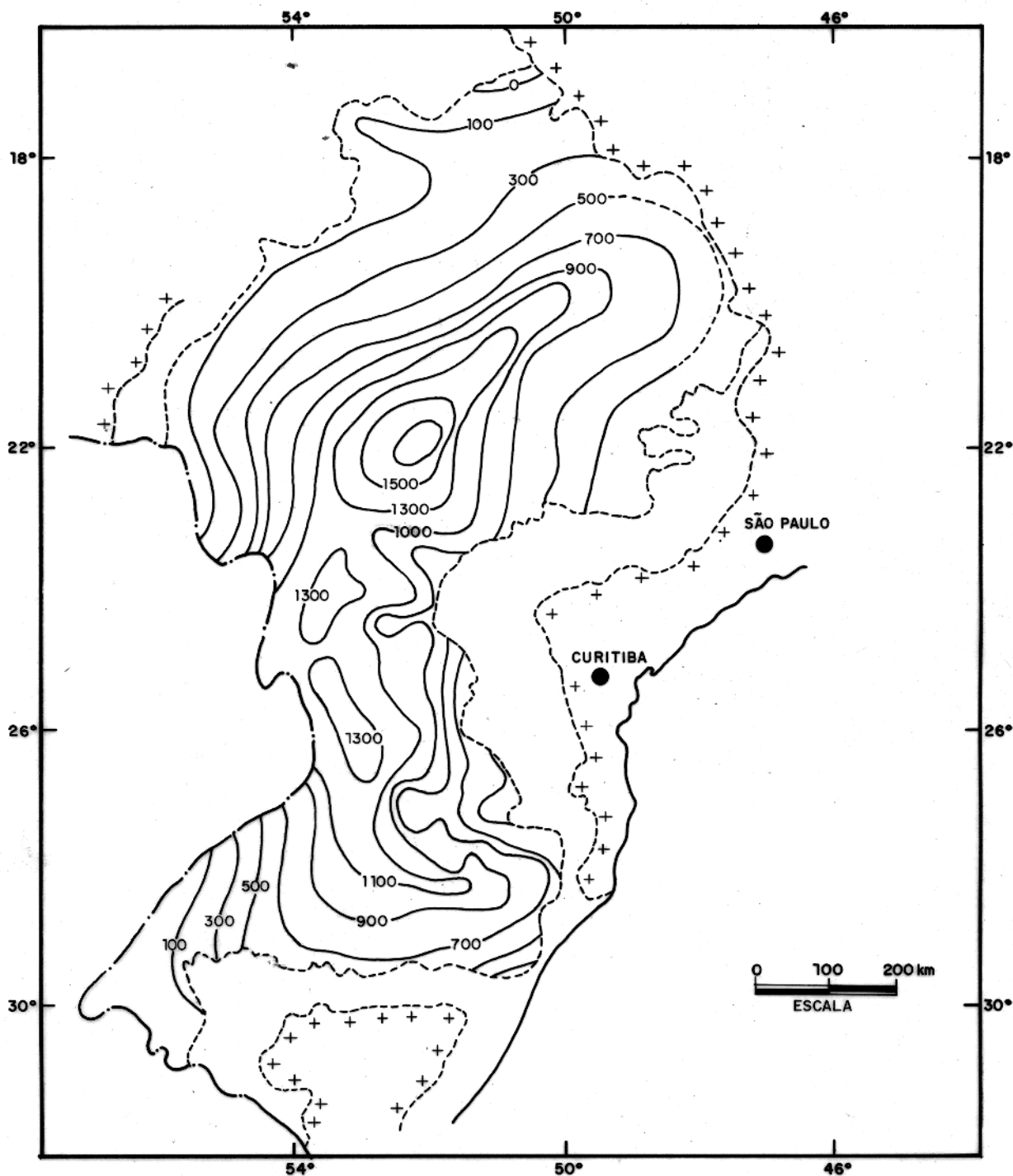


Figura 40—Isópacas da Formação Serra Geral. Contorno em metros.
(Modificado de Ferreira, 1982)

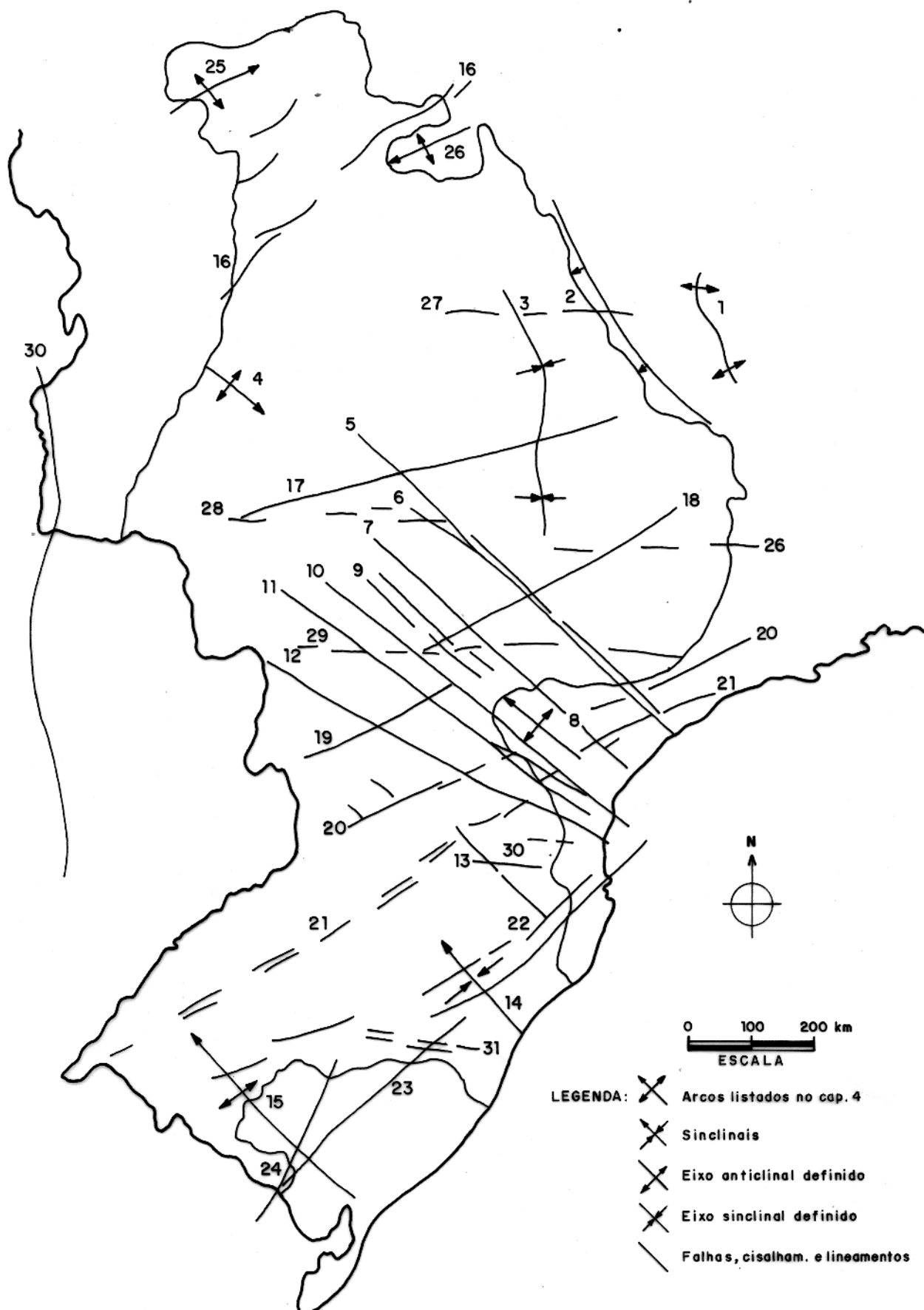
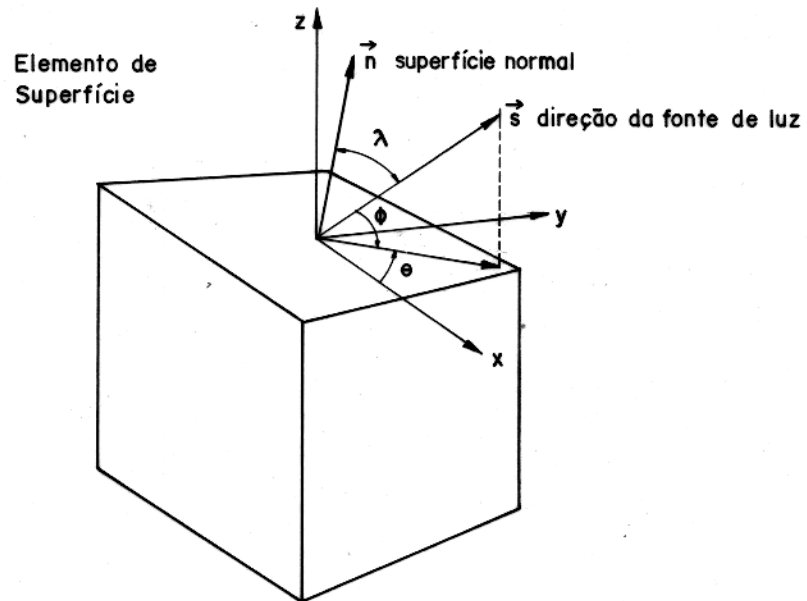


Figura 41 — Arcabouço estrutural da Bacia do Paraná.
(Modificado de Zalán et al., 1986)



A luz refletida no elemento de superfície é proporcional a $\cos(\lambda)$

Figura 42 — Elemento de superfície, mostrando a geometria e nomenclatura relevante.
(Modificado de Dods et al., 1985).

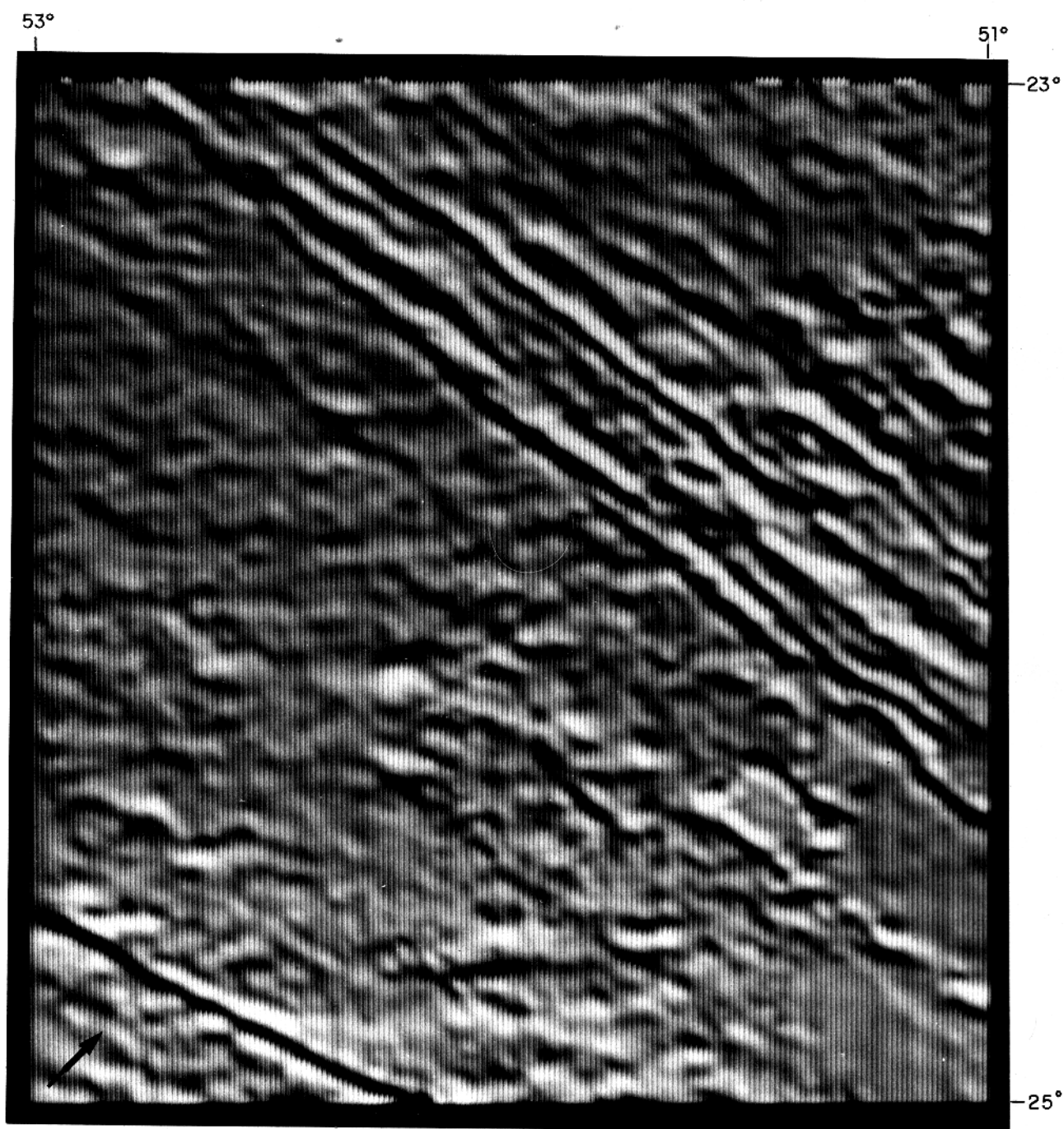


Figura 43 – Mapa de relevo sombreado da sub-área 6. A direção de iluminação indicada pela seta possui 215° de azimute e 45° de elevação. Escala 1:1.300.000. (Ver figura 8).

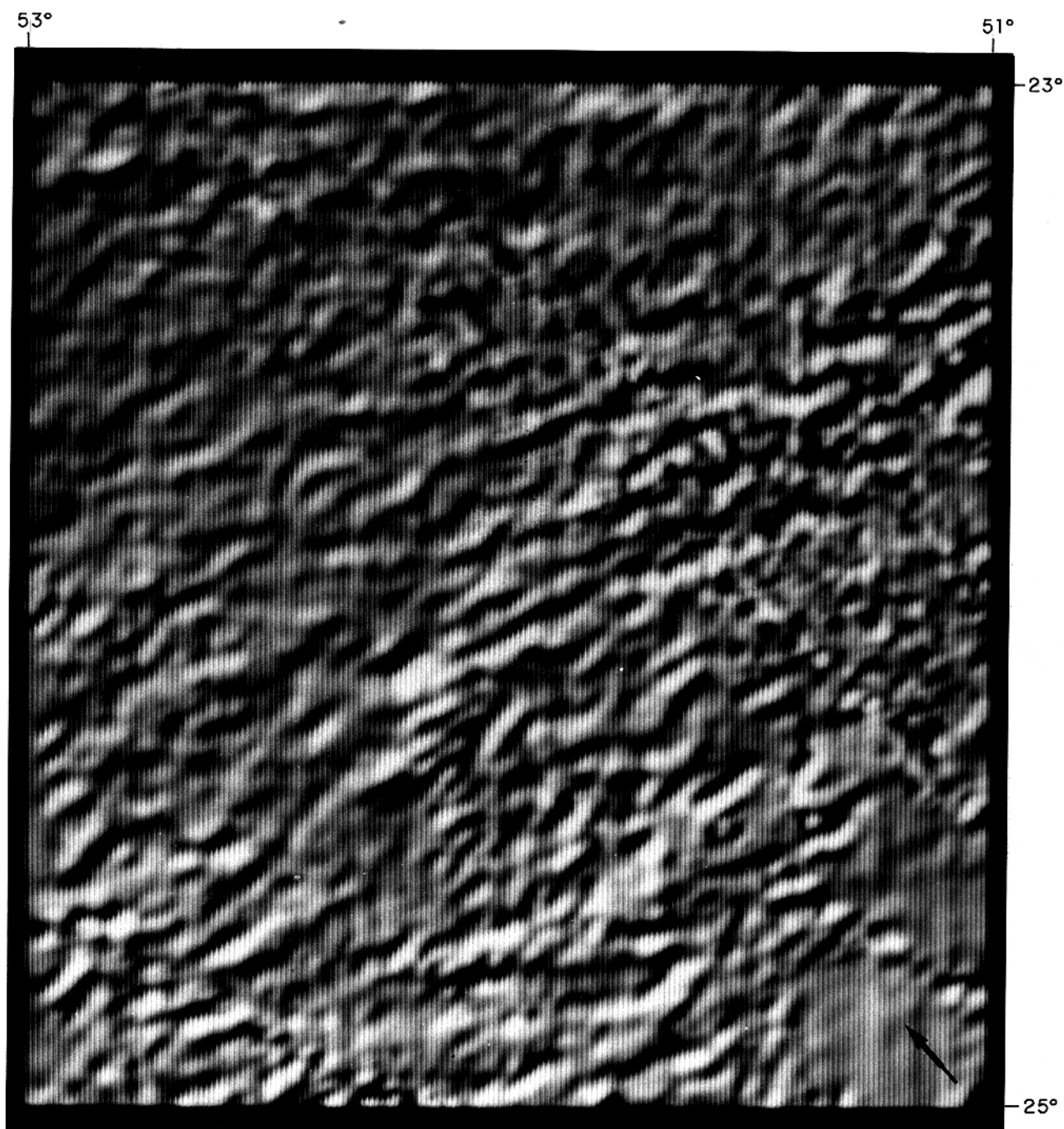


Figura 44 – Mapa de relevo sombreado da sub-área 6. A direção de iluminação indicada pela seta possui 135° de azimute e 45° de elevação. Escala 1:1.300.000. (Ver figura 8).

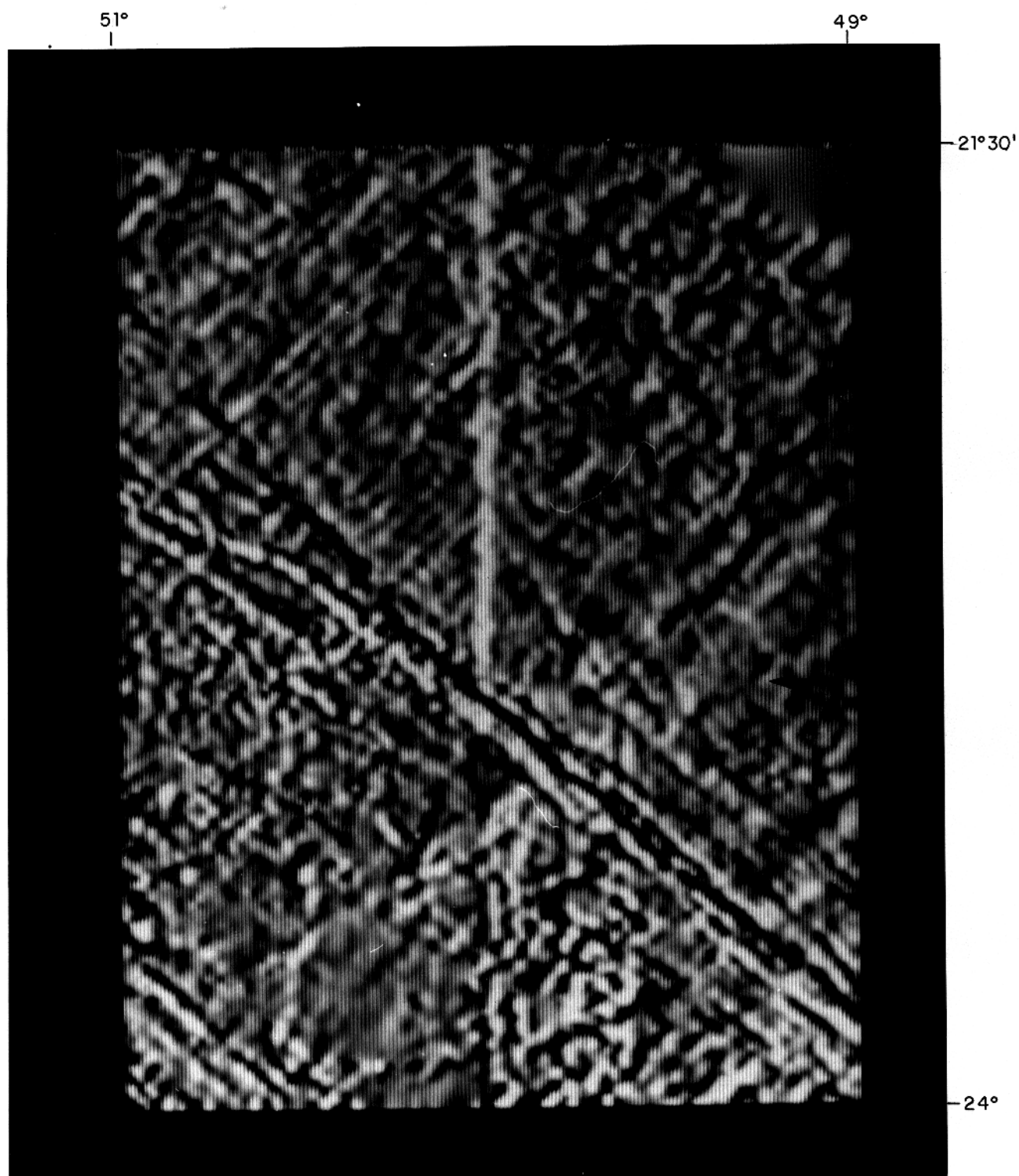


Figura 45 – Mapa de relevo sombreado da sub-área 3. A direção de iluminação indicada pela seta possui 90° de azimute e 45° de elevação. Observe o contato N-S e E-W dos 4 levantamentos que compõem a área. Escala 1:1.600.000.

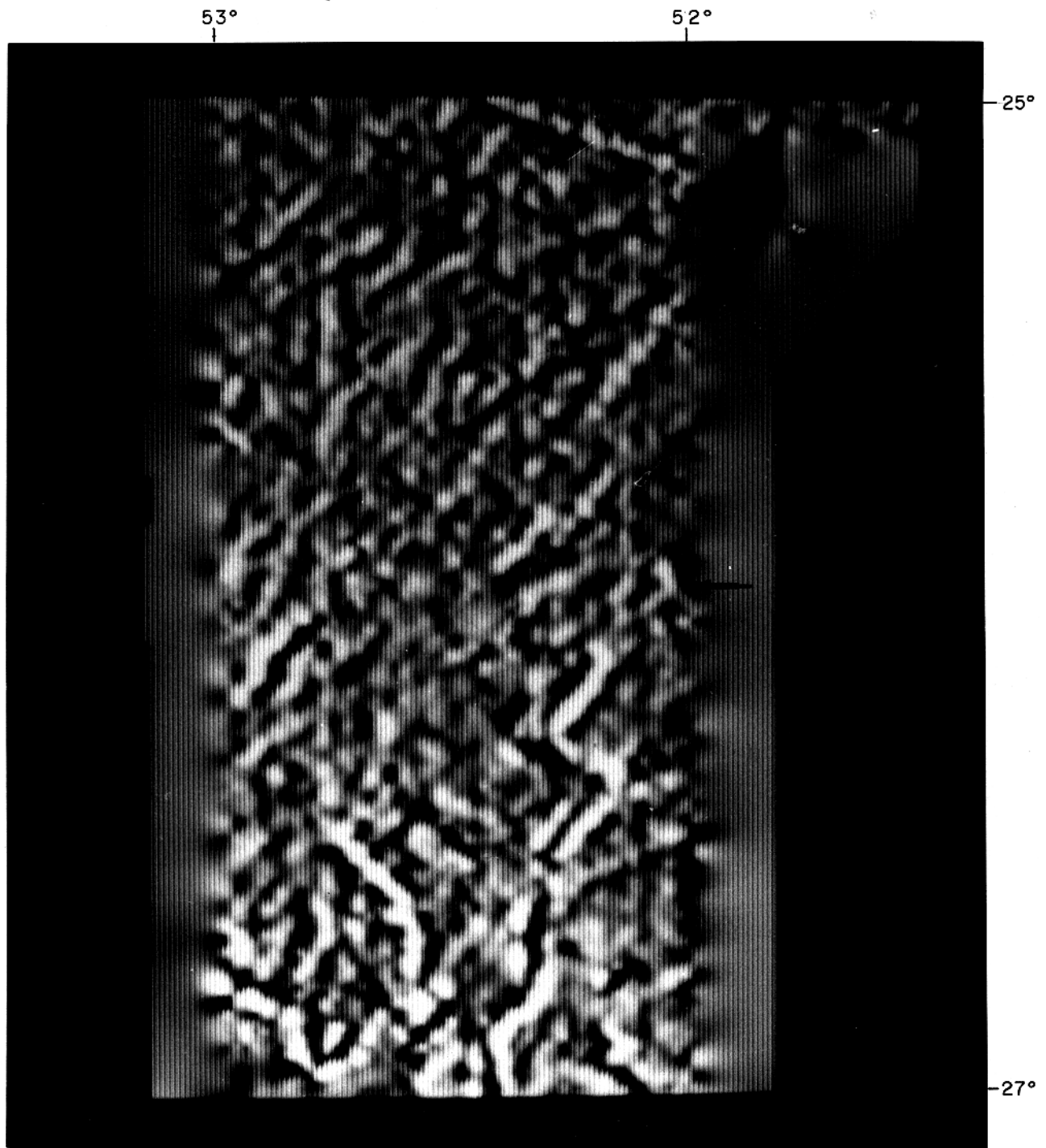


Figura 46 – Mapa de relevo sombreado da sub-área 7. A direção de iluminação indicada pela seta possui 90° de azimute e 45° de elevação. Escala 1:1.300.000.

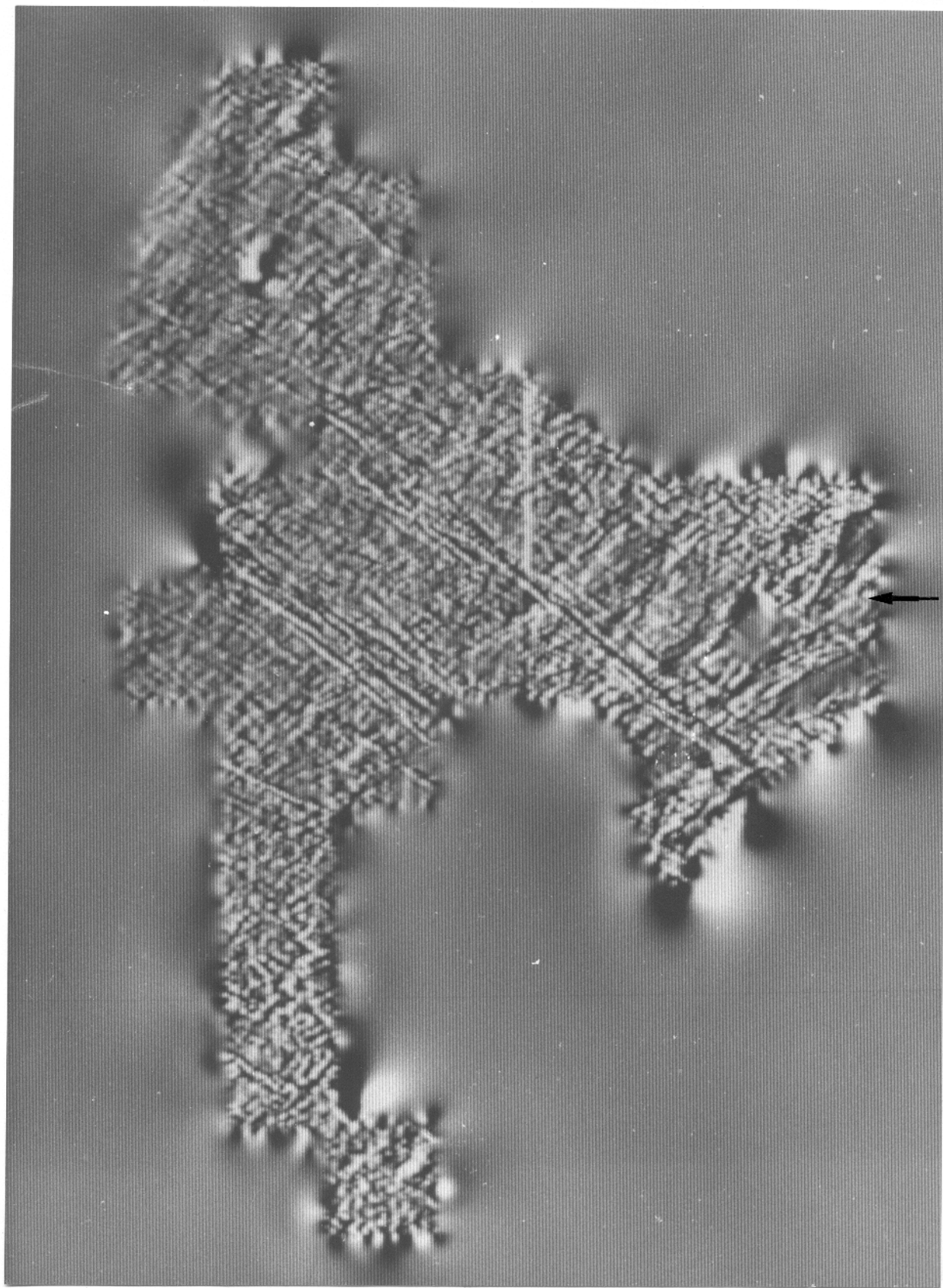


Figura 47 – Mapa de relevo sombreado da área total estudada. A Direção de iluminação indicada pela seta possui 90° de azimute e 45° de elevação. Escala 1:6.000.000. (Ver figura 3).

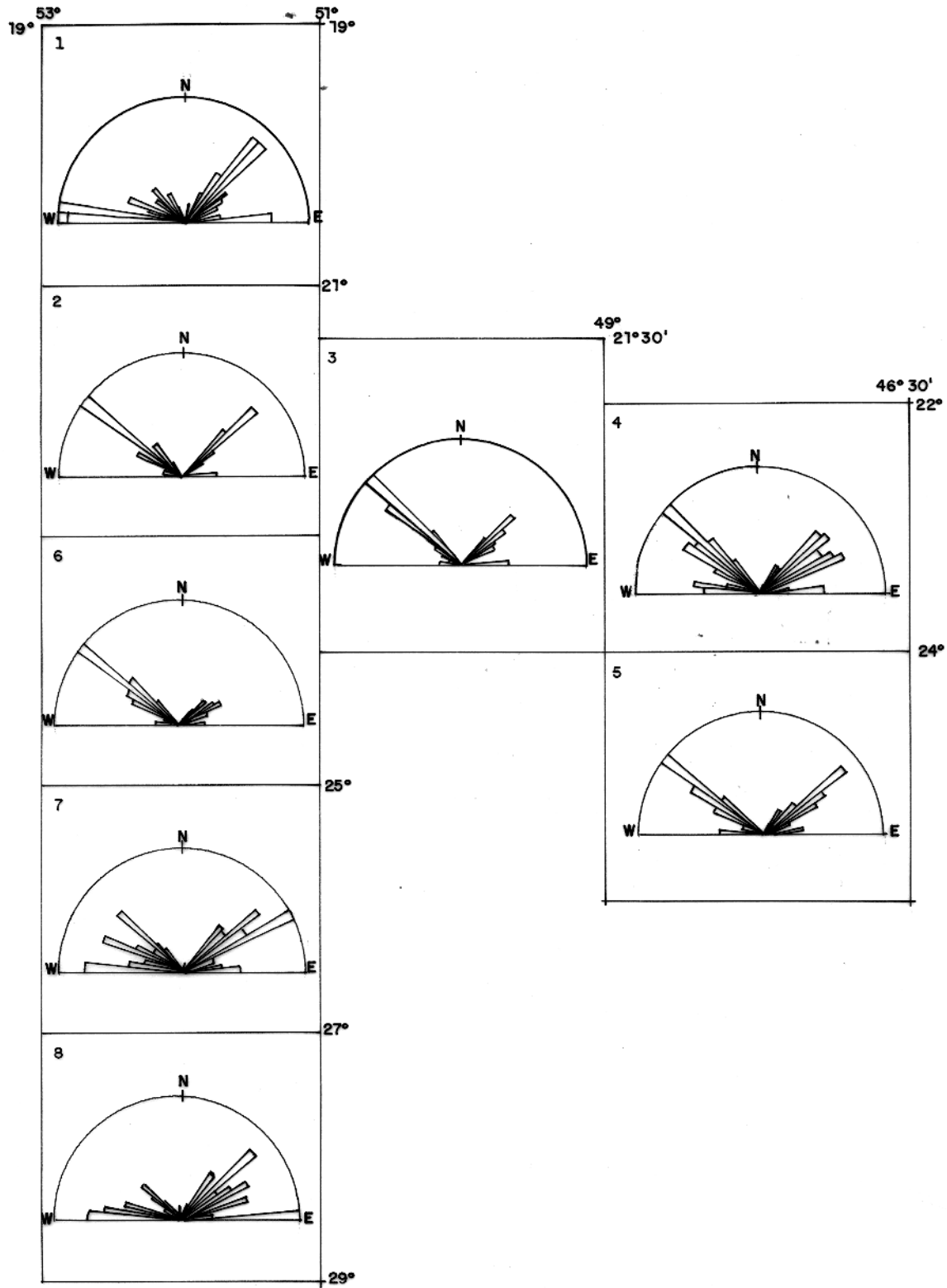


Figura 48 - Diagramas de rosetas dos lineamentos nas sub-áreas numeradas interpretado nas imagens sombreadas.

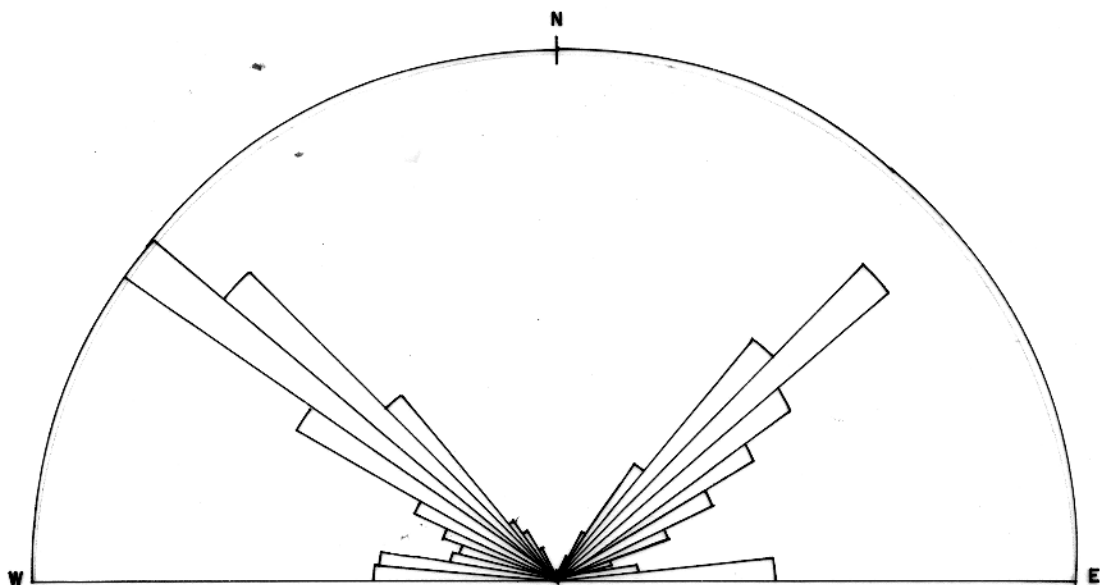


Figura 49 – Diagrama de roseta das direções de lineamentos na parte centro-norte da área levantada interpretados nas imagens sombreadas. (Nº de medidas=517).

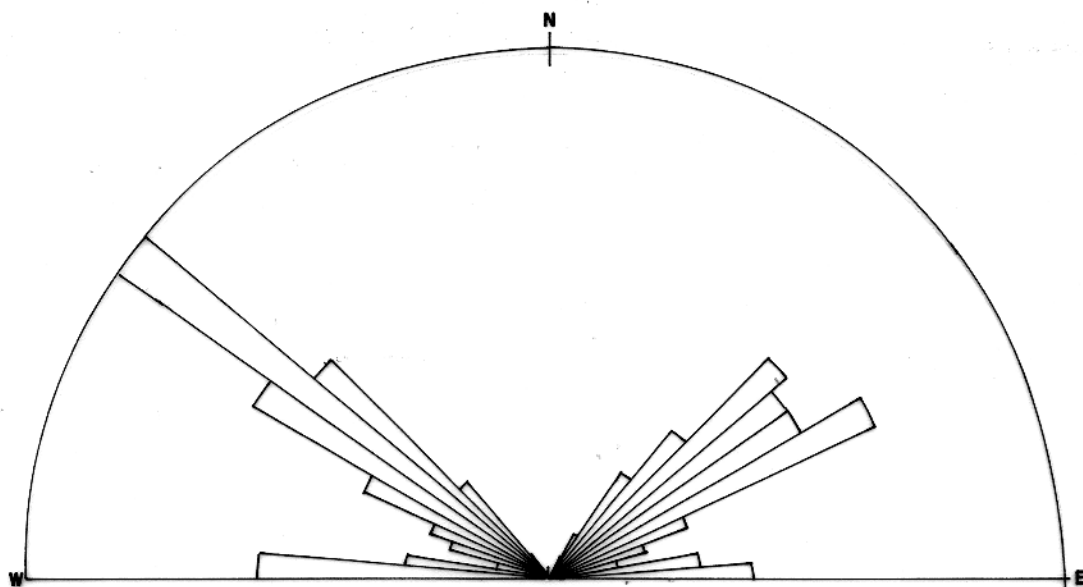
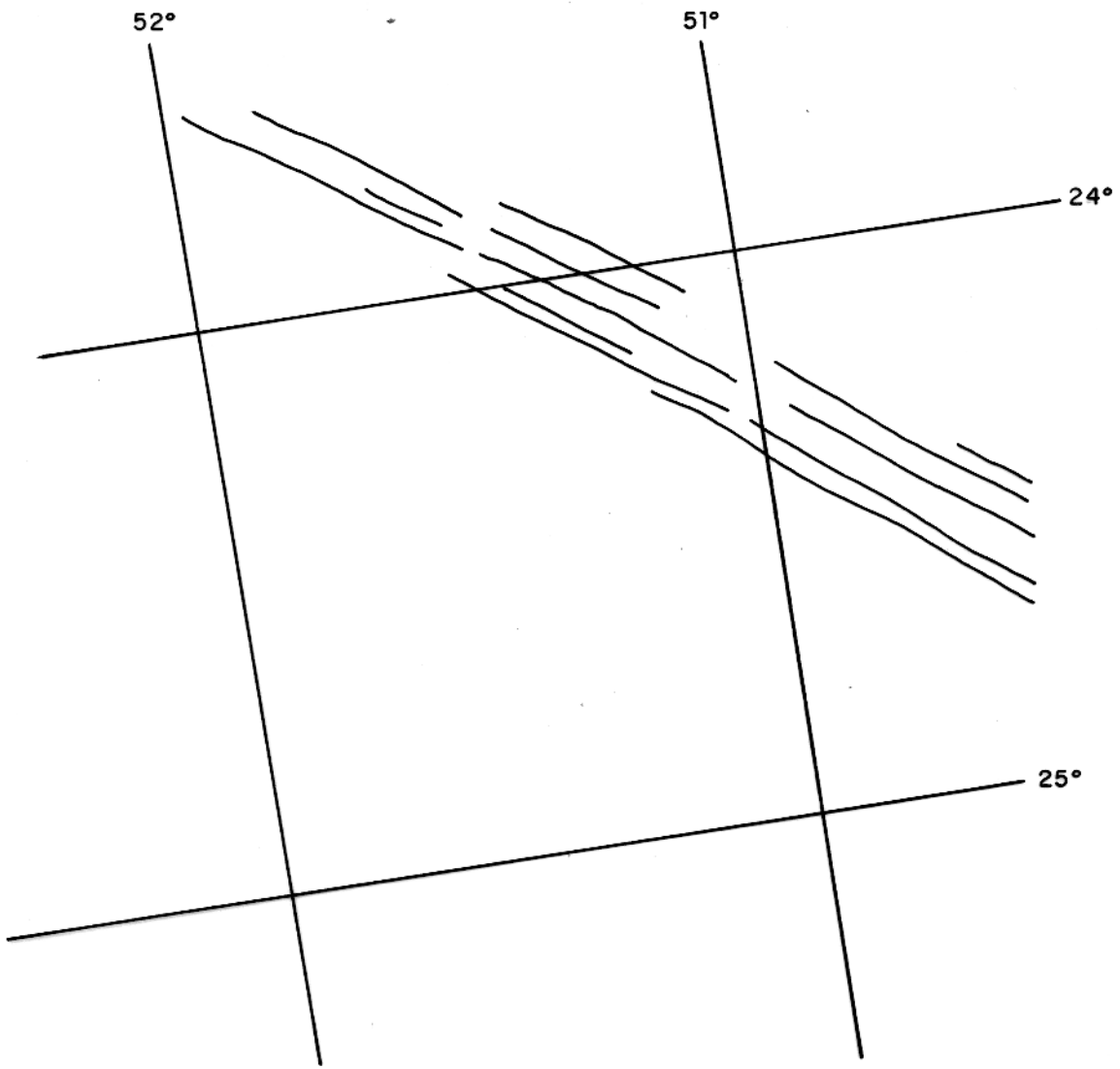


Figura 50 – Diagrama de roseta das direções de lineamentos na parte centro-sul da área levantada interpretados nas imagens sombreadas. (Nº de medidas=644).



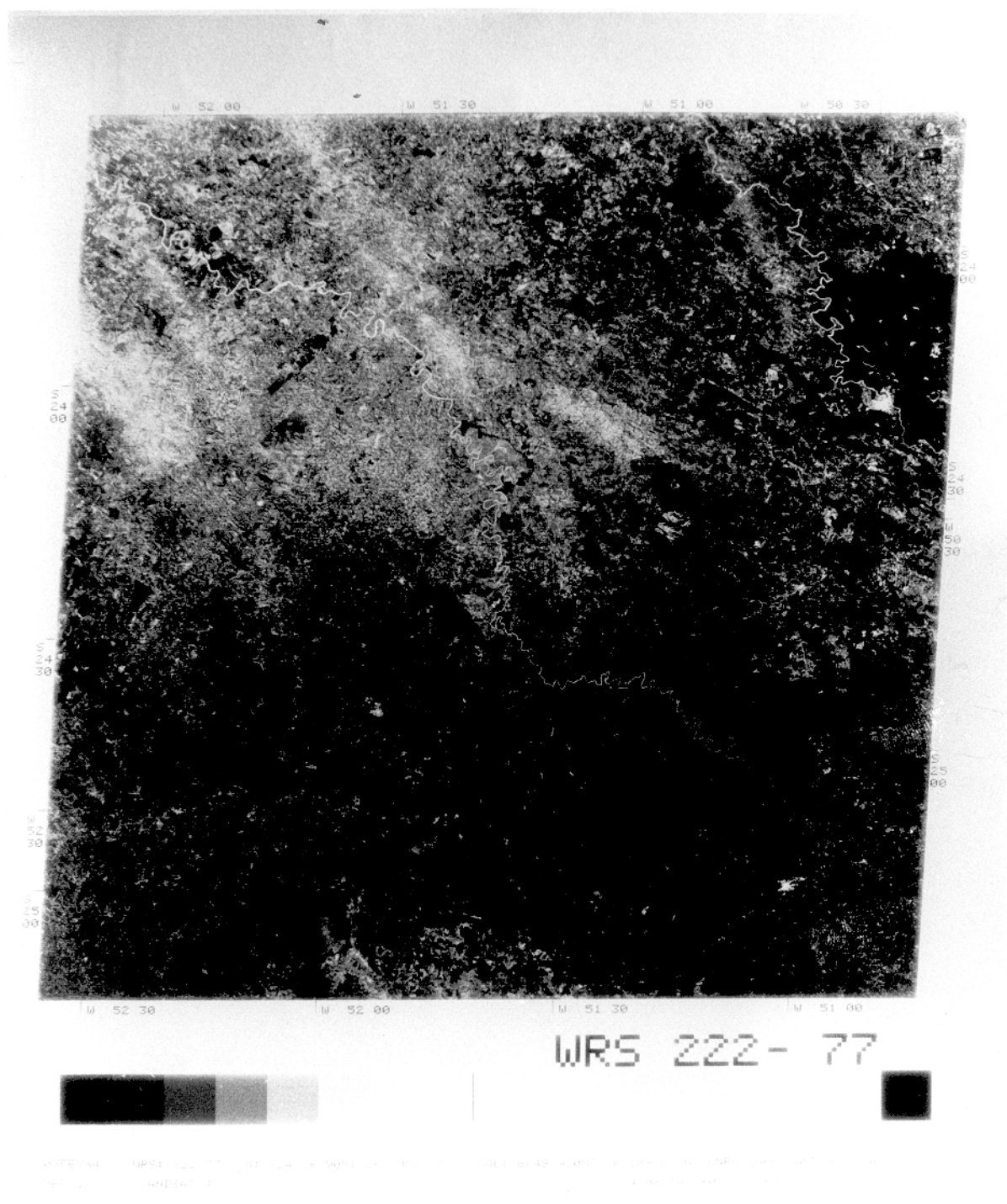
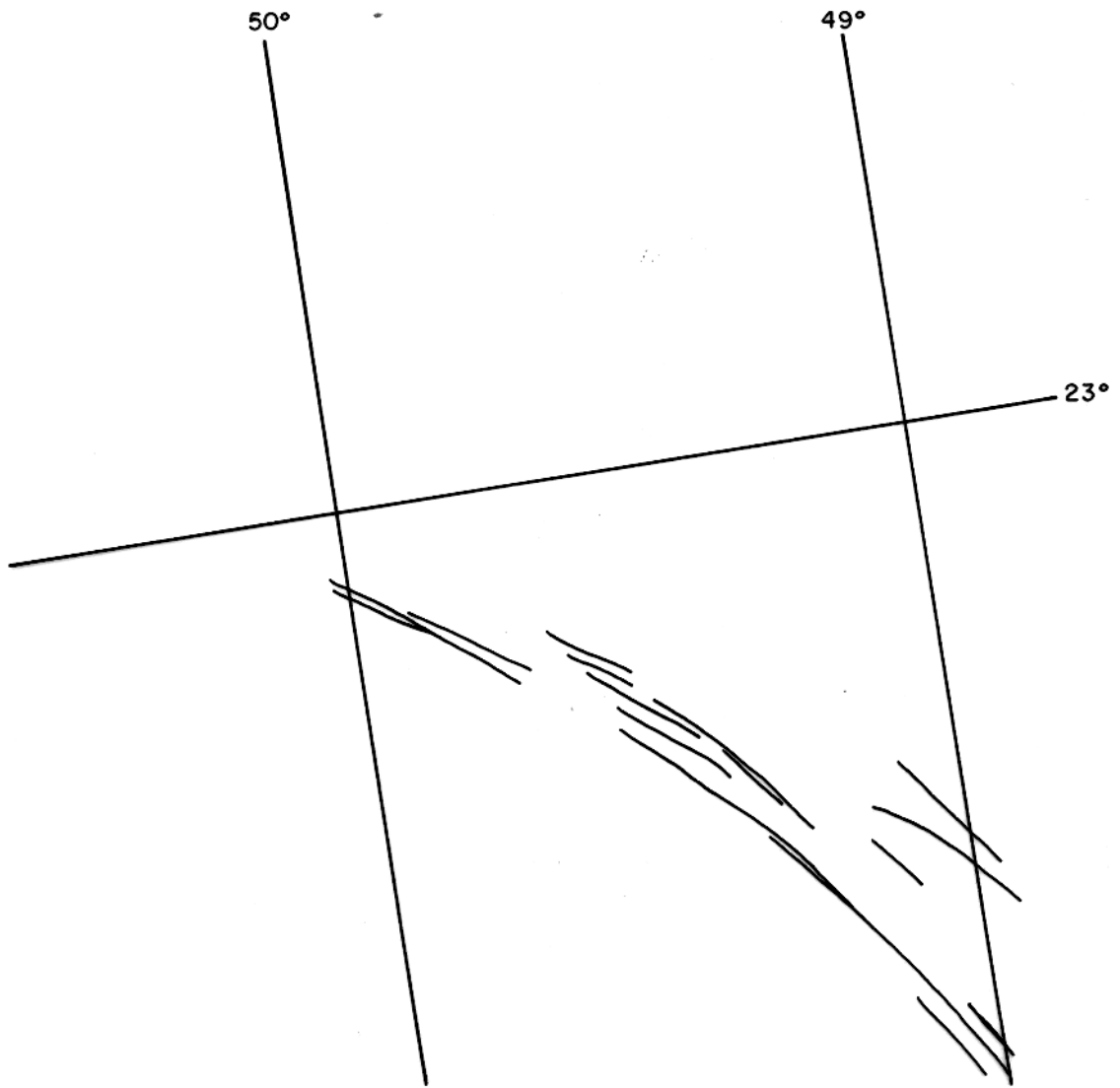


Figura 51 – Imagem de LANDSAT mostrando a região limitada pelos lineamentos de São Jerônimo–Curiúva e Rio Alonzo. Compare com a figura 43 e veja a resposta ao aerolevantamento desta região.



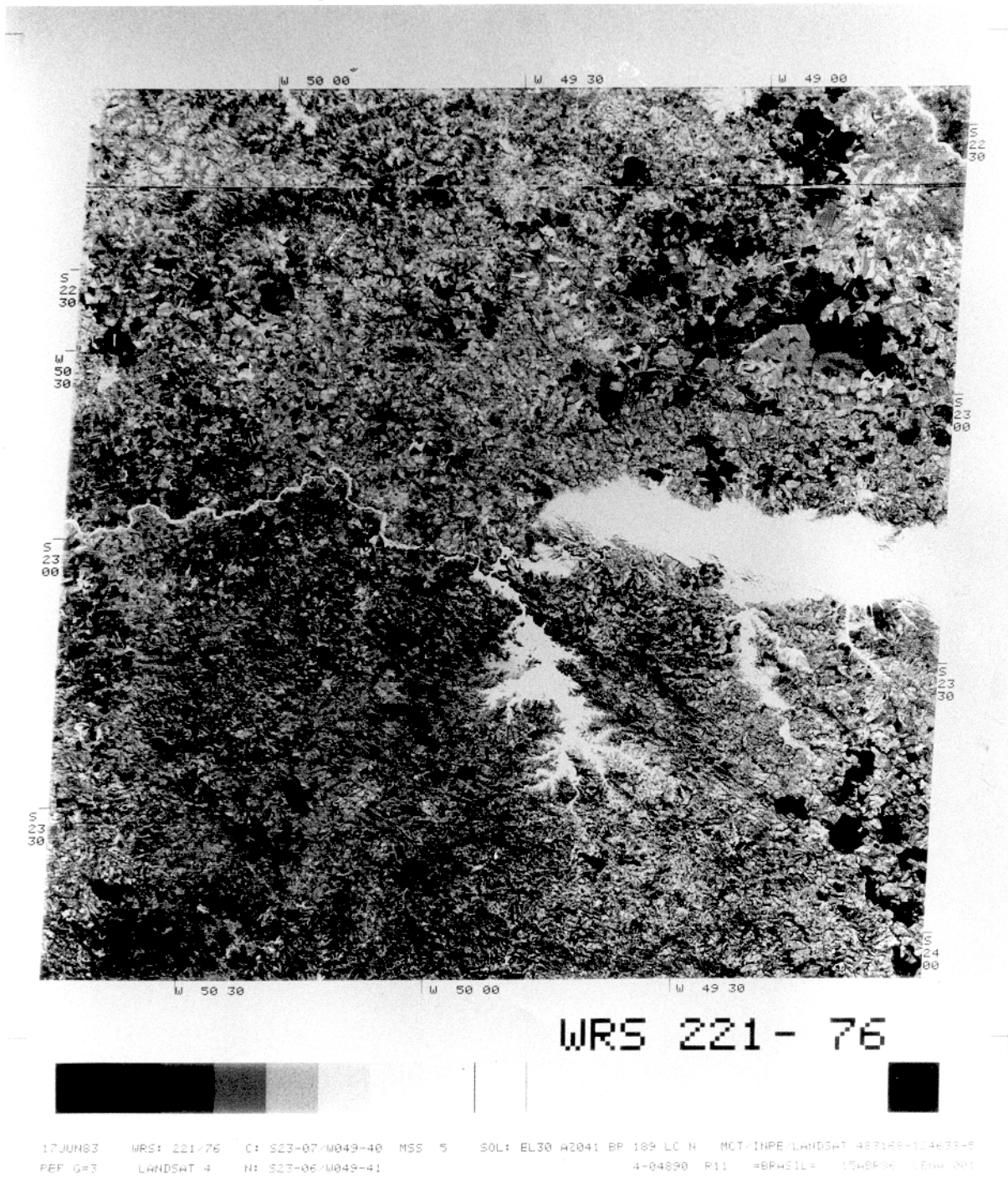
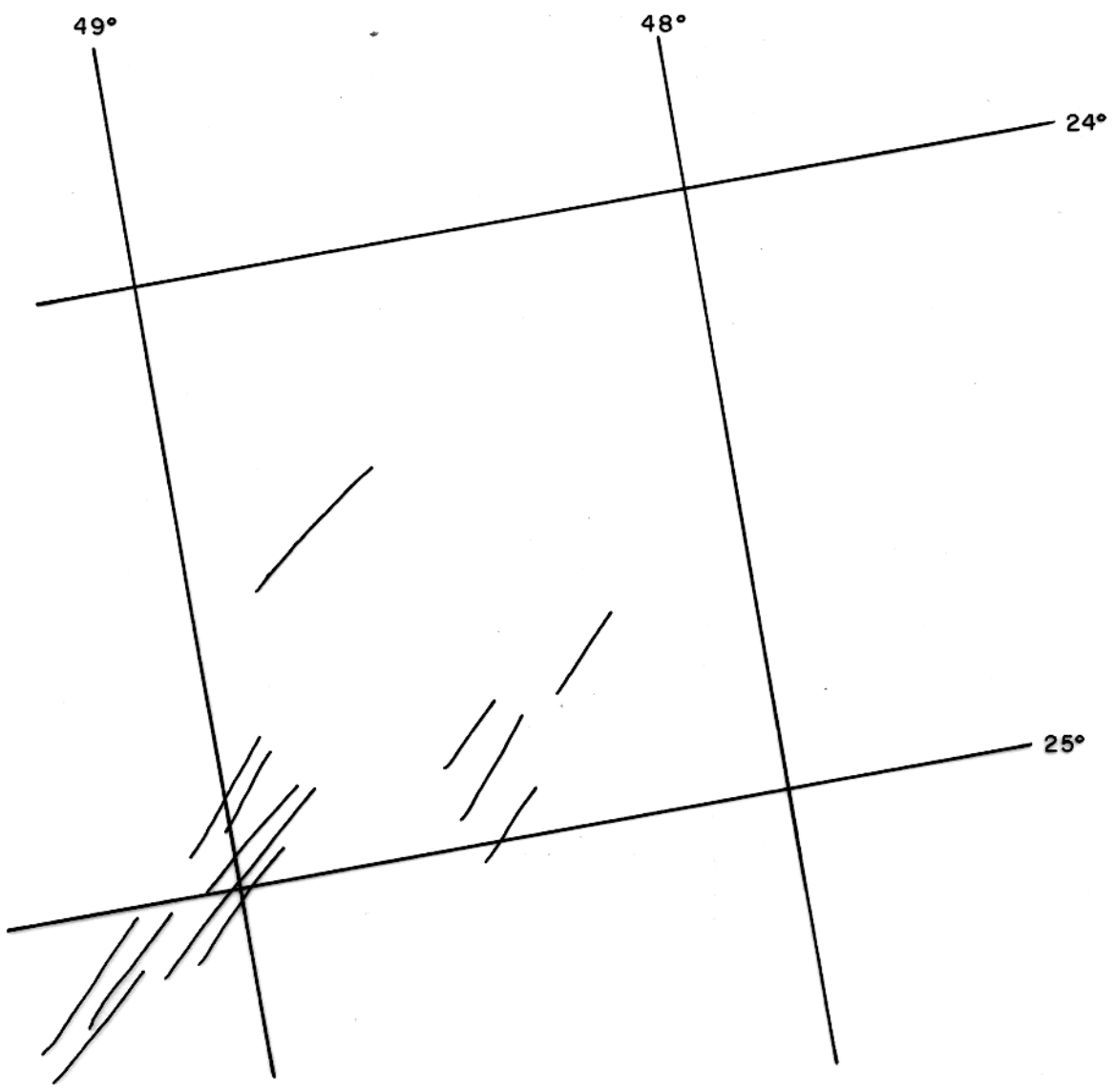


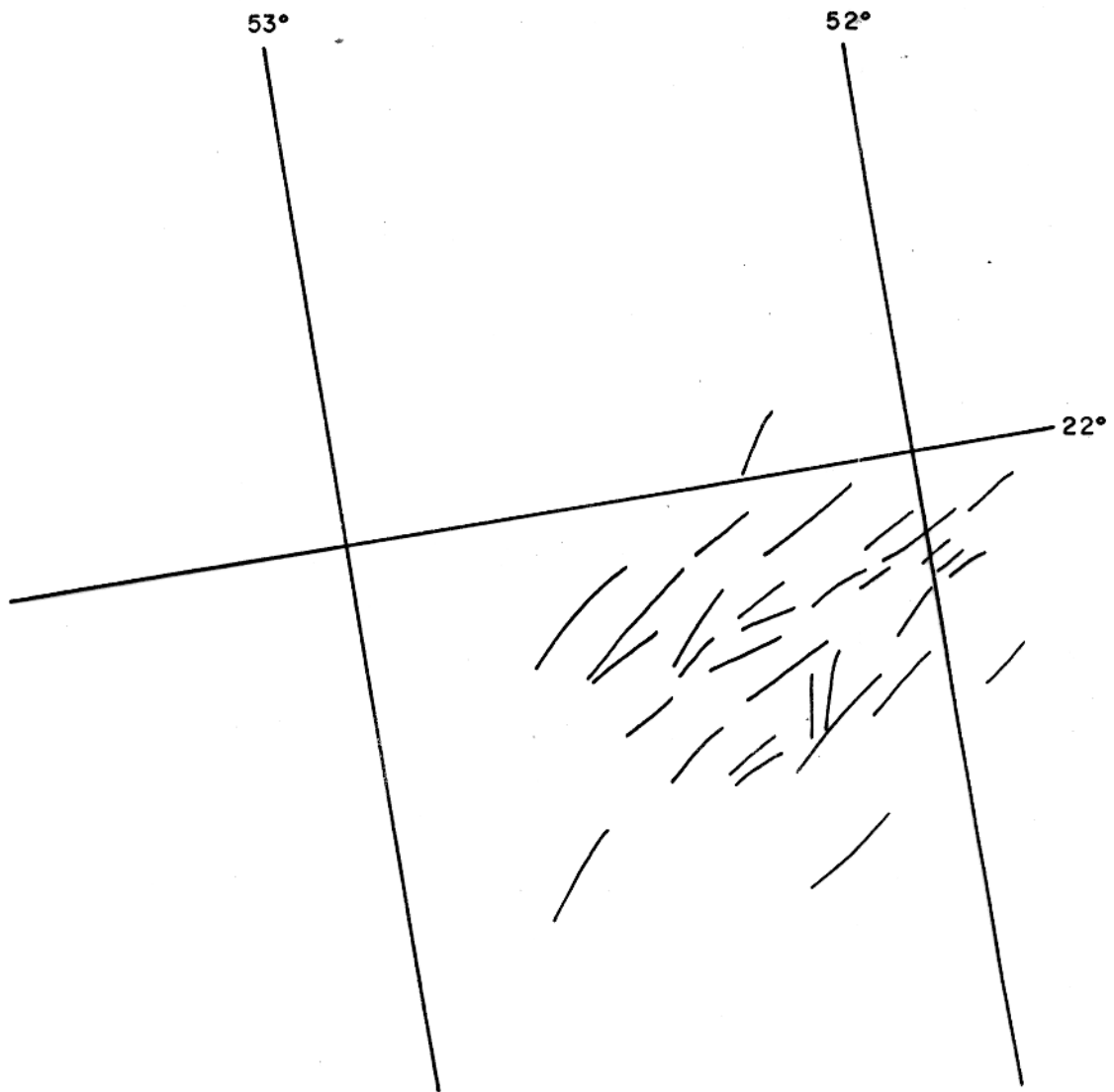
Figura 52 – Imagem de LANDSAT mostrando parte do lineamento de Guapiara. Compare com a figura 45 e veja o lineamento de Guapiara representado na imagem sombreada.





05FEV84 WRS: 220-77 C: 524-32 W048-27 MSS: 5 SOL: EL49 W086 BP 189 LC N NOT INPE LANDSAT 4 AND 5
 PEF 5=3 LANDSAT 4 W: 524-21 W048-27 4-06187 R01 AERSTI/INPE/CPD/INPE/INPE

Figura 53 – Imagem de landsat mostrando os lineamentos de direção NE–SW no embasamento. Compare com a figura 6 e veja a ausência dos lineamentos magnéticos de direção NW–SE.



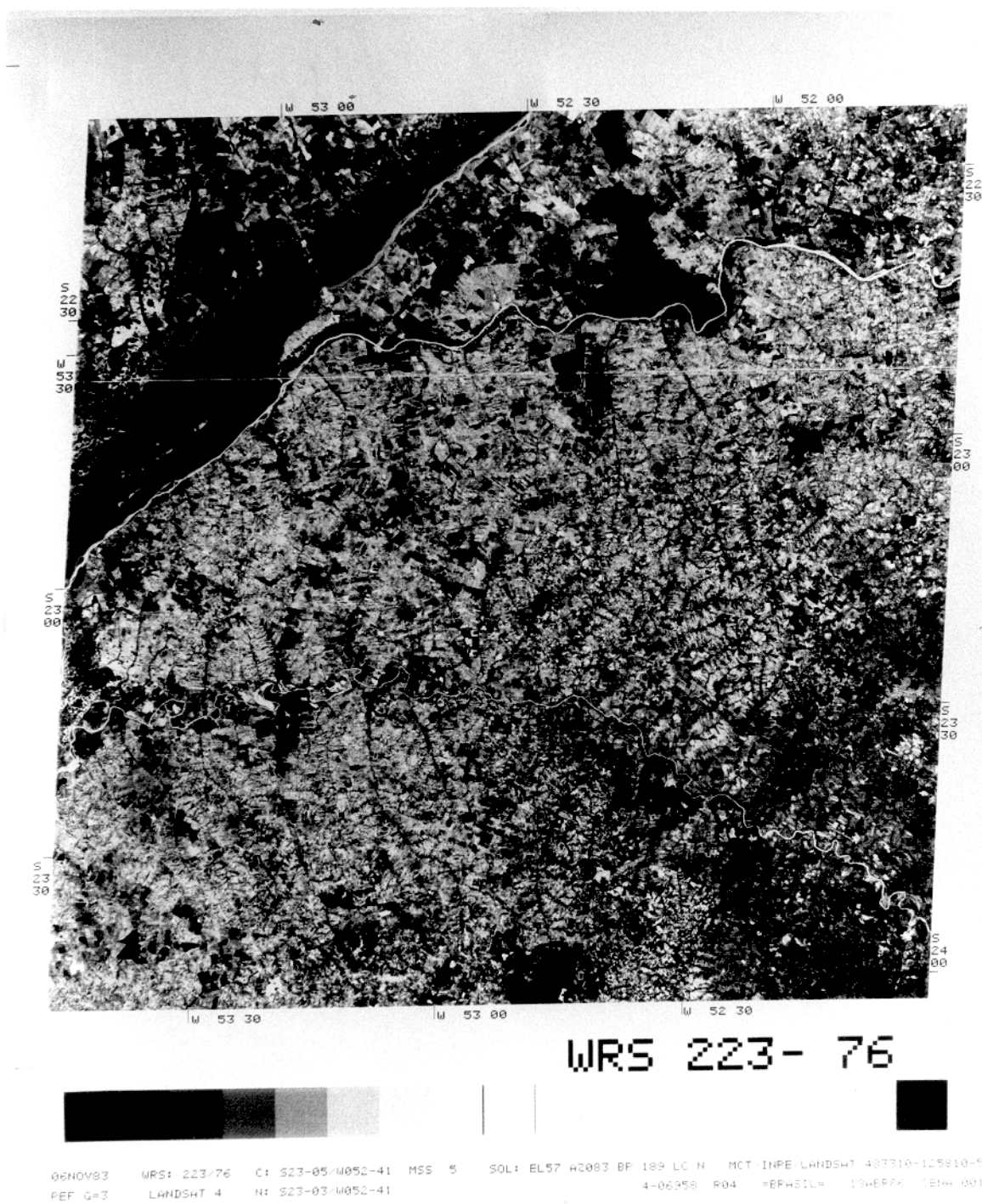


Figura 54 – Imagem de LANDSAT mostrando os lineamentos de direção NE–SW. Compare com a figura 43 e veja a ausência desses lineamentos e a presença dos lineamentos magnéticos de direção NW–SE nas imagens sombreadas

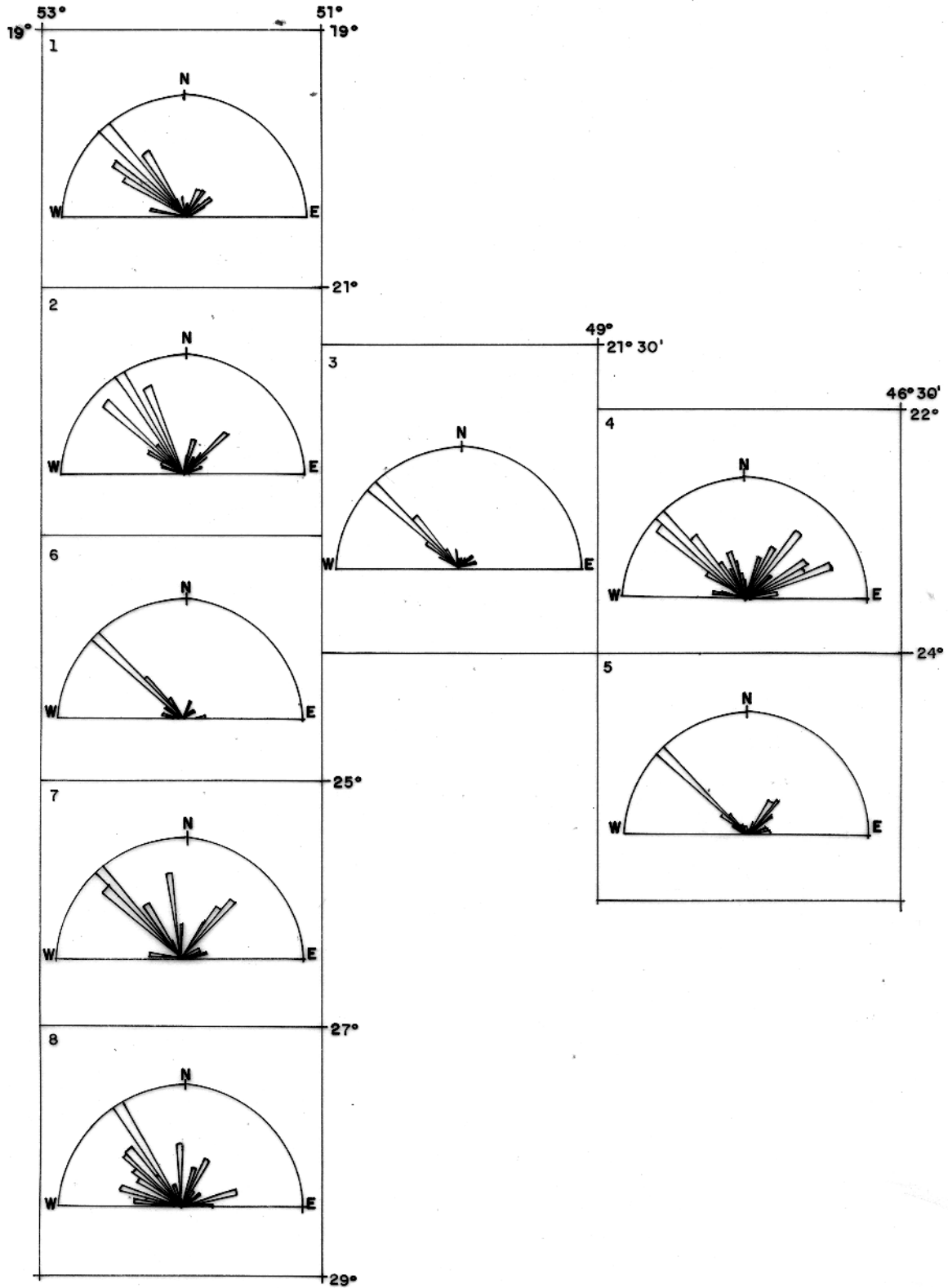


Figura 55 - Diagramas de rosetas dos lineamentos nas sub-áreas numeradas interpretados nas imagens de Landsat.

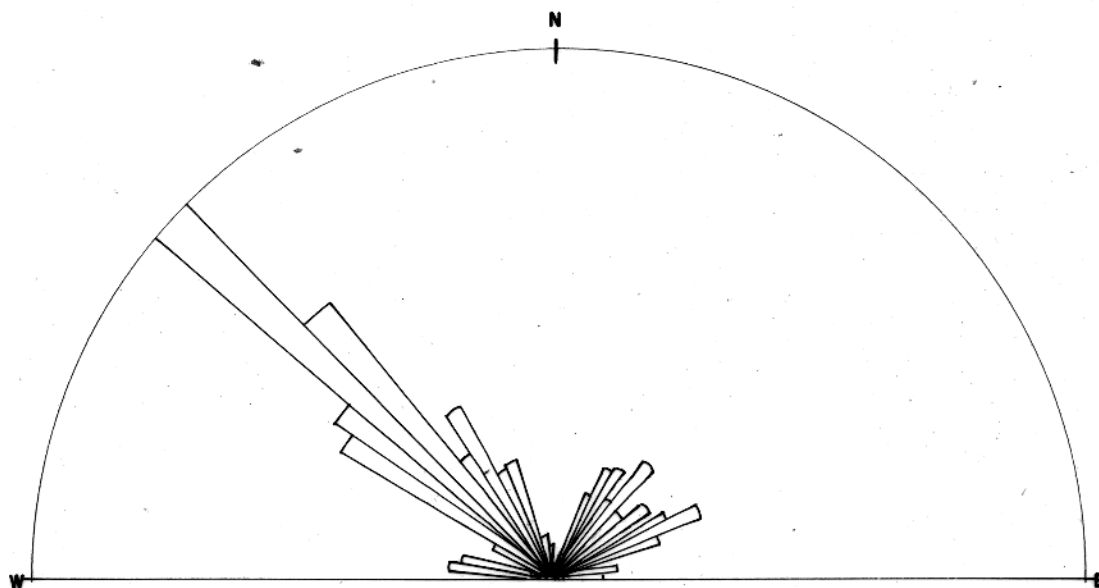


Figura 56 — Diagrama de roseta das direções de lineamentos na parte centro-norte interpretados nas imagens de LANDSAT. (Nº de medidas = 245).

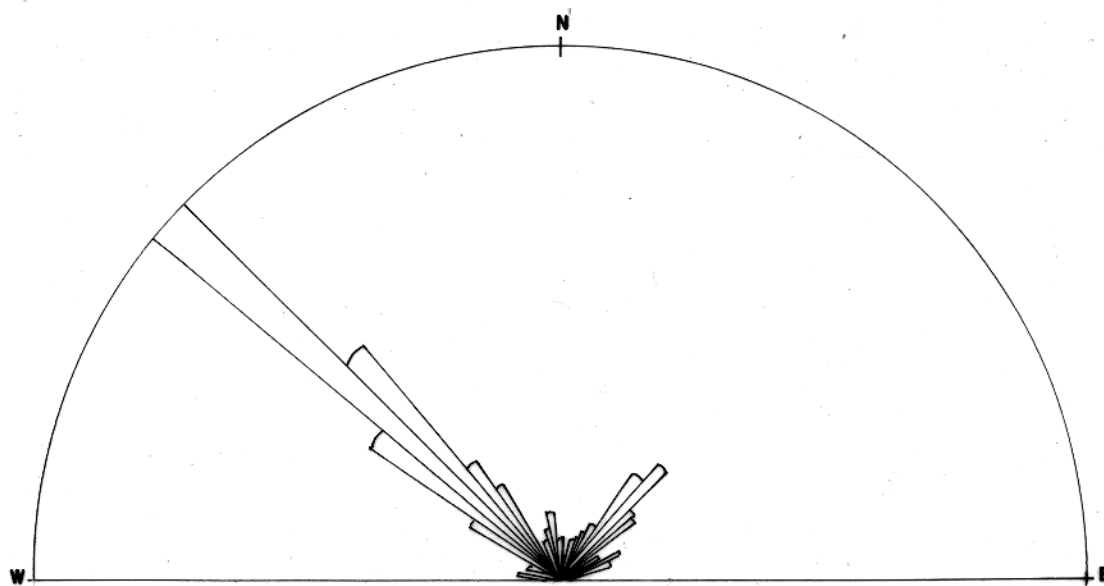


Figura 57 — Diagrama de roseta das direções de lineamentos na parte centro-sul interpretados nas imagens de LANDSAT. (Nº de medidas = 313).

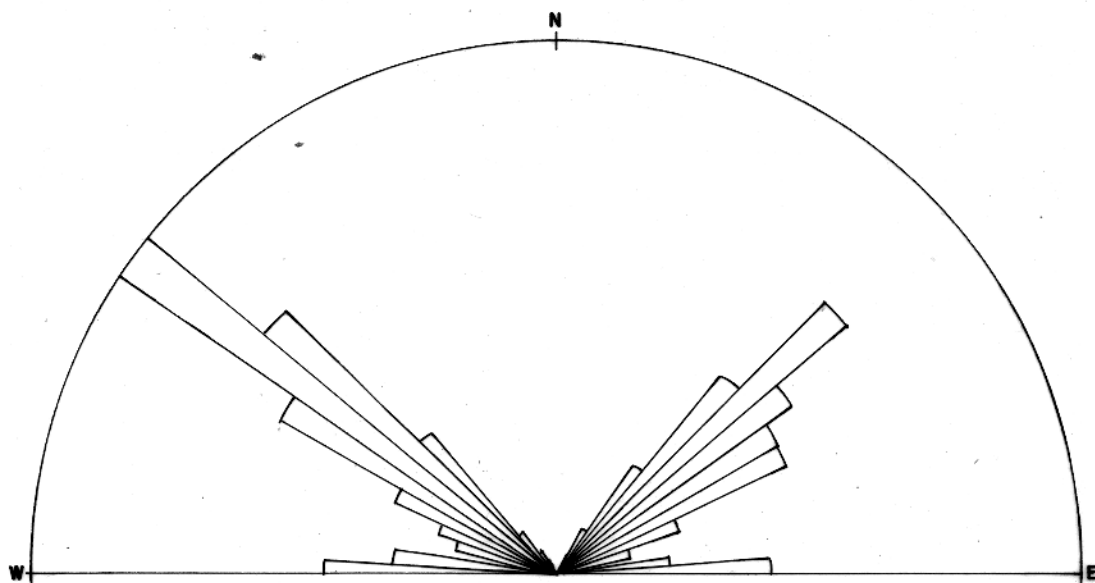


Figura 58 - Diagrama de roseta das direções de lineamentos para a área total interpretados nas imagens sombreadas. (Nº de medidas = 1161).

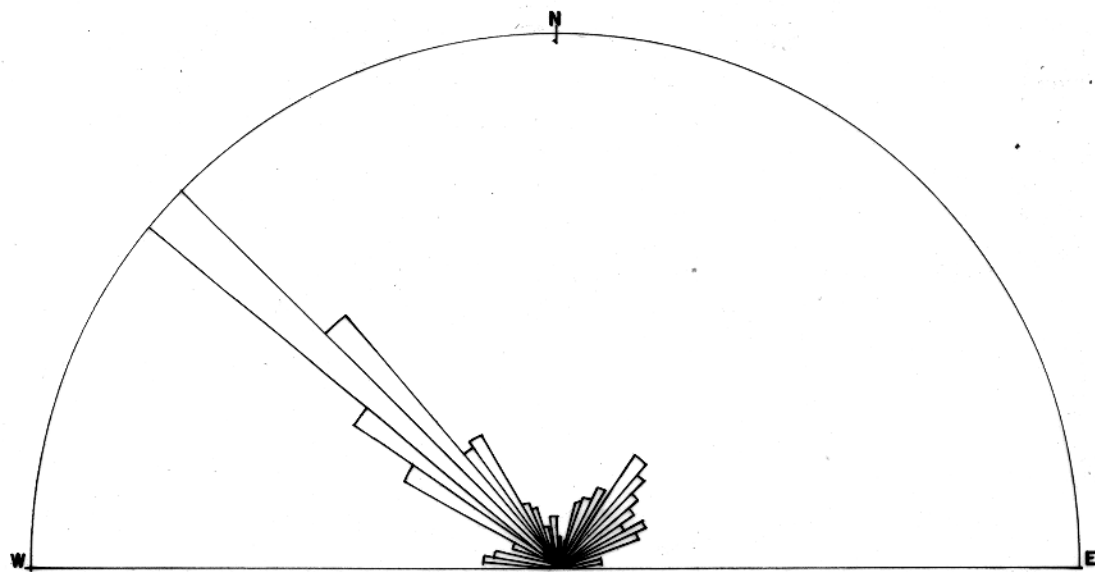


Figura 59 - Diagrama de roseta das direções de lineamentos para a área total interpretados nas imagens de Landsat. (Nº de medidas = 558).

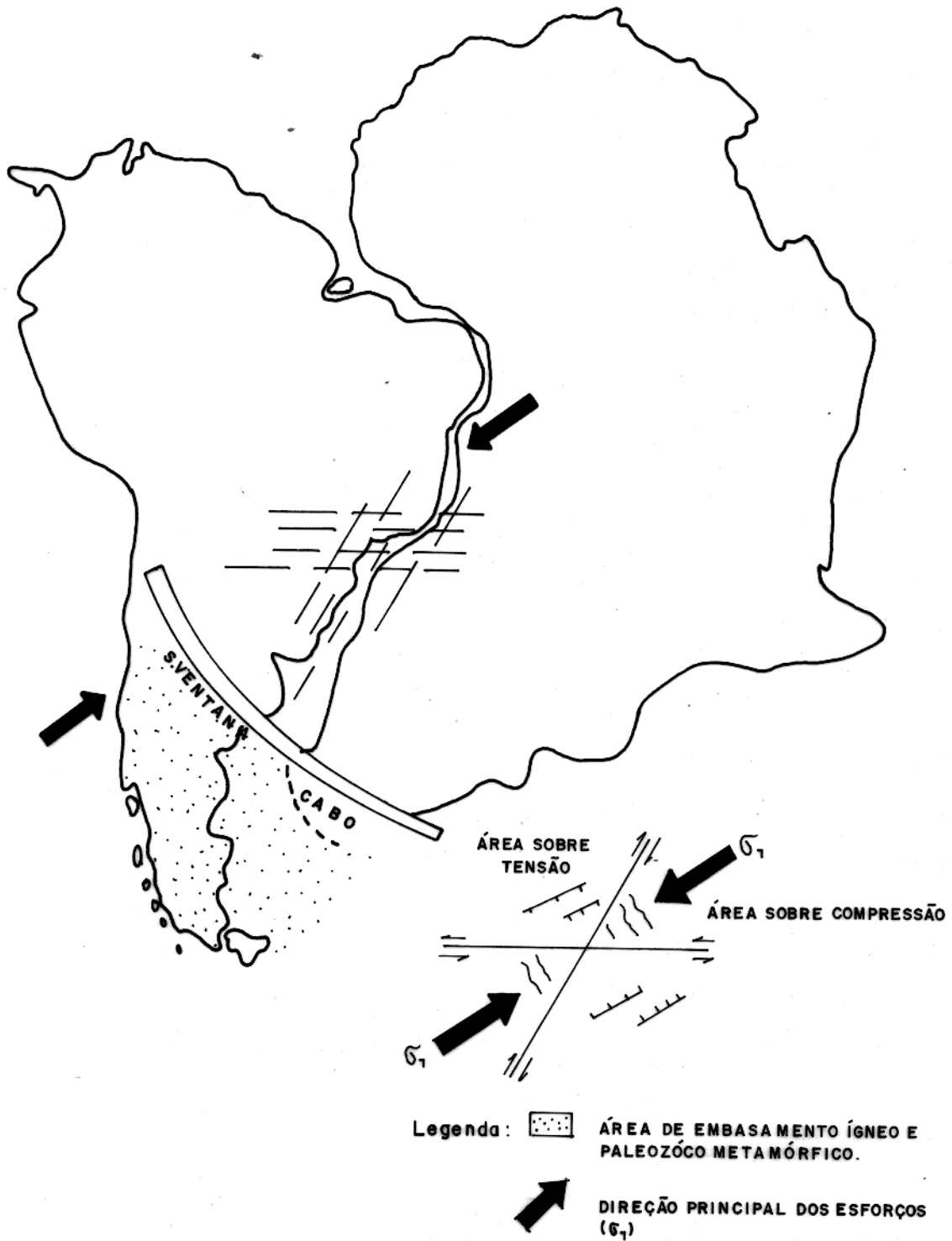


Figura 60 - Esquema de esforços atuantes durante os eventos Hercínios I e II.
 (Modificado de Bacoccoli e Aranha, 1984)

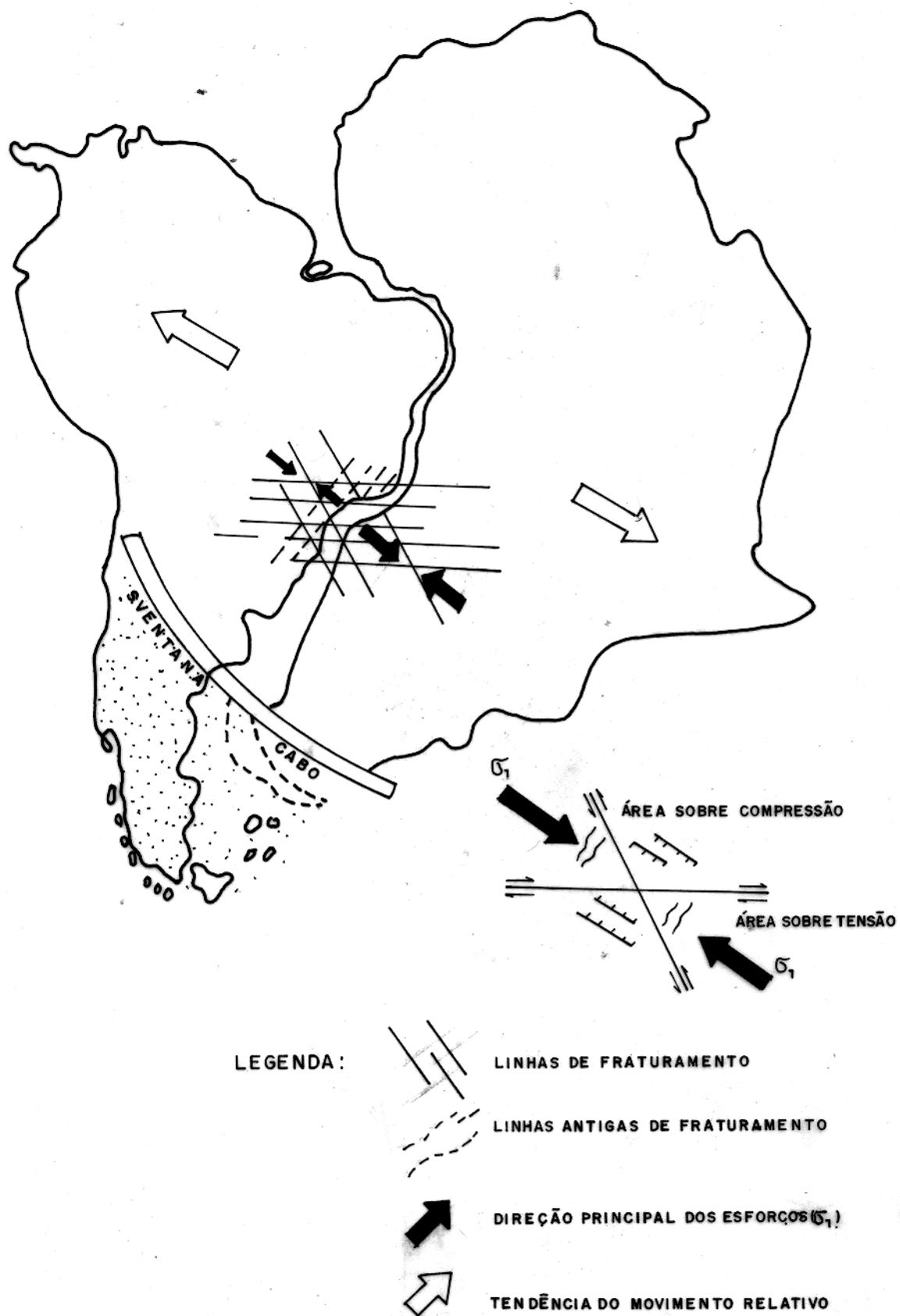


Figura 61 - Esquema de esforços atuantes no início da separação dos continentes durante o Juro-Cretáceo. (Modificado de Bacoccoli e Aranha, 1984).