

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
*Campus de Rio Claro*

ESTUDO DOS ALTOS ESTRUTURAIS DE PITANGA, ARTEMIS, PAU  
D'ALHO E JIBÓIA (FLANCO NORDESTE DA BACIA SEDIMENTAR DO  
PARANÁ), ATRAVÉS DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS DA  
GRAVIMETRIA E MAGNETOMETRIA TERRESTRES

Maximilian Fries

Orientador: Prof. Dr. Walter Malagutti Filho

Tese de doutorado elaborada junto ao Programa de  
Pós Graduação em Geociências - Área de  
Concentração em Geologia Regional, para obtenção  
do Título de Doutor em Geociências.

RIO CLARO (SP)

2008

Comissão Examinadora:

Dr. WALTER MALAGUTTI FILHO (ORIENTADOR)

Dr. JOÃO CARLOS DOURADO

Dr. NORBERTO MORALES

Dr. JORGE KAZUO YAMAMOTO

Dra. YARA REGINA MARANGONI

MAXIMILIAN FRIES

Aluno

Rio Claro: 12 de Maio de 2008

Resultado: APROVADO

Aos meus pais, pela ajuda e o apoio incondicional  
em todos os momentos.

## AGRADECIMENTOS

Durante o desenvolvimento deste trabalho tive a oportunidade de conhecer muitas pessoas que colaboraram de variadas formas no desenvolvimento e elaboração desta tese de doutorado.

Ao Professor Doutor Walter Malagutti Filho, pela orientação, incentivo e amizade ao longo de todos esses anos que trabalhamos juntos.

Aos membros da Comissão Examinadora; Prof. Dr. Norberto Morales, Prof. Dr. João Carlos Dourado, Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto e Prof<sup>a</sup>. Dra. Yara Regina Marangoni pela mobilização e presteza na participação da banca de avaliação desta tese.

Quero expressar também minha gratidão ao meu amigo e parceiro de tantas viagens Francisco Manuel Garcia e a geóloga Mariana Aparecida Fernandes, pela imensa ajuda durante as etapas de campo realizadas neste estudo.

À Ana Paula, que esteve ao meu lado durante todas as fases do trabalho.

Ao amigo e colega MSc. Dionísio Uendro, geofísico que muito me ajudou durante nossas conversas casuais, na elucidação de dúvidas e sugestões muito proveitosas para melhoramento do estudo.

Aos meus amigos matemáticos, Doutor André Contiero e Professora MSc. Rosemeire Batistela, sempre dispostos a uma boa discussão científica e filosófica onde quer que estivéssemos.

Aos meus amigos e professores do Curso de Geofísica da Universidade Federal do Pampa, campus de Caçapava do Sul, pela ajuda e compreensão nesta fase final de conclusão desta tese.

Ao meu pai Bruno e minha mãe Rosemari que sempre estiveram do meu lado e pacientemente me apoiaram em todas as fases deste trabalho.

A FAPESP, pelo apoio financeiro concedido para este trabalho.

A CAPES, pela bolsa concedida durante o período de elaboração desta tese.

A Eliana Corrêa Contiero, supervisora da pós-graduação do IGCE, pelo auxílio prestado gentilmente na entrega desta tese.

*“Sem saber o que sou e porque estou aqui, a vida é impossível.”*

*-Liév Tolstoi, Anna Karenina-*

## RESUMO

Levantamentos geofísicos, através das técnicas da gravimetria e magnetometria realizados em escala de semi-detalhe na região dos altos estruturais de Pitanga, Ártemis, Pau D'Alho e Jibóia, localizados na porção nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, região sudeste do Brasil, permitiram identificar lineamentos estruturais que são associados aos principais *trends* reconhecidos em estudos para a Bacia Sedimentar do Paraná tanto em escala regional como para a área determinada. O Setor Pitanga/Ártemis e Setor Pau D'Alho/Jibóia foram determinados com base na concentração desses lineamentos e anomalias detectadas. Assinaturas gravimétricas e magnetométricas lineares e de direções preferenciais NW-SE são identificados na área em mapas de campo magnético anômalo total, da anomalia Bouguer e de valores magnetométricos de sinal analítico e são possivelmente associadas a zonas de fraqueza pré-existentes do embasamento e as falhas (juntas e fraturas) que atuaram como planos de fraqueza na colocação e disposição dos atuais corpos de rochas básicas. Essas direções também são identificadas para os altos de Pau D'Alho e Jibóia. Feições lineares de menor prolongamento de direção NE-SW, E-W e N-S são também observados e correlacionados às reativações mais recentes ocorridas na bacia. Modelagens dos valores observados de gravimetria e magnetometria mostraram conformidade com as feições geológicas e estruturais conhecidas para os estudos de superfície e geofísicos anteriores que determinaram espessuras de aproximadamente 500 metros para a camada de sedimentos na região dos Altos estruturais e um espessamento dessa camada em torno de 1000 metros na região circundante aos altos. A aplicação dos métodos geofísicos da gravimetria e magnetometria, assim como a utilização da técnica DGPS foram ferramentas importantes e valiosas para o reconhecimento e consolidação das feições geológico/estruturais que determinaram à formação dos altos estruturais nessa porção da Bacia Sedimentar do Paraná.

## **ABSTRACT**

A geophysical survey using the gravimetric and magnetometric methods, associated with a differential GPS technique as support in the gravimetric survey in the structural highs known as Pitanga, Ártemis, Pau D'Alho e Jibóia, located in the northeast portion from Paraná Sedimentary Basin, southeast Brazil was performed and allowed to identified structural features (alignments) related to the main known trends identified in previous studies for the Parana Basin. Sector Pitanga/Artemis and Sector Pau D'Alho/Jibóia were determined based mainly in the alignments and also the anomalies concentrations. Aligned gravimetric and magnetometric signatures with NE-SW trend were identified in total magnetic, Bouguer anomaly and analitical signal generated maps. And are related to basement previously existing weak zones and faults (joints and fractures) that played the role of weakness plans that allowed the basic rocks displacement in the basin sediments. Such trends are recognized for the Pau D'Alho and Jibóia high. Less extended alignments with NE-SW, E-W and N-S directions are also recognized and related to the recent reactivated faults in the basin. Gravimetric and magnetometric models are concordant with the structural and geologic features known in surface mapping and also for the geophysical studies that determined a sediment thickness around 500 meters in the highs área and around 1000 meters for the area nearby the structural highs. The geophysical methods of gravimetry and magnetometry associated with the DGPS technique are valuable tools in the identification, recognition and consolidation from geologic and structural features that directly determined the structural highs formation in this portion from Paraná Sedimentary Basin.

## SUMÁRIO

	Página
<b>ÍNDICE</b> .....	i
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>LISTA DE FOTOS</b> .....	xiii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xv
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E METODOLOGIA</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 2 - EVOLUÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR E GEOLOGIA REGIONAL DA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ</b> .....	10
<b>CAPÍTULO 3 - GEOLOGIA DA PORÇÃO NORDESTE DA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ E ARCABOUÇO ESTRUTURAL DA ÁREA</b> .....	38
<b>CAPÍTULO 4 - GRAVIMETRIA, MAGNETOMETRIA E SISTEMA GPS DIFERENCIAL - FUNDAMENTOS TEÓRICOS E CARACTERÍSTICAS DE CADA MÉTODO</b> .....	69
<b>CAPÍTULO 5 - AQUISIÇÃO DE DADOS - CAMPANHAS DE CAMPO DE GRAVIMETRIA, GPS DIFERENCIAL E MAGNETOMETRIA</b> .....	100
<b>CAPÍTULO 6 - MAPAS GRAVIMÉTRICOS, MAGNETOMÉTRICOS, PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DOS DADOS GEOFÍSICOS</b> .....	113
<b>CAPÍTULO 7 - MODELAGEM GRAVIMÉTRICA E MAGNETOMÉTRICA, INTERPRETAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS</b> .....	132
<b>CAPÍTULO 8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES</b> .....	169
<b>CAPÍTULO 9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	176
<b>APÊNDICE 1 - CONSIDERAÇÕES E ANÁLISES REFERENTES À QUALIDADE DOS DADOS PÓS-PROCESSADOS COM O GPS PATHFINDER PRO-XR</b> .....	185



<b>APÊNDICE 2 - FÓRMULAS DA GRAVIDADE UTILIZADAS NAS CORREÇÕES</b>	
REDUÇÕES, PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DOS DADOS DESTE	
ESTUDO.....	193
<b>APÊNDICE 3 - TERMINOLOGIA USADA NO MÉTODO DE AQUISIÇÃO</b>	
DGPS.....	198
<b>APÊNDICE 4 - ESTAÇÕES GRAVIMÉTRICAS E MAGNETOMÉTRICAS</b>	
ADQUIRIDAS NO ESTUDO.....	199
<b>APÊNDICE 5 - TEORIA DO MÉTODO DA TRANSFORMADA RÁPIDA DE</b>	
FOURIER 2-D (FAST FOURIER TRANSFORM) NO TRATAMENTO DOS DADOS	
GRAVIMÉTRICOS E MAGNETOMÉTRICOS DESTE ESTUDO.....	223
<b>APÊNDICE 6 - PREPARAÇÃO DO GRID PARA O PROCESSAMENTO FFT</b>	
WINOGRAD.....	231
<b>APÊNDICE 7 - DESCRIÇÃO DOS FILTROS UTILIZADOS NO PROCESSAMENTO</b>	
DE DADOS GRAVIMÉTRICOS E MAGNETOMÉTRICOS.....	233

## ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E METODOLOGIA _____	1
1.1 INTRODUÇÃO _____	1
1.2 A MOTIVAÇÃO _____	1
1.3 OBJETIVOS _____	3
1.4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO _____	5
1.5 METODOLOGIA DE TRABALHO _____	7
1.5.1 Trabalhos e aquisições de dados efetuados no campo _____	8
1.5.2 Trabalhos de escritório _____	8
 CAPÍTULO 2 - EVOLUÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR E GEOLOGIA REGIONAL DA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ _____	          10
2.1 INTRODUÇÃO _____	10
2.2 EVOLUCAO E DESENVOLVIMENTO DA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ _____	 15
2.2.1 A Bacia do Paraná como entidade Geotectônica _____	15
2.2.2 Influência do Embasamento no Comportamento Geotectônico _____	17
2.2.3 Embasamento _____	19
2.3 ARCABOUÇO ESTRUTURAL/TECTÔNICO E PRINCIPAIS LINEAMENTOS DA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ _____	 22
2.3.1 Arcabouço Estratigráfico _____	23
2.4 SÍNTESE DOS PRINCIPAIS ESTUDOS GEOFÍSICOS REALIZADOS NA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ _____	 27
2.4.1 Paulipetro - Consórcio CESP/IPT _____	27
2.4.2 Outros levantamentos executados na Bacia Sedimentar do Paraná _____	30
2.5 SÍNTESE DA GEOLOGIA DO PETRÓLEO NA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ _____	 37
 CAPÍTULO 3 - GEOLOGIA DA PORÇÃO NORDESTE DA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ E ARCABOUÇO ESTRUTURAL DA ÁREA _____	   38
3.1 UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS DA ÁREA _____	38
3.1.1 Rochas do Paleozóico Superior _____	40
3.1.1.1 Grupo Itararé _____	40

3.1.1.2. Formação Tatuí _____	41
3.1.1.3 Formação Irati _____	45
3.1.1.4 Formação Corumbataí _____	47
3.1.2 Rochas Mesozóicas _____	48
3.1.2.1 Formação Pirambóia _____	48
3.1.2.2 Formação Botucatu _____	50
3.1.2.3 Formação Serra Geral e Intrusivas Básicas Associadas _____	51
3.1.2.4 Formação Itaqueri _____	52
3.1.3 Coberturas Superficiais, Terciárias e Quaternárias _____	53
3.1.3.1 Formação Rio Claro _____	53
3.1.3.2 Coberturas Superficiais Indiferenciadas _____	55
3.2 - QUADRO TECTÔNICO DA ÁREA – ÊNFASE NOS ALTOS ESTRUTURAIS	57
3.2.1 Estrutura de Pitanga _____	59
3.2.2 Estrutura de Artemis _____	61
3.2.3 Estrutura de Pau D’ Alho _____	62
3.2.4 Estrutura de Jibóia _____	63
3.3 CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DOS ALTOS DE PITANGA, ARTEMIS, PAU D’ALHO E JIBÓIA NA REGIAO DE ESTUDO _____	64
3.3.1 Estrutura de Pitanga _____	65
a) Sistema de Falhas Passa Cinco – Cabeça _____	65
b) Sistema de Falhas Ipeúna – Piracicaba _____	66
3.3.2 Estrutura de Artemis _____	66
3.3.3 Estrutura do Pau D’Alho _____	67
3.3.4 Estrutura de Jibóia _____	67
<b>CAPÍTULO 4 - GRAVIMETRIA, MAGNETOMETRIA E SISTEMA GPS</b>	
<b>DIFERENCIAL - FUNDAMENTOS TEÓRICOS E CARACTERÍSTICAS DE CADA</b>	
<b>MÉTODO _____</b>	<b>69</b>
4.1 PRINCIPAIS FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO MÉTODO GRAVIMÉTRICO _____	70
4.1.1 Tratamento dos Dados Gravimétricos (Redução) _____	72
4.1.1.1 Efeitos de Maré ou Luni – Solares _____	74
4.1.1.2 Correção da Deriva Instrumental (C <sub>D</sub> ) _____	75
4.1.1.3 Correção de Latitude (CL) _____	75
4.1.1.4 Correção Ar livre (Free - Air) _____	76

4.1.1.5 Correção Bouguer	76
4.1.1.6 Correção Topográfica	78
4.2 PRINCIPAIS FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO MÉTODO	
MAGNETOMÉTRICO	79
4.2.1 Fundamentos e Teoria	79
4.2.1.1 Momento e Força Magnética	80
4.2.1.2 Campo Magnético e Indução Magnética	81
4.2.1.3 Potencial Magnético	82
4.2.1.4 O Campo Magnético Terrestre	83
4.2.1.5 O IGRF e Perturbações do Campo Magnético Terrestre	85
4.2.1.6 Magnetismo dos Materiais	87
a) Magnetização das Rochas	87
4.2.1.7 Suscetibilidade de Rochas e Minerais	89
4.3 PRINCIPAIS CORREÇÕES APLICADAS AOS DADOS MAGNETOMÉTRICOS	89
4.3.1 Correção da Variação Diurna	91
4.3.2 Correção Topográfica	91
4.3.3 Correções de Latitude	92
4.3.4 Filtragem dos Dados	92
4.3.5 Remoção do IGRF	92
4.4 PRINCIPAIS TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO APLICADAS AOS	
MÉTODOS GEOFÍSICOS POTENCIAIS	92
4.4.1 Técnicas de Processamento de Sinais e Aplicação de Filtros	93
4.4.2 Análise Fourier no Domínio do Tempo e a Transformada Rápida de Fourier	94
4.5 O GPS DIFERENCIAL, PRINCIPAIS FUNDAMENTOS E CARACTERÍSTICAS	95
4.5.1 Principais características do Método de Processamento Diferencial	96
4.5.1.1 Fatores Limitantes	96
4.5.1.2 Fatores que Afetam a Precisão DGPS Pós-Processada	97
CAPÍTULO 5 - AQUISIÇÃO DE DADOS - CAMPANHAS DE CAMPO DE GRAVIMETRIA, GPS DIFERENCIAL E MAGNETOMETRIA	100

5.1 GRAVIMETRIA - LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO BASE E PECULIARIDADES DO LEVANTAMENTO _____	101
5.2 CARACTERÍSTICAS DO LEVANTAMENTO GRAVIMÉTRICO EXECUTADO POR GPS DIFERENCIAL _____	104
5.2.1 Estação base de referência usada na correção GPS diferencial _____	104
5.3 MAGNETOMETRIA – LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO BASE E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO LEVANTAMENTO _____	108
5.3.1 Correção Diurna _____	109
<b>CAPÍTULO 6 - MAPAS GRAVIMÉTRICOS, MAGNETOMÉTRICOS, PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DOS DADOS GEOFÍSICOS _____</b>	<b>113</b>
6.1 – PRINCIPAIS PROCEDIMENTOS NA ELABORAÇÃO DOS MAPAS _____	116
6.1.1 Processamento no domínio do tempo – Transformada <i>Fourier</i> _____	117
6.1.2 Mapas dos Resultados Gravimétricos _____	120
6.1.2.1 Processamento no Domínio do Tempo Aplicado aos dados gravimétricos _____	122
a) A filtragem Passa - Banda _____	123
6.1.3 Mapas dos dados Magnetométricos _____	125
6.1.3.1 Processamento no Domínio do Tempo Aplicado aos dados magnetométricos _____	127
a) A Filtragem Passa-Banda _____	128
b) Mapa de Amplitude do Sinal Analítico _____	130
<b>CAPÍTULO 7 – MODELAGEM GRAVIMÉTRICA E MAGNETOMÉTRICA, ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS _____</b>	<b>132</b>
7.1 - CONCEITOS BÁSICOS DA MODELAGEM E DO PROGRAMA UTILIZADO _____	132
7.1.1 Modelagem 2 ½ D _____	133
7.1.2 Base computacional usada nos modelos pelo GM-SYS _____	133
7.1.3 Unidades utilizadas para as propriedades magnéticas e gravimétricas _____	134
7.2 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS GERADOS - PARÂMETROS DE SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E DE DENSIDADE _____	135
7.2.1 Setor Pitanga e Artemis _____	135
7.2.3 Parâmetros de profundidades e limites sedimentos/embasamento usados na modelagem geofísica _____	149

a) Dados de sismicidade obtidos pela UNESP _____	149
b) Dados geofísicos anteriores obtidos pelo IPT _____	150
7.3 ANÁLISE DOS DADOS GEOFÍSICOS OBTIDOS E CORRELAÇÃO COM AS INFORMAÇÕES GEOLÓGICAS E ESTRUTURAIS DE SUPERFÍCIE _____	151
7.3.1 Mapas gravimétricos e magnetométricos _____	151
7.3.2 Setor Pitanga e Artemis _____	156
7.3.2.1 Setor Pitanga e Artemis; Mapa dos domínios gravimétricos e magnetométricos - principais lineamentos estruturais detectados _____	158
7.3.2.1 Setor Pau D'Alho e Jibóia; Mapa dos domínios magnetométricos - principais lineamentos estruturais detectados _____	165
CAPÍTULO 8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES _____	169
8.1 DISCUSSÃO _____	169
8.1.1 Resultados geofísicos e anomalias apresentadas nos mapas geofísicos _____	169
8.2 RESULTADOS FINAIS _____	170
8.2.1 Aquisição Geofísica _____	170
8.2.2 Feições reconhecidas e identificadas no contexto regional e local da área _____	171
8.2.3 Modelagem geofísica _____	174
8.3 CONCLUSÕES _____	174
CAPÍTULO 9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	176
APÊNDICE 1 - CONSIDERAÇÕES E ANÁLISES REFERENTES À QUALIDADE DOS DADOS PÓS-PROCESSADOS COM O GPS PATHFINDER PRO-XR _____	185
APÊNDICE 2 - FÓRMULAS DA GRAVIDADE UTILIZADAS NAS CORREÇÕES REDUÇÕES, PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DOS DADOS DESTE ESTUDO _____	193
APÊNDICE 3 – TERMINOLOGIA USADA NO MÉTODO DE AQUISIÇÃO DGPS _____	198
APÊNDICE 4 – ESTAÇÕES GRAVIMÉTRICAS E MAGNETOMÉTRICAS ADQUIRIDAS NO ESTUDO _____	199
4.1 ESTAÇÕES GRAVIMÉTRICAS _____	199
4.2 ESTAÇÕES MAGNETOMÉTRICAS _____	211

APÊNDICE 5 - TEORIA DO MÉTODO DA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER 2-D ( <i>FAST FOURIER TRANSFORM</i> ) NO TRATAMENTO DOS DADOS GRAVIMÉTRICOS E MAGNETOMÉTRICOS DESTE ESTUDO _____	223
APÊNDICE 6 – PREPARAÇÃO DO <i>GRID</i> PARA O PROCESSAMENTO FFT WINOGRAD _____	231
APÊNDICE 7 – DESCRIÇÃO DOS FILTROS UTILIZADOS NO PROCESSAMENTO DE DADOS GRAVIMÉTRICOS E MAGNETOMÉTRICOS _____	233

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de localização da área de estudo com as principais vias de acesso e de interligação das cidades. _____	6
Figura 1.2 Mapa de superfície de terreno gerados por dados de satélite SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) com as cores padrão USGS. A área de aquisição de dados deste estudo e as principais cidades são delimitadas pelo retângulo vermelho _____	7
Figura 2.1 Mapa da localização da Bacia do Paraná na América do sul (modificado de Zalán et al., 1987). _____	11
Figura 2.2 Mapa da espessura total do preenchimento da Bacia do Paraná (sedimentos e rochas ígneas pós – ordovicianas, (ZALÁN et al., 1987). _____	12
Figura 2.3 Mapa do arcabouço estrutural da Bacia do Paraná. A bacia é dominada por elementos tectônicos lineares que se orientam em três direções principais: NO-SE, NE-SO e E-O (ZALÁN et al., 1987). _____	14
Figura 2.4 Diagrama em roseta das extensões de lineamentos, obtido a partir de levantamentos aeromagnéticos na bacia. Podem ser observados dois grupos de trendes principais: NO-SE, (N45 <sup>0</sup> – 65 <sup>0</sup> O) e NE-SO (N50 <sup>0</sup> – 70 <sup>0</sup> E). Um terceiro trende, subordinado, alonga-se segundo E – O (N85 <sup>0</sup> – 95 <sup>0</sup> O). (Compilado e modificado de ZALÁN et al., 1987). _____	16
Figura 2.5 Contexto geotectônico fanerozóico da margem sul do Gondwana. Um sítio de persistente convergência entre o paleocontinente e o assoalho oceânico do Panthalassa. Os números de 1 a 4 correspondem as áreas de referência utilizadas na análise de subsidência da faixa Gondwanides. Compilado de Powell (1993) e De Wit et al. (1998), segundo a concepção de Du Toit (1927) in MILANI, 1998. _____	18
Figura 2.6 Conceitos de “núcleo Cratônico” (Cordani et al., 1984) e de rifte central (Marques et al., 1993) da Bacia do Paraná. _____	20
Figura 2.7 Estrutura do Embasamento da Bacia do Paraná. No quadro arcabouço geotectônico regional para o domínio sul-ocidental do Gondwana em parte baseado em Ramos & Vujovich (1993) in Milani (1997). Setas indicam o movimento convergente entre o continente e a litosfera do Panthalassa. _____	21
Figura 2.8 Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, com referências geográficas e profundidade do embasamento (modificado de Milani et al., 1998). _____	25



Figura 2.9 Coluna litoestratigráfica da Bacia Sedimentar do Paraná segundo Milani, 1993. _____	26
Figura 2.10 Localização das estações gravimétricas. Fonte: IAG – USP, CPRM, ON, IBGE e UFPR (Quintas, M.C.L., 1994). _____	33
Figura 2.11 Mapa da anomalia Bouguer calculada a partir dos dados observados (Quintas, 1994). _____	34
Figura 2.12 Localização dos poços exploratórios usados no estudo de Quintas, (1994). _____	35
Figura 3.1: Mapa geológico da área de estudo com a localização dos altos estruturais e principais cidades (modificado de CPRM, 2005). _____	39
Figura 3.2 Principais lineamentos e falhas condicionantes dos altos estruturais na área estudada e acima delimitada (elipses pretas): 1) Pitanga; 2) Artemis; 3) Pau D’Alho e 4) Jibóia (modificado de Sousa, 2002). _____	58
Figura 4.1 Densidades aproximadas em diferentes litologias (Adaptado de Sheriff, 1989). _____	71
Figura 4.2 Representação esquemática dos efeitos da rotação da Terra e respectivos vetores (ROBINSON & ÇORUH, 1988). _____	72
Figura 4.3 Parâmetros envolvidos na obtenção de dados gravimétricos e suas posteriores correções (modificado de Sheriff, 1989). _____	73
Figura 4.4 Perturbação Luni – Solar (SÁ, 1994). _____	74
Figura 4.5 Representação da correção Bouguer segundo Sheriff (1989). Em a) a representação da estação gravimétrica localizada na superfície do terreno e a placa com sua respectiva densidade entre o datum e a estação, em b) uma representação de uma estação gravimétrica em diferentes níveis em relação à superfície do terreno e o datum. _____	77
Figura 4.6 Efeito topográfico na redução gravimétrica (Luiz, J.G. & Silva, L.M., 1995). _____	78
Figura 4.7 Representação do momento dipolo magnético. _____	81
Figura 4.8 Simetria para o cálculo do potencial magnético _____	83
Figura 4.9 Representação esquemática do dipolo cujo campo é uma aproximação do campo magnético terrestre (LUIZ, J.G. & SILVA, L.M., 1995). _____	83
Figura 5.1 Estações gravimétricas adquiridas na área de estudo. Triângulo cinza representa a estação base da cidade de Rio Claro – SP. _____	103

Figura 5.2 Rede de estações de referencia no Brasil da Santiago e Cintra ( <a href="http://www.santiagoecintra.com.br">http://www.santiagoecintra.com.br</a> ). _____	106
Figura 5.3 Estações magnetométricas adquiridas na área de estudo, principais cidades e estradas de acesso. _____	110
Figura 5.7 Exemplo da variação diurna do campo magnético adquirido pelo magnetômetro base em um levantamento realizado na área de estudo No eixo X os horários de cada medida e no eixo Y as leituras obtidas em nT. _____	112
Figura 6.2 Espectro de potência radial dos dados da anomalia Bouguer no domínio da frequência levantados na área de estudo. Os valores observados no eixo X representam ciclos por unidade de medida usada no processamento (km). _____	119
Figura 6.4 Mapa de pontos das estações gravimétricas, principais cidades, rodovias e estradas de acesso. _____	120
Figura 6.5 Mapa dos valores calculados da anomalia Bouguer, principais cidades e estações gravimétricas. _____	121
Figura 6.6 Mapa dos valores calculados da anomalia free – air, principais cidades e estações gravimétricas. _____	122
Figura 6.7 Espectro de potencia radial das frequências no domínio do tempo com os valores de corte adotados para os valores da anomalia Bouguer (linha azul). O espectro resultante estabelecido é representado pela linha vermelha. _____	123
Figura 6.8 Mapa com os valores calculados da anomalia Bouguer submetidos a uma filtragem passa – banda. Os valores adotados para valores de corte são referentes às altas profundidades de acordo com a análise do espectro de potencia. _____	124
Figura 6.9 Mapa das estações magnetométricas levantadas ná área de estudo com as principais rodovias, estradas vicinais e drenagens. _____	125
Figura 6.10 Mapa com os valores calculados de campo magnético anômalo total (em nT). _____	126
Figura 6.11 Espectro de potencia radial das frequências no domínio do tempo com os valores de corte (linha azul) e espectro resultante (linha vermelha) estabelecidos pelo filtro. _____	128
Figura 6. 12 Mapa com os valores calculados de campo magnético anômalo total submetido à filtragem passa – banda de acordo com a análise do espectro de potencia dos dados. _____	129
Figura 6.13 Mapa com os valores de sinal analítico, calculado a partir dos dados de campo magnético anômalo total. _____	130

Figura 7.1 Seção em corte de um bloco usado como modelo, com a representação dos eixos X e Z. _____	134
Figura 7.2 Mapa geológico detalhado da área dos altos estruturais de Pitanga e Artemis com os principais lineamentos, limites das estruturas e perfis geofísicos adotados para a modelagem deste estudo (modificado de Sousa, 2002). _____	136
Fig 7.3 Seção geológica A – B com direção E –W usada na construção do modelo gravimétrico/magnetométrico A -B _____	138
Fig 7.4 Modelo gravimétrico/magnetométrico A – B. Os pontos representam os valores observados no campo e a linha continua a curva calculada. _____	139
Fig 7.5 Seção geológica C – D com direção N –S usada na construção do modelo C - D. _____	140
Fig 7.6 Modelo gravimétrico/magnetométrico C – D. Os pontos representam os valores observados no campo e a linha continua a curva calculada. _____	141
Fig 7.7 Modelo gravimétrico/magnetométrico E – F com direção NW/SE. Os pontos representam os valores observados no campo e a linha continua a curva calculada. _____	142
Figura 7.8 Modelo gravimétrico com os dados de altas profundidades da anomalia Bouguer filtrados por filtro passa-banda. Os pontos representam os valores observados no campo e a linha continua a curva calculada. _____	143
Figura 7.9 Mapa geológico detalhado da área dos altos estruturais de Pau D’Alho e Jibóia, principais lineamentos, limites das estruturas e perfis geofísicos adotados para a modelagem deste estudo (modificado de Sousa, 2002). _____	144
Fig 7.10 Seção geológica G – H com direção SW – NE usada na construção do modelo gravimétrico/magnetométrico G - H. _____	145
Figura 7.11 Modelo gravimétrico/magnetométrico com os dados das anomalias Bouguer e de sinal analítico. Os pontos representam os valores observados no campo e a linha continua a curva calculada. _____	146
Fig 7.12 Seção geológica I – J com direção SW – NE usada na construção do modelo gravimétrico/magnetométrico I - J. _____	147
Figura 7.13 Modelo gravimétrico/magnetométrico com os dados das anomalias Bouguer e de sinal analítico. Os pontos representam os valores observados no campo e a linha continua a curva calculada. _____	148

Figura 7.14 Mapa dos principais domínios e lineamentos gravimétricos observados na área estudada. Retângulos delimitam a área dos altos estruturais de Pitanga (Pta), Artemis (Art), Pau D' Alho (PD) e Jibóia (Jb).	154
Figura 7.15 Mapa dos principais domínios e lineamentos magnetométricos observados na área estudada. Retângulos delimitam a área dos altos estruturais de Pitanga (Pta), Artemis (Art), Pau D' Alho (PD) e Jibóia (Jb).	155
Figura 7.16 Mapa gerado em 3D com os valores da anomalia Bouguer. É marcante a estruturação e a presença de anomalias na região do Alto Estrutural de Pitanga e Artemis.	157
Figura 7.17 Mapa gerado em 3D com os valores magnetométricos de campo total. É marcante a estruturação e presença de anomalias na região do Alto Estrutural de Pitanga e Artemis.	157
Figura 7.18 Principais domínios e lineamentos gravimétricos observados para a área dos altos estruturais de Pitanga e Ártemis.	159
Figura 7.19 Principais lineamentos e domínios magnetométricos reconhecidos para a área dos altos estruturais de Pitanga e Ártemis.	160
Figura 7.20 Principais domínios e lineamentos magnetométricos (valores de sinal analítico) para os altos estruturais de Pitanga e Artemis.	161
Figura 7.21 Mapa em detalhe da região do Domo de Pitanga e Artemis com os principais lineamentos em superfície e rochas básicas aflorantes (Extraído em modificado de Sousa, 2002).	163
Figura 7.23 Mapa integrado para a área dos altos estruturais de Pitanga e Artemis segundo os dados geofísicos e estruturais interpretados nas figuras anteriores.	164
Com o propósito de efetuar uma comparação, partindo-se dos mapas de domínios e dos principais lineamentos magnetométricos traçados e reconhecidos, é apresentado um mapa integrado de todos os dados estruturais de superfície como as principais falhas e os lineamentos extraídos de fotos aéreas e reconhecimento geológico de superfície segundo estudos de Sousa (2002) segundo a Figura 7.27.	166
Figura 7.25 Mapa em detalhe da região dos Altos Estruturais de Pau D'Alho e Jibóia com os principais lineamentos em superfície e rochas básicas aflorantes (Extraído e modificado de Sousa, 2002).	167

Figura 7.26 Mapa em detalhe da região do Domo de Pitanga e Artemis com as principais fontes anômalas (corpo básicos) identificadas pelo mapa de sinal analítico. \_\_\_\_\_ 167

Figura 7.27 Mapa integrado para a área dos altos estruturais Pau D'Alho e de Jibóia segundo os dados geofísicos e estruturais interpretados nas figuras anteriores. \_ 168

### APÊNDICES

Figura 1.1 Perfil dos valores de altimetria (Z) adquiridos com GPS e submetidos à técnica de pós-processamento e correção diferencial (acima) e valores de altimetria resultantes das folhas topográficas 1:10.000 (abaixo). \_\_\_\_\_ 186

Figura 1.2 Mapa da área de estudo com as estações altimétricas do IBGE utilizadas na determinação da precisão e qualidade dos dados adquiridos por GPS. \_\_\_\_\_ 191

Figura 1.3 Mapa com os valores da aquisição GPS e subtraídos dos valores obtidos pelas folhas topográficas 1:10.000. \_\_\_\_\_ 192

Figura 5.1 Exemplo do comportamento do pico do número de onda no espectro conforme a profundidade de um corpo é alterada (Geosoft, 2005). \_\_\_\_\_ 225

Figura 5.2 Exemplo da redução na amplitude do espectro (Geosoft, 2005). \_\_\_\_\_ 225

Figura 5.3 Esquema que representa os três componentes principais de um espectro de potencia usado na aplicação de filtros em métodos potenciais (Geosoft, 2005). \_\_\_\_\_ 227

Figura 5.4 Exemplo de um arquivo gerado para o espectro radial da média de energia \_\_\_\_\_ 229

Figura 6.1 Remoção do trend de primeira ordem(Geosoft, 2005). \_\_\_\_\_ 232

Figura 7.1 Representação gráfica de um filtro Passa-Faixa \_\_\_\_\_ 234

Figura 7.2 Representação gráfica de um filtro Passa-Alta \_\_\_\_\_ 236

Figura 7.3 Representação gráfica de filtro Butterworth \_\_\_\_\_ 237

## LISTA DE FOTOS

Foto 3.1 Formação Itararé. Estratificações plano-paralelas e acanaladas (proximidades da fazenda Pau D’Alho). _____	41
Foto 3.2 Diamictito com seixo anguloso inserido na matriz da rocha (proximidades da fazenda Pau d’Alho). _____	42
Foto 3.3 Formação Tatuí. A mudança de coloração representa o contato com a litofácies fácies Ibicatu (Distrito de Assistência, município de Rio Claro). _____	44
Foto 3.4 Siltito denominado de “chocolate” da Formação Tatuí (Próximo a Fazenda Santa Rosa, distrito de Assistência, município de Rio Claro). _____	44
Foto 3.5 Argilito típico da Formação Irati com coloração avermelhada e manchas esverdeadas (Pedreira próxima a Rodovia Fausto Santomauro). _____	46
Foto 3.6 Contato da porção superior (Membro Assistência) com a porção inferior (Membro Taquaral). Pedreira desativada próximo a Rodovia Fausto Santomauro distrito de Assistência – Rio Claro. _____	46
Foto 3.7 Padrão de fraturamento em afloramento da Formação Corumbataí (Pedreira próximo a Rodovia Fausto Santomauro). _____	48
Foto 3.8 Afloramento da Formação Pirambóia. Rodovia Charqueada São Pedro. _	50
Foto 5.1 Estação base gravimétrica localizada em frente a Igreja Matriz de Rio Claro. _____	102
Foto 5.2 Gravímetro La Coste Romberg utilizado na aquisição das estações gravimétricas deste estudo. _____	102
Foto 5.3 Leitura do gravímetro nas aquisições das estações gravimétricas em campo. _____	103
FOTO 5.4 GPS Pathfinder Pro-XR e coletor de dados da Trimble Navigation Limited. _____	105
Foto 5.5 Preparativos para a aquisição de dados com o GPS Pathfinder Pro-XR da Trimble. _____	108
Foto 5.6 Magnetômetro de base da GEM Systems usado no estudo. _____	109
Foto 5.7 Magnetômetro móvel (Rover) usado na aquisição dos pontos magnetométricos _____	111

**APÊNDICES**

Foto 1.1 Detalhe da placa da estação altimétrica IBGE número 2859Z localizada no município de Rio Claro – S.P. \_\_\_\_\_ 186

Foto 1.2 Aquisição altimétrica com o GPS Pathfinder Pro XR na estação altimétrica IBGE número 2859Z localizada no município de Rio Claro – S.P. \_\_\_\_\_ 187

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 4.1: Suscetibilidade magnética das principais rochas e minerais. (Compilado de Telford et al., 1976).	89
Tabela 7.1 Valores de suscetibilidade magnética e de densidade usados na modelagem geofísica baseados nos valores de Telford et al., (1990).	137
Tabela 1.1 Dados das estações altimétricas do IBGE (Coordenadas horizontais em UTM).	188
Tabela 1.2 Valores altimétricos das Referências de Nível (RN's) do IBGE obtidos pelo GPS diferencial (Coordenadas horizontais em UTM).	188



## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E METODOLOGIA

---

### 1.1 INTRODUÇÃO

Desde os primeiros levantamentos geológicos realizados no Estado de São Paulo que tinham como objetivo a pesquisa de petróleo, os altos estruturais localizados na porção nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, entre os quais os altos de Pitanga, Ártemis, Pau D'Alho e Jibóia, vem despertando o interesse dos pesquisadores, uma vez que essas estruturas são testemunhos da evolução tectônica a que a região foi submetida. Dessa forma a região, e em particular essas estruturas, já foram objeto de vários estudos (Soares, 1971, Soares, 1974; Castro, 1973; Souza Filho, 1983; Riccomini, 1992; Riccomini, 1997; Sousa, 1997; Sousa, 2002), cujo enfoque principal era o seu condicionamento geológico-estrutural e tectônico.

A presente tese pretende contribuir para o conhecimento da região dos altos estruturais, em especial o Domo de Pitanga, e acrescentar conhecimento aos processos evolutivos da Bacia Sedimentar do Paraná.

### 1.2 A MOTIVAÇÃO

A Bacia Sedimentar do Paraná, por suas características evolutivas e sua grande extensão no continente Sul Americano, já foi alvo de inúmeros estudos e trabalhos. Esses estudos abrangem desde levantamentos em mega-escala de

caráter regional (levantamentos geológicos e aquisições geofísicas), até os estudos de maior detalhe.

Nas últimas décadas e ainda nos dias de hoje, importantes estudos de caráter regional que analisam o contexto geológico/estrutural da bacia e suas relações com o desenvolvimento da plataforma sul-americana são realizados. Esses estudos foram patrocinados e estimulados principalmente pelo incentivo a procura de possíveis áreas produtoras de hidrocarbonetos, impulsionados no final da década de 1970 com a criação da PAULIPETRO causando, a época, uma conseqüente mobilização de geocientistas.

Essas campanhas exploratórias de grande escala tiveram início e foram promovidas a partir da segunda metade do século XX pela Petrobras e posteriormente na década de 80, pelo então criado consórcio IPT - Paulipetro, que almejavam a busca de áreas exploratórias viáveis para o país. Até os dias atuais, apesar do grande acúmulo de conhecimento científico gerado acerca da Bacia do Paraná, áreas produtoras economicamente viáveis ainda não foram encontradas nessa bacia, salvo algumas localidades com uma produção não muito significativa.

O conhecimento científico, assim como a consolidação de teorias não é adquirido e consolidado apenas com um número de estudos ou observações acerca de um determinado objetivo ou proposição inicialmente feita. Informações obtidas e conseqüentes explicações progridem muitas vezes de forma irregular, não linear e acumulativa e, às vezes, de forma empírica, com sucessivas tentativas, reformulações ou mesmo a consolidação de teorias até o momento que essas sejam falseáveis causando, portanto, uma volta ao ponto de partida. Nas diversas áreas de conhecimento, assim como no campo das geociências, as técnicas utilizadas podem ser revistas, reavaliadas ou até mesmo refeitas sob uma nova ótica e metodologia científica.

Nos últimos anos, em especial na última década, a geofísica vem experimentando grande expansão em virtude do avanço tecnológico na área da informática. A velocidade dos microprocessadores, o surgimento de programas ou ferramentas de processamento de dados mais robustos e confiáveis, novos e modernos equipamentos usados na aquisição de dados, sistemas de informação geográfica (SIG) integrados mais refinados e confiáveis são uma expressão dessa grande otimização na área.

Levando em conta essas evoluções tanto quantitativas como qualitativas, considerou-se aqui que um levantamento geofísico realizado sob novas metodologias e técnicas de processamento pode oferecer resultados satisfatórios e de certa forma elucidativos a um determinado problema proposto. Fornece também a obtenção de resultados em determinada região onde uma escala de detalhamento é ainda inexistente.

A motivação desse estudo, leva em conta as premissas acima citadas e compreende basicamente duas características principais;

- a) A área de estudo, os altos estruturais e suas características geológico/estruturais intimamente ligadas à formação desta bacia sedimentar de proporções continentais.
- b) Utilização das técnicas de aquisição, de processamento e análise amplamente utilizadas atualmente e muito aplicadas em diversas áreas de pesquisa.

### **1.3 OBJETIVOS**

A gravimetria e a magnetometria, quando aplicadas em estudos de escala regional, fornecem indicações sobre o arranjo, relações e compartimentações entre massas crustais, que associadas às informações sobre a constituição litológica e as estruturas geológicas, constituem uma importante base para modelagens tectônicas.

O estudo da geometria de corpos arenosos potencialmente reservatórios de hidrocarbonetos pode ser feito segundo diferentes escalas; estratos individuais, conjuntos de estratos semelhantes (equivalente à fácies), e sucessão de fácies. Estudos dessa natureza foram realizados em afloramentos e sondagens realizadas na região deste trabalho pela Petrobras (SOUZA FILHO, 1983). É importante se conhecer a geometria e as feições estruturais (falhas e fraturamento) que formaram e condicionaram os principais lineamentos responsáveis pelos derrames da Formação Serra Geral e os respectivos altos estruturais correlatos, entre eles o de Pitanga, Jibóia, Artemis e Pau D`Alho.

Um levantamento gravimétrico e magnetométrico regional, em escala de semi-detalle e em conjunto com um levantamento geológico e estrutural, proporcionam informações necessárias para formular hipóteses, criar, confirmar e/ou refinar modelos propostos buscando, desta maneira, a localização de eventuais

estruturas de grande porte, as quais poderiam contribuir para a determinação dos processos evolutivos que ocorreram na área de estudo. Essa questão é controversa ainda nos dias de hoje, apesar do grande número de trabalhos publicados e estudos realizados na área, sendo todos de geologia de superfície e carecendo, portanto, de um estudo que enfoque mais as características da crosta e manto superior, nos quais essas estruturas formaram-se, evoluíram até os dias atuais.

O presente estudo visa um melhor entendimento das feições estruturais (altos estruturais) em especial do Domo de Pitanga que ocorrem no flanco nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná. Para tal estudo, serão empregados os métodos geofísicos da gravimetria e da magnetometria terrestres, que associados a informações geológico-estruturais já existentes da área, fornecem subsídios para a formulação e refinamento de modelos tectônicos que delimitem essas estruturas em sub-superfície.

De acordo com as características da região, os principais objetivos propostos para esse estudo são:

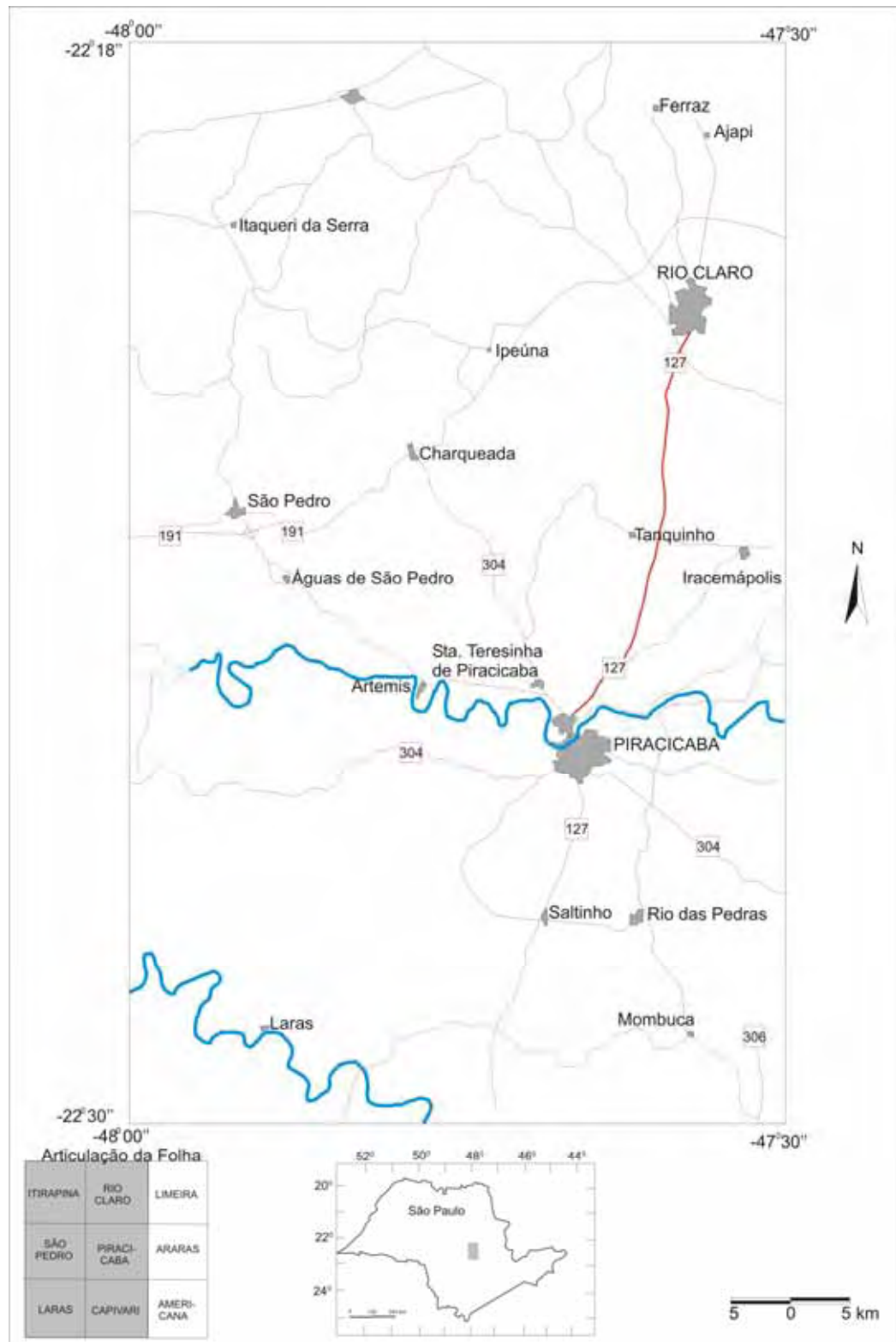
- Execução de uma campanha gravimétrica terrestre para o levantamento de estações gravimétricas. Identificar os principais gradientes gravimétricos por meio de mapas gravimétricos e executar perfis gravimétricos nas áreas de interesse (anomalias gravimétricas na área com evidências de um alto gradiente gravimétrico horizontal).
- Campanha magnetométrica terrestre para o levantamento de estações magnetométricas. Determinar o campo magnético anômalo para a região, identificar os principais gradientes magnetométricos em mapas magnetométricos e executar perfis ao longo das áreas de interesse (anomalias magnéticas na área correlacionadas aos lineamentos e principais limites das estruturas).
- Elaboração de mapas da anomalia Bouguer e da anomalia Magnética de campo total, modelos  $2^{1/2}$  D a partir de perfis perpendiculares aos principais gradientes gravimétricos e magnetométricos correlacionáveis às estruturas presentes.

- Determinação das principais anomalias gravimétricas e magnetométricas na área potencialmente correlacionáveis às feições geológicas e estruturais. Uma delimitação mais precisa dos limites e da extensão em sub-superfície do Domo de Pitanga assim como sua articulação com o embasamento da bacia;
- A elaboração de um modelo geológico estrutural para a região estudada baseado na gravimetria e na magnetometria. Delimitação das principais unidades litoestratigráficas (domínios geofísicos) e compartimentação estrutural dessas unidades na região.
- Comportamento das feições geológicas e estruturais a níveis mais profundos (crosta inferior/manto superior), identificação de possíveis lineamentos assim como a relação direta e/ou indireta destes com a formação e evolução da Bacia Sedimentar do Paraná.

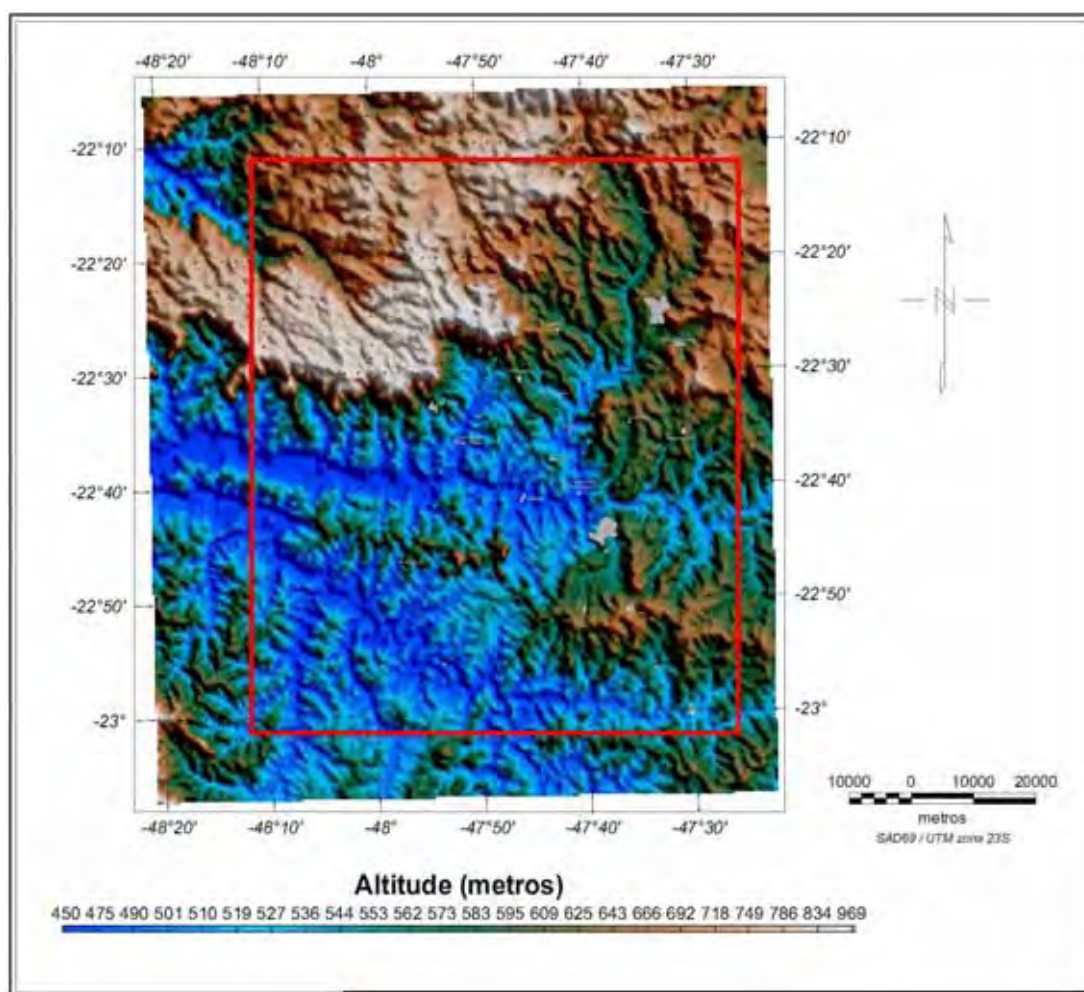
#### **1.4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

A área estudada localiza-se na porção centro-leste do Estado de São Paulo e no flanco nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, onde estão situados os conhecidos altos estruturais de Pitanga, Artemis, Pau D'Alho e Jibóia. Está compreendida entre as coordenadas 22° 15' e 23° 00' de latitude Sul e 47° 30' e 48° 00' de longitude oeste dentro da qual Piracicaba e Rio Claro são as cidades mais importantes. Abrange uma área de aproximadamente 4.000 Km<sup>2</sup>, ocupando as folhas topográficas do IBGE (escala 1:50.000) de Rio Claro, Piracicaba, Capivari, Itirapina, São Pedro e Laras (Figuras 1.1 e 1.2).

A escolha dessa área foi fortemente influenciada por possuir muitos trabalhos que abordam a evolução geológica e estrutural tais como os estudos de Riccomini (1992), Riccomini (1995), Milani (1997), Sousa (1997) e Sousa (2002) que desenvolveram um estudo aprofundado da evolução, sedimentação e da compartimentação tectono-estrutural da bacia.



**Figura 1.1** Mapa de localização da área de estudo com as principais vias de acesso e de interligação das cidades.



**Figura 1.2** Mapa de superfície de terreno gerados por dados de satélite SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) com as cores padrão USGS. A área de aquisição de dados deste estudo e as principais cidades são delimitadas pelo retângulo vermelho.

### 1.5 METODOLOGIA DE TRABALHO

Para o desenvolvimento, preparação e elaboração final desta tese foram cumpridas algumas etapas básicas. Dentre elas, as principais fases de desenvolvimento e a metodologia empregada podem ser resumidas nas seguintes etapas:

### **1.5.1 Trabalhos e aquisições de dados efetuados no campo**

- Levantamento gravimétrico terrestre conjuntamente com o posicionamento das coordenadas horizontais (X e Y) e altimétricas (Z) das estações na área de estudo (emprego do método de processamento de correção GPS diferencial).
- Levantamento magnetométrico terrestre conjuntamente com o posicionamento das coordenadas horizontais (X e Y) das estações ao longo de toda a área de estudo.
- Levantamento com equipamento GPS diferencial ao longo de estações pré-determinadas do IBGE (RN's) localizadas em cidades distribuídas em toda área da pesquisa. As correções visaram conferir a viabilidade do sistema GPS quanto à precisão dos dados altimétricos.

### **1.5.2 Trabalhos de escritório**

- Pesquisa bibliográfica sobre a área, com dados de levantamentos geológicos/estruturais anteriores, levantamentos gravimétricos, magnetométricos e outros estudos geofísicos realizados.
- Pós – processamento diferencial dos dados obtidos em campo com programa apropriado ou também denominada de técnica DGPS.
- Redução e processamento dados adquiridos em campo com o gravímetro e o magnetômetro através de programas apropriados.
- Eventuais correções e reprocessamentos dos dados para o cálculo dos valores das anomalias gravimétricas e magnetométricas e consistência dos dados.



- Elaboração de mapas de curvas de contorno dos isovalores dos dados gravimétricos e magnetométricos
- Elaboração de mapas, perfis e diagramas (geológicos e geofísicos).
- Modelagem dos dados geofísicos magnetométricos e gravimétricos em modelo  $2^{1/2}$  D por meio de programa apropriado.
- Integração dos dados estruturais e geofísicos e geração de mapas interpretativos dos dados.

## CAPÍTULO 2 - EVOLUÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR E GEOLOGIA REGIONAL DA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ

---

### 2.1 INTRODUÇÃO

A Bacia Sedimentar do Paraná é uma vasta bacia intracratônica sul-americana, desenvolvida completamente sobre a crosta continental e preenchida por rochas sedimentares e vulcânicas, cujas idades variam entre o Siluriano e o Cretáceo. É uma vasta região de sedimentação situada na porção centro – oriental da América do Sul que evoluiu durante o Paleozóico e o Mesozóico e abriga um registro estratigráfico temporalmente posicionado entre o Neo – Ordoviciano e o Neocretáceo, documentando assim quase 400 milhões de anos da história geológica fanerozóica dessa região (MILANI, 1997).

O nome da bacia é devido ao rio Paraná, que corre paralelo ao seu eixo maior, na direção NNE – SSW, por 1.500 km até alterar a sua direção para leste – oeste, cruzando o arco de Assunção e formando a fronteira entre o Paraguai e a Argentina (Bacia Chaco – Paraná).

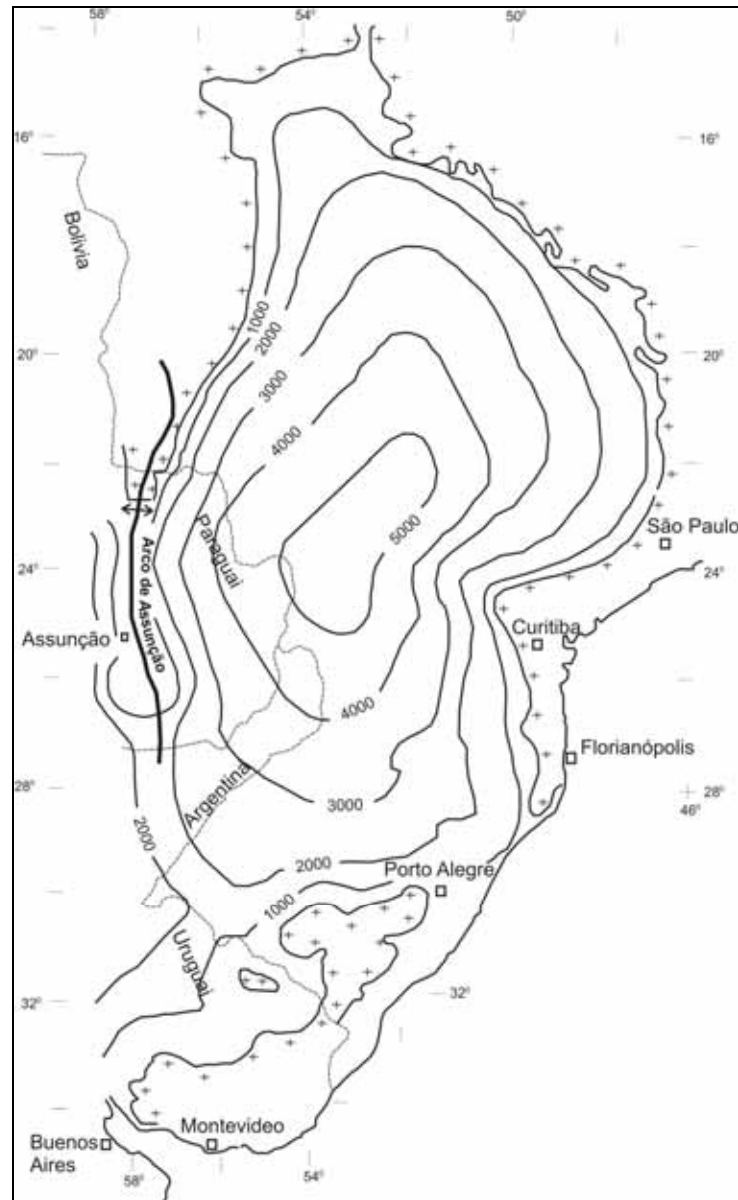
De acordo com Zalán et al. (1990), a Bacia do Paraná compreende a parte meridional do Brasil, a metade oriental do Paraguai, a região mesopotâmica da Argentina e a metade ocidental do Uruguai. Possui uma área de 1,1 milhões de km<sup>2</sup>, a metade oriental do Paraguai com 100 mil km<sup>2</sup>, parte da Argentina, 100 mil km<sup>2</sup>, e Uruguai, com 100 mil km<sup>2</sup>, totalizando aproximadamente, 1,4 milhões de km<sup>2</sup>.

A bacia tem um formato alongado na direção NNE – SSW, com aproximadamente 1.750 km de comprimento e largura média de 900 km (Figura 2.1).



**Figura 2.1** Mapa da localização da Bacia do Paraná na América do sul (modificado de Zalán et al., 1987).

Apresenta derrames de lavas basálticas em dois terços da porção brasileira, que podem atingir até 1.700m de espessura os quais somados aos *sills*, chegam até 2.000 metros de espessura de rochas ígneas. Os valores máximos de espessura de rochas sedimentares e vulcânicas são em torno de 8.000m no centro geométrico da bacia (Figura 2.2).



**Figura 2.2** Mapa da espessura total do preenchimento da Bacia do Paraná (sedimentos e rochas ígneas pós – ordovicianas, segundo Zalán et al., 1987).

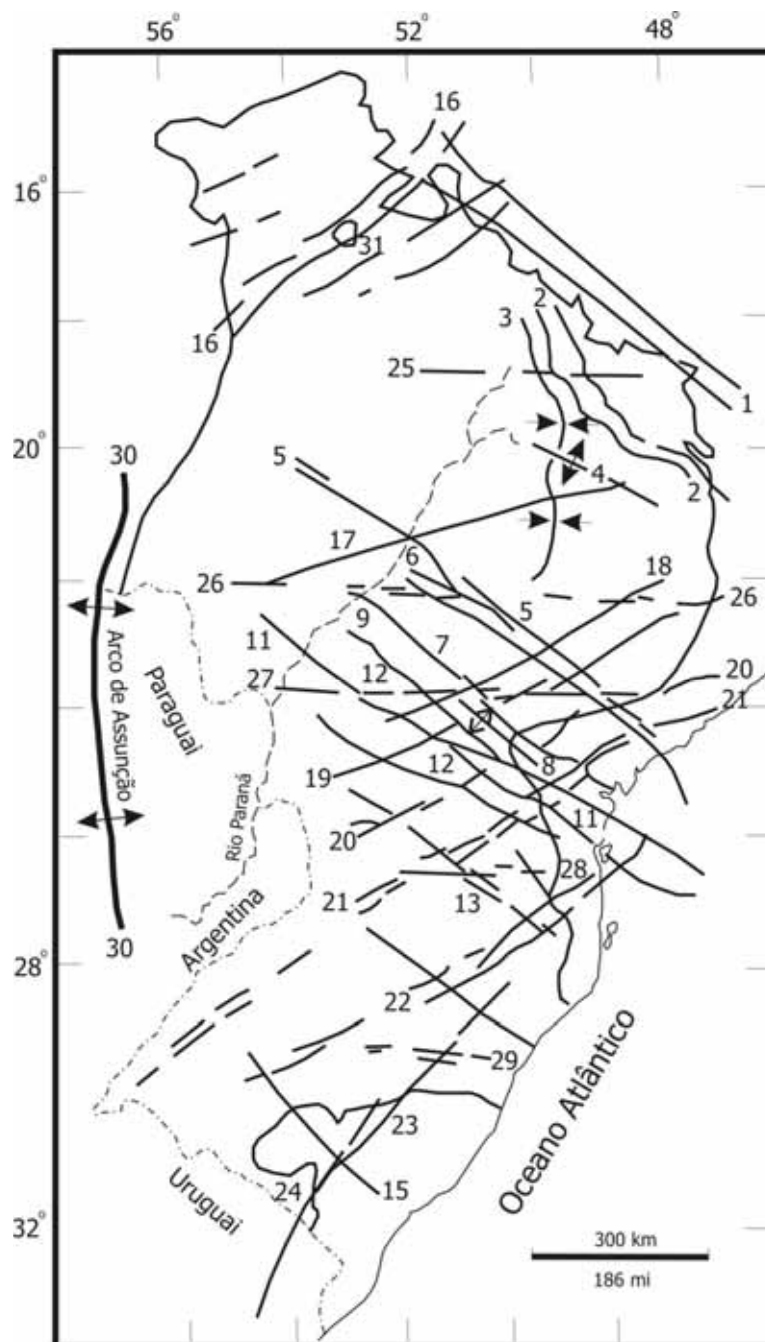
O conjunto de rochas sedimentares e vulcânicas que constituem a Bacia do Paraná representa a superposição de pacotes depositados, no mínimo, em três diferentes ambientes tectônicos, decorrentes da dinâmica das placas que conduziu a evolução do Gondwana no tempo geológico. Por isso, sua forma é muito variável no tempo, sendo que a configuração atual não retrata com nitidez aquilo que já foi um grande mar, diretamente conectado com o oceano Pacífico paleozóico, e cobrindo uma extensa área do continente Gondwânico, hoje fragmentado em vários pedaços (América do Sul, África, Antártica, Madagascar, Austrália e Índia).

Os limites atuais da bacia podem ser de mera natureza erosional ou de origem tectônica (grandes arcos ou soerguimentos). No caso da borda nordeste da bacia, entre a zona de falha de Guapiara e o arco de Goiânia/Alto Paranaíba, os sedimentos simplesmente afinam ou são suavemente afinados por erosão, sem a interferência de qualquer atividade tectônica maior. O limite noroeste da bacia é o cinturão de dobramentos do Paraguai/Araguaia de idade Pré-Cambriano Superior/Ordoviciano, o qual, provavelmente agiu como barreira topográfica para a sedimentação (ZALÁN et al., 1987).

A borda oeste representa um caso de erosão mais comum, decorrente de grandes arcos ou soerguimentos, representado pelo Arco de Assunção. O Arco de Assunção é uma extensa flexura do embasamento, com direção N-S, que atravessa o Paraguai e a parte ocidental do estado do Mato Grosso do Sul. Esta feição foi criada no início da história da Bacia do Paraná, provavelmente no Devoniano Inferior, como resposta flexural da crosta aos primeiros movimentos orogênicos da margem ocidental da América do Sul (Figura 2.3).

Ao serem empurrados e empilhados, os pacotes de rocha da margem convergente da América do Sul geraram um arco flexural situado mais ao interior do continente. Sua presente localização é uma resposta aos eventos orogênicos do Mesozóico/Cenozóico, sendo que seu eixo deve ter migrado com o tempo, provavelmente de oeste para leste.

O limite norte da bacia é o arco de Goiânia/Alto Paranaíba, com direção NW, que é outra flexura crustal com forte resposta aeromagnética, ao longo do qual foram intrudidos vários corpos alcalinos e kimberlíticos. Outros dois arcos de direção NW são de extrema importância na configuração da Bacia do Paraná (Figura 2.3).



**Figura 2.3** Mapa do arcabouço estrutural da Bacia do Paraná. A bacia é dominada por elementos tectônicos lineares que se orientam em três direções principais: NO-SE, NE-SO e E-O (ZALÁN et al., 1987).

**Direção NO:** 1- Arco do Alto Paranaíba; 2- Flexura de Goiânia; 3- Baixo de Ipiaçú/Campina Verde; 4- Alto de Cardoso; 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:** **16-** Zona de falha Transbrasiliano (também conhecido por Lineamento Transbrasiliano); **17-** Lineamento de Araçatuba; **18-** Falha de Guaxupé; **19-** Zona de falha Lancinha-Cubatão; **22-** Zona de falha Blumenau-Soledade; **23-** Falha do Leão; **24-** Falha de Açotea. **Direção E-O:** **25-** Lineamento de Cassilândia; **26-** Lineamento Moji-Guaçu-Dourados; **27-** Lineamento de São Sebastião; **28-** Lineamento de Taquara Verde; **29-** Lineamento de Bento Gonçalves. A única estrutura importante com direção N-S é o Arco de Assunção (30). O domo da Araguainha (31) é um dos maiores astroblemas conhecidos do mundo (ZALÁN et al., 1987).

O arco de Ponta Grossa criou uma notável reentrância na borda oriental da bacia, no estado do Paraná, enquanto que o arco do Rio Grande originou uma reentrância similar no estado do Rio Grande do Sul. A extensão noroeste do arco do Rio Grande se une a uma ramificação do Arco de Assunção, formando o limite meridional da bacia. Todos esses arcos possuem respostas aeromagnéticas expressivas (Figura 2.4), o que indicaria a presença de espessos diques de diabásio, derivados do manto, que teriam sido os alimentadores dos derrames mesozóicos (ZALÁN et al., *op. cit.*).

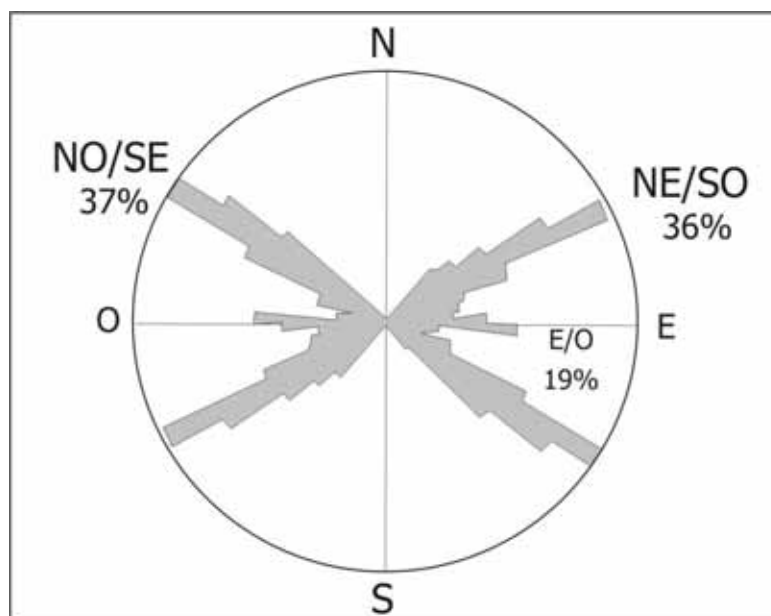
Os primeiros trabalhos científicos sobre a Bacia do Paraná remontam ao século passado. Desde então, muitos trabalhos sobre sua geologia foram publicados por órgãos técnicos públicos estaduais e federais, universidades, companhias de mineração, petróleo e pesquisadores. É a mais bem estudada das bacias cratônicas brasileiras.

## **2.2 EVOLUCAO E DESENVOLVIMENTO DA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ**

### **2.2.1 A Bacia do Paraná como entidade Geotectônica**

A Bacia do Paraná, em função de aspectos inerentes ao seu posicionamento atual e a suas características tectono-sedimentares é considerada uma típica bacia intracratônica. Essa classificação é referente a um sítio de acumulação de

sedimentos no interior do cráton ou plataforma, unidade geotectônica relativamente imóvel da Terra e geralmente de grande dimensão.



**Figura 2.4** Diagrama em roseta das extensões de lineamentos, obtido a partir de levantamentos aeromagnéticos na bacia. Podem ser observados dois grupos de *trends* principais: NO-SE, ( $N45^{\circ} - 65^{\circ} O$ ) e NE-SO ( $N50^{\circ} - 70^{\circ} E$ ). Um terceiro *trend*, subordinado, alonga-se segundo E – O ( $N85^{\circ} - 95^{\circ} O$ ). (Compilado e modificado de ZALÁN et al., 1987).

De acordo com Almeida (1981), a bacia apresentou dois períodos maiores em sua evolução, subdivisíveis em menores fases. Durante o primeiro, entre o Paleozóico e o Jurássico Superior, evoluiu tectonicamente como tantas outras bacias intracratônicas discordantes de interior remoto, do tipo sinéclise. A partir do Jurássico Superior os processos da Reativação Wealdeniana ligados ao início da abertura do Oceano Atlântico, modificaram profundamente as características da bacia, transformando-a numa anfíclise, na qual os processos magmáticos e tectônicos sobrepujaram amplamente os sedimentares (ALMEIDA, *op. cit.*).

Milani & Ramos (1998), argumentam que os mecanismos de subsidência de sinéclises cratônicas são ainda muito controversos e muito pouco compreendidos. Uma vez que tais regiões situam-se distantes de margens de continentes, desta



forma estando desacopladas de mecanismos tectônicos originados pela interação de placas, a origem e o desenvolvimento de bacias intracratônicas são freqüentemente explicados por combinações de uma ampla área e reajustes isostáticos tardios processos de precário controle geológico-geofísico. O fato de situar-se no interior de um continente não significa necessariamente uma condição permanente e imutável desde sua implantação.

### **2.2.2 Influência do Embasamento no Comportamento Geotectônico**

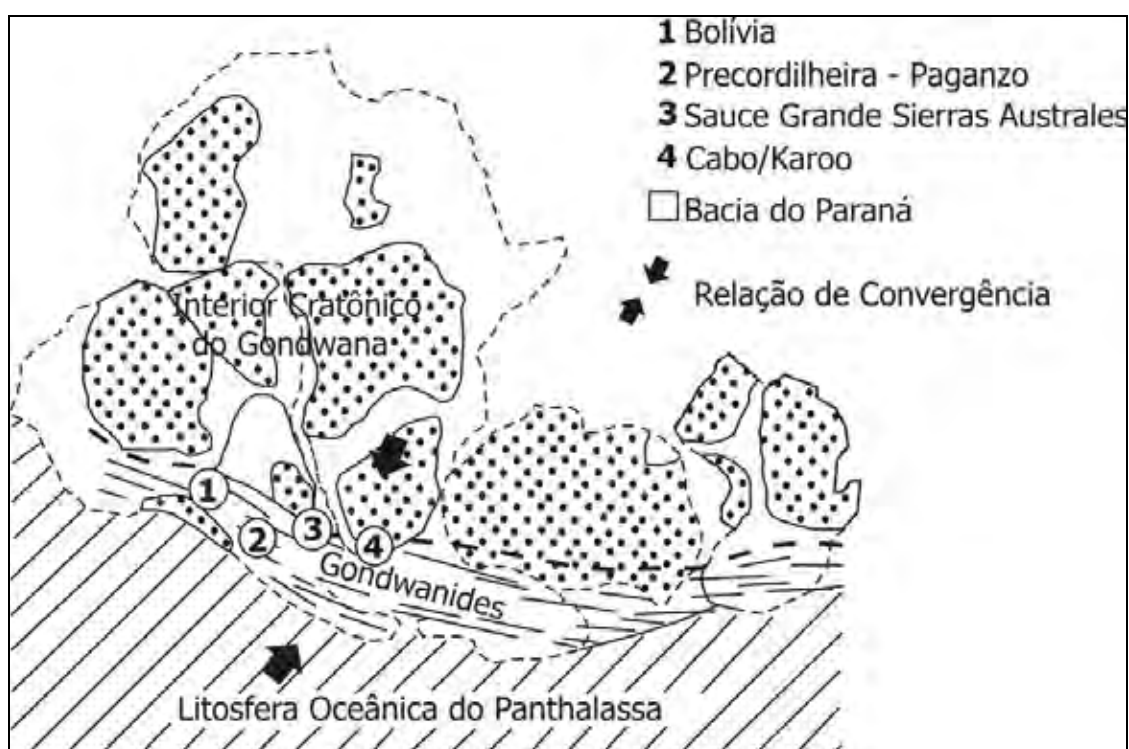
Para Almeida (1981), encerrado o ciclo Brasileiro, o sítio aonde viria a se desenvolver a Bacia do Paraná apresentava-se constituído de faixas móveis originadas ou retrabalhadas nesse ciclo e outras áreas, os crátons pré – Brasileiros, que nele haviam sido grandemente poupados pela tectonogênese e processos correlatos. A Bacia do Paraná no Brasil desenvolveu-se em maior parte sobre áreas do domínio Brasileiro, cujas direções estruturais aproximadamente coincidem, em longos trechos, com os limites erosivos atuais da bacia.

Há muito se sabe que linhas de fraqueza, pré-existentes no embasamento de uma bacia, constituem os elementos mais importantes em sua evolução, que ao serem reativadas durante fases tectônicas posteriores, controlam e determinam os falhamentos subseqüentes (FULFARO et al., 1982).

Segundo Fulfaro et al.(op. cit.), a Bacia do Paraná implantou-se na Plataforma Sul Americana, em um embasamento cratônico consolidado no Cambro-Ordoviciano e sobre zonas de fraqueza NW-SE, herdadas de aulacógenos tardios aí desenvolvidos após a cratonização da área. A idade referida para a consolidação e evolução final do embasamento da Bacia do Paraná, está ligada a evolução dos grupos Açungui, Castro (Faixa de dobramentos do Brasil-Sudeste), pertencente ao ciclo de reativação Brasileiro, estendendo-se do Pré-Cambriano Superior ao Eopaleozóico, portanto, o mais jovem de nossa plataforma. Pelo menos até o Cambro-Ordoviciano, o embasamento da Bacia do Paraná ainda estava em estágio de formação ou cratonização, com movimentação essencialmente vertical e, portanto, impedido de receber sedimentação de caráter cratônico.

Segundo Milani & Ramos (1998), dois domínios distintos devem ser considerados ao se analisar a tectônica e a sedimentação do denominado continente Gondwana sul – ocidental; uma porção cratônica correspondente ao

núcleo do paleo - continente e constituída por um complexo mosaico de blocos crustais aglutinados e ligados entre si até o cambriano e do outro lado os Gondwanides, uma extensa faixa de orógenos do Fanerozóico e bacias associadas distribuídas ao longo da margem meridional do Gondwana. (Figura 2.5).



**Figura 2.5** Contexto geotectônico fanerozóico da margem sul do Gondwana. Um sítio de persistente convergência entre o paleocontinente e o assoalho oceânico do Panthalassa. Os números de 1 a 4 correspondem às áreas de referência utilizadas na análise de subsidência da faixa Gondwanides. Compilado de Powell (1993) e De Wit *et al.* (1998), segundo a concepção de Du Toit (1927) in MILANI, 1998.

Portanto a bacia desenvolveu-se sobre o Gondwana cratônico, mas ao lado da zona móvel dos Gondwanides, experimentando assim uma influência dos esforços compressivos originados pela convergência de placas ao longo da faixa de colisão.

Segundo Fulfaro *et al.* (1982), ao final da cratonização da faixa de dobramentos da região sul e sudeste da Plataforma Sul Americana, desenvolveram-se aulacógenos tardios de direção preferencial NW-SE, preenchidos com sedimentação de alta energia do tipo molássico. Diferem esses sedimentos dos

depósitos de caráter similar, desenvolvidos nas bacias intermontanas da fase final de evolução da faixa de dobramentos do Pré-Cambriano Superior por estarem estes últimos dobrados e levemente metamorfoseados, além de se associar a manifestações vulcânicas de caráter ácido-intermediário.

### 2.2.3 Embasamento

Milani & Ramos (1998) argumentam que o desenvolvimento da bacia se deu sobre um embasamento cratônico do Gondwana, mas ao lado da zona móvel dos Gondwanides, experimentando assim uma influência dos esforços compressivos originados pela convergência de placas ao longo da colisão.

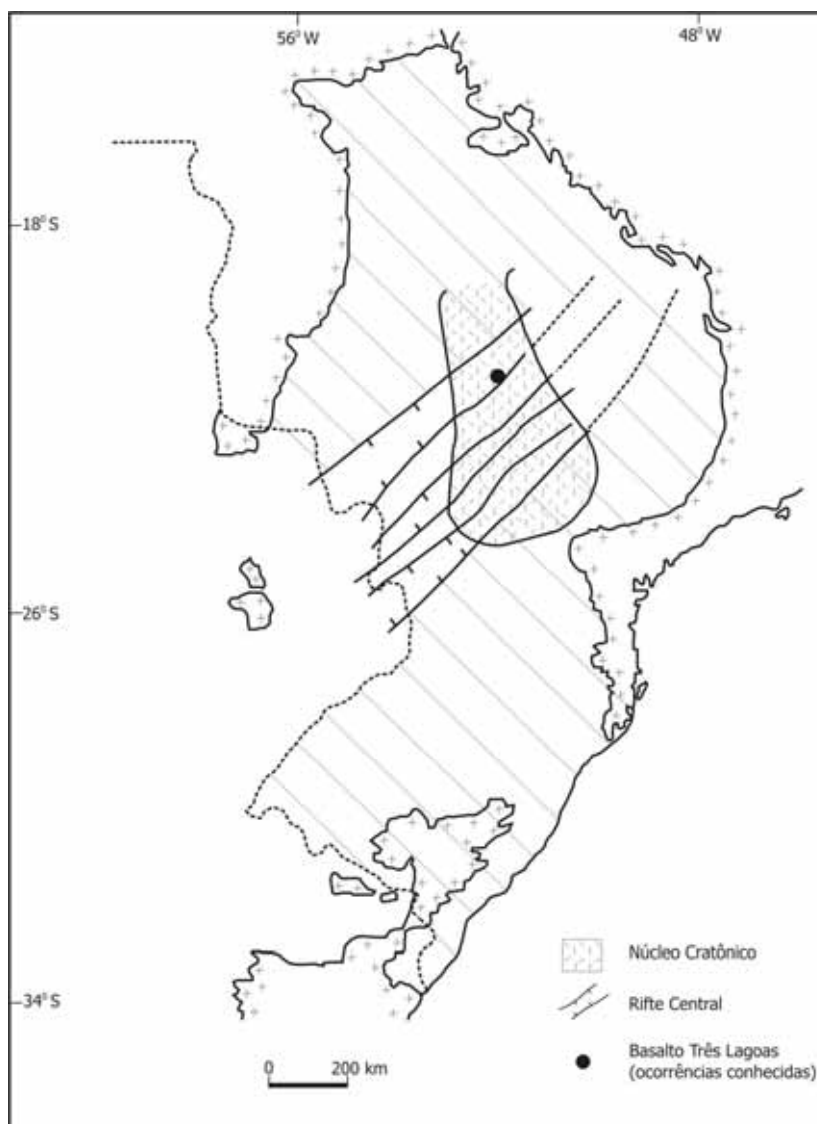
O pacote de sedimentos que constitui a Bacia Sedimentar do Paraná foi então depositado, segundo Zalan et al. (1990), sobre uma vasta área do então recém construído continente do Gondwana. Tal supercontinente era, então, composto por vários núcleos cratônicos (terrenos granulíticos e de granitos *-greenstones*), rodeados por vários cinturões móveis orogênicos (rochas meta-sedimentares dobradas e empurradas, granitos e faixas de crátons isotopicamente remobilizadas) e dispersamente cobertos por remanescentes de bacias de antepaís, de natureza molássica, todos formados durante o ciclo Brasileiro (Proterozóico Superior a Ordoviciano).

Cordani et al. (1984), Zalán et al. (1990) e Soares, (1991), descrevem em estudo com maior detalhe o embasamento da Bacia do Paraná através de dados de poços que atingiram a seção pre-siluriana. Este estudo suporta a existência de um núcleo cratônico no centro da bacia (Figura 2.6), ao redor do qual se desenvolveram os cinturões móveis.

Uma cobertura gravimétrica ainda escassa impossibilita confirmar essa hipótese da existência de um Rifte central inicial que estivesse associado à origem e ao desenvolvimento da Bacia sedimentar do Paraná. Tal hipótese, entretanto, não pode ser descartada (CORDANI et al., 1984).

Linhas sísmicas de reflexão recentes na parte central da bacia mostram reflexões inclinadas a 7 km de profundidade. A origem da Bacia do Paraná deve estar, de algum modo, relacionada ao fim do ciclo Brasileiro (Neo-Ordoviciano), que deixou exposto um expressivo volume aquecido de crosta continental recém agrupada. Provavelmente, os subseqüentes arrefecimentos dos esforços,

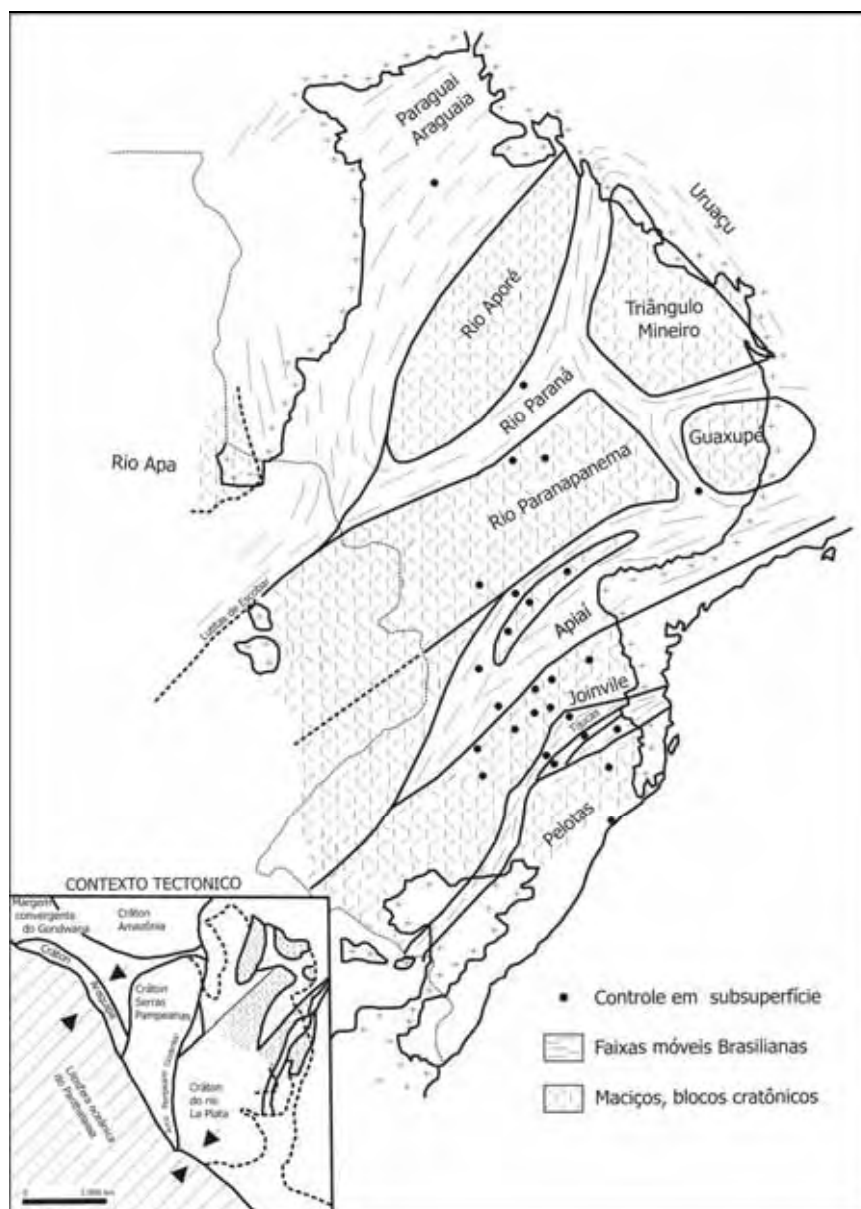
juntamente com o esfriamento da crosta, foram suficientes para iniciar a subsidência que levou a deposição da seqüência siluriana (ZALÁN, 1990).



**Figura 2.6** Conceitos de “núcleo Cratônico” (Cordani et al., 1984) e de rifte central (Marques et al., 1993) da Bacia do Paraná.

A maior parte da evolução estratigráfica - estrutural da Bacia do Paraná foi controlada por *trends* herdados desse embasamento. Tal conjunto de crátons e de faixas móveis contém um surpreendente número de zonas de fraqueza, as quais cruzam o embasamento, partindo-o em centenas de megablocos, blocos e sub-

blocos. Estas zonas de fraqueza pré-existentes seriam as principais dissipadoras dos esforços intraplaca, permitindo, ao longo delas, movimentações de blocos tanto verticais como horizontais (Figura 2.7).



**Figura 2.7** Estrutura do Embasamento da Bacia do Paraná. No quadro arcabouço geotectônico regional para o domínio sul-ocidental do Gondwana em parte baseado em Ramos & Vujovich (1993) in Milani (1997). Setas indicam o movimento convergente entre o continente e a litosfera do Panthalassa.

### 2.3 ARCABOUÇO ESTRUTURAL/TECTÔNICO E PRINCIPAIS LINEAMENTOS DA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ

Zalán et al. (1987) argumentam que nos principais lineamentos da Bacia do Paraná existe um marcante padrão das feições lineares em forma de X. Estas feições podem ser divididas em três grupos, de acordo com suas orientações NW-SE, NE-SW, E-W. As duas orientações mais importantes são de direção NW-SE e NE-SW, que podem constituir falhas simples ou extensas zonas de falhas (centenas de quilômetros de comprimento e poucas dezenas de quilômetros de largura). Estes dois grupos de elementos tectônicos são zonas de fraqueza antigas que foram recorrentemente ativas durante a evolução da bacia.

Este mesmo padrão de elementos tectônicos com orientação NW e NE é reconhecido por Soares et al. (1982) em um estudo detalhado de imagens LANDSAT e de radar da parte central e oriental da bacia.

Esses autores argumentam que essas zonas estruturais representariam áreas com maior mobilidade tectônica em comparação às áreas adjacentes. Várias dessas “zonas móveis” coincidem com as que foram mapeadas pelos autores com base em dados aeromagnéticos (Zalán et al., *op. cit.*; Soares et al., 1982), também concluíram que estes elementos representam zonas de fraqueza do embasamento, que vários deles controlaram a sedimentação durante a evolução da bacia e que as zonas com *trend* NW estão intensivamente preenchidas por diques de diabásio, enquanto *trends* NE são notavelmente carentes dessas feições. Zalán et al. (1990) demonstraram que os *trends* NW e NE ocorrem em toda a bacia, tendo confirmado também a existência de um importante terceiro grupo de lineamentos com orientação E-W.

A origem do lineamento NW, segundo Zalán et al. (1990), é mais nebulosa, contudo, várias evidências indicam que eles sejam, pelo menos tão antigos quanto os lineamentos NE, de idade Brasileira; provavelmente até mais velhos. A orientação NW-SE da faixa Uruaçu (mais antiga que o Brasileiro) é uma destas evidências.

O padrão estrutural atual de cada um destes grupos é diferente, principalmente porque as falhas com orientação NW foram fortemente reativadas durante o quebramento juro-cretáceo do Gondwana enquanto as de direção NE não o foram. Este evento tectônico do juro-cretáceo foi o mais forte dentre aqueles que,

de alguma maneira, afetaram a Bacia do Paraná. Ele reativou vigorosamente as falhas NW pré-existentes criando provavelmente várias outras paralelas a esta direção, promovendo o condicionamento de milhares de corpos ígneos intrusivos e a extrusão do mais volumoso derrame de lavas do planeta. O peso das lavas pressionou a crosta causando uma terceira e importante fase de subsidência da bacia (ZALÁN et al., *op. cit.*).

O padrão estrutural das zonas de falha NE é diferente e são constituídas ou por uma única falha larga ou por uma zona de falha retilínea. Ocorre em geral uma ausência significativa de diques e, conseqüentemente, das deformações associadas a eles. Entretanto, estruturas relacionadas a movimentações transcorrentes são muito mais comuns ao longo dos lineamentos NE, embora também sejam freqüentes ao longo dos lineamentos NW.

Lineamentos de direção E – W de acordo com Zalán et al. (*op. cit.*), são pouco compreendidos na Bacia do Paraná. Eles podem ser detectados em mapas aeromagnetométricos e imagens LANDSAT. Seu desenvolvimento teve início a partir do Triássico. Esta idade, aliada ao seu paralelismo, mas não coincidente, com as zonas de fratura oceânicas, sugerem uma ligação com o desenvolvimento do Atlântico Sul.

### **2.3.1 Arcabouço Estratigráfico**

Almeida (1980) e Zalán et al. (1990) argumentam que o pacote de rochas sedimentar e vulcânico que constituem a Bacia do Paraná representa a superposição de no mínimo, três bacias diferentes, cujas geometrias e limites variam de uma para a outra, em decorrência do movimento das placas que conduziu a evolução do Gondwana no tempo geológico. A primeira bacia corresponde às seqüências siluriana e devoniana e teria sido depositado em um golfo aberto para o paleo-oceano Pacífico. A segunda, que corresponde à seqüência permocarbonífera, típica de sinéclise continental, desenvolveu-se em mar interior. A fase de erupção das lavas corresponderia a “terceira bacia” do Paraná.

A primeira seqüência amplamente depositada nas três bacias é denominada, segundo Soares (1974) de Seqüência gama, de idade Devoniana. Essa seqüência corresponde a o Grupo Paraná e à Série Campos Gerais de Gama Jr. et al. (1982) e constitui o primeiro evento sedimentar de caráter basinal. Esta sedimentação tem

início no Devoniano Médio, depositando-se sobre um embasamento consolidado no Cambro-Ordoviciano e com grande denudação durante o Siluriano.

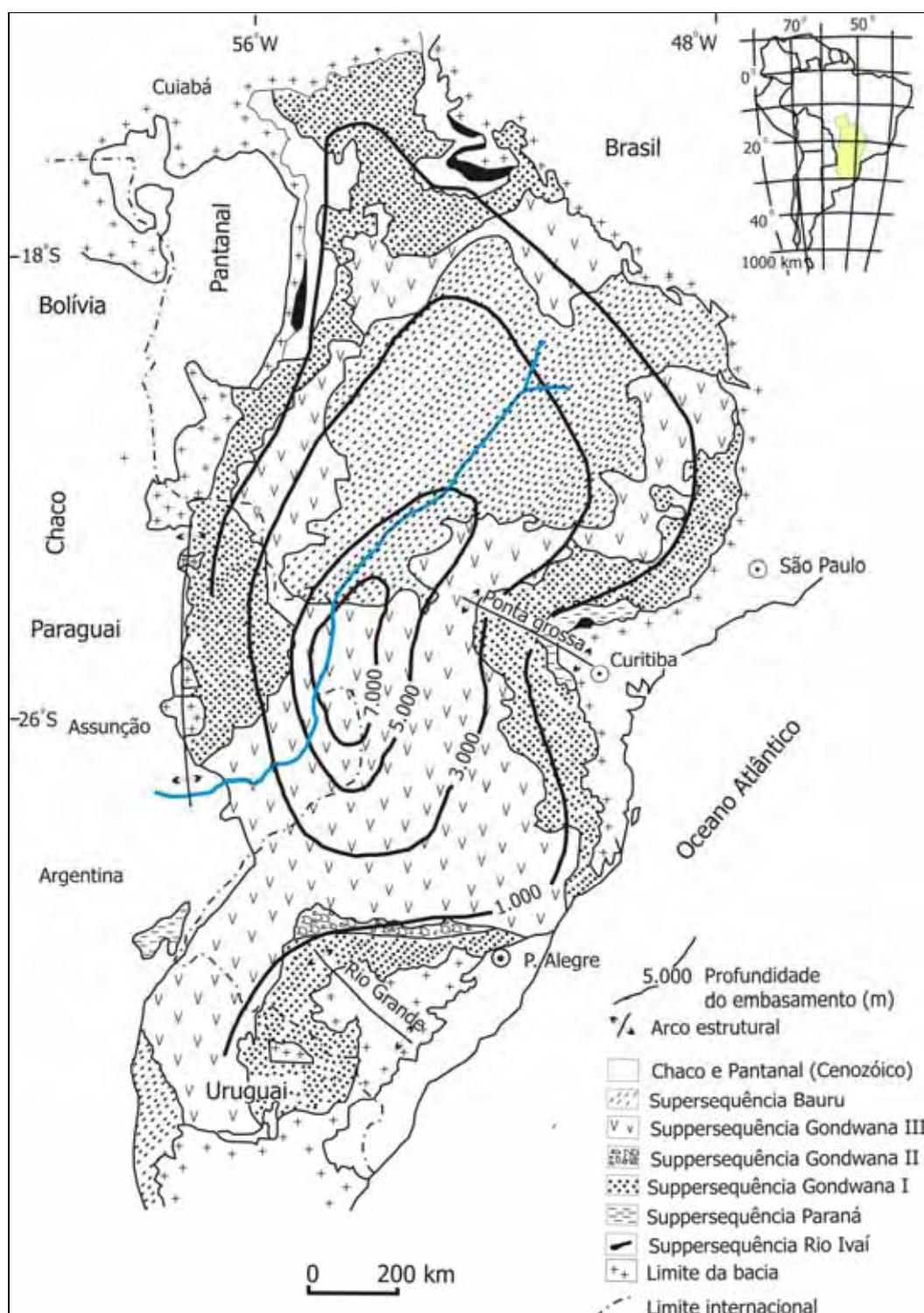
Milani & Ramos (1998) reconhecem seis unidades aloestratigráficas de segunda ordem, ou supersequências na concepção de Vail et al. (1977). Cada uma delas compreendendo um registro geológico da ordem de algumas dezenas de milhões de anos, e constituem o arcabouço estratigráfico da Bacia do Paraná (MILANI, 1997). O registro completo engloba o intervalo de 450 a 65 Ma, e uma grande parte do tempo encontra-se condensado em hiatos que separam as diversas supersequências (Figura 2.8).

As supersequências reconhecidas por Milani (1998) são; Rio Ivaí, Paraná e Gondwana I, que materializam grandes ciclos transgressivos-regressivos paleozóicos enquanto o Gondwana II, Gondwana III e Bauru são representados por pacotes sedimentares continentais e rochas ígneas associadas (Figura 2.9);

A Supersequência Rio Ivaí - Compreende as rochas mais antigas da Bacia do Paraná. É particularmente importante no entendimento da implantação da bacia, uma vez que representa o primeiro ciclo de sedimentação fanerozóica nessa área que se apoiou num embasamento cratônico consolidado após os fenômenos da orogenia Brasiliana (ALMEIDA, 1980).

O topo da seqüência Rio Ivaí é definido por uma superfície de discordância que erodiu profundamente o pacote ordovício – siluriano. A Supersequência Paraná, com sua geometria tabular de ocorrência, materializa um ciclo transgressivo – regressivo completo de oscilação do nível do Panthalassa. Supersequência Gondwana I sucedeu ao ápice das condições glaciais. O degelo patrocinou mecanismos de transporte e deposição em que fluxos de massa e resedimentação foram muito importantes. O Grupo Itararé é o correspondente a essa fase de degelo. Acompanhando a deformação da margem Gondwânica do Meso ao Neopermiano, teve lugar uma progressiva e irreversível continentalização dos sistemas deposicionais na Bacia do Paraná, registrada na porção terminal da Supersequência Gondwana I. Desertos arenosos cobriram completamente a bacia e regiões vizinhas durante o Neojurássico (Formação Botucatu), seguidos pelas lavas eocretáceas da Formação Serra Geral.





**Figura 2.8** Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, com referências geográficas e profundidade do embasamento (modificado de Milani & Ramos, 1998).

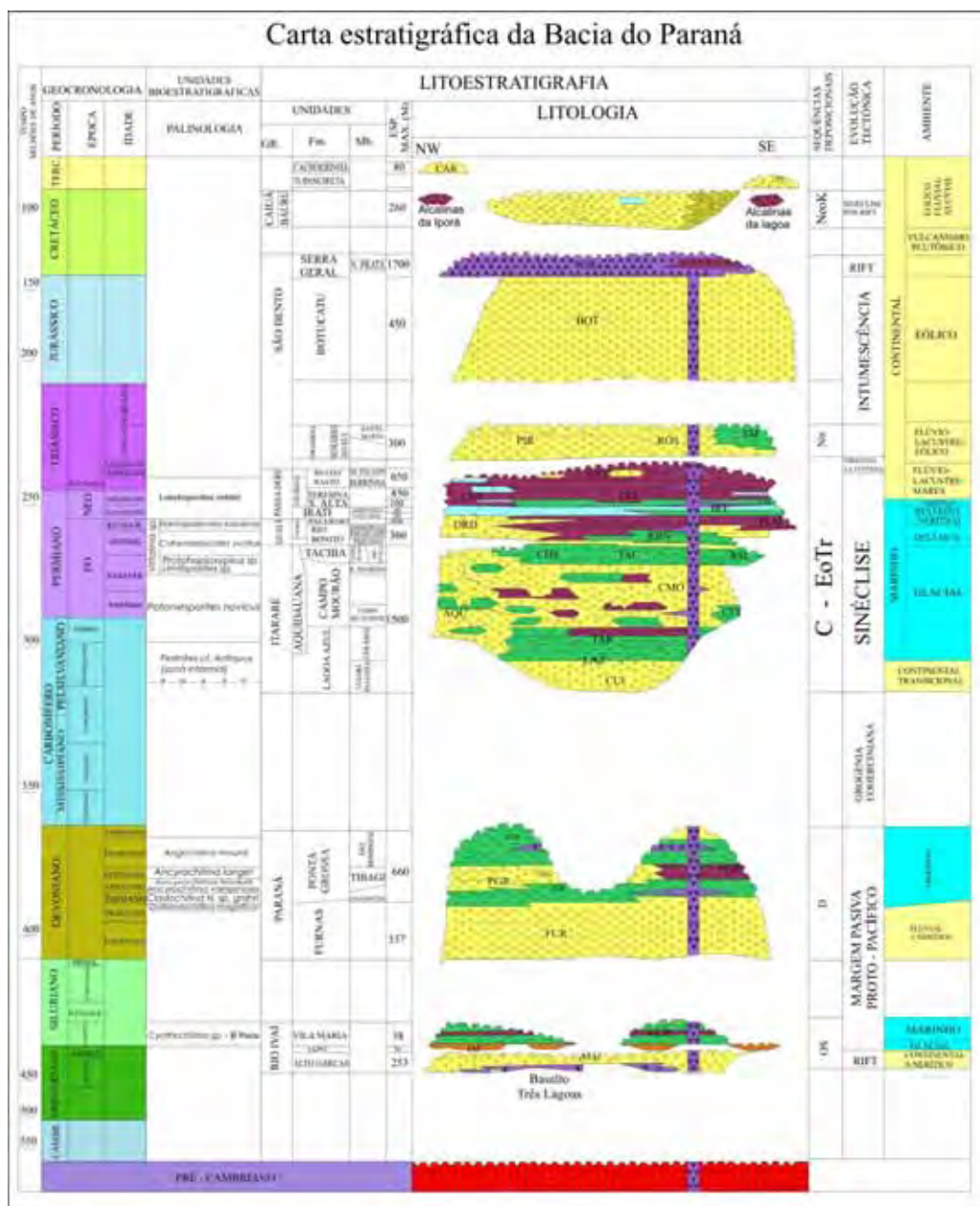


Figura 2.9 Coluna litoestratigráfica da Bacia Sedimentar do Paraná, segundo Milani (1993).

A subsidência e acumulação sedimentar na Bacia do Paraná tiveram um último evento no Neocretáceo com a acomodação da Supersequência Bauru (MILANI, 1997).

Essa característica no arcabouço estratigráfico da bacia deve-se ao fato de que a geodinâmica do Gondwana sul-ocidental parece ter sido de grande influência. A dissipação intraplaca de esforços ao longo de antigas zonas de fraqueza e a propagação no sentido do antepaís para o interior cratônico de flexura litosférica por sobrecarga tectônica figuram como os mecanismos admitidos como os controladores primordiais da subsidência e da assinatura estratigráfica nessa bacia interior (MILANI, *op.cit.*). Os principais fatores de controle do registro estratigráfico, por um lado a subsidência do embasamento de uma região específica do planeta, no caso o domínio sul – ocidental do Gondwana, e por outro as variações eustáticas do nível do mar, são consideradas por Milani & Ramos (1998), como variáveis completamente independentes, portanto as assinaturas estratigráficas das várias supersequências, em termos de ciclos transgressivo – regressivos, da mesma forma apresentam uma estreita correlação aos ciclos de subsidência do Gondwana sul-ocidental.

## **2.4 SÍNTESE DOS PRINCIPAIS ESTUDOS GEOFÍSICOS REALIZADOS NA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ**

### **2.4.1 Paulipetro - Consórcio CESP/IPT**

No início dos trabalhos geofísicos na Bacia Sedimentar do Paraná, a Paulipetro defrontou-se com o problema da carência de informações especializadas, restrito quase que totalmente a trabalhos localizados, realizados pela Petrobras e cuja acessibilidade não era possível, por constituírem-se de relatórios internos, não divulgados ao público.

Optou-se inicialmente pela programação de um levantamento aerogeofísico, com o objetivo de definir, *a priori*, a resolução da metodologia. Uma vez comprovada a aplicabilidade da aeromagnetometria, estendeu-se o levantamento para todas as áreas de concessão, com o objetivo básico de nelas definir em curto prazo, o arcabouço estrutural da bacia e fornecer subsídios para orientar a seleção de áreas para a aplicação de outros métodos geofísicos.

A definição de importantes feições tectônicas, regionais e locais, permitiu o confronto com dados de antigas linhas sísmicas da PETROBRAS, bem como orientar a localização de alguns prospectos sísmicos do programa exploratório do Paulipetro. A aplicação de métodos geofísicos elétricos e eletromagnéticos, orientados por análises de dados geológicos e geofísicos integrados, mostra a viabilidade de sua utilização. A metodologia preconizada, com ênfases seletivas a métodos, conforme o estágio de prospecção possibilitou a obtenção de bons resultados, em particular demonstrando ser viável a aplicação de métodos geofísicos (PAULIPETRO – CONSÓRCIO CESP/IPT, 1981).

#### **a) Magnetometria aérea**

Após estudar os levantamentos executados anteriormente na bacia, a prioridade inicial foi de selecionar áreas alvo de concessão onde houvesse um conhecimento geológico de superfície. Com essas áreas selecionadas foram escolhidos os blocos 45 e 39 (localizados a sul do Rio Tietê), como áreas de teste. Sabendo-se previamente que existe um grande alto estrutural na região de Piratininga (sudoeste de Bauru), com padrões estruturais definidos nas proximidades do vale do Rio Tietê e de áreas onde os derrames basálticos encontram-se aflorantes à superfície, foi dado início ao Projeto Bauru com o primeiro voo de teste.

Os resultados oriundos do Projeto Bauru, segundo Paulipetro - Consórcio CESP/IPT (1981), possibilitou e estimulou a elaboração de outras áreas para levantamentos aéreos por meio de contrato com a Petrobras. Os levantamentos aéreos foram executados em um *grid* de 2 km X 20 km mantendo-se um constante espaçamento do terreno (nível de voo constante). Os principais objetivos desses levantamentos foram de fornecer resultados referentes ao arcabouço geológico/estrutural regional das áreas de interesse para prospecção (interpretação qualitativa), possibilitar o estudo e interpretação das fontes magnéticas rasas (derrames basálticos) e fontes magnéticas profundas (embasamento cristalino). Esses trabalhos foram realizados utilizando-se da interpretação e resultados esperados anteriormente através do Projeto Bauru (interpretação quantitativa). Os resultados finais foram um total de 139.711 km de perfis magnéticos obtidos, abrangendo 243.737 km<sup>2</sup> das áreas de concessão. Os voos foram feitos entre

dezembro de 1979 e abril de 1981. Os blocos com uma cobertura total foram os de números 33, 37, a 39, 42 a 45, 48 a 49, denominados de bloco São Paulo. Eles abrangem o projeto denominado “Confluência Paraná – Paranapanema” (blocos 33, 37, 38, 42 a 44), Projeto Bauru (blocos 39 e 45) e o Projeto Botucatu (blocos 48 e 49). Os dados interpretados e os resultados analisados apresentaram um visível *trend* com predominância NE – SW dos quais representam as principais direções das fontes magnéticas rasas e profundas. Esse lineamento é cortado pelos lineamentos magnéticos NW – SE. Um dos principais *trends* observados é o lineamento denominado de lineamento estrutural de Guapiara de direções N45<sup>0</sup> – 50<sup>0</sup> W (PAULIPETRO – CONSÓRCIO CESP/IPT, 1981).

### **b) Levantamentos de Eletrorresistividade**

Para uma melhor definição dos derrames basálticos e do embasamento cristalino, utilizou-se de sondagens elétricas verticais profundas ou S.E.V.'s. As interpretações apresentaram uma boa definição no que se refere ao comportamento estrutural apresentado para a região. Deve-se levar em conta, porém, que interpretações quantitativas apresentam certas restrições quanto às propriedades e parâmetros geoeletricos conhecidos das rochas presentes.

O programa para as locações das linhas de sondagem foi elaborado de forma a proporcionar o melhor custo operacional e de *performance* (PAULIPETRO – CONSÓRCIO CESP/IPT, 1981).

### **c) Levantamentos Magnetotelúricos**

Esse método nunca havia sido utilizado antes no Brasil para a exploração de petróleo. Apresentou uma boa resolução sem limitações de profundidade e possibilitou também uma ótima correlação com os dados geológicos de superfície conhecidos. Segundo as avaliações finais, a rapidez na aquisição dos dados, comparada com outros métodos aplicados mostrou ser eficaz e com um baixo custo em programas exploratórios (PAULIPETRO – CONSÓRCIO CESP/IPT, 1981).

#### **d) Levantamentos Sísmicos**

Com o intuito de evitar grandes custos sem obter bons resultados optou-se, de início, por avaliar o estudo dos levantamentos anteriores efetuados pela Petrobras, para depois uma possível verificação de incremento das aquisições e, finalmente, verificar a aplicação e validade desses resultados no programa.

A primeira tarefa, mostrou a possibilidade de incremento dos dados sísmicos, através da alteração das seqüências de processamento das linhas sísmicas. O estudo das seções permitiu concluir que houve energia suficiente transmitida da vibração na superfície até a base dos basaltos, refletida nesta descontinuidade e retornando à superfície. Havendo energia suficiente para atravessar esse meio e retornar, então isso significa que parte dessa energia foi também transmitida para as camadas abaixo dos basaltos.

Para a correção estática admitiu-se velocidade constante, sendo a alteração das rochas desprezada. Como as rochas da Bacia do Paraná estiveram sujeitas a alterações em sub-superfície, foi necessário à aplicação da correção estática, porém de uma forma cuidadosa. Dessa forma, foi efetuado um levantamento raso de sísmica de refração, a fim de obter-se uma correção estática ideal.

Foi concluído nesse trabalho que a aplicação da sísmica pela Paulipetro constituiu uma ferramenta bastante valiosa, em especial em áreas onde ocorrem grandes derrames basálticos de até 800 m de espessura, (PAULIPETRO – CONSÓRCIO CESP/IPT, 1981).

#### **2.4.2 Outros levantamentos executados na Bacia Sedimentar do Paraná**

Um levantamento gravimétrico tendo como produto final mapas e perfis da anomalia Bouguer abrangendo a área da Bacia do Paraná e adjacências do Brasil, Uruguai e Argentina foi efetuado por pesquisadores do CNPq (Observatório Nacional) e IBGE no Brasil, Instituto Geográfico Militar da Argentina e Serviço Geográfico Militar do Ministério da Defesa Nacional do Uruguai (PAULIPETRO – CONSÓRCIO CESP/IPT, 1981).

Para a interpretação dos perfis foram utilizados os seguintes valores de densidades das rochas calculados a partir de determinações diretas e indiretas; 3,0 g/cm<sup>3</sup> a densidade média do basalto e diques de diabásio; 2,4 g/cm<sup>3</sup> para os

sedimentos pré – lavas; para os sedimentos da Formação Bauru foi utilizado o valor de  $2,1 \text{ g/cm}^3$ . O cálculo teórico para os modelos bidimensionais foi efetuado a partir da formulação proposta por Talwani (1959).

Foram estudadas as cartas e perfis Bouguer entre as latitudes de  $18^\circ$  a  $23^\circ$  S, correspondendo à parte NE da bacia. O perfil da parte sul da bacia está situado na altura dos paralelos  $30^\circ$  –  $31^\circ$  S abrangendo parte da República Argentina e da República Oriental do Uruguai na região fronteira com o Brasil.

Ambos perfis apresentam características gravimétricas similares notando-se de imediato a presença de uma região central com valores de anomalia Bouguer mais elevados que as zonas adjacentes e anomalias de caráter local:

- a) Uma anomalia central, situada a oeste do Rio Paraná na altura do Estado de São Paulo e do Estado do Paraná, entre o Rio Paraná e o Rio Uruguai na altura dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul bem como da República Oriental do Uruguai. Esta anomalia de 20 a 25 mGal possui uma largura aproximada de 200 km.
- b) Diques de diabásio; os perfis, bem como as cartas gravimétricas indicam a presença de diques de diabásio, tendo sido verificadas anomalias Bouguer de 5 a 30 mGal em relação aos valores próximos. Os valores das anomalias verificadas dependem da largura do dique ou diques e da localização da estação gravimétrica em relação a eles. Correspondem freqüentemente às zonas de falhamentos detectados gravimetricamente.
- c) Falhas de gravidade; Sob o peso dos sedimentos da sinéclise do Paraná houve a formação de falhas de gravidade, normais, que possibilitaram a compensação isostática dos blocos envolvidos neste processo tectônico. Os rejeitos verticais são da ordem de até poucas centenas de metros e os blocos de falhas são geralmente de dimensões maiores no sentido NNE-SSW (da ordem de 60 – 100 km) que no sentido transversal (30 – 50 km).
- d) Falhas transcorrentes: O deslocamento relativo entre as anomalias Bouguer na bacia do Paraná e nas bordas permite interpretá-las como decorrentes de zonas de falhas transcorrentes com direções ENE-WSW. Os deslocamentos verificados são do bloco N para E e do bloco S para W, alcançando em algumas zonas de falhas transcorrentes deslocamentos horizontais superiores a 100 km. Este sistema de falhas é aproximadamente paralelo ao lineamento do Paraíba do Sul.

Portanto, determinou-se zonas de falhamentos delimitadas gravimetricamente que indicam sistemas de falhas de gravidade (NNE – SSW, WNW – ESE, N – S, E – W) normais ou inversas provavelmente decorrentes da reativação de antigas zonas de fraqueza de embasamento sob a carga de sedimentos e de esforços horizontais decorrentes da subsidência da bacia e atividade tectônica da antéclise do Atlântico Sul.

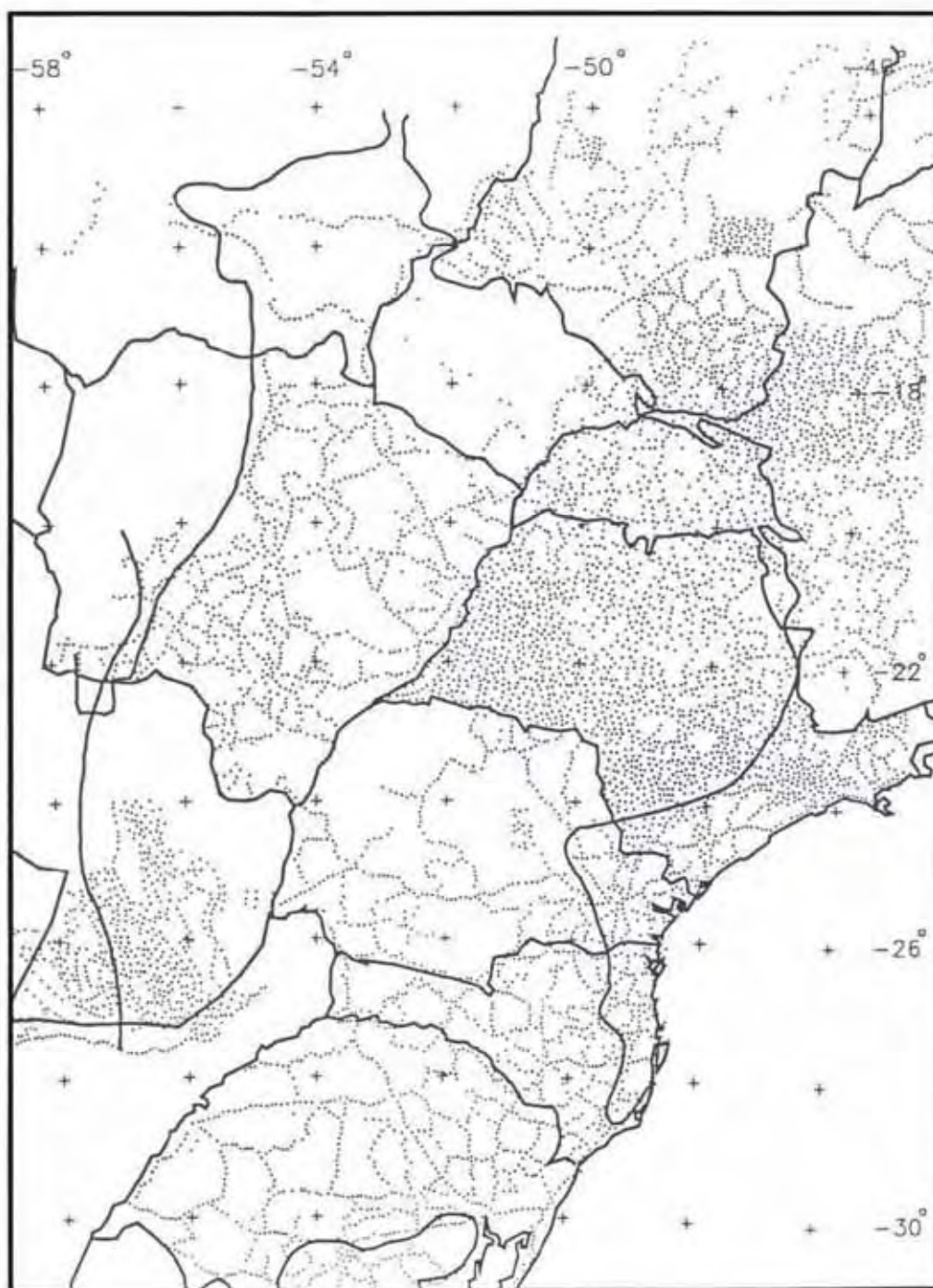
Outro estudo, Ferreira et al., 1981, envolvendo o consórcio CESP/IPT (Paulipetro) realizou cerca de 75.000 km lineares de perfis aeromagnetométricos no centro e oeste do Estado de São Paulo, cobrindo uma área de aproximadamente 130.000 km<sup>2</sup>. Os levantamentos foram executados a uma altura média de 400 m, em malha de 2 km por 20 km. Os produtos finais são apresentados em escalas 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000, na forma de contorno do campo magnético anômalo total (corrigido do IGRF). A análise desses permitiram a definição de uma grande feição magnética anômala linear, de direção NW-SE com pelo menos 600 km de comprimento e larguras variáveis entre 20 km e 100 km. Tem início no litoral sul do Estado de São Paulo, atravessa os terrenos pré-cambrianos e penetra na Bacia do Paraná até a altura da confluência dos rios Verde e Paraná.

Concluiu-se que o alinhamento estrutural de Guapiara é uma estrutura profunda, como é interpretada através dos mapas de filtragem passa-baixa, constituindo-se numa das principais fontes de magmas básicos da Bacia do Paraná, alojando diques de diabásio e condicionando rochas alcalinas (FERREIRA *et al.*, *op cit.*).

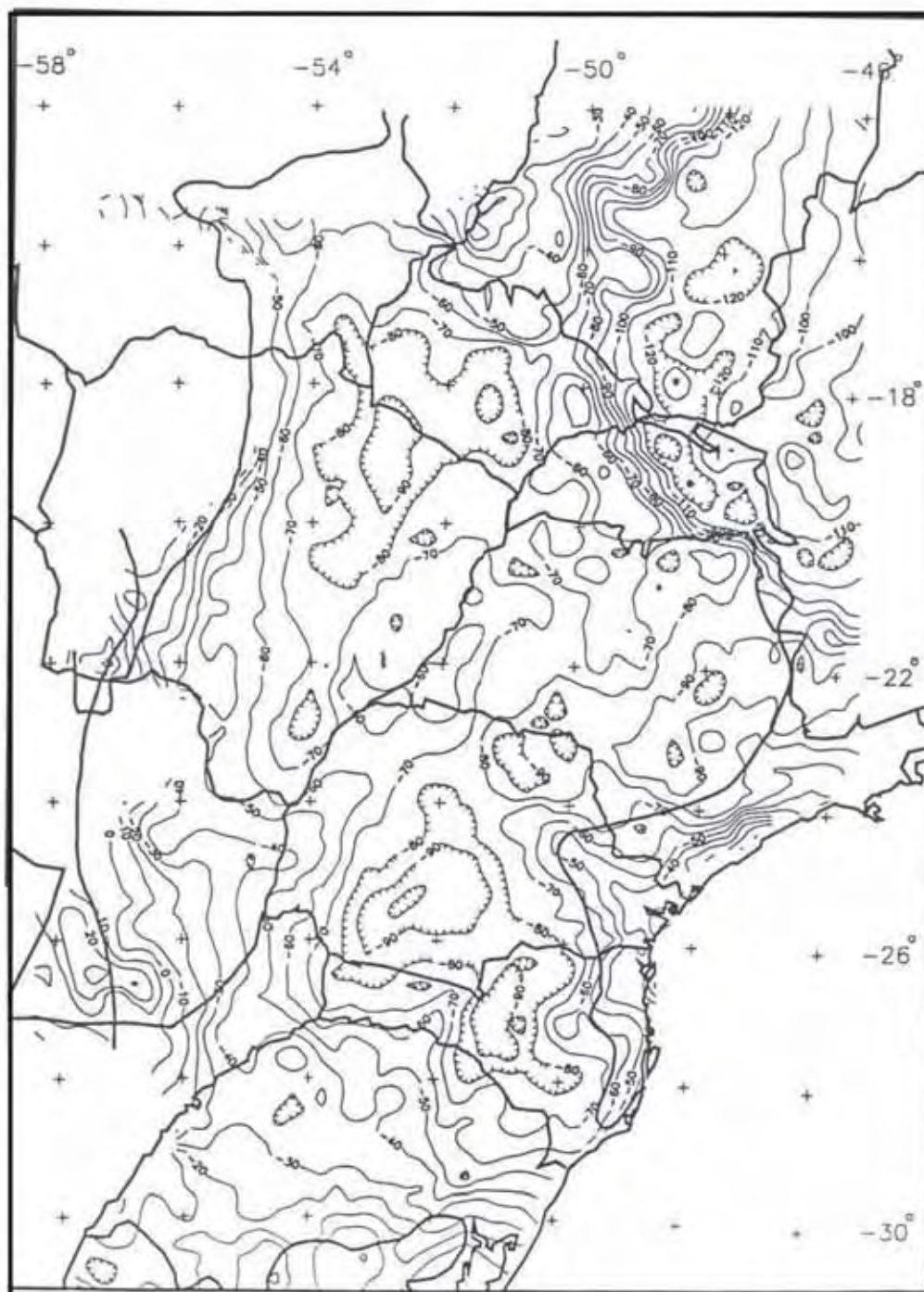
Outro estudo de importância na determinação do arcabouço do embasamento da Bacia Sedimentar do Paraná e da sua evolução através da análise de dados geofísicos foi realizado por Quintas (1994). Neste estudo foi feita uma integração e análise de dados geofísicos gravimétricos de diferentes instituições como IBGE, Observatório Nacional, CPRM, IAG-USP, UFPR conjuntamente com poços exploratórios da Petrobras situados em diferentes localidades da Bacia Sedimentar do Paraná (Figura 2.10 e 2.11). O estudo teve como objetivo, fornecer subsídio para o estudo dos processos envolvidos na evolução mecânica da bacia.

No estudo termo-mecânico foram utilizados 81 poços exploratórios para hidrocarbonetos perfurados ao longo do tempo pela Petrobrás e Paulipetro (Figura 2.12)

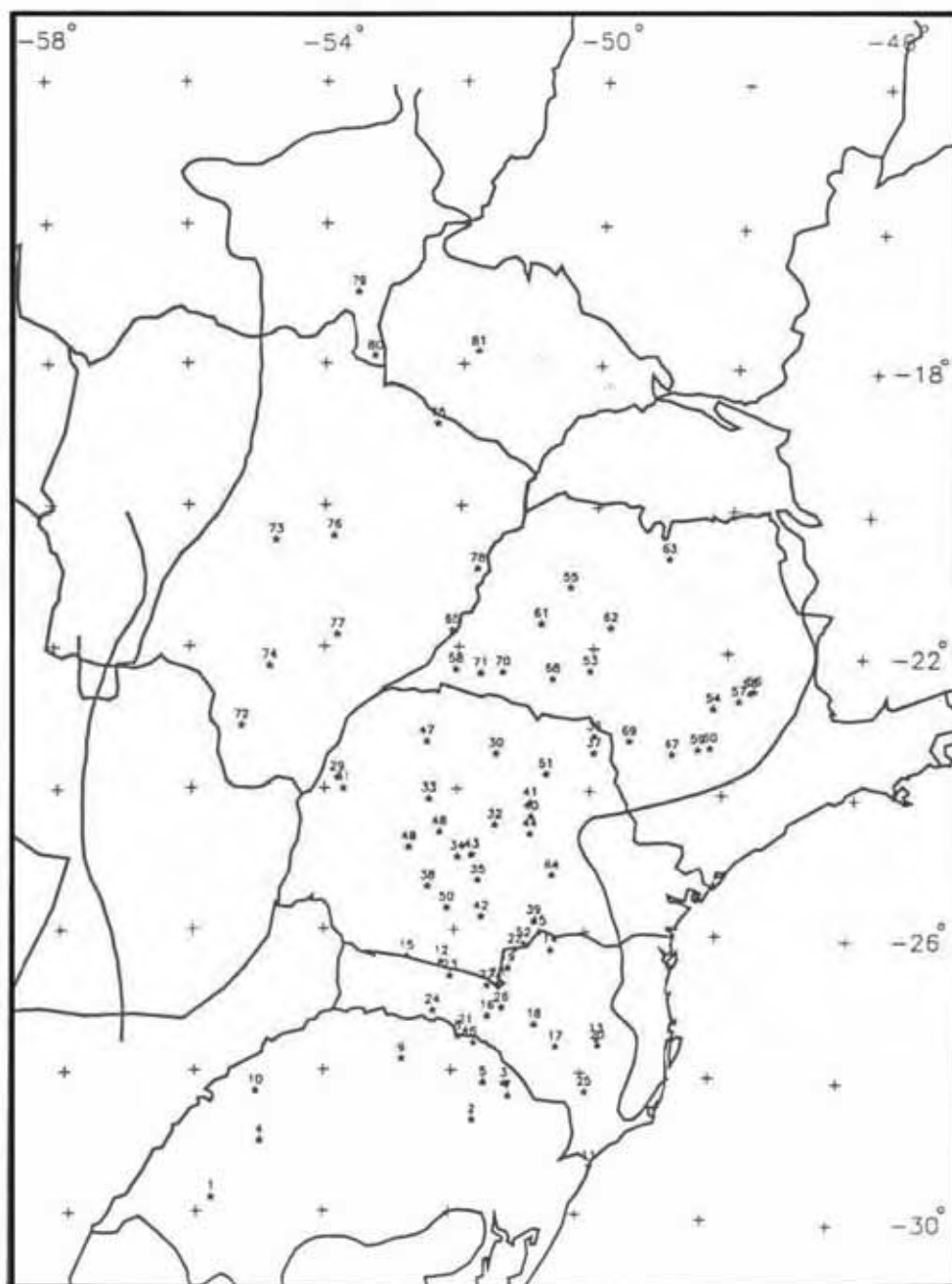




**Figura 2.10** Localização das estações gravimétricas. Fonte: IAG – USP, CPRM, ON, IBGE e UFPR (Quintas, 1994).



**Figura 2.11** Mapa da anomalia Bouguer calculada a partir dos dados observados (Quintas, 1994).



**Figura 2.12** Localização dos poços exploratórios usados no estudo de Quintas (1994).

Esses dados forneceram subsídios para a aplicação de modelos distensivos de cisalhamento puro. Com essa modelagem foi possível localizar a região de maiores esforços na Bacia, que está compreendida entre:  $23^{\circ} 8' S$ ,  $53^{\circ} 8' W$  e  $22^{\circ} 3' S$ ,  $52^{\circ} W$  o que poderia refletir a existência de uma paleo-estrutura representativa de limite entre blocos tectônicos. Discutem-se também os resultados obtidos, associados aos tipos de sedimentação descritos para as principais seqüências cronoestratigráficas.

Foi utilizada a técnica de *backstripping* para a modelagem termo-mecânica que possibilitou a determinação de taxas médias de subsidência total e tectônica, relativas a cada intervalo de tempo ou formação geológica atravessada em diversos pontos da Bacia do Paraná. Esse resultado revela a provável velocidade com que foram depositadas as formações geológicas que compõem a bacia, bem como a influência tectônica no contexto da deposição. As maiores taxas de subsidência tectônica ocorreram no segundo evento distensivo, no Permiano, compreendendo as formações Palermo, Irati, Teresina e Rio do Rasto, com valor médio de cerca de 50m/M. A., crescente no tempo, desde um mínimo de 30m/M.A. (associada à Formação Palermo), até a máxima de 92m/M.A., (Formação Rio do Rasto).

Embora pelas premissas do modelamento o estiramento seja considerado instantâneo, esse resultado sugere a presença de um campo de esforços atuante ao longo de todo o período de deposição dessas formações (aproximadamente 50 M.A.).

As taxas de subsidência anteriores a esse período, relativas às formações associadas ao primeiro evento distensivo (Rio Ivaí, Furnas e Ponta Grossa), são inferiores ao valor médio atingido no Permiano. Por outro lado, as associadas ao evento da Formação Serra Geral apresentam o menor valor, se comparadas às demais formações, excetuando-se Pirambóia, Botucatu e Bauru. Foi concluído neste estudo, portanto, que o evento distensivo do Permo-Carbonífero foi o de maior expressão, ao passo que a subsidência no Juro-Cretácico teve a maior contribuição do carregamento produzido pelo grande volume de lavas. Neste último caso, o mecanismo de formação dos basaltos foi dominado por uma componente térmica expressiva, que provavelmente induziu os esforços indicados na modelagem termomecânica.

## 2.5 SÍNTESE DA GEOLOGIA DO PETRÓLEO NA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ

Os indícios de óleo em afloramentos são numerosos, especialmente nas partes leste e sudeste da Bacia. Os arenitos asfálticos dos Estados de São Paulo (região de Anhembi) e Santa Catarina (Barra Nova) são famosos, apesar de apresentarem reservas modestas. Muitos indícios foram reportados nas minas de carvão (arenitos da Formação Rio Bonito), nas escavações das usinas hidrelétricas (derrames de basalto) e em pedreiras (soleiras e diques de diabásio fraturados), assim como em diversos poços exploratórios para hidrocarbonetos (ZALÁN et al., 1990).

Diversos trabalhos, como o de Washbourne (1930), vem ao longo das décadas estudando evolução, sedimentação e principais condicionantes estruturais visando o seu potencial exploratório. Reservas de caráter sub-econômico foram encontradas no sul, e na porção nordeste da Bacia onde este estudo foi feito. Zalán et al. (*op. cit.*), citam a existência de dois *plays* petrolíferos principais na Bacia do Paraná: 1) *play* Irati – Rio Bonito – Pirambóia; e 2) *play* Ponta Grossa Itararé.

O primeiro é um *play* para óleo. A rocha geradora está contida na Formação Irati, suprimindo os arenitos Rio Bonito e Pirambóia. É um *play* relativamente raso, a profundidades inferiores a 3.000 metros. Dentre desses *plays* podemos citar os arenitos asfálticos de São Paulo e Santa Catarina. O *play* Ponta Grossa – Itararé é para gás condensado. A rocha geradora está na parte superior da Formação Ponta Grossa, suprimindo os arenitos do Grupo Itararé ZALÁN et al. (*op. cit.*).

Um possível *play* adicional pode ocorrer nas partes mais profundas da Bacia, associado com a Formação Vila Maria da Seqüência Siluriana.

## **CAPÍTULO 3 - GEOLOGIA DA PORÇÃO NORDESTE DA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ E ARCABOUÇO ESTRUTURAL DA ÁREA**

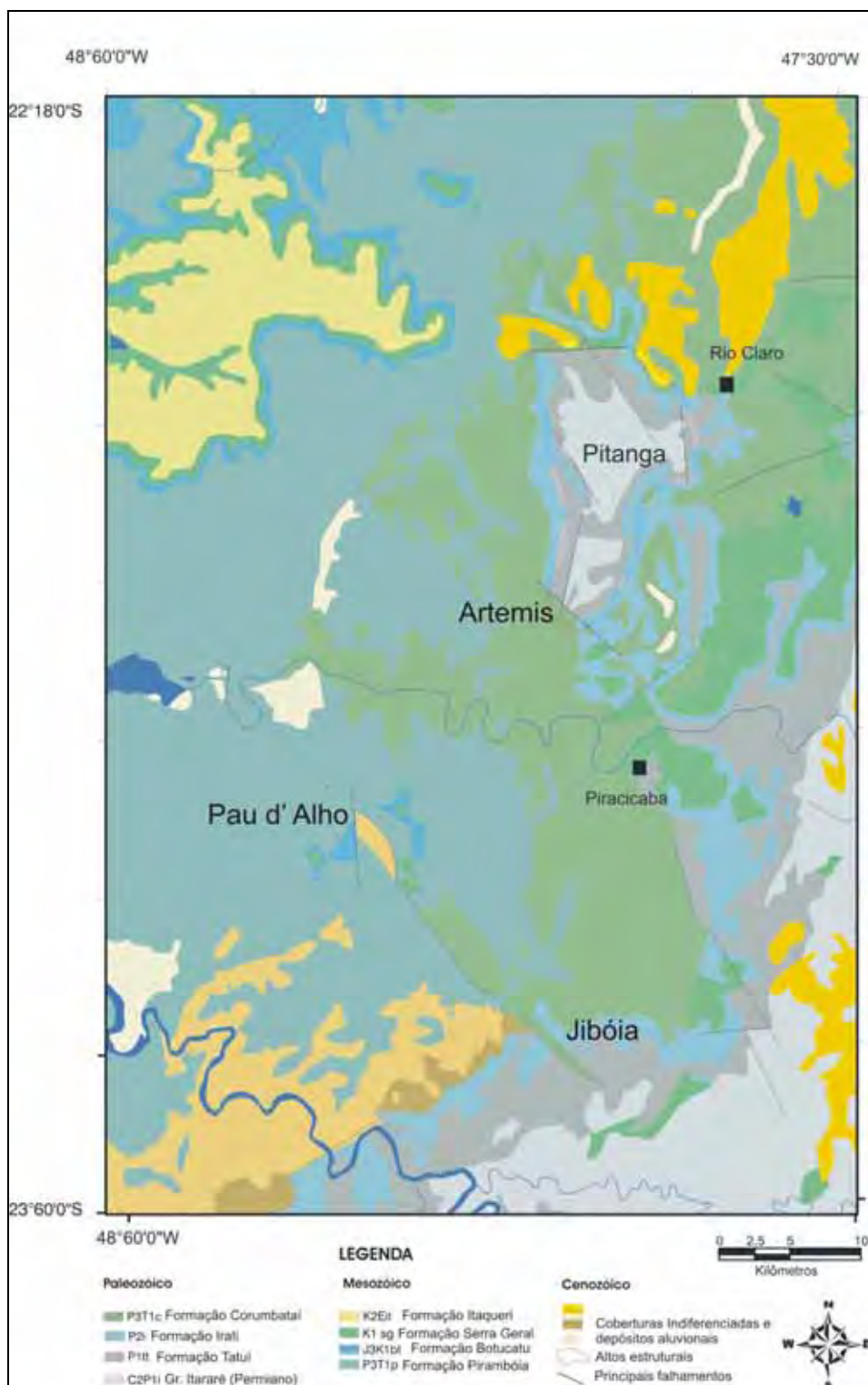
---

### **3.1 UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS DA ÁREA**

A região estudada nesta tese situa-se na parte nordeste da Bacia do Paraná, na porção centro ocidental da Depressão Periférica Paulista, apresentando rochas de idade que variam desde o Permo-Carbonífero – Grupo Itararé, (Formação Tatuí e Formação Irati) até o Cretáceo Superior, incluindo os derrames de rochas básicas, intrudidas no pacote sedimentar – Formações Pirambóia, Botucatu, Serra Geral e Itaqueri - e ainda sedimentos neoceno-zóicos capeando as superfícies planas – Formação Rio Claro e coberturas indiferenciadas. Uma descrição pormenorizada da litologia que compõe essas unidades foi mais recentemente realizada por Sousa, (2002), conjuntamente com a sua compartimentação estrutural e tectônica. O mapa geológico mostrado na Figura 3.1 ilustra a distribuição dessas unidades ao longo da área de estudo.,

A litoestratigrafia da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo mostra particularidades notáveis em relação às unidades correlacionáveis dos estados sulinos. Essa diferenciação é devida em grande parte, à compartimentação da bacia fruto do arcabouço estrutural que governou a sedimentação destas unidades na área do estado de São Paulo, uma das áreas marginais desta imensa bacia sedimentar (FULFARO et al., 1984).





**Figura 3.1:** Mapa geológico da área de estudo com a localização dos altos estruturais e principais cidades (modificado de CPRM, 2005).

### **3.1.1 Rochas do Paleozóico Superior**

#### **3.1.1.1 Grupo Itararé**

As rochas do Grupo Itararé ocorrem na porção centro-norte da área de estudo, no baixo e médio vale do Rio Passa-Cinco, no encontro deste com o Rio Corumbataí e mais a sudeste da área, na confluência do rio Tietê com o rio Capivari e no encontro do rio Piracicaba com o Tijuco Preto.

Estudando-se afloramentos e perfis provenientes de poços da PETROBRAS, verifica-se que o Grupo Itararé é constituído predominantemente por arenitos, freqüentemente feldspáticos ou mesmo arcossianos, sendo a sua presença mais conspícua no terço inferior e no terço superior do ciclo glacial, e dominante na região nordeste. Estes corpos psamíticos variam em forma e relações com as demais litologias existentes com dimensões e exibem diversas estruturas sedimentares singenéticas como marcas ondulares, marcas de sola, estratificação cruzada, estratificação gradacional, além de estruturas devidas a deformações plásticas penecontemporâneas à deposição. Ritmitos são presentes, principalmente na porção inferior, como os varvitos. Litologicamente exibem lâminas cinza-escuras de argilito e/ou siltito alternadas com lâminas cinza-claras de siltito e/ou arenito fino (LANDIM et al., 1980).

Segundo Sousa (2002), essa unidade é caracterizada por arenitos, diamictitos, siltitos e argilitos. Os arenitos normalmente têm granulação heterogênea, variando de muita fina a conglomerática. São compactos, maciços, constituindo desde camadas delgadas a bancos. Apresentam estratificação paralela e cruzada de tamanho que variam de decimétricas a métricas, e localmente apresentam nível laterizado (Foto 3.1). Por vezes, esses arenitos apresentam intercalação com níveis siltosos de coloração cinza esverdeada, maciços e compactos de granulação fina e acamamento plano-paralelo. Na base de “pacotes” de estratificação cruzada, são comuns lentes conglomeráticas de pequena espessura, ricas em seixos de argilitos, na maioria das vezes semelhantes aos pacotes imediatamente inferiores. Os conglomerados apresentam seixos arredondados a angulosos de quartzo, quartzito e granito, gnaiss, entre outros.

Às vezes os seixos de quartzo apresentam-se polidos e com tamanho de até 3 cm. Localmente os níveis conglomeráticos verificados nesses arenitos



apresentam-se cobertos por uma couraça ferruginosa com presença de seixos e clastos laterizados (Foto 3.2).



**Foto 3.1** Formação Itararé. Estratificações plano-paralelas e acanaladas (proximidades da fazenda Pau D'Alho).

Os diamictitos apresentam coloração creme acinzentada e avermelhada, e normalmente são compostos por matriz de natureza areno-argilosa, homogênea, maciça de textura que varia de fina a média com clastos de quartzito e granitos (as vezes facetados), o que pode indicar abrasão por efeito glacial) de formas e tamanhos variados que variam de 3 a 20 cm, apresentam-se arredondados e também angulosos, e por vezes ocorrem envoltos por uma camada ferruginosa.

Os siltitos do Grupo Itararé normalmente apresentam coloração cinza esverdeada, creme, são macios e compactos de matriz fina de acamamento e estratificação plano-paralelos. Por vezes ocorrem alternados com arenitos.

### **3.1.1.2. Formação Tatuí**

Em seções executadas no Domo de Pitanga, Iracemópolis e Ipeúna a Formação Tatuí apresenta intercalações de camadas conglomeráticas com seixos de silexitos cuja presença tem levado vários autores a interpretá-los como

sugestivos de uma possível discordância. Estas camadas, no entanto, encontram-se em diferentes posições estratigráficas dentro da Formação Tatuí.



**Foto 3.2** Diamictito com seixo anguloso inserido na matriz da rocha (proximidades da fazenda Pau d'Alho).

Na região do Domo de Pitanga, os siltitos cinza-azulados do Membro Taquaral assentam-se sobre arenitos finos esbranquiçados da Formação Tatuí. No nível deste contato, que é gradacional (existem pequenas lentes do arenito no siltito sobreposto) existe um nível de 2 a 5 cm contendo seixos de silexito, quartzo (com 1cm de diâmetro) e dentes silicificados de peixes (FULFARO et al., 1984).

Nesta mesma seção para a base, os arenitos tornam-se mais finos passando a siltitos arenosos avermelhados que se sobrepõem ao denominado "Tilito Pitanga". Este "Tilito" é constituído por seixos dispersos em matriz de areia grossa, avermelhada, com estratificação cruzada e siltitos argilosos avermelhados com grãos de quartzo de granulação fina a média, dispersos na matriz (FULFARO et al., *op. cit.*)

De acordo com Landim (1980), as rochas da Formação Tatuí são incluídas no ciclo pós glacial, o qual se inicia com os siltitos e arenitos muito finos de cor marrom avermelhada do membro inferior da Formação Tatuí. O membro superior apresenta

também siltitos de cores claras, amareladas e esverdeadas, intercalando corpos acanalados de arenitos na base e bancos de lentes de arenitos maduros na parte superior. O membro inferior do Tatuí corresponde a sedimentação acima do nível das águas, evoluindo de uma situação mais afastada para mais próxima da lâmina d'água. No membro superior parecem ser freqüentes a sucessão de recobrimento e exposição pelas águas.

Segundo Sousa (2002), a Formação Tatuí distribui-se em forma de faixas alongadas e sinuosas na porção centro-norte da área, na confluência dos rios Passa Cinco e Cabeça e na porção sudoeste da área, ao longo dos rios Tietê e Piracicaba.

É representada na área de estudo por siltitos, argilitos, arenitos e níveis de silexitos.

Assine et al. (1999) consideram para o centro leste de São Paulo um limite natural entre a Formação Irati e a Formação Tatuí, e Sousa (2002), descreve a porção inferior da Formação Tatuí como sendo caracterizada por siltitos de coloração marrom, vermelha e arroxeadas de textura fina. Em alguns locais apresenta intercalação com lentes de calcários brancos a acinzentados, acompanhados ou não de concreções carbonáticas. Normalmente, estes siltitos são maciços apresentam acamamento e estratificação plano-paralela e algumas vezes incluem arenitos finos avermelhados com estratificação plano-paralela. Laminação intensa nos siltitos também é comum.

A porção superior da Formação Tatuí é representada por siltitos argilosos esverdeados ou amarelos esverdeados com intercalações de lentes de arenito muito fino, esverdeados e esbranquiçados, maciços e ainda pela presença de pequenas concreções calcárias, que às vezes ocorrem com coloração arroxeadas. Por vezes apresentam delgadas camadas de sílex. Este sílex é compacto, maciço de coloração cinza e apresenta espessura máxima de 20 cm.

O arenito desta unidade é maciço de coloração amarelo esverdeada a esbranquiçada, de granulação fina a média representando alternância de níveis arenosos e às vezes argilosos, com acamamento e estratificação plano paralela.

Localmente, ocorre lente conglomerática de matriz arenosa de coloração amarelo avermelhada com fragmentos arredondados a subarredondados (de até 5 cm) de quartzo, sílex e fósseis. A variação da granulometria vai desde a areia até o calhau, e a espessura destas lentes também varia bastante, sendo referenciada na literatura como litofácies Ibicatu (Stevaux et al., 1986), embora recentemente Assine

et al. (1999) representem estes níveis na base do Membro Taquaral considerando assim, base do trato de sistema transgressivo Taquaral (Fotos 3.3 e 3.4).



**Foto 3.3** Formação Tatuí. A mudança de coloração representa o contato com a litofácies Ibicatu (Distrito de Assistência, município de Rio Claro).



**Foto 3.4** Silito denominado de "chocolate" da Formação Tatuí (Próximo a Fazenda Santa Rosa, distrito de Assistência, município de Rio Claro).

### 3.1.1.3 Formação Irati

Os sedimentos da Formação Irati na área de estudo, ocorrem basicamente na porção nordeste (Estrutura de Pitanga), próximo à cidade de Piracicaba e na porção sul da área, nas imediações da cidade de Saltinho.

Assine et al. (1999) argumentam que a Formação Irati representa o contato concordante com a Formação Corumbataí e contato por um limite natural com a Formação Tatuí. Localmente foi observado contato discordante da Formação Irati com a formação Rio Claro, e contato lateral com arenitos e siltitos da Formação Tatuí, causado por falha normal. Essa formação é constituída de folhelhos pretos betuminosos ou não, intercalados com dolomitos de cor acinzentada, calcários silicificados alternados com folhelhos betuminosos, que às vezes apresentam nódulos de sílex e siltito cinza escuros (SOUSA, 2002). As melhores exposições da Formação Irati são encontradas nas pedreiras de calcários localizadas próximo ao distrito de Assistência e aos municípios de Ipeúna, Piracicaba, Laras e Saltinho.

A porção inferior da Formação Irati (Membro Taquaral) é caracterizada por argilitos, folhelhos e ainda siltitos maciços de textura fina e coloração que varia de cinza escuro a azulado ou esverdeado de acamamento (laminação) plano-paralelo (Foto 3.5). Normalmente, os siltitos assentam-se sobre o nível conglomerático que marca o contato com os arenitos finos esbranquiçados da Formação Tatuí, ou diretamente sobre a camada de sílex.

A porção superior (Membro Assistência) da Formação Irati é caracterizada por dolomitos e calcários cinza claro e escuro, maciços e compactos, alternados com folhelhos betuminosos cinza escuros, apresentando laminação plano-paralela. Para o topo, as camadas de calcário costumam estar silicificadas. Nas pedreiras de calcário (distrito de assistência) as camadas de calcário maciço são de coloração cinza, alternadas com folhelhos betuminosos de coloração cinza escuros a pretos que exalam odor de óleo. Apresentam acamamento plano-paralelo e às vezes, pequenas dobras que localmente ocorrem associadas às intrusões de rochas básicas (Foto 3.6).





**Foto 3.5** Argilito típico da Formação Irati com coloração avermelhada e manchas esverdeadas (Pedreira próxima a Rodovia Fausto Santomauro).



**Foto 3.6** Contato da porção superior (Membro Assistência) com a porção inferior (Membro Taquaral). Pedreira desativada próxima a Rodovia Fausto Santomauro distrito de Assistência – Rio Claro.

A estratificação rítmica observada na Formação Irati se dá pela alternância de folhelho betuminoso e calcário silicificado, apresentando estratos tabulares e lentiformes de carbonato. As concreções de sílex ocorrem entre os níveis de folhelho e calcário. Quando alterado, o Membro Assistência ocorre com coloração avermelhada com nódulos e concreções de sílex (“bonecas” de sílex) espalhadas na matriz argilosa, que às vezes mascara a laminação paralela.

#### **3.1.1.4 Formação Corumbataí**

A formação Corumbataí assenta-se concordantemente sobre a Formação Irati (Membro Assistência) e encontra-se em contato discordante com a Formação Rio Claro e a Formação Pirambóia.

As rochas da Formação Corumbataí ocorrem ao longo de toda a área de estudo, estando as suas melhores exposições localizadas nas imediações das cidades de Rio Claro, Piracicaba e de Laras.

De acordo com Landim (1967), esta formação é caracterizada por argilitos, siltitos arenosos e argilosos finamente estratificados de coloração avermelhada ou arroxeadada (porções média a superior) e siltitos maciços de coloração cinza esverdeada (porção inferior), com laminação plano-paralela, apresentando fósseis de escamas e dentes de peixes (Foto 3.7).

Os siltitos arenosos e argilosos da Formação Corumbataí são compactos de coloração que varia de vermelho amarelado a arroxeadado. Apresentam acamamento plano-paralelo, estratificação rítmica marcada por intercalações de arenitos calcíferos. Quando alterados, mostram coloração amarela esverdeada e fraturas de aspecto pastilhado, esbranquiçada, com laminação plano-paralela. Por vezes apresenta veios de quartzo com crescimento perpendicular às suas paredes (Foto 3.7).

A ocorrência de fósseis na Formação Corumbataí é representada por fragmentos de restos atribuídos a peixes como escamas, dentes, espinhos, além de fósseis vegetais como raízes e caules de *Licopodiopsis derbii*. Localmente, as rochas argilo-arenosas da porção superior da Formação Corumbataí apresentam intercalações de brechas de sílex, intercaladas com banco de calcário.



**Foto 3.7** Padrão de fraturamento em afloramento da Formação Corumbataí (Pedreira próximo a Rodovia Fausto Santomauro).

São reconhecidos diversos diques clásticos (arenitos) cortando os argilitos e siltitos da Formação Corumbataí próximos às cidades de Recreio, Santa Luzia e Santana, sendo a maioria deles dobrados com planos axiais sub-horizontais, provavelmente associados à compactação desta unidade (SOUSA, 2002).

### **3.1.2 Rochas Mesozóicas**

#### **3.1.2.1 Formação Pirambóia**

A Formação Pirambóia é uma das unidades sedimentares de maior ocorrência no centro leste de São Paulo. Sua faixa de afloramento estende-se desde a divisa com Minas Gerais até o Paraná, mantendo-se com largura variável. Na bacia do Rio Piracicaba sua largura ultrapassa 50 km, diminuindo para 5 km em Ipeúna-Serra de Itaqueri e Morro do Bofete-Torre de Pedra (LANDIM et al., 1980).

Na área estudada, a Formação Pirambóia distribui-se ao longo das porções norte, centro-oeste e sudeste da área e suas melhores exposições ocorrem



próximas às localidades de São Pedro e Águas de São Pedro e na região onde se localiza a estrutura de Pau D'Alho e Jibóia (Figura 3.8).

Dentre as principais estruturas sedimentares observadas nos afloramentos em níveis onde a Formação Pirambóia encontra-se preenchida por asfalto ressaltam as estruturas maciças das camadas, a estratificação plano-paralela, cruzada, lenticular, escavações de canais, pelotas de argilas, deslizamentos subaquáticos, deformações e perturbações pós-deposicionais. A estrutura maciça é caracterizada pela homogeneidade e espessura dos leitos que alcançam até 4 metros e a falta de estratificação. As camadas de arenito maciço são unidades de arenito de granulação fina a média, bem selecionado, compacto. De maneira geral, são contínuas, podendo ser seguida por dezenas de metros.

A textura dos sedimentos está condicionada a natureza da topografia na época de deposição. Nos baixos estruturais foi favorecida a sedimentação de arenito mais grosseiro, friável, avermelhado e melhor selecionado. Arenitos finos, argilosos esverdeados, pouco selecionados predominam nas áreas topograficamente mais altas (FRANZINELLI, 1973).

Segundo Landim (1980), o membro inferior aparece mais diferenciado do superior entre Ipeúna e Bofete, até onde foi separado. Suas fácies é mais argilosa, predominam estratificação plano-paralela e cruzada acanalada de pequeno porte. São freqüentes camadas de argila, folhelhos arenosos e sílticos.

O membro superior é caracterizado pela disposição dos bancos de arenitos, pouco a muito argilosos, sucedidos por bancos de arenitos muito argilosos, com estratificação plano-paralela, lamitos e argilitos arenosos, numa clara repetição cíclica.

De acordo com Sousa (2002), a Formação Pirambóia é caracterizada por arenitos de granulação fina a média, de coloração esbranquiçada, mas também avermelhada e amarelada, com intercalações de finas camadas de argilitos e siltitos. Localmente ocorrem no topo desta formação níveis conglomeráticos de espessuras milimétricas a centimétricas de granulometria fina a média formada por quartzo e minerais escuros. Normalmente, a Formação Pirambóia apresenta contato discordante com a Formação Corumbataí e Formação Rio Claro. O contato com a Formação Botucatu é considerado discordante segundo Caetano Chang (1997).

As principais estruturas descritas e observadas por SOUSA (2002) nesta unidade são estratificações paralelas, cruzadas (acanalada, em cunha e tangencial na base) que variam de centimétricas a métricas.

A espessura da Formação Pirambóia é variável chegando a atingir 270 m em seções aflorantes na região de São Pedro (CAETANO-CHANG, 1997).



**Foto 3.8** Afloramento da Formação Pirambóia. Rodovia Charqueada São Pedro.

### 3.1.2.2 Formação Botucatu

A Formação Botucatu designa o pacote de arenitos de granulação fina e muito fina predominante, com estratificação cruzada de grande porte a médio porte, muito friáveis ou silicificados, apresentando na parte basal corpos de arenitos conglomeráticos e conglomerado. É admitida a existência de derrames basálticos nesta unidade. O pacote sedimentar desta formação constitui uma unidade genética depositada em ambiente desértico. A característica fundamental desta unidade é a monótona sucessão de corpos cuneiformes de arenitos com seleção regular a boa e com teor de silte + argila em média inferior a 10% (LANDIM, 1980). Os corpos de arenitos conglomeráticos, com estratificação cruzada de porte médio a pequeno, têm ocorrência local. Apresentam pouca matriz e seixos facetados. São depósitos torrenciais realizados por correntes temporárias (*wadis*).

Mais rara é a ocorrência de depósitos lacustres, na parte superior da seção, constituída de arenitos lamíticos e lamitos.

Os depósitos da Formação Botucatu ocorrem na porção noroeste da área estudada (Serras de São Pedro e Itaqueri) e em alguns morros testemunhos próximos da estrutura de Pau d'Alho. Essa formação é composta por arenitos bem selecionados, friáveis ou silicificados, de coloração avermelhada, com granulação média a fina e grãos foscos (SOUSA, 2002).

As estruturas sedimentares mais comuns são as estratificações cruzadas de grande porte que indicam deposição eólica em ambiente desértico. No estado de São Paulo, os depósitos da Formação Botucatu ocorrem próximos a linha de *cuesta*, ou seja, junto ao degrau de relevo formado entre a Depressão Periférica e o Planalto Ocidental Paulista, com espessuras variáveis, máximas de 150 metros e em seções aflorantes a espessura média é de 60 metros (CAETANO-CHANG, 1997).

### **3.1.2.3 Formação Serra Geral e Intrusivas Básicas Associadas**

A Formação Serra Geral caracteriza-se por espessa seção de lavas basálticas, toleíticas, de textura afanítica, coloração cinza escura a negra, amigdaloidal no topo dos derrames e com desenvolvimento de juntas verticais e horizontais. Intercalações de arenitos finos a médios, com estratificações cruzadas tangencial, idênticos aos da Formação Botucatu, ocorrem principalmente na parte basal da parte da formação.

O contato inferior da Formação Serra Geral é discordante com os arenitos eólicos da Formação Botucatu. Os derrames de lavas tiveram início quando ainda perduravam as condições desérticas da sedimentação Botucatu, fato este atestado pela presença de inúmeros corpos arenosos de origem eólica na parte basal da Formação Serra Geral. O contato inferior com rochas mais antigas é marcado por discordância erosiva, jazendo a formação, em certos locais, diretamente sobre rochas do embasamento. O contato superior é discordante com as formações subseqüentes e na maior parte da bacia encontra-se em fase de erosão (LANDIM et al., 1980).

A Formação Serra Geral ocorre na área na forma de diques e *sills* de diabásios ou basaltos, além de alguns derrames aéreos pouco espessos segundo Sousa (2002). Essas rochas ocorrem principalmente ao longo dos rios Piracicaba e

Corumbataí, nas Serras de São Pedro e Itaqueri e preenchendo fraturas e falhas nas estruturas de Pitanga, Pau D'Alho e Jibóia. As rochas básicas apresentam coloração que varia de cinza escura a preta, são maciças e quando alteradas apresentam cores amareladas e esfoliação esferoidal.

O fraturamento típico de corpos tabulares, com disjunções colunares em contato com o arenito da Formação Pirambóia é comum, aparecendo em locais como na região da Estrutura do Pau D'Alho.

Encontram-se diques de diabásio preenchendo as falhas que colocam algumas formações lado a lado, como o argilito conglomerático (diamictito) avermelhado do Grupo Itararé com a Formação Irati, argilito da Formação Corumbataí com o arenito da Formação Pirambóia e rochas da Formação Irati, siltitos da Formação Tatuí com rochas das formações Irati e Corumbataí, indicando uma estreita associação entre as discontinuidades pré-existentes e o magmatismo basáltico.

Nos leitos de alguns rios, como Piracicaba, Corumbataí, Tietê, Passa Cinco, Cabeça, e de alguns de seus afluentes, além de alguns ribeirões como Jacaré-Pepira, dos Pintos, são freqüentes *sills* e diques de diabásio, exercendo o papel fundamental na sedimentação.

#### **3.1.2.4 Formação Itaqueri**

A Formação Itaqueri é representada por conglomerados polimíticos e diamictitos mal selecionados e ricos em fragmentos angulosos sustentados numa matriz arenosa. Os diamictitos apresentam fragmentos, seixos e até calhaus de quartzo, quartzito e rochas vulcânicas, em corpos de espessura irregular, matriz arenosa ou até mesmo argilo arenosa.

Os arenitos são maciços, mal selecionados, argilosos ou siltosos, com clastos (grânulos e/ou seixos) dispersos, arredondados ou angulosos, na sua maioria de quartzo. Quase que invariavelmente apresentam-se com cores avermelhadas e manchas brancas irregulares, formando as chamadas “plínticas”, representantes de níveis intermediários das crostas lateríticas regionais.

A distribuição desta unidade ocorre predominante nas serras de Itaqueri e de São Pedro e as feições de relevo características de ocorrência da Formação Itaqueri são os morrotes, sustentados pelos níveis silicificados ferruginosos. Localmente

ocorrem níveis de lateritas de até 1 metro de espessura com seixos e clastos angulosos de “ferricrete” de até 10 a 15 cm e lateritas com aspecto brechóide (SOUSA, 2002).

### **3.1.3 Coberturas Superficiais, Terciárias e Quaternárias**

#### **3.1.3.1 Formação Rio Claro**

Denominada por Björnberg & Landim (1966) como uma cobertura sedimentar neocenozóica, composta de arenitos arcossianos mal consolidados, conglomeráticos e argilitos vermelhos depositados em um ambiente de clima semi-árido. Fulfaro & Suguio (1968) subdividiram a Formação Rio Claro em seqüência basal (sucessão de estratos arenosos com intercalações subordinadas de leitos argilosos) com espessura máxima de 20 metros e interpretada como sendo de calha de paleo-canal fluvial; e seqüência de topo (predominância de argila com brechas intraformacionais e lentes arenosas subordinadas) e interpretadas como de depósitos de planícies de inundação.

Andrade & Soares (1971) estenderam a denominação de Formação Rio Claro para diversas coberturas inconsolidadas na área da Depressão Periférica, em ocorrências pequenas, descontínuas, e com até 30 metros de espessura que ocorrem entre 550 e 700 metros, nas bacias dos rios Corumbataí, Piracicaba, Moji-Guaçu e Tietê. Almeida (1981) considera que essas correlações ainda não estão bem esclarecidas, limitando assim o uso da denominação Formação Rio Claro à área que foi originalmente definida por Björnberg & Landim (1966).

Penteado (1976) define a Formação Rio Claro como o resultado da agradação e degradação em clima semi-árido que ocorreu nas bacias alveolares escalonadas ao longo de antigos eixos de drenagem, admitindo ainda que esses escalonamentos teriam se formado devido às reativações cenozóicas de antigas falhas que teriam funcionado como uma soleira tectônica para a deposição desses sedimentos. Já Fulfaro & Bartorelli (1979), consideram que a gênese da Formação Rio Claro deve estar intimamente ligada ao processo de escavação da Depressão Periférica Paulista, já que sua ocorrência está em pelo menos três níveis altimétricos (600, 700 e 800 metros) próxima à escarpa da Serra Geral.

De acordo com o estudo de Sousa (2002), a Formação Rio Claro ocorre na porção nordeste da área de estudo (Rio Claro e Ipeúna), capeando os principais interflúvios dos rios Corumbataí, Passa Cinco, Cabeça e Ribeirão Vermelho. As maiores ocorrências estão na cidade de Rio Claro e na área rural do campo do cocho e junto à cidade de Ipeúna. Esta unidade apresenta espessura em afloramento entre 2 a 6 metros, porém pode alcançar até 25 e 30 metros, como na localidade denominada de Campo dos Cochos (próximo à cidade de Rio Claro).

Os sedimentos da Formação Rio Claro são arenosos, esbranquiçados, amarelados e róseos, mal consolidados, normalmente não estratificados e muitas vezes com intercalações de lentes argilosas e também níveis conglomeráticos. Mais freqüentemente ocorrem arenitos de coloração variada, esbranquiçados, amarelados, avermelhados e arroxeados, de granulometria fina a média com variação de frações grossas a conglomeráticas, friáveis, que por vezes apresentam estratificação planar e cruzada e níveis conglomeráticos na base.

Ocorrem também na forma de bancos predominando arenitos de granulometria grossa. Normalmente, esta formação assenta-se discordantemente sobre as rochas da Formação Corumbataí, sendo este contato marcado por um nível conglomerático formado por seixos de quartzo, fragmentos de siltito, argilito e sílex. Na porção superior esta formação apresenta-se mais arenosa, e secundariamente mostra leitos argilosos de até 10 cm de espessura.

Os níveis argilosos desta formação, por vezes ocorrem associados a crostas ferruginosas podendo assim indicar processo de laterização. Nos arenitos foi notada a presença de variadas concentrações de óxidos de ferro, dada pela coloração amarelada e arroxeadada e pela cimentação ferruginosa dos seixos.

Localmente, foram encontrados sedimentos da Formação Rio Claro, próximo à Santa Teresinha de Piracicaba, mais precisamente na Estrada Piracicaba – São Pedro. Estes sedimentos apresentam-se arenosos de coloração amarelo-avermelhada com nível de espessura que varia de 20 centímetros a 1 metro composto de seixos e cascalhos de quartzo e quartzito de tamanhos que variam de poucos centímetros até 30 centímetros, arredondados e em contato por falha normal com os sedimentos da Formação Corumbataí.

Portanto, a sedimentação Rio Claro, que ultrapassa os limites impostos pelas soleiras de diabásio é possivelmente associada à reativação de falhas de movimentação normal e falhas transcorrentes que ocorrem próximas à estrutura de Artemis. Em alguns afloramentos, pacotes da Formação Rio Claro mostram-se organizados, com uma variação de clastos grossos (conglomerados) ou brechas intraformacionais na base, pacotes de arenitos e arenitos conglomeráticos, argilitos de espessuras variadas entre 0,5 a 1,2 metros, recobertas por arenitos maciços mal selecionados, ligeiramente conglomeráticos (SOUSA, 2002).

### **3.1.3.2 Coberturas Superficiais Indiferenciadas**

As coberturas superficiais indiferenciadas, segundo Sousa (2002) que as estudou em detalhe, são constituídas por materiais conglomeráticos, cascalhos, areias e argilas e os depósitos aluviais recentes associados à rede de drenagem.

Na área do estudo são representados por depósitos colúvio-eluviais, areno-argilosos, depósitos de cascalhos aluviais em terraços elevados e intermediários e depósitos aluviais recentes e nas proximidades da Fazenda Pau Cavallo (porção sudoeste), ocorrem depósitos de sedimentos arenosos de coloração esbranquiçada, constituídos por cascalhos aluviais com seixos e clastos de tamanhos que variam de 3 a 15 centímetros de natureza silicosa (quartzo, quartzito e silexito) arredondados a sub-arredondados, apresentando espessura de aproximadamente 1,5 metro, sustentados por clastos. Por vezes, estes sedimentos apresentam intercalações de lentes arenosas formadas por grãos de quartzo milimétricos a centimétricos, arredondados a subarredondados, cimentados numa matriz arenosa de granulação grossa.

Próximo à cidade de Laras, às margens do Rio Tietê, os sedimentos de cobertura são representados por níveis de aproximadamente 50 centímetros de espessura com seixos de quartzo de tamanhos que variam de poucos centímetros e clastos de até 15 centímetros, cimentados numa matriz arenosa, às vezes recobrendo sedimentos da Formação Pirambóia e por vezes da Formação Corumbataí. Os seixos são arredondados e sub-arredondados.

Na região vizinha à cidade de Águas de São Pedro, são encontrados depósitos de cobertura representados por material areno-argiloso de coloração amarelo-avermelhada, apresentando nível de cascalhos com seixos e clastos de

quartzo de tamanho que variam de 1 a 6 centímetros, sub-angulosos a arredondados. A espessura dos níveis de cascalhos varia de 10 a 50 centímetros e por vezes, esses cascalhos encontram-se cimentados na matriz areno-argilosa.

Ainda na região da cidade de Águas de São Pedro e São Pedro, ocorrem depósitos colúvio-eluviais areno-argilosos inconsolidados, sem estrutura sedimentar, de coloração avermelhada e com percentual maior de areia que argila. Normalmente, apresentam em sua base uma linha de seixos ou cascalhos formados por quartzo e fragmentos de limonita. Este tipo de cobertura que ocorre nesta região, sem estruturas (colúvio-eluviais) desenvolve-se em função do substrato arenoso do Grupo Itararé e das Formações Botucatu e Pirambóia.

Na Serra de Itaqueri os sedimentos de cobertura são representados por pacotes areno-argilosos de coloração amarelada, de aspecto mosqueado com alternâncias de níveis de granulação mais grossa com seixos de quartzo angulosos a sub-ângulosos que por vezes apresentam laterizados, cimentados na matriz. Localmente são encontrados clastos de argilito dentro da matriz.

No sopé da Serra de Itaqueri, ocorre cobertura conglomerática composta de seixos e fragmentos de basaltos, quartzo, arenito silicificado, sílex que variam de arredondados a angulosos e canga laterítica em contato com a Formação Pirambóia. Estas coberturas, que ocorrem preferencialmente no sopé das escarpas são consideradas como neocenozóicas, já que fazem parte da evolução destas escarpas.

Nas proximidades da localidade de Ibitiruna ocorrem depósitos relativamente extensos e delgados de sedimentos areno-argilosos sem estruturas sedimentares presentes. Por vezes, ocorre fino nível basal formado por grãos e grânulos de quartzo e quartzito e pequenas concreções limoníticas. Este tipo de cobertura ocorre também na localidade de Ajapi e Rio Claro e também na região da Estrutura do Pau D'Alho.

Depósitos aluviais recentes se restringem aos leitos dos rios Piracicaba, Corumbataí, da Cabeça, Tietê, Itaqueri e ao longo dos ribeirões Guamium, da Jibóia e do Lobo. E a presença de rochas básicas é favorável à criação de soleiras, a montante das quais se acumulam os aluviões, como por exemplo, ao longo dos rios Corumbataí e da Cabeça, e no ribeirão Guamium, próximo a Estrutura de Pitanga (SOUSA, 2002).



### 3.2 - QUADRO TECTÔNICO DA ÁREA – ÊNFASE NOS ALTOS ESTRUTURAIS

São reconhecidos em estudos como o de Soares (1974) e mais detalhadamente por Sousa (1997) e Sousa (2002), os sistemas de falhas Passa Cinco – Cabeça e Ipeúna – Piracicaba. O sistema de falhas Passa Cinco – Cabeça é constituído por arranjo de falhas normais de *trend* NW – SE e ainda falhas isoladas com orientação próximo a N – S. Pode ser entendido como um sistema de falhas normais com abatimento do bloco NE e soerguimento do bloco SW.

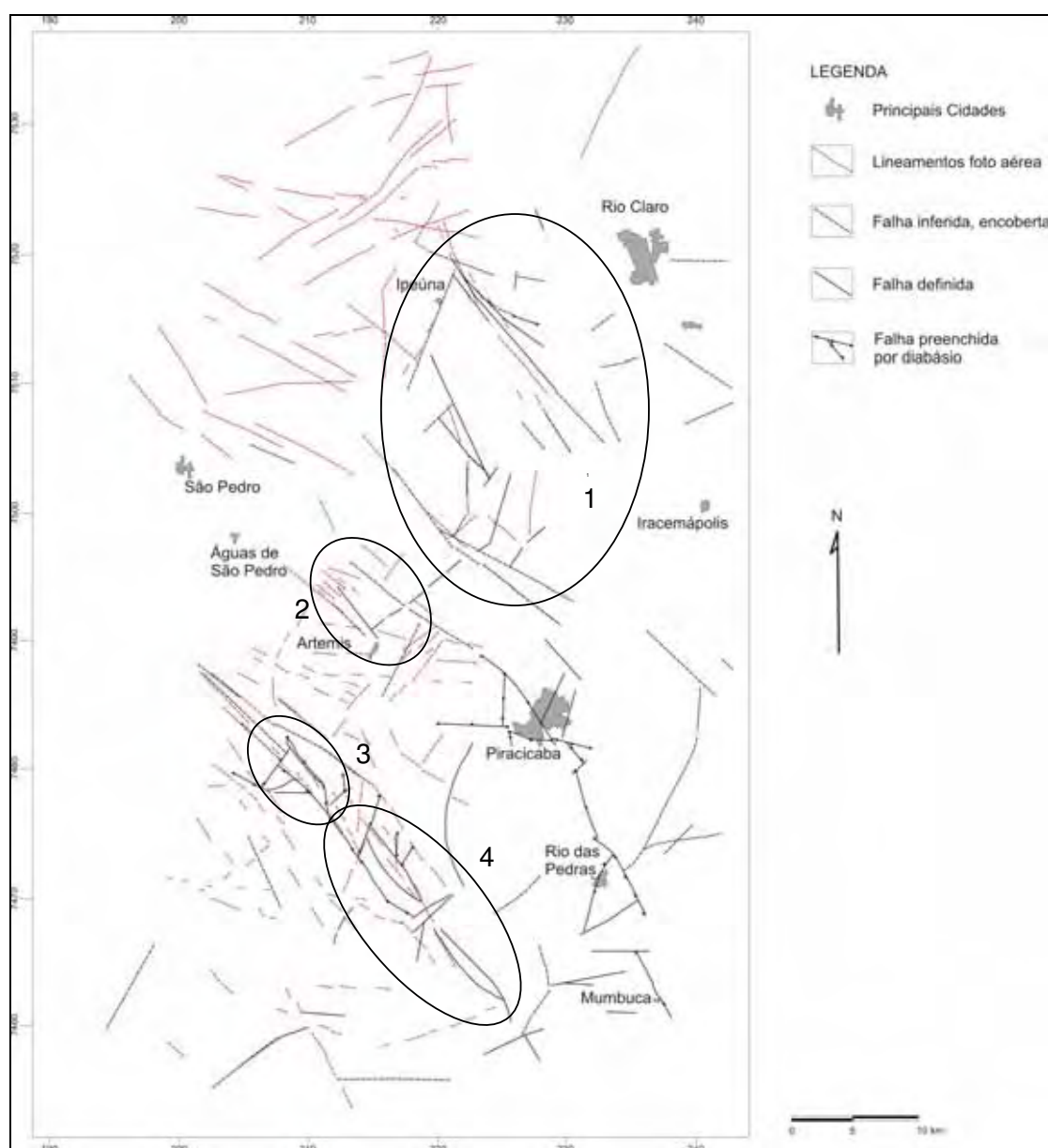
O sistema de falhas Ipeúna – Piracicaba apresenta um arranjo de falhas normais de *trend* preferencial NW – SE e ainda NE – SW e algumas isoladas de *trend* N – S e E – W. Estas falhas limitam a porção oeste da Estrutura de Pitanga e de modo geral, representam o bloco abatido WSW – SW e bloco soerguido ENE – NE. Esses sistemas de falhas Passa Cinco – Cabeça e Ipeúna – Piracicaba apresentam evidências de movimentações com componente horizontal (dextral e sinistral) preferencialmente nas estruturas de orientação NW - SE.

O quadro estrutural e tectônico da área é condicionado pela distribuição das unidades litoestratigráficas na forma de blocos soerguidos, abatidos, controlados por falhamentos levando a que unidades mais jovens aflorem ao lado de rochas mais antigas. As inclinações das camadas em geral são de pequeno porte, com mergulhos que variam de  $2^{\circ}$  a  $5^{\circ}$ , embora localmente encontrem-se mergulhos de valores maiores, com até  $75^{\circ}$  associados a blocos limitados por falhas

Em termos morfoestruturais, a área é fortemente condicionada pelo arranjo de lineamentos orientados a NW, E-W e NE, que se relacionam às zonas de falhas normais. Os feixes de falhas NW-SE são caracterizados por blocos basculados para NE e SW condicionando a geometria dos altos estruturais de Pitanga, Ártemis, Pau D'Alho e Jibóia (Figura 3.2).

A morfotectônica da área é resultado da atuação de um regime distensivo que gerou falhas normais NE-SW, associado à fragmentação do Gondwana e também de um regime transcorrente, que reativaram discontinuidades pré-existentes através de grandes traços, provavelmente herdados de zonas de falhas do embasamento, das principais falhas e lineamentos mapeados em superfície e interpretados em fotografias aéreas.

Portanto, os altos estruturais assim como seu arcabouço geológico-estrutural, objeto principal deste estudo, são descritos em maior detalhe quanto a sua compartimentação na região nos sub-itens a seguir;



**Figura 3.2** Principais lineamentos e falhas condicionantes dos altos estruturais na área estudada e acima delimitada (elipses pretas): 1) Pitanga; 2) Artemis; 3) Pau D'Alho e 4) Jibóia (modificado de Sousa, 2002).

### 3.2.1 Estrutura de Pitanga

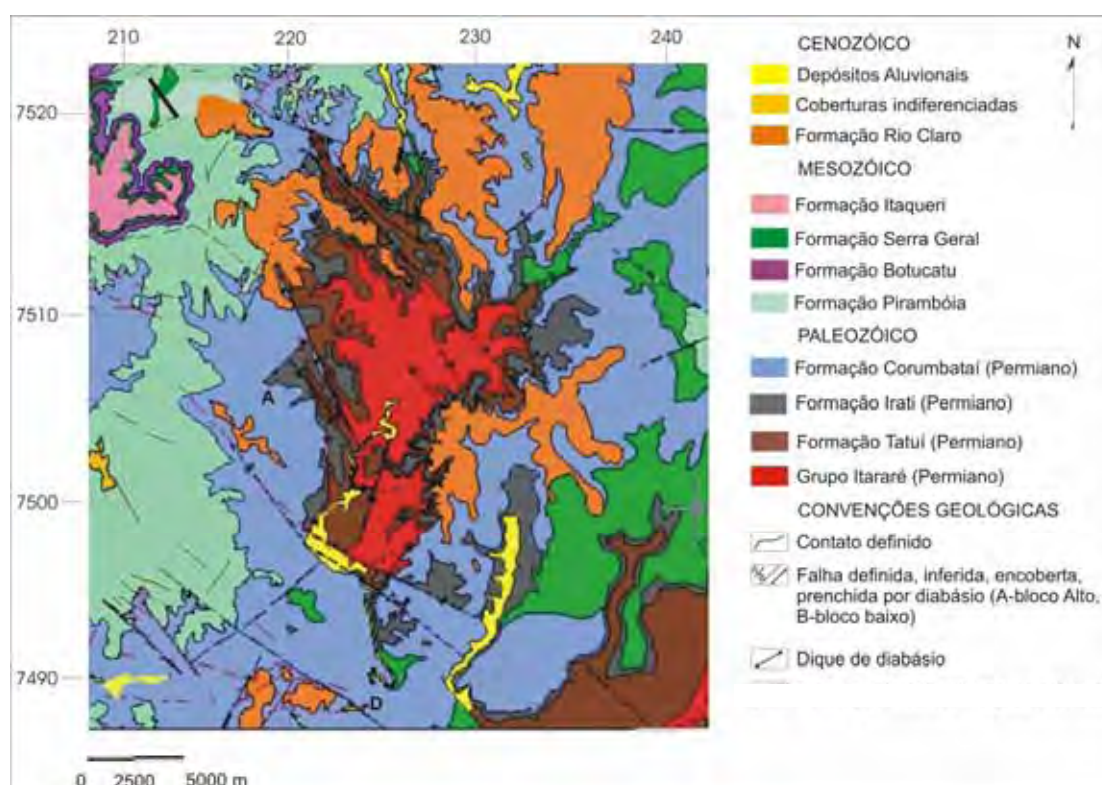
O alto estrutural de Pitanga, é uma estrutura inicialmente relacionada a dobramentos e foi reconhecida inicialmente por Washburne (1930) e Almeida & Barbosa (1953), a falhamentos (Fúlfaro et al., 1982; Souza Filho, 1983), ou ambos os processos (Soares, 1971). Mais recentemente foi designado por Riccomini (1995), de anticlinal de Pitanga, nome originalmente atribuído por Washburne (*op. cit*), que considerou esta feição o resultado de um dobramento *en echelon*, associado a um binário transcorrente sinistral de orientação geral NNW, e coincidente com o lineamento do Rio Moji-Guaçu (COIMBRA et al., 1981).

Segundo estudos de Riccomini (1992) e Riccomini (1995), a região do alto estrutural de Pitanga possui uma evolução tectônica polifásica, marcada por seis fases de intensa movimentação e deformação; 1) eventos sísmicos sinsedimentares do Permiano Superior a Triássico Inferior, 2) extensão NE-SW e secundariamente NW-SE, com a colocação de diques e *sills* de diabásio da Formação Serra Geral, no Cretáceo Inferior, 3) transcorrência dextral com compressão NW-SE e extensão NE-SW, com manifestação inicial no Cretáceo Inferior, penecontemporânea a fase tardia do magmatismo Serra Geral, 4) compressão NE-SW, e 5 e 6) inicialmente extensão e posteriormente compressão de direção NW-SE, quaternárias e ambas com caráter tectônico. Esta situação estrutural favoreceu a exposição de significativa quantidade do pacote rochoso que compõem a bacia sedimentar do Paraná.

Em um estudo efetuado em ocorrências de sílica microcristalina por Riccomini, (1997) nos sedimentos da Formação Tatuí, essas feições ocorrem sob forma de nódulos e concreções de sílex disseminados nos arenitos finos das porções do topo da formação. Os processos genéticos de cristalização desse tipo de sílica são associados a eventos hidrotermais, e dentre outros fatores, o fato de estarem distribuídas ao longo de fraturas, provavelmente ativas durante a fase de extensão NE-SW e, secundariamente, NW-SE do Cretáceo Inferior. São relacionadas, portanto, aos estágios finais do magmatismo da Formação Serra Geral a origem de águas hidrotermais.

Sousa (1997) descreve a estrutura de Pitanga como uma feição assimétrica, com flanco oeste marcado por falhas e o flanco leste caracterizado por uma ligeira inclinação de camadas. Em seu interior ocorrem baixos intercalados, também marcados por falhas e camadas inclinadas. A autora reconheceu pelo menos três

etapas para o desenvolvimento das falhas que formara essa estrutura; (1) falhas normais apontando para a distensão aproximada E-W, (2) falhas sindeposicionais à Formação Rio Claro com indicação de tectônica distensiva e (3) falhas que deformam a Formação Rio Claro, inversas e transcorrentes (Figura 3.3).



**Figura 3.3** Mapa geológico/estrutural em detalhe do Alto Estrutural de Pitanga (Modificado de Sousa, 2002).

A observação em mapa geológico (Sousa, 2002), permite reconhecer a Estrutura de Pitanga como um arranjo geométrico na forma de sistemas de falhas (Sistema Passa-Cinco e Sistema Ipeúna - Piracicaba) ou de falhas associadas. Os sistemas de falhas mais importantes e expressivos da área da estrutura de Pitanga são marcados pelos alinhamentos dos rios Passa-Cinco e Corumbataí, formando os sistemas de falhas Passa Cinco - Cabeça e Ipeúna Piracicaba (ANDRADE & SOARES, 1971).

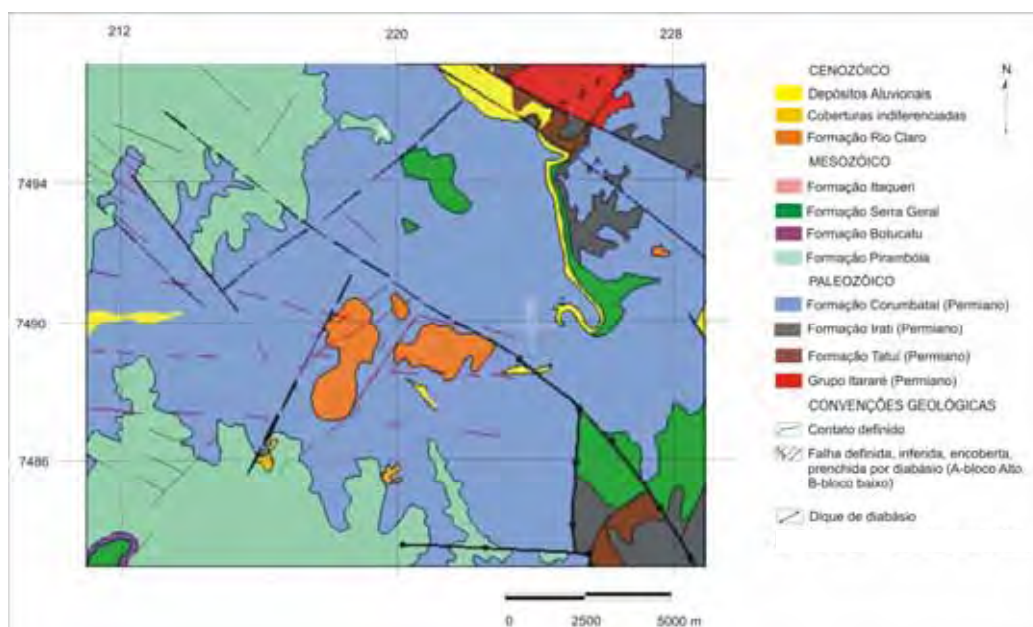
Estes sistemas de falhas apresentam diversas estruturas e ao longo deles foram reconhecidas reativações, observadas através da análise do sentido de movimento e de estrias e de falhas e também com a observação de feições de

relevo e de drenagem que indicam possíveis atividades neotectônicas (Sousa, 2002).

### 3.2.2 Estrutura de Artemis

Essa estrutura foi descrita inicialmente por Andrade & Soares (1971) ao realizarem mapeamentos geológicos na Bacia do Paraná. Trata-se de uma estrutura caracterizada pela presença de sedimentos da Formação Corumbataí na faixa de afloramentos da Formação Pirambóia, de acordo com Bósio (1973). Possui uma estrutura ligeiramente arqueada com seu eixo maior cortado pelo rio Piracicaba e mergulhos divergentes próximos à desembocadura do Ribeirão Limoeiro (Figura 3.4).

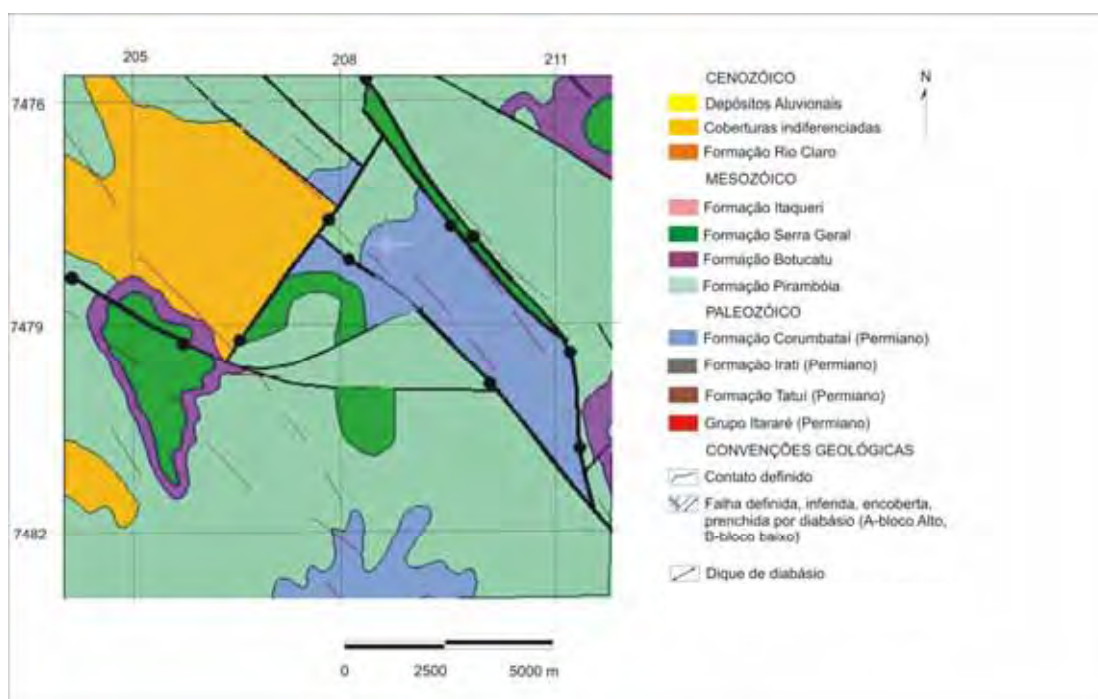
A estrutura de Artemis teve sua origem a partir de esforços tectônicos, sem nenhum efeito por levantamento de rochas intrusivas. Como não foram observadas variações faciológicas das rochas da Formação Corumbataí e Pirambóia, é provável que este tectonismo não tenha sido contínuo no tempo e possivelmente foi contemporâneo ou posterior ao vulcanismo basáltico (SOARES, 1974).



**Figura 3.4** Mapa em detalhe do Alto Estrutural de Artemis (Modificado de Sousa, 2002).

### 3.2.3 Estrutura de Pau D' Alho

Essa estrutura foi descrita por Soares (1974) como um sistema de *horst* e *graben* situado no divisor de águas de Piracicaba e Tietê, com falhas de direção principal NW, cujos mergulhos confirmam uma estrutura de falhas com camadas adernadas em várias direções, influenciando as feições geomorfológicas. Castro (1973) define essa estrutura como um alto estrutural formado por um sistema de falhas normais de orientação NW que gerou deslocamentos e basculamentos de blocos, do tipo *horst* (Figura 3.5).



**Figura 3.5** Mapa em detalhe do Alto Estrutural de Pau D'Alho (Modificado de Sousa, 2002).

A estrutura do Pau D'Alho, em um quadro regional, apresenta mergulhos suaves de até  $5^{\circ}$ , embora localmente seja encontrada inclinação dos estratos com até  $25^{\circ}$  associada a blocos limitados por falhas. Em mapa é possível reconhecer que o arranjo geométrico principal da estrutura do Pau D'Alho consiste de um conjunto de falhas direcionadas NW-SE, de movimentação normal, às quais se associam diques de diabásio (Figura 3.5). Internamente a estrutura, as unidades litoestratigráficas se distribuem na forma de blocos soerguidos e abatidos com uma



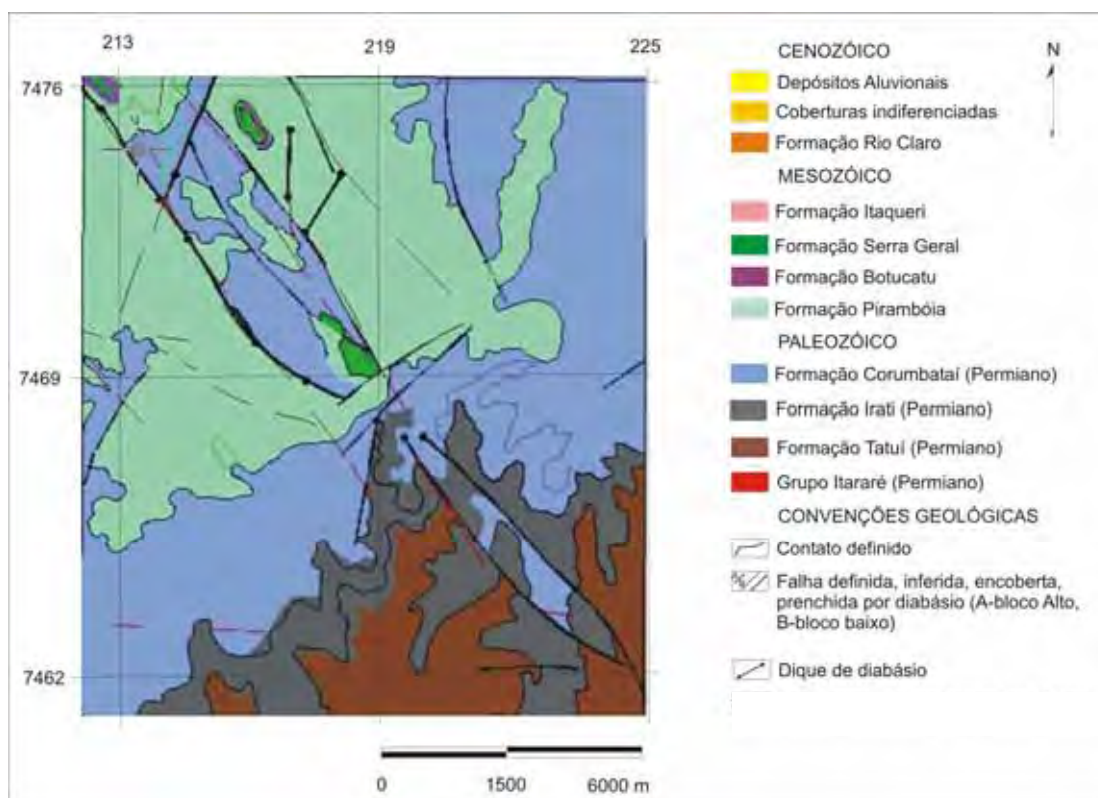
inclinação dos estratos associada a blocos limitados por falhas de orientação NW-SE, NE-SW, NNW-SSE e próxima a E-W. Este arranjo é constituído por cerca de sete falhas que limitam a estrutura a SW, próximas as serras isoladas que ocorrem na área (serras de Fortaleza e Morro Chato) e duas no limite NE da estrutura (serras do Pau D'Alho e da Floresta).

Dentro deste arranjo, pode-se considerar como mais importantes às falhas que ocorrem a SW da estrutura que promovem o abatimento de bloco a SW. A importância dessas falhas se dá principalmente pela diversidade de estruturas encontradas ao longo delas. Neste conjunto de falhas foi possível observar a marcante associação de diques de diabásio, o reconhecimento direto dos planos principais das falhas, além de pequenos planos de falhas transcorrentes. Na parte NW da estrutura, o arranjo permite supor um controle dessas falhas na sedimentação de depósitos de coberturas superficiais (Sousa, 2002).

#### **3.2.4 Estrutura de Jibóia**

Essa estrutura descrita por Soares (1974) que a definiu como um bloco soerguido a sul do Monte Branco e ao norte da falha de Monte Branco, relativa à fazenda de mesmo nome. Encontra-se a SE das falhas do Alto Estrutural de Pau D'Alho, representando uma extensão desta estrutura, principalmente por ser limitada a SW pela falha do Monte Branco que também margeia a estrutura do Pau d'Alho. Seu arcabouço principal é constituído por falhas normais paralelas com orientação em torno de  $45^{\circ}$  W que a limitam a SW e NE fazendo com que as rochas da Formação Corumbataí sejam alçadas ao mesmo nível das rochas da Formação Pirambóia. Prolongando-se para SE ocorre uma estrutura na forma de *graben* nesse sistema de falhas. Soares (*op.cit.*) denominou essa estrutura de “serrote” e Sousa (2002), a considera como parte da estrutura de Jibóia.

Essa feição é caracterizada por arranjos de blocos limitados por duas falhas paralelas, fazendo com que as rochas da Formação Corumbataí ocorram dentro da zona de afloramento das rochas da Formação Irati (Figura 3.6).



**Figura 3.6** Mapa em detalhe do Alto Estrutural de Jibóia (Modificado de Sousa, 2002).

### 3.3 CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DOS ALTOS DE PITANGA, ARTEMIS, PAU D'ALHO E JIBÓIA NA REGIAO DE ESTUDO

Em estudo recente das estruturas realizado por Sousa (2002) na área de estudo foi aplicado os conceitos de estudos de populações de falhas aplicando-se as técnicas de Arthaud (1969), com a definição os planos dos movimentos e a distribuição dos pólos destes planos, e a técnica dos diedros retos de Angelier & Mechler (1977), por meio do reconhecimento dos diedros compressivos e diedros distensivos.

Esse estudo é de importância na identificação e localização dos principais *trends* de fraturas e falhas na área e da compartimentação dessas estruturas para um ajuste ideal do modelo gerado, assim como para a interpretação e análise dos principais domínios gravimétrico/magnetométrico gerados neste estudo. Desta forma, é possível delimitar e separar as principais falhas que limitam os pacotes rochosos conjuntamente com os corpos ígneos que os preenchem e condicionam a



atual geometria apresentada pelos mesmos. Para a resposta magnética/gravimetétrica dos dados observados em campo *versus* dados calculados pelo modelo 2D <sup>1/2</sup> é importante se ter mapeado e identificado em superfície a localização dessas fontes anômalas (soerguimentos, diferenças litológicas e corpos ígneos) para a construção de um modelo o mais representativo possível do real, evitando desta forma a indução de erros provocados por esses corpos no modelo.

Para a área dos altos estruturais, observou-se que as falhas são as principais estruturas da região e formam conjunto de planos paralelos/subparalelos que promovem a formação de altos e baixos estruturais, ou aparecem de forma isolada, controlando a linha de afloramentos das unidades afetadas. As juntas também são as estruturas que juntamente com as falhas formam o quadro geométrico principal. As medidas de fraturas indicam que estas são subverticais, com alto mergulho (84° a 89°) e constituem duas famílias principais em direções ortogonais segundo orientações NW-SE e NE-SW, sendo a primeira concordante com o *trend* regional e coincidente com os principais lineamentos e falhas da área.

### **3.3.1 Estrutura de Pitanga**

Para o Alto Estrutural de Pitanga, foram considerados os dados reconhecidos em estudos do conhecido sistema de falhas Passa Cinco – Cabeça e Ipeúna – Piracicaba, descritos na literatura por Andrade & Soares (1972) e Sousa (1997), que são representantes dos principais elementos estruturais mapeados em superfície e que são formados pelas já conhecidas macroestruturas.

#### **a) Sistema de Falhas Passa Cinco – Cabeça**

É formado por arranjo de falhas normais (*trend* NW-SE) e falhas isoladas com orientação próxima a N-S. Pode ser entendido como um sistema de falhas normais, com abatimento do bloco NE e soerguimento do bloco SW .

As falhas normais que ocorrem em maior número e de maior expressão posicionam  $\sigma$  1 vertical,  $\sigma$  2 NNW-SSE/horizontal e  $\sigma$  3 ENE-WSW/horizontal. Um pequeno número de falhas inversas reconhecidas aponta para o  $\sigma$  1 N 40° W/horizontal,  $\sigma$  2 N 50° E/horizontal e  $\sigma$  3 sub-vertical. Para as falhas transcorrentes,

a posição do  $\sigma$  1 não é muito clara, mas sugere uma direção NE-SW/horizontal,  $\sigma$  2 vertical e  $\sigma$  3 NW-SE/ horizontal.

### **b) Sistema de Falhas Ipeúna – Piracicaba**

Compõem-se de um arranjo de falhas normais (*trend* NW-SE) e também NE-SW com algumas isoladas de direção N-S e E-W. Esse conjunto de falhas limitam a estrutura de Pitanga a oeste e de modo geral representa o bloco abatido a WSW-SW e bloco soerguido a ENE-NE .

As falhas normais sugerem um padrão de guirlanda e indicam um eixo vertical e dois sub - horizontais. O  $\sigma$  1 encontra-se na vertical (esperado para um sistema distensivo), o  $\sigma$  2 N 20° E/ sub - horizontal (deduzido) e  $\sigma$  3 N 70° W/sub-horizontal.

As falhas transcorrentes dextrais desse sistema apontam para  $\sigma$  1 NNW-SSE/horizontal,  $\sigma$  2 vertical e  $\sigma$  3 WNE-ESW/horizontal e as falhas inversas, embora em pequeno número, apontam para  $\sigma$  1 NW-SE/sub - horizontal,  $\sigma$  2 NE-SW/sub-horizontal e  $\sigma$  3 sub-vertical.

Os sistemas de falhas Passa Cinco - Cabeça e Ipeúna - Piracicaba apresentam evidências de movimentações com componente horizontal (dextral e sinistral) preferencialmente nas estruturas de orientação NW – SE (SOUSA, 2002).

### **3.3.2 Estrutura de Artemis**

O arcabouço estrutural dessa estrutura é composto por falhas normais de orientação NW-SE com basculamento para NE-SW e que promovem a formação de altos e baixos e uma inclinação de camadas em torno de 10° a 15°, associadas a estas falhas. Para as falhas normais o quadro aponta para uma tectônica distensiva ( $\sigma$ 1 vertical) NE-SW. As falhas (normais, inversas e transcorrentes) que deformam as coberturas cenozóicas aponta para uma tectônica compressiva NE-SE com  $\sigma$  2 vertical e que se reflete na reorganização da rede de drenagem através da reativação de antigas estruturas (falhas normais NW-SE). Esta atividade é observada nas anomalias de drenagem, do tipo capturas, curvas anômalas, inflexões tipo S sugerindo uma movimentação transcorrente dextral nos afluentes do Rio Piracicaba.

### 3.3.3 Estrutura do Pau D'Alho

Compõem-se de um conjunto de falhas normais que variam de subverticais a subhorizontais com orientação preferencial de NW-SE e, secundariamente NE-SW. As falhas de orientação NW-SE formam dois conjuntos que delimitam a estrutura a SW e a NE. As falhas da borda SW são consideradas mais importantes devido a diversidade de estruturas encontradas (falhas normais, inversas e transcorrentes). As inclinações das camadas são de maior mergulho nessa porção da estrutura, com mergulhos de camadas de até  $20^{\circ}$  para SW associadas às falhas.

Um grande número de rochas básicas está associado às falhas normais que configuram o arranjo principal, com orientação NW-SE. Observam-se também, ao longo de perfis, feições do tipo *horsts* e *grabens* com inclinações dos estratos na porção interna da estrutura.

Na estrutura de Pau D' Alho, os traços principais são de falhas normais NW-SE, desenhando o arranjo de altos e baixos alongados. O tratamento realizado separadamente para as falhas normais NW-SE à semelhança das estruturas anteriores, indica um bom posicionamento para o eixo principal, vertical e  $\sigma 2$  NW-SE/horizontal e  $\sigma 3$  NE-SW/ horizontal. O traço principal de falhas NE-SE é dada pela falha do Monte Branco, que apresenta a mesma direção, com bloco abatido a SW. O arranjo de pequenas falhas associadas ao seu traço mostra  $\sigma 1$  em torno de  $N 60^{\circ} E/70^{\circ} NE$ ,  $\sigma 2$   $N 30^{\circ} W$ /horizontal e  $\sigma 3$   $S 60^{\circ} W/20^{\circ} SW$ .

As falhas normais NE-SW também não contribuem substancialmente com a organização estrutural do Alto do Pau d' Alho, embora ocorram pequenos planos de falhas normais nesta orientação. A posição dos eixos distensivos não é bem definida, com indicação de  $\sigma 3$  entre NW-SE e NNE-SSW/sub - horizontal e  $\sigma 1$  vertical. O arranjo de  $\sigma 2$ , no entanto, está indicado entre NE-SW a ENE-WSW.

### 3.3.4 Estrutura de Jibóia

Formada por conjunto de falhas normais de orientação NW-SE e subverticais. A sua borda SW é marcada pela continuidade da falha do Monte Branco, principal falha dessa estrutura e do alto de Pau D'Alho. São encontradas inclinações de camadas de  $15^{\circ}$  para SW e inclinações de  $5^{\circ}$  no interior da estrutura.

A estrutura em forma de *graben* é considerada como parte da Estrutura de Jibóia é formada por duas falhas normais que a limitam a SW e NE. Tanto na borda NE como SW são encontradas inclinações de camadas que chegam até a  $75^{\circ}$  mergulhando para SW e NE. São encontrados também, no interior dessa estrutura, mergulhos altos.

O quadro apresentado para as falhas normais, considerando as preenchidas por rochas básicas de orientação preferencial NW-SE, permite definir o eixo principal do elipsóide de tensões, vertical, caracterizando uma tectônica distensiva com esforços trativos NE-SW que configuram o arranjo principal dessa estrutura de Jibóia. Este quadro é o mesmo apresentado pelas falhas normais NW-SE formadoras da Estrutura de Pitanga e Pau D'Alho.

## **CAPÍTULO 4 - GRAVIMETRIA, MAGNETOMETRIA E SISTEMA GPS DIFERENCIAL - FUNDAMENTOS TEÓRICOS E CARACTERÍSTICAS DE CADA MÉTODO**

---

---

Os métodos gravimétricos e magnetométricos consistem basicamente na obtenção de medidas das variações no campo gravitacional e magnético terrestre, com o objetivo de mapear variações de densidade e magnetização nos materiais que compõem a crosta da Terra e assim subsidiar estudos em várias áreas das geociências, como estudos geotectônicos, em apoio ao mapeamento geo-estrutural.

Em estudos geofísicos, baseiam-se no fato de que diferentes distribuições de densidade e de magnetização abaixo da superfície, provocam distorções (anomalias) no campo gravitacional normal e magnético que envolve a Terra. Portanto, nesses levantamentos, são medidas a atração gravitacional e a variação da suscetibilidade magnética em diferentes pontos da superfície da Terra, com o principal objetivo de detectar as diferenças de densidade e as anomalias no campo magnético próximo as rochas correlacionadas às estruturas geológicas. Na prospecção de petróleo, minérios e geotectônica, esses métodos potenciais são empregados para se localizar e delimitar grandes estruturas, falhas e corpos mineralizados. No caso do petróleo, essas estruturas são potenciais armazenadores de óleo e gás. Essas estruturas, na forma de domos salinos, anticlinais ou falhas, possibilitam acumulações de hidrocarbonetos e chegam a ter anomalias gravimétricas da ordem de dezenas de miligals.

Na gravimetria a atração gravitacional em cada ponto da Terra é definida em termos gerais, pela forma e o tamanho do planeta conjuntamente com a velocidade de rotação do mesmo. Na magnetometria, o levantamento é feito tendo-se como base um campo magnético pré-estabelecido para cada latitude/longitude onde se efetua as medições de cada estação levantada.

#### 4.1 PRINCIPAIS FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO MÉTODO GRAVIMÉTRICO

A força gravitacional  $F$ , entre duas partículas com massas  $m_1$  e  $m_2$  é, segundo a lei da Gravitação Universal de Newton, diretamente proporcional ao produto das massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância  $r$  entre seus centros de massa:

$$F = \frac{G.m_1.m_2}{r^2} r_1$$

onde:

$G$  é a constante gravitacional universal ( $6,672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{Kg}^2$  no sistema SI e  $6,672 \times 10^{-8} \text{ dynas.cm}^2/\text{g}^2$  no cgs)

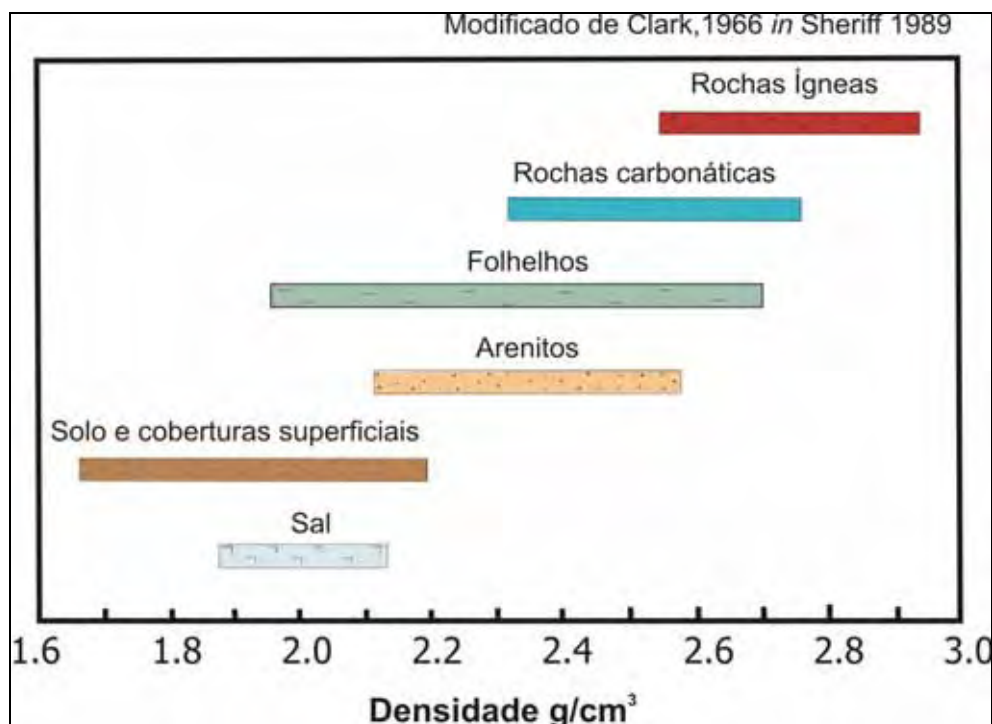
$r_1$  é o vetor unitário dirigido da massa  $m_1$  para  $m_2$

Quando consideramos a Terra com massa  $M$  e raio  $R$ , uma massa  $m_2$ , que pode ser o elemento sensor de um gravímetro, na superfície, estar sujeita à aceleração gravitacional terrestre dada por:

$$g = \frac{G.M}{R^2}$$

Como a distribuição das densidades (Figura 4.1) no interior da Terra não é perfeitamente homogênea, quando as massas estão dispersas em volumes de grandes dimensões é mais conveniente dividi-las em elementos infinitesimais ( $dM$ ) e somar o efeito da cada um. Portanto a equação mais correta é:

$$g = G \int_v \frac{dM}{R^2}$$



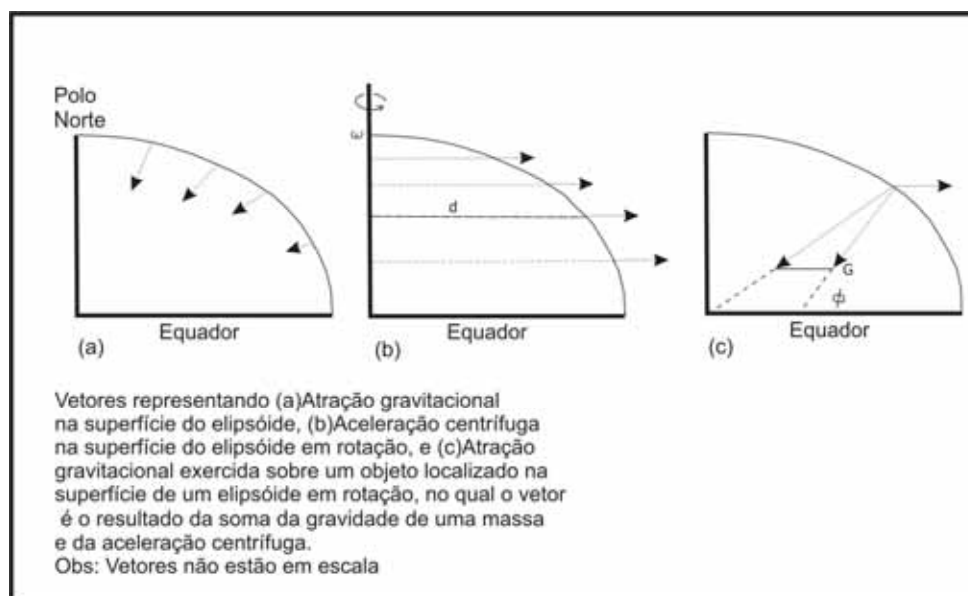
**Figura 4.1** Densidades aproximadas em diferentes litologias (Adaptado de Sheriff, 1989).

Ao se movimentar rotacionalmente, a Terra está sujeita a uma força centrífuga, que depende do raio de rotação ( $l$ ) e da velocidade angular ( $w$ ). A aceleração centrífuga associada a esta força é definida por:

$$a_c = w^2 \cdot l$$

A orientação da aceleração de atração é para o centro da Terra e a orientação da aceleração centrífuga é no sentido contrário (ver Figura 4.2). Como a intensidade da atração é muito maior que a centrífuga, um corpo na superfície é atraído para o centro da Terra, com uma aceleração resultante denominada de gravidade (ou aceleração gravitacional  $g$ ), cuja intensidade é:

$$g = G \int_v \frac{dM}{r^2} - w^2 l \cos \phi$$



**Figura 4.2** Representação esquemática dos efeitos da rotação da Terra e respectivos vetores (ROBINSON & ÇORUH, 1988).

#### 4.1.1 Tratamento dos Dados Gravimétricos (Redução)

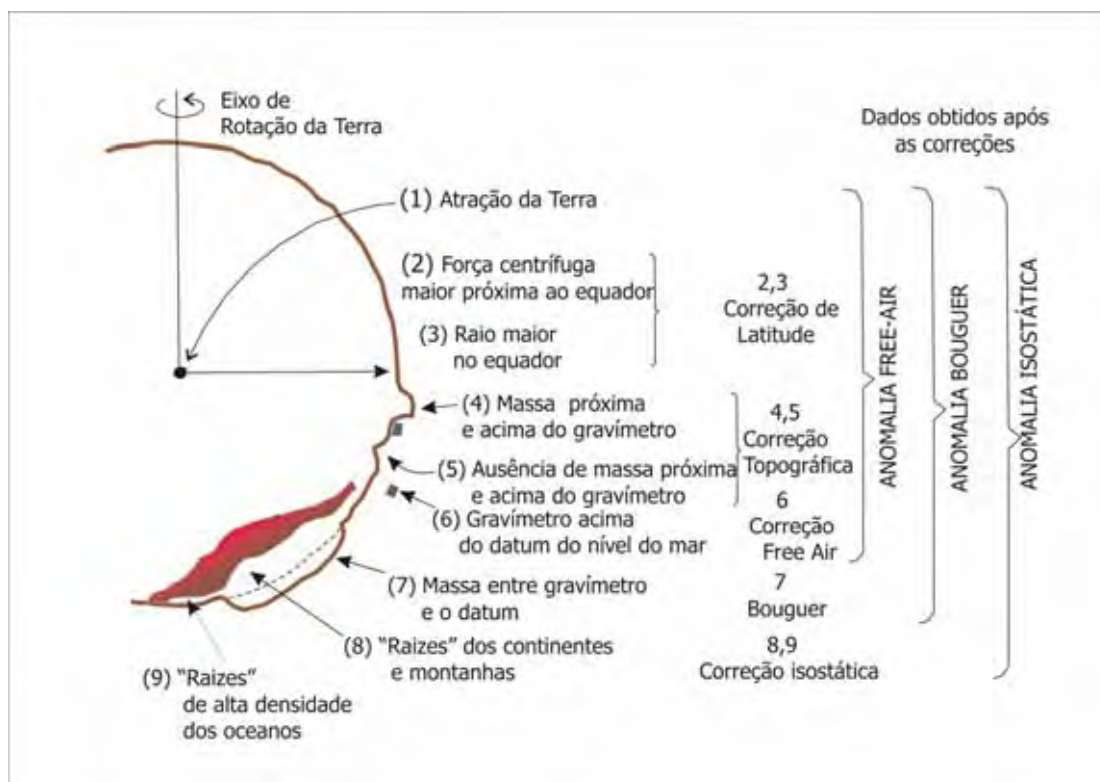
Na teoria, assume-se que a atracção gravitacional da Terra ao longo de toda a sua superfície, é (em média) em torno de 980 Galileu, ou seja, 980.000 mGal (SHERIFF, 1989). Em média os valores das anomalias gravimétricas em campanhas de prospecção são da ordem e magnitude de 1 mGal ou menos. Fatores de correção além da distribuição de massa que afetam o campo gravitacional de interesse são resumidos na Figura 4.3.

Foi estabelecida pela União Internacional de Geodésia e Gravimetria, uma equação teórica para a atracção gravitacional na superfície de um modelo de referência idealizado. Esta equação, adotada em 1971, é expressa por:

$$g = g_e \cdot (1 + C_1 \cdot \text{sen}^2 \phi - C_2 \cdot \text{sen}^2 2\phi)$$

onde:  $\phi$  é a latitude,  $g_e = 978.031,846$  mGal,  $C_1 = 0,005278895$  e  $C_2 = 0,000023462$





**Figura 4.3** Parâmetros envolvidos na obtenção de dados gravimétricos e suas posteriores correções (modificado de Sheriff, 1989).

O valor de  $g_\phi$  representa a aceleração normal da gravidade em mGal, na superfície de referência definido por valores numéricos que dependem do raio equatorial, o coeficiente de achatamento  $\omega$ , e a massa da Terra, supondo então que a superfície deste elipsóide de referência seja uma superfície equipotencial.

No entanto, para o cálculo das anomalias gravimétricas, é utilizada a superfície média dos mares, que define o geóide, o qual nem sempre coincide com o elipsóide da referência, devido principalmente a variações laterais da densidade no interior da Terra.

Como a Terra não é uma esfera perfeita e homogênea, a aceleração gravitacional não é constante ao longo de toda sua superfície. A magnitude de uma medida gravimétrica depende de cinco fatores principais: latitude, elevação (altitude relativa ao nível do mar), relevo (ou topografia) da circunvizinhança próxima à estação gravimétrica, marés terrestres e variações de densidade em superfície. Para isolar o efeito dessa última variação (densidade) que é muito menor que as

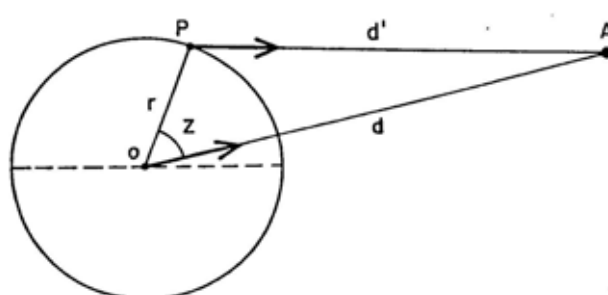
variações provocadas pelos efeitos de latitude e de altitude, é necessária a aplicação de uma redução de dados. A mudança da aceleração gravitacional de áreas equatoriais para polares é de aproximadamente 5 Gal ou seja, em torno de 0,5% do valor total de  $g$  (980 Gal). O efeito produzido nas variações de altitude pode ser maior que 0,1 Gal ou 0,01% de  $g$ . Para efeitos comparativos, uma anomalia gravimétrica considerada alta, em prospecção de petróleo pode ser da ordem de 10 mGal ou 0.001% de  $g$ . Portanto, uma variação em  $g$  que pode ser significativa em alvos exploratórios, é pequena e sutil em comparação a magnitude do valor de  $g$  e dos efeitos de latitude e altitude. Por isso é necessário remover-se esses efeitos através da correção e redução dos dados levantados em campo.

#### 4.1.1.1 Efeitos de Maré ou Luni – Solares

A interação gravitacional da Terra com a Lua e o Sol introduz perturbações no campo de gravidade terrestre que devem ser removidas da aceleração de gravidade medida nos levantamentos gravimétricos.

A perturbação luni-solar numa estação gravimétrica (Figura 4.4) é obtida a partir das coordenadas geodésicas da estação, dos elementos orbitais a Terra e da Lua, das massas da Terra, da Lua e do Sol, e dos parâmetros da elasticidade terrestre. As fórmulas geralmente usadas para o cálculo da perturbação luni-solar nas observações dos levantamentos gravimétricos rotineiros são descritas em detalhe em estudos como o de Sá (1994).

Para a Terra sólida e rígida, o potencial de maré no ponto **P** da superfície terrestre, gerado pelo astro perturbador em **A** (Figura 4.4), é expresso pelo potencial diferencial desse ponto com o geocentro.



**Figura 4.4** Perturbação Luni – Solar (SÁ, 1994).

#### 4.1.1.2 Correção da Deriva Instrumental ( $C_D$ )

A deriva instrumental é a composição das derivas estática e dinâmica ocorridas no percurso (ou *Loop*) segundo Sá, (1994), isto é:

$$D = D_e + D_D$$

Onde  $D_e$  é a deriva estática e  $D_D$  é a deriva dinâmica. A deriva estática de uma linha gravimétrica representa a soma das variações ocorridas nas interrupções da linha, geralmente com duração maior que uma hora.

$$D_e = \sum (L_i - L_{i+1})$$

Onde:  $m$  é o número de interrupções da linha e  $L_1$  é a leitura média em mGal corrigida da perturbação luni – solar, nas  $n$  estações da linha (Sá, 1994). O tempo correspondente à deriva estática é expresso por:

$$T_e = \sum_{k=1}^m (T_{i+1} - T_i)$$

#### 4.1.1.3 Correção de Latitude (CL)

O valor da gravidade normal aumenta à medida que nos afastamos do equador em direção aos pólos, ao longo dos meridianos. Consequentemente, valores obtidos em latitudes diferentes não podem ser comparados, sem que antes sejam corrigidos. A correção de latitude é necessária, pois o efeito da atração gravitacional é diferente no equador e nos pólos da Terra.

$$C_L = 0,81 \text{ sen } \phi \text{ mGal/km}$$

Onde:  $\phi$  representa a latitude da estação gravimétrica usada

#### 4.1.1.4 Correção Ar livre (*Free - Air*)

A correção ar – livre (*Free-Air*) elimina a influência da altitude. A gravidade teórica é calculada no nível de referencia do mar e não no nível da estação medida. A correção *free - air* não leva em conta a quantidade de massa existente entre a estação de leitura e o plano do *datum* utilizado. A correção é adicionada à leitura do campo quando a estação de leitura encontra-se acima do plano do *datum* e é subtraída quando a estação estiver abaixo do nível do *datum*. Para as correções de latitude e ar - livre a localização das estações precisa ser precisamente conhecida. No caso de um gravímetro com precisão de 0,01 mGal como o usado nesta tese, uma estação localizada a 45° de latitude, precisará de uma precisão de menos 13 metros (coordenadas X e Y) e de poucos metros (Z ou altitude) para se conseguir essa precisão no levantamento (TELFORD et. al., 1976).

$$C_F = 0.3086 h \text{ mGal}$$

Onde: *h* é a altitude relativa ao nível do mar da estação gravimétrica

O exame das anomalias ar – livre não é, em geral, conclusivo nos levantamentos de prospecção geológica, pois o efeito de massa existente entre as estações e o nível do geóide não é considerado. Somente nas áreas planas ou de relevo muito suave é aceitável a interpretação das anomalias ar – livre, já que a quantidade de massa entre as estações e o geóide é aproximadamente constante produzindo igual efeito em todas as estações (LUIZ & SILVA, 1995).

#### 4.1.1.5 Correção Bouguer

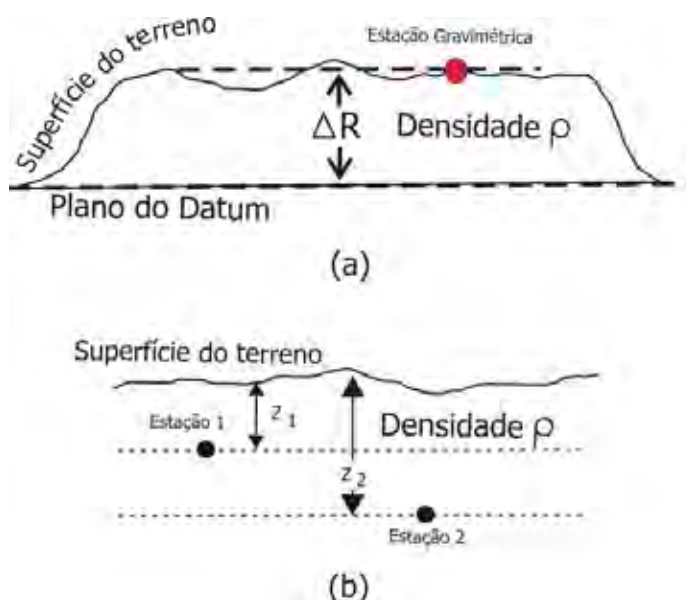
É feita levando-se em conta a atração gravitacional exercida em determinado ponto da crosta, entre a estação que se efetua as medidas gravimétricas e o nível do mar. É levado em conta o efeito de atração produzido pela quantidade de massa entre a estação de medida e o geóide ou *datum* de referência ignorado na correção ar – livre. Uma estação localizada em uma área plana de grande extensão horizontal, com espessura e densidade constante (Figura 4.5) a leitura de gravidade

será maior, devido a massa da placa entre a estação e o geóide. A correção Bouguer é dada por:

$$C_B = \pi G d h, \quad d = 2,67 \text{ g/cm}^3$$

$$C_B = -0.118 h \text{ mGal}$$

Onde  $h$  = altitude da estação,  $d$  = densidade média da crosta da Terra e  $G$  = constante gravitacional.

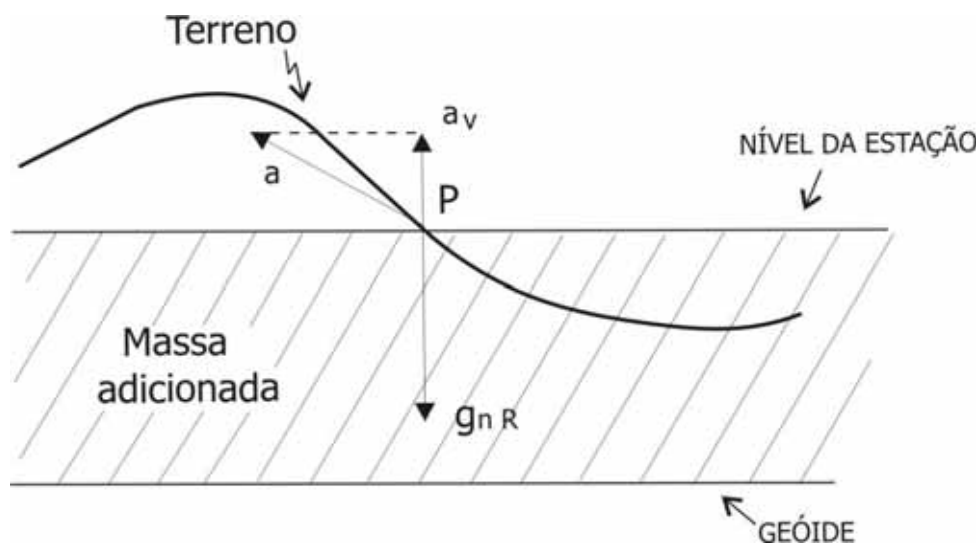


**Figura 4.5** Representação da correção Bouguer segundo Sheriff (1989). Em **a**) a representação da estação gravimétrica localizada na superfície do terreno e a placa com sua respectiva densidade entre o *datum* e a estação, em **b**) uma representação de uma estação gravimétrica em diferentes níveis em relação à superfície do terreno e o *datum*.

Quando se subtrai da medida gravimétrica um valor de referência e se adiciona às correções referidas acima, obtém-se o valor conhecido como Anomalia Bouguer, cujas variações refletem variações laterais de densidades dos materiais da Terra.

#### 4.1.1.6 Correção Topográfica

Depois de aplicadas as correções ar – livre e Bouguer, o nível da gravidade observada foi elevado até o terreno e o vazio entre o geóide e o terreno preenchido com a massa de um cilindro de raio infinito. A Figura 4.6 representa que na aplicação da correção Bouguer considera-se que acima do ponto P não existe massa, desprezando-se o efeito do material localizado nas cotas mais elevadas. No entanto, esse material exerce atração sobre qualquer massa colocada em P e sua componente vertical (cujo sentido opõe-se ao sentido da atração gravitacional) reduz o valor da gravidade medida no ponto. Este efeito deve, portanto, ser subtraído do valor da gravidade normal reduzido pelas correções ar – livre e Bouguer ou somado ao valor da gravidade medido no terreno. Essa compensação recebe a denominação de correção de terreno ou topográfica. A correção topográfica é executada em caso de acentuadas elevações presentes na área de estudo ou mesmo grandes depressões ou vales próximos à estação que se efetua a leitura gravimétrica. Nesse estudo, tal correção não foi efetuada, pois a área apresenta pouca variação de altitude ao longo das estações obtidas.



**Figura 4.6** Efeito topográfico na redução gravimétrica (Luiz & Silva, 1995).

## **4.2 PRINCIPAIS FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO MÉTODO MAGNETOMÉTRICO**

O método magnetométrico, à semelhança do método gravimétrico, tem seus fundamentos embasados na Teoria do Potencial. Os dois são muito semelhantes teoricamente, mas a principal diferença (que torna o método mais complexo) é o caráter dipolar do campo magnético, em contraste com o caráter monopolar do campo gravitacional. A interpretação também possui maior complexidade pelo fato das variações desse campo serem mais inconstantes e pontuais.

O método magnético foi um dos primeiros métodos geofísicos a serem empregados em prospecção. As primeiras medidas sistemáticas datam de 1640 e foram realizadas na Suécia, com o propósito de detecção de depósitos de minério de ferro. Essas medidas consistiam na observação da variação da declinação magnética com bússolas náuticas. O uso do método magnético na prospecção de petróleo é quase sempre dirigido para a determinação da topografia do embasamento de rochas ígneas e metamórficas recobertos por rochas sedimentares. Como o efeito magnético em rochas sedimentares é muito fraco, qualquer anomalia observada sobre uma bacia sedimentar deve estar associada às rochas do embasamento ou, no caso deste estudo, às rochas intrusivas básicas.

A magnetometria, a exemplo da gravimetria, é um método geofísico potencial e possui aplicações variadas no campo das geociências e meio ambiente. As variações do campo geomagnético principal são produzidas em maior ou menor grau em função da presença de minerais magnéticos das rochas. Os principais minerais magnéticos são: pirrotita, ilmenita e magnetita, além da hematita, ulvospinélio e pseudobroquita. Além de permitir a localização de minerais economicamente importantes, as medidas magnéticas podem ser aplicadas na identificação de contatos geológicos e estruturas geológicas (falhas, dobras), como no caso das estruturas estudadas nesta tese.

### **4.2.1 Fundamentos e Teoria**

De acordo com Telford et al. (1976), a teoria do magnetismo clássica e moderna difere em alguns conceitos básicos, sendo a teoria clássica similar à teoria elétrica e gravitacional. O conceito principal dita que pólos magnéticos são análogos a cargas elétricas e corpos, de forma semelhante à lei do quadrado inverso das

forças entre os pólos, cargas ou corpos. As unidades hoje usadas e denominadas de *centimeter – gram – second* e *eletromagnetic units* (cgs e emu respectivamente) são oriundas desse conceito.

As unidades do Sistema Internacional (*Système International*) ou simplesmente SI, originam-se da idéia de que um campo magnético é de origem elétrica. A unidade básica é o dipolo, o qual é criado por uma corrente elétrica circular, ao contrário do sistema cgs –emu que derivam de um monopólo isolado fictício. Ambas as unidades são atualmente utilizadas

#### 4.2.1.1 Momento e Força Magnética

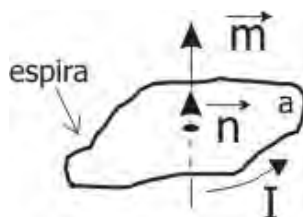
Os pólos magnéticos são comumente visualizados como excessos de carga magnética que se desenvolvem nas extremidades dos imãs (carga positiva na extremidade norte e negativa na extremidade sul). Essas cargas são tidas como a fonte do campo magnético externo ao imã, em analogia às cargas elétricas que se acumulam nas extremidades de um material eletricamente polarizado e são responsáveis por um campo elétrico externo ao material.

Embora o modelo de pólos e cargas magnéticas seja conveniente e possa ser aplicado ao estudo de campos externos aos materiais magnetizados, não foi ainda possível observarem-se essas cargas na natureza e muito menos seus excessos isolados (um pólo norte isolado, por exemplo). A fonte dos campos magnéticos não deve ser, portanto, pólos magnéticos. Por outro lado, os resultados de experimentos eletromagnéticos demonstram que campos magnéticos podem ser observados sempre que correntes elétricas fluem através de condutores (um cabo elétrico, por exemplo). Esta parece ser a única fonte dos campos magnéticos. Nesse caso, a unidade magnética fundamental é denominada de momento dipolo magnético  $m$  e definida por:

$$\vec{m} = \frac{I}{c} \mathbf{a} \vec{n}$$

Sendo  $I$  a corrente que flui na espira (*loop*) que limita a área  $\mathbf{a}$ ,  $c$  a velocidade da luz e  $\vec{n}$  o vetor unitário normal à área limitada pela espira.





**Figura 4.7** Representação do momento dipolo magnético.

Portanto o princípio do método magnetométrico envolve a medida do campo magnético da Terra, por meio de seus elementos vetoriais e apesar da não existência de pólos magnéticos isolados, é mais simples desenvolver a teoria magnética presumindo que eles existam. O método baseia-se na Lei de Coulomb que expressa que uma força ( $f$ ) atuando entre dois pólos magnéticos de intensidade  $P_1$  e  $P_2$ , separados por uma distância  $r$ . A força que atua sobre esses dois pólos é dada por:

$$f = \frac{1}{\mu} \frac{P_1 P_2}{r^2}$$

Sendo  $\mu$  a permeabilidade magnética do meio que envolve os pólos

#### 4.2.1.2 Campo Magnético e Indução Magnética

O campo magnético ( $H$ ) é definido como a força que experimenta um pólo magnético ( $P_1$ ) devido à presença no espaço de outro pólo magnético considerado onde:  $P_1$  é um pólo magnético fictício no espaço onde o sensor está localizado

Quando um material é submetido ao efeito do campo  $H$ , ele adquire uma intensidade de magnetização ou imantação  $M$ , proporcional ao campo:

$$M = \kappa.H$$

onde:  $\kappa$  é a susceptibilidade magnética do material

A magnetização de um material por um campo externo se faz através do alinhamento dos momentos dos dipolos internos provocando o aparecimento de um campo adicional que somado ao campo externo  $H$  gera um campo conhecido por indução magnética. O “campo indução magnética”  $B$  é relacionado ao campo externo  $H$  da seguinte forma:

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H}$$

$\mu$  relaciona-se com  $K$  segundo a seguinte expressão:  $\mu = 1 + 4\pi k$

#### 4.2.1.3 Potencial Magnético

O campo magnético, da mesma forma que o campo gravitacional, é também um campo conservativo, ou seja, o trabalho necessário para mover uma massa dentro do campo independe do caminho percorrido, somente importam os pontos inicial e final. Logo, ele pode ser obtido a partir do gradiente de uma função potencial escalar através da relação:

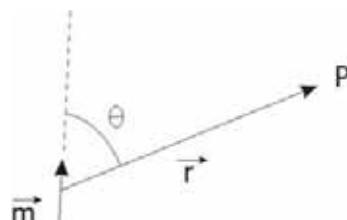
$$\vec{H} = -\nabla A$$

Sendo  $A$  o potencial magnético, e  $\nabla$  (nabla), o operador diferencial que produz o gradiente.

O potencial magnético em um ponto  $p$  que dista  $r$ , de um dipolo (Figura 4.8) é dado por:

$$A = -\vec{m} \cdot \nabla \left( \frac{1}{r} \right) = \frac{\vec{m} \cdot \mathbf{r}}{r^3} = \frac{\vec{m} \cos \theta}{r^2}$$

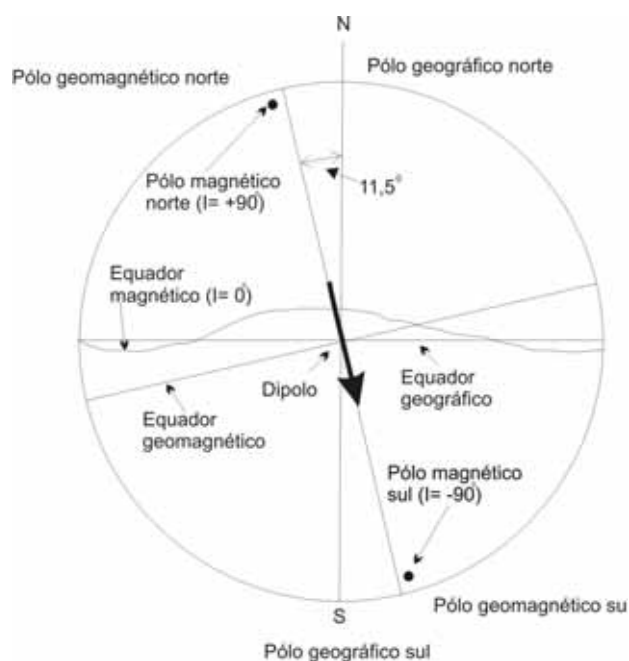
Sendo  $\theta$  o ângulo entre  $\mathbf{m}$  e  $\mathbf{r}$ .



**Figura 4.8** Simetria para o cálculo do potencial magnético

#### 4.2.1.4 O Campo Magnético Terrestre

Medidas efetuadas na superfície da Terra sugerem que o campo magnético terrestre pode ser aproximado pelo campo produzido por um momento de dipolo localizado no seu centro. Este momento aponta para o pólo sul geográfico e se localiza sobre um eixo que forma um ângulo de aproximadamente  $11,5^\circ$  com o eixo de rotação da Terra (Figura 4.9).



**Figura 4.9** Representação esquemática do dipolo cujo campo é uma aproximação do campo magnético terrestre (LUIZ & SILVA, 1995).

Esse eixo do dipolo terrestre intercepta a superfície da Terra nas coordenadas aproximadas de  $78,5^{\circ} \text{ N} - 69^{\circ} \text{ W}$  e  $78,5^{\circ} \text{ S} - 111^{\circ} \text{ E}$ , e determina o que se chama de pólos geomagnéticos. Estes pólos não devem ser confundidos com os verdadeiros pólos magnéticos, definidos nas posições onde uma agulha magnetizada inclina-se com ângulo de  $90^{\circ}$  em relação à superfície da Terra. As coordenadas dos pólos magnéticos verdadeiros são de aproximadamente  $75^{\circ} \text{ N} - 101^{\circ} \text{ W}$  e  $67^{\circ} \text{ S} - 143^{\circ} \text{ E}$ , o que significa que eles não são diametralmente opostos.

O campo magnético da Terra ( $\vec{F}$ ) é caracterizado em qualquer ponto da superfície terrestre pelos seguintes elementos:

- componente horizontal ( $F_h$ )
- componente vertical ( $F_z$ )
- ângulo de inclinação com o plano horizontal ( $i$ )
- ângulo de declinação ( $D$ ) formado entre ( $F_h$ ) e a direção do norte geográfico (marcado a partir dessa última)

A componente horizontal pode ser decomposta em duas outras:

- componente  $F_x$  (componente norte) na direção do norte geográfico
- componente  $F_y$  (componente leste) na direção do leste geográfico

Os valores de inclinação variam de zero a  $90^{\circ}$  no hemisfério norte e de zero a  $-90^{\circ}$  no hemisfério sul. Os pontos onde  $i = \pm 90$  são os pólos magnéticos verdadeiros

Como a componente horizontal ( $\vec{F}_h$ ) aponta sempre para o norte magnético, a agulha de uma bússola tende a orientar-se com a direção do campo magnético ( $\vec{F}$ ) que fora do equador magnético, tem uma inclinação diferente de zero. Neste caso a agulha da bússola, inclina-se em relação à posição horizontal, acompanhando a direção do campo. O campo magnético terrestre, assim como seus elementos, sofrem variações ao longo do tempo e essas variações são denominadas de variação secular. São conhecidas, além dessa variação as inversões de polaridade, ou seja, mudanças de  $180^{\circ}$  no sentido do momento dipolo.

Em trabalhos de prospecção, as anomalias magnéticas apresentam amplitudes, em geral, muito menores do que os valores normais do campo magnético terrestre (entre  $50 \times 10^{-5}$  e  $5000 \times 10^{-5}$  oersted). Por esse motivo, a unidade oersted não é conveniente para representar os valores do campo medidos em prospecção; ela é substituída pelo submúltiplo nanotesla (nT) do SI, que equivale a  $10^{-5}$  oersted. Anteriormente, um submúltiplo muito empregado era o gama ( $\gamma$ ) do cgs (*centimeter - gram - second*), cujo valor é o mesmo do nanotesla.

#### 4.2.1.5 O IGRF e Perturbações do Campo Magnético Terrestre

O IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) é a representação teórica para um dado intervalo de tempo, do campo magnético normal da Terra ou campo principal, isto é, que se origina no interior da Terra, excetuando os causados por materiais magnéticos da crosta e correntes elétricas induzidas por campos magnéticos externos a Terra. Para gerar o IGRF, o campo magnético terrestre é representado por um somatório de harmônicos esféricos, cujos coeficientes são determinados a partir de medidas magnéticas realizadas sobre todo o planeta, por meio de levantamentos terrestres marinhos e aéreos (com aeronaves e satélites).

O primeiro IGRF foi adotado em 1968 (IGRF – 1965) pela *International Association of Geomagnetism and Aeronomy* (IAGA). Desde então, já foram feitas várias atualizações que permitem gerar os valores dos elementos magnéticos do campo entre 1945 e 2003. Cada IGRF prevê uma variação secular do campo, permitindo extrapolações para os cinco anos seguintes. O IGRF é usado como referência para definição das perturbações causadas no campo normal pelas estruturas geológicas e depósitos de minérios (SHERIFF, 1989; TELFORD et al., 1976).

Os valores normais do campo magnético terrestre recebem contribuições de caráter local, das concentrações de minerais magnéticos que ocorrem nos primeiros 5 km da crosta. Essas contribuições constituem as anomalias do campo magnético. Superpõem-se ao campo principal e as contribuições magnéticas locais, campos produzidos por fontes externas à Terra, cuja característica básica é a rápida variação com o tempo. A causa desses campos externos são as correntes elétricas que fluem

da ionosfera, resultantes da interação entre o campo magnético principal, a ionosfera, a magnetosfera e o vento solar (SHERIFF, 1989).

Na prospecção com o método magnético, dois efeitos produzidos pelos campos magnéticos externos são importantes:

- a) As variações diurnas, que produzem flutuações magnéticas com períodos de 24 horas (estas são causadas pelo movimento da ionosfera, devido ao seu aquecimento no lado exposto ao sol e ao resfriamento no lado oposto)
- b) As tempestades magnéticas (ligadas às emissões intensas de plasma solar e a sua interação com o campo principal da Terra), que são tanto aperiódicas, podendo ocorrer de 1 a 3 vezes por dia durante 2 a 10 horas, como periódicas, repetindo-se a cada 27 dias e com efeito por vários dias (sendo o primeiro deles em geral o mais problemático).

As variações diurnas apresentam freqüentemente amplitude máxima em torno de 50 a 80 nT (os valores aumentam suavemente a partir das primeiras horas da manhã, atingem o seu máximo por volta de meio dia e tornam a decrescer suavemente nas horas da tarde). Durante levantamentos com o método magnético, é necessário registrar-se essa variação do campo, para posterior correção dos valores medidos.

Tempestades magnéticas podem produzir variações no campo magnético superiores a 1.000 nT. Essas variações geralmente são tão repentinas que em determinado momento seu valor é de alguns nanoteslas, enquanto que no instante seguinte o valor pode passar para centenas de nanoteslas. A duração das tempestades magnéticas é aleatória; elas podem durar desde frações de segundos a vários dias. Esse fenômeno é mais freqüente e intenso nas altas latitudes, onde ocorre geralmente associado às auroras. Nos levantamentos magnéticos, as medidas devem ser suspensas durante uma tempestade magnética, pois é impossível obter-se um bom registro de campo durante esse período.

Na prospecção magnetométrica executada no presente estudo, o objetivo principal é, inicialmente, a obtenção da medida da intensidade do campo magnético total da área, seguido da remoção do IGRF. Como as anomalias magnéticas são perturbações ou desvios do campo geomagnético terrestre (campo magnético

normal) desse modo, para definir uma anomalia, é necessário subtrair-se o valor do campo normal de cada medida executada no levantamento. Nos levantamentos realizados em áreas pouco extensas, como a área de estudo, um único valor de IGRF tomado para o centro da área é subtraído de todas as medidas efetuadas na área. Em extensas áreas, o uso de diferentes valores de IGRF faz-se necessário.

#### 4.2.1.6 Magnetismo dos Materiais

Substâncias ou materiais terrestres não apresentam o mesmo comportamento magnético quando submetidas a um campo magnético. Por exemplo, se é criado um campo no eixo de um cilindro ao se passar uma corrente através de espiras que o envolvem e, a seguir, diversos tipos de substâncias são aproximadas de uma de suas extremidades, pode se observar que:

- a) Algumas substâncias podem ser atraídas e outras repelidas;
- b) A força de atração ou repulsão não é mais intensa no centro do cilindro, onde o campo tem a máxima intensidade, mas as proximidades das extremidades do cilindro;
- c) A intensidade da força varia de algumas dezenas de dinas (positivas no caso da atração e negativa na repulsão) até valores superiores a 100.000 dinas, dependendo do tipo de substância.

No exemplo descrito, as substâncias que são repelidas são denominadas de **diamagnéticas**, enquanto as que são atraídas recebem a denominação de **paramagnéticas**. Estas últimas, sob certas condições, podem apresentar magnetização espontânea e estão associadas aos maiores valores de atração. Neste caso elas passam a ser denominadas de substâncias **ferromagnéticas**.

##### a) Magnetização das Rochas

A magnetização que se observa nas rochas, como resultado da presença de minerais magnéticos na sua composição pode ser classificada em dois tipos: a **magnetização induzida** e magnetização residual **remanescente** ou **remanente**. A

magnetização induzida é provocada pelo campo atual da Terra, enquanto a magnetização remanescente é adquirida ao longo da história geológica da rocha. No processo de formação das rochas ígneas, a **magnetização termoremanente** é a mais importante. Este tipo de magnetização remanescente desenvolve-se a partir do resfriamento dos materiais geológicos abaixo da temperatura de Curie, na presença do campo magnético terrestre da época.

Quando um campo magnético é aplicado a um material magnético e depois removido, é possível o aparecimento de magnetização residual no material, dita **magnetização isotérmica**. O campo magnético terrestre por ser muito fraco, não é capaz de produzir significativa magnetização desse tipo; porém os fortes compostos magnéticos associados com a queda de raios podem causar magnetização isotérmica, ainda que localmente.

A magnetização remanescente conhecida como **magnetização química** desenvolve-se quando ocorrem transformações químicas ou crescimentos de grãos ferromagnéticos (ainda que a temperaturas abaixo da Curie), durante a formação das rochas metamórficas e sedimentares. Durante o processo de deposição de sedimentos finos (argilas de varvitos, por exemplo) desenvolve-se a magnetização remanescente denominada de magnetização **detrital** ou **deposicional**.

A aplicação de um campo magnético fraco, como o da Terra, por um longo período de tempo produz a **magnetização viscosa**.

Um outro tipo de magnetização remanescente, que pode ocorrer como o resultado da aplicação conjunta de pressão e campo magnético (fenômeno da magnetostricção), é denominado de magnetização **piezo-remanescente**. Este tipo de magnetização ser significativo em rochas que foram submetidas a esforços tectônicos.

Na prospecção mineral os valores medidos representam o resultado da interação da magnetização induzida com a magnetização remanescente. Essa interação se dá através da reorientação ou do alargamento dos domínios magnéticos dos minerais ferromagnéticos. Durante a interpretação dos valores medidos, a interação dos dois tipos de magnetização pode ocasionar erros e interpretações falsas, quando se presume que a magnetização responsável pelas anomalias é somente induzida.



#### 4.2.1.7 Suscetibilidade de Rochas e Minerais

A suscetibilidade magnética das rochas (Tabela 4.1) depende principalmente, da quantidade, tamanho dos grãos e modo de distribuição dos minerais ferromagnéticos nelas contidos. Os minerais ferromagnéticos ocorrem nas rochas comumente na forma de grãos finos dispersos em uma matriz de minerais paramagnéticos e diamagnéticos, representada pelos silicatos.

#### 4.3 PRINCIPAIS CORREÇÕES APLICADAS AOS DADOS MAGNETOMÉTRICOS

Os dados magnéticos, após serem coletados, passam por processos de tratamento a exemplo da aquisição gravimétrica. Dentre esses procedimentos pode-se destacar:

- a) Correções para eliminar às variações provocadas por causas não geológicas como a variação diurna no magnetômetro de base em relação ao magnetômetro que mede os pontos ao longo de um perfil. Esse procedimento é conhecido como a correção diurna.

**Tabela 4.1:** Suscetibilidade magnética das principais rochas e minerais. (Compilado de Telford et al., 1976).

Rochas Sedimentares	Susceptibilidade X 10 <sup>3</sup> (SI)	
	Variação	Média
Dolomito	0 – 0.9	0.1
Calcário	0 – 3	0.3
Arenito	0 – 20	0.4
Folhelho	0.01 – 15	0.6
Média (48 rochas sedimentares)	0 – 18	0.9
Metamórficas		
Amfibolito		0.7
Xisto	0.3 – 3	1.4
Filito		1.5

Gnaisse	0.1 – 25	
Quartzito		4
Serpentinito	3 – 17	
Ardósia	0 – 35	6
Média (61 rochas metamórficas)	0 – 70	4.2
<b>Ígneas</b>		
Granito	0 – 50	2.5
Riolito	0.2 – 35	
Dolerito	1 – 35	17
Diabásio	1 – 160	55
Gabro	1 – 90	70
Basalto	0.2 – 175	70
Diorito	0.6 – 120	85
Piroxenito		125
Peridotito	90 – 200	150
Andesito		160
Média ígneas ácidas	0 – 80	8
Média ígneas básicas	0.5 – 97	25
<b>Minerais</b>		
Grafite		0.1
Quartzo		-0.01
Anidrita, Gipso		-0.01
Calcita	-0.001 - -0.01	
Carvão		0.02
Argilas		0.2
Calcopirita		0.4
Esfalerita		0.7
Cassiterita		0.9
Siderita	1.4	
Pirita	0.05 – 5	1.5
Limonita		2.5
Arsenopirita		3
Hematita	0.5 – 35	6.5
Cromita	3 – 110	7

Franklinita		430
Pirrotita	1 – 6000	1500
Ilmenita	300 – 3500	1800
Magnetita	1200 – 19200	6000

b) Filtragens para eliminar efeitos geológicos indesejáveis, como os produzidos por heterogeneidades próximas da superfície ou a interferência entre fontes rasas e profundas, possibilitando dessa forma, um melhor reconhecimento das anomalias magnéticas.

Os procedimentos adotados para o processamento dos dados magnetométricos, assim como a sua utilização e respectiva teoria, são devidamente explanados no Apêndice 6.

#### **4.3.1 Correção da Variação Diurna**

Em um levantamento magnetométrico terrestre como o realizado neste estudo, o procedimento empregado na correção da variação diurna consistiu em medir em um dos magnetômetros denominado de “base” a variação do campo magnético continuamente ou a intervalos regulares. Um outro magnetometro denominado de viajante ou *rover* é utilizado para medir o campo nas diversas estações medidas. A hora em que os dois magnetômetros efetuam a medidas deve ser anotada. Portanto, a correção do valor medido em uma determinada estação, é feita somando-se ou subtraindo-se da mesma, a variação do campo observada no magnetometro fixo (base), para o momento da medida. O valor é somado, se o campo magnético da estação fixa diminui em relação ao primeiro valor medido naquele dia e diminuído, no caso inverso.

#### **4.3.2 Correção Topográfica**

No caso de grande variação na topografia do terreno como, por exemplo, nas encostas de vales, o sensor fica mais próximo do terreno, além de ser envolvido por um volume maior de material magnetizado. O efeito produzido pela proximidade do terreno é, porém, de menor intensidade do que o provocado pela magnetização do

terreno. Como a topografia da área estudada não apresenta tais contrastes, esta correção não foi aplicada.

#### **4.3.3 Correções de Latitude**

Variações de campo magnético normal com a latitude são geralmente inferiores a 10 nT por grau. Conseqüentemente, não é necessário correção de latitude nos levantamentos sobre áreas pouco extensas na direção norte-sul, como no caso deste estudo. Nos levantamentos em grande escala, que cobrem vários graus de latitude, pode ser necessário que se efetua uma correção em função da latitude, dependendo da precisão requerida ao levantamento.

#### **4.3.4 Filtragem dos Dados**

Técnicas de filtragem aplicada aos dados gravimétricos são semelhantes e podem ser usadas no método magnético. O resultado que se deseja, é de certa forma, o mesmo. Tentar separar o sinal produzido pelas fontes de interesse do levantamento, daquele produzido pelas fontes indesejáveis denominadas de ruído.

O método magnetométrico, porém, por tratar-se de três componentes espaciais (X, Y e Z) possui atualmente técnicas de processamento descritas de forma mais detalhadas no Apêndice 7.

#### **4.3.5 Remoção do IGRF**

As anomalias magnéticas são perturbações ou desvios do campo geomagnético terrestre (campo magnético normal). Desse modo, para definir uma anomalia, é necessário subtrair-se o valor do campo normal de cada medida tomada no levantamento. O campo normal é representado pelo IGRF e seus valores podem ser encontrados em tabelas e mapas ou gerados em computadores por algoritmos.

### **4.4 PRINCIPAIS TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO APLICADAS AOS MÉTODOS GEOFÍSICOS POTENCIAIS**

#### 4.4.1 Técnicas de Processamento de Sinais e Aplicação de Filtros

Os dados geofísicos de campo devem ser submetidos sempre que necessário, a operações de processamento e tratamento, com o objetivo de torná-los mais apropriados a interpretação. O tratamento de dados geofísicos deriva da Teoria da Informação, um campo da matemática que surgiu a partir dos esforços realizados durante a Segunda Guerra Mundial para a detecção de sinais de radar afetados por ruído. Dentre as operações de tratamento estão a discretização e a transformação de domínio, que modificam a apresentação das medidas de campo, facilitando a sua manipulação, bem como as operações de correção, filtragem e empilhamento, melhorando assim, a qualidade dos dados analisados. Operações baseadas nos conceitos da série de Fourier, espectros, convolução e técnicas de filtragens usadas neste estudo e descritas como processamentos e tratamentos geofísicos são aqui, de forma resumida, apresentados.

O processamento de sinais consiste na sua análise e/ou modificação de forma a extrair informações dos mesmos e/ou torná-los mais apropriados para alguma aplicação específica. O processamento de sinais pode ser feito de forma analógica ou digital. A filtragem é uma das principais aplicações do processamento de sinais. As técnicas atuais de processamento podem ser de muita utilidade no controle e análise de sistemas físicos de interesse das mais diversas pesquisas e em inúmeras áreas, incluindo a análise de dados potenciais.

As medidas geofísicas englobam efeitos de feições de interesse (sinais), assim como também efeitos indesejáveis (ruídos), como citado anteriormente. Nos métodos potenciais, podemos denominar o sinal conjuntamente com o ruído de medida gravimétrica ou magnetométrica.

A medida (M) pode então ser representada sob a forma

$$\mathbf{M} = f(\mathbf{S}, \mathbf{R})$$

Uma razão sinal/ruído (S/R) baixa pode tornar proibitiva a aplicação da geofísica, pois as medidas se mostrarão como uma amálgama de efeitos indistinguíveis.

Os diversos filtros aplicados para correção ou para se ressaltar determinadas feições, são necessários pelo fato das medidas de campo serem influenciadas por

ruídos de caráter natural, provocados, no caso deste estudo, por fontes rasas (intrusões de rochas básicas). A plataforma OASIS MONTAJ\* possibilita o uso desses filtros, assim como a sua interação com os dados e os mapas gerados.

Nesse estudo, foi definida uma seqüência operacional usada para cada filtragem, ou seja, a cada elemento filtrado parte-se para as filtrações seguintes. Dessa forma ter obedecida uma seqüência que permite fidelidade e precisão do que e como está sendo obtido, sem perder as respostas originalmente obtidas. Uma explanação mais detalhada de cada filtragem encontra-se no Apêndice 6 deste estudo.

#### **4.4.2 Análise Fourier no Domínio do Tempo e a Transformada Rápida de Fourier**

A Transformada de Fourier, nomeada em homenagem ao matemático e físico francês Jean Baptiste Fourier, pode ser explicada de forma simplificada como sendo uma transformada integral, que expressa uma função em termos de funções de base sinusoidal como por exemplo, a soma ou integral de funções sinusoidais multiplicadas por coeficientes (amplitudes). Existem diversas variações diretamente relacionadas desta transformada dependendo do tipo de função a transformar. As transformadas de Fourier têm muitas aplicações em disciplinas científicas e na física, podendo-se citar como as principais, o processamento de sinal, acústica, geometria, criptografia e outras.

Nos campos relacionados com o processamento de sinal, a transformada de Fourier, segundo Geosoft (2005), é tipicamente utilizada para decompor um sinal nas suas componentes em frequência e suas amplitudes. A versão discreta da transformada de Fourier pode ser calculada rapidamente por computadores, utilizando algoritmos baseados na transformada rápida de Fourier. Geralmente, a denominação "Transformada de Fourier" refere-se à transformada de Fourier para funções contínuas, que representa qualquer função integrável  $f(t)$  como a soma de exponenciais complexas com frequência angular  $\omega$  e amplitude complexa  $F(\omega)$ . A transformada rápida de Fourier proporciona diferentes e amplas aplicações de filtrações em dados aplicados em estudos e investigações na área das ciências da

\*Oásis/Montaj: Desenvolvido pela Geosoft Inc. para processamento de dados em um único ambiente interativo

Terra, como no caso de dados gerados por métodos potenciais como a gravimetria e a magnetometria. Tendo-se um determinado *grid* dos dados adquiridos no estudo é feito, através da rotina denominada de MAGMAP na plataforma Oasis Montaj, um novo *grid* no domínio de Fourier denominado de FFT (*Fast Fourier Transform*). Os filtros aplicados pela FFT possibilitam remoção de ruídos de origem geológica ou inerentes á técnica geofísica aplicada e separar dados de origem regional e/ou residual para diferentes interpretações, estimativa de certos parâmetros geofísicos como a suscetibilidade magnética, por exemplo. A FFT proporciona, também, a possibilidade do geocientista de avaliar e interpretar as relações das freqüências em dados transformados por meio de um espectro de potência.

Tendo-se um determinado *grid* FFT, obtém-se um gráfico 2D da análise espectral no domínio de Fourier de acordo com a energia dos corpos em subsuperfície. Essa análise é feita por comprimento de onda/unidade de terreno usada, no caso deste estudo, em metros (eixo X) *versus* o log da potência de 10 (eixo Y).

As maiores freqüências por unidade/metro são oriundas de fontes residuais e de origem subsuperficial (rasas) e as menores freqüências por unidade/metro oriundas de fontes mais profundas e de maior energia.

#### **4.5 O GPS DIFERENCIAL, PRINCIPAIS FUNDAMENTOS E CARACTERÍSTICAS**

Na execução de um levantamento gravimétrico terrestre ou aéreo, conforme citado nos itens anteriores, a precisão da leitura obtida do gravímetro e o posicionamento da estação a ser levantada (coordenadas x, y e z) são de extrema importância na qualidade e precisão de dados calculados como a gravidade absoluta, a anomalia *free – air* e a anomalia Bouguer. Neste trabalho, cada estação gravimétrica levantada em campo foi localizada e posteriormente georeferenciada no mapa da área por meio do sistema DGPS diferencial da Trimble modelo Pathfinder – Pro XR, e as coordenadas horizontais X e Y e altimétricas obtidas, recalculadas pelo processo de pós-processamento diferencial.

O equipamento utilizado consiste basicamente de receptores GPS de alto desempenho e podem ser operados com um sistema ou programa controlador, que possibilita uma eficaz coleta de dados durante o levantamento em campo e uma

posterior manutenção e integração dos dados por meio de um sistema SIG (Sistema de Informação Geográfica).

#### **4.5.1 Principais características do Método de Processamento Diferencial**

O sistema de posicionamento global (GPS) é um sistema de posicionamento baseado em satélites operados pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos onde mais de 24 satélites operacionais denominados de NAVSTAR orbitam a Terra a cada 12 horas, fornecendo informações de posicionamento em todo o mundo, sob qualquer condição de tempo, 24 horas por dia.

O sistema receptor Pathfinder Pro-XR e o programa de controle utilizado no presente estudo, possibilita coletar informações precisas para bancos de dados de utilidade tanto de caráter urbano como naturais. Esse tipo de receptor GPS possui 12 canais de contínuo rastreamento de satélites na faixa denominada de L1 (frequência permitida para o uso civil). Possui também um receptor Beacon MSK integrado que possibilita a aquisição e correção em tempo real dos dados coletados. O sistema não foi utilizado por necessitar uma assinatura que permite a decodificação do sinal enviado pelo satélite através de um radio farol (Beacon). Optou-se pela opção de pós-processamento por haver maior precisão e segurança na aquisição e processamento dos dados no escritório.

O sistema DGPS requer essencialmente dois ou mais receptores. Um receptor é chamado de estação de referência e fica localizado em um ponto conhecido, com localização precisa de latitude, longitude e altitude. Os receptores denominados de *rovers* ou viajantes coletam dados GPS em determinada área, na vizinhança da estação de referência. Os erros ou distorções das medidas inerentes ao sistema, são corrigidos durante o pós-processamento.

##### **4.5.1.1 Fatores Limitantes**

O receptor GPS possui a capacidade de calcular posições precisas a cada segundo. Depois da correção diferencial, a precisão horizontal e vertical de cada posição pode chegar a valores sub-métricos (inferiores a 1 metro). Alguns fatores são determinantes na qualidade dos valores obtidos, dependendo de condições ambientais e antrópicas. Sinais diferenciais de satélite que estão na linha visual



podem ser bloqueados por montanhas, edifícios ou copas de árvores que molhadas por chuvas fortes reduzem ainda mais o sinal. Fatores como transmissores de radar ou de microondas (antrópicos), podem interferir com os sinais de satélite. Fios elétricos geralmente não produzem nenhum efeito degradante de sinal.

#### **4.5.1.2 Fatores que Afetam a Precisão DGPS Pós-Processada**

Após a coleta de dados, a precisão dos mesmos depende dos seguintes fatores:

**a) Número de satélites visíveis:**

Geralmente, requer-se um mínimo de quatro satélites para obter uma boa posição. Com cinco ou mais satélites (mínimo ajustado durante a aquisição neste estudo), a precisão aumenta.

**b) Sinais refletidos:**

Sinais GPS às vezes são refletidos por objetos próximos, em particular objetos metálicos, criando um resultado falso e errôneo. Esse fenômeno é conhecido como sinal refletido ou *multi-path*. Sinais refletidos podem induzir a erros de posicionamento de muitos metros, enquanto poucos podem causar erros pequenos, imperceptíveis. Uma boa precisão é obtida através da coleta de dados em um ambiente sem grandes superfícies reflexivas, como edifícios e árvores.

**c) Distância entre os receptores da estação de referência e rover:**

Para este receptor (segundo especificações do fabricante), a degradação do sinal é de 1 ppm na medida em que a distância entre a estação de referência e o rover aumenta. Isso significa que 1 mm de degradação ocorre para cada quilometro entre a estação de referência e o rover. Portanto, recomenda-se que para obter precisões submétricas não se exceda o limite de 500 km.

**d) Diluição de precisão da posição (PDOP):**

É uma medida em unidades da geometria atual dos satélites, que indica quando são fornecidos os resultados mais precisos. Quando satélites estão espalhados no céu, o valor PDOP é baixo e a posição computada é mais precisa, e quando estão mais agrupados a posição é menos precisa.

**e) Relação sinal para ruído (SNR):**

É uma medida de força do sinal do satélite em relação ao ruído de fundo. Um sinal forte com baixo ruído fornece melhor precisão. Em áreas de copas densas de árvores, pode-se baixar o valor SNR, prejudicando, porém, a precisão do sinal. Esta alternativa possibilita a coleta de posições GPS em áreas marginais.

**f) Elevação do satélite:**

Quando um satélite estiver abaixo do horizonte, os sinais GPS devem deslocar-se uma distância maior através da atmosfera, atrasando a recepção pelo receptor. Pode-se ajustar um valor menor da máscara de elevação, porém se o valor for muito baixo, o *rover* pode usar um satélite que a estação de referência não vê. Se isso ocorrer, alguns dados não poderão ser corrigidos diferencialmente pelo pós-processamento.

**g) Tempo de ocupação num ponto:**

O receptor usado nesse estudo fornece segundo dados do fabricante, a precisão horizontal especificada com um tempo de ocupação de 1 minuto.

**h) Tipo de receptor na estação de referência:**

Os receptores Trimble, entre eles o modelo Pathfinder Pro-XR possui, quando usados como estação de referência, precisão abaixo de um metro ao serem pós-processados com *rover* da mesma especificação. Se o receptor GPS da estação de referência possuir menos de 12 canais, talvez seja impossível corrigir diferencialmente alguns dos dados.

**i) Precisão da posição da estação de referência.**

Qualquer imprecisão na posição da estação de referência reflete na posição da estação *rover*, portanto é necessário saber se a estação e os dados gerados provêm de uma fonte confiável.

**j) Medições sincronizadas devem ser registradas na estação de referência.**

Para uma boa correção diferencial, a estação de referência deve registrar dados de referência (ou correções diferenciais de saída) de medições sincronizadas. As medições sincronizadas acontecem quando o receptor da

estação de referência e os receptores *rovers* tomam medições simultaneamente de todos os satélites que estão rastreando. Quando medições não forem sincronizadas, não há uma posição da estação de referência equivalente exatamente ao mesmo tempo da posição do *rover*. Uma posição simultânea da estação de referência deve ser interpolada, o que reduz a precisão dos resultados finais. É necessário também, que a estação de referência use uma antena receptora correta.

## **CAPÍTULO 5 - AQUISIÇÃO DE DADOS - CAMPANHAS DE CAMPO DE GRAVIMETRIA, GPS DIFERENCIAL E MAGNETOMETRIA**

---

Os dados gravimétricos e magnetométricos desse estudo foram adquiridos por meio de campanhas terrestres ao longo das principais rodovias, estradas vicinais e acessos encontrados. Em todas as campanhas de campo realizadas, procurou se manter, sempre que possível, um espaçamento de 2 km, tanto para as estações gravimétricas como magnetométricas.

Na aquisição das estações gravimétricas, uma atenção especial foi dada para a aquisição dos dados de localização das coordenadas horizontais UTM (X e Y) e principalmente para a altitude (em Z), onde se usou um GPS diferencial. Os termos técnicos relativos à metodologia e ao equipamento encontram-se no apêndice deste estudo.

A estação base utilizada para as correções gravimétricas foi a da cidade de Rio Claro e a estação usada para o pós-processamento e respectiva correção do GPS diferencial foi inicialmente a da cidade de São Paulo e posteriormente a estação base de Rio Claro.

O levantamento magnetométrico foi efetuado de forma independente e paralelo à aquisição gravimétrica e será explicado com maior detalhe em item próprio mais a frente.

## 5.1 GRAVIMETRIA - LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO BASE E PECULIARIDADES DO LEVANTAMENTO

A estação base utilizada para a abertura e fechamento de cada *loop* executado nas campanhas gravimétricas, pertence à rede gravimétrica secundária do Estado de São Paulo implantada pelo Instituto Astronômico e Geofísico IAG/USP da Universidade de São Paulo (Foto 5.1).

Tanto a rede gravimétrica secundária do Estado de São Paulo como a rede fundamental brasileira são referenciadas ao IGSN71 (*International Gravity Standardization Net*).

A estação localiza-se em um marco (obelisco) em frente à Igreja matriz na cidade de Rio Claro – S.P. e possui os seguintes dados de localização (em coordenadas UTM e geográficas):

- Latitude (Y): 7.519.341
- Longitude (X): 236.237
- Latitude: 22° 24, 63´ S
- Longitude: 47° 33, 67´ W
- Altitude: 624 metros

Na Foto 5.1 pode-se observar a aquisição de uma medida de gravidade na estação de referência.

Na aquisição das estações gravimétricas usou-se o gravímetro La Coste & Romberg, modelo G 987, pertencente ao Departamento de Geologia Aplicada do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP de Rio Claro (Fotos 5.2 e 5.3). Foi adquirido neste estudo um total de 543 estações gravimétricas (Figura 5.1).



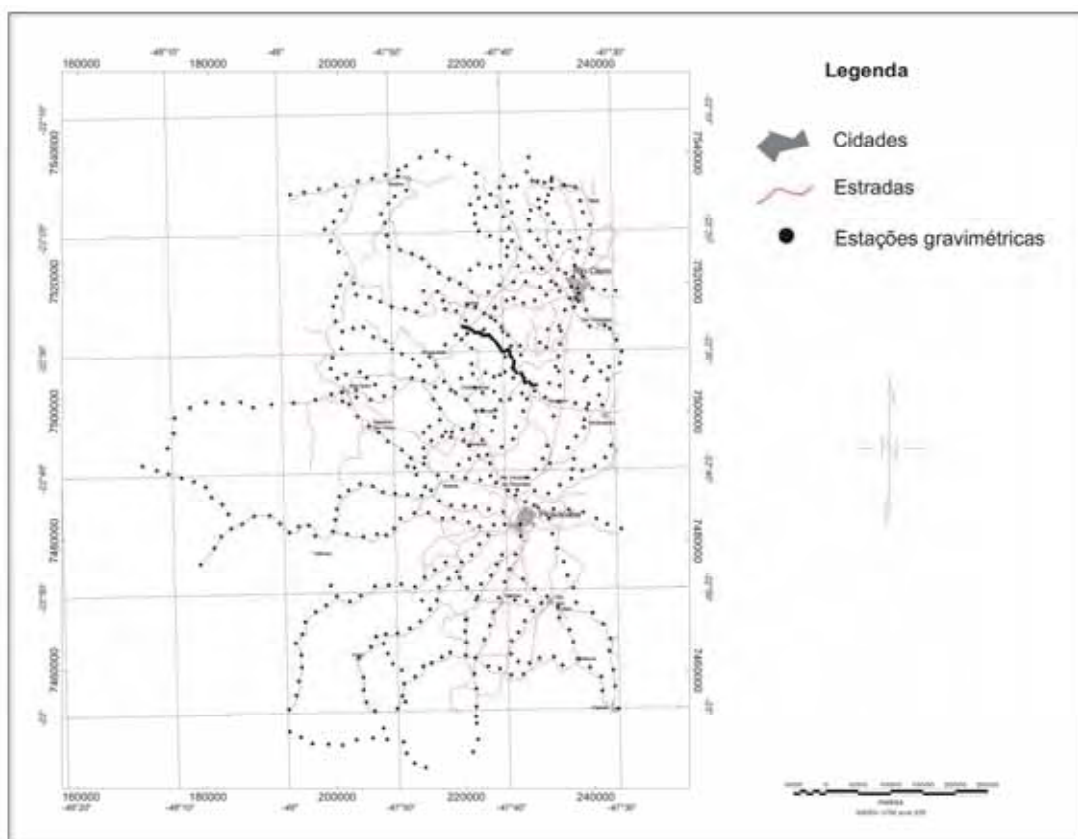
**Foto 5.1** Estação base gravimétrica localizada em frente à Igreja Matriz de Rio Claro.



**Foto 5.2** Gravímetro La Coste Romberg utilizado na aquisição das estações gravimétricas deste estudo.



**Foto 5.3** Leitura do gravímetro nas aquisições das estações gravimétricas em campo.



**Figura 5.1** Estações gravimétricas adquiridas na área de estudo, principais cidades, rodovias e estradas vicinais.

## 5.2 CARACTERÍSTICAS DO LEVANTAMENTO GRAVIMÉTRICO EXECUTADO POR GPS DIFERENCIAL

Para a aquisição dos valores de altimetria (Z), coordenadas horizontais (X e Y) usados na localização das estações gravimétricas, correção e redução dos dados, usou-se um receptor diferencial GPS Pathfinder Pro - XR da *Trimble Navigation Limited*. A terminologia usada no método GPS diferencial se encontra no Apêndice 3 desta tese.

A aquisição dos dados de posicionamento é feita simultaneamente ao levantamento gravimétrico terrestre. Durante o levantamento no campo, deve-se ter uma atenção quanto à qualidade do sinal que se obtém (número de satélites que o receptor capta e valor de PDOP baixo). É necessário evitar áreas com coberturas extensas (muitas árvores) e a presença de rádios transmissores e antenas nas proximidades. Esses elementos prejudicam a qualidade do sinal recebido comprometendo a precisão dos dados após a correção.

O equipamento permite, através de um coletor tipo *palm top*, o registro dos dados não processados em tempo real, com uma visualização espacial (em mapa), assim como seus parâmetros de PDOP, máscara de elevação, satélites captados e qualidade do sinal. Quanto à qualidade do sinal, é possível alterar as configurações do coletor para uma aquisição rápida, com poucos satélites, porém com menor precisão; e uma aquisição mais demorada, com maior número de satélites, e uma maior precisão, principalmente nos valores de altitude relativa ao HAE (*Height Above Espheroid*). Neste estudo optou-se por uma aquisição mais lenta, a fim de obter-se a melhor precisão possível (Foto 5.4).

### 5.2.1 Estação base de referência usada na correção GPS diferencial

Para o procedimento de correção diferencial, optou-se inicialmente usar a estação de referência da Cidade de São Paulo, por ser a mais próxima da área de levantamento existente até o momento. Posteriormente, houve a instalação e implantação de uma estação de referência localizada nas dependências do Laboratório de Estudo de Bacias (LEBAC) no campus da UNESP em Rio Claro, S.P., que possibilitou que as correções de pós-processamento fossem executadas por meio desta. Estas estações GPS denominadas de base ou referência fazem



parte de uma rede nacional de estações ativas gerenciadas e disponibilizadas na internet pela empresa Santiago e Cintra (Figura 5.2) para os usuários do equipamento através de uma senha (*login*) do usuário fornecido pela empresa.

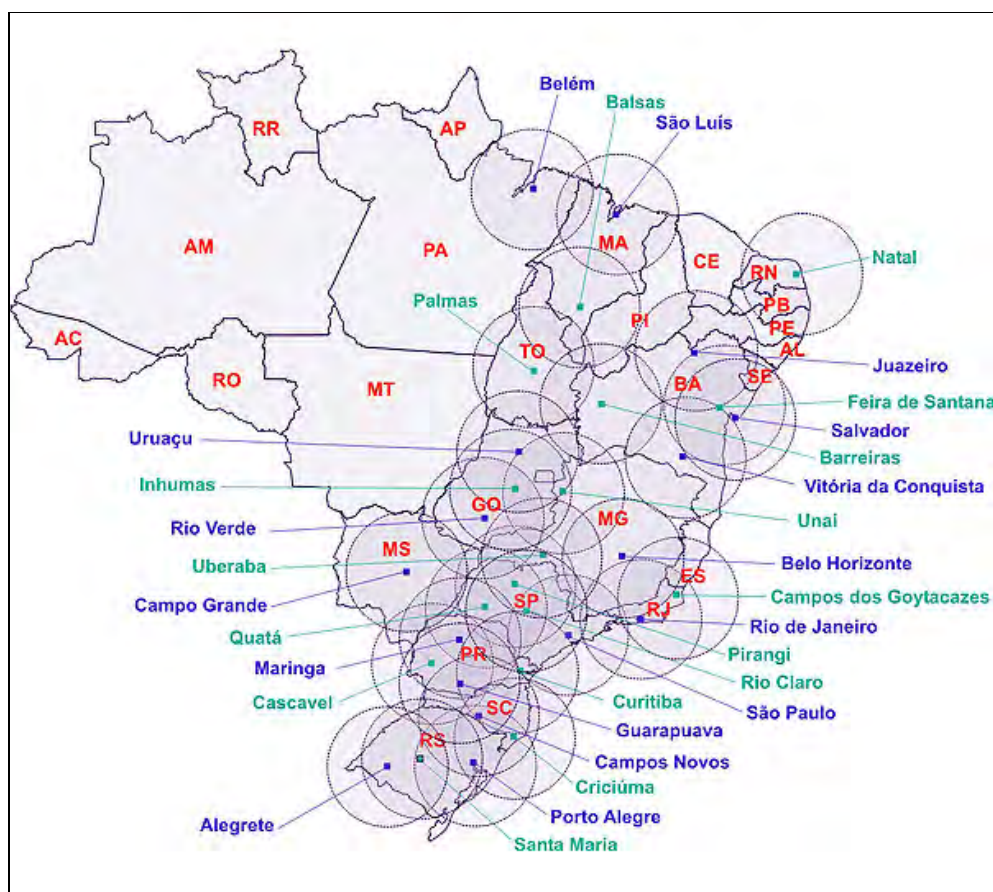


**FOTO 5.4** GPS Pathfinder Pro-XR e coletor de dados da Trimble Navigation Limited.

**a) Características principais da estação base localizada na cidade de São Paulo:**

- Receptor CBS TRIMBLE de 12 canais; L1 apenas; SNR Mask 4; Elevation Mask 10; PDOP Mask 8; PDOP Switch 8.
- Horário Universal de Greenwich. Três (3) horas a mais do que a hora local da região Sul/Sudeste do Brasil, exceto em horário de verão.
- Datum: SAD-69 (96)
- Latitude: 23° 37' 04,474930" S
- Longitude: 46° 40' 34,682860" W
- Altitude: 809,8260 m (HAE)
- Dados disponíveis no formato .SSF, zipados no formato .EXE auto expansível.
- Taxa de Gravação: 05 segundos (Código C/A + fase L1).

- Arquivos de 1 hora de rastreio, com a seguinte nomenclatura: **BYMMDDHH.SSF** onde: **B** significa que se trata de um arquivo estação base de **São Paulo - SP**; **Y** é o último dígito do ano corrente; **MM** o mês corrente; **DD** o dia corrente e **HH** a hora do dia.
- **Exemplo:** B8030610.SSF é um arquivo contendo 1 hora de observações iniciadas às 10:00 da manhã (horário de Greenwich) do dia 06 de Março de 2008. O programa gera 1 arquivo a cada hora. O tamanho médio dos arquivos compactados (.EXE) é de 200K.



**Figura 5.2** Rede de estações de referência no Brasil da Santiago e Cintra (<http://www.santiagoecintra.com.br>).

**b) Características principais da estação base localizada na cidade de Rio Claro:**

- Receptor GPS TRIMBLE PATHFINDER Pro XR de 12 canais; L1 apenas; SNR Mask 4; Elevation Mask 10; PDOP Mask 8; PDOP Switch 8.
- Horário Universal de Greenwich. Três (3) horas a mais do que a hora local da região Sul/Sudeste do Brasil, exceto em horário de verão.
- Datum: WGS-84
- Latitude: 22° 23' 48,46756" S
- Longitude: 47° 32' 55,25328" W
- Altitude: 624,3889 m (HAE)
- Datum SAD-69 (96)
- Latitude: 22° 23' 46,7245" S
- Longitude: 47° 32' 53,6316" W
- Altitude: 631,510 m (HAE)
- Coordenadas referidas ao topo do pilar.
- Antena: Compact L1 com plano de terra.
- Vértice 93791 – Homologado ao Sistema Geodésico Brasileiro pelo IBGE.
- Dados disponíveis no formato .SSF, zipados no formato .EXE autoexpansível.
- Taxa de Gravação: 05 segundos (Código C/A + fase L1).
- Arquivos de 1 hora de rastreo, com a seguinte nomenclatura:  
**QYMMDDHH.SSF** onde: **Q** significa que se trata de um arquivo estação base de **Rio Claro - SP**; **Y** é o último dígito do ano corrente; **MM** o mês corrente; **DD** o dia corrente e **HH** a hora do dia.
- **Exemplo:** Q5081510.SSF é um arquivo contendo 1 hora de observações iniciadas às 10:00 da manhã (horário de Greenwich) do dia 15 de Agosto de 2005. O programa gera 1 arquivo a cada hora. O tamanho médio dos arquivos zipados (.EXE) é de 200K.



**Foto 5.5** Preparativos para a aquisição de dados com o GPS Pathfinder Pro-XR da Trimble.

### **5.3 MAGNETOMETRIA – LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO BASE E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO LEVANTAMENTO**

Os dados magnetométricos desse estudo foram adquiridos com o emprego de magnetômetros de precessão de prótons, usando a metodologia de manter-se uma base conhecida, denominada aqui de estação base, e de uma viajante denominada de *rover*. Foram adquiridas 505 estações com os valores magnetométricos de campo total ao longo da área (Figura 5.3). Como o campo magnético terrestre varia ao longo do dia é necessária uma correção das medidas efetuadas pelo magnetômetro *rover* ao longo do dia. O magnetômetro base usado (Foto 5.6) permite a opção de gravar os dados com intervalos de tempo previamente selecionados. Para esse estudo adotou-se 60 segundos para uma melhor otimização e fidelidade da correção final.



**Foto 5.6** Magnetômetro de base da GEM Systems usado no estudo.

Os procedimentos da correção diurna foram efetuados de acordo com o manual do equipamento (GEM SYSTEMS, 2005), que descreve o procedimento a ser adotado para o equipamento em questão.

A estação base localiza-se próxima ao CEIS (Centro de Estudo de Insetos Sociais) localizado no Instituto de Biociências, dentro do campus da UNESP Rio Claro – S.P., e possui os seguintes dados de localização (em coordenadas UTM):

- **Latitude (Y): 7.521.177**
- **Longitude (X): 238.461**

### 5.3.1 Correção Diurna

A correção diurna é feita combinando-se as leituras de um magnetômetro móvel (Foto 5.7) com uma unidade de base. A equação usada para a correção segue a seguinte forma, de acordo com GEM Systems (2005):



$$MAG_{corr} = ROVER - BASE + Datum$$

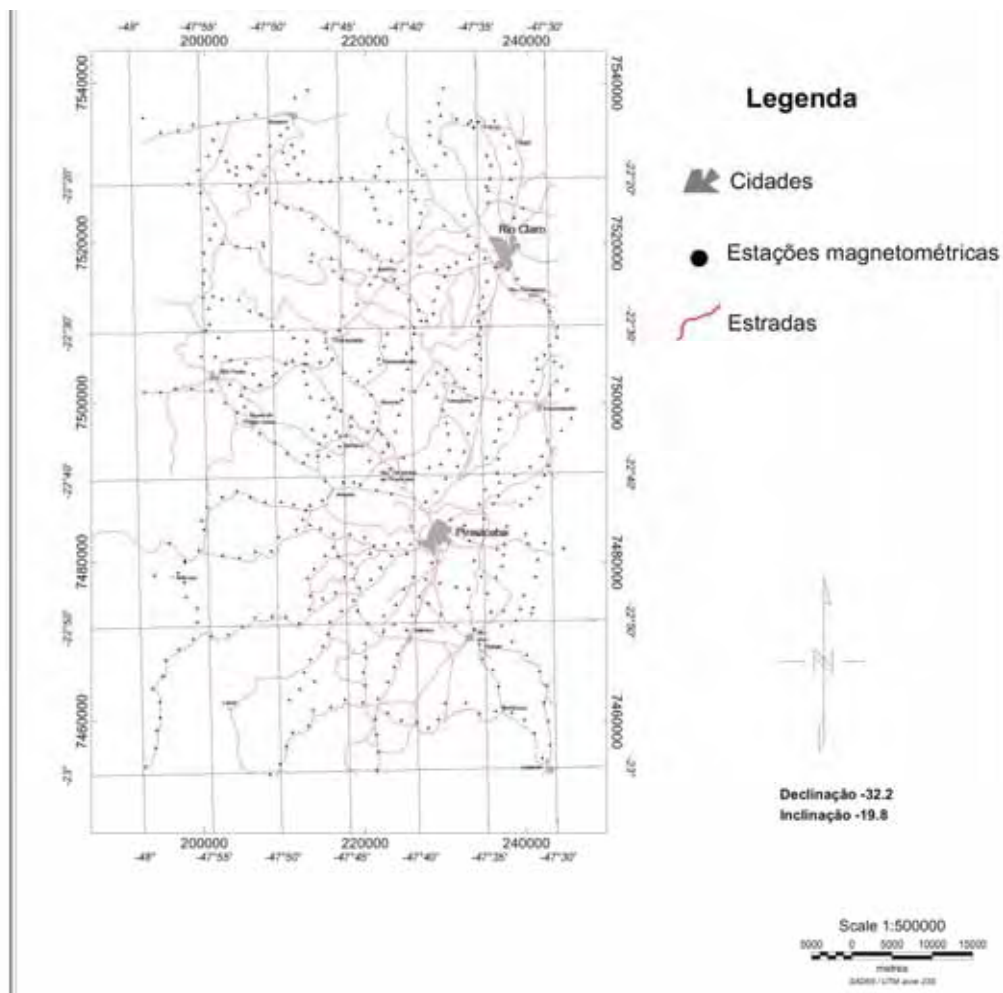
Onde:

**MAG<sub>corr</sub>** é o valor do campo magnético corrigido.

**ROVER** é o valor do campo magnético do magnetômetro viajante.

**BASE** é o valor do campo magnético do magnetômetro de base.

**Datum** é o valor do campo magnético terrestre previamente conhecido do campo magnético da área de estudo.



**Figura 5.3** Estações magnetométricas adquiridas na área de estudo, principais cidades e estradas de acesso.



**Foto 5.7** Magnetômetro móvel (*Rover*) usado na aquisição dos pontos magnetométricos

O *Datum* deve ser somente uma mudança positiva dos dados corrigidos. Normalmente, é ajustada a média de uma série de medidas ou a um valor conhecido do campo magnético em determinada área, mas pode também ser ajustado para qualquer número positivo ou zero. Como a estação base corresponde a uma unidade estacionária, as variações do campo magnético circundante são resultados exclusivos da variação diurna. As leituras da estação *rover*, em contrapartida, são influenciadas pela variação diurna e também pelas variações locais do campo magnético em virtude de eventuais anomalias presentes no local do levantamento. A correção diurna remove, portanto, as variações das leituras provocadas pela variação diurna (Figura 5.4) do campo magnético, permitindo assim, que as anomalias sejam devidamente reconhecidas nos levantamentos executados. Um

critério ou referência para combinar as leituras tanto de *Rover* como de Base é através das medidas de tempo feitas ao longo do dia pelos dois magnetômetros (Base e *Rover*). Se as medidas de tempo nas leituras (hora, minuto e segundo) do magnetômetro base coincidem com as medidas anotadas no magnetômetro *Rover*, a correção é aplicada exatamente segundo a equação citada acima.

Como as anotações, na maioria das vezes não são coincidentes, o campo magnético da estação base é obtido interpolando-se linearmente o campo das duas leituras obtidas na base mais próximas a leitura do tempo da estação *rover*.



**Figura 5.7** Exemplo da variação diurna do campo magnético adquirido pelo magnetômetro base em um levantamento realizado na área de estudo. No eixo X os horários de cada medida e no eixo Y as leituras obtidas em nT.

Esse procedimento encontra-se em conformidade com o manual do fabricante do equipamento (GEM Systems, 2005), e é a melhor forma de se obter uma correção diurna, desde que se utilize um equipamento que registre ininterruptamente as variações da base e um equipamento independente para as leituras ao longo da área estudada.



## **CAPÍTULO 6 - MAPAS GRAVIMÉTRICOS, MAGNETOMÉTRICOS, PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DOS DADOS GEOFÍSICOS**

---

Dados gravimétricos e magnetométricos obtidos através de uma aquisição terrestre nada mais são do que as somas dos campos gravitacionais e magnéticos produzidos por diferentes tipos de fontes. Dentre essas fontes, algumas oriundas da crosta terrestre. Os alvos de interesse, tanto na pesquisa como na prospecção, podem ser estruturas de pequeno (alguns metros) a grande porte (vários quilômetros) que se situam a pequenas e grandes profundidades.

Respostas magnéticas e gravimétricas obtidas por meio de equipamentos são relacionadas a um campo magnético/gravitacional regional, originadas diretamente da(s) fonte(s) de interesse. Essas possuem por si próprias, as suas determinadas propriedades magnéticas e de densidades.

O resultado obtido com esse campo “anômalo” produzido por essas fontes, devido a características intrínsecas aos métodos potenciais, é geralmente maior e mais profundo do que os corpos analisados em um estudo. Estimar de uma forma mais precisa e remover a porção regional do campo em estudo, fornece o chamado campo residual produzido pelos corpos alvo. Por isso, em alguns estudos, a interpretação e a modelagem numérica, são comumente efetuadas com base em dados residuais.

A qualidade e a maior proximidade com o modelo real dependem diretamente do sucesso da separação regional-residual. Poucos artigos tratam especificamente dos tipos de procedimentos e processamentos adotados para cada tipo de estrutura e de alvos desejado. De acordo com Li & Oldenburg (1998) esses métodos de processamento acabam inevitavelmente situados em quatro categorias, onde cada uma delas possuem falhas e vulnerabilidades em alguns pontos:

- a) Remoção manual do *trend* regional de um perfil por meio de métodos gráficos, onde a determinação do *trend* depende diretamente do conhecimento de dados geológicos/estruturais do intérprete. Esse é um procedimento com uma certa subjetividade e torna-se extremamente difícil com grupos de dados 2D.
- b) Estimativa do campo magnético/gravitacional por meio das técnicas de interpolação como mínimos quadrados que se encaixa em uma polinomial do campo observado de pequena ordem. Esse procedimento reduz a subjetividade, mas mesmo assim torna-se necessário a estimativa de determinar-se a ordem da polinomial a ser aplicada.
- c) Aplicação de filtros nos dados observados, a fim de se separar as anomalias de grande comprimento de onda relacionadas ao campo regional, das anomalias relacionadas às estruturas alvo e de pequeno comprimento de onda. Essa técnica, atualmente é executada mais eficientemente por programas de computador que executam os dados observados e os transporta para o domínio de número de ondas, onde se aplica, então, as transformadas Fourier (Apêndice 5). O uso de dados observados no domínio de número de ondas é atualmente prático e simples de ser aplicado e veio a tornar-se um método de processamento muito utilizado. Diferentes filtros podem ser simultaneamente aplicados em um *grid* e conhecimento acerca da geologia pode ser incorporado por meio do espectro de potencia de diferentes componentes, ou seja, tanto o campo regional como o residual pode ser utilizado.
- d) O quarto procedimento de aproximação é feito analisando-se dados geológicos conhecidos onde o campo, com propriedades magnéticas/densidades previamente conhecidas e/ou medidas, é calculado e subtraído das observações.

Os dados adquiridos nas campanhas de campo deste estudo são representados graficamente após o processamento e tratamento inicial, na forma de mapas sombreados de contorno de isovalores, com um espaçamento pré-determinado para o *grid* que gera as respectivas curvas de isovalores obtidas.

As medidas feitas em campo devem expressar de alguma forma uma grandeza física, como uma função da distância ou do tempo de forma mais precisa e representativa possível. Neste capítulo, serão primeiramente apresentados os resultados obtidos com o processamento dos dados geofísicos de campo, que nada mais são do que medidas feitas em termos da variação da distância denominadas de “medidas no domínio do espaço”.

Neste estudo, as variáveis aqui representadas são referentes à intensidade do campo gravitacional e do campo magnético da Terra, registrados em pontos de localização predefinida. Mais a frente, são apresentados os procedimentos usados no processamento dos dados que, em sua essência, são medidas feitas em termos das variações temporais conforme acima citado. Essas medidas são obtidas em instantes predefinidos ou ao longo de um intervalo de tempo escolhido e, portanto, pertencentes ao “domínio de tempo”. Podem também ser obtidas envolvendo a variação na frequência de onda que representa determinada fonte geradora no terreno e encontram-se no chamado “domínio da frequência”. Essas são equivalentes às medidas obtidas no domínio do tempo.

Os dados adquiridos no campo (Capítulo 5), previamente processados, reduzidos e inseridos em um banco de dados são distribuídos através do método de interpolação da mínima curvatura. Um *grid* (com a variável de interesse anomalia Bouguer, campo total, *free-air*, residual, etc) é gerado na forma de coordenadas X e Y com um espaçamento pré-determinado para cada célula, de acordo com a distância das estações adquiridas no campo.

Os mapas são gerados para que tendências lineares ou curvilíneas dos dados de interesse possam ser visualizadas. Feições como falhas, fraturas, contatos litológicos e estruturas de grande porte, podem ser identificadas por meio destes. A geração e a interpretação dos mapas de curvas isogálicas, fornecem subsídios para uma posterior modelagem gravimétrica, conjuntamente com o conhecimento das densidades e das litologias dos pacotes rochosos presentes.

As fontes rasas neste estudo podem ser denominadas de fontes residuais, já que o objetivo do estudo é delimitar os altos estruturais e a sua correlação com a

crosta inferior e manto superior. As feições de origem mais profunda, por sua vez, denominam-se de fontes regionais ou anomalias regionais. A separação qualitativa e a respectiva classificação dessas anomalias ou fontes no contexto litoestrutural da área são importantes na determinação e identificação das principais estruturas e lineamentos da área.

O mapa da anomalia Bouguer gerado pode ser, portanto, considerado como a soma dos efeitos tanto locais como regionais, podendo ser de origem de massas profundas de grandes dimensões ou até mesmo oriundas de massas superficiais. Essas geram chamados ruídos de fontes rasas. Essas características são difíceis de serem separadas adequadamente.

Como o arcabouço tectônico precisa ser reconhecido e delimitado, é importante, também que essas fontes rasas aqui denominadas de residuais, sejam devidamente reconhecidas e separadas dos ruídos, porque são resultado de corpos rasos e mais densos, compostos principalmente pelas rochas básicas intrusivas da Formação Serra Geral. Essas rochas são abundantes na área e contrastam em densidade com as coberturas sedimentares da bacia. As rochas básicas da Formação Serra Geral, encontram-se na forma de diques e *sills* e encontram-se relacionadas aos principais falhamentos e lineamentos que formam a atual estruturação e compartimentação da Bacia Sedimentar do Paraná.

## 6.1 – PRINCIPAIS PROCEDIMENTOS NA ELABORAÇÃO DOS MAPAS

Ao ser obtido o *grid* com os valores de interesse (anomalia Bouguer, campo magnético total, etc.), pode-se detectar por meio de perfis geológico/estruturais, gravimétricos/magnetométricos, e posterior modelagem dos dados, os efeitos causados nos campos magnéticos e gravitacionais. Essas massas e corpos são os causadores das anomalias detectadas que são agrupadas em profundidades eliminando-se ruídos superficiais presentes. É necessário separar e distinguir as fontes primárias oriundas de corpos de interesse mais profundos dos corpos secundários (fontes rasas) e ruídos.

O *grid* gerado na plataforma Oasis Montaj, fornece subsídios para a elaboração dos mapas aqui apresentados e possibilita o processamento dos dados de interesse no domínio do tempo (transformada rápida de *Fourier*). Esse procedimento permite que os dados sejam submetidos as diferentes filtragens e

formas de tratamento de forma ágil e simplificada. Uma explicação mais detalhada da metodologia denominada de transformada rápida de *Fourier* no domínio das frequências encontra-se no Apêndice 4 desta tese.

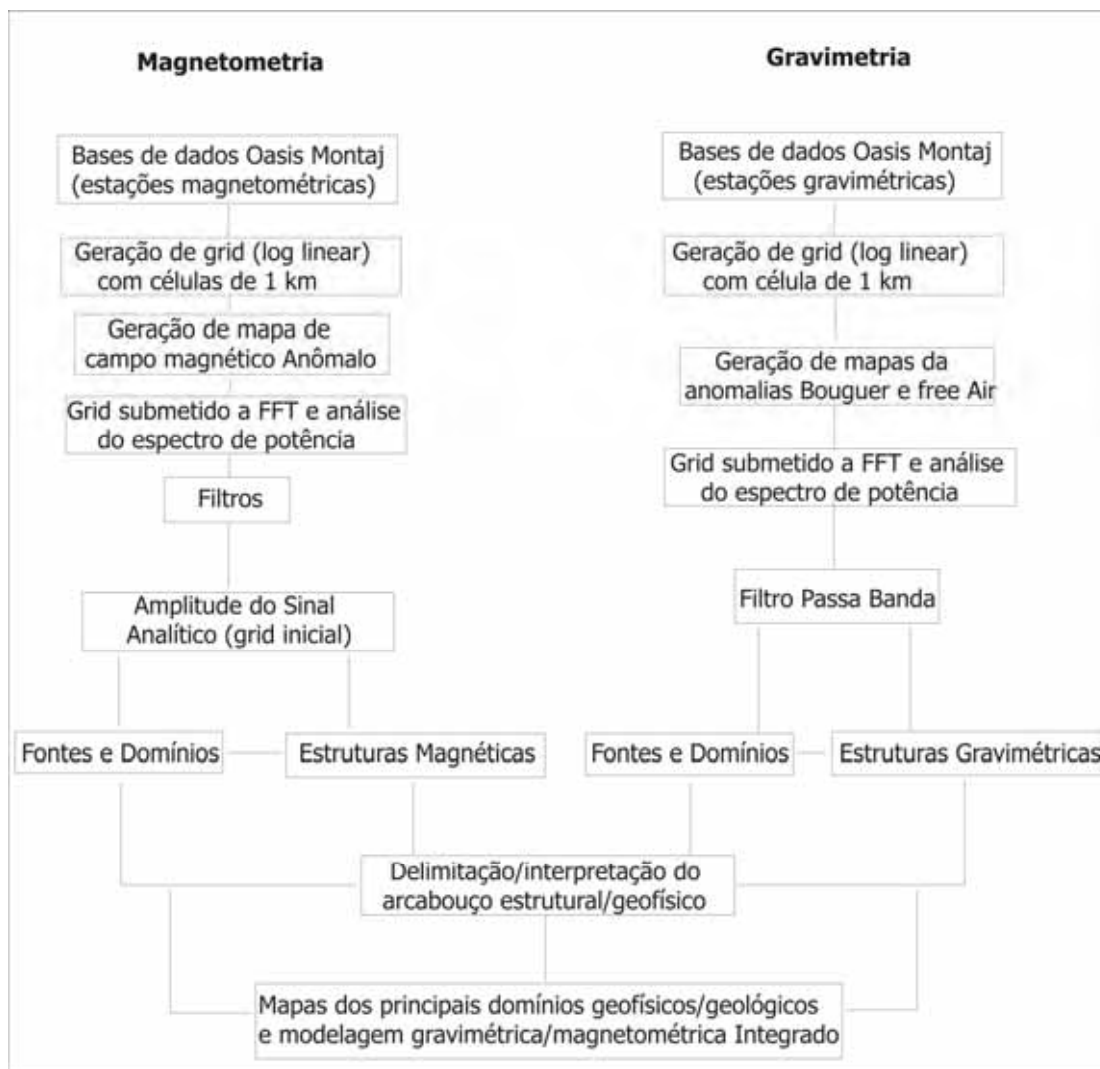
Os principais procedimentos adotados no tratamento e processamento dos dados brutos adquiridos no campo são melhor visualizados na Figura 6.1.

### **6.1.1 Processamento no domínio do tempo – Transformada *Fourier***

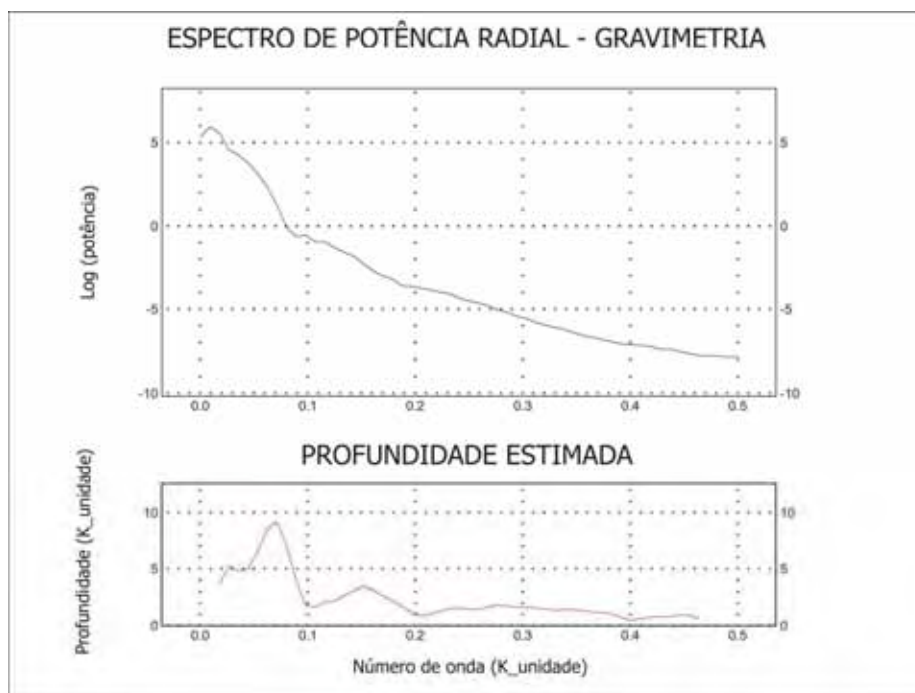
Neste estudo foram aplicadas técnicas e procedimentos para a interpretação das anomalias dos dados magnetométricos e gravimétricos aplicados interativamente partindo-se de um *grid* gerado no domínio da frequência. Esses procedimentos, a partir dos dados primariamente gerados, são tratados pelo método denominado de transformada rápida de *Fourier* (SPECTOR & GRANT, 1970 e GEOSOFT, 2005).

Para a área estudada foram determinados e adotadas as técnicas que melhor se adequaram às seguintes características geológicas predominantes; lineamentos e estruturas condicionadas a presença de rochas básicas intrusivas preenchendo ou não os falhamentos presentes. Foi concebido inicialmente que as estruturas (anomalias, lineamentos), são na sua maioria compostas por rochas sedimentares. Por isso, essas feições não apresentam significantes contrastes no que se refere aos valores de suscetibilidade magnética. Esse fato foi comprovado com os valores de campo magnético total apresentados mais a frente.

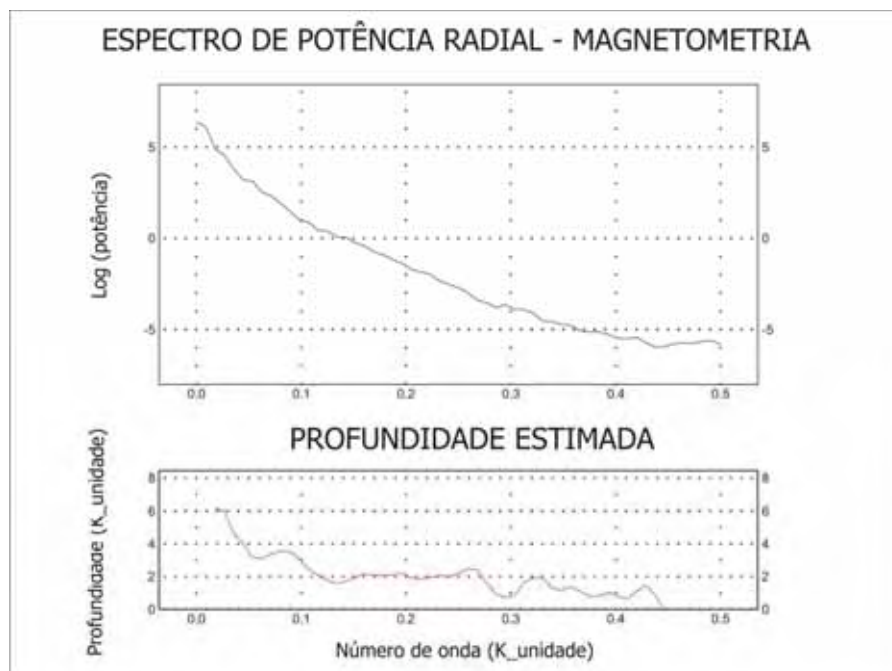
Nas Figuras 6.2 e 6.3, observa-se o comportamento das ondas, no domínio da frequência ou do tempo, para os valores da anomalia Bouguer e do campo magnético anômalo total. Esses valores são representados através do número de ciclos por unidade de medida usado no *grid* gerado no eixo X (quilômetro). As estimativas de profundidade (eixo Y) são relacionadas as frequências de número de onda, também por unidade de medida (quilômetro) e de acordo com a energia (densidade e suscetibilidade magnética) gerada pelos corpos e estruturas presentes.



**Figura 6.1** Etapas de processamento e interpretação adotados para os dados magnetométricos e gravimétricos na área.



**Figura 6.2** Espectro de potência radial dos dados da anomalia Bouguer no domínio da frequência levantados na área de estudo. Os valores observados no eixo X representam ciclos por unidade de medida usada no processamento (km).

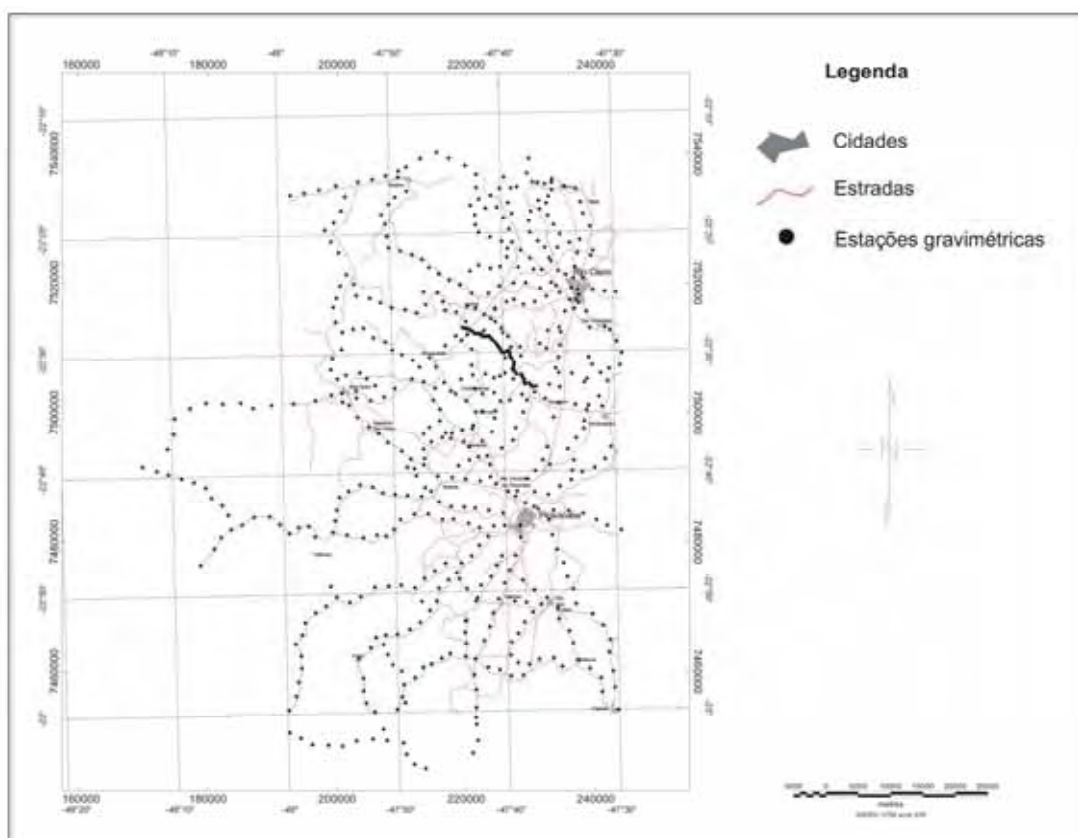


**Figura 6.3** Espectro de potência radial dos dados magnetométricos no domínio da frequência adquiridos na área de estudo. Os valores observados no eixo X representam ciclos por unidade de medida usada no processamento (km).

### 6.1.2 Mapas dos Resultados Gravimétricos

Os mapas gravimétricos gerados neste estudo, como resultado das estações terrestres adquiridas de acordo com a Figura 6.4 abaixo são:

- Mapa da anomalia Bouguer (Figura 6.5)
- Mapa da anomalia *free-air* (Figura 6.6).
- Mapa da anomalia Bouguer com filtro passa-banda (Figura 6.8)



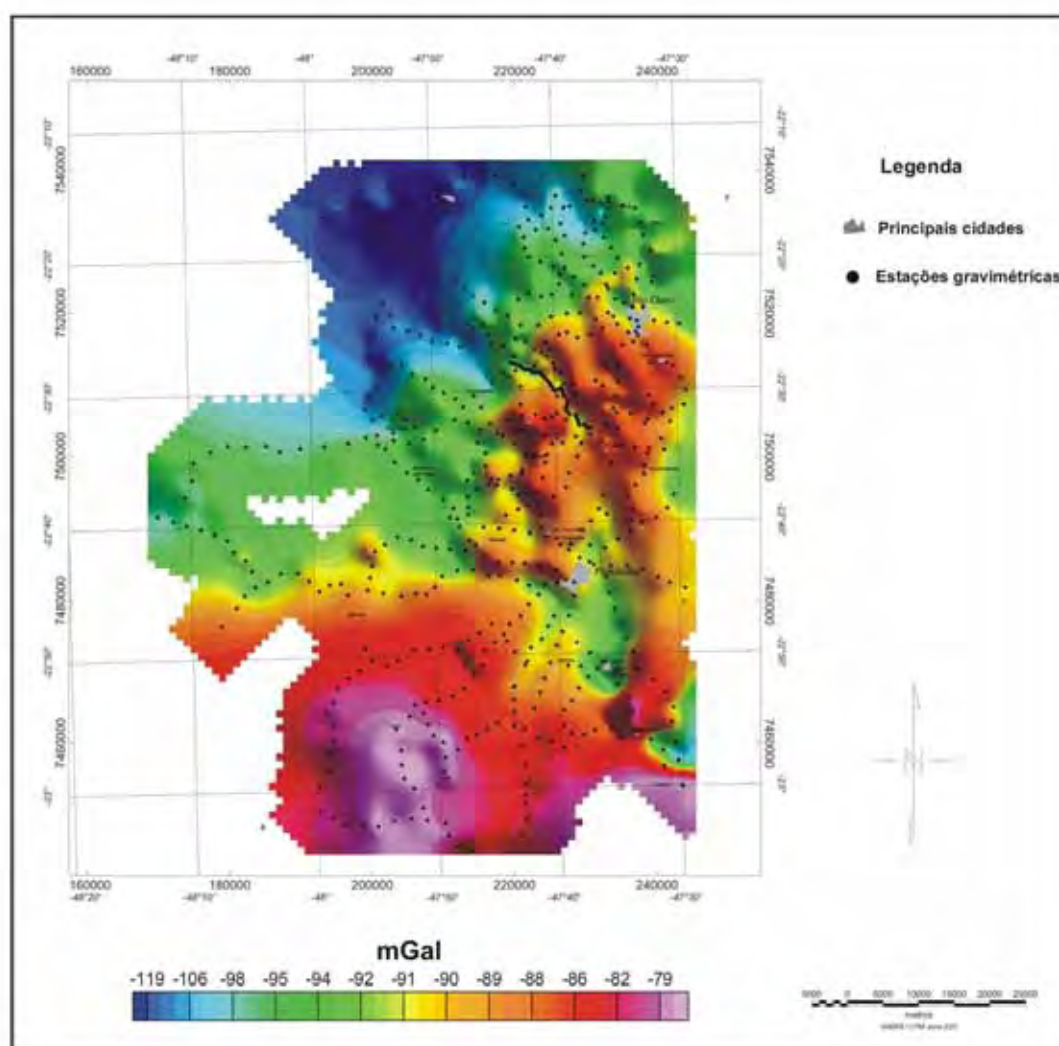
**Figura 6.4** Mapa de pontos das estações gravimétricas, principais cidades, rodovias e estradas de acesso.

O *grid* gerado para a confecção dos mapas em uma rotina do *software Oasis Montaj* da Geosoft inc., é o resultado de 595 estações gravimétricas. Na interpolação dos pontos X, Y e Z (anomalia Bouguer) foi usado o método de interpolação pelo método da mínima curvatura.

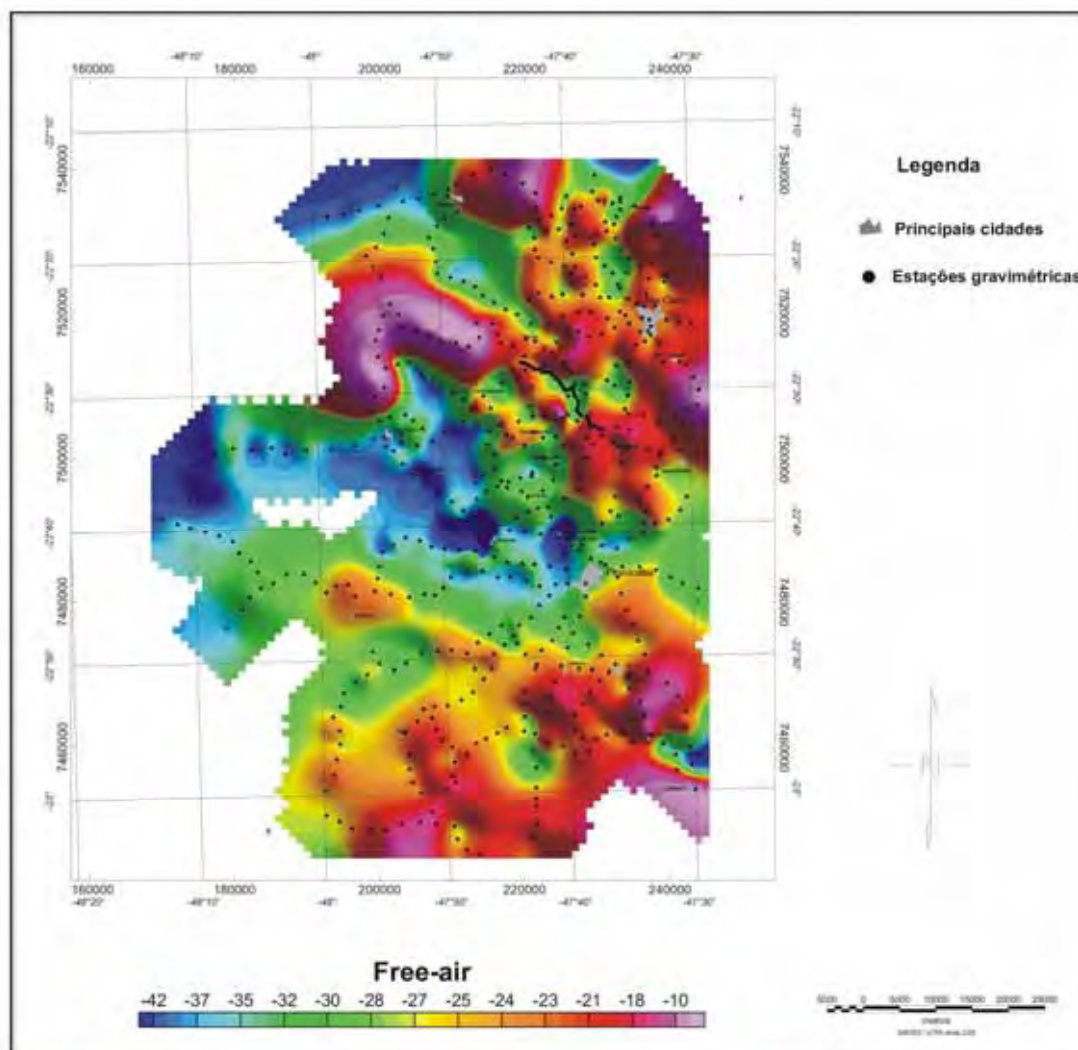


Foi usado um espaçamento mínimo de 1.000 metros entre as células. O *grid* é composto de 77 por 97 pontos nas direções X e Y para os mapas Bouguer e *free-air*.

Na localização geográfica das estações foi empregado o sistema de coordenadas UTM, zona 23 do meridiano de Greenwich. O elipsóide de referência utilizado foi o SAD 69 para a América do Sul (IBGE).



**Figura 6.5** Mapa dos valores calculados da anomalia Bouguer, principais cidades e estações gravimétricas.



**Figura 6.6** Mapa dos valores calculados da anomalia *free – air*, principais cidades e estações gravimétricas.

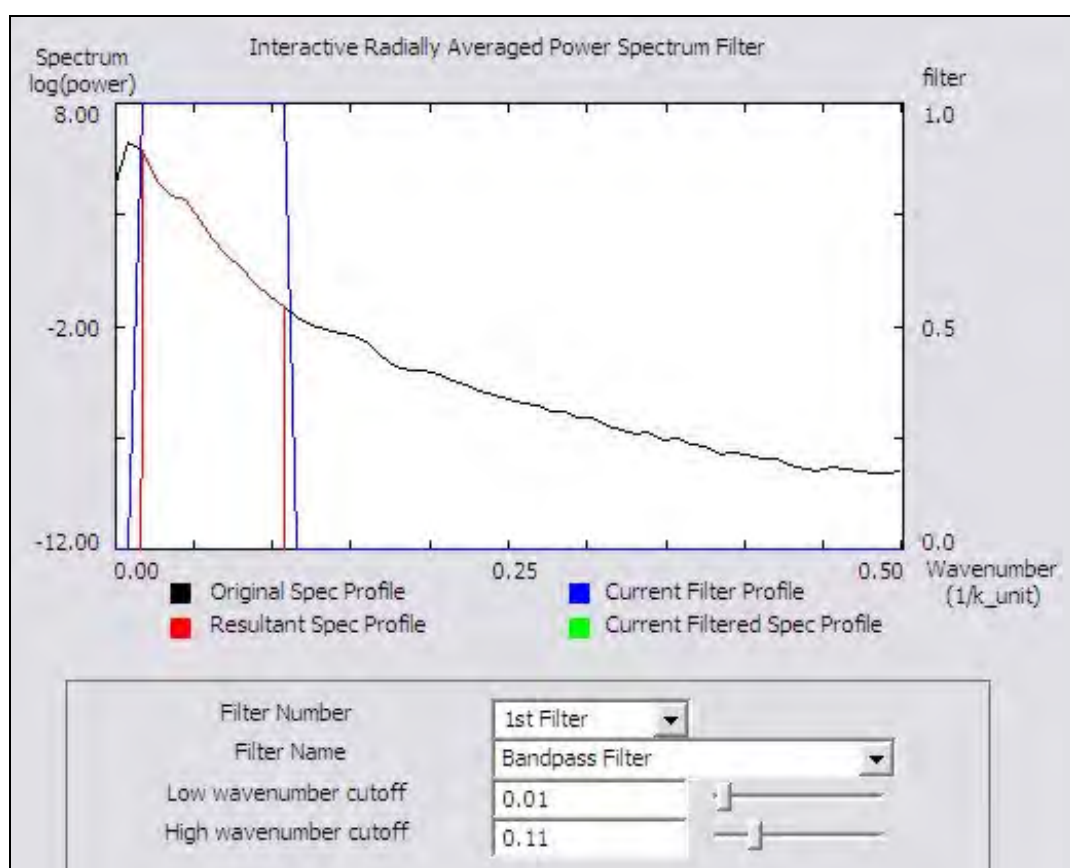
### 6.1.2.1 Processamento no Domínio do Tempo Aplicado aos dados gravimétricos

A partir dos dados adquiridos no campo (Figura 6.4) e do mapa de contorno dos valores da anomalia Bouguer calculada (Figura 6.5) foram aplicadas as técnicas de processamento adequadas para a área. As anomalias apresentadas no mapa são resultados dos contrastes de densidade tanto em superfície e níveis rasos (corpos intrusivos básicos) como a níveis mais profundos (embasamento e provável limite crosta/manto ou Moho).

Foi adotado, então, a separação das fontes rasas como procedimento de abordagem com a finalidade de interpretação das feições apresentadas mais a frente.

### a) A filtragem Passa - Banda

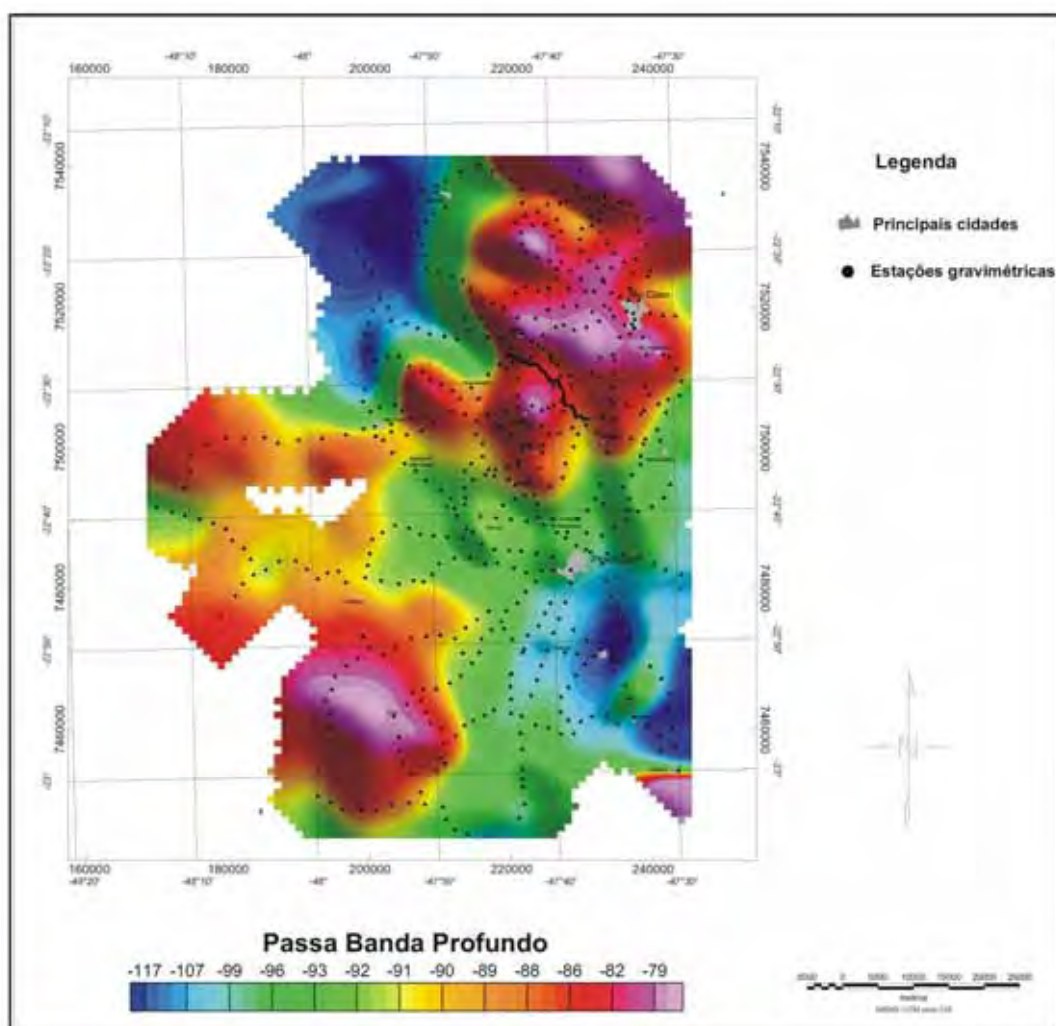
Com os valores da anomalia Bouguer no domínio do espaço convertidos para o domínio do número de onda através da transformada rápida Fourier, de acordo com os procedimentos descritos no Apêndice 5 desta tese, os valores de corte (*cut-off*) adotados para a aplicação do filtro passa-banda, foram estabelecidos de acordo com o espectro de potência radial abaixo (Figura 6.7).



**Figura 6.7** Espectro de potência radial das frequências no domínio do tempo com os valores de corte adotados para os valores da anomalia Bouguer (linha azul). O espectro resultante estabelecido é representado pela linha vermelha.

Estabelecidos estes valores foi gerado, então, o mapa com os dados de profundidade submetidos a filtragem passa – banda (Figura 6.7).

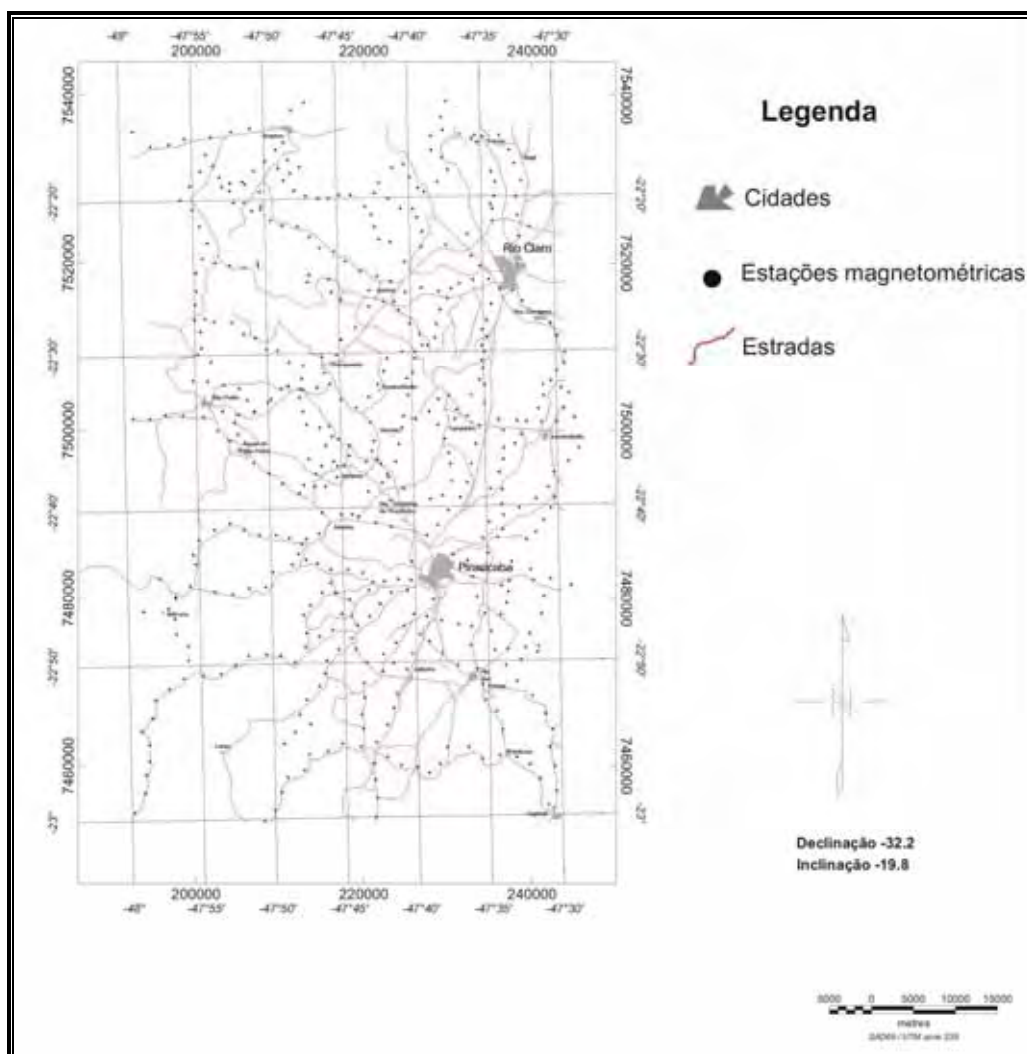
É possível se observar no espectro de potência acima, que procurou-se cortar somente as frequências que representam a energia de fontes mais profundas (reta de tendência de maior declive). Os valores de corte determinados neste estudo são de 0.01 e de 0.11 (número de ondas por unidade de medida) para as frequências baixas.



**Figura 6.8** Mapa com os valores calculados da anomalia Bouguer submetidos a uma filtragem passa – banda. Os valores adotados para valores de corte são referentes às altas profundidades de acordo com a análise do espectro de potência.

### 6.1.3 Mapas dos dados Magnetométricos

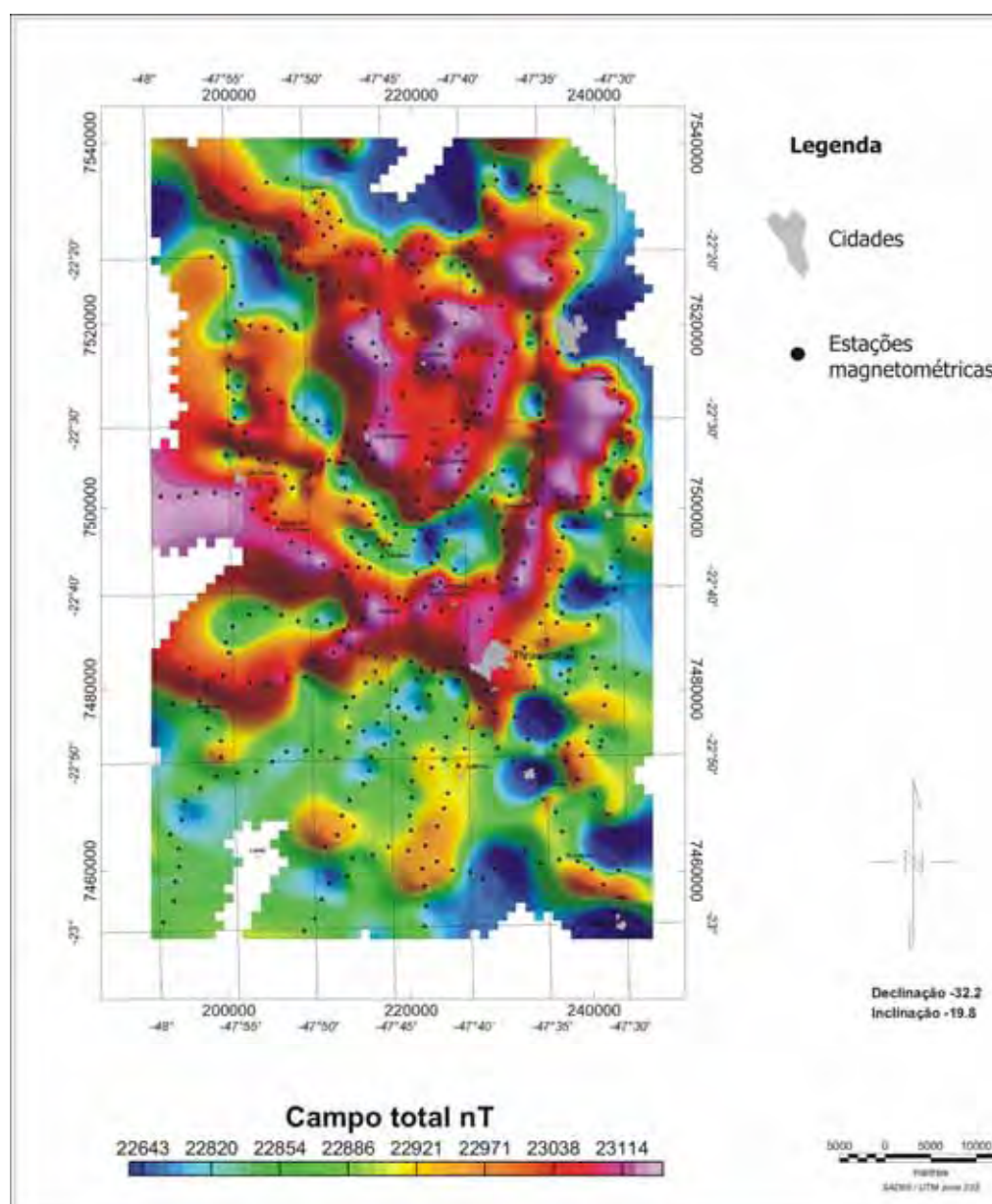
Através das leituras dos valores de campo magnético obtido nas estações magnetométricas levantadas (Figura 6.9), foi inicialmente gerado o mapa dos valores de campo magnético anômalo total (Figura 6.10). A partir dos valores de campo magnético total foi subtraído o valor do IGRF.



**Figura 6.9** Mapa das estações magnetométricas levantadas na área de estudo com as principais rodovias, estradas vicinais e drenagens.



Para o mapa dos valores de campo magnético total abaixo, subtraiu-se o valor do IGRF para a área de estudo. A área em questão não possui uma grande extensão e possui, portanto, uma variação de latitude pouco significativa. Para esse procedimento, foi subtraído dos valores obtidos após a correção diurna, o valor do IGRF mais recente (explicação mais detalhada, ver Capítulo 4), de 23.202,17nT disponibilizado pelo site <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/geomag/jsp/IGRF.jsp>.



**Figura 6.10** Mapa com os valores calculados de campo magnético anômalo total (em nT).

A partir deste mapa inicialmente elaborado, foi possível determinar um método de processamento adequado para a distribuição das anomalias apresentadas na área de estudo.

Para a confecção dos mapas magnetométricos no programa Oasis Montaj da Geosoft inc., foi gerado um *grid* dos pontos amostrados por meio de interpolação de log linear usando-se para isso o método da mínima curvatura. O *grid* é composto por células de 1000 metros cada com 55 por 88 pontos nas direções X e Y respectivamente.

Na localização geográfica das estações foi empregado o sistema de coordenadas UTM, zona 23 sul do meridiano de Greenwich. O elipsóide de referência utilizado foi o SAD 69 para a América do Sul (Brasil IBGE). O mapa de contorno sombreado foi gerado com  $45^{\circ}$  de inclinação e de declinação.

#### **6.1.3.1 Processamento no Domínio do Tempo Aplicado aos dados magnetométricos**

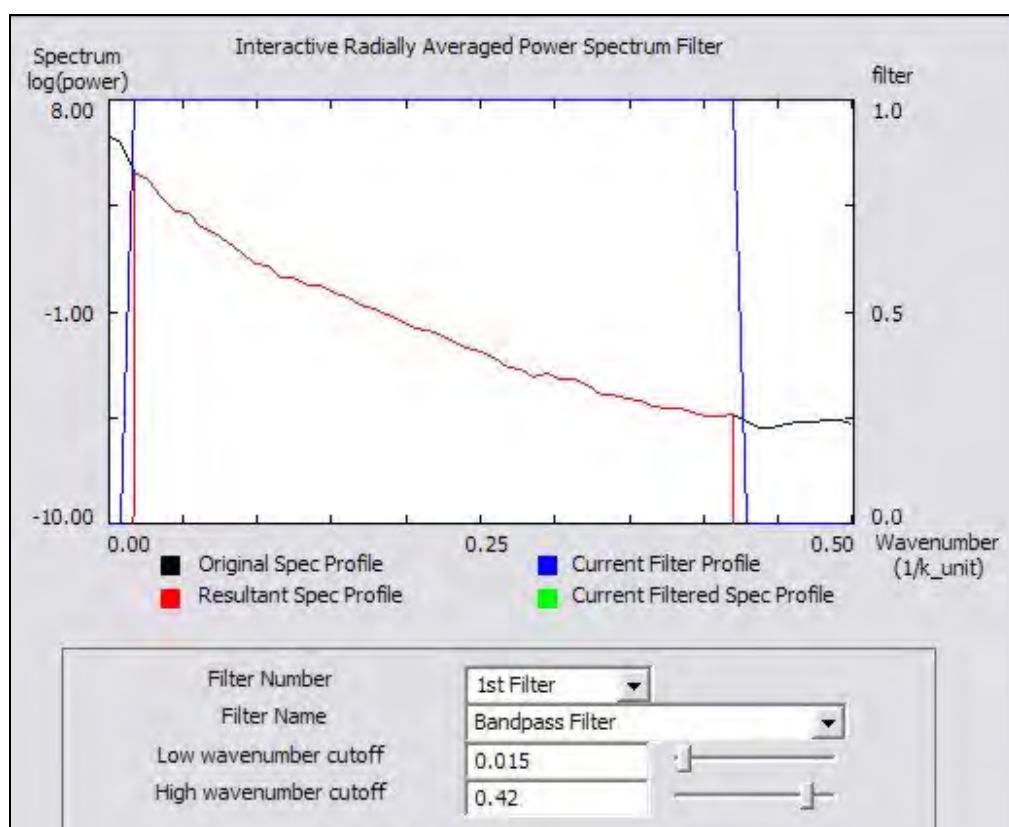
A partir dos dados adquiridos no campo (Figura 6.8) e do mapa de contorno dos valores de campo magnético total (Figura 6.9), procurou-se de uma forma semi-empírica, aplicar as diferentes técnicas de processamento mais adequados, para a separação das anomalias magnéticas presentes. Como esperado, no início dos processamentos em etapas de escritório e citado no início do capítulo, não há significativos contrastes laterais de suscetibilidade magnética na região dos altos estruturais pelo fato destas feições serem formadas também por rochas sedimentares.

Tendo-se os valores de campo magnético anômalo total convertidos, na etapa seguinte do processo (transformação do domínio do espaço para o domínio do tempo através da transformada rápida de Fourier) foram gerados os seguintes mapas de contorno sombreado:

- Mapa com os valores de campo magnético anômalo total submetidos a filtragem passa-banda
- Mapa com os valores do sinal analítico

### a) A Filtragem Passa-Banda

De acordo com os procedimentos descritos (Apêndice 5), os valores de corte adotados para a aplicação do filtro passa-banda, foram estabelecidos em concordância com o espectro de potência radial abaixo (Figura 6.11) que é determinado através do *grid* inicial dos valores de campo magnético total.



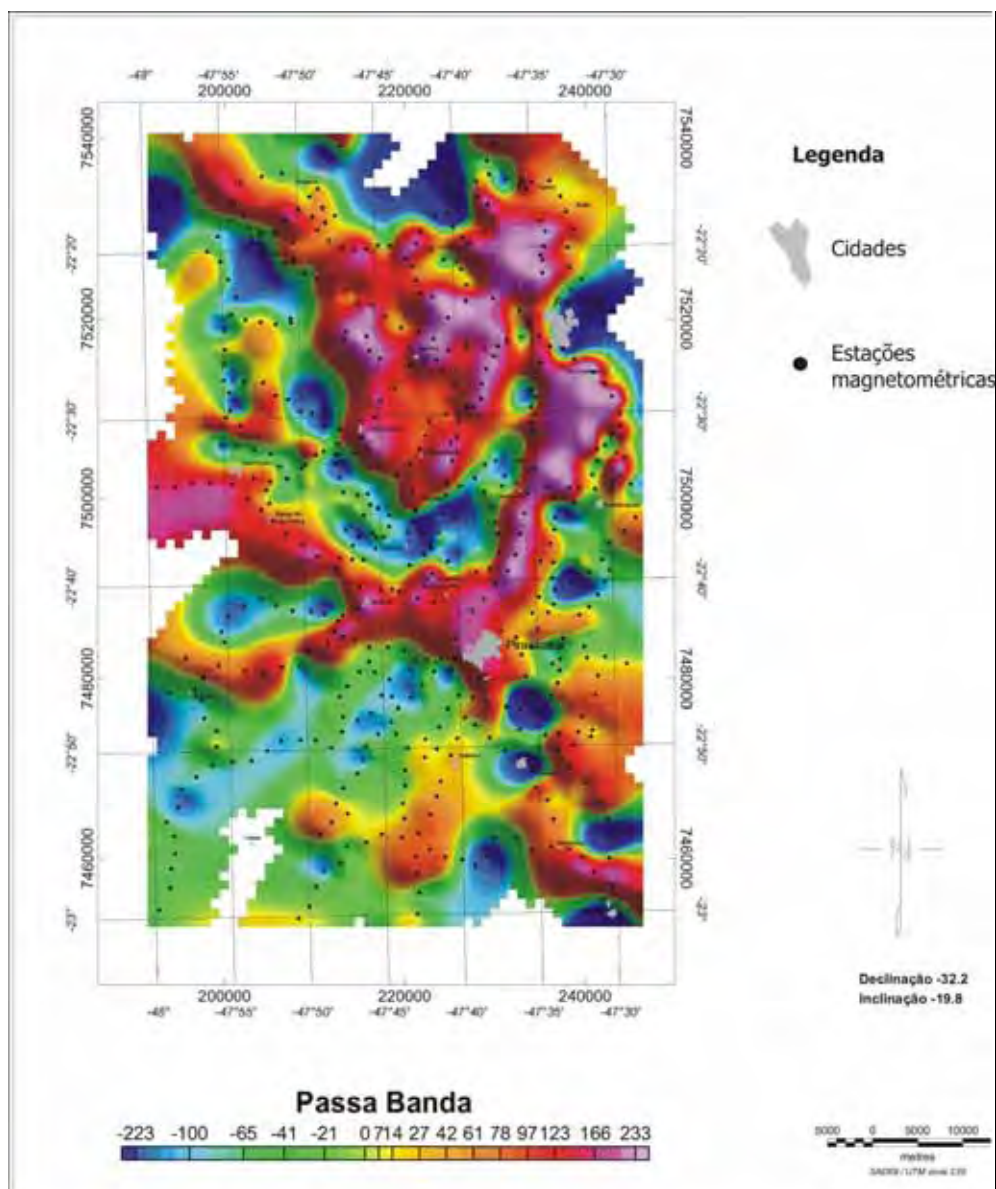
**Figura 6.11** Espectro de potência radial das frequências no domínio do tempo com os valores de corte (linha azul) e espectro resultante (linha vermelha) estabelecidos pelo filtro.

É importante se levar em conta as imperfeições do método magnetométrico (ruídos culturais e produzidos durante o processamento). Portanto, é possível se observar no espectro de potência acima, que as frequências excluídas são na maioria as de altas frequências de número de ondas (extrema direita do gráfico). Esse procedimento foi adotado para se evitar a formação de novos ruídos (Apêndice



5) fazendo desta forma, com que frequências irrealis venham a incorporar os dados já existentes.

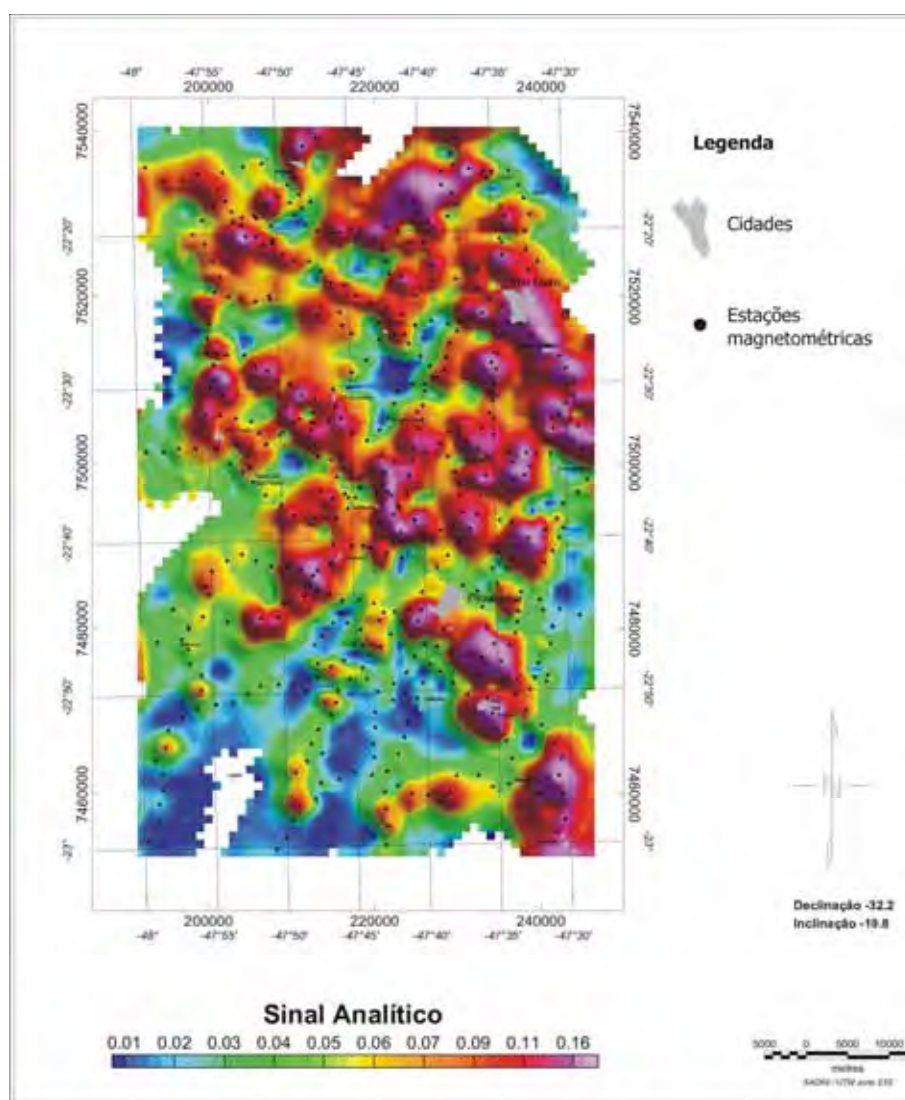
Os valores de corte determinados na geração do mapa da Figura 6.12 para este estudo são de 0.015 e de 0.42 (número de ondas por unidade de medida) para as frequências baixas e altas respectivamente.



**Figura 6. 12** Mapa com os valores calculados de campo magnético anômalo total submetido à filtragem passa – banda de acordo com a análise do espectro de potência dos dados.

### b) Mapa de Amplitude do Sinal Analítico

Á área de estudo se encontra situada no hemisfério sul, próxima ao equador magnético e o arcabouço tectônico e geológico, assim como suas estruturas correlatas, são fortemente marcadas e delimitadas por preenchimento de diferentes intrusões de rochas básicas da Fm. Serra Geral. Por isso, as anomalias magnéticas identificadas são formadas por assinaturas complexas e, por vezes, difíceis de se correlacionar com as fontes causadoras. Para tal, optou-se por um processamento do sinal analítico dos dados de campo magnético anômalo total (Figura 6.13).



**Figura 6.13** Mapa com os valores de sinal analítico calculado a partir dos dados de campo magnético anômalo total.

Esse método, que foi inicialmente desenvolvido por Nabighian (1972), permite que os picos das fontes estejam centrados nas bordas do corpo anômalo ou da feição geológica correspondente. Torna-se possível uma delimitação com maior precisão dessas fontes de alta suscetibilidade magnética que foram inicialmente observadas de forma difusas nos mapas anteriores. Uma vez conhecendo-se a geologia de superfície na área e sabendo-se que essas anomalias são abundantes na forma de diques e *sills*, a determinação dos limites dessas feições é de grande importância para esse estudo.

## **CAPÍTULO 7 – MODELAGEM GRAVIMÉTRICA E MAGNETOMÉTRICA, ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS**

---

As modelagens, tanto gravimétrica como magnetométrica feitas nesse estudo, consistiram na elaboração de modelos denominados de  $2^{1/2} D$  que se baseiam nas características geológicas e estruturais responsáveis pelas assinaturas gravimétricas e magnetométricas da região. Os modelos aqui propostos procuram atender também as principais litologias e feições conhecidas em superfície por seções geológicas, assim como delinear seus limites e profundidades na área estudada.

### **7.1 - CONCEITOS BÁSICOS DA MODELAGEM E DO PROGRAMA UTILIZADO**

A modelagem geofísica foi executada através do programa GM-SYS da *Northwest Geophysical Associates* (NGA). Este programa encontra-se na rotina do programa OASIS MONTAJ sendo, portanto, um aplicativo do mesmo.

O GM-SYS foi desenvolvido para o cálculo de respostas obtidas por dados de magnetometria e de gravimetria aplicados a um modelo geológico pré-concebido ou ainda a ser criado.

Este programa proporciona também uma interação conjunta entre os valores observados (gravimétricos e/ou magnetométricos) simultaneamente com a elaboração de um modelo e a respectiva resposta da curva calculada, dispostos em uma mesma área de visualização ou *display*.

A geração de modelos geológicos fundamentados em observações geofísicas como dados da anomalia Bouguer, campo magnético, *free-air*, ou residual, consiste basicamente na criação de um modelo físico/matemático o qual a resposta geofísica é inserida em um modelo da Terra. Modelos gravimétricos e magnéticos não são únicos, podendo diferentes tipos resultarem em uma mesma resposta geofísica. Desta maneira é importante atentar-se ao fato de que diferentes estruturas e feições geológicas inseridas nos resultados de um modelo podem não corresponder às reais características existentes. Por isso, o intérprete deve estar atento às inferências geológicas e avaliar os resultados quanto à coerência geológica e estrutural de forma que os valores medidos em campo estejam próximos das feições apresentadas na área em questão.

### **7.1.1 Modelagem 2 ½ D**

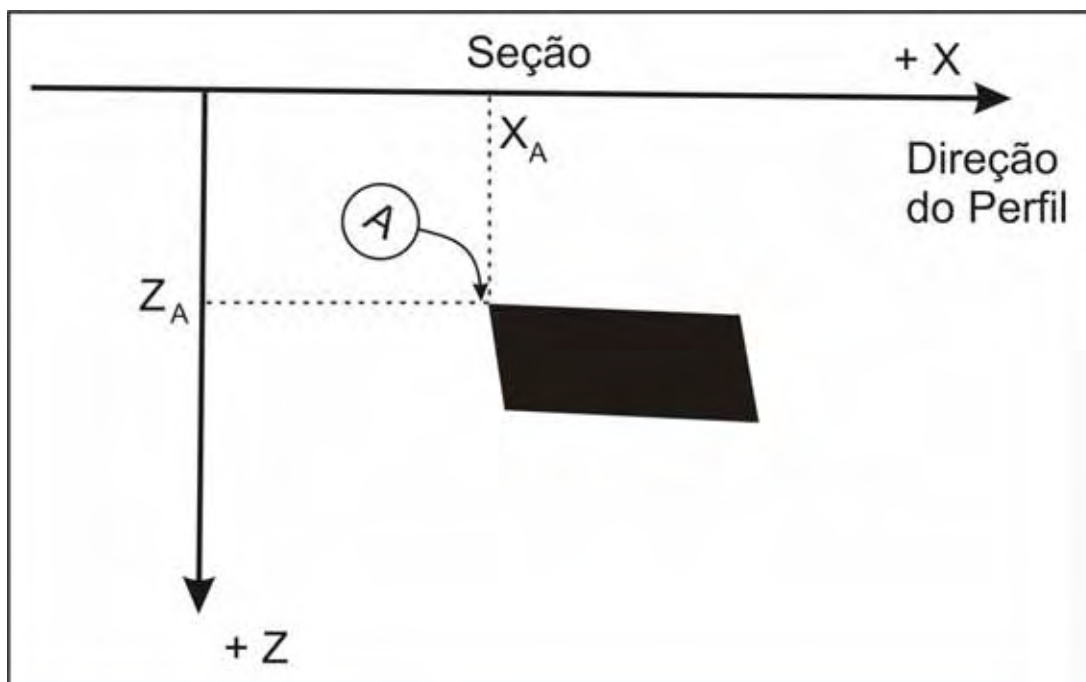
Para se compreender o conceito de modelagem 2 <sup>1/2</sup>-D utilizado aqui, primeiramente é necessário que se entenda a concepção de um modelo 2-D. O modelo 2-D é visualizado segundo um determinado número de prismas retangulares onde seus eixos principais encontram-se alinhados com a principal direção (*strike*) de determinada estrutura ou feição estudada (Figura 7.1).

Os métodos utilizados para o cálculo da resposta dos modelos de gravidade e magnéticos são descritos pormenorizadamente nos estudos de Talwani et al. (1959); Talwani & Heirtzler (1964) e GM – SYS (2000).

### **7.1.2 Base computacional usada nos modelos pelo GM-SYS**

Na elaboração dos modelos deste estudo é necessário ter em conta que para os cálculos de gravidade e campo magnético, o programa GM-SYS utiliza um modelo da Terra bi-dimensional e plano. Cada unidade estrutural ou bloco prolonga-se para o infinito tanto na direção positiva como negativa dos eixos de um determinado perfil. Para a Terra assume-se uma topografia existente e não uma

curvatura. Os modelos se estendem 30.000 km nas direções positivas e negativas do perfil a fim de eliminar os efeitos de borda.



**Figura 7.1** Seção em corte de um bloco usado como modelo, com a representação dos eixos X e Z.

### 7.1.3 Unidades utilizadas para as propriedades magnéticas e gravimétricas

O GM-SYS usa como valores pré-estabelecidos (*default*) o sistema de unidades cgs tanto para os dados magnéticos/gravimétricos como para quantificação de valores como a suscetibilidade, magnetização, indução magnética e intensidade do campo magnético (GM – SYS, 2000). Nesse estudo optou-se pelo uso do sistema SI (*Lê Système International d'Unitès*) para todos os dados obtidos nos levantamentos. Esse sistema foi escolhido por ser citado pela maior parte da literatura internacional.

## **7.2 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS GERADOS - PARÂMETROS DE SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E DE DENSIDADE**

Para os modelos gravimétrico/magnetométrico propostos nos itens a seguir, procurou-se atender os seguintes requisitos: (1) feições estruturais e geológicas correspondam de forma real à área estudada, (2) os parâmetros físicos das estruturas e das feições geológicas correspondam de forma coerente com o perfil geológico adotado, portanto, os dados observados das leituras processadas em trabalhos de campo devem ser ajustados da melhor forma aos dados calculados pelo modelo matemático.

Os modelos gerados e apresentados neste estudo, foram construídos com base no conhecimento geológico/estrutural da região e maiores detalhes sobre sua elaboração encontram-se no item Discussão do Capítulo 8.

Tendo-se como base os mapas gravimétricos e magnetométricos obtidos, sua compartimentação, anomalias e principais lineamentos detectados, foram elaborados neste capítulo as respectivas modelagens gravimétricas/magnetométricas em dois setores principais (explanados com maior detalhe no item 7.3); a) Setor Pitanga e Artemis (Pta/Art) e, b) Setor Pau D'Alho e Jibóia (PD/Jb).

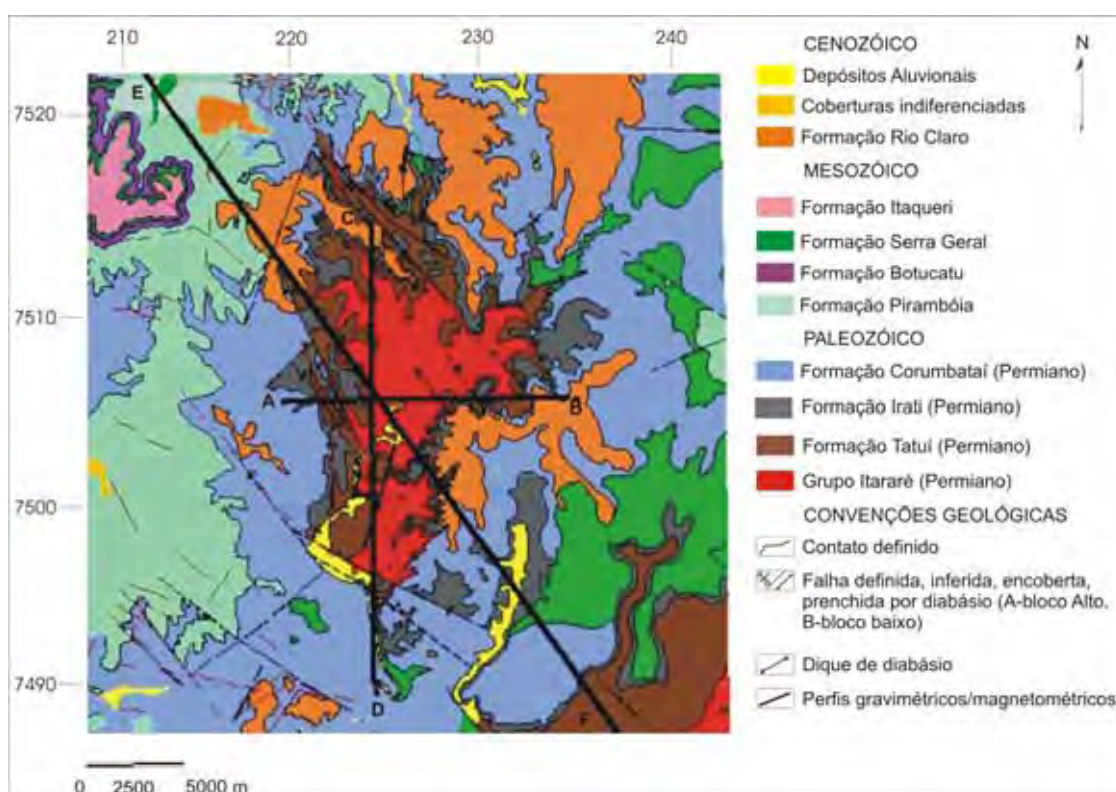
### **7.2.1 Setor Pitanga e Artemis**

Para este setor identificado, dois perfis geológicos principais, A – B e C – D, de maior detalhe, foram elaborados sobre a região do Alto Estrutural de Pitanga e de Artemis (Figura 7.2). A escolha desses perfis tem como objetivo a delimitação das estruturas tanto em superfície como em profundidade. Esses perfis têm como base o mapa geológico/estrutural detalhado da região elaborado por Sousa (2002). Para esses perfis de caráter local, foram feitos para efeito comparativo, a modelagem com os dados gravimétricos e magnetométricos (Figuras 7.4 e 7.6).

Para efeito de avaliação do comportamento regional das anomalias gravimétricas e magnetométricas observadas, um modelo mais extenso E – F foi traçado ao longo da área (Figura 7.7). Este perfil em decorrência da sua extensão não apresenta seção geológica anexa e tem a finalidade de evidenciar o comportamento do embasamento/sedimentos ao longo da área, ou seja, uma

visualização regional e mais abrangente da região circundante ao Alto Estrutural de Pitanga. Para esse perfil foi feito também uma modelagem somente com os valores observados da anomalia Bouguer submetidos à filtragem passa – banda (valores de altas profundidades) observada na Figura 7.8.

As seções geológicas de menor extensão, A – B e C – D (Figuras 7.3 e 7.5), que são apresentadas conjuntamente com os modelos elaborados no programa GM – SYS a partir dos dados gravimétricos e magnetométricos observados, serviram como um importante referencial das características de variações geológico/estruturais existentes ao longo do perfil escolhido.



**Figura 7.2** Mapa geológico detalhado da área dos altos estruturais de Pitanga e Artemis com os principais lineamentos, limites das estruturas e perfis geofísicos adotados para a modelagem deste estudo (modificado de Sousa, 2002).



Na elaboração dos modelos foram utilizados os parâmetros de suscetibilidade magnética e de densidade da Tabela 7.1, levando-se em considerações alguns valores médios para as principais rochas de acordo com Telford et al. (1990):

**Tabela 7.1** Valores de suscetibilidade magnética e de densidade usados na modelagem geofísica baseados nos valores de Telford et al. (1990).

Rochas	Suscetibilidade magnética x 10 <sup>3</sup> (SI)	Densidade kg/m <sup>3</sup>
Sedimentos	0.4	2.400
Rochas Básicas	5.0	2.850
Embasamento	2.0	2.670
Crosta superior	-	2.850
Crosta inferior	-	2.850
Manto	-	4.000

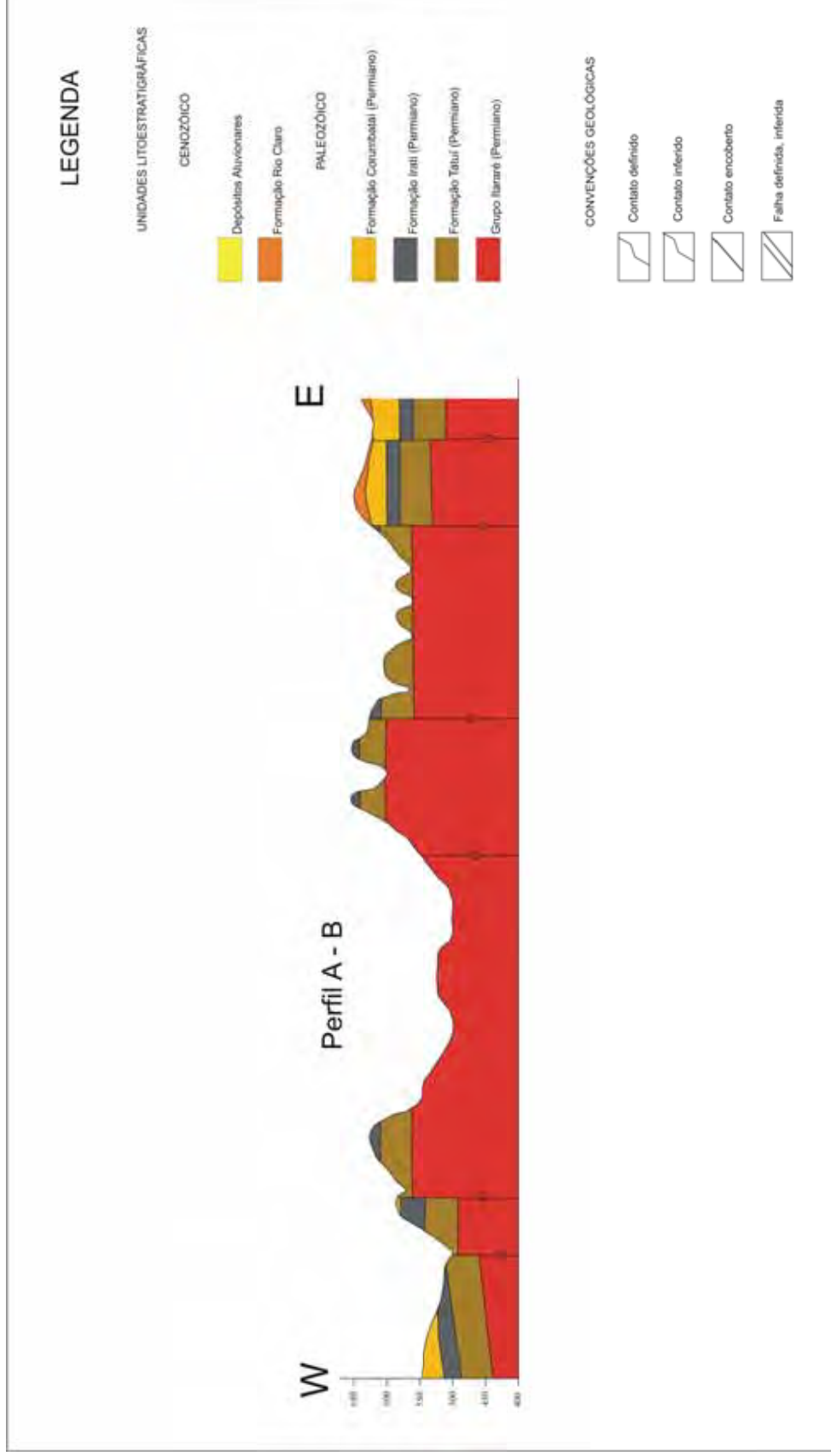
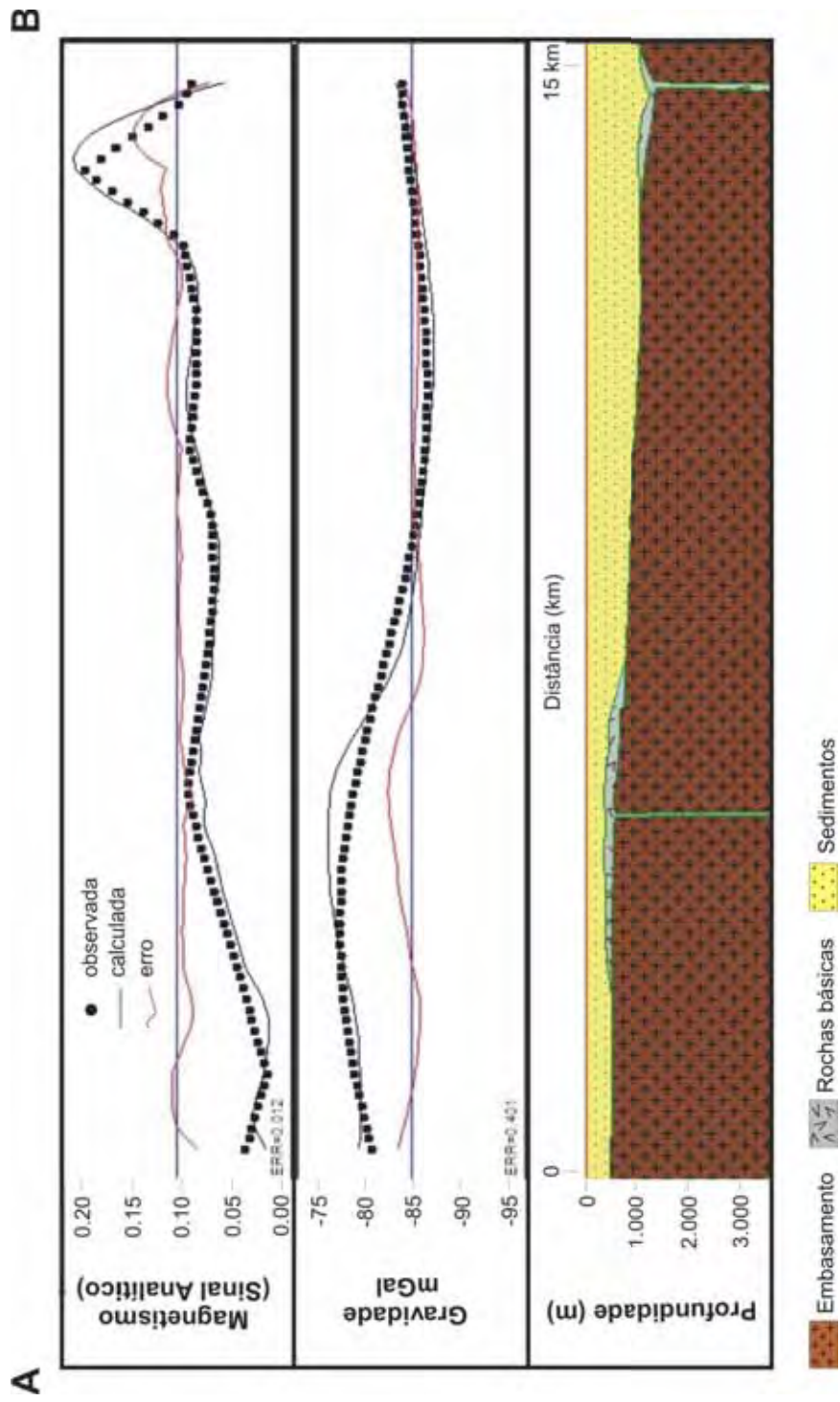


Fig 7.3 Seção geológica A – B com direção E –W usada na construção do modelo gravimétrico/magnetométrico A -B



**Fig 7.4** Modelo gravimétrico/magnético A – B. Os pontos representam os valores observados no campo e a linha contínua a curva calculada.

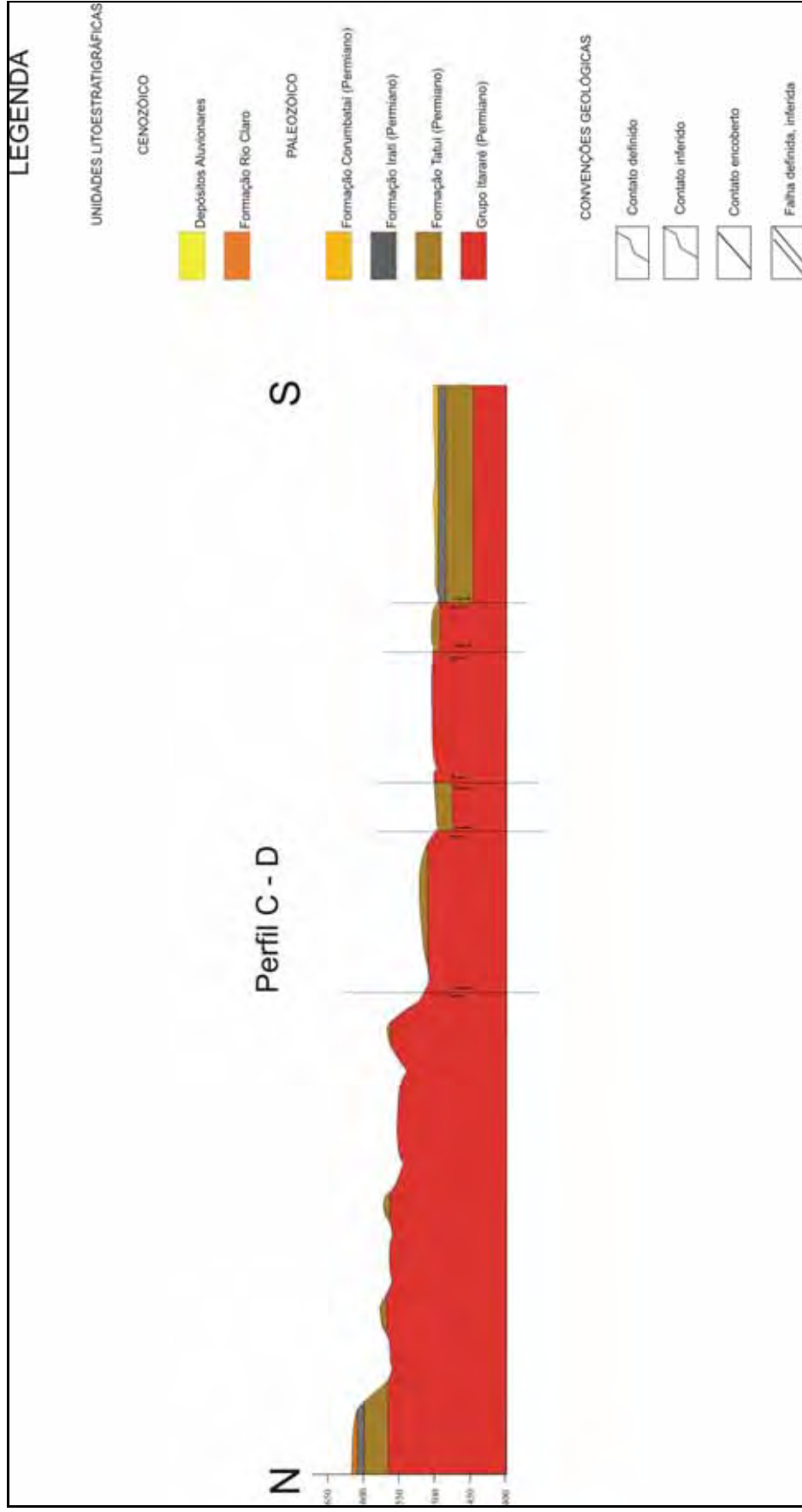
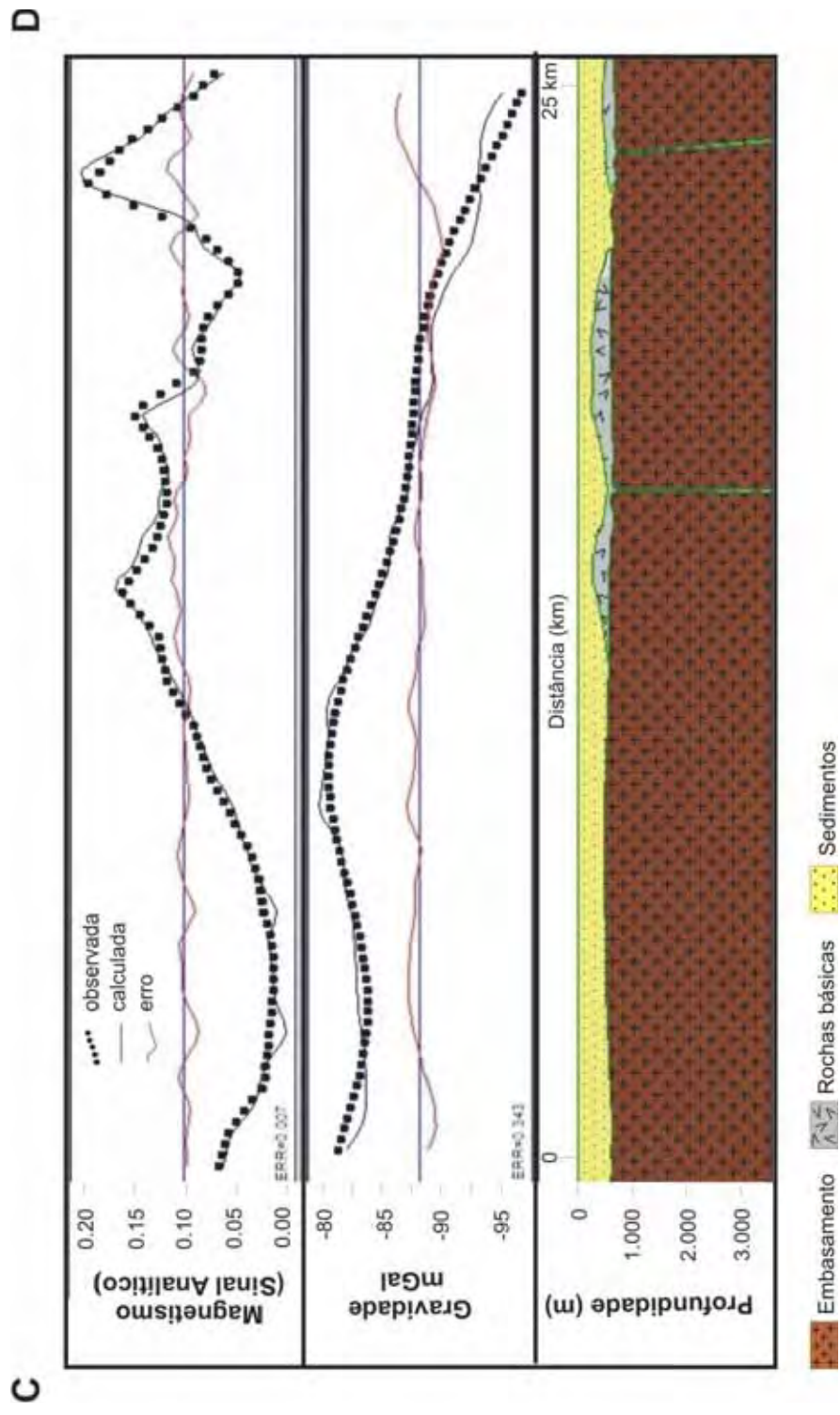
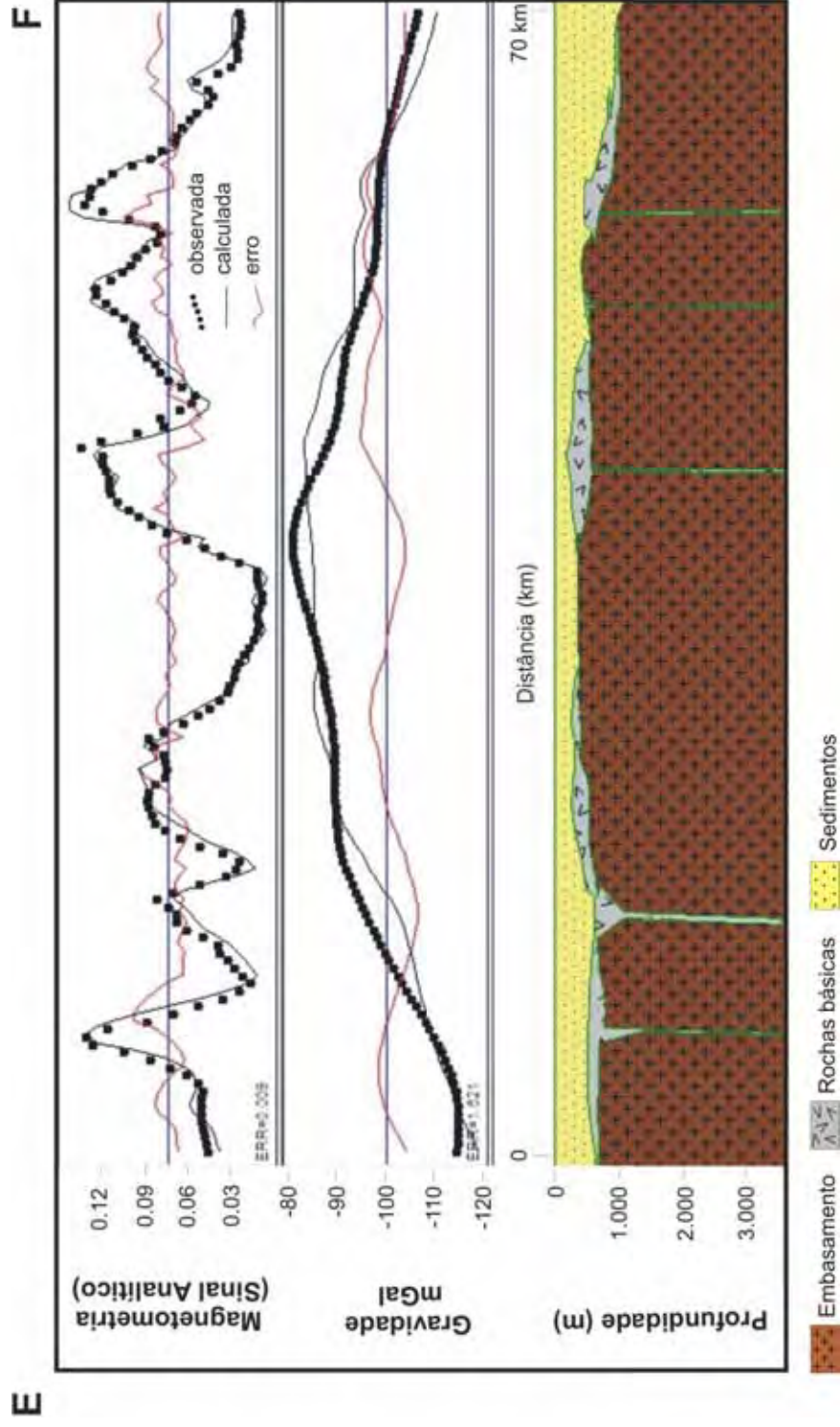


Fig 7.5 Seção geológica C – D com direção N –S usada na construção do modelo C - D.

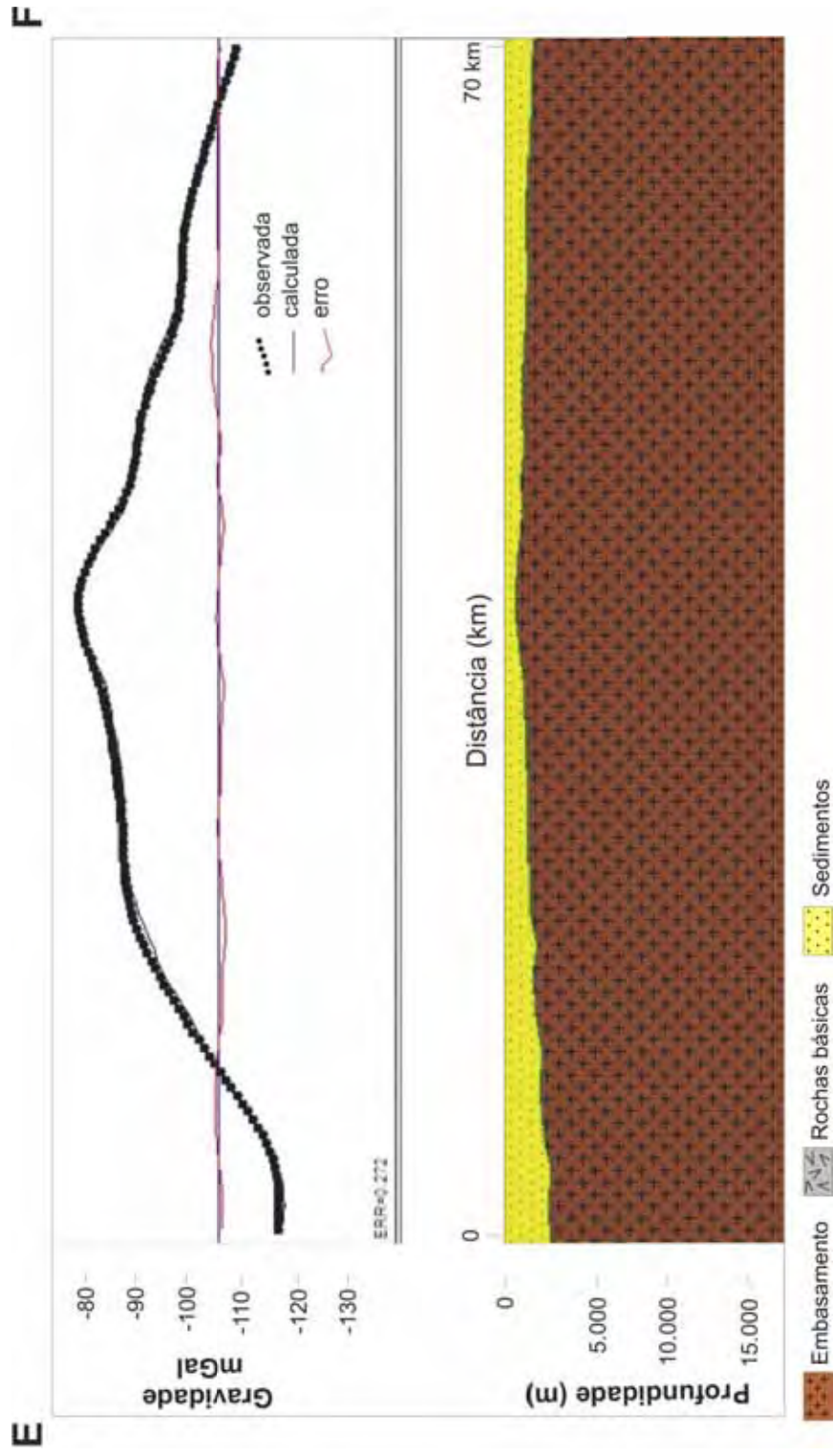


**Fig 7.6** Modelo gravimétrico/magnético C – D. Os pontos representam os valores observados no campo e a linha continua a curva calculada.



**Fig 7.7** Modelo gravimétrico/magnetométrico E – F com direção NW/SE. Os pontos representam os valores observados no campo e a linha continua a curva calculada.



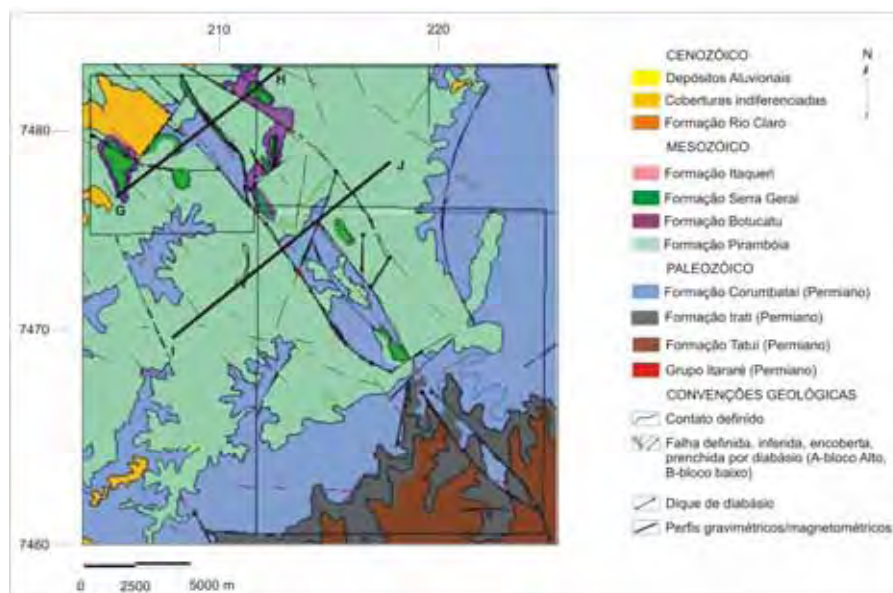


**Figura 7.8** Modelo gravimétrico com os dados de altas profundidades da anomalia Bouguer filtrados por filtro passa-banda. Os pontos representam os valores observados no campo e a linha continua a curva calculada.

## 7.2.2 Setor Pau D'Alho e Jibóia

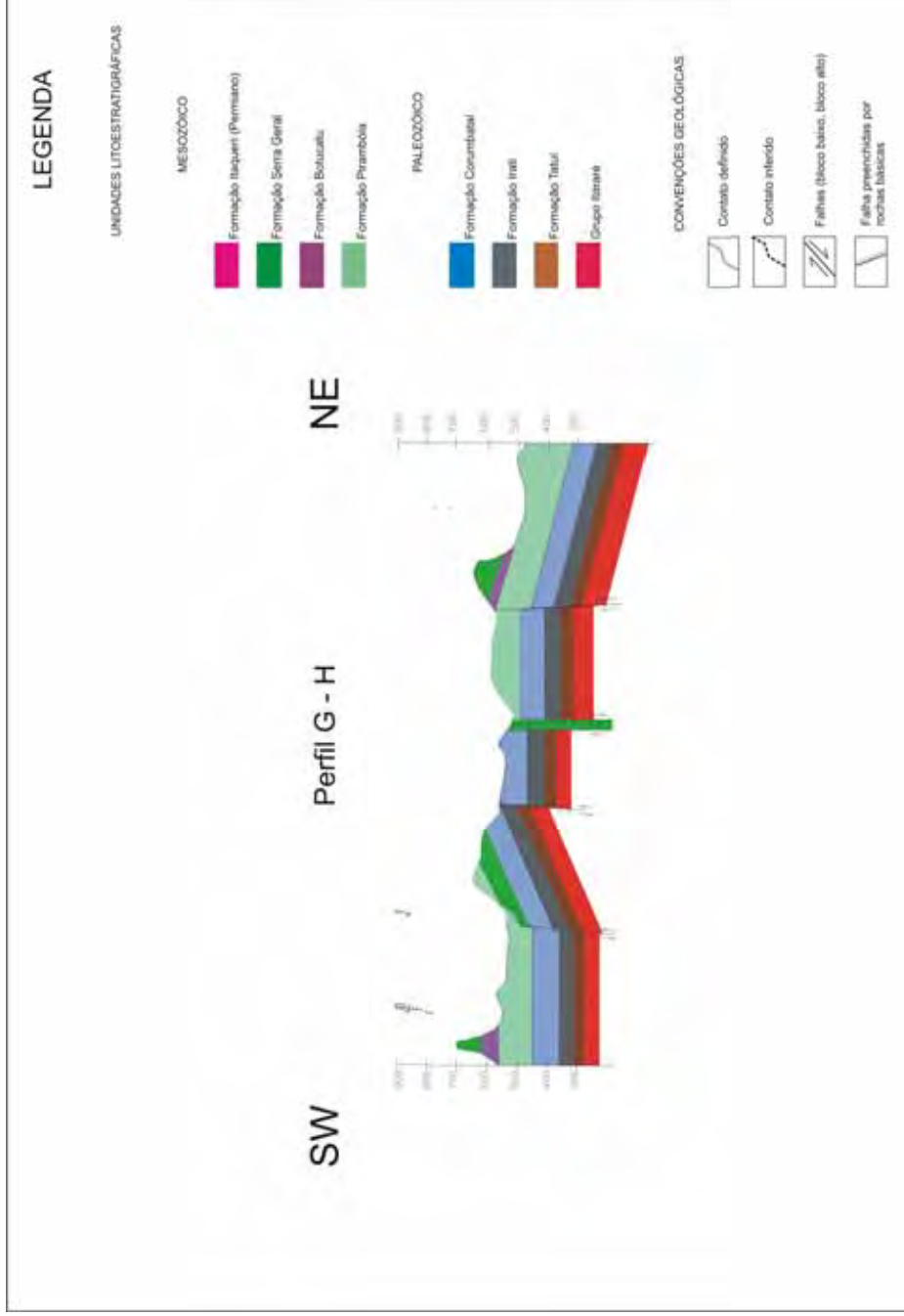
Para este setor, dois perfis geológicos de superfície G – H e I – J foram traçados sobre a região dos Altos Estruturais de Pau D'Alho e Jibóia segundo a Figura 7.9. A escolha desses dois perfis foi feita com base na estruturação apresentada nos mapas gerados e tem como objetivo a delimitação das estruturas tanto em superfície como em profundidade. Esses perfis (Figuras 7.10 e 7.12) foram elaborados tendo como base o mapa geológico/estrutural detalhado da região elaborado por Sousa (2002).

A seguir foi elaborada a modelagem gravimétrica/magnetométrica dos mesmos perfis G- H e I – J, com a finalidade de evidenciar o comportamento dos altos estruturais assim como sua articulação e compartimentação com o embasamento/sedimentos ao longo da área. Em decorrência da pequena estruturação evidenciada nos mapas geofísicos gravimétricos e magnetométricos, foi possível uma modelagem, somente através dos valores apresentados das anomalias Bouguer e de sinal analítico do campo magnético total, tanto para o perfil G – H como para o I – J (Figuras 7.11 e 7.13).

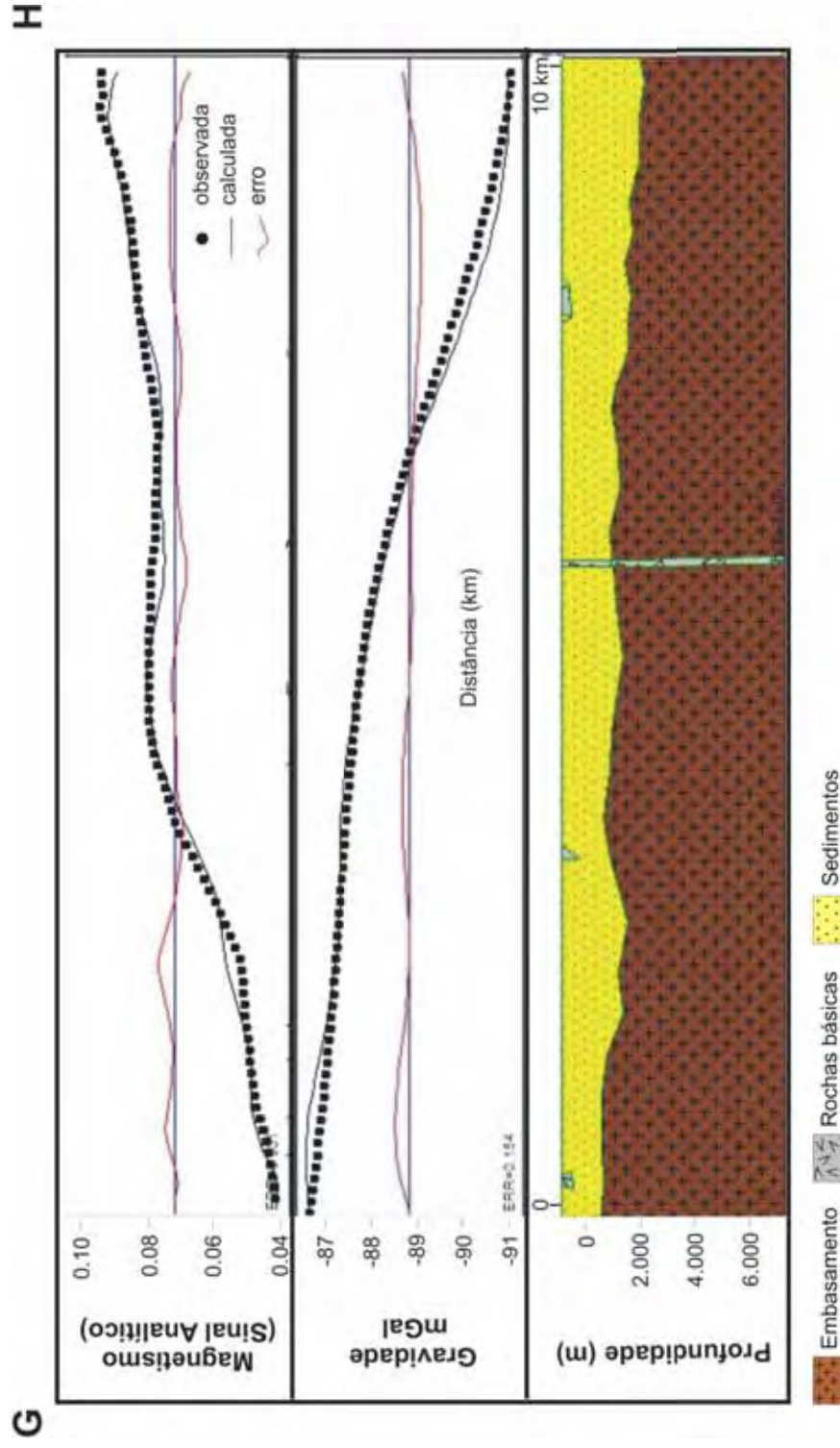


**Figura 7.9** Mapa geológico detalhado da área dos altos estruturais de Pau D'Alho e Jibóia, principais lineamentos, limites das estruturas e perfis geofísicos adotados para a modelagem deste estudo (modificado de Sousa, 2002).

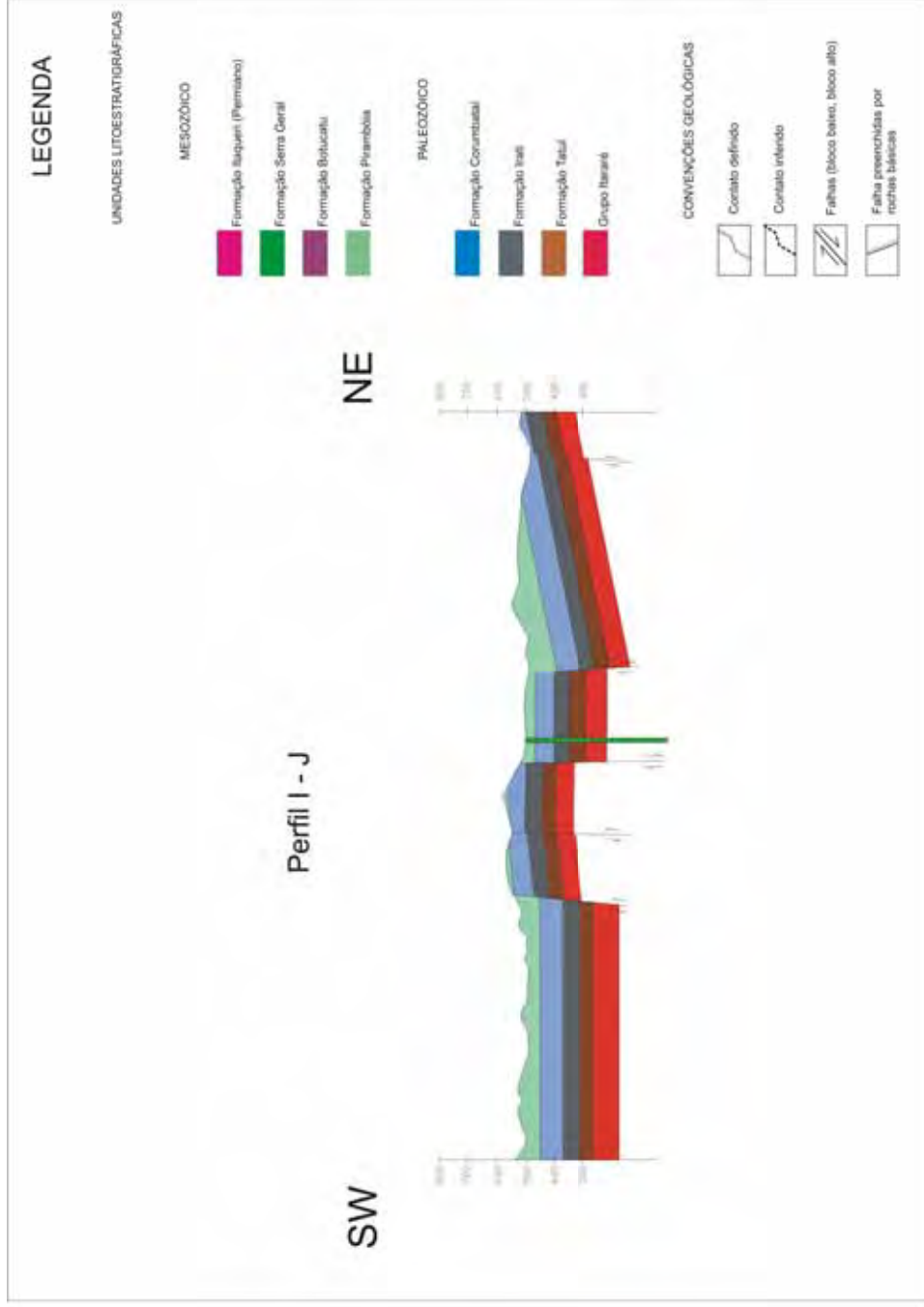




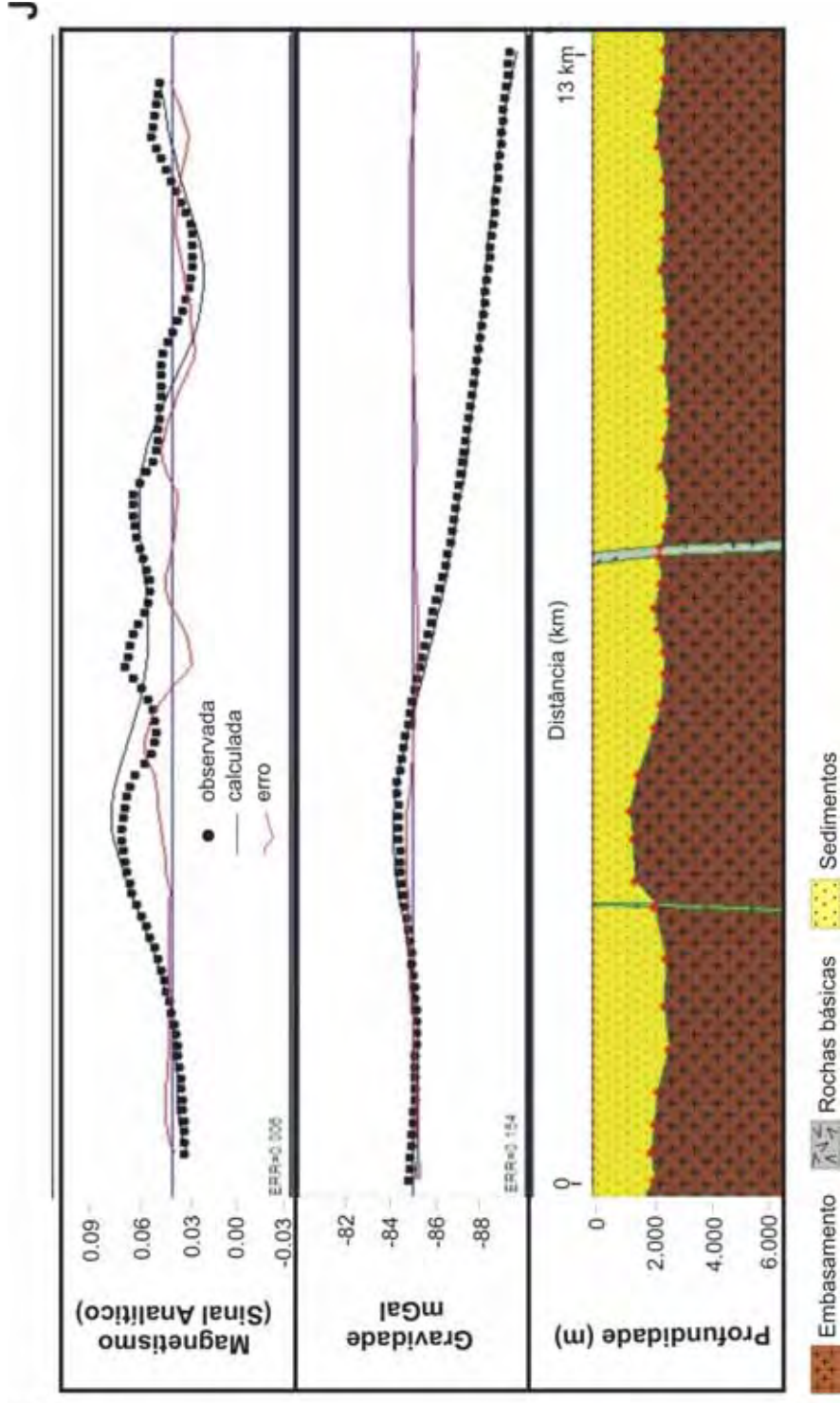
**Fig 7.10** Seção geológica G – H com direção SW – NE usada na construção do modelo gravimétrico/magnetométrico G - H.



**Figura 7.11** Modelo gravimétrico/magnetométrico com os dados das anomalias Bouguer e de sinal analítico. Os pontos representam os valores observados no campo e a linha continua a curva calculada.



**Fig 7.12** Seção geológica I – J com direção SW – NE usada na construção do modelo gravimétrico/magnetométrico I - J.



**Figura 7.13** Modelo gravimétrico/magnetométrico com os dados das anomalias Bouguer e de sinal analítico. Os pontos representam os valores observados no campo e a linha continua a curva calculada.

### **7.2.3 Parâmetros de profundidades e limites sedimentos/embasamento usados na modelagem geofísica**

Os modelos elaborados apoiaram-se primordialmente nos conceitos geológicos e estruturais mais recentes da área (Riccomini, 1992, Sousa, 1997 e Sousa, 2002). Além desse estudo foram utilizadas na modelagem informações geofísicas oriundas de outros dois relatórios de trabalhos que quantificaram parâmetros físicos na área do estudo cujos resultados podem ser assim sintetizados:

#### **a) Dados de sismicidade obtidos pela UNESP**

Dados de ondas sísmicas que atravessam toda a Terra podem ser estudados através da propagação das mesmas. Constitui, desta maneira, uma fonte importante no estudo da estrutura interna da Terra. Com esse objetivo, um projeto denominado de “Estruturação crustal da borda leste da Bacia do Paraná através da sismologia” foi realizado pelo Departamento de Geologia Aplicada do IGCE – UNESP de 2001 a 2004 – financiado pela FAPESP.

Para a realização deste estudo foi implantada uma estação sismológica permanente (RCLB) e duas temporárias. O principal objetivo deste estudo foi fornecer informações sobre a estrutura da crosta na região em que a estação se situa. Os dados sismológicos citados neste estudo compreendem o período entre outubro de 2002 e abril de 2004 e a principal técnica utilizada é denominada de técnica sismológica da função do receptor, que utiliza distâncias epicentrais entre  $18^{\circ}$  e  $94^{\circ}$  e valores de magnitudes acima de 5 (DOURADO, 2004).

Foi determinada uma profundidade média de 42 km para Moho com um desvio padrão de 1,86 km. Foi usado um modelo da crosta com velocidades médias de propagação das ondas P no valor de 6,5 km/s e velocidades para as ondas S como valor médio de 3,75 km/s. De acordo com Dourado (*op. cit*), na análise azimutal, foi usado um modelo de 3 camadas para a crosta mais a cobertura sedimentar da Bacia do Paraná estimada em 1 km. Esta análise mostrou que a profundidade desta interface varia no mínimo de cerca de 38 km para SW e de 43 km para o azimute N  $168^{\circ}$ . A diminuição de profundidade para SW, associada à análise de FR tangencial que mostra um mergulho NE, parece indicar que o alto estrutural de Pitanga teve origem em fenômenos profundos, que afetaram inclusive a

interface crosta – manto. Esta mesma análise azimutal indicou um espessamento dos sedimentos da Bacia para oeste, indicando possíveis regiões em que a espessura dos sedimentos ultrapassa 1 km.

#### **b) Dados geofísicos anteriores obtidos pelo IPT**

Muitos estudos realizados na Bacia Sedimentar do Paraná argumentam que o pacote de rochas sedimentar e vulcânico, representa a superposição de diferentes bacias (ALMEIDA, 1980; ZALÁN et al., 1987 e ZALÁN et al., 1990). As maiores profundidades no centro da bacia podem chegar a 8.000 metros e na região nordeste da bacia, segundo mapas de isópacas (Milani et al., 1998), as profundidades são de 1.000 a 2.000 metros.

Em um estudo geofísico executado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 1980), foi realizado um levantamento geofísico na área situada na região de São Pedro e Piracicaba. Foram executadas sondagens elétricas verticais e um levantamento magnetométrico terrestre ao longo das principais vias de acesso.

O principal objetivo desse projeto foi de subsidiar estudos geológicos desenvolvidos pela então PAULIPETRO em áreas da Bacia Sedimentar do Paraná, no denominado Bloco 47A. Esse estudo visou principalmente à definição do comportamento do embasamento cristalino e o provimento de informações acerca das camadas rochosas sedimentares sobrepostas.

Com base nos resultados de sondagens elétricas verticais profundas, foi elaborado um mapa de isópacas que mostra variações das unidades estratigráficas que recobrem o cristalino. A cobertura sedimentar apresenta uma espessura média de 1.000 metros nas proximidades das cidades de Piracicaba e São Pedro. Na área que se prolonga de Charqueada até o Rio Piracicaba as espessuras desta cobertura chegam a atingir 1.472 metros.

Para a superfície do embasamento, calculada a partir de sondagens elétricas verticais, a configuração é semelhante ao mapa de isópacas dos sedimentos. As áreas mais altas do embasamento cristalino, da ordem de 500 metros de profundidade, situam-se nas proximidades de Piracicaba e São Pedro e as áreas mais baixas na região, atingindo 952 metros de profundidade, que se estende da cidade de Charqueada até o Rio Piracicaba.

Na aquisição magnetométrica, foi necessário separar as anomalias regionais provenientes do embasamento cristalino das anomalias locais oriundas de diques e *sills* de diabásio abundantes na área. O mapa magnetométrico de campo total apresenta anomalias, mas é muito difícil perceber continuidades que caracterizam eixos anômalos. Em dados residuais gerados em superfície de tendência de grau 8, foram evidenciados dois sistemas de orientações principais; um mais extenso e com melhor definição NE e outro NW.

Os alinhamentos magnetométricos presentes na região são diretamente relacionados à grande quantidade dos corpos intrusivos de diabásio. Portanto, uma anomalia presente no embasamento cristalino com 1.000 metros de cobertura dificilmente seria detectada, a menos que tal anomalia fosse muito intensa.

### **7.3 ANÁLISE DOS DADOS GEOFÍSICOS OBTIDOS E CORRELAÇÃO COM AS INFORMAÇÕES GEOLÓGICAS E ESTRUTURAIS DE SUPERFÍCIE**

#### **7.3.1 Mapas gravimétricos e magnetométricos**

Para os mapas gravimétricos de isovalores gerados; a) anomalia Bouguer, b) *free-air*, e c) filtragem passa-banda (valores de alta profundidade), são observáveis anomalias gravimétricas ou gradientes horizontais elevados da ordem de 10 até 20 mGal. Dividindo-se os mapas em quadrantes, podemos relacionar essas anomalias distribuídas especialmente nos quadrantes NE e SW.

Essas anomalias, ao se analisar o mapa da anomalia Bouguer e de filtragem passa-banda com dados de profundidade, possuem um padrão não linear, centralizado e homogêneo. É possível interpretá-las como resultantes de fontes mais profundas relacionadas ao embasamento e à interface crosta inferior/manto superior. Essa interpretação é possível, pois não há uma mudança significativa dessas feições quando comparados os mapas dos valores da anomalia Bouguer e de filtragem passa-banda. Existe também, uma diferença não muito significativa entre os valores da anomalia Bouguer (geometria das anomalias) e os dados filtrados com os valores de corte estabelecidos pelo espectro de potência dos dados aplicado ao domínio de tempo pelo sistema da transformada rápida de *Fourier*.

Para os valores da anomalia Bouguer foram criados domínios que permitem a interpretação de acordo com os gradientes horizontais apresentados no mapa Bouguer.

Para os domínios gravimétricos interpretados mais a frente, há valores anômalos de gradiente horizontal denominados de baixos, médios e altos. São relatados os seguintes valores para cada domínio:

- Domínio de altos valores anômalos: - 70 a - 90 mGal
- Domínio de médios valores anômalos – 96 a – 90 mGal
- Domínio de baixos valores anômalos: - 120 a – 96 mGal

Para os mapas magnetométricos de isovalores gerados; a) de campo magnético anômalo total, b) de campo magnético anômalo total submetido à filtragem passa-banda, e c) mapa dos valores do sinal analítico, é possível uma interpretação referente à presença da alta estruturação na área, em especial na região circunvizinha ao alto estrutural de Pitanga e Artemis. Se divididos os mapas em quadrantes, são observadas anomalias concentradas principalmente na porção central e nos quadrantes NE e NW para todos os mapas gerados.

A porção central da área apresenta no mapa dos valores magnetométricos de campo total, uma anomalia extensa com alto gradiente horizontal e variação da ordem de 260 nT (22.854 a 23.114 nT). Essa feição possui uma forma arredondada e homogênea, sem anomalias difusas espalhadas e encontra-se localizada na região dos altos de Pitanga e Artemis. Circundando essa feição, uma outra anomalia significativa pode ser observada, em forma de uma ferradura e que circunda essa anomalia.

De forma semelhante, o mapa com os valores anômalos de sinal analítico gerado, possui anomalias significativas concentradas nesta região centro-NE/SW do mapa. Como essas anomalias possuem uma característica mais pontual, e também em virtude dos valores de sinal analítico salientarem os corpos com alto contraste lateral de suscetibilidade magnética (intrusivas básicas da Formação Serra Geral), existe uma relação direta com a estruturação da região e também, as falhas e fraturas que compõem o arcabouço geológico e estrutural.

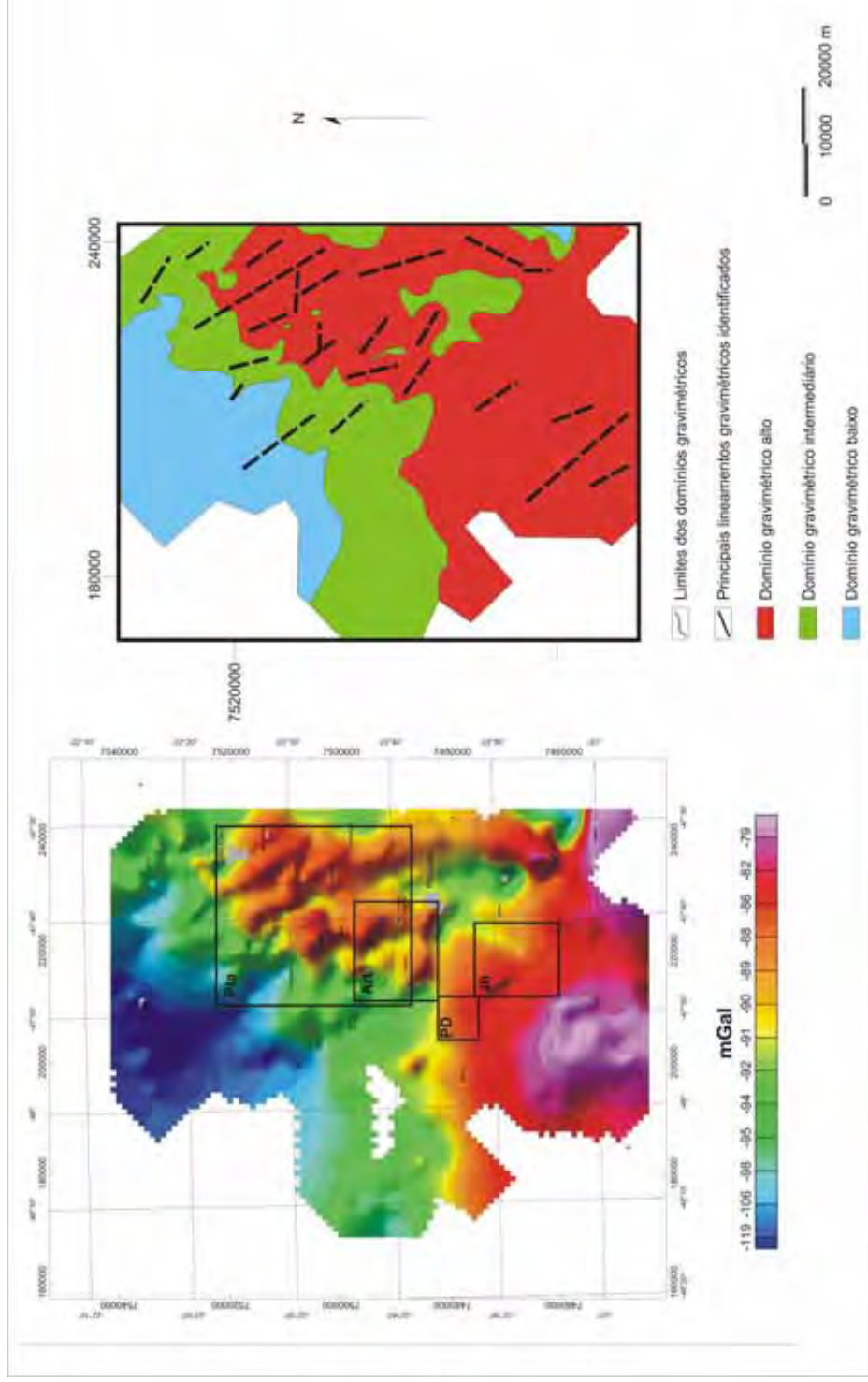


Para os domínios magnetométricos interpretados e apresentados mais a frente, há valores anômalos de gradiente horizontal denominados de baixos, médios e altos. Para cada um, são relatados os seguintes valores:

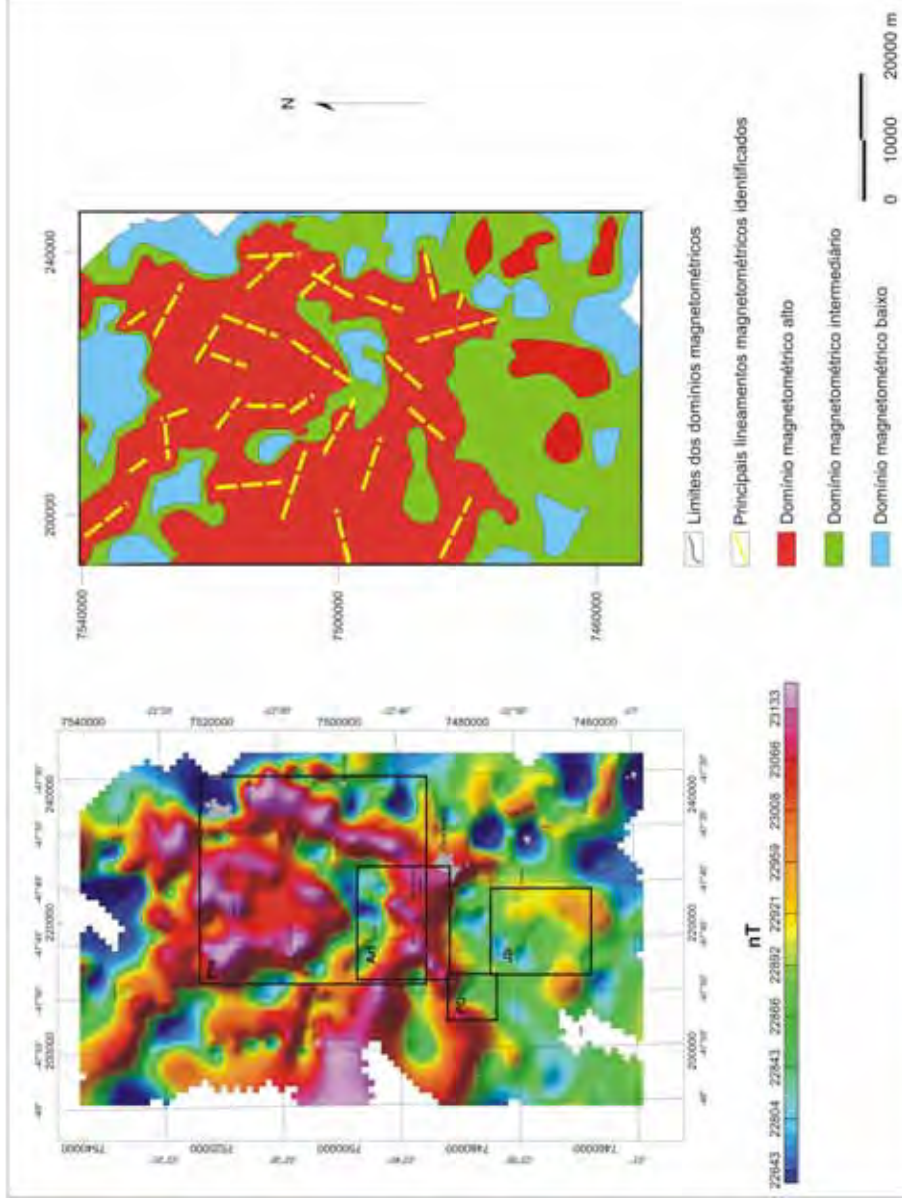
- Domínio de altos valores anômalos: 22900 a 23120 nT
- Domínio de médios valores anômalos: 22840 a 22900 nT
- Domínio de baixos valores anômalos: 22640 a 22840 nT

Para os resultados geofísicos obtidos, os mapas gerados e as respectivas anomalias detectadas, foram determinados e traçados domínios tendo como base as maiores anomalias gravimétricas/magnetométricas (altos gradientes horizontais) apresentadas. Conjuntamente foram traçados os principais lineamentos identificados. Desta maneira, a fim de facilitar uma análise mais detalhada dos resultados, esses domínios são apresentados primeiramente em mapas gravimétricos e magnetométricos de toda região onde se efetuou o levantamento através dos seguintes mapas:

- a) Mapa gravimétrico, respectivos domínios gravimétricos e lineamentos traçados para a área estudada (Figura 7.14).
- b) Mapas magnetométricos, respectivos domínios magnetométricos e lineamentos traçados para a área estudada (Figura 7.15).



**Figura 7.14** Mapa dos principais domínios e lineamentos gravimétricos observados na área estudada. Retângulos delimitam a área dos altos estruturais de Pitanga (Pta), Artemis (Art), Pau D' Alho (PD) e Jibóia (Jb).



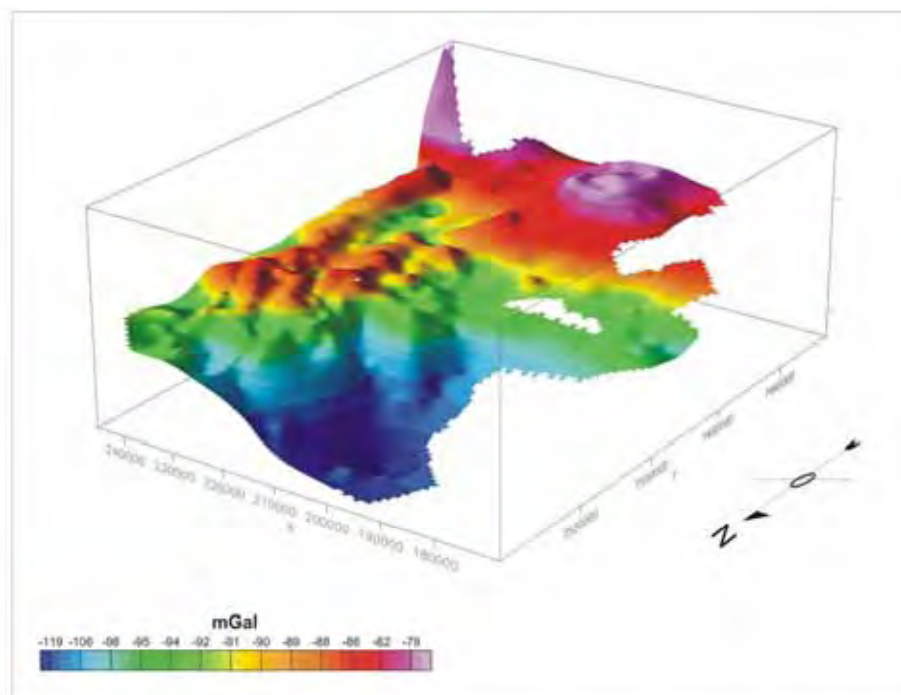
**Figura 7.15** Mapa dos principais domínios e lineamentos magnetométricos observados na área estudada. Retângulos delimitam a área dos altos estruturais de Pitanga (Pta), Artemis (Art), Pau D' Alho (PD) e Jibóia (Jb).

A partir dos mapas gravimétricos e magnetométricos com os respectivos domínios e lineamentos identificados e traçados, reconheceu-se uma significativa estruturação com padrões e lineamentos diferentes em áreas distintas. Em especial, na região do Alto Estrutural de Pitanga e de Artemis. Em razão dessa grande presença de anomalias e feições identificadas nessa área de acordo com o apresentado nas Figuras 7.16 e 7.17, e a fim de proporcionar uma melhor análise dos altos estruturais segundo a proposta inicial para esta tese, determinou-se a separação em duas regiões principais denominadas aqui de setores:

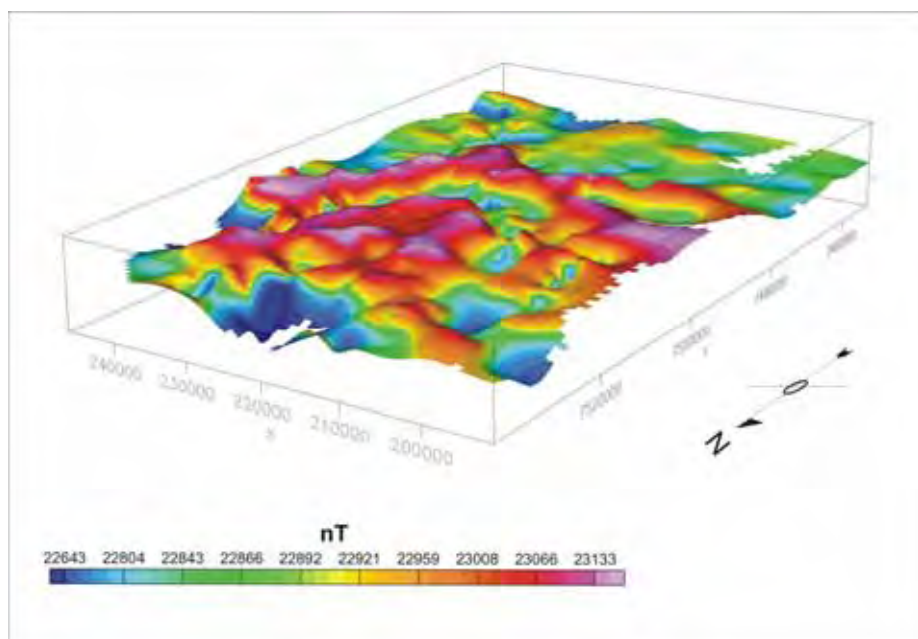
- Setor Pitanga Artemis: a) Mapa gravimétrico e magnetométrico, respectivos domínios gravimétricos e lineamentos traçados para a área dos altos Estruturais de Pitanga (Pta) e Artemis (Art).
- Setor Pau D' Alho e Jibóia – Mapa gravimétrico e magnetométrico, respectivos domínios magnetométricos e lineamentos traçados para a área dos altos Estruturais de Pau D' Alho (PD) e Jibóia (Jb).

### **7.3.2 Setor Pitanga e Artemis**

Foram traçados as principais feições e lineamentos observados no mapa com os dados da anomalia Bouguer (para os dados gravimétricos), de campo magnético total e de amplitude do sinal analítico (para os dados magnetométricos). Essas feições identificadas permitiram que domínios com os lineamentos gravimétricos/magnetométricos observáveis fossem criados. É necessário levar-se em conta que esses domínios e lineamentos são o resultado de respostas de fontes ou sinais de diferentes profundidades crustais. Alguns lineamentos são bem pronunciados e podem apresentar as características tanto dos corpos intrusivos (sinais mais rasos) como de lineamentos ou cicatrizes presentes no embasamento, em especial nos valores anômalos de gravimetria.



**Figura 7.16** Mapa gerado em 3D com os valores da anomalia Bouguer. É marcante a estruturação e a presença de anomalias na região do Alto Estrutural de Pitanga e Artemis.



**Figura 7.17** Mapa gerado em 3 D com os valores magnetométricos de campo total. É marcante a estruturação e presença de anomalias na região do Alto Estrutural de Pitanga e Artemis.

### **7.3.2.1 Setor Pitanga e Artemis; Mapa dos domínios gravimétricos e magnetométricos - principais lineamentos estruturais detectados**

Para efeito comparativo do comportamento das variações de densidade dos pacotes rochosos presentes na área de estudo e uma melhor análise, os contrastes de valores anômalos e estruturação foram aqui representados através de um mapa interpretativo gerado para esse propósito. Neste mapa foram traçados os principais domínios gravimétricos (altos, médios e baixos).

Os principais domínios são representados conjuntamente com os lineamentos reconhecidos e traçados no mapa para uma análise da compartimentação e do arcabouço estrutural os quais se encontram inseridas a estrutura de Pitanga e de Artemis. Uma visualização dos domínios gravimétricos traçados e dos dados geológicos/estruturais de superfície, possibilita maior detalhamento, identificação e precisão quanto a interpretação dos resultados, limites da estrutura e comportamento em superfície e profundidade das principais feições estruturais que compõem o setor do Domo de Pitanga e de Artemis (Figura 7.18) .

Para os mapas dos domínios magnetométricos gerados é necessário observar que, devido ao fato das unidades sedimentares presentes na área não apresentarem significativo contraste lateral, os sedimentos possuem valores de suscetibilidade magnética pouco contrastante entre si. Foram elaborados, portanto, para o setor Pitanga e Artemis localizados na área de soerguimento, dois mapas interpretativos a partir de respostas magnéticas diferentes (campo magnético anômalo reduzido do IGRF total e valores do sinal analítico dos valores magnéticos anômalos) conforme apresentados nas Figuras 7.19 e 7.20.

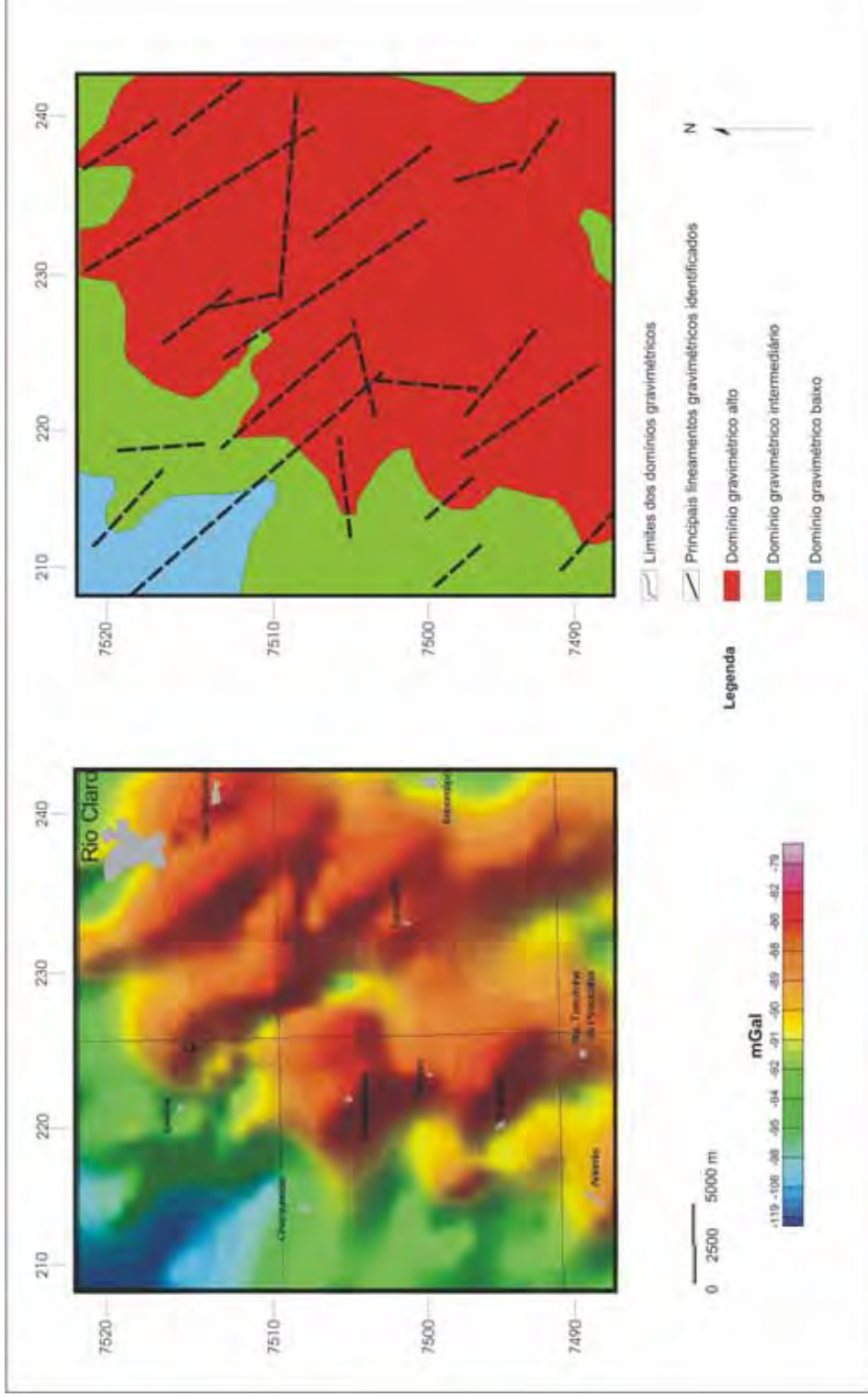
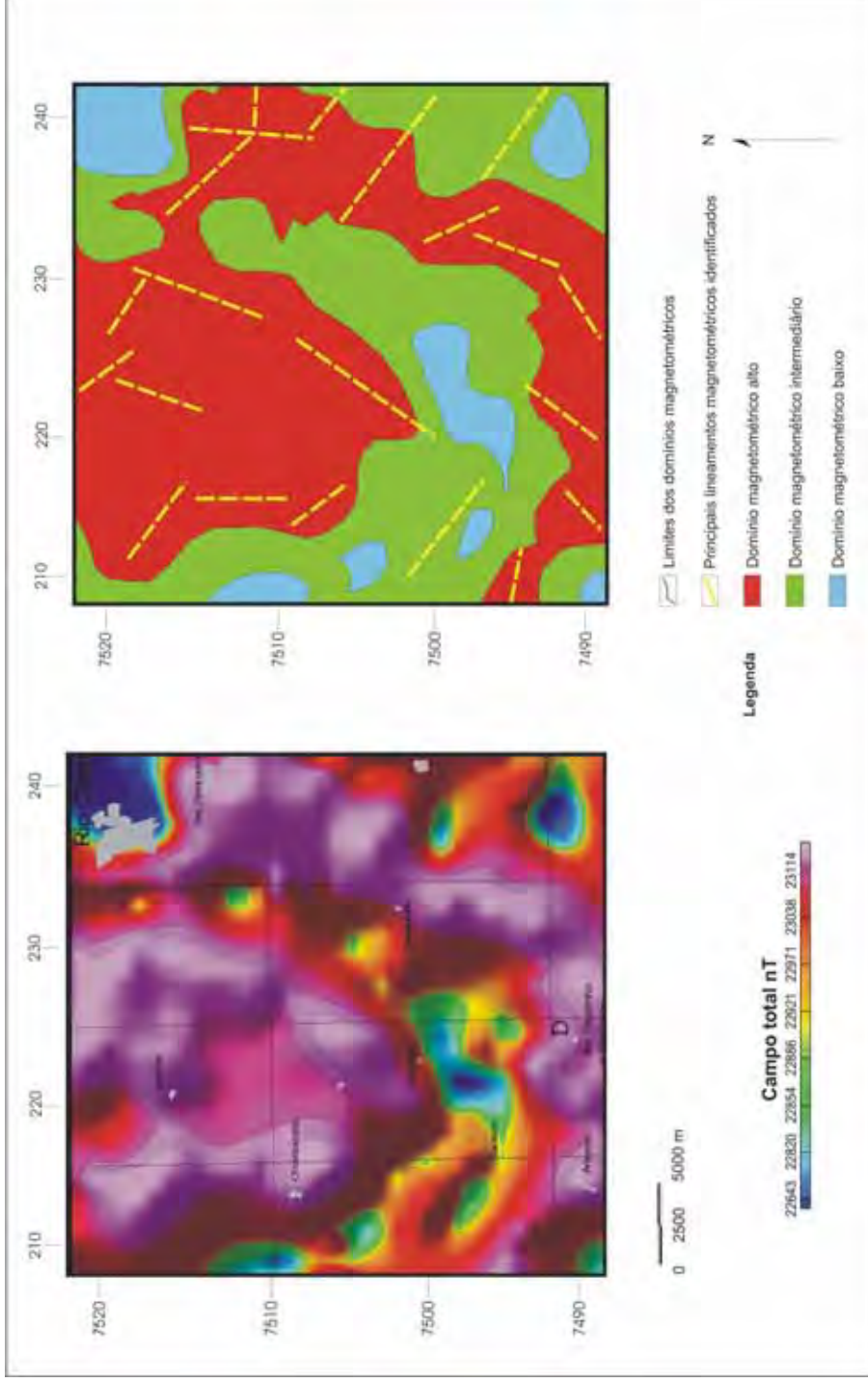


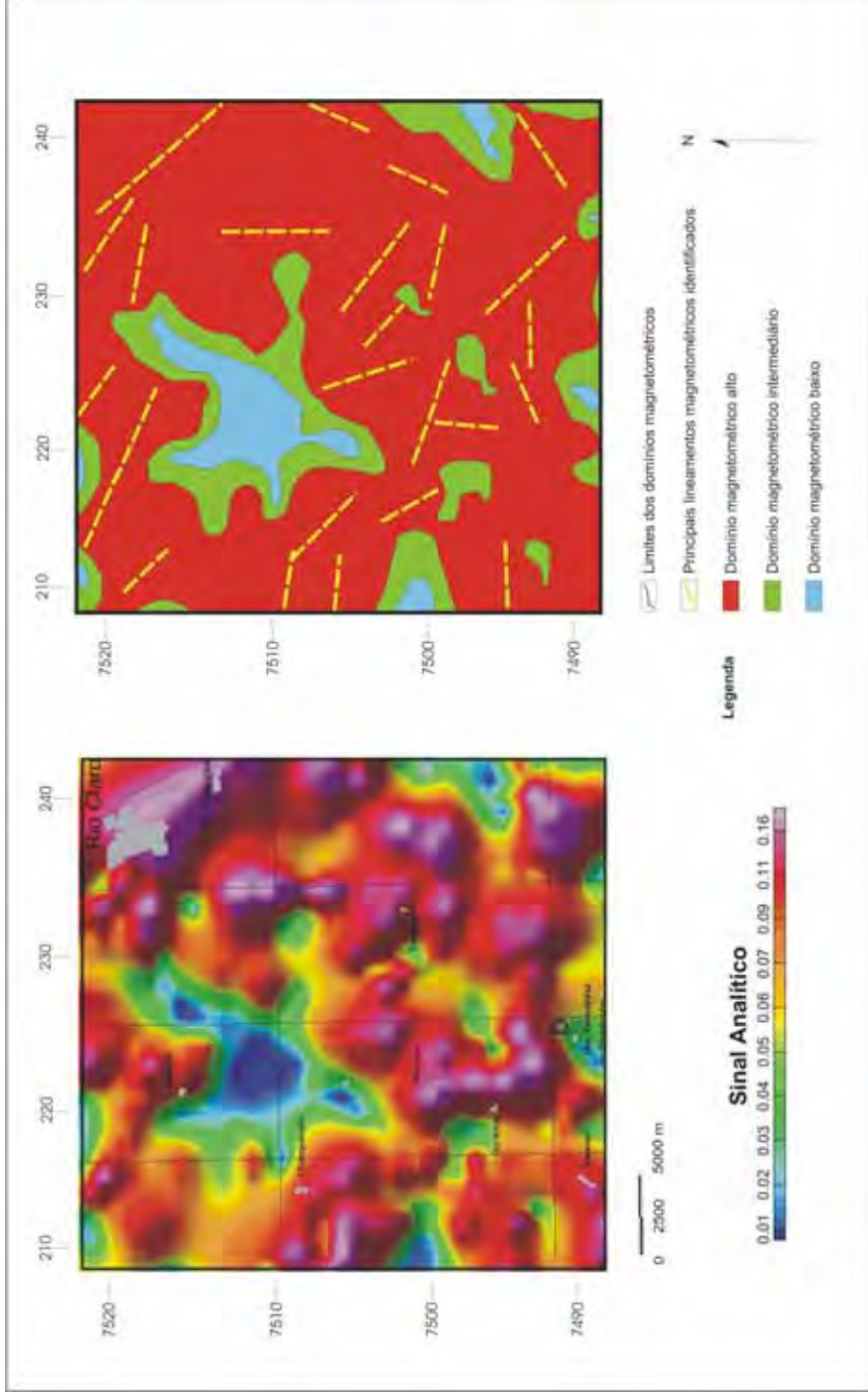
Figura 7.18 Principais domínios e lineamentos gravimétricos observados para a área dos altos estruturais de Pitanga e Artemis.





**Figura 7.19** Principais lineamentos e domínios magnetométricos reconhecidos para a área dos altos estruturais de Pitanga e Artemis.





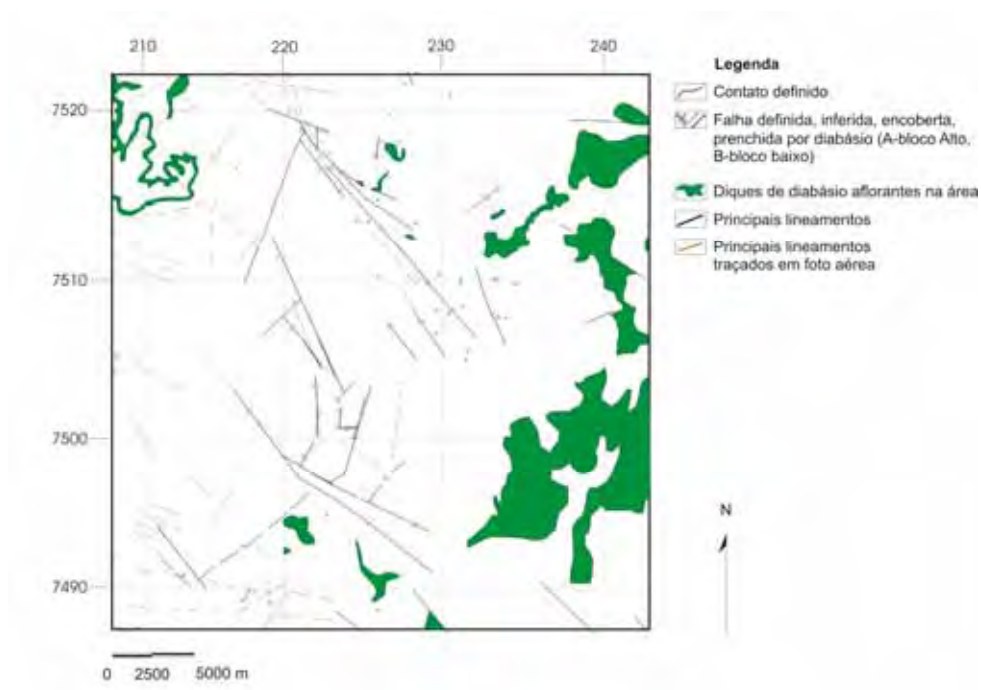
**Figura 7.20** Principais domínios e lineamentos magnetométricos (valores de sinal analítico) para os altos estruturais de Pitanga e Artemis.

Em outro mapa gerado para o setor Pitanga e Artemis foram inseridas apenas as principais ocorrências em superfície das rochas intrusivas básicas da Formação Serra Geral, as falhas e lineamentos identificados em superfície segundo Sousa (2002). Essas unidades litológicas presentes, apresentam significativo contraste lateral em superfície e sub-superfície para as respostas gravimétricas e magnetométricas da área (Figura 7.21).

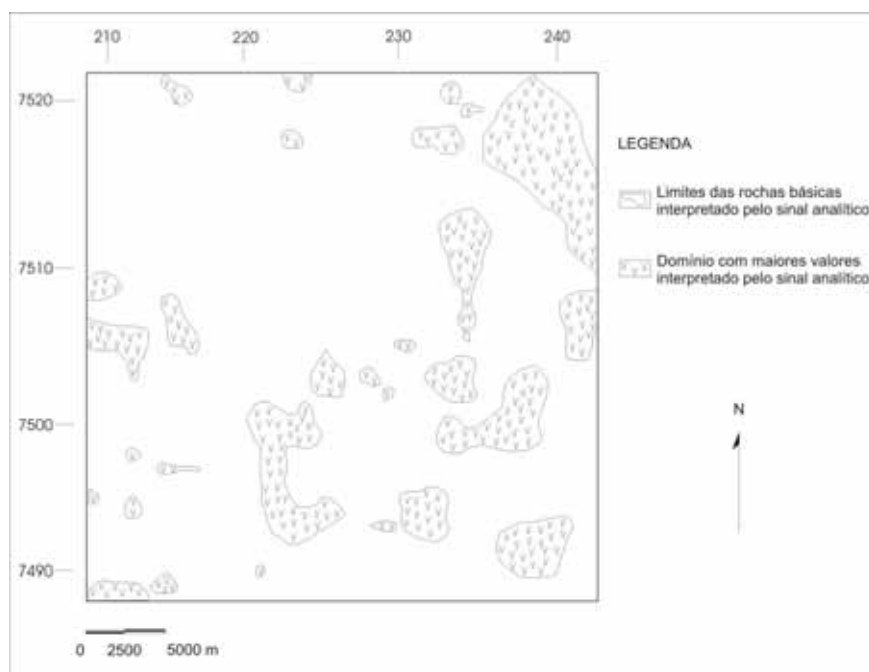
Para efeito comparativo na delimitação e análise mais detalhada dos limites dos corpos básicos aflorantes em superfície, um mapa em detalhe do setor Pitanga e Artemis, com os limites dos corpos básicos identificados e traçados através dos valores magnetométricos do sinal analítico foi gerado. Esse mapa permite uma melhor visualização e análise comparativa com os domínios gravimétricos/magnetométricos traçados neste estudo, assim como uma comparação mais coerente com os dados geológicos mapeados e reconhecidos em estudos geológicos e estruturais de superfície (Figura 7.22).

A visualização da distribuição dos principais lineamentos, dos contrastes gravimétricos e magnetométricos (anomalias) através da utilização de diferentes mapas interpretativos e integrados adotados neste estudo, possibilitam uma análise comparativa e qualitativa no que se refere à identificação dos diferentes domínios e unidades geofísicas detectadas, assim como também o reconhecimento mais preciso dos lineamentos identificados, de seus limites, e localização e delimitação ao serem comparados com os dados geológicos/estruturais mapeados em superfície.

Para efeito comparativo, partindo-se dos mapas de domínios e dos principais lineamentos gravimétricos e magnetométricos traçados e reconhecidos, é apresentado um mapa integrado de todos os dados estruturais de superfície como as principais falhas e os lineamentos extraídos de fotos aéreas e reconhecimento geológico de superfície segundo estudos de Sousa (2002) segundo a Figura 7.23.



**Figura 7.21** Mapa em detalhe da região do Domo de Pitanga e Artemis com os principais lineamentos em superfície e rochas básicas aflorantes (Extraído e modificado de Sousa, 2002).



**Figura 7.22** Mapa em detalhe da região do Domo de Pitanga e Artemis com as principais fontes anômalas (corpo básicos) identificadas pelo mapa de sinal analítico.



**Figura 7.23** Mapa integrado para a área dos altos estruturais de Pitanga e Artemis segundo os dados geofísicos e estruturais interpretados nas figuras anteriores.

### **7.3.3 Setor Pau D' Alho e Jibóia**

Para esses setores identificados, foram traçadas as principais feições e lineamentos observados no mapa com os dados da anomalia Bouguer (para os dados gravimétricos), de campo magnético total e de amplitude do sinal analítico (para os dados magnetométricos). É possível de se observar a ausência de anomalias e de uma marcante estruturação na área ao contrário do apresentado no Setor Pitanga e Artemis.

No caso do mapa de valores da anomalia Bouguer, as feições são pouco expressivas ou inexistentes, com exceção para a região extremo sul localizado próxima ao setor aqui citado. Ao contrário dos dados gravimétricos, é possível se observar à existência de feições para os mapas de valores magnetométricos e de sinal analítico conforme apresentado no mapa dos domínios magnetométricos de toda a área (item 7.3.1). Essas feições, são características da estruturação imposta pelas rochas básicas aflorantes ou em sub-superfície e que estão presentes nas falhas que delimitam as estruturas de Pau D' alho e de Jibóia. Mas, em menor número em comparação ao Setor Pitanga/Artemis analisado no item anterior.

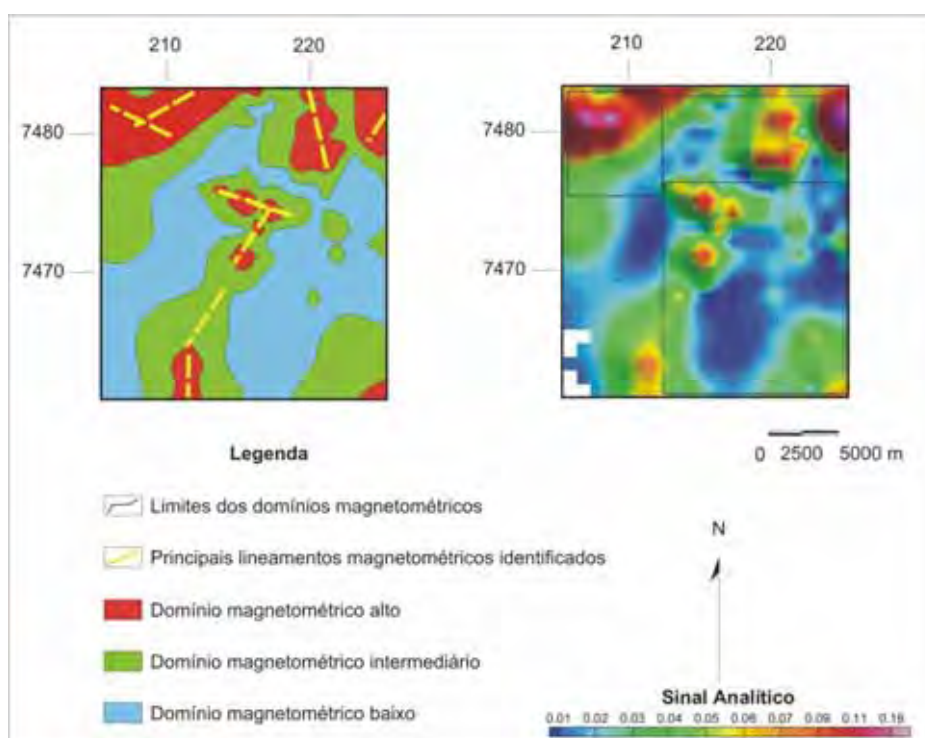
#### **7.3.2.1 Setor Pau D'Alho e Jibóia; Mapa dos domínios magnetométricos - principais lineamentos estruturais detectados**

Essas feições e padrões de lineamentos identificados, permitiram que domínios magnetométricos, com as anomalias observáveis fossem traçadas. É necessário levar-se em conta, para esse setor, que esses domínios e lineamentos são o resultado de respostas de fontes ou sinais de diferentes profundidades crustais. Para as anomalias gravimétricas não houve, significativa presença e variações quanto às anomalias ou lineamentos detectados no mapa da anomalia Bouguer.

Devido a essas características, foi gerado para esse setor um mapa dos principais lineamentos reconhecidos nas anomalias apresentadas somente para os dados magnetométricos de sinal analítico, gerados a partir dos dados magnetométricos de campo total e outro com a delimitação dos limites anômalos reconhecidos na magnetometria (Figura 7.24). Para comparação com essas

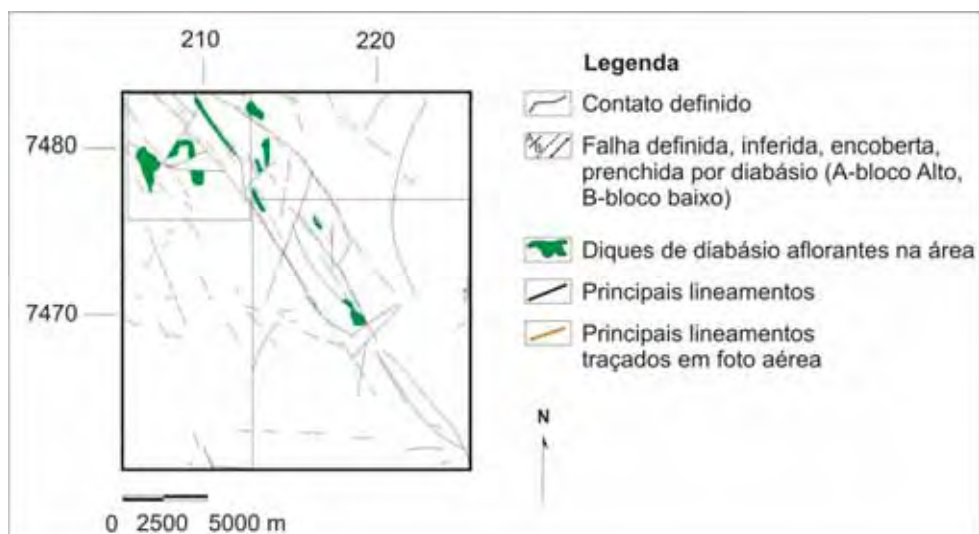
anomalias, um mapa com as rochas básicas aflorantes reconhecidas em mapeamento geológico de superfície (Sousa, 2002) e que condicionam a estruturação dessas estruturas para o setor é também apresentado (Figura 7.25).

A partir dos limites anômalos traçados, um mapa com as fontes contrastantes de alta suscetibilidade magnética, causadoras dessas anomalias é mostrado na Figura 7.26.

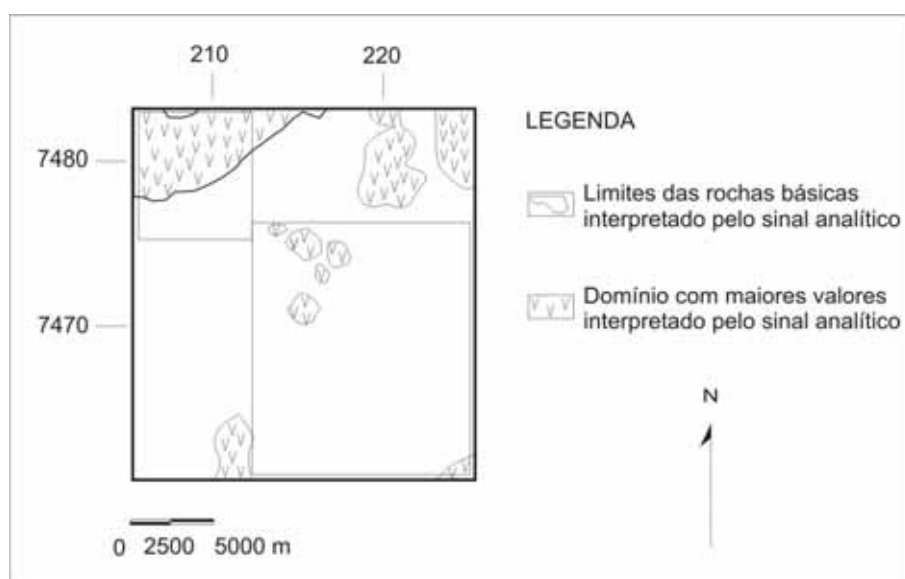


**Figura 7.24** Principais fontes anômalas reconhecidas para o mapa com os valores magnetométricos de sinal analítico.

Com o propósito de efetuar uma comparação, partindo-se dos mapas de domínios e dos principais lineamentos magnetométricos traçados e reconhecidos, é apresentado um mapa integrado de todos os dados estruturais de superfície como as principais falhas e os lineamentos extraídos de fotos aéreas e reconhecimento geológico de superfície segundo estudos de Sousa (2002) segundo a Figura 7.27.

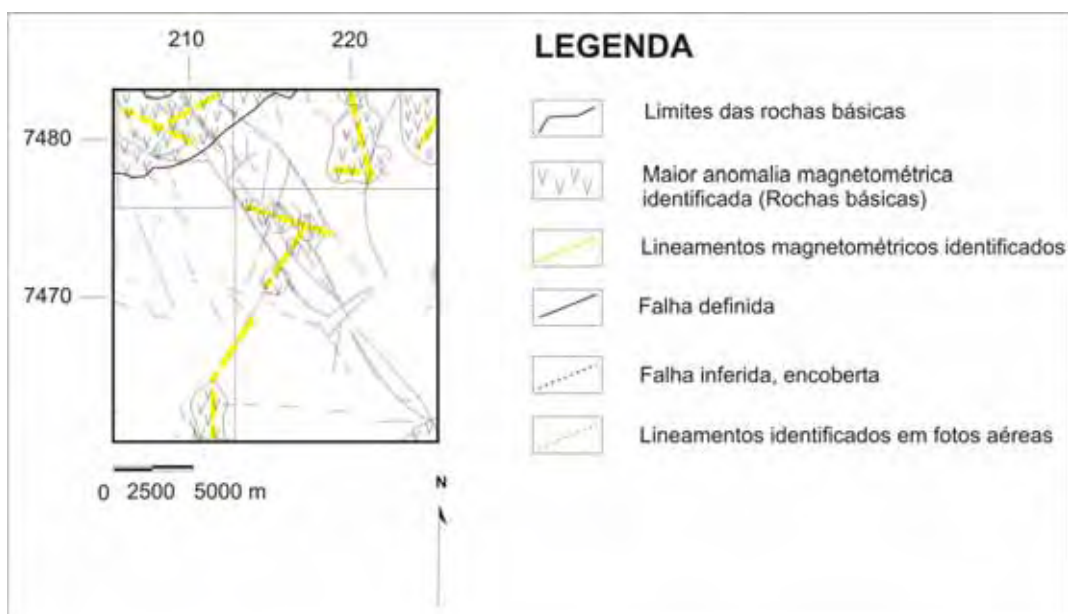


**Figura 7.25** Mapa em detalhe da região dos Altos Estruturais de Pau D'Alho e Jibóia com os principais lineamentos em superfície e rochas básicas aflorantes (Extraído e modificado de Sousa, 2002).



**Figura 7.26** Mapa em detalhe da região dos altos estruturais de Pau D'Alho e de Jibóia com as principais fontes anômalas (corpo básicos) identificadas pelo mapa de sinal analítico.





**Figura 7.27** Mapa integrado para a área dos altos estruturais Pau D'Alho e de Jibóia segundo os dados geofísicos e estruturais interpretados nas figuras anteriores.



## CAPÍTULO 8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

---

### 8.1 DISCUSSÃO

#### 8.1.1 Resultados geofísicos e anomalias apresentadas nos mapas geofísicos

Os valores gravimétricos e magnetométricos observados nas aquisições terrestres da área, de acordo com os objetivos propostos inicialmente para este estudo no Capítulo 1 forneceram subsídios para uma interpretação a cerca do arcabouço geológico, geofísico e estrutural nesta região da Bacia Sedimentar do Paraná.

Os resultados, para melhor estruturação e análise, compreendem três partes fundamentais:

- 1) Mapas de isovalores de contorno sombreado das anomalias.
- 2) Modelagem dos valores gravimétricos e magnetométricos através de perfis pré-selecionados.
- 3) Interpretação das anomalias apresentadas nos mapas geofísicos e correlação com mapa geológico/estrutural de superfície para os Setores Pitanga-Artemis e Pau D' Alho-Jibóia.

No mapa com os valores da anomalia Bouguer e dos valores da anomalia Bouguer submetidos à filtragem passa-banda para valores de profundidade, nota-se uma grande anomalia significativa de padrão circular e com alto gradiente horizontal no quadrante SW da área, em torno de 20 mGal. Essa feição não apresenta valores anômalos quando observada nos mapas de anomalias magnéticas de campo total ou dos valores de sinal analítico. Sugere-se, então, uma possível feição ou mesmo cicatriz localizada no embasamento ou em níveis mais profundos, provavelmente na interface crosta inferior/superior.

Essa feição anômala, também apresenta pouca resposta para a curva calculada do modelo alterando-se as espessuras de crosta terrestre (Moho). O mesmo ocorre em superfície (mapa geológico) que não apresenta a presença de nenhum corpo que apresentasse anomalias gravimétricas dessa magnitude. Em razão do alto gradiente horizontal apresentado para essa anomalia, a realização de estudos com maior grau de detalhamento é sugerida com aquisições gravimétricas e um consequente adensamento das estações nessa região com o intuito de definir, através de uma malha gravimétrica mais detalhada, os limites laterais de profundidade e a determinação dessa feição anômala apresentada.

## **8.2 RESULTADOS FINAIS**

### **8.2.1 Aquisição Geofísica**

Os resultados gravimétricos e magnetométricos, submetidos às técnicas de processamento mostradas nos capítulos 6 e 7 desta tese, demonstraram ser consistentes e coerentes em relação aos estudos geofísicos e geológicos anteriores realizados na área dos altos estruturais (SOARES, 1971; SOARES, 1974; CASTRO, 1973; SOUZA FILHO, 1983; RICCOMINI, 1992; RICCOMINI, 1995; RICCOMINI, 1997; SOUSA, 1997; SOUSA, 2002). Os dados resultantes, ao serem convertidos para o domínio do tempo ou da frequência por meio da técnica da transformada rápida de Fourier, visualizados no gráfico do espectro radial de potência, assim como os valores de profundidade calculados de acordo com a energia das fontes gravimétricas e magnéticas, também são compatíveis e coerentes as espessuras encontradas para a região em trabalhos anteriores (MILANI et al., 1998; IPT, 1980; DOURADO, 2004).

Anomalias pequenas, de menor magnitude, de alta frequência ou picos anômalos de curto comprimento de onda, tanto para os valores magnetométricos como gravimétricos, quando analisados através do método da quarta diferença, demonstraram a existência desses valores de altas frequências tanto para os dados brutos adquiridos no levantamento, como para os valores da quarta diferença gerados no programa. Isto permite concluir uma ausência de ruídos e possíveis anomalias inexistentes, feições que eventualmente tenham sido causadas na aquisição em campo ou durante o processamento.

Os mapas de contorno sombreado de isovalores gerados e as conseqüentes anomalias observadas possuem características, feições e distintas geometrias, relacionadas às diferentes propriedades físicas embora sejam sensíveis às limitações impostas pelos métodos da gravimetria e da magnetometria aplicados neste estudo. Como já citado, a aplicação de técnicas de processamento, assim como a integração dessas técnicas entre si são variadas, mas, de acordo com o conhecimento científico prévio da área, optou-se por procedimentos que permitissem a avaliação e integração mais adequada aos estudos geológicos e geofísicos realizados até o momento na região.

### **8.2.2 Feições reconhecidas e identificadas no contexto regional e local da área**

Feições contrastantes e lineares vistas nos mapas com aparente continuidade, são concordantes com os lineamentos conhecidos na Bacia do Paraná em estudos anteriores e apresentam marcantes direções preferenciais NE-SW, NW-SE e, em menor número, direções de E-W e N-S (FULFARO et al., 1982; ZALÁN et al., 1987; ZALÁN, 1990).

Esses lineamentos contrastantes são evidentes e reconhecidos tanto para os mapas de magnetometria como de gravimetria e também visualizados nos mapas separadamente elaborados e nos mapas de integração dos métodos geofísicos com as feições e lineamentos estruturais conhecidos em superfície. Os mapas possuem feições e anomalias de diferentes comprimentos, geometrias e concentrados em regiões distintas na área. Em virtude dessas diferenças foram demarcados os setores Pitanga - Artemis, para a região de forte estruturação e Pau D'Alho - Jibóia, que apresenta poucas feições lineares contrastantes.

Por isso, pode-se concluir para os mapas gravimétricos gerados, que os lineamentos possuem maiores comprimentos, maior continuidade e significativa concentração na região circunvizinha aos altos de Pitanga e Artemis. Estes lineamentos possuem uma marcante direção preferencial de NW – SE, localmente coincidentes com o alinhamento do Rio Tietê e regionalmente aos alinhamentos do Rio Moji-Guaçu, Ribeirão Preto, Rifaina, Ibitinga - Botucatu (Riccomini, 1997) e, em mega escala ao grande alinhamento estrutural de Guapiara reconhecidos por Ferreira (1981) na Bacia do Paraná. Podem ser atribuídos, para esta região nordeste da Bacia, segundo Ricomini (1997), a alinhamentos estruturais de direções WNW, NW e NNW que configuram um padrão em blocos romboidais associadas a estruturas sintéticas R (alinhamentos WNW) e antitéticas R' (direção NNW) de Riedel (1929) ligados diretamente a um modelo transcorrente com binário dextral de orientação próxima a E-W. Sistemas de falhas mais antigos, também de direção NW-SE são também reconhecidos nos depósitos da Formação Tatuí por Morales et al. (1997).

Os lineamentos identificados para o Setor Pitanga - Artemis, de níveis mais profundos (interface crosta/sedimentos) e prolongando-se também em profundidade na crosta, pode-se atribuir como possíveis descontinuidades pré-existentes de origem pré-cambriana/eopaleozóica e que geraram, devido as reativações, os grandes lineamentos estruturais que representam o arcabouço estrutural reconhecido na Bacia do Paraná e que possuem, ao longo destes, uma maior quantidade e freqüência de falhas, diques e *sills* de diabásio reconhecido em superfície, e que se alojam nesses planos de fraqueza pré-existentes (ZALÁN et al., 1987; CORDANI, 1984; ZALÁN et al., 1990; SOARES, 1991).

É possível atribuir ao conjunto de lineamentos de menor representatividade e com menor prolongamento, em especial na região do domo de Pitanga e ao Alto Estrutural de Artemis, ao denominado sistema de falhas Passa Cinco – Cabeça e Ipeúna – Piracicaba reconhecidos nos estudos de Soares (1974); Sousa (1997) e Sousa (2002). Outros lineamentos de menor magnitude são observados nos mapas com direções preferenciais de NE – SW, N – S e E - W , que apresentam também assinaturas descontínuas e de menor prolongamento, porém são significativos e abundantes. As direções NE-SW podem estar associadas às falhas normais reconhecidas por Sousa (2002) de difícil caracterização em superfície e a tectônica

distensiva do final do Mesozóico até o Terciário Superior (Mioceno) de direção NW-SE e relacionada ao processo de abertura do Oceano Atlântico (RICCOMINI, 1989).

Para os mapas magnetométricos, concluiu-se que as anomalias observadas, de acordo com a análise dos domínios feita nos capítulos 6 e 7, possuem uma distribuição difusa ao longo de toda a área estudada e com um padrão circular e concentrado em especial, no Setor Pitanga - Artemis. No mapa de anomalia magnética total com os lineamentos reconhecidos e interpretados, as feições lineares reconhecidas, assim como suas direções preferenciais da mesma forma que o mapa gravimétrico, são concordantes aos lineamentos reconhecidos em estudos anteriores para a Bacia do Paraná de direções NW – SE e NE-SW e que exibem um marcante padrão de feições lineares em forma de X (ZALÁN et al., 1987; FULFARO et al., 1982 e ZALÁN, 1990).

Estes lineamentos observados apresentam, porém, menores comprimentos e continuidade em toda a área, sendo, em virtude das características do método magnetométrico, associados a grande frequência de fraturas (falhas e juntas), preenchidas em grande parte por diques e *sills* de rochas básicas, resultando em assinaturas magnéticas mais difusas e pouco lineares. Essas rochas são abundantes no Setor Pitanga-Artemis, em especial na região circunvizinha ao Domo de Pitanga. Essas evidências apontam para um posicionamento desses corpos básicos em grande parte, preenchendo zonas de fraqueza ou falhas, segundo Sousa (2002).

Para Setor Pau D'Alho e Jibóia, pode-se atribuir para esses altos uma direta participação desses corpos ígneos na formação dessas feições, conforme é observável no mapa com os valores de sinal analítico. Para esse mapa, é evidente os corpos ígneos ao longo dessas estruturas também na direção NW-SE.

A identificação e delimitação desses corpos básicos, apontam para a existência de corpos de maior extensão em profundidade, com variadas formas (batólitos e lacólitos) não aflorantes. No Domo de Pitanga, é marcante também a ausência de corpos ígneos dentro dos limites desse alto coincidindo, portanto, com o mapa geológico e estrutural da área.

### 8.2.3 Modelagem geofísica

Os modelos gerados por meio dos dados observados dos valores de sinal analítico, da anomalia Bouguer de dados de profundidade (filtragem passa-banda), e valores da anomalia Bouguer em perfis menores situados na região do domo e perfis maiores de abrangência regional, permitiram uma avaliação, correlação e análise em relação as diferentes feições anômalas encontradas nos mapas geofísicos de gravimetria e de magnetometria e para as características geológicas e estruturais reconhecidas na área por estudos anteriores (SOARES, 1971; SOARES, 1974; CASTRO, 1973; SOUZA FILHO, 1983; RICCOMINI, 1992; RICCOMINI, 1995; RICCOMINI, 1997; SOUSA, 1997; SOUSA, 2002).

A escolha dos valores de suscetibilidade e de densidade usados na modelagem possibilitou também a caracterização e a compreensão do comportamento em profundidade, e da determinação de corpos intrusivos assim como sua possível geometria em níveis rasos e mais profundos.

As anomalias apresentadas e modeladas próximo à curva de valores calculados para o modelo, estão em concordância às feições geológicas reconhecidas assim como as profundidades do embasamento ao longo da área visualizados nos perfis E – F de abrangência regional (Capítulo 7). No perfil modelado mais extenso denominado de E – F com os valores observados da anomalia Bouguer de profundidade de filtragem passa – banda, é reconhecido e observado a pouca espessura ou o afinamento de sedimentos na região, em especial dos altos de Pitanga e de Ártemis, e também, o aumento dessa espessura nos extremos do perfil. Estes resultados são concordantes as profundidades reconhecidas em trabalhos como IPT (1980) e Dourado (2004).

## 8.3 CONCLUSÕES

A avaliação e interpretação dos resultados acima descritos permitem concluir neste estudo para a região dos Alto estruturais de Pitanga, Ártemis, Pau D'Alho e Jibóia que os lineamentos reconhecidos em profundidade, são produto de falhas pré-existentes, sendo algumas reativadas durante o magmatismo Serra Geral e que possibilitaram a passagem do magma através dessas zonas de fraqueza. Os lineamentos reconhecidos pela geofísica são também associados aos principais

*trends* reconhecidos para a área em diversos estudos, e que possuem, de acordo com cada método utilizado, diferentes origens e geometrias como, por exemplo, os lineamentos reconhecidos na magnetometria, ligados essencialmente aos falhamentos preenchidos pelas intrusões de rochas básicas.

Estes resultados levam a concluir, que apesar das intrusões básicas terem um importante papel na evolução da área, atuaram conjuntamente e em fases distintas com as estruturas pré-existentes e que sofreram, dentro do contexto estrutural, diferentes movimentações em diferentes fases evolutivas da bacia.

Os resultados anteriores de estudos geofísicos na região serviram como parâmetro e auxiliaram na determinação dos valores de profundidade utilizados nas modelagens gravimétricas e magnetométricas e foram também, determinantes na confirmação quanto às espessuras das rochas sedimentares na região dos altos estruturais e áreas adjacentes, assim como os maiores espessamentos da camada sedimentar na região circunvizinha aos altos estruturais e em especial ao Domo de Pitanga. Desta maneira o comportamento da topografia da crosta, os lineamentos presentes e a variação de profundidade puderam ser melhor analisados e compreendidos.

A aplicação dos levantamentos geofísicos através dos métodos da gravimetria e magnetometria terrestres possibilitou um reconhecimento e consolidação de estruturas conhecidas e estudadas, especialmente em níveis mais profundos. Os modelos gravimétricos/magnetométricos permitiram uma identificação mais precisa da espessura dos sedimentos, e principalmente o comportamento da topografia do embasamento na área do Domo de Pitanga. As diferentes técnicas aplicadas e integradas na interpretação permitiram, também, uma consolidação acerca da estruturação a que o Alto se encontra dentro da Bacia Sedimentar do Paraná.

A aplicação neste estudo dos métodos geofísicos da gravimetria e magnetometria em conjunto com o método de aquisição conhecido como DGPS (*Differential Global Positioning System*), permitiu a avaliação e interpretação acerca das características geológicas, arcabouço estrutural, as características e geometria em profundidade na região dos altos estruturais de Pitanga, Ártemis, Pau D'Alho e Jibóia situados na porção nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, sudeste do Brasil.

## CAPÍTULO 9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ANGELIER, J.; MECHLER, P. Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en seismologie: la méthode des diedres droits. **Bulletin de la Société Géologique de France**, v. 7, p. 1309-1318, 1977.

ALMEIDA, F. F. M.; BARBOSA, O. Geologia das quadrículas de Piracicaba e Rio Claro, Estado de São Paulo. **Boletim Divisão Geologia e Mineralogia/DNPM**. São Paulo, n. 143, 96 p., 1953

ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos Geológicos do relevo paulista. **Bol. IGC**, São Paulo, n. 41, p. 169-263, 1964

ALMEIDA, F. F. M. 1980. Tectônica da Bacia do Paraná no Brasil. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 187 p.

ALMEIDA, F. F. M. Síntese sobre a tectônica da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, n. 3, 1981, Curitiba. **Atas...**São Paulo: SBG, v 2, p. 1 - 20.

ALMEIDA, F.F.M. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da plataforma sul-americana. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.13, p. 139 - 158. 1983.

ANDRADE, S.M.; SOARES, P.C. Geologia do Centro Leste do Estado de São Paulo. Ponta Grossa: PETROBRAS, 1971. (Relatório DESUL, n. 407).

ARTHAUD, F. Méthode de détermination graphique des directions de raccourcissement, d'allongement et intermédiaire d'une population de failles. **Bulletin Société Géologique de France**, n. 11, p. 729-737, 1969.

ASSINE, M. L.; ZACHARIAS, A. A.; PERINOTTO, J. A. J. O trato deposicional Tatuí e a transgressão Taquaral no Centro-Leste do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, n. 6, 1999, Águas de São Pedro. **Boletim...** Águas de São Pedro: SBG, 1999.

BHATACHARIA, B.K. Magnetic anomalies due to a prism-shaped bodies with arbitrary polarization. **Geophysics**, v. 29, p. 517 - 553. 1964.

BHATACHARIA, B.K. Continuous spectrum of the total magnetic field anomaly due to a rectangular prismatic body. **Geophysics**, v. 31, p.97 - 121. 1966.



BJORNBERG, A.J.S.; LANDIM, P.M.B. Contribuição ao Estudo da Formação Rio Claro, neoceno-zóico. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, São Paulo, n.4, p.43 - 67. 1966.

BLAKELY, J. B. Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications. Cambridge University Press New York, 441 p. 1996.

BÓSIDO, V. J. **Geologia da área de São Pedro, SP**. 1973. 125 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Rio Claro, Rio Claro.

CAETANO-CHANG, M. R. **A Formação Pirambóia no Centro Leste de São Paulo**. 1997. 196 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

CASTRO, P. R. M. **Contribuição ao Estudo da Estrutura do Pau d' Alho (Piracicaba, SP)**. 1973. 87 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Engenharia de Limeira, Universidade de Campinas.

COIMBRA, A.M.; BRANDT NETO, M.; COUTINHO, J.M.V. Silicificação dos arenitos da Formação Bauru no Estado de São Paulo. In: SBG/ Núcleo São Paulo, **A Formação Bauru no Estado de São Paulo e regiões adjacentes**. São Paulo, *Coletânea de trabalhos e debates*, p. 103 - 115. 1981.

COLLON A. Le petrole dans les environs du Mont de Bofete et de Porto Martins, dans l'Etat de São Paulo. Instituto Geográfico e Geológico, Secretaria de Agricultura do Estado de São Paulo, 69 p. 1897.

CORDANI, U.G.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A.; PORTO, R.; THOMAZ FILHO, A.; CUNHA, F.M.B. Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. Rio de Janeiro, Petrobras (CENPES/SINTEP), 70 p. (Série Ciência – Técnica – Petróleo. Seção: Exploração de Petróleo. 1984.

CPRM (Serviço Geológico do Brasil). 2001. Mapa geológico do Brasil. In: Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Sistema de Informações Geográficas - SIG e Mapas na escala 1:2.500.000. CD-Rom 3.

DOURADO, J.C. **Estruturação crustal da região de Rio Claro através da sismologia**. 2004. 104 f. Tese (Livre Docência). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro.

FERREIRA F.F.J. **Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa**. 1982. 169 f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

FAIRHEAD, J.D.; ODEGARD, M.E. Advances in gravity survey resolution. **The Leading Edge**, Society of Exploration Geophysics, vol.21, n.1, p.36-37. 2002.

FAIRHEAD, J.D.; GREEN, M.C.; BLITZKOW, D. The use of GPS in gravity surveys. **The Leading Edge**, Society of Exploration Geophysics, vol.21, n.1, p.36-37. 2003.

FEATHERSTONE, W.E.; DENTITH, M.C. A geodetic approach to gravity data reduction for geophysics. **Computer & Geosciences**, vol.23, n. 10, p. 1063 – 1070. 1997.

FEATHERSTONE, W.E. et al. Do we need a gravimetric geoid or a model of the base of the Australian height datum to transform GPS heights ?, **Australian Survey**, v.43, p. 273 – 280. 1998

FEATHERSTONE, W.E.; KIRBY, J.F. The reduction of aliasing in gravity anomalies and geoid heights using digital terrain data. **Geophys. J. Int.**, n. 141, p. 204 -212. 2000.

FEATHERSTONE, W.E.; KIRBY, J.F.; KEARSLEY, A.H.W.; GILLILAND, J.R.; JOHNSTON, G.M.; STEED, J. ; FORSBERG, R.; SIDERIS, M.G. The AUSGeoid98 geoid model of Australia: data treatment, computations and comparisons with GPS-levelling data. **J. Geod.**, n.75, p. 313-330. 2001.

FERREIRA F.F.J. **Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa**. 1982. 169 f. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo.

FERREIRA, F.J.F.; MORAES, R.A.V.; FERRARI, M.P.; VIANA, R.B. Contribuição ao estudo do Alinhamento Estrutural de Guapiara. In: III SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, n. 3. 1981. **Anais...**Curitiba. 1981.

FRANZINELLI, E. A estratigrafia e ambiente de sedimentação do arenito Pirambóia (Estado de São Paulo). In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, n. 27, 1973. Aracaju. **Anais...** Aracaju: SBG, v.1. 1973.

FULFARO, V. J.; SUGUIO, K. A. Formação Rio Claro (Neocenoico) e seu Ambiente de Deposição. **Boletim do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 20, p. 45 - 60. 1968.

FULFARO. V. J. A evolução tectônica e paleogeográfica da Bacia Sedimentar do Paraná pelo “*trend surface analysis*”. **Geologia**. São Carlos, n. 14, 112 p. 1971.

FULFARO, V. J.; BARTORELLI, A. Análise palinológica de sedimentos cretáceos da região de Marabá, Estado do Pará. In: II REUNIÃO DE PALEOBOTÂNICOS E PALINÓLOGOS, n. 2, 1979, São Paulo, **Boletim do Instituto de Geociências da USP - Separata**. São Paulo: Instituto de Geociências da USP, p. 155 - 161. 1979.

FULFARO, V. J.; GAMA JR, E.; SOARES, P. C.; Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. São Paulo: PAULIPETRO, 1980. (Consórcio IPT/CESP – Relatório 008/80).

FULFARO, V. J.; SAAD, A. R.; SANTOS, M. V.; VIANNA, R. B. Compartimentação e evolução tectônica d Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 12, n. 4, p. 590 - 610, 1982.

FULFARO, V. J.; STEVAUX, J. C.; SOUZA FILHO, E. E.; BARCELOS, J. H. A Formação Tatuí (P) no Estado de São Paulo. In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, n.33, 1984, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: SBG, v.2, p. 711-724. 1984.

GAMA Jr., E.; BANDEIRA Jr., A.N.; FRANÇA, A.B. Distribuição espacial e temporal das unidades litoestratigráficas paleozóicas na parte central da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 12, n. 4, p. 578 - 589, 1982.

GEOSOFT INCORPORATED. 1999. Xcelleration gravity processing system; Gravity data processing system for Oasis Montaj, Tutorial user guide. Toronto, Ontário, Canadá.

GEOSOFT INCORPORATED. 2005. Montaj MAGMAP filtering; 2-D frequency domain of potential field data extension for Oásis Montaj v6.1. Toronto, Ontário, Canadá.

GEM SYSTEMS. 2005. GSM-19 v7.0 Instruction Manual, <http://www.gemsys.ca>

GM – SYS. 2000. Gravity magnetic modeling software user's guide for version 4.6. Northwest geophysical associates, Inc. Corvallis. U.S.A.

GODOY, D.F. **Termotectônica por traços de fissão em apatitas dos altos estruturais de Pitanga, Pau D`Alho e Jibóia - Centro do Estado de São Paulo**. 2006. 116 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

HASUI, Y.; HARALYI N.L.E.; CAMPANHA, V.A.; HAMZA, V.M.; GALLI V.A.; FRANGIPANI, A.; PULEGHINI, F<sup>o</sup>. P. 1989 Compartimentação estrutural e evolução tectônica do Estado de São Paulo, IPT, relatório 27394 - Pró-Minério.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Divisão de Minas e Geologia Aplicada. Mapa Geológico do Estado de São Paulo. São Paulo; 1981. Esc. 1:500.000. 2v. (Série monografias, 6).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Divisão de Minas e Geologia Aplicada. Prospecção geofísica (sondagens elétricas verticais e magnetometria) em apoio aos estudos geológicos na região de São Pedro e Piracicaba – bloco 47, São Paulo, Relatório IPT nº. 14.481, 1980.

LANDIM, P. M. B.; SOARES, P. C.; GAMA JR., E. Estratigrafia do nordeste da Bacia do Rio Paraná. Rio Claro: IPT/UNESP, 1980. 45 P. (Curso de Especialização).

LI, Y.; OLDENBURG, D.W. 3 D Inversion of Gravity Data. **Geophysics**. n. 1, v. 63, p. 109-119. 1998.

LUIZ, J. G.; COSTA & SILVA, L. M. **Geofísica de Prospecção**. Belém. Pará, Universidade Federal do Pará, 1995. 311 p.

MAAS, M.V.R.; OLIVEIRA, C. G.; PIRES, A. C. B.; MORAES, R.A.V. Aplicação da Geofísica Aérea na Exploração Mineral e Mapeamento Geológico do Setor Sudoeste do Cinturão Cuprífero Orós-Jaguaribe. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 3, p. 279-288. 2003.

MILANI, E. J.; FRANÇA, A. B.; SCHNEIDER, R. L. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 69 – 82. 1994.

MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul – ocidental**. 1997. 255 f. Tese (doutorado em geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

MILANI, E.J.; RAMOS, V.A. Orogenias Paleozóicas no Domínio Sul-Occidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v.28, n.4, p. 473-484. 1998

MORALES, N.; PERINOTTO, J.A.J.; D’AFFONSECA, F.M. Evidências de tectônica distensiva sindeposicional à Formação Tatuí na região de Limeira S.P. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, n. 5., Itatiaia. **Atas...Itatiaia**: SBG, p. 60-61. 1997

NABIGHIAN, M.N., The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal crosssection: Its properties and use for automated anomaly interpretation: **Geophysics**, n. 37, p. 507-517. 1972

NABIGHIAN, M.N. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section, **Geophysics**, v. 39, p. 85-92. 1974.

NABIGHIAN, M.N. Toward the three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations: **Geophysics**, n. 53, p. 957-966. 1984.

NORTHLEET, A. A.; MEDEIROS, R. A.; MUHLMANN, H. Reavaliação dos dados geológicos da Bacia do Paraná. **Boletim Petrobras**, n. 12, v. 3, p. 291 – 346, 1969.

PAULIPETRO – CONSÓRCIO CESP/IPT. Metodologia do Paulipetro para prospecção geofísica na Bacia do Paraná. In: SEMINÁRIO SOBRE EXPLORAÇÃO DO PETRÓLEO NO BRASIL, Rio de Janeiro, 1981.

PENTEADO MM. 1976. Geomorfologia do setor centro-ocidental da Depressão Periférica Paulista. Série teses e monografias, 22. IGEOG/USP. 86 p.

POWEL, C.M.A. Paleomagnetism constraints on timing of the Neoproterozoic breakup of Rodinia and the Cambrian formation of Gondwana. **Geology**, n. 21, p. 889-892, 1993.

QUINTAS M.C.L. **O embasamento da Bacia do Paraná: reconstrução geofísica de seu arcabouço**. 1994. 218f. Tese (doutorado em geofísica) - Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo São Paulo.

RICCOMINI, C. **O Rift Continental do sudeste do Brasil**. 1989. 256 f. Tese (doutorado em geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo:

RIEDEL, W. Zur mechanik, geologischer brucherscheinungen. Ein Beitrag zum problemder "Fiederspalten". Zentralbl. f. Mineral., **Geol., u. Paleont.**, 1929B: p. 354-368. 1929.

RICCOMINI, C. Estilos estruturais da região do Domo de Pitanga, Bacia do Paraná, SP. **Bol. IG-USP**, Publicação Especial, n. 12, p. 93-94. 1992.

RICCOMINI, C. **Tectonismo gerador e deformador dos depósitos sedimentares pós-gondwânicos da porção centro-oriental do Estado de São Paulo e áreas vizinhas**. 1995. 100 f. Tese (Livre Docência) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

RICCOMINI, C. Arcabouço estrutural e aspectos do tectonismo gerador e deformador da Bacia Bauru no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**; n. 27, v. 2, p. 153-162. 1997.

ROBINSON, E.S.; ÇORUH, C.1988. Basic exploration geophysics. EUA, Ed. John Wiley & Sons, Inc. 562 p.

ROSTIROLA, S.R.; ASSINE, M.L.; FERNANDES, L.A.; ARTHUR, P.C. Reativação de paleolineamentos durante a evolução da Bacia do Paraná exemplo do Alto Estrutural de Guatiguá. **Revista Brasileira de Geociências**. n. 30. v. 4, p. 639 – 648. 2002.

Sá, N. C. Reduções e observações gravimétricas: Teoria e prática. Universidade de São Paulo – IAG. 90 p. 1994

SAAD, A. R. **Estratigrafia do subgrupo Itararé no centro e sul do estado de São Paulo**. 1977. 107 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SCHNEIDER, R.L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R.A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto alegre, **Anais...Porto Alegre**: SBG, v.1, p. 41 – 65. 1974.

SHERIFF, R.E. Geophysical Methods. New Jersey: Prentice Hall, 1989. 605p.

Soares P.C. Elementos estruturais da parte nordeste da Bacia do Paraná: classificação e gênese. In: CONGR. BRAS. GEOL., SBG, n. 28, 1971, Porto Alegre, **Anais...**, n.1, p. 107 - 121.

SOARES, P. C. **O mesozóico Gondwânico no Estado de São Paulo**. 1973. 152 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Rio Claro, Rio Claro.

SOARES, P. C. & LANDIM, P. M. B. Aspectos Regionais da Bacia do Paraná no seu flanco nordeste. In: CONGR. BRAS. GEOL. n. 27, 1973, Salvador. **Anais...Aracaju**: SBG, v. 1, p. 243 – 256. 1973,

SOARES, P. C. Elementos estruturais da parte nordeste da Bacia do Paraná; classificação e gênese. In: CONGRESS. BRAS. GEOL., n. 28, Porto Alegre. **Anais...Porto Alegre**: SBG, v. 30. 1974, p. 107 – 121.

SOARES, P.C. BARCELLOS, P.E. CSORDAS, S.M. Lineamentos em imagens de landsat e radar e suas implicações no conhecimento tectônico da Bacia do Paraná. In: INPE/CNPq. Simpósio BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1982. **Anais....**p. 143-167.

SOARES, P.C. Tectônica **Sinsedimentar cíclica na Bacia do Paraná – Controles**. 1991. Tese (Concurso ao cargo de professor titular). Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná.

SOUSA, M. O. L. **Caracterização Estrutural do Domo de Pitanga – SP**. 1997. 116 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

SOUSA, M. O. L. **Evolução Tectônica dos Altos Estruturais de Pitanga, Ártemis, Pau D' Alho, e Jibóia – Centro de Estado de São Paulo**. 2002. 206 f. Tese de Doutorado (Pós Graduação em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

SOUZA FILHO, E. E. Tectônica da região de Rio Claro-Piracicaba, Domo de Pitanga. In: **SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA**, n. 4, 1983, São Paulo, **Atas...SBG/ Núcleo São Paulo**, São Paulo, p. 191-196.

SPECTOR, A. GRANT, F.S., 1970 Statistical Models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, Vol. 35, N.2, p. 293-302.

STEVAUX, J. C.; SOUZA FILHO, EDVARD ELIAS DE; FULFARO, V. J. Trato deposicional da Formação Tatuí (P) na área aflorante no NE da Bacia do Paraná. In: XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia, 1986, Goiânia, GO. **Anais...** 1986. v. 1. p. 219-229.

STEVAUX, J. C. O Rio Paraná: **Geomorfogênese, sedimentação e evolução quaternária do seu curso superior (região de Porto Rico, PR)**. 1994. 214 f. tese (doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

STEWART, K.; TURNER, S.; KELLEY, S.; HAWKESWORTH, C.; KIRSTEIN, L.; MANTOVANI, M. 3-D,  $^{40}\text{Ar}$  -  $^{39}\text{Ar}$  geochronology in the Paraná continental flood basalt province. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 143, p.95 -109. 1996.

TALWANI, M.; WORZEL, J.L. & LANDISMAN, N.M. Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. **J. Geophys. Res.** v. 64, p. 49-59. 1959.

TALWANI, M.; HEIRTZLER, J.R. Computation of magnetic anomalies caused by two-dimensional bodies of arbitrary shape. In: Parks, G.A., Ed., *Computers in the mineral industries, Part I: Stanford Univ. Publ., Geological Sciences*, 9, 464-480. 1964.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. & KEYS, D.A. 1976. *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University, 860p.

TURNER, S.; REGELOUS, M.; KELLEY, S.; HAWKESWORTH, C.; MANTOVANI, M. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  geochronology. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 121, p. 333-348. 1994.

VAIL, P.R.; MITCHUM, Jr. R.M.; THOMPSON, S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 4: global cycles of relative changes of sea level. In: PAYTON CE (Ed.). **Seismic Stratigraphy- applications to hydrocarbon exploration. American Association of Petroleum Geologists.** Tulsa, Oklahoma. U.S.A. p. 83-96. 1977.

WASHBURNE, C.W. 1930. Petroleum geology of the State of São Paulo - Brazil. São Paulo, Com. Geog. Geol. do Est. S. Paulo, 282 p. (Boletim 22)

ZALÁN, P.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T; ZANOTTO, O.A.P. 1987. Tectônica e Sedimentação da Bacia do Paraná In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3, , Curitiba. **Atas....**Curitiba: SBG, 1987. 441 p.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. Bacia do Paraná in: GABAGLIA, G. P. R.; MILANI, E. J. (coord.). Origem e evolução de bacias sedimentares. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, 1990. p. 135 – 168.

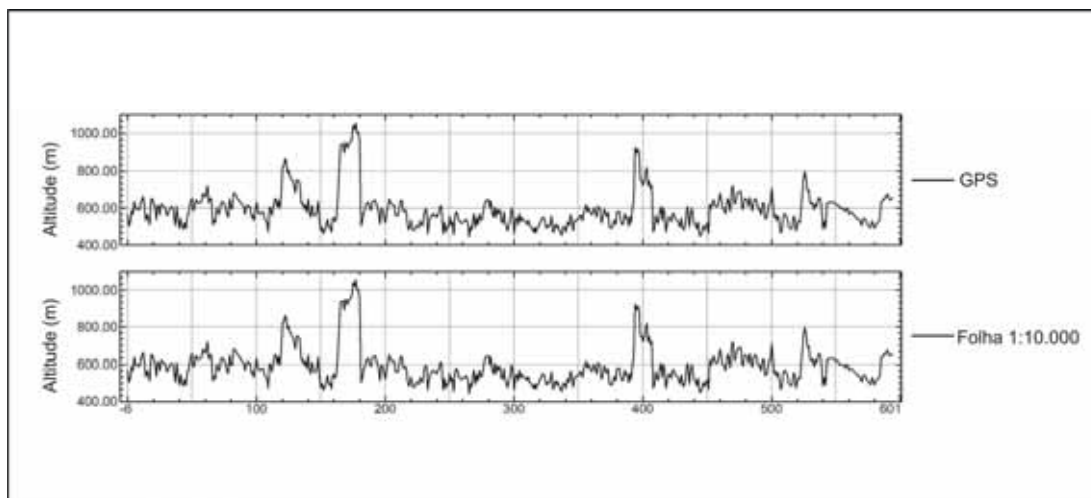


## **APÊNDICE 1 - CONSIDERAÇÕES E ANÁLISES REFERENTES À QUALIDADE DOS DADOS PÓS-PROCESSADOS COM O GPS PATHFINDER PRO-XR**

Foi efetuado um estudo comparativo entre os dados levantados em campo com o GPS diferencial e os dados extraídos das folhas topográficas do Instituto Cartográfico de São Paulo escala 1:10.000, usados inicialmente nas campanhas de campo. Os valores altimétricos, inicialmente obtidos nas campanhas de gravimetria, foram plotados a mão nas folhas topográficas e, posteriormente, comparadas aos valores altimétricos adquiridos pela técnica de pós - processamento. Os valores, quando comparados ao gráfico da Figura 1.1, não ultrapassam, na média, a casa das unidades de metros, com exceção de alguns poucos pontos isolados. Para os valores anômalos em mGal obtidos na área de levantamento considerando a escala regional de semi – detalhe para o levantamento e o mapa da anomalia Bouguer gerado, esses valores são considerados aceitáveis.

Valores maiores que 10 metros, como citado anteriormente, podem ser um produto do erro das cotas altimétricas nas folhas topográficas 1:10.000, já que as suas curvas de nível e a metodologia de obtenção dos valores altimétricos foram feitas por meio de técnicas cartográficas que, eventualmente, possuem um certo grau de imprecisão. Não podem se descartar, também, possíveis falhas na precisão do equipamento devido a interferências na área de levantamento (torres de telefonia celular, alta tensão e rádio transmissores) e até mesmo no sinal GPS/satélite (ver Apêndice 3).

Como meio de verificar a qualidade dos dados altimétricos obtidos no estudo pela técnica GPS diferencial, foram escolhidas cinco estações altimétricas do IBGE (Foto 1.1 e 1.2), que se encontram distribuídas ao longo da área de aquisição. Os valores altimétricos e de localização geográfica (Tabela 1.1) foram então comparados com valores adquiridos por meio da técnica de pós-processamento GPS (Tabela 1.2). As estações altimétricas selecionadas para essa análise são de domínio público, do tipo RN (referência de nível), encontram-se disponíveis no site: [www.ibge.org.br](http://www.ibge.org.br). e se encontram em bom estado com as devidas placas de identificação.



**Figura 1.1** Perfil dos valores de altimetria (Z) adquiridos com GPS e submetidos à técnica de pós-processamento e correção diferencial (acima) e valores de altimetria resultantes das folhas topográficas 1:10.000 (abaixo).



**Foto 1.1** Detalhe da placa da estação altimétrica IBGE número 2859Z localizada no município de Rio Claro – S.P.



**Foto 1.2** Aquisição altimétrica com o GPS *Pathfinder Pro XR* na estação altimétrica IBGE número 2859Z localizada no município de Rio Claro – S.P.

**Tabela 1.1** Dados das estações altimétricas do IBGE (Coordenadas horizontais em UTM).

Estação n.º.	X	Y	Altitude (m)
<b>RN 2859 Z Rio Claro</b>	<b>235.221</b>	<b>7.519.885</b>	<b>620,8568</b>
<b>RN 2868H Charqueada</b>	<b>214.887</b>	<b>7.508.718</b>	<b>605,0635</b>
<b>RN 2865T S. Pedro</b>	<b>201.595</b>	<b>7.501.816</b>	<b>546,1531</b>
<b>RN 2865S Águas S. Pedro</b>	<b>204.402</b>	<b>7.498.607</b>	<b>526,0484</b>
<b>RN 2865A Piracicaba</b>	<b>229.643</b>	<b>7.485.652</b>	<b>552,6221</b>

**Tabela 1.2** Valores altimétricos das Referências de Nível (RN's) do IBGE obtidos pelo GPS diferencial (Coordenadas horizontais em UTM).

Estação n.º.	X	Y	Altitude (m)
<b>RN 2859 Z Rio Claro</b>	<b>235197</b>	<b>7519859</b>	<b>620,55</b>
<b>RN 2868H Charqueada</b>	<b>214776</b>	<b>7508820</b>	<b>605,46</b>
<b>RN 2865T S. Pedro</b>	<b>201499</b>	<b>7501809</b>	<b>545,30</b>
<b>RN 2865S Águas S. Pedro</b>	<b>204573</b>	<b>7498531</b>	<b>526,88</b>
<b>RN 2865 A Piracicaba</b>	<b>229617</b>	<b>7485759</b>	<b>551,44</b>

As estações altimétricas selecionadas (ver Figura 1.2) e a descrição de suas principais características como localização e altitude, segundo [www.ibge.org.br](http://www.ibge.org.br), são as seguintes:

1) Estação Rio Claro

N.º. da estação: 2859Z,

Tipo: Estação altimétrica – RN

Latitude: 22<sup>o</sup> 24' 24" S, Longitude: 47<sup>o</sup> 34' 19 W

Altitude ortométrica (m): 620,8568

UTM (N): 7.519.885, UTM (E): 235.221

*Datum*: SAD 69

Localização: na base do monumento ao Vereador Sylvio Cassavia Filho, localizado no entroncamento da Av. 12 com a Rua 14 a 0.67 km além da Igreja de Santa Cruz.

## 2) Estação Charqueada

Nº. da estação: 2868H

Tipo: Estação altimétrica – RN

Latitude: 22° 30' 15" S, Longitude: 47° 46' 17 W

Altitude ortométrica (m): 605,0635

UTM (N): 7.508.718, UTM (E): 214.887

*Datum:* SAD 69

Localização: Chapa cravada na base do monumento localizado na praça Dr. Tancredo Neves, na saída para Ipeúna.

## 3) Estação Águas de São Pedro

Nº. da estação: 2865S

Tipo: Estação altimétrica – RN

Latitude: 22° 35' 37" S, Longitude: 47° 52' 30 W

Altitude ortométrica (m): 526,0484

UTM (N): 7.498.607, UTM (E): 204.402

*Datum:* SAD 69

Localização: Chapa cravada no topo da mureta do tanque de reserva de água do “centro de tratamento de águas” as SABESP; 1,20 km além da igreja matriz de Águas de São Pedro e 2,46 km aquém do campo de pouso de São Pedro.

## 4) Estação São Pedro

Nº. da estação: 2865T

Tipo: Estação altimétrica – RN

Latitude: 22° 33' 51" S, Longitude: 47° 54' 06 W

Altitude ortométrica (m): 546,1531

UTM (N): 7.501.816, UTM (E): 201.595

*Datum:* SAD 69

Localização: Chapa cravada na cabeceira do viaduto da SP-304, na entrada da cidade de São Pedro; 2,83 km além do campo de pouso Xavante.

### 5) Estação Piracicaba

Nº. da estação: 2865A

Tipo: Estação altimétrica – RN

Latitude: 22° 42' 53" S, Longitude: 47° 37' 55 W

Altitude ortométrica (m): 552,6221

UTM (N): 7.485.652, UTM (E): 229.643

*Datum*: SAD 69

Localização: Localizada no centro do trevo em forma de triângulo, no final da Avenida Independência, próxima a igreja de São Judas Tadeu e a Escola de Agronomia de Piracicaba.

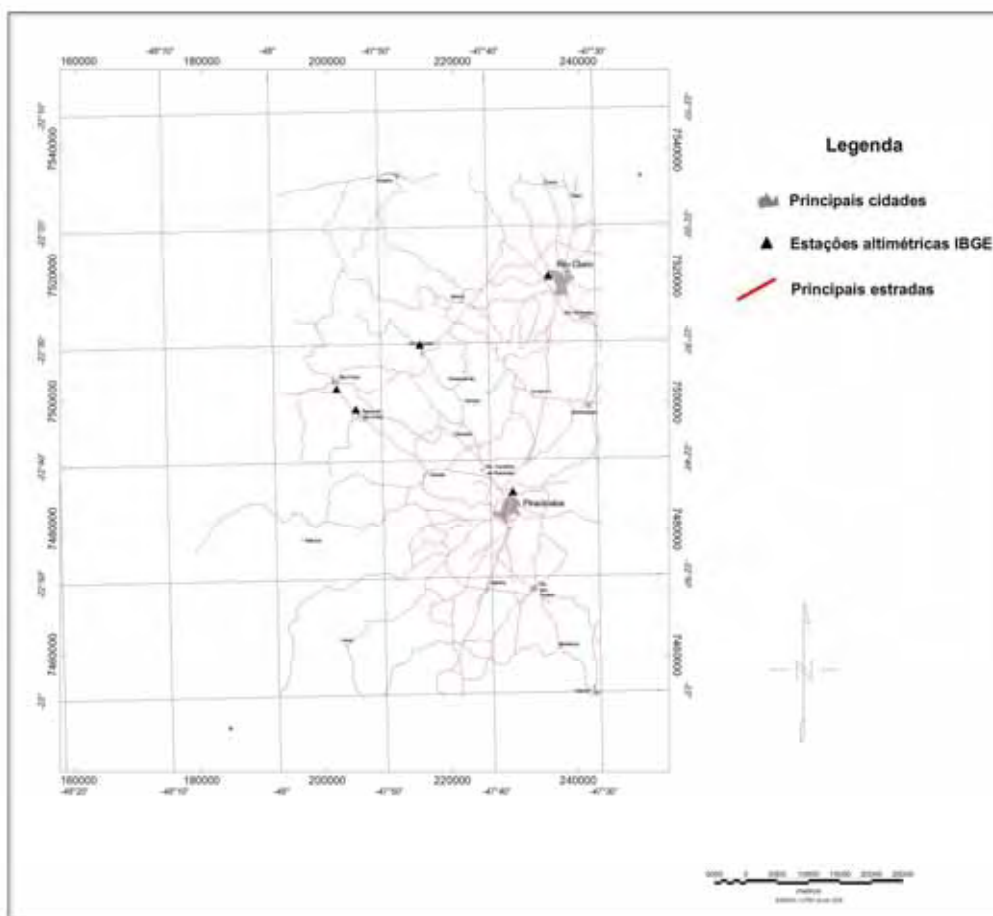
Para efeito comparativo, foi gerado um mapa com o resultado da diferença de todos os valores altimétricos das folhas topográficas 1:10.000 e valores altimétricos adquiridos através da técnica GPS diferencial), segundo a seguinte fórmula:

$$D_A = \text{GPS diferencial} - \text{folhas 1:10.000}$$

Onde:  $D_A$  = Diferença altimétrica

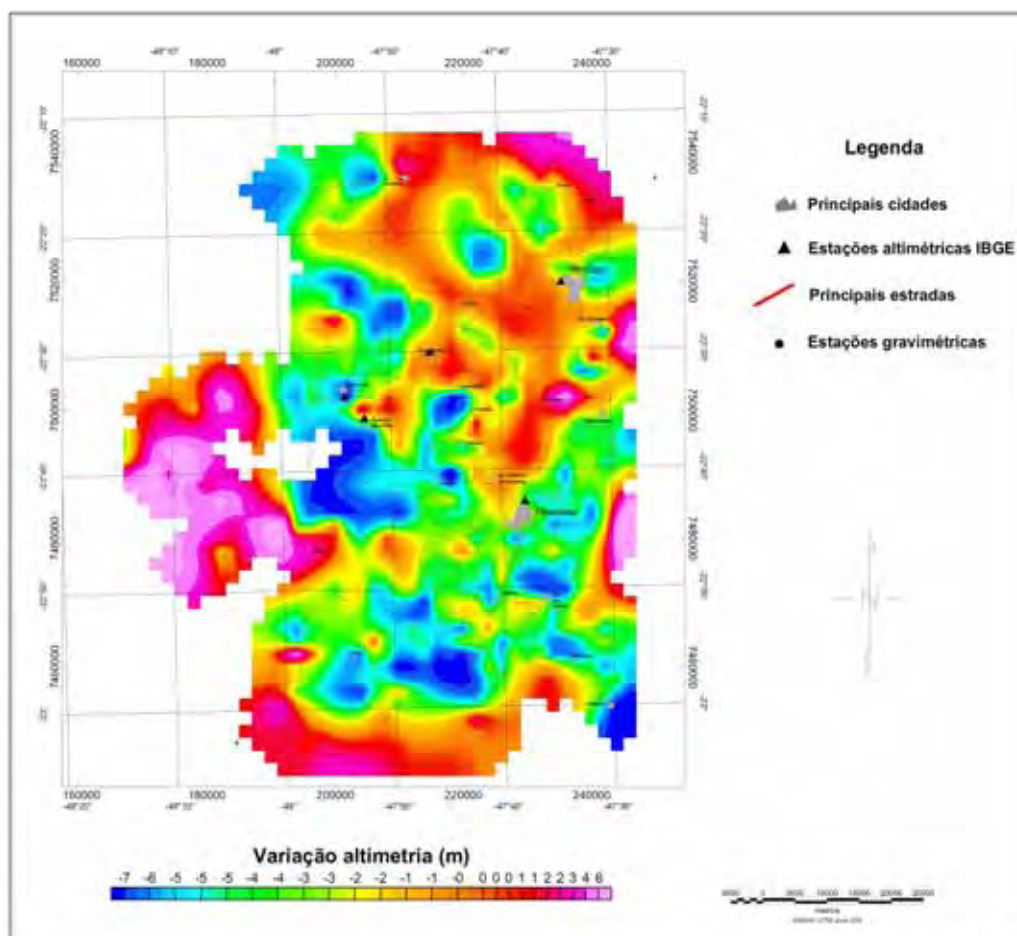
O mapa é produto de um *grid* com células de 50 pontos por 80 pontos (direção X e Y respectivamente) gerado na rotina própria do programa OASIS MONTAJ da Geosoft inc. O *grid* possui um espaçamento de 2.000 metros de cada célula e os valores foram obtidos por interpolação linear, método da mínima curvatura.

As diferenças altimétricas resultantes expressam de forma georeferenciada e espacial a variação de leituras obtidas ao longo de toda a área onde a aquisição gravimétrica foi realizada (Figura 1.3).



**Figura 1.2** Mapa da área de estudo com as estações altimétricas do IBGE utilizadas na determinação da precisão e qualidade dos dados adquiridos por GPS.

A técnica de GPS diferencial no estudo e na aquisição gravimétrica vem sendo usada há poucos anos sendo, portanto, uma aplicação relativamente recente. O emprego desse método motiva ainda alguns questionamentos em relação à qualidade dos dados obtidos, já que os fabricantes desse tipo de equipamento enfatizam a alta precisão que os equipamentos são capazes fornecer (na casa de milímetros). Com o intuito de eliminar dúvidas em relação à qualidade de sinal obtida pelo receptor GPS, essa análise auxilia e certifica uma precisão aceitável frente à escala do levantamento gravimétrico realizado neste estudo.



**Figura 1.3** Mapa com os valores da aquisição GPS e subtraídos dos valores obtidos pelas folhas topográficas 1:10.000.



## APÊNDICE 2 - FÓRMULAS DA GRAVIDADE UTILIZADAS NAS CORREÇÕES REDUÇÕES, PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DOS DADOS DESTE ESTUDO

Na determinação dos valores da anomalia obtidos nesse estudo, usou-se a rotina dentro do programa Geosoft denominada de *Xcelleration Gravity Profession System*. Essa rotina permite que os dados das estações gravimétricas levantados em campo sejam corrigidos, reduzidos e inseridos em uma planilha de forma que possam ser usados na confecção dos mapas e dos respectivos *grids* de curvas isogálicas (isovalores). Em ordem de procedimento, segue-se uma sucinta explanação de cada procedimento seguido de suas respectivas fórmulas matemáticas empregada pela rotina computacional.

### Fator escala do instrumento – Gravímetro

O fator escala do instrumento corrige determinada leitura efetuada no instrumento para valores (em miligal) conhecidos de uma tabela de calibração do instrumento. No caso deste estudo o gravímetro La Coste & Romberg modelo G 987.

$$r_c = r \cdot S(r)$$

Onde:

$r_c$  leitura corrigida em miligals

$r$  leitura do instrumento em unidades da escala de leitura (*dia*)

$S(r)$  fator escala (unidades da escala de leitura/miligal), o qual é uma função da leitura

### Correção de Marés

Se a diferença de horário relativa ao Meridiano de Greenwich (*Greenwich Mean time* – GMT) é provida de uma linha constante (através do parâmetro gm= contido no programa), todas as leituras são corrigidas para as marés terrestres por meio da posição da lua e do sol na hora e na localização de determinada observação. A fórmula completa é muito extensa e complexa para ser citada aqui. Resumidamente o procedimento, expresso de forma matemática é expresso da seguinte forma:

$$r_t = r_c + g_{tide}$$

Onde:

$r_t$  leitura corrigida da maré

$r_c$  leitura da escala corrigida a partir da equação anterior (fator escala do instrumento)

$g_{tide}$  correção de maré

### Correção de deriva

A deriva é calculada baseando-se no erro de fechamento entre a estação base de abertura e de fechamento. Cada *loop* é expresso pela seguinte fórmula:

$$d = \frac{(r_{B2} - r_{B1}) - (g_{B2} - g_{B1})}{t_{B2} - t_{B1}}$$

### Gravidade absoluta

$$g_a = g_{B1} + (r_h - r_{B1}) - (t - t_{B1})d$$

Onde:

$g_a$  gravidade absoluta em miligals

$g_{B1}$  Gravidade absoluta em miligals da base 1

$r_h$  leitura corrigida da estação com referência a altura do instrumento (não efetuado nesse estudo)

$r_{B1}$  leitura da base 1  
 $t$  hora da leitura  
 $t_{B1}$  horário da leitura da base 1  
 $d$  deriva (equação anterior)

### Correção de Latitude

Para a execução da correção de latitude é necessário se ter um valor teórico da gravidade em determinada estação quanto a sua posição e localização em referencia ao esferóide da Terra. Existem três equações opcionais para o cálculo da gravidade teórica:

Fórmula de 1930:

$$g_l = 978049 \cdot [1 + 0.0052884 \sin^2(l) - 0.0000059 \sin^2(2l)]$$

Fórmula de 1967:

$$g_l = 978031.846 \cdot [1 + 0.005278895 \sin^2(l) + 0.000023462 \sin^4(l)]$$

Fórmula de 1980:

$$g_l = 978032.7 \cdot [1 + 0.0053024 \sin^2(l) - 0.0000058 \sin^2(2l)]$$

Onde:

$g_l$  gravidade teórica em miligals (correção de latitude)

$l$  latitude da estação

Obs: Para os levantamentos de caráter local, somente o gradiente devido a latitude é considerada e importante:

$$g_l = 0.000812132 \sin(2l) \cdot y_s$$

Onde:

$g_l$  correção de latitude

$l$  latitude da estação

$y_s$  distância da estação norte com referencia a origem do *grid* em metros

Neste estudo a redução dos dados feita na rotina Geosoft/MAGMAP e a conseqüente determinação do valor de gravidade teórica é feita segundo a fórmula de 1967.

### **Anomalia *Free – Air***

A correção *free –air* é calculada subtraindo-se a correção de latitude (gravidade teórica) do valor de gravidade absoluta e adicionando uma correção para a altitude da estação medida:

$$g_{fa} = g_a - g_l + 0.308596h_s$$

Onde:

$g_{fa}$  anomalia *free-air* em miligals

$g_a$  gravidade absoluta

$g_l$  correção de latitude

$g_s$  altitude da estação em metros

### **Anomalia Bouguer**

$$g_{ba} = g_{fa} - 0.0419088 \cdot [\rho h_s + (\rho_w - \rho)h_w + (\rho_i - \rho_w)h_i] + g_{curv}$$

Onde:

$h_{ba}$  anomalia Bouguer em miligal

$h_{fa}$  anomalia *free – air* (equação anterior)

$\rho$  densidade Bouguer das rochas em g/cm<sup>3</sup>

$\rho_w$  densidade Bouguer da água em g/cm<sup>3</sup>

$\rho_i$  densidade Bouguer do gelo em g/cm<sup>3</sup>

$h_s$  altitude da estação em metros

$h_w$  profundidade da lâmina d'água em metros

$h_i$  espessura do gelo em metros

$g_{curv}$  correção da curvatura

A finalidade da correção de curvatura, como uma das etapas da geração da anomalia Bouguer, é fundamentalmente de se converter a geometria da correção Bouguer a partir de uma placa infinita, cuja espessura corresponde a altitude da estação e da qual o raio (comprimento de arco) desta estação é de 166.735 km. A fórmula de La Fehr é usada para a correção de curvatura (Geosoft, 1999).

### APÊNDICE 3 – TERMINOLOGIA USADA NO MÉTODO DE AQUISIÇÃO DGPS

**IALA** – Associação Internacional de Sinalização Marítima

**Estação de referência** - Estação base onde os dados coletados com um receptor GPS em tempo pré-determinado são armazenados em arquivos específicos

**Rover** - GPS itinerante, ou seja, que executa a coleta de dados ao longo de determinado percurso

**PDOP** - Diluição da precisão da posição

**SNR** - Relação sinal para ruído.

**Máscara de elevação** - Quando um satélite estiver abaixo do horizonte, os sinais GPS devem deslocar-se uma distância maior através da atmosfera, atrasando a recepção pelo receptor. Pode-se ajustar um valor menor da máscara de elevação, porém se o valor for muito baixo, o *rover* pode usar um satélite que a estação de referência não vê. Se isso ocorrer, alguns dados não poderão ser corrigidos diferencialmente pelo pós-processamento.

**Beacons** - Subgrupo de um grande número de radiofaróis marinhos, operam numa faixa FM de 283,5 a 325 kHz. O receptor utiliza essa função para a aquisição de dados com processamento em tempo real. O radiofarol funciona como um comunicador entre a estação de referência e a estação *rover*.

**MSK** - Modulação de manipulação por defasamento mínimo

## APÊNDICE 4 – ESTAÇÕES GRAVIMÉTRICAS E MAGNETOMÉTRICAS ADQUIRIDAS NO ESTUDO

### 4.1 Estações gravimétricas

Estação Obs.	Coordenada X	Coordenada Y	Altitude GPS	Gravidade Abs.	Free Air	Bouguer
1	231340.0	7510698.0	567.500	978586373	-26.232	-89.733
2	232407.0	7509983.0	503.000	978601797	-31.134	-87.418
3	232587.0	7512720.0	527.000	978594541	-29.410	-88.380
4	234334.0	7513216.0	589.000	978582670	-21.881	-87.788
5	233819.0	7506882.0	565.000	978589375	-26.223	-89.445
6	232842.0	7504363.0	636.000	978577539	-17.592	-88.758
7	232140.0	7502209.0	597.500	978587414	-20.833	-87.691
8	240995.0	7501037.0	597.000	978584853	-24.312	-91.115
9	238872.0	7501196.0	594.500	978588678	-21.147	-87.669
10	236895.0	7501299.0	599.000	978587806	-20.551	-87.577
11	234401.0	7501515.0	635.000	978579703	-17.394	-88.449
12	230530.0	7503187.0	638.000	978575128	-20.040	-91.430
13	229637.0	7504540.0	662.500	978570799	-16.019	-90.151
14	228621.0	7505827.0	615.000	978579745	-20.979	-89.796
15	227265.0	7505177.0	532.000	978599110	-27.588	-87.117
16	227363.0	7517433.0	565.000	978600255	-9.209	-72.430
17	228429.0	7508817.0	550.000	978593674	-25.385	-86.928
18	228288.0	7510214.0	510.000	978602047	-28.550	-85.617
19	225652.0	7512354.0	648.500	978569438	-17.159	-89.724
20	224449.0	7514080.0	649.000	978566776	-18.663	-91.283
21	222775.0	7515130.0	622.000	978571910	-21.239	-90.839
22	221429.0	7516137.0	606.000	978572311	-25.184	-92.993
23	224444.0	7515983.0	535.000	978590401	-29.124	-88.988
24	226209.0	7517113.0	616.000	978573665	-20.233	-89.161
25	234410.0	7518559.0	603.000	978575457	-21.704	-89.178
26	232357.0	7517989.0	565.000	978584206	-24.989	-88.210
27	230570.0	7517107.0	623.500	978571626	-20.005	-89.772
28	228824.0	7516684.0	615.500	978573056	-21.269	-90.141
29	219916.0	7514077.0	606.500	978574877	-23.632	-91.497
30	218352.0	7511857.0	605.000	978575810	-24.421	-92.119
31	216732.0	7510375.0	565.000	978576808	-36.603	-99.825
32	215681.0	7508783.0	561.400	978579500	-25.820	-92.678
33	214316.0	7508517.0	590.000	978579326	-27.414	-93.433
34	216541.0	7504628.0	600.000	978582145	-23.773	-90.911
35	217574.0	7503309.0	609.000	978581582	-22.331	-90.476
36	215321.0	7506984.0	597.500	978579500	-25.820	-92.678
37	219164.0	7505120.0	560.000	978591059	-26.947	-89.609
38	221002.0	7505759.0	505.000	978604311	-30.319	-86.827

39	222926.0	7505935.0	610.000	978582149	-19.997	-88.254
40	224279.0	7505319.0	540.000	978597771	-26.346	-86.770
41	224305.0	7503084.0	490.000	978608877	-31.959	-86.788
42	222490.0	7502930.0	546.000	978597833	-25.792	-86.887
43	222503.0	7500236.0	500.000	978607201	-32.174	-88.122
44	220934.0	7497560.0	485.500	978610831	-34.548	-88.874
45	222460.0	7495538.0	521.000	978608170	-27.439	-85.737
46	223231.0	7493318.0	487.000	978613838	-33.555	-88.048
47	225497.0	7494515.0	550.500	978601353	-25.775	-87.374
48	227226.0	7495720.0	575.000	978594254	-24.635	-88.975
49	227630.0	7497723.0	610.000	978586349	-20.585	-88.842
50	228797.0	7500101.0	635.000	978580162	-17.696	-88.750
51	229366.0	7501907.0	655.000	978573479	-17.170	-90.462
52	233115.0	7520169.0	585.500	978576465	-25.159	-90.674
53	231415.0	7519264.0	605.000	978573832	-22.277	-89.975
54	229193.0	7520118.0	646.000	978563729	-19.215	-91.500
55	227323.0	7520067.0	630.000	978566629	-21.264	-91.759
56	225071.0	7519581.0	626.000	978567744	-21.639	-91.686
57	223394.0	7518390.0	630.000	978567266	-21.549	-92.044
58	220144.0	7516403.0	631.500	978567522	-21.937	-92.600
59	218434.0	7515519.0	679.000	978556984	-18.307	-94.285
60	216697.0	7515771.0	674.000	978555957	-20.714	-96.132
61	216381.0	7517113.0	656.000	978557160	-24.292	-97.696
62	215527.0	7518488.0	675.000	978564569	-10.221	-85.751
63	213374.0	7518581.0	720.000	978543137	-17.690	-98.255
64	223766.0	7514541.0	625.000	978571758	-20.815	-90.750
65	225400.0	7513034.0	652.000	978567677	-17.447	-90.403
66	226434.0	7511824.0	647.500	978569370	-17.849	-90.302
67	226917.0	7510194.0	510.000	978595102	-35.492	-92.559
68	226008.0	7508514.0	537.500	978595930	-27.136	-87.280
69	225960.0	7506066.0	522.000	978600907	-28.352	-86.762
70	225197.0	7505628.0	602.500	978607150	2.488	-64.929
71	221282.0	7503701.0	575.000	978590351	-23.867	-88.208
72	220826.0	7507298.0	566.000	978588641	-26.276	-89.610
73	220824.0	7509809.0	615.000	978576629	-21.721	-90.537
74	219231.0	7511196.0	631.500	978571229	-21.214	-91.877
75	220137.0	7512055.0	632.500	978571420	-20.230	-91.004
76	221200.0	7512330.0	621.000	978573273	-21.779	-91.266
77	222725.0	7512661.0	604.500	978577092	-22.877	-90.519
78	223569.0	7511749.0	565.000	978586789	-25.903	-89.124
79	225000.0	7510164.0	550.000	978591312	-26.936	-88.479
80	230983.0	7535549.0	650.000	978554104	-18.790	-91.523
81	233147.0	7535604.0	600.000	978560575	-27.739	-94.877
82	235150.0	7535035.0	595.000	978561687	-28.515	-95.093
83	236934.0	7534640.0	681.000	978544445	-19.461	-95.662
84	237608.0	7532637.0	678.000	978567551	1.569	-74.297



85	238014.0	7530838.0	665.000	978550450	-20.577	-94.988
86	239086.0	7528827.0	657.000	978557452	-17.567	-91.083
87	237531.0	7526776.0	645.000	978557314	-22.205	-94.378
88	237141.0	7524731.0	638.000	978561865	-20.981	-92.371
89	236728.0	7522607.0	624.000	978567357	-21.024	-90.847
90	236520.0	7520903.0	618.000	978569121	-22.086	-91.238
91	237177.0	7519069.0	611.000	978573128	-21.298	-89.667
92	237337.0	7517000.0	567.500	978584305	-24.735	-88.236
93	238555.0	7515669.0	602.000	978578742	-20.429	-87.790
94	239067.0	7513201.0	617.000	978577061	-18.904	-87.944
95	241397.0	7513298.0	605.000	978580883	-18.752	-86.449
96	235238.0	7515651.0	607.000	978578543	-19.063	-86.984
97	234582.0	7512507.0	550.000	978592186	-24.811	-86.354
98	234492.0	7510443.0	561.000	978587907	-26.882	-89.656
99	234238.0	7508621.0	530.000	978597500	-27.901	-87.207
100	234279.0	7506174.0	580.000	978589039	-22.343	-87.243
101	234466.0	7504004.0	630.000	978580725	-16.480	-86.975
102	233480.0	7499338.0	590.000	978589540	-22.693	-88.712
103	232935.0	7492022.0	567.500	978595699	-27.702	-91.203
104	232486.0	7494688.0	570.000	978594632	-26.451	-90.232
105	231833.0	7492742.0	575.000	978594126	-26.533	-90.873
106	230664.0	7491073.0	580.000	978594863	-25.207	-90.107
107	229390.0	7489816.0	546.000	978602903	-28.374	-89.470
108	227862.0	7487952.0	535.000	978606124	-29.613	-89.477
109	226456.0	7487881.0	519.500	978609920	-30.626	-88.756
110	224573.0	7488999.0	472.500	978597347	-57.035	-109.906
111	235946.0	7517426.0	604.000	978575270	-22.248	-89.834
112	233854.0	7519688.0	600.000	978573428	-24.005	-91.143
113	231625.0	7522148.0	560.000	978581309	-27.035	-89.697
114	229826.0	7523869.0	605.000	978568673	-24.780	-92.477
115	228356.0	7525103.0	643.000	978559739	-21.265	-93.214
116	227039.0	7526337.0	652.000	978557335	-20.171	-93.128
117	226581.0	7528317.0	602.500	978564756	-26.887	-94.305
118	225727.0	7530109.0	640.000	978556429	-22.609	-94.222
119	224698.0	7531747.0	597.000	978562167	-29.193	-95.995
120	223731.0	7533567.0	670.000	978544759	-23.023	-97.994
121	221502.0	7534777.0	822.500	978508820	-11.188	-103.223
122	221459.0	7536797.0	825.000	978508787	-9.295	-101.610
123	219759.0	7538118.0	860.000	978499834	-6.677	-102.908
124	217284.0	7539254.0	855.000	978497732	-9.648	-105.319
125	215355.0	7540142.0	789.800	978508058	-18.916	-107.292
126	212843.0	7539201.0	805.080	978502286	-20.483	-110.569
127	210675.0	7537911.0	771.300	978510056	-23.851	-110.157
128	209379.0	7536337.0	757.500	978511829	-27.220	-111.982
129	210720.0	7534200.0	747.000	978516924	-26.600	-110.187
130	208937.0	7533262.0	727.000	978520012	-30.201	-111.550

131	207918.0	7532163.0	680.000	978529389	-35.944	-112.034
132	206808.0	7530598.0	752.000	978515362	-28.636	-112.782
133	207406.0	7529073.0	747.500	978518516	-27.749	-111.391
134	207711.0	7527161.0	747.000	978521572	-25.944	-109.530
135	207982.0	7525388.0	697.000	978532916	-31.048	-109.040
136	209747.0	7524934.0	620.000	978551944	-36.061	-105.437
137	211566.0	7524376.0	625.000	978553952	-32.849	-102.784
138	213117.0	7523639.0	597.500	978562539	-33.187	-100.046
139	214238.0	7522433.0	617.500	978560073	-30.184	-99.280
140	215747.0	7521459.0	577.000	978570767	-32.563	-97.127
141	217351.0	7520486.0	650.000	978555072	-26.305	-99.038
142	219014.0	7519809.0	574.000	978577366	-27.870	-92.099
143	220815.0	7518411.0	550.000	978582409	-31.055	-92.598
144	227996.0	7522505.0	614.000	978566152	-25.287	-93.991
145	230423.0	7522155.0	567.000	978579835	-26.332	-89.777
146	232819.0	7523935.0	558.000	978580303	-27.645	-90.084
147	234076.0	7525549.0	562.000	978576864	-28.937	-91.823
148	235901.0	7526299.0	580.000	978574914	-24.920	-89.820
149	239535.0	7525110.0	637.500	978559653	-23.154	-94.488
150	222136.0	7489448.0	522.541	978605197	-33.457	-91.928
151	219912.0	7489731.0	469.821	978616646	-38.090	-90.662
152	217830.0	7489981.0	480.137	978614411	-36.974	-90.700
153	215614.0	7490187.0	456.980	978618240	-40.149	-91.283
154	213446.0	7491935.0	464.196	978614079	-41.047	-92.989
155	211423.0	7492786.0	495.670	978607861	-37.038	-92.501
156	209997.0	7494044.0	536.027	978597877	-33.824	-93.804
157	207857.0	7495359.0	486.220	978606244	-40.043	-94.450
158	206469.0	7496748.0	493.047	978604070	-39.293	-94.464
159	204901.0	7497750.0	461.879	978610408	-41.977	-93.660
160	203151.0	7499263.0	542.701	978592631	-33.919	-94.646
161	201877.0	7501067.0	541.034	978591315	-34.694	-95.234
162	200707.0	7502949.0	519.032	978593760	-37.940	-96.018
163	199113.0	7502687.0	539.077	978589539	-36.108	-96.429
164	200068.0	7505118.0	628.329	978566264	-30.450	-100.757
165	199011.0	7506546.0	772.595	978530395	-20.964	-107.415
166	199282.0	7508317.0	928.294	978499535	-2.759	-106.632
167	200671.0	7509737.0	936.867	978496537	-2.309	-107.141
168	200806.0	7512365.0	940.897	978490562	-5.531	-110.814
169	199757.0	7513940.0	893.742	978499970	-9.758	-109.764
170	199432.0	7516201.0	945.319	978487584	-4.925	-110.702
171	199904.0	7517623.0	931.117	978489932	-6.148	-110.337
172	200476.0	7519559.0	913.306	978490915	-9.557	-111.753
173	201424.0	7521293.0	942.990	978483323	-7.005	-112.522
174	202606.0	7519848.0	945.174	978485578	-4.917	-110.679
175	202988.0	7517981.0	958.996	978485143	-2.162	-109.470
176	205051.0	7517603.0	1.037.693	978469954	6.694	-109.420

177	206722.0	7516953.0	1.015.124	978477642	7.026	-106.563
178	208416.0	7516148.0	1.048.041	978471160	10.222	-107.050
179	210528.0	7515839.0	991.007	978486329	7.590	-103.301
180	212286.0	7515373.0	1.002.433	978481461	5.961	-106.208
181	213717.0	7516644.0	946.887	978492615	0.689	-105.265
182	227623.0	7487133.0	502.880	978610990	-35.131	-91.401
183	229138.0	7486022.0	526.620	978607237	-32.218	-91.145
184	231109.0	7485105.0	561.700	978600257	-28.924	-91.777
185	232821.0	7483437.0	577.760	978598382	-26.828	-91.478
186	233317.0	7481151.0	609.910	978592378	-24.244	-92.491
187	234047.0	7478907.0	624.560	978591054	-22.359	-92.245
188	235062.0	7476853.0	623.210	978592402	-22.632	-92.367
189	235647.0	7474686.0	595.560	978598473	-26.360	-93.001
190	236567.0	7472761.0	580.770	978605634	-24.893	-89.879
191	237000.0	7470500.0	632.710	978597478	-18.342	-89.140
192	239561.0	7468947.0	636.870	978600554	-14.914	-86.177
193	241163.0	7467219.0	640.600	978602034	-13.308	-84.988
194	242334.0	7465054.0	612.850	978601589	-23.591	-92.167
195	242125.0	7463018.0	598.240	978609554	-21.322	-88.263
196	242742.0	7460099.0	571.170	978610425	-30.516	-94.428
197	243015.0	7457657.0	509.220	978618447	-43.043	-100.023
198	243564.0	7454211.0	592.290	978635074	-2.804	-69.079
199	241047.0	7456929.0	589.470	978615027	-22.105	-88.065
200	240872.0	7459063.0	548.310	978614458	-34.126	-95.480
201	239133.0	7460495.0	513.490	978622367	-36.107	-93.565
202	237424.0	7461767.0	564.280	978629105	-12.934	-76.075
203	236544.0	7464441.0	603.570	978615073	-13.271	-80.808
204	235965.0	7466340.0	647.460	978604846	-8.838	-81.287
205	234378.0	7468154.0	619.250	978593252	-28.063	-97.355
206	234158.0	7469907.0	617.470	978597615	-23.225	-92.318
207	232504.0	7471414.0	606.870	978597781	-25.436	-93.342
208	230542.0	7472613.0	607.260	978598219	-24.158	-92.109
209	228767.0	7474132.0	555.060	978608574	-29.009	-91.118
210	226695.0	7475694.0	558.330	978607312	-28.331	-90.807
211	225925.0	7473652.0	558.810	978608649	-28.026	-90.555
212	225014.0	7471196.0	599.250	978602274	-23.343	-90.397
213	224188.0	7469057.0	632.880	978597768	-18.708	-89.525
214	223595.0	7466974.0	640.300	978597732	-17.663	-89.310
215	222770.0	7464828.0	578.140	978613332	-22.489	-87.181
216	227607.0	7477972.0	581.980	978599653	-27.377	-92.499
217	228397.0	7480739.0	579.860	978599862	-26.222	-91.106
218	228357.0	7482588.0	518.630	978611825	-32.080	-90.113
219	225902.0	7482547.0	479.490	978618606	-37.376	-91.029
220	224260.0	7482451.0	495.390	978614480	-36.634	-92.066
221	222044.0	7482199.0	532.040	978606754	-33.172	-92.706
222	220327.0	7482864.0	486.530	978617320	-36.246	-90.687

223	218001.0	7483542.0	469.940	978620859	-37.408	-89.993
224	216300.0	7483442.0	480.490	978618860	-36.191	-89.956
225	214157.0	7484332.0	501.470	978612739	-35.298	-91.411
226	211950.0	7484268.0	496.950	978612426	-37.019	-92.626
227	209810.0	7483426.0	484.370	978615780	-38.013	-92.212
228	208791.0	7481937.0	525.460	978611480	-30.485	-89.282
229	207610.0	7480910.0	513.680	978614797	-31.386	-88.865
230	206177.0	7481061.0	500.580	978617075	-33.047	-89.061
231	204079.0	7480652.0	566.380	978603477	-26.554	-89.930
232	201544.0	7481049.0	591.500	978597345	-24.674	-90.861
233	199354.0	7481482.0	593.660	978597605	-23.471	-89.900
234	178909.0	7476383.0	464.850	978627343	-36.203	-88.218
235	181027.0	7478922.0	512.990	978614614	-32.626	-90.028
236	182076.0	7480637.0	553.530	978603608	-30.139	-92.077
237	183603.0	7481877.0	561.550	978600352	-30.218	-93.054
238	185329.0	7482582.0	574.230	978598274	-27.995	-92.250
239	187177.0	7483783.0	561.090	978599561	-30.089	-92.873
240	189561.0	7483834.0	565.400	978599770	-28.549	-91.815
241	191163.0	7482658.0	557.380	978603632	-27.862	-90.231
242	192618.0	7481292.0	578.770	978599832	-25.872	-90.634
243	194073.0	7482187.0	590.080	978597064	-24.647	-90.675
244	195622.0	7482375.0	609.300	978593055	-22.634	-90.812
245	196602.0	7480799.0	587.940	978599682	-23.524	-89.312
246	214541.0	7487863.0	454.340	978620992	-39.546	-90.385
247	213086.0	7487068.0	523.060	978606178	-33.599	-92.127
248	210917.0	7487211.0	465.750	978616704	-40.651	-92.767
249	208987.0	7487385.0	493.430	978611346	-37.346	-92.559
250	207126.0	7487617.0	491.260	978611811	-37.394	-92.365
251	205521.0	7488498.0	550.110	978598280	-32.237	-93.792
252	203568.0	7488859.0	502.490	978608164	-36.817	-93.044
253	201773.0	7487865.0	519.870	978606254	-33.919	-92.090
254	200372.0	7486899.0	448.320	978623571	-39.226	-89.392
255	199981.0	7484850.0	554.510	978602258	-28.953	-91.000
256	199708.0	7483226.0	570.880	978600193	-26.905	-90.784
257	183182.0	7484086.0	566.470	978598186	-29.579	-92.965
258	182216.0	7485612.0	541.470	978604025	-30.559	-91.147
259	180582.0	7486756.0	535.500	978602910	-32.833	-92.754
260	179713.0	7488339.0	518.460	978604373	-35.702	-93.715
261	177873.0	7489167.0	527.200	978600986	-35.889	-94.881
262	175962.0	7489729.0	540.230	978597083	-35.422	-95.872
263	173926.0	7490323.0	532.140	978598662	-35.971	-95.515
264	172125.0	7490865.0	549.660	978593475	-35.416	-96.921
265	169909.0	7491506.0	521.310	978598326	-38.915	-97.248
266	173800.0	7494264.0	449.320	978612419	-45.491	-95.768
267	174743.0	7496585.0	501.320	978600825	-39.709	-95.805
268	174898.0	7499028.0	483.640	978603461	-41.120	-95.237

269	177257.0	7500586.0	519.810	978595410	-37.139	-95.304
270	179760.0	7501405.0	573.270	978583970	-31.639	-95.786
271	182299.0	7501283.0	501.910	978598486	-39.245	-95.407
272	185105.0	7501450.0	549.500	978587908	-35.074	-96.561
273	187020.0	7500630.0	512.730	978596155	-38.670	-96.043
274	189885.0	7501077.0	565.000	978584850	-33.620	-96.841
275	193267.0	7501330.0	527.980	978592986	-36.802	-95.881
276	196617.0	7501822.0	531.300	978593007	-35.511	-94.962
277	227518.0	7470851.0	578.090	978606670	-25.704	-90.390
278	229304.0	7470698.0	613.150	978598124	-23.538	-92.147
279	231613.0	7470402.0	639.340	978590984	-22.793	-94.333
280	230371.0	7469241.0	644.250	978591442	-21.483	-93.573
281	229041.0	7467683.0	641.150	978596854	-17.923	-89.665
282	228066.0	7465950.0	596.810	978606995	-22.466	-89.247
283	226982.0	7464597.0	630.000	978602769	-17.228	-87.723
284	226924.0	7462513.0	572.390	978617307	-21.684	-85.733
285	228016.0	7461340.0	547.930	978623621	-23.616	-84.927
286	229791.0	7461119.0	600.470	978611456	-19.715	-86.905
287	231322.0	7461866.0	547.570	978621347	-25.728	-86.999
288	233524.0	7462087.0	588.060	978611820	-22.654	-88.455
289	234873.0	7460806.0	568.970	978617861	-23.266	-86.932
290	228811.0	7459433.0	588.470	978616013	-19.836	-85.684
291	226985.0	7459362.0	526.320	978631861	-23.189	-82.083
292	225203.0	7460264.0	512.970	978632556	-26.069	-83.468
293	223395.0	7460639.0	578.470	978616899	-21.273	-86.002
294	221427.0	7461933.0	518.150	978627620	-28.390	-86.369
295	221254.0	7459485.0	498.400	978635077	-28.456	-84.225
296	221554.0	7457231.0	467.070	978644227	-30.296	-82.560
297	221563.0	7454477.0	503.040	978639041	-25.995	-82.283
298	221527.0	7452878.0	544.790	978631052	-22.035	-82.995
299	221755.0	7471378.0	594.730	978603301	-23.570	-90.118
300	220105.0	7472766.0	564.220	978609742	-25.718	-88.852
301	225700.0	7484442.0	458.049	978625642	-35.855	-87.109
302	218967.0	7474279.0	534.863	978615872	-27.755	-87.604
303	218534.0	7475279.0	544.707	978612920	-27.082	-88.033
304	217237.0	7474121.0	502.914	978622699	-30.861	-87.135
305	215779.0	7472827.0	565.699	978613040	-21.882	-85.182
306	215432.0	7470877.0	524.400	978623309	-25.490	-84.168
307	214382.0	7469459.0	542.782	978619204	-24.737	-85.472
308	213127.0	7470818.0	527.616	978621665	-26.150	-85.189
309	212881.0	7467625.0	522.346	978625061	-26.239	-84.687
310	211285.0	7466556.0	522.677	978626036	-25.767	-84.253
311	209366.0	7465796.0	507.819	978631010	-25.800	-82.623
312	207572.0	7465659.0	530.940	978626959	-22.776	-82.186
313	206030.0	7465288.0	502.970	978634323	-24.243	-80.523
314	205232.0	7463636.0	499.941	978637512	-22.943	-78.885

315	203365.0	7461908.0	482.657	978643065	-23.712	-77.719
316	205879.0	7453774.0	467.262	978651457	-24.857	-77.142
317	204529.0	7455144.0	487.365	978646732	-22.561	-77.095
318	204126.0	7457007.0	460.942	978650525	-25.826	-77.404
319	204086.0	7458948.0	486.324	978643331	-24.052	-78.470
320	216774.0	7476753.0	487.062	978624108	-32.807	-87.307
321	215135.0	7475558.0	518.922	978618241	-29.520	-87.586
322	213524.0	7474382.0	525.666	978621104	-25.242	-84.062
323	212040.0	7472885.0	549.280	978615908	-24.006	-85.468
324	209918.0	7473340.0	548.670	978615613	-24.201	-85.595
325	207996.0	7473142.0	526.440	978621142	-25.625	-84.532
326	205831.0	7472951.0	483.810	978630171	-29.839	-83.976
327	223385.0	7480915.0	502.874	978614000	-35.688	-91.958
328	222012.0	7479505.0	494.652	978618365	-34.665	-90.015
329	220848.0	7477884.0	516.040	978616442	-30.917	-88.660
330	219272.0	7476796.0	556.423	978609469	-26.043	-88.305
331	203640.0	7471535.0	475.484	978633151	-30.228	-83.433
332	201986.0	7470642.0	466.298	978636024	-30.691	-82.868
333	199969.0	7471463.0	510.504	978625937	-26.634	-83.758
334	199051.0	7473064.0	489.110	978628681	-29.550	-84.280
335	198318.0	7470057.0	504.310	978628905	-26.378	-82.809
336	196695.0	7469034.0	481.589	978634536	-28.336	-82.224
337	195111.0	7467495.0	461.876	978639849	-29.984	-81.667
338	194652.0	7465654.0	446.906	978645415	-30.106	-80.114
339	193609.0	7464185.0	492.263	978637014	-25.356	-80.438
340	194467.0	7462328.0	509.401	978634537	-23.637	-80.638
341	194565.0	7460438.0	465.001	978645296	-27.685	-79.717
342	194092.0	7458341.0	508.429	978636982	-23.818	-80.709
343	193737.0	7456150.0	521.229	978635130	-22.997	-81.321
344	192604.0	7453988.0	508.087	978638519	-24.916	-81.769
345	209324.0	7454180.0	560.612	978630410	-16.898	-79.628
346	210102.0	7456088.0	527.962	978636999	-19.276	-78.353
347	210347.0	7457976.0	471.237	978647830	-24.849	-77.578
348	212074.0	7459033.0	525.109	978634237	-21.218	-79.976
349	213338.0	7460610.0	525.316	978630224	-24.259	-83.040
350	214636.0	7461151.0	535.924	978625964	-24.944	-84.912
351	216202.0	7462024.0	531.383	978625703	-26.113	-85.573
352	217521.0	7462747.0	555.361	978619634	-24.375	-86.518
353	219917.0	7462292.0	552.406	978619718	-25.495	-87.307
354	219974.0	7464300.0	527.594	978624046	-27.652	-86.688
355	219819.0	7466086.0	572.590	978613432	-23.337	-87.408
356	220029.0	7467927.0	589.290	978607775	-22.768	-88.707
357	219870.0	7467809.0	616.050	978599637	-22.715	-91.649
358	221504.0	7470860.0	577.930	978606197	-26.158	-90.826
359	222300.0	7473311.0	596.880	978600425	-24.664	-91.452
360	223817.0	7474664.0	575.640	978603724	-27.147	-91.559

361	224695.0	7476453.0	558.060	978605806	-29.459	-91.904
362	225511.0	7477908.0	565.920	978602851	-29.151	-92.475
363	238643.0	7500510.1	599.900	978587741	-20.812	-87.939
364	238235.0	7498786.1	576.500	978592740	-24.026	-88.535
365	238185.0	7497633.5	544.200	978598757	-28.642	-89.536
366	236977.0	7496096.9	605.800	978588359	-20.907	-88.694
367	235699.0	7494396.7	598.000	978590204	-22.439	-89.353
368	236633.0	7492706.8	587.500	978594073	-22.798	-88.537
369	236390.0	7491115.4	515.400	978608607	-31.433	-89.104
370	236242.0	7489674.8	534.900	978605213	-29.642	-89.496
371	242372.0	7494756.1	590.700	978587617	-27.138	-93.235
372	241455.0	7492906.2	570.200	978595243	-26.899	-90.702
373	239855.0	7491588.2	552.600	978601692	-26.629	-88.463
374	237907.0	7490899.1	576.100	978596605	-24.844	-89.308
375	234487.0	7488691.4	491.800	978612431	-36.277	-91.308
376	232688.0	7487421.2	490.900	978613799	-35.904	-90.834
377	230571.0	7487811.0	484.900	978612939	-38.369	-92.627
378	243968.0	7481928.0	526.250	978610056	-32.039	-90.924
379	241771.0	7482595.0	531.700	978609894	-30.110	-89.606
380	240127.0	7483447.0	502.700	978615317	-33.125	-89.376
381	238083.0	7484435.0	576.250	978599319	-25.632	-90.185
382	235841.0	7484841.0	575.250	978598943	-26.259	-90.628
383	233488.0	7484889.0	575.500	978598596	-26.477	-90.874
384	230499.0	7485456.0	524.200	978607399	-33.145	-91.801
385	213438.0	7504743.0	506.780	978599051	-35.530	-92.237
386	211563.0	7505152.0	521.310	978595371	-34.471	-92.804
387	212754.0	7506993.0	569.280	978595053	-18.937	-92.800
388	211695.0	7508087.0	539.080	978590249	-32.420	-92.741
389	210022.0	7508946.0	543.400	978588814	-32.008	-92.813
390	208526.0	7509701.0	494.580	978597609	-37.829	-93.170
391	207451.0	7510903.0	555.860	978582716	-33.107	-95.306
392	205626.0	7511535.0	513.340	978589883	-38.678	-96.119
393	204097.0	7513021.0	595.090	978567624	-34.838	-101.426
394	202482.0	7512866.0	630.110	978558513	-33.213	-103.720
395	200209.0	7524663.0	920.050	978479167	-16.290	-119.241
396	199056.0	7526342.0	890.440	978479741	-23.880	-123.517
397	198097.0	7528068.0	914.200	978472365	-22.925	-125.221
398	199490.0	7529262.0	890.190	978477298	-24.734	-124.343
399	209420.0	7537236.0	757.670	978510333	-28.147	-112.927
400	207485.0	7536560.0	744.670	978510820	-32.037	-115.363
401	205418.0	7535977.0	712.090	978516569	-36.652	-116.333
402	203223.0	7535593.0	742.380	978507749	-36.320	-119.390
403	201204.0	7533327.0	785.510	978500165	-31.866	-119.762
404	200588.0	7531138.0	818.190	978491665	-31.525	-123.078
405	199770.0	7534990.0	718.970	978513953	-37.646	-118.096
406	197191.0	7534363.0	745.760	978506866	-36.796	-120.244

407	194893.0	7533876.0	700.330	978517854	-40.080	-118.444
408	192744.0	7533491.0	717.330	978513833	-39.050	-119.317
409	207262.0	7502376.0	472.900	978607030	-39.305	-92.221
410	208935.0	7503706.0	486.800	978602551	-38.745	-93.217
411	205194.0	7501821.0	556.700	978588547	-32.225	-94.518
412	203009.0	7502255.0	519.200	978594579	-37.491	-95.587
413	200836.0	7501619.0	509.300	978597878	-37.589	-94.577
414	202946.0	7503319.0	572.400	978581878	-33.160	-97.209
415	201362.0	7505702.0	605.300	978571552	-31.942	-99.673
416	203538.0	7506061.0	528.300	978591172	-35.901	-95.016
417	204577.0	7505214.0	591.100	978578004	-30.189	-96.331
418	205887.0	7504138.0	572.500	978583174	-31.394	-95.454
419	223744.0	7490100.0	468.130	978617672	-37.408	-89.790
420	223662.0	7491970.0	512.250	978607536	-32.845	-90.164
421	221846.0	7493154.0	544.930	978599783	-29.809	-90.784
422	220478.0	7492664.0	549.290	978599369	-29.147	-90.610
423	218781.0	7491810.0	522.870	978605648	-31.496	-90.004
424	220438.0	7494666.0	562.040	978595736	-27.686	-90.576
425	219613.0	7495497.0	570.310	978592490	-27.890	-91.706
426	217580.0	7496003.0	543.300	978598438	-29.964	-90.757
427	216276.0	7496131.0	535.630	978599863	-30.817	-90.752
428	214593.0	7495436.0	524.780	978600214	-34.198	-92.919
429	213393.0	7494329.0	514.170	978602610	-35.704	-93.238
430	213525.0	7492881.0	490.860	978608813	-37.533	-92.458
431	217729.0	7496821.0	542.890	978598177	-29.880	-90.628
432	219403.0	7497325.0	486.350	978609598	-35.634	-90.055
433	221065.0	7498065.0	482.360	978609425	-36.627	-90.602
434	221458.0	7500085.0	504.270	978604008	-34.121	-90.547
435	219988.0	7501813.0	582.050	978587241	-25.872	-91.001
436	218320.0	7502915.0	598.640	978582987	-24.353	-91.339
437	215176.0	7503760.0	494.010	978602857	-36.251	-91.529
438	214908.0	7501921.0	560.780	978589507	-30.054	-92.803
439	215913.0	7500520.0	591.200	978583971	-27.022	-93.175
440	215879.0	7498743.0	539.450	978597661	-30.327	-90.690
441	214307.0	7497756.0	511.210	978601286	-35.970	-93.173
442	216783.0	7496897.0	512.650	978605985	-31.350	-88.714
443	213383.0	7496706.0	479.370	978609308	-38.370	-92.010
444	210867.0	7491539.0	520.630	978603093	-34.814	-93.071
445	211958.0	7491342.0	448.640	978618234	-42.015	-92.216
446	212260.0	7490249.0	444.660	978619892	-42.221	-91.977
447	213631.0	7488423.0	465.740	978515692	-140.989	-90.100
448	215787.0	7486208.0	501.990	978613854	-32.948	-89.119
449	217630.0	7485456.0	481.670	978619747	-33.781	-87.678
450	219683.0	7485360.0	499.340	978614947	-33.206	-89.080
451	221383.0	7485238.0	514.930	978611186	-32.245	-89.864
452	223450.0	7484892.0	463.490	978622107	-37.421	-89.284



453	238006.0	7520916.0	619.600	978568724	-21.992	-91.323
454	239582.0	7519076.0	591.430	978575576	-24.904	-91.083
455	241376.0	7518795.0	615.600	978571807	-21.393	-90.277
456	243096.0	7518667.0	641.140	978564318	-21.090	-92.832
457	239263.0	7524314.0	611.980	978562653	-28.478	-96.957
458	234450.0	7527628.0	600.110	978566647	-26.202	-93.352
459	233496.0	7529071.0	607.210	978562776	-27.047	-94.991
460	232562.0	7530555.0	636.360	978554197	-25.772	-96.978
461	231302.0	7531534.0	672.200	978545272	-23.064	-98.281
462	232337.0	7532437.0	634.270	978552755	-26.780	-97.753
463	232640.0	7533469.0	593.420	978561093	-30.462	-96.864
464	233186.0	7534459.0	591.760	978560366	-31.141	-97.357
465	233209.0	7536139.0	564.200	978565444	-33.609	-96.741
466	232072.0	7535351.0	600.940	978557493	-30.660	-97.903
467	230180.0	7535644.0	650.630	978546676	-25.958	-98.761
468	229306.0	7536980.0	628.790	978550605	-27.997	-98.356
469	229624.0	7539257.0	584.020	978559690	-31.432	-96.781
470	227750.0	7534898.0	694.350	978537034	-22.509	-100.205
471	226861.0	7534707.0	714.770	978533243	-20.099	-100.079
472	225097.0	7534632.0	619.340	978554492	-28.324	-97.626
473	225753.0	7536376.0	625.350	978551206	-28.767	-98.741
474	226418.0	7532465.0	676.520	978543474	-22.949	-98.649
475	227002.0	7530802.0	676.510	978545065	-22.318	-98.017
476	222947.0	7531602.0	687.750	978542271	-21.144	-98.101
477	221916.0	7532998.0	687.690	978541123	-21.502	-98.452
478	220595.0	7532018.0	606.480	978559458	-28.775	-96.638
479	221293.0	7530584.0	589.770	978564589	-29.627	-95.620
480	221394.0	7528989.0	643.800	978554868	-23.588	-95.627
481	221907.0	7527824.0	645.330	978555907	-22.750	-94.960
482	223616.0	7527110.0	636.850	978558601	-23.099	-94.360
483	225448.0	7526470.0	600.910	978566186	-26.989	-94.229
484	226321.0	7525376.0	653.000	978555714	-22.022	-95.090
485	226231.0	7524046.0	616.110	978564744	-25.137	-94.077
486	225174.0	7522573.0	577.070	978573636	-29.126	-93.698
487	223743.0	7522304.0	630.450	978563128	-23.301	-93.846
488	221897.0	7522780.0	642.700	978559874	-22.483	-94.398
489	220534.0	7521885.0	640.670	978559287	-24.196	-95.885
490	236235.0	7519345.0	602.580	978572315	-24.537	-91.964
491	236994.0	7517507.0	590.000	978576804	-24.993	-91.012
492	237375.0	7518190.0	589.680	978576357	-25.151	-91.134
493	236634.0	7516109.0	563.960	978583995	-26.638	-89.743
494	235360.0	7521399.0	617.090	978566955	-24.232	-93.282
495	234135.0	7521961.0	621.400	978565776	-23.747	-93.279
496	233093.0	7523442.0	538.510	978582708	-31.535	-91.793
497	232110.0	7525553.0	543.960	978579169	-32.173	-93.040
498	231032.0	7526542.0	573.950	978572155	-29.355	-93.578

499	229806.0	7527842.0	616.400	978561266	-26.388	-95.361
500	229635.0	7529654.0	621.270	978558859	-26.253	-95.771
501	229924.0	7531153.0	708.510	978537384	-19.952	-99.232
502	231117.0	7532802.0	639.170	978551257	-26.546	-98.066
503	221603.0	7451833.0	552.040	978631656	-19.802	-81.573
504	221815.0	7449351.0	565.030	978630456	-18.451	-81.675
505	221057.0	7447422.0	534.090	978637639	-21.939	-81.702
506	213757.0	7445053.0	559.280	978632942	-20.173	-82.754
507	211989.0	7445691.0	524.250	978640169	-23.361	-82.023
508	210764.0	7447212.0	465.590	978654210	-26.515	-78.613
509	210290.0	7448966.0	481.540	978648740	-26.029	-79.912
510	207769.0	7449328.0	556.190	978635215	-16.277	-78.513
511	205554.0	7449548.0	570.010	978632080	-14.992	-78.774
512	203039.0	7449252.0	558.780	978634009	-16.673	-79.199
513	200891.0	7448445.0	544.430	978638794	-16.765	-77.685
514	198688.0	7448574.0	503.990	978645814	-22.124	-78.518
515	196199.0	7448679.0	495.080	978645727	-24.869	-80.267
516	194449.0	7449667.0	488.820	978645910	-26.017	-80.715
517	192700.0	7450496.0	489.000	978644880	-26.485	-81.202
518	207196.0	7451044.0	557.410	978633605	-16.497	-78.870
519	210592.0	7455207.0	546.500	978633910	-17.160	-78.312
520	210010.0	7460063.0	465.070	978649101	-24.251	-76.291
521	208647.0	7461016.0	508.010	978638751	-20.777	-77.622
522	207844.0	7462552.0	528.220	978631929	-20.456	-79.562
523	207212.0	7464139.0	516.150	978632380	-22.796	-80.552
524	242205.0	7512876.0	600.810	978581447	-19.727	-86.956
525	243239.0	7511143.0	697.060	978562044	-10.434	-88.433
526	244016.0	7509379.0	768.810	978546881	-4.479	-90.506
527	243737.0	7507394.0	795.010	978541864	-2.552	-91.511
528	242096.0	7506861.0	757.850	978551030	-5.145	-89.945
529	241815.0	7504989.0	689.010	978565036	-13.458	-90.556
530	240754.0	7506176.0	689.450	978565941	-11.723	-88.870
531	239439.0	7507460.0	626.690	978579554	-16.725	-86.849
532	238932.0	7508658.0	616.520	978580880	-17.842	-86.828
533	238677.0	7505279.0	621.080	978579550	-19.710	-89.207
534	238254.0	7504751.0	588.340	978587815	-21.848	-87.681
535	236319.0	7506073.0	618.620	978580314	-19.223	-88.445
536	240521.0	7502566.0	611.350	978583315	-20.530	-88.938
537	229639.0	7504543.0	649.620	978570817	-19.969	-90.660
538	228603.0	7502834.0	649.720	978571919	-19.812	-90.110
539	226721.0	7501937.0	629.610	978576720	-21.715	-90.120
540	225259.0	7501790.0	585.200	978587933	-24.277	-89.758
541	224507.0	7500282.0	486.450	978610111	-33.435	-87.867
542	224356.0	7499189.0	527.200	978602213	-29.388	-88.380
543	223948.0	7497068.0	486.230	978612164	-33.300	-87.708

#### 4.2 Estações magnetométricas

<b>Estação Obs.</b>	<b>Coordenada X</b>	<b>Coordenada Y</b>	<b>Campo Mag Total Medido nT</b>
1	226631.00	7511616.00	23048.00
2	225458.00	7512812.00	23047.00
3	224099.00	7514386.00	23035.00
4	222361.00	7515429.00	23189.00
5	220594.00	7516762.00	23118.00
6	217230.00	7515593.00	23168.00
7	216095.00	7516521.00	23173.00
8	215777.00	7518074.00	23170.00
9	213439.00	7518600.00	23180.00
10	213254.00	7517712.00	23174.00
11	223181.00	7517837.00	23220.00
12	224821.00	7520184.00	23200.00
13	226761.00	7521945.00	23133.00
14	229772.00	7522195.00	23106.00
15	232283.00	7523502.00	23138.00
16	235044.00	7527044.00	23132.00
17	238208.00	7525732.00	22960.00
18	232983.00	7518051.00	22791.00
19	231314.00	7517584.00	23145.00
20	229889.00	7515880.00	23119.00
21	229032.00	7514467.00	23130.00
22	228592.00	7512775.00	23135.00
23	228444.00	7511145.00	23140.00
24	227556.00	7510211.00	23125.00
25	226068.00	7509438.00	23025.00
26	224525.00	7509463.00	23013.00
27	222718.00	7508644.00	23041.00
28	222315.00	7507041.00	23023.00
29	221638.00	7505515.00	23039.00
30	220579.00	7503975.00	23041.00
31	219065.00	7502684.00	22986.00
32	220743.00	7500990.00	23094.00
33	221207.00	7498750.00	23057.00
34	221569.00	7496478.00	23039.00
35	222795.00	7494858.00	22890.00
36	217283.00	7503677.00	23102.00
37	215911.00	7505471.00	23170.00
38	215001.00	7508809.00	23101.00
39	216735.00	7509028.00	23094.00
40	217269.00	7510842.00	23144.00

41	218968.00	7512317.00	23035.00
42	220568.00	7514832.00	23039.00
43	223561.00	7515458.00	23182.00
44	224872.00	7516547.00	23075.00
45	226793.00	7517080.00	23060.00
46	228863.00	7516682.00	23093.00
47	230355.00	7517007.00	23092.00
48	226038.00	7508651.00	23026.00
49	225799.00	7506881.00	23100.00
50	225100.00	7506202.00	23125.00
51	225270.00	7504207.00	23150.00
52	235149.00	7515186.00	23074.00
53	234583.00	7513251.00	22989.00
54	234629.00	7511298.00	22992.00
55	234346.00	7509482.00	23250.00
56	234143.00	7507410.00	23117.00
57	234347.00	7505487.00	23100.00
58	234343.00	7503378.00	23123.00
59	233740.00	7500574.00	23155.00
60	233294.00	7498470.00	23200.00
61	232782.00	7496104.00	23125.00
62	232297.00	7493821.00	23186.00
63	231466.00	7492057.00	23226.00
64	230019.00	7490508.00	23115.00
65	228805.00	7488815.00	23112.00
66	227507.00	7487539.00	23130.00
67	236025.00	7501339.00	23137.00
68	238210.00	7501224.00	23192.00
69	215268.00	7506826.00	23167.00
70	214383.00	7505058.00	23102.00
71	212339.00	7504923.00	23053.00
72	210144.00	7504858.00	23174.00
73	208585.00	7503355.00	23042.00
74	206898.00	7502160.00	23024.00
75	205041.00	7501863.00	23095.00
76	203184.00	7502289.00	23099.00
77	200904.00	7501583.00	23160.00
78	198445.00	7501731.00	23156.00
79	196399.00	7501763.00	23150.00
80	194522.00	7501311.00	23149.00
81	192521.00	7501311.00	23159.00
82	199631.00	7505813.00	22821.00
83	200203.00	7509033.00	23092.00
84	201774.00	7508154.00	23122.00
85	202607.00	7499923.00	23075.00

86	204076.00	7498767.00	23080.00
87	205309.00	7497651.00	23090.00
88	206878.00	7496115.00	23112.00
89	208725.00	7494954.00	23120.00
90	210331.00	7493625.00	23193.00
91	212335.00	7492494.00	23001.00
92	215045.00	7490213.00	23111.00
93	217273.00	7489999.00	23097.00
94	219354.00	7489741.00	23155.00
95	221436.00	7489004.00	23164.00
96	223250.00	7488556.00	23021.00
97	214679.00	7487754.00	23150.00
98	212606.00	7486464.00	23168.00
99	211470.00	7484055.00	23157.00
100	209220.00	7483116.00	23033.00
101	208321.00	7481364.00	22801.00
102	206357.00	7481232.00	23114.00
103	204395.00	7480518.00	23070.00
104	202276.00	7480795.00	23034.00
105	199343.00	7481449.00	23051.00
106	197571.00	7480154.00	23070.00
107	195690.00	7482305.00	23030.00
108	200623.00	7509788.00	22694.00
109	200535.00	7511774.00	22990.00
110	199873.00	7513162.00	22908.00
111	199888.00	7514971.00	22920.00
112	200059.00	7516620.00	23009.00
113	199993.00	7518788.00	22796.00
114	200708.00	7520486.00	22996.00
115	201333.00	7522315.00	22774.00
116	200407.00	7524313.00	22894.00
117	199519.00	7526266.00	22925.00
118	198089.00	7527413.00	22948.00
119	199228.00	7529102.00	22828.00
120	200500.00	7530874.00	22861.00
121	201096.00	7532885.00	23064.00
122	201694.00	7534980.00	23012.00
123	198609.00	7534741.00	23065.00
124	196755.00	7534057.00	22923.00
125	194569.00	7533791.00	22744.00
126	192361.00	7535635.00	22825.00
127	204140.00	7535690.00	22909.00
128	206366.00	7536079.00	22834.00
129	210345.00	7534356.00	22983.00
130	209427.00	7533452.00	22799.00

131	208184.00	7532106.00	23045.00
132	206822.00	7530961.00	23093.00
133	205796.00	7529388.00	22868.00
134	205807.00	7529380.00	23011.00
135	207654.00	7526344.00	23065.00
136	208836.00	7525060.00	22836.00
137	210227.00	7524417.00	23003.00
138	212036.00	7524309.00	23071.00
139	213465.00	7523100.00	23010.00
140	214716.00	7521724.00	22960.00
141	216404.00	7521414.00	23200.00
142	217756.00	7520255.00	23002.00
143	219601.00	7519073.00	22954.00
144	221550.00	7518530.00	22998.00
145	228293.00	7479908.00	23047.00
146	227521.00	7477863.00	22881.00
147	226697.00	7475710.00	22942.00
148	225825.00	7473413.00	22909.00
149	225120.00	7471536.00	22937.00
150	223992.00	7468604.00	22910.00
151	223570.00	7466938.00	22923.00
152	222838.00	7464941.00	22957.00
153	221531.00	7462829.00	22952.00
154	221210.00	7460306.00	22950.00
155	221407.00	7458351.00	22972.00
156	221621.00	7456189.00	22787.00
157	221454.00	7453903.00	22850.00
158	222794.00	7461065.00	22940.00
159	224485.00	7460129.00	22950.00
160	226436.00	7459915.00	22779.00
161	227821.00	7459193.00	22707.00
162	229092.00	7460262.00	22632.00
163	229920.00	7462278.00	22771.00
164	232513.00	7462320.00	22801.00
165	234177.00	7460942.00	22877.00
166	236222.00	7461300.00	22896.00
167	236525.00	7464393.00	22904.00
168	235856.00	7466536.00	22814.00
169	234538.00	7467933.00	23016.00
170	234174.00	7469749.00	22498.00
171	233536.00	7471612.00	22755.00
172	232706.00	7474417.00	22860.00
173	232854.00	7476651.00	22126.00
174	231298.00	7476897.00	22880.00
175	229247.00	7477381.00	23017.00

176	230624.00	7485285.00	23004.00
177	232353.00	7484606.00	22936.00
178	232947.00	7482662.00	22921.00
179	233496.00	7480221.00	22986.00
180	234381.00	7478226.00	22688.00
181	235161.00	7476095.00	22494.00
182	235628.00	7473811.00	22859.00
183	236934.00	7472076.00	22958.00
184	238252.00	7470138.00	22966.00
185	240059.00	7468414.00	22852.00
186	241638.00	7466302.00	22943.00
187	242471.00	7464487.00	22802.00
188	242207.00	7462337.00	22246.00
189	242738.00	7460083.00	22858.00
190	242984.00	7457071.00	22958.00
191	242012.00	7455454.00	22701.00
192	241035.00	7458548.00	22960.00
193	239758.00	7460221.00	22958.00
194	238222.00	7461103.00	22894.00
195	231186.00	7472058.00	22793.00
196	229433.00	7473530.00	22910.00
197	227840.00	7474879.00	22853.00
198	223570.00	7472241.00	22878.00
199	222227.00	7471311.00	22926.00
200	220355.00	7472312.00	22895.00
201	219047.00	7473945.00	22876.00
202	218531.00	7475240.00	22821.00
203	217030.00	7473901.00	22810.00
204	215614.00	7472544.00	22905.00
205	215372.00	7471022.00	22783.00
206	214766.00	7469499.00	22877.00
207	213176.00	7467864.00	22845.00
208	212393.00	7466152.00	22933.00
209	213695.00	7464986.00	22920.00
210	211862.00	7464040.00	22952.00
211	210529.00	7462667.00	22960.00
212	225734.00	7484479.00	23100.00
213	225600.00	7482224.00	23125.00
214	225190.00	7481012.00	22770.00
215	223261.00	7480756.00	22877.00
216	221926.00	7479326.00	22904.00
217	220687.00	7477828.00	22774.00
218	219271.00	7476790.00	22877.00
219	216315.00	7476179.00	22841.00
220	214742.00	7475418.00	22778.00

221	213041.00	7474155.00	22867.00
222	211812.00	7472363.00	22856.00
223	210108.00	7473170.00	22862.00
224	208437.00	7473213.00	22838.00
225	206283.00	7473107.00	22821.00
226	204751.00	7471995.00	22828.00
227	203015.00	7470923.00	22849.00
228	200947.00	7470749.00	22860.00
229	198613.00	7470364.00	22846.00
230	196850.00	7469107.00	22850.00
231	195194.00	7467754.00	22837.00
232	194839.00	7465656.00	22768.00
233	193571.00	7464076.00	22852.00
234	194479.00	7462479.00	22875.00
235	194539.00	7460510.00	22857.00
236	194109.00	7458857.00	22835.00
237	193972.00	7456717.00	22866.00
238	192772.00	7454390.00	22858.00
239	208222.00	7453386.00	22892.00
240	209420.00	7454721.00	22862.00
241	210186.00	7456875.00	22841.00
242	210981.00	7458653.00	22740.00
243	212958.00	7459481.00	22858.00
244	213522.00	7461386.00	22844.00
245	215730.00	7461795.00	22892.00
246	217476.00	7462724.00	22907.00
247	219677.00	7462328.00	22936.00
248	219973.00	7464509.00	22898.00
249	219783.00	7466165.00	22897.00
250	220070.00	7468130.00	22874.00
251	220042.00	7469858.00	22900.00
252	222310.00	7473319.00	22922.00
253	223831.00	7474697.00	22874.00
254	224790.00	7476669.00	22880.00
255	225966.00	7478129.00	22892.00
256	226924.00	7510239.00	23100.00
257	238494.00	7523193.00	22742.00
258	239612.00	7524400.00	22803.00
259	238067.00	7527923.00	22863.00
260	238657.00	7529934.00	22961.00
261	237859.00	7531906.00	22881.00
262	237268.00	7533543.00	22840.00
263	236041.00	7535278.00	22849.00
264	234040.00	7535131.00	22951.00
265	232793.00	7534914.00	23023.00



266	231313.00	7535498.00	22604.00
267	229339.00	7535951.00	22871.00
268	229112.00	7537468.00	22812.00
269	229662.00	7539348.00	22959.00
270	227920.00	7535186.00	22878.00
271	227983.00	7533493.00	23039.00
272	229214.00	7532615.00	23083.00
273	229911.00	7531148.00	23029.00
274	228748.00	7529707.00	22939.00
275	227122.00	7528464.00	23094.00
276	226427.00	7528990.00	23003.00
277	225385.00	7530245.00	22792.00
278	224657.00	7531785.00	22110.00
279	223312.00	7531354.00	22588.00
280	221715.00	7529593.00	23075.00
281	221215.00	7528316.00	23098.00
282	222837.00	7527685.00	22987.00
283	224338.00	7526509.00	22823.00
284	225780.00	7526434.00	22845.00
285	226244.00	7525466.00	22960.00
286	226880.00	7523753.00	22867.00
287	232758.00	7520930.00	22846.00
288	233785.00	7519688.00	23042.00
289	234848.00	7518108.00	23006.00
290	236136.00	7517001.00	22995.00
291	214408.00	7505095.00	22877.00
292	212727.00	7504864.00	22822.00
293	210985.00	7505257.00	22835.00
294	212569.00	7506115.00	22982.00
295	212748.00	7507709.00	22978.00
296	211096.00	7508123.00	22760.00
297	209705.00	7509506.00	22844.00
298	208373.00	7509657.00	22846.00
299	207047.00	7511033.00	22846.00
300	205676.00	7511495.00	23170.00
301	208953.00	7503724.00	22881.00
302	207004.00	7502245.00	22766.00
303	206110.00	7503580.00	22904.00
304	205153.00	7504970.00	22967.00
305	203297.00	7505374.00	22899.00
306	201382.00	7505768.00	22945.00
307	201052.00	7513290.00	22750.00
308	202172.00	7512958.00	22951.00
309	204284.00	7512911.00	23002.00
310	202335.00	7519966.00	22942.00

311	204008.00	7519664.00	22997.00
312	205677.00	7519420.00	22960.00
313	207311.00	7520070.00	22807.00
314	207389.00	7519625.00	22898.00
315	239363.00	7501165.00	22987.00
316	241130.00	7501074.00	22876.00
317	242970.00	7501143.00	22947.00
318	245042.00	7501640.00	22768.00
319	238715.00	7499589.00	22892.00
320	236595.00	7500078.00	22992.00
321	237991.00	7498514.00	22761.00
322	236679.00	7497997.00	22668.00
323	236581.00	7496644.00	22983.00
324	236124.00	7495117.00	22992.00
325	235042.00	7493100.00	22958.00
326	236473.00	7492982.00	22974.00
327	236414.00	7491259.00	22899.00
328	236650.00	7489979.00	22699.00
329	238515.00	7490873.00	22459.00
330	240494.00	7491938.00	22978.00
331	234916.00	7489126.00	22932.00
332	234132.00	7487267.00	22905.00
333	234769.00	7485458.00	22998.00
334	234128.00	7483521.00	22895.00
335	237591.00	7484483.00	22894.00
336	239888.00	7483547.00	22820.00
337	242236.00	7482424.00	22844.00
338	244662.00	7481693.00	22853.00
339	213112.00	7487073.00	22915.00
340	212225.00	7485312.00	23068.00
341	213108.00	7484620.00	23181.00
342	214477.00	7484190.00	22981.00
343	216047.00	7483480.00	22931.00
344	218116.00	7483447.00	22951.00
345	219900.00	7483071.00	22891.00
346	221077.00	7482015.00	22899.00
347	222426.00	7482064.00	22916.00
348	224068.00	7482307.00	22964.00
349	211124.00	7487196.00	22806.00
350	209577.00	7487523.00	22832.00
351	207571.00	7487520.00	22896.00
352	205730.00	7488132.00	22900.00
353	204031.00	7488893.00	22886.00
354	202230.00	7488127.00	22867.00
355	200397.00	7486912.00	22830.00

356	199668.00	7485162.00	22862.00
357	199997.00	7484053.00	22924.00
358	197632.00	7479942.00	22903.00
359	196752.00	7478672.00	22915.00
360	193817.00	7478336.00	22887.00
361	197531.00	7477482.00	22856.00
362	197716.00	7475648.00	22871.00
363	199129.00	7474270.00	22891.00
364	199135.00	7472510.00	22980.00
365	213150.00	7475806.00	22912.00
366	212814.00	7478002.00	22879.00
367	213638.00	7479141.00	22911.00
368	214989.00	7480727.00	22901.00
369	216036.00	7481856.00	22939.00
370	216685.00	7480714.00	22914.00
371	218316.00	7479864.00	22846.00
372	218553.00	7477944.00	22803.00
373	217403.00	7478128.00	22836.00
374	220597.00	7481030.00	22807.00
375	232314.00	7501796.00	22850.00
376	231064.00	7502519.00	22825.00
377	230092.00	7504181.00	22792.00
378	228876.00	7503728.00	22917.00
379	227751.00	7502299.00	22788.00
380	226186.00	7501372.00	22860.00
381	224693.00	7501730.00	23115.00
382	224551.00	7500330.00	22918.00
383	224170.00	7498424.00	22711.00
384	223782.00	7496345.00	22896.00
385	222913.00	7494503.00	22813.00
386	221996.00	7496046.00	22284.00
387	220966.00	7497587.00	22762.00
388	220281.00	7496326.00	22871.00
389	217652.00	7495814.00	22889.00
390	216849.00	7495781.00	22969.00
391	216779.00	7494489.00	22828.00
392	215422.00	7493287.00	22964.00
393	214172.00	7493335.00	22948.00
394	218592.00	7489973.00	22825.00
395	220527.00	7492707.00	22875.00
396	222187.00	7493784.00	22767.00
397	224759.00	7493104.00	22772.00
398	223086.00	7491700.00	23214.00
399	227925.00	7491868.00	23060.00
400	229383.00	7492266.00	22897.00

401	230459.00	7494068.00	22953.00
402	230291.00	7496087.00	22930.00
403	230094.00	7497412.00	22941.00
404	229611.00	7499050.00	22871.00
405	228822.00	7500694.00	22990.00
406	230818.00	7501421.00	22874.00
407	232744.00	7504238.00	22892.00
408	233782.00	7506057.00	22866.00
409	233975.00	7508424.00	22904.00
410	234005.00	7510205.00	22773.00
411	234037.00	7512113.00	22756.00
412	212362.00	7503904.00	22791.00
413	212727.00	7502276.00	22803.00
414	213148.00	7500693.00	22990.00
415	214749.00	7500334.00	22953.00
416	215889.00	7500528.00	22842.00
417	216154.00	7499285.00	22926.00
418	215459.00	7498222.00	22976.00
419	216978.00	7498976.00	22843.00
420	218268.00	7498236.00	22856.00
421	218252.00	7497021.00	22880.00
422	216392.00	7496326.00	22859.00
423	214956.00	7495788.00	22810.00
424	213432.00	7496616.00	22812.00
425	214257.00	7494841.00	22875.00
426	212858.00	7493454.00	23157.00
427	204602.00	7500903.00	22963.00
428	204990.00	7499464.00	22987.00
429	233138.00	7535293.00	22901.00
430	233444.00	7534391.00	22932.00
431	235108.00	7530929.00	22976.00
432	235592.00	7529712.00	23137.00
433	235473.00	7528030.00	23124.00
434	235256.00	7526524.00	22853.00
435	235270.00	7525076.00	23167.00
436	223101.00	7522474.00	23180.00
437	221719.00	7522792.00	23020.00
438	221202.00	7524272.00	23024.00
439	220848.00	7525753.00	22950.00
440	220084.00	7526755.00	23155.00
441	218370.00	7528090.00	22868.00
442	217017.00	7528119.00	22899.00
443	215681.00	7527729.00	23131.00
444	214519.00	7527682.00	23093.00
445	213004.00	7527947.00	23025.00

446	211625.00	7528610.00	22961.00
447	210360.00	7529817.00	22985.00
448	209733.00	7531292.00	22996.00
449	210868.00	7532271.00	22968.00
450	212269.00	7531436.00	22904.00
451	211179.00	7530683.00	22984.00
452	211232.00	7538200.00	22647.00
453	212803.00	7539141.00	22940.00
454	202005.00	7531517.00	22972.00
455	202757.00	7530188.00	22911.00
456	204018.00	7529477.00	22894.00
457	205470.00	7529655.00	22892.00
458	207546.00	7528451.00	22958.00
459	207732.00	7526775.00	23021.00
460	206617.00	7526186.00	22917.00
461	205697.00	7527167.00	22954.00
462	204444.00	7527157.00	22666.00
463	203962.00	7528523.00	22845.00
464	203031.00	7529027.00	22841.00
465	236527.00	7488293.00	22873.00
466	235918.00	7487357.00	22925.00
467	237096.00	7483468.00	22769.00
468	237293.00	7482150.00	22868.00
469	236365.00	7481624.00	22789.00
470	237195.00	7480879.00	22830.00
471	236949.00	7479501.00	22891.00
472	236253.00	7478088.00	22910.00
473	237156.00	7473968.00	22959.00
474	238693.00	7472700.00	22960.00
475	239279.00	7474142.00	22898.00
476	240671.00	7473640.00	22920.00
477	240827.00	7474340.00	22766.00
478	239697.00	7475854.00	22906.00
479	241156.00	7478193.00	22940.00
480	241426.00	7480302.00	22887.00
481	240225.00	7482277.00	22892.00
482	241912.00	7493309.00	22785.00
483	242738.00	7492152.00	22819.00
484	242233.00	7490895.00	22773.00
485	241415.00	7489376.00	22779.00
486	240470.00	7487977.00	22893.00
487	239371.00	7487105.00	22935.00
488	242636.00	7495155.00	22876.00
489	244374.00	7496480.00	22918.00
490	245603.00	7498004.00	22918.00

491	243805.00	7502723.00	23200.00
492	244406.00	7504534.00	22972.00
493	243479.00	7505162.00	22926.00
494	240774.00	7502695.00	22848.00
495	241430.00	7504233.00	22810.00
496	241294.00	7505513.00	23125.00
497	242255.00	7506005.00	22769.00
498	242950.00	7507167.00	22856.00
499	243820.00	7508190.00	23132.00
500	243889.00	7509444.00	22800.00
501	242991.00	7511431.00	23250.00
502	242221.00	7512885.00	22883.00
503	240949.00	7514116.00	23218.00
504	238820.00	7515547.00	22983.00
505	237642.00	7516741.00	22412.00

## APÊNDICE 5 - TEORIA DO MÉTODO DA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER 2-D (*FAST FOURIER TRANSFORM*) NO TRATAMENTO DOS DADOS GRAVIMÉTRICOS E MAGNETOMÉTRICOS DESTE ESTUDO

Para fins de conveniência matemática e praticidade, a rotina de processamento MAGMAP do programa Geosoft e os diferentes filtros aplicados neste estudo, têm como base o domínio de *Fourier* e o número de ondas. Uma breve explanação da teoria e dos conceitos básicos é aqui apresentada, segundo Geosoft, 2005 e Bhattacharia (1966), juntamente com os principais fundamentos do método. Devido a abrangência e aplicabilidade da teoria de *Fourier*, uma análise teórica assim como uma completa explanação seria demasiado extensa e não é, também, o objetivo desse estudo.

Matematicamente, a transformada de *Fourier* em uma função de domínio do tempo  $f(x,y)$  é definida como sendo:

$$\bar{f}(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \cdot e^{-i(\mu x + \nu y)} dx dy$$

A relação recíproca é

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{f}(\mu, \nu) \cdot e^{i(\mu x + \nu y)} d\mu d\nu$$

onde:  $\mu$  e  $\nu$  são número de onda na direção X e Y respectivamente, medido em radianos/metro se X e Y encontram-se em unidades de metros. Estes são associados a “freqüências”  $f_x$  e  $f_y$  as quais estão em ciclos/metro.

Um determinado *grid* (no domínio do espaço) é transformado de e para um domínio de onda, através do uso da transformada rápida de *Fourier* (*Fast Fourier Transform*) ou aqui denominada de FFT. A transformada de um determinado *grid* é composta de um número de ondas, as quais são unidades de ciclos por metro e possuem um componente real e imaginário.

Da mesma forma que um *grid* possui amostragens na função de domínio de tempo a melhorias constantes de distância, a transformada amostra uma função no domínio de *Fourier* a melhorias constantes de  $1/(\text{tamanho do grid})$  (ciclos/metro) entre 0 e o número de onda de Nyquist ( $1/[2 \text{ tamanho da célula}]$ ).

Uma dada função de campo potencial no domínio espacial possui somente uma única e exclusiva função no domínio espacial e vice-versa. A adição de duas funções (anomalias) no domínio de espaço é equivalente à adição das suas “transformadas”.

O espectro de energia é uma função 2 D da energia relacionada ao número de ondas e a sua direção. O espectro radial da média de energia é uma função do número de onda sozinho que é calculado obtendo-se a média da energia em todas as direções par o mesmo número de onda dado.

A transformada *Fourier* do campo potencial como por exemplo, de um corpo prismático possui um amplo espectro, cujo a localização do maior valor (pico) é uma função da profundidade com a superfície do topo e da base deste prisma, na qual a amplitude é determinada pela sua densidade ou magnetização. O número de onda de pico (*peak wavenumber  $\omega'$* ) pode ser determinado pela expressão abaixo:

$$\omega' = \frac{\ln(h_b/h_t)}{h_b - h_t}$$

onde:

$\omega'$  é o pico do número de onda (em radianos/metro)

$h_t$  é a profundidade do topo do corpo

$h_b$  é a profundidade da base do corpo

O espectro de um corpo que apresente ausência de base o pico de número de onda tenderá a zero de acordo com a expressão segundo Bhattacharia, (1966):

$$\bar{f}(\mu, \nu) = e^{-hr}$$

$$r = \sqrt{\mu^2 + \nu^2}$$

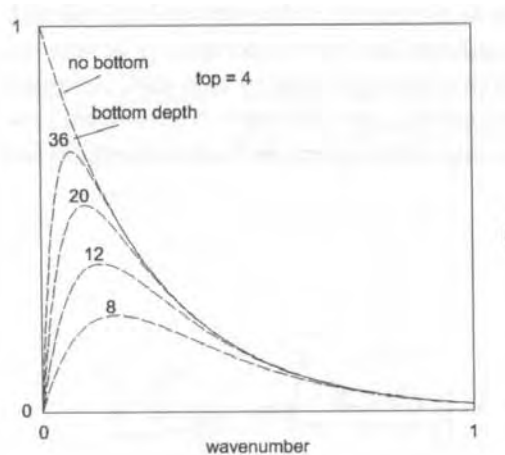
Onde  $h$  é a profundidade até o topo do prisma. O espectro aqui assumido para um prisma com superfícies de topo e base é:

$$\bar{f}(\mu, \nu) = e^{-h_t r}$$

Onde  $h_t$  e  $h_b$  são as profundidades até as superfícies do topo e da base respectivamente. Conforme o topo deste prisma é trazido ou movimentado mais para

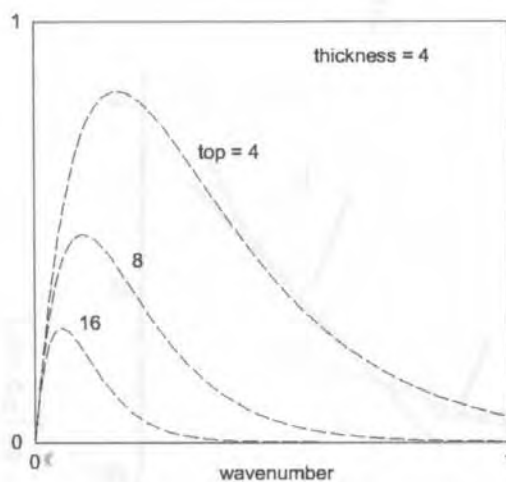


cima, o pico altera para números de onda maiores como demonstrado na Figura 5.1 abaixo:



**Figura 5.1** Exemplo do comportamento do pico do número de onda no espectro conforme a profundidade de um corpo é alterada (Geosoft, 2005).

Considerando-se o espectro de um prisma de tamanho fixo. Conforme a profundidade deste corpo aumenta, o pico do espectro muda para um número de onda menor (a anomalia torna-se mais larga e extensa), e a amplitude do espectro é reduzida (Figura 5.2).



**Figura 5.2** Exemplo da redução na amplitude do espectro (Geosoft, 2005).

Na figura acima, é importante observar que o espectro de um prisma profundo, não ultrapassa a amplitude do mesmo prisma a profundidades menores em qualquer número de onda. Somente o pico altera-se para número de ondas

menores. Devido a isso, não existe como se separar efeitos de fontes profundas das fontes rasas de mesmo tipo utilizando filtros com número de onda. Isto se torna somente possível, se as fontes profundas possuem uma forte amplitude, ou se as fontes rasas possuem pouca extensão em profundidade.

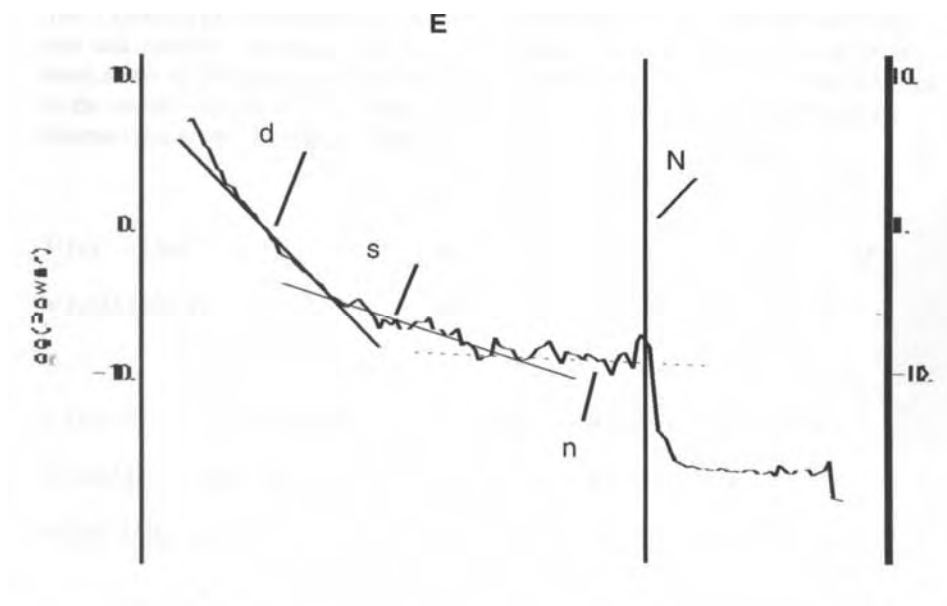
Quando é considerado um *grid* suficientemente grande para incluir várias fontes, o espectro de *log* ou logarítmico pode ser interpretado para determinar estatisticamente a profundidade até os topos das fontes utilizando-se da relação:

$$\log E(r) = 4 \pi hr$$

Quando se considera uma amostragem ou grupo de fontes, a profundidade é facilmente determinada medindo-se o declive do espectro de energia e dividindo por  $4\pi$ . Um espectro de energia típico, oriundo de dados magnéticos exibirá três partes principais de declive; um componente relacionado à fonte profunda, um componente relacionado à fonte rasa e, finalmente, um componente associado a ruídos. A Figura 5.3 a seguir ilustra a interpretação de um espectro de potencia com esses três componentes.

### **Descrição do algoritmo FFT Winograd**

Na rotina MAGMAP, a transformada rápida *Fourier* FFT (*Fast Fourier Transform*) é usada para converter um *grid* de dados no domínio de tempo para o domínio *Fourier*. O sistema usado neste estudo, aplica a Transformada de *Fourier* rápida Winograd (FFT) a um *grid* no domínio de tempo para gerar uma transformada 2D dobrada como *output*. Como parte do processo, o espectro radial da média de energia é também calculado na transformada.



**Figura 5.3** Esquema que representa os três componentes principais de um espectro de potencia usado na aplicação de filtros em métodos potenciais (Geosoft, 2005).

O sistema cria um *grid* no domínio *Fourier* o qual é denominado de Transformada e possui o mesmo nome do *grid* de *input*, mas com a extensão **.trn**. O *grid* da Transformada contém uma Transformada *Fourier* dobrada, individualmente separada e distinta do *grid* de *input*.

O tamanho de um *grid* da Transformada é de 4 bytes, mas cada par de elementos representa um componente real e imaginário de um determinado número complexo. A Transformada é armazenada da mesma forma que o *grid* de *input* de forma que cada vetor da transformada (coluna) representa u vetor na direção de armazenamento do *grid* de *input* (X para  $k_x=1$ , Y para  $k_x=-1$ ). O diagrama apresentado abaixo ilustra o sistema lógico de armazenamento da transformada.

$V(n)$	$-(1/nv)r$	$i r$	$i r$	$i \bullet$	$r$	$i$
$V(n-1)$	$-(2/nv)r$	$i r$	$i r$	$i \bullet$	$r$	$i$
	$\bullet$	$\bullet$	$\bullet$		$\bullet$	
$V(n/2+2)$	$-(1/2v - 1/nv)r$	$i r$	$i r$	$i \bullet$	$r$	$i$
$V(n/2+1)$	$1/2v$ (nyq.)	$r$	$i r$	$i r$	$i \bullet$	$r$
$V(n/2)$	$1/2v - 1/nv$	$r$	$i r$	$i r$	$i \bullet$	$r$
	$\bullet$	$\bullet$	$\bullet$		$\bullet$	
$V(3)$	$2/nv$	$r$	$i r$	$i r$	$i \bullet$	$r$
$V(2)$	$1/nv$	$r$	$i r$	$i r$	$i \bullet$	$r$
$V(1)$	$0$	$r$	$i r$	$i r$	$i \bullet$	$r$
$\uparrow$ Vectors	$0$	$1/ne$	$2/ne$		$1/2e$ (nyq.)	

Elementos E (1,2) E (3,4) E (5,6) E (n+1, n+2)

Onde:

$r, i$  componentes real e imaginário de cada elemento da transformada

$e, v$  separação dos elementos e vetores (tamanho da célula)

$n$  dimensão original do *grid* em células

O elemento de separação da transformada ( $1/ne$ ), e o vetor separação ( $1/nv$ ) é  $1 /$  (dimensão do *grid*) ciclos/metro. Considerando que o *grid* é quadrado e o tamanho da célula do *grid* é quadrado,  $1 / ne = 1 / nv$ . O número de onda de nyquist é o maior número de onda amostrado pelo *grid* e é definido como um sobre duas vezes o tamanho da célula do *grid* ( $1/2e$  e  $1/2v$ , a qual é, portanto, igual).

Ao observar o diagrama acima, nota-se que cada vetor da transformada (coluna) representa uma coluna individual e única *Fourier* na direção dos vetores dos *grids* de *input*. Os elementos *Fourier* contidos em cada coluna iniciam a 0 (zero) ciclos/metro e estendem-se ao número de onda de nyquist em aumentos de  $1/ne$ . Como resultado, o *grid* transformado terá  $(n/2+1)$  elementos por vetor, aonde  $n$  é o número de elementos por vetor do *grid* original. A transformada é então, dobrada ao número de onda de nyquist na direção dos vetores do *grid* de forma que o *grid* da transformada possuirá  $n$  vetores.

## Descrição do Espectro de Energia

Conjuntamente a formação da Transformada da *Fourier*, um dos procedimentos é formar um arquivo onde está contido o espectro radial da média de energia (espectro de potência) no formato demonstrado a seguir (Figura 5.4).

A energia e sua energia radial listada na terceira coluna, representam à média da densidade espectral (energia) para todos os elementos do *grid* nos números de onda listados na primeira coluna. A segunda coluna indica o número de elementos que foram usados na determinação da média. A energia é normalizada por meio da subtração do *log* da média de densidade espectral.

```

/ 2-D RADIALLY AVERAGED POWER SPECTRUM
/
/ WAVENUMBER INTERVAL      DWE = 1.428571E-01
/ AVERAGE SPECTRAL DENSITY LOG(ETOT) = 1.940511E+01
/
/
/      CYC/KM #_SAMP      LOG_P      3_DEPTH      5_DEPTH
/-----
0.000000E+00      1  6.953915E+00  2.017633E-01      *
1.428571E-01      8  6.591711E+00  3.892244E-01      *
2.857143E-01     12  5.556448E+00  5.608587E-01  4.363967E-01
4.285714E-01     16  4.578010E+00  3.591071E-01  3.645031E-01
5.714285E-01     32  4.267114E+00  1.735434E-01  2.545823E-01
7.142857E-01     28  3.954922E+00  2.310963E-01  2.454431E-01
8.571429E-01     40  3.437389E+00  3.316897E-01  3.152357E-01
1.000000E+00     40  2.764027E+00  3.829211E-01  2.908998E-01
.
.
.
9.000000E+00     364 -6.672572E+00  1.778083E-01  5.273030E-02
9.142857E+00     440 -7.611941E+00  2.138515E-01  1.244036E-01
9.285714E+00     400 -7.440382E+00 -1.844887E-02  1.012864E-01
9.428572E+00     424 -7.545702E+00  1.084567E-01  1.966618E-02
9.571428E+00     420 -7.829783E+00 -3.100928E-02  1.257935E-02
9.714286E+00     416 -7.434367E+00 -3.970939E-02  4.879844E-02
9.857142E+00     448 -7.687212E+00  2.171140E-01      *
1.000000E+01     394 -8.213891E+00  2.933830E-01      *
1.014286E+01     340 -1.024793E+01      *      *
1.028571E+01     348 -1.104301E+01      *      *
1.042857E+01     272 -1.107746E+01      *      *

```

**Figura 5.4** Exemplo de um arquivo gerado para o espectro radial da média de energia

As colunas 3-DEPTH e 5-DEPTH são amostragens das estimativas de profundidade baseadas nas médias do ponto 3 e 5 na curva de inclinação apresentada no espectro de energia (SPECTOR & GRANT, 1970). A profundidade para uma determinada amostragem de fontes magnéticas é determinada pela expressão:

$$h = -s / 4\pi$$

onde:

$h$  = profundidade

$s$  = curva de inclinação do *log* do espectro (energia)

Estas estimativas podem ser usadas como um guia aproximado na determinação de profundidade de populações de fontes magnéticas. O programa possibilita a criação de uma visualização do espectro radial da média de energia automaticamente como demonstrado abaixo (Figura 5.5). Esse gráfico ilustra uma típica redução da energia com o aumento do número de onda. A estimativa de profundidade é uma plotagem do ponto 5 dos dados de profundidade do arquivo contido no espectro.

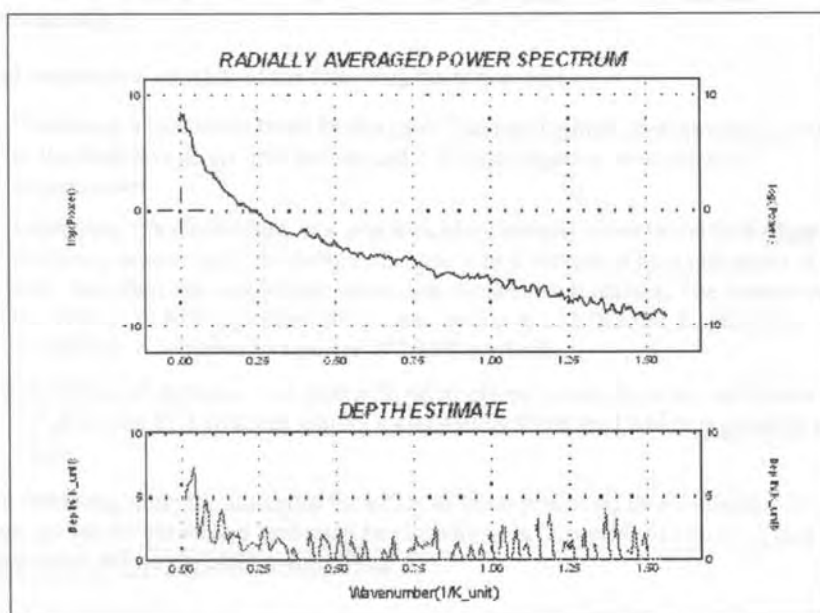


Figura 10.5 Exemplo de uma curva de inclinação com estimativa de profundidade por meio do espectro radial da média de energia. (Geosoft, 2005).

## APÊNDICE 6 – PREPARAÇÃO DO *GRID* PARA O PROCESSAMENTO FFT WINOGRAD

Antes de ser efetuada a transformação para o domínio de número de ondas (aplicando-se o procedimento FFT), é necessário que o arquivo do *grid* inicial seja preparado afim de que contenha as seguintes propriedades:

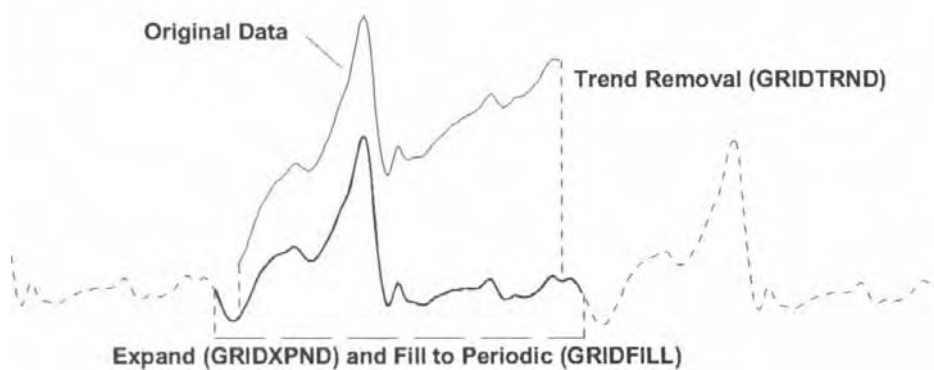
- Seja quadrado
- Tenha dimensões que sejam aceitáveis ao procedimento Winograd FFT
- Não possua *dummies* (amostragens irreais)

É necessário que haja periodicidade nas bordas ou seja, um ponto na borda esquerda de um *grid* precisa igualar-se a borda direita, e um ponto na borda do topo precisa igualar-se a borda da base tanto em valor como em inclinação. Ao utilizar o procedimento FFT da rotina MAGMAP do programa Geosoft denominado de “extendido”, o primeiro passo no processo é de preparar o *grid* (menu *option* – opção *run the prepare grids*). No caso de ser feito o processo simplificado (*one step FFT process*) a preparação do *grid* é conduzida automaticamente pelo programa.

Uma preparação de um *grid* consiste dos seguintes procedimentos básicos:

1. Remoção do *trend* de primeira ordem do *grid*. O *trend* que foi removido é armazenado em uma área do usuário do cabeçalho contido no *grid* e é filtrado conjuntamente com o número de onda zero.
2. Através da expansão das dimensões de um *grid* através da adição de áreas falsas ou irreais (*dummies*) às bordas do *grid*, a fim de se produzir um *grid* quadrado. O procedimento padrão, o tamanho do *grid* é aumentado a um mínimo de 10% e então a dimensão mais próxima e aceitável é escolhida. O sistema usa o algoritmo Winograd FFT para dimensões maiores do que 2520X2520.
3. Substituindo todos *dummies* de um *grid* com valores interpolados a partir de partes válidas de um *grid*. O procedimento FFT exigem que determinado *grid* seja completamente preenchido e no qual seja periódico em suas bordas.

O diagrama da Figura 6.1 abaixo ilustra os efeitos deste processo em uma dimensão.



**Figura 6.1** Remoção do *trend* de primeira ordem(Geosoft, 2005).

Devido ao fato do *grid* pré-processado precisar ser periódico, é importante que seja removido o *trend* de primeira ordem antes que ele seja expandido e preenchido.



## APÊNDICE 7 – DESCRIÇÃO DOS FILTROS UTILIZADOS NO PROCESSAMENTO DE DADOS GRAVIMÉTRICOS E MAGNETOMÉTRICOS

Esse apêndice tem como finalidade descrever os filtros e técnicas de processamento utilizadas nos tratamentos dos dados gravimétricos e magnetométricos efetuados neste estudo. O nome de cada filtro e procedimento, assim como a sua especificação e aplicação, encontram-se em ordem alfabética. Cada explanação demonstra a expressão matemática utilizada, assim como uma ilustração correspondente a sua aplicabilidade. As expressões aqui demonstradas seguem as seguintes variáveis matemáticas segundo Geosoft, 2005.

$\mu$  número de ondas X (complexo, radianos/unidade de terreno)

$\nu$  número de ondas Y (complexo, radianos/unidade de terreno)

$r = \sqrt{\mu^2 + \nu^2}$  número de ondas (radianos/unidade de terreno)

$\theta = \tan^{-1}(\mu/\nu)$  direção do número de ondas

$N$  número de ondas de Nyquist [ $1 / (2 \text{ tamanho da célula})$ ]

$K$  número de ondas em ciclos/unidade de terreno ( $r = 2\pi k$ )

Os eixos horizontais das figuras representam os números de onda entre 0 (zero) e a enésima frequência de Nyquist. Todas as referências de distância são um múltiplo do tamanho da célula de cada *grid*. Tomemos como exemplo um esquema da resposta do filtro *upward continuation* (sigla CNUP). Se o tamanho de uma célula de determinado *grid* é de 25 unidades de terreno, o enésimo número de onda será de 0.02 ciclos/unidade de terreno (*cycles/ground\_unit*), e a curva de resposta do filtro representará distâncias de *upward continuation* de 50, 100, 200 e 400 unidades de terreno. Os exemplos aqui citados são referentes a Geosoft, 2005.

### Filtro Passa Faixa

Unidade de terreno (*ground\_unit*) é a unidade utilizada no *grid* em determinado levantamento (por exemplo: metros, pés, quilômetros, etc). Quando a

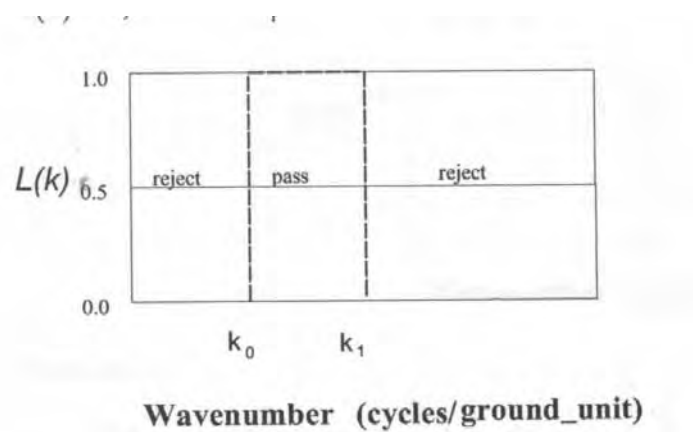
unidade de terreno for em metros, o *cut off* do maior e o menor comprimento de onda será, portanto, em ciclos/metros.

Um filtro passa-faixa (Figura 7.1) é um dispositivo que permite a passagem das freqüências de uma certa faixa e rejeita (atenua) as freqüências fora dessa faixa. Estes filtros também podem ser obtidos através da combinação entre um filtro passa – baixa e um filtro passa-altas.

$L(k) = 0$ , para  $k < k_0$

$L(k) = 1$ , para  $k_0 \leq k \leq k_1$

$L(k) = 0$ , para  $k > k_1$



**Figura 7.1** Representação gráfica de um filtro Passa-Faixa

Parâmetros:

$k_0$  *cut off* do maior número de onda em ciclos/unidade de terreno

$k_1$  *cut off* do menor número de onda em ciclos/unidade de terreno

**0/1** Sendo 1 passa a banda determinada, sendo 0, rejeita determinada banda. O padrão (*default*) é de passar.

Os filtros passa – faixa (*band pass*) podem ser utilizados a fim de passar ou rejeitar determinado limite para os números de ondas obtidos em um levantamento. Entretanto é necessário se observar que, ao introduzir-se determinada freqüência de corte de um filtro (*cut - off*) a um espectro de energia, invariavelmente será introduzido uma significativa quantidade de ruído, também conhecido como fenômeno de Gibb's (Geosoft, 2005).

É importante no entanto, salientar, que um filtro ideal possuiria um banda passante totalmente plana (sem atenuação), e iria atenuar completamente todas as freqüências fora desta banda. Adicionalmente, a transição para fora da banda seria instantânea em freqüência. Na prática, nenhum filtro passa-faixa é ideal. O filtro não atenua todas as freqüências fora da faixa desejada; existe uma região em particular fora da banda desejada em que as freqüências são atenuadas, mas não rejeitadas. Este é conhecido como o roll-off do filtro. Geralmente, o projeto de um filtro busca tornar o roll-off o mais seletivo possível para que posteriormente o filtro trabalhe o mais próximo do desejado. Entretanto, conforme o roll-off é tornado mais seletivo, a banda passante não é mais plana, ela começa e produzir um '*ripple*'. Este efeito é particularmente aparente na queda da banda passante, um efeito conhecido como fenômeno de Gibbs.

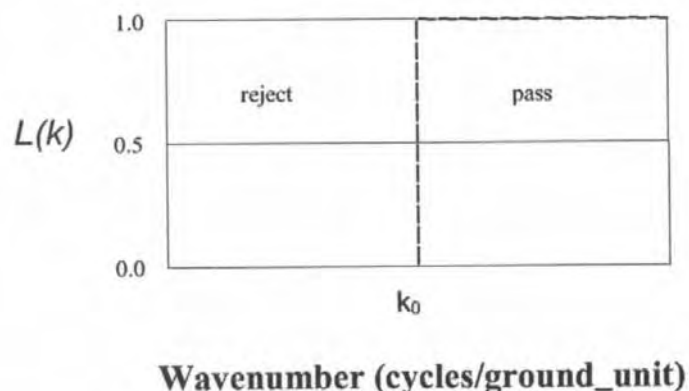
### **Filtro Passa – Alta**

Da mesma forma que o filtro passa-banda, o método de filtragem passa-alta é utilizado com certas precauções e cautela por gerar ruídos resultantes do fenômeno de Gibb's. (Geosoft, 2005). Um filtro passa-alta é um filtro que permite a passagem das freqüências altas com facilidade, porém atenua (ou reduz) a amplitude das freqüências abaixo de freqüência de corte. A quantidade de atenuação para cada freqüência varia de filtro para filtro.

Ele é muito utilizado para bloquear as frequências baixas não desejadas em um sinal complexo enquanto permite a passagem das frequências mais altas. As frequências são consideradas 'altas' ou 'baixas' quando estão acima ou abaixo da frequência de corte, respectivamente (Figura 7.2).

$$L(\mathbf{k}) = 0, \text{ para } k < k_0$$

$$L(\mathbf{k}) = 0, \text{ para } k \geq k_0$$



**Figura 7.2** Representação gráfica de um filtro Passa-Alta

#### Parâmetros:

**$K_0$**  O valor da frequência de corte (*cut off*) do número de onda em ciclos/unidade de terreno. Todos os números de onda abaixo deste valor serão, portanto, removidos.

**Unidade de terreno (*ground\_unit*)** é a unidade utilizada no *grid* em determinado levantamento (por exemplo: metros, pés, quilômetros, etc).

#### Filtro Passa – Baixa

Filtro passa-baixa é o nome comum dado a um determinado sinal ou circuito eletrônico que permite a passagem de baixas frequências sem dificuldades e atenua (ou reduz) a amplitude das frequências maiores que a frequência de corte.. A quantidade de atenuação para cada frequência varia de filtro para filtro.

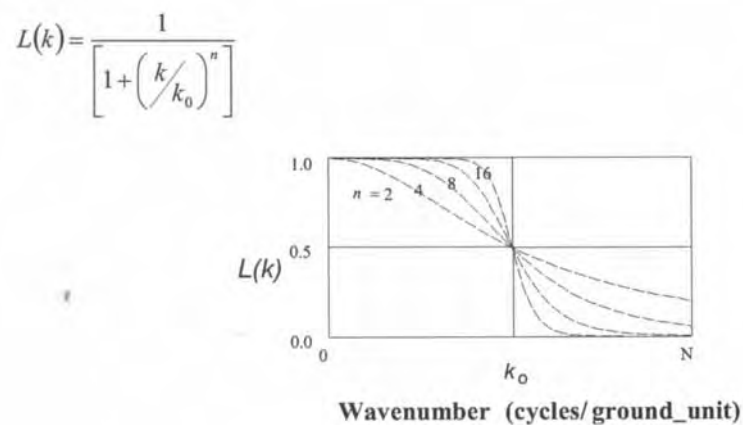
#### Filtro Butterworth

Para a aplicação deste tipo de filtro, um marcador 0/1 (0 ou 1) para especificar se um residual passa-alta (0) ou um regional passa-baixa (1) é exigido. A operação padrão aplica um filtro regional.

Unidade de terreno (*ground\_unit*) é a unidade utilizada no *grid* em determinado levantamento (por exemplo: metros, pés, quilômetros, etc). Quando a

unidade de terreno for em metros, o *cut off* do maior e o menor comprimento de onda será, portanto, em ciclos/metros.

O filtro Butterworth é indicado para ser aplicado aos dados em seguida aos filtros passa-baixa e passa-alta, porque ele permite que seja controlado o grau de filtragem mantendo-se o número central fixo. No caso de se observar ruído, reduz-se o grau até que o ruído torne-se aceitável (Figura 7.3).



**Figura 7.3** Representação gráfica de filtro Butterworth

#### Parâmetros:

$k_0$  O número de onda central do filtro

$n$  O grau da função filtro Butterworth. Como padrão, o grau 8 é usado.

#### Redução ao Pólo Magnético

$$L(\theta) = \frac{[\sin(I) - i \cdot \cos(I) \cdot \cos(D - \theta)]^2}{[\sin^2(Ia) + \cos^2(Ia) \cdot \cos^2(D - \theta)] \cdot [\sin^2(I) + \cos^2(I) \cdot \cos^2(D - \theta)]}, \text{ if } (|Ia| < |I|), Ia = I$$

Onde:

$I$  Inclinação geomagnética

$Ia$  Inclinação para correção de amplitude (nunca menor que  $I$ )

***D*** Declinação geomagnética

***L* ( $\Theta$ )** Direção do vetor número de onda em graus azimute

Parâmetros:

***la*** Inclinação para ser usada na correção de amplitude. O padrão é de  $\pm$  20 graus. Se *la* é especificado para ser menor do que *l* , então deve ser corrigido usando-se *l*.