



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

KAREN MARIA LEOPOLDINO OLIVEIRA

**GEOFÍSICA DA BORDA OESTE DA BACIA POTIGUAR: MÉTODOS
POTENCIAIS APLICADOS AO CONHECIMENTO ESTRUTURAL E
PETROLÍFERO.**

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco

FORTALEZA

2014

KAREN MARIA LEOPOLDINO OLIVEIRA

GEOFÍSICA DA BORDA OESTE DA BACIA POTIGUAR: MÉTODOS
POTENCIAIS APLICADOS AO CONHECIMENTO ESTRUTURAL E
PETROLÍFERO.

Relatório de Graduação submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Geologia, da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial para
obtenção do título de Geóloga.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Mariano
Gomes Castelo Branco.

FORTALEZA

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O47g Oliveira, Karen Maria Leopoldino.
Geofísica da borda oeste da Bacia Potiguar : métodos potenciais aplicados ao conhecimento estrutural e / Karen Maria Leopoldino Oliveira. – 2014.
95 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Geologia, Fortaleza, 2014.

Orientação: Prof. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco.

1. Métodos potenciais. 2. Deconvolução de Euler. 3. Bacia Potiguar. I. Título.

CDD 551

KAREN MARIA LEOPOLDINO OLIVEIRA

GEOFÍSICA DA BORDA OESTE DA BACIA POTIGUAR: MÉTODOS
POTENCIAIS APLICADOS AO CONHECIMENTO ESTRUTURAL E
PETROLÍFERO.

Relatório de Graduação submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Geologia, da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial para
obtenção do título de Geóloga.

Aprovada em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco (Orientador)
Universidade Federal do Ceará – UFC

Prof. Dr. Luis Parente Maia
Universidade Federal do Ceará – UFC

Prof. Dr. José Marcio Lins Marinho – UFC
Universidade Federal do Ceará – UFC

Dr. Francisco Nepomuceno Filho
PETROBRAS

À minha mãe, irmão e namorado.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao meu orientador, professor Mariano Castelo Branco, por todas as oportunidades e experiências que me tem proporcionado e pela confiança e credibilidade.

Ao amável companheiro, amigo e namorado Nilo Junior, que com uma paciência incrível repassou seus conhecimentos e esclareceu todas as minhas dúvidas. A todos os professores do Departamento de Geologia da UFC que contribuíram para minha formação profissional e passaram-me grandes ensinamentos de vida, tenho muito a agradecer aos professores Afonso, Clóvis, Christiano, Zé Airton, Wellington, Neivaldo (atualmente na UFSC) e David (atualmente na UFRN). Aos funcionários, Valmir, Verônica, Leal e Mara pela disposição em sempre ajudar e serem atenciosos comigo.

A toda minha família, por sempre acreditarem em mim, especialmente a minha mãe e meu irmão por todo amor, dedicação, carinho e paciência. Aos meus avós, Vó Socorro e Vô Mundah, por terem me acolhido de todo coração para ser sua netinha. A Ivone por ser uma segunda mãe e uma pessoa extraordinária. A D. Salete e todos os Pedrosa por me acolherem como família.

A toda minha turma e agregados pelo companheirismo, amizade, pelo convívio na sala de aula e por terem tornado as viagens de campo super divertidas.

Aos meus amigos Amanda, Caio e Eduardo, vocês foram essenciais para tornar essa jornada inesquecível. Obrigada pela amizade e pela parceria em qualquer circunstância!

Aos amigos do LGPSR, Nilo Jr, Glauciane, Ricardo, Fabiano, Nilton, Fernando, Dani, Zé do Gado, Ailton, Sérgio, Jackson, Caio, Eduardo, Melina, Jonathan, Vitor, Regilásio, Mateus, Eliel, Carlos Eduardo e Paulo. Obrigada por tudo!

Aos meus companheiros de campo, Nilo Jr., Melina, Jonathan e Mateus. Obrigada por todo o esforço e por fazerem dar certo.

Ao Irabson e família por cederem tão gentilmente sua casa em Parajuru. A D. Fátima que nos ajudou nesse período de campo.

Por fim, à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) pela formação através do PRH 31 e ao Projeto GEOFMEL/LGPSR/UFC/FCPC.

A todas as manifestações divinas, pois sem elas eu nada seria.

“Só existem dois dias do ano que nada pode ser feito. Um dia se chama ontem e o outro se chama amanhã, portanto hoje é o dia certo para amar, acreditar, fazer e principalmente viver”.

Dalai Lama

RESUMO

Este trabalho apresenta o resultado de um estudo integrado de dados geofísicos (magnetometria e gravimetria) que foi realizado na borda ocidental emersa da Bacia Potiguar (BP), NE do Ceará. Esta área sofreu reativações tectônicas de falhas importantes associadas às zonas de cisalhamento brasileiras e à abertura do Oceano Atlântico. Interpretações qualitativas e semi-quantitativas foram realizadas nos dados geofísicos visando o melhor entendimento das relações tectonoestratigráficas que envolvem a borda oeste da BP e tendo como base a determinação dos principais lineamentos geofísicos, sua geometria e profundidade das fontes e, a importante separação de domínios geofísicos. A partir de perfis geofísicos sobre o mapa de anomalias Bouguer residual e direcionados segundo NW-SE foram gerados modelos geológicos 2-D e 2,5-D objetivando melhor caracterizar a geometria e profundidade das fontes e assim promover resultados mais confiáveis do ponto de vista geológico. Os resultados mostram compartimentação estrutural caracterizada por lineamentos de 1ª ordem dispostos na direção NE-SW e de 2ª ordem dispostos na direção E-W e NW-SE. A disposição espacial dos domínios geofísicos está relacionada com os lineamentos brasileiros que ocorrem na região. A Zona de Cisalhamento Jaguaribe (ZCJ) que não é bem marcada em superfície aparece bem pronunciada em subsuperfície nos diversos mapas e modelos geofísicos. Os lineamentos Ponta Grossa e Fazenda Belém apresentam assinaturas geofísicas similares a da ZCJ e parecem limitar estruturas grabeniformes da borda oeste da BP. Outro lineamento, de expressão e profundidades semelhantes aos demais, aparece bem marcado pelas soluções de Euler 2-D a NW do Lineamento Ponta Grossa. As modelagens gravimétricas nos perfis mostram a geometria da borda oeste da BP, a qual possui feições grabeniformes que podem estar associadas à acumulação de hidrocarbonetos, como por exemplo, o campo petrolífero da Fazenda Belém. O embasamento cristalino de toda a região de estudo se mostra bastante heterogêneo. Alinhamentos de fontes magnéticas e gravimétricas rasas (< 1 km) são interpretados como falhas ou descontinuidades intrabaciais que, por sua vez, podem representar reativações das principais zonas de cisalhamento que se prolongam na área de estudo. Essas regiões são importantíssimas do ponto de vista da exploração de petróleo e gás na borda oeste da BP, uma vez que essas feições podem se comportar como trapas ou armadilhas geológicas e estruturais.

Palavras-chave: Métodos Potenciais, Deconvolução de Euler, Bacia Potiguar.

ABSTRACT

An integrated study of geophysical data (magnetic and gravity) was undertaken in the onshore western part of Potiguar Sedimentary Basin, NE Ceará. The development of this basin suffered tectonic reactivation of its major faults associated with the Brasiliano shear zones and opening of the Atlantic Ocean. Qualitative and quantitative interpretations of geophysical data were performed in order to understanding tectonostratigraphy relationships involving the western part of Potiguar Basin based on determination of main geophysical lineaments, geometry and depth of sources and the important determinations of geophysical domains. From geophysical profiles in NW-SE direction over Bouguer Map 2-D and 2,5 D geological models were generated to give better characterization of the geometry and the depth of the sources and thus promote more reliable results from geological interpretations. The results shown structural lineaments partitioning characterized by lineaments in the 1st NE-SW order direction and 2nd EW and NW-SE order directions. The spatial arrangement of geophysical fields is related to the Brasiliano lineaments that occur in the region. The Jaguaribe shear zone that is not marked on the surface appears much pronounced in the various maps and subsurface geophysical models. The Ponta Grossa and Fazenda Belém lineaments have geophysical similar signatures to Jaguaribe shear zone and appear to limit a graben forms structures on the west part of Potiguar Basin. Another lineament with similar expression to others appears well marked by the 2-D Euler solutions in NW of Ponta Grossa lineament. Gravity modeling over the profiles shows the geometry of the western part of Potiguar Basin which has a graben feature that may be associated with the accumulation of hydrocarbons such as the Fazenda Belém oil field. The crystalline basement of the study region is heterogeneous. Magnetic and gravity lineaments with shallow sources (<1 km) are interpreted as faults or intrabasin discontinuities which may represent the reactivation of major shear zones in the study area. These regions are very important to the oil and gas in the western part of Potiguar Basin, since these features can behave as geological/structural traps.

Keywords: Potential Methods, Euler Deconvolution, Potiguar Basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – a) Mapa de anomalia magnética da região com destaque para a área de estudo; b) mapa de anomalia gravimétrica da região com destaque para a área de estudo. (Fonte: Pedrosa <i>et al</i> (2010)).....	2
Figura 1.2: Imagem do Modelo Digital do Terreno com a localização e os acessos à área de estudo.....	4
Figura 3.1: Mapa esquemático de parte do Gondwanda Oeste mostrando as principais massas cratônicas em cinza e as faixas móveis em amarelo claro. As zonas de sutura brasileiras/pan-africanas são marcadas pelas linhas pretas. FA: Faixa Araguaia, FB: Faixa Brasília, FA: Faixa Adamaoua, FOC: Faixa do Oeste de Congo, FH: Faixa Hoggar, FY: Faixa Yaoundé, PT: Província Tapajós, PB: Província Borborema, PN: Província Nigéria, PT: Província Touareg, (Adaptado de Fetter, 1999).....	7
Figura 3.2: Mapa geotectônico da Província Borborema (modificado de Cavalcante, 1999, Brito Neves et al., 2000). Domínios Tectônicos - DTS: Setentrional, DTC: Central, DTM: Meridional. Sub-domínios do DTS – DMC: Médio Coreau, DCC: Ceará Central, DRN: Rio Grande de Norte. Zonas de Cisalhamento – ZCSPII: Sobral-Pedro II, ZCSP: Senador Pompeu, ZCJ: Jaguaribe, ZCPA: Porto Alegre, ZCPJC: Picuí-João Câmara, ZCP: Patos, ZCPE: Pernambuco.....	9
Figura 4.1: Mecanismos de evolução da margem continental brasileira e processos genéticos iniciais do Rifte Potiguar (Françolin & Szatmari, 1987).....	14
Figura 4.2: Modelo de reconstrução tectônica do nordeste brasileiro e sudoeste africano durante os estágios sin-rifte I, II e III (Compilado de Matos, 1992).....	16
Figura 4.3: Arcabouço estrutural da Bacia Potiguar (Pedrosa Jr, 2010 e Bertani <i>et al.</i> , 1990).....	17
Figura 4.4: Carta estratigráfica da Bacia Potiguar (Compilado de Pessoa Neto <i>et al.</i> , 2007).....	19
Figura 4.5: Carta de evolução tectono-sedimentar da Bacia Potiguar (Compilado de Pessoa Neto <i>et al.</i> , 2007).....	20
Figura 4.6: Mapa Geológico simplificado da área de estudo. LJ: Lineamento Jaguaribe; LPGFB: Lineamento Ponta Grossa – Fazenda Belém.....	24
Figura 5.1: Mapa das linhas de voo do levantamento aerogeofísico do Projeto Bacia Potiguar, destaque em vermelho para o polígono da área de estudo.....	25
Figura 5.2: Perfis com valores do CMA e da diferença da quarta ordem com a presença do efeito pepita.....	26
Figura 5.3: Perfis com valores do CMA e da diferença da quarta ordem sem a presença de valores pepita.....	26
Figura 5.4: Etapas de processamento dos dados aeromagnéticos da área de estudo. CMA – Campo Magnético Anômalo; RTP – Campo Magnético Reduzido ao Polo; DER_X – Primeira Derivada Horizontal em X; DER_Y – Primeira Derivada Horizontal em Y; DER_Z – Primeira Derivada Vertical em Z; AGHT: Amplitude do Gradiente Horizontal Total; ISA: Inclinação do Sinal Analítico; ASA: Amplitude do Sinal Analítico.....	27

Figura 5.5: Representação gráfica do filtro cosseno direcional (Geosoft, 2010).....	28
Figura 5.6: Campo Magnético Anômalo – CMA com filtro cosseno direcional.....	28
Figura 5.7: Mapa de anomalias magnéticas reduzidas ao polo.....	29
Figura 5.8: Mapa de Amplitude do Sinal Analítico da área de estudo.....	30
Figura 5.9: Mapa de Inclinação do Sinal Analítico.....	31
Figura 5.10: Amplitude do Gradiente Horizontal Total da área de estudo.....	32
Figura 5.11: Mapa de domínios magnéticos com os principais lineamentos interpretados.....	34
Figura 5.12: Diagrama de roseta dos principais lineamentos gravimétricos interpretados na área de estudo. Notar forte tendência NE e lineamentos subordinados NW e E-W.....	34
Figura 5.13: Espectro de potência radial médio do campo magnético anômalo da área de estudo.....	35
Figura 5.14: Nuvens de soluções para Deconvolução de Euler 3-D com índice estrutural 0 na área de estudo.....	37
Figura 5.15: Nuvens de soluções para Deconvolução de Euler 3-D com índice estrutural 3 na área de estudo.....	38
Figura 5.16: Domínios magnéticos e os lineamentos interpretados com as nuvens de soluções da Deconvolução de Euler 3-D.....	38
Figura 6.1: Prancha de fotografias dos detalhes da aquisição gravimétrica e plani-altimétrica. A: Posição do gravímetro em relação à base gravimétrica de Aracati, B, C, D e E: Perspectiva geral de alguns locais escolhidos para a realização das estações e aquisição DGPS; F: Catálogo de informações relevantes no momento das leituras de gravidade; e G e H: Detalhe do gravímetro CG-5 em preparação para as leituras.....	41
Figura 6.2: Relatório da Estação Gravimétrica Aracati “B” do Observatório Nacional utilizada como estação base na aquisição dos dados gravimétricos no extremo oeste da Bacia Potiguar.....	42
Figura 6.3: Estrutura básica do método DGPS (Assis, 2005).....	43
Figura 6.4: Distribuição das estações gravimétricas pertencentes ao banco de dados da ANP.....	46
Figura 6.5: Distribuição das estações gravimétricas prévias e as novas estações adquiridas. A linha vermelha representa o perfil usado na análise estatística dos conjuntos de dados.....	46
Figura 6.6: Modelo digital do terreno – SRTM da área de estudo com zonas em tons de cinza que mostram os locais com maiores diferenças na variação da gravidade entre os mapas de anomalias Bouguer simples e Bouguer completo.....	50
Figura 6.7: Anomalias gravimétricas Bouguer (1), regionais (2) e residuais (3) do perfil NW-SE extraído da parte central da área de estudo. A curva gravimétrica A (linha tracejada) considera apenas o bando de dados prévios da ANP. A curva B (linha cinza) foi obtida somente com os dados levantados para a pesquisa. A curva C (linha preta) representa a integração dos dois conjuntos de estações gravimétricas.....	53
Figura 6.8: Diagramas de correlação das anomalias gravimétricas Bouguer, regionais e residuais entre os dados prévios (ANP) e os dados adquiridos.....	54
Figura 6.9: Mapa de anomalias Bouguer Completo da borda oeste emersa da Bacia Potiguar.....	55
Figura 6.10: Espectro de potência radial médio do campo gravimétrico anômalo Bouguer da área estudada.....	56

Figura 6.11: Mapa de anomalias gravimétricas regionais da borda oeste emersa da Bacia Potiguar.....	57
Figura 6.12: Mapa de anomalias gravimétricas residuais da borda oeste da porção emersa Bacia Potiguar.....	58
Figura 6.13: Mapa de anomalias gravimétricas da primeira derivada vertical da borda oeste emersa da Bacia Potiguar.....	58
Figura 6.14: Domínios gravimétricos com os principais lineamentos interpretados na área de estudo.....	60
Figura 6.15: Diagrama de roseta dos principais lineamentos gravimétricos interpretados na área de estudo. Notar forte tendência NE e lineamentos subordinados NW e E-W.....	60
Figura 6.16: Nuvens de soluções para Deconvolução de Euler 3-D na área de estudo.....	62
Figura 6.17: Domínios gravimétricos e os lineamentos interpretados com as nuvens de soluções da Deconvolução de Euler 3-D e da primeira derivada vertical na área de estudo.....	62
Figura 6.18: Linha sísmica interpretada para a utilização da informação de profundidade do embasamento (Sousa, 2002).....	63
Figura 6.19: Mapa de anomalias gravimétricas residuais e a disposição dos perfis A-A', B-B' e C-C'.....	64
Figura 6.20: Mapa da Província Borborema ilustrando os limites da Bacia Potiguar (esquerda) e perfil E-W da bacia mostrando suas plataformas e seus altos do embasamento (Bertani <i>et al.</i> , 1990).....	65
Figura 6.21: Modelo Geofísico 2-D da seção A – A'. Notar o ajuste entre as curvas observada e calculada.....	65
Figura 6.22: Modelo Geofísico 2-D da seção B– B'. Notar o ajuste entre as curvas observada e calculada.....	67
Figura 6.23: Modelo Geofísico 2-D da seção C– C'. Notar o ajuste das curvas observada e calculada.....	67
Figura 7.1: Mapa de domínios geofísicos com os principais alinhamentos estruturais, zonas de cisalhamentos brasilianas e os perfis geofísicos utilizados nas modelagens e estimativa de fontes. ZCJ: Zona de Cisalhamento Jaguaribe; LPGFB: Lineamento Ponta Grossa – Fazenda Belém.....	68
Figura 7.2: Perfis gravimétricos e magnéticos na parte superior e as nuvens de soluções geradas pela deconvolução de Euler 2-D na parte inferior. A: seção A-A'; B: seção B-B' e C: seção C-C'. As linhas pretas representam as principais falhas ou lineamentos interpretados. ZCJ: Zona de Cisalhamento Jaguaribe; LPG: Lineamento Ponta Grossa; LFB: Lineamento Fazenda Belém.....	70
Figura 7.3: Modelos geológicos dos perfis A-A', B-B' e C-C'. ZCJ: Zona de Cisalhamento Jaguaribe. LPG: Lineamento Ponta Grossa. LFB: Lineamento Fazenda Belém.....	72
Figura 7.4: Representação em 2,5-D da geometria interna da borda oeste da Bacia Potiguar obtida através da modelagem geofísica.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1: Estações planialtimétricas BASE e suas estações gravimétricas referentes.....	40
Tabela 6.2: Parâmetros utilizados no processamento dos dados planialtimétricos.....	44
Tabela 6.3: Dados estatísticos das anomalias gravimétricas Bouguer e das componentes regional e residual do perfil traçado na área de estudo (Figura 6.5). Curvas: A – Banco de dados da ANP; Curvas B – Dados do levantamento gravimétrico; Curvas C: Integração do banco de dados da ANP com os novos dados de levantamento gravimétrico.....	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Apresentação	1
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivos Gerais	3
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.3	Localização e Vias de acesso	4
2	MATERIAIS E MÉTODOS	5
2.1	Etapa Inicial	5
2.2	Etapa de Campo	5
2.3	Processamento e Interpretação de Dados Geofísicos	5
2.4	Etapa Final	6
3	A PROVÍNCIA BORBOREMA	7
3.1	Domínio Rio Grande do Norte	10
3.1.1	Arqueano	10
3.1.2	Paleoproterozóico	11
3.1.3	Neoproterozóico	12
4	BACIA POTIGUAR	13
4.1	Gênese da Bacia Potiguar	13
4.2	Arcabouço Estrutural	15
4.3	Sequências Tectono-sedimentares	17
4.4	Magmatismo Meso-Cenozóico	21
4.5	Estruturas rasas na Bacia Potiguar	22
4.6	Arcabouço Geológico da Área	23
5	MAGNETOMETRIA	25
5.1	Origem dos Dados	25
5.2	Processamento dos Dados	25
5.2.1	Filtro Cosseno Direcional	27
5.2.2	Filtro de Redução ao Polo	29
5.2.3	Amplitude do Sinal Analítico	30
5.2.4	Inclinação do Sinal Analítico	31
5.2.5	Amplitude do Gradiente Horizontal Total	32
5.3	Interpretação dos Dados Magnéticos	33
5.3.1	Interpretação Qualitativa	33
5.3.2	Interpretação Semi-Quantitativa	35
5.4	Deconvolução de Euler 3-D	36
6	GRAVIMETRIA	39
6.1	Introdução	39
6.2	Método de Aquisição e Materiais	39
6.3	Posicionamento Planialtimétrico	42
6.4	Banco de Dados Graviméricos	45
6.5	Levantamento Gravimétrico	47
		47

6.6	Correção de Dados Gravimétricos	
6.6.1	Correção de Maré	47
6.6.2	Correção de Altura do Instrumento	48
6.6.3	Correção da Deriva Instrumental	48
6.6.4	Gravidade Absoluta	48
6.6.5	Correção de Latitude	48
6.6.6	Anomalia Ar-Livre	49
6.6.7	Anomalia Bouguer	49
6.6.8	Anomalia Bouguer Completa	49
6.6.9	Correção de Terreno	49
6.7	Análise Estatística das Anomalias Gravimétricas	51
6.8	Processamento dos Dados Gravimétricos	55
6.9	Mapa de Anomalias Gravimétricas Regional	56
6.10	Mapa de Anomalias Gravimétricas Residual	57
6.11	Deconvolução de Euler 3-D	61
6.12	Modelagem Gravimétrica 2-D	63
7	INTEGRAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS E GEOLÓGICOS	68
7.1	Deconvolução de Euler 2-D	69
7.2	Modelos Geológicos	69
8	SÍNTESE DAS PRINCIPAIS CONCLUSÕES	74
	REFERÊNCIAS	76

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

A Bacia Potiguar (BP) localiza-se no extremo leste da Margem Equatorial Brasileira ocupando uma área de 119.300 km², compreendendo um segmento emerso com 33.200 km² e outro submerso com 86.100 km² (ANP, 2005). Está inserida, em sua maior parte, no Estado do Rio Grande do Norte (RN) e, parcialmente, no Estado do Ceará (CE). Geologicamente sua parte emersa é limitada a sul, leste e oeste pelo embasamento cristalino, enquanto que a parte submersa da bacia é limitada a norte pelo Oceano Atlântico até a isóbata de -2.000m, a nordeste o alto de Touros a separa da Bacia Pernambuco-Paraíba e a noroeste ocorre o alto de Fortaleza que define seu limite com a Bacia do Ceará.

A BP se desenvolveu sobre um substrato de rochas pré-cambrianas pertencentes à Província Borborema. Os *trends* estruturais tem direção NE-SW, além de zonas de cisalhamento de direção NE-SW e E-W. Sendo assim, a BP faz parte do Sistema de Rifte Brasileiro no qual também estão inseridas as bacias do Recôncavo, Tucano-Jatobá, Rio do Peixe e Sergipe-Alagoas (Matos, 1992).

A BP apresenta importância no que diz respeito à produção de petróleo e gás natural. De acordo com o boletim anual de produção de petróleo e gás natural, edição de abril de 2012, a bacia lidera a produção de petróleo em terra com o campo de Canto do Amaro que possui o maior número de poços produtores, com uma porcentagem de 13,5%. A metade dos poços produtores do Brasil está na Bacia Potiguar, sendo 46,6% no Rio Grande do Norte e 4,6% no Ceará (ANP, 2012).

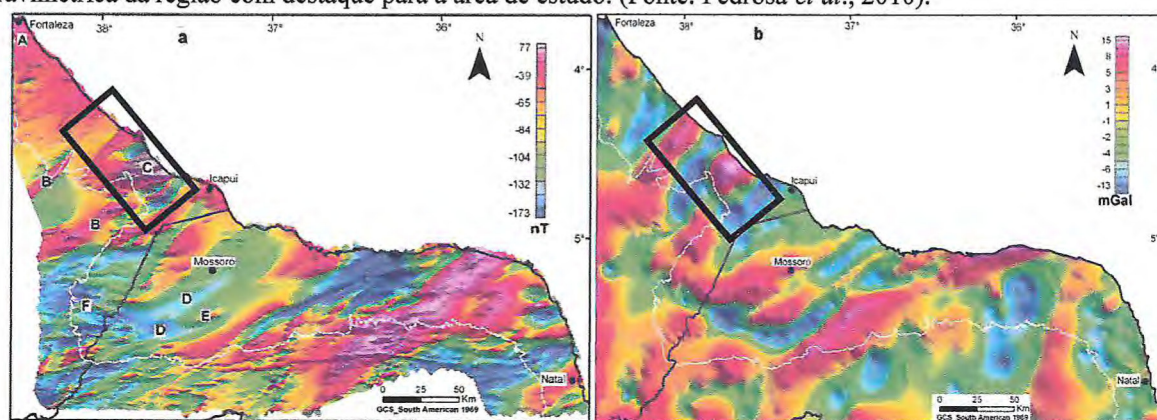
A área proposta nesse projeto de pesquisa está inserida na porção mais ocidental da BP na sua porção *onshore*, estando dentro dos limites do Estado do Ceará. A estrutura da BP compreende três unidades básicas (Bertani *et al*, 1990): grábens, altos internos e plataformas do embasamento que contém sequências sedimentares distintas de idades neocomiana à terciária. Sua arquitetura interna é resultado de modificações durante a evolução nos estágios *rift*, *drift* e do magmatismo recente.

Segundo Pedrosa *et al* (2010) a região na qual está inserida a área de estudo possui uma anomalia gravimétrica positiva e uma anomalia magnética bastante expressiva (Figura 1.1). Essa estrutura peculiar ainda não está bem delimitada e é próxima ao campo petrolífero da Fazenda Belém, região a qual aqueles autores denominaram de Domínio Magnético Orós e Domínio Gravimétrico Jaguaribe. Os dados gravimétricos que foram levantados em uma

Capítulo 1

malha regular de semidetalle aplicado junto ao processamento dos dados aéreos do Projeto Bacia Potiguar, levantados pela Petrobrás entre dezembro de 1986 e fevereiro de 1987, ajudaram a delimitar essa estrutura, bem como conhecer melhor sua direção e profundidade. Uma associação com acúmulo de hidrocarboneto poderá ser feita devido a sua proximidade e analogia a estruturas de áreas vizinhas.

Figura 1.1 –a) Mapa de anomalia magnética da região com destaque para a área de estudo; b) mapa de anomalia gravimétrica da região com destaque para a área de estudo. (Fonte: Pedrosa *et al.*, 2010).



Os métodos potenciais foram os precursores nas pesquisas e exploração de recursos minerais, principalmente os hidrocarbonetos nas margens continentais (Nettleton, 1976). São amplamente utilizados para o mapeamento dos limites das bacias sedimentares e de diversos alvos importantes para a indústria do petróleo (grábens, *horsts*, domos salinos, falhas, espessura crustal, espessura de coluna estratigráfica, etc). A gravimetria e magnetometria fornecem melhores resultados na determinação de geometrias internas, relações com arcabouços estruturais e mapeamento de feições regionais com importância geológica aos sistemas petrolíferos. Os dados geofísicos servirão de base para uma análise estrutural de escala em semidetalle, cuja finalidade mais aplicada será a de modelar a evolução da arquitetura interna, deformação e distribuição de tensões na formação da bacia.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Promover o entendimento sobre o arcabouço estrutural e evolução da porção oeste da Bacia Potiguar. Este estudo tem como base a aquisição, processamento e interpretação de dados gravimétricos e magnéticos com vistas ao conhecimento da arquitetura interna da borda oeste da Bacia Potiguar.

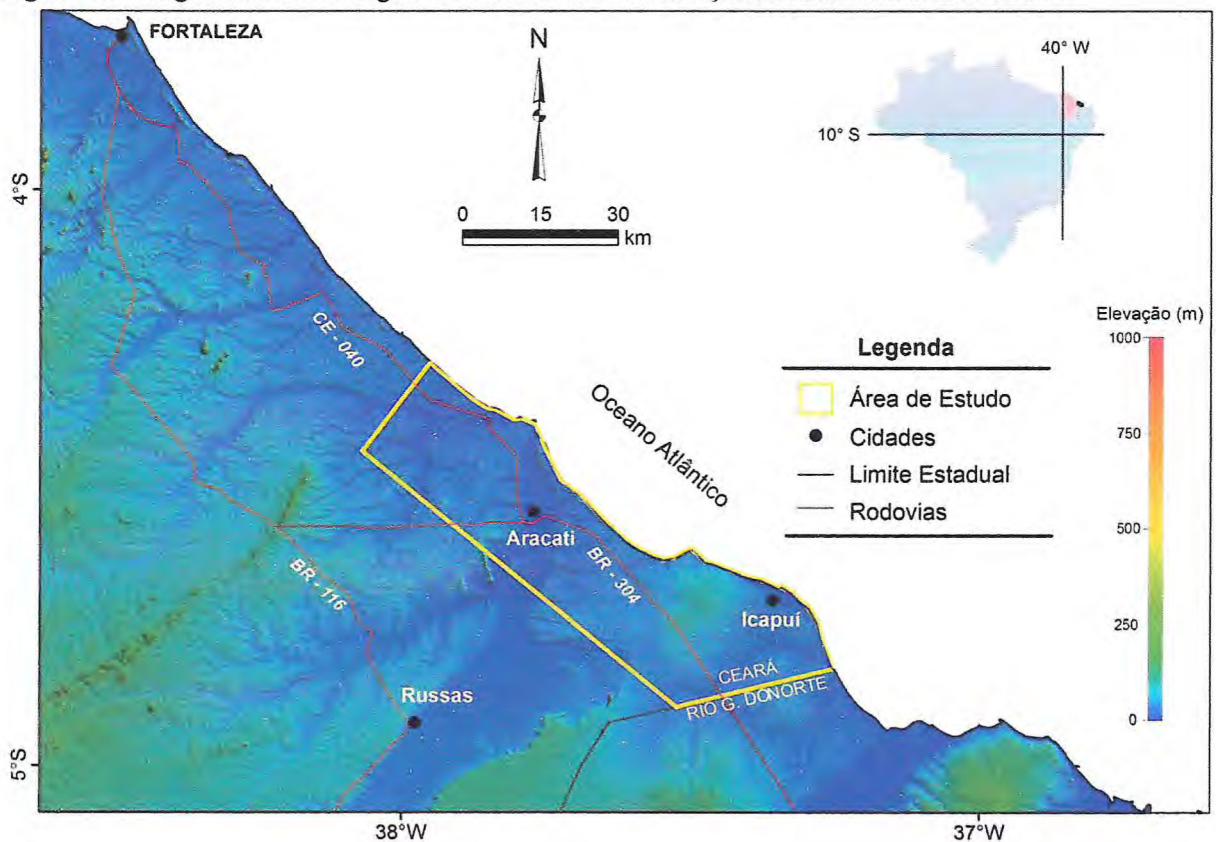
1.2.2. Objetivos Específicos

- ✓ Ampliar o banco de dados gravimétricos terrestres do Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto (LGPSR-UFC) para a borda oeste da Bacia Potiguar;
- ✓ Realizar uma malha, o mais retangular possível, com cerca de 150 estações abrangendo uma área de aproximadamente 2.000 km²;
- ✓ Gerar e integrar mapas de anomalias gravimétricas (G, Bouguer, Ar-Livre, Bouguer Regional e Residual, além de seções) e magnéticas (Campo Anômalo, Amplitude e Inclinação do Sinal Analítico, etc);
- ✓ Gerar mapas de interpretação dos principais lineamentos estruturais da região;
- ✓ Determinar, em subsuperfície, estruturas geológicas na Bacia Potiguar que possam estar associadas ao acúmulo de hidrocarbonetos;
- ✓ Estudar a geometria da porção oeste da Bacia Potiguar com base em modelagem gravimétrica e Deconvolução de Euler sobre os dados gravimétricos e magnéticos;
- ✓ Estudar feições estruturais por meio de modelagens gravimétricas 2D e/ou 2,5D.
- ✓ Determinar relação de continuidade, em profundidade, da Zona de Cisalhamento Jaguaribe que não aflora sobre os sedimentos litorâneos da região;
- ✓ Formação de recursos humanos especializados na aplicação de métodos geofísicos na cartografia geológica básica e prospecção de recursos minerais, incluindo petróleo e gás natural em bacias sedimentares emersas.

1.3. Localização da Área

A Bacia Potiguar localiza-se no extremo nordeste do Brasil, englobando as porções norte do estado do Rio Grande do Norte e nordeste do Ceará. A área de pesquisa envolve a porção oeste emersa da Bacia Potiguar que está inserida dentro do estado do Ceará (Figura 1.2). Apresenta formato irregular com cerca de 2.000 km² de área superficial, estando inserida nas seguintes folhas, SB-24-X-A-II, SB-24-X-A-III, SB-24-X-A-VI, SB-24-X-B-IV. O acesso à área pode ser feito através da rodovia estadual litorânea CE-040, partindo do Município de Fortaleza no sentido sudeste até Aracati (Figura 1.2), adentrando na borda oeste da bacia Potiguar. A partir daí, é utilizada a BR – 304 até o limite entre Ceará e Rio Grande do Norte. Os demais acessos serão feitos por meio de estradas vicinais.

Figura 1.2: Imagem do Modelo Digital do Terreno com a localização e os acessos à área de estudo.



2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos na presente monografia de graduação, a pesquisa geofísica aplicada e multidisciplinar envolveu técnicas geofísicas de Magnetometria e Gravimetria da porção oeste emersa da Bacia Potiguar. A pesquisa foi executada seguindo uma linha de ação integrada envolvendo quatro etapas abaixo descritas.

2.1. Etapa Inicial

Nesta primeira etapa foi realizada compilação de material bibliográfico disponível na literatura sobre a Bacia Potiguar, especificamente a porção oeste da bacia, seu arcabouço tectônico, os aspectos técnicos e científicos envolvidos na cartografia magnetométrica e gravimétrica em bacias sedimentares. Mapas geológicos e geofísicos da Bacia Potiguar disponíveis em meio digital ou impressos foram compilados para gerar o mapa base, sobre o qual estão sendo inseridos todos os níveis de informações obtidas. O sistema de informações georreferenciadas *Arc View 10* foi utilizado para a concatenação dos dados geofísicos, de forma que haja plena interação espacial entre os mesmos.

2.2. Etapa de Campo

Nesta fase, foram incorporados novos dados gravimétricos terrestres na borda oeste da Bacia Potiguar, extremo NE do Ceará. A região de estudo apresentava cobertura gravimétrica irregular, onde os dados disponíveis não atendiam ao objetivo da pesquisa. Foi efetuado levantamento gravimétrico para aumentar a cobertura gravimétrica na região e assim possibilitar a geração de mapas de anomalias que se enquadram ao escopo do estudo, além da modelagem gravimétrica da arquitetura interna da borda oeste da bacia. Esta fase foi dividida em duas etapas, quando foram adquiridas um total de 142 novas estações gravimétricas na região.

2.3. Processamento e Interpretação de Dados Geofísicos

Os dados aerogeofísicos do Projeto Bacia Potiguar, levantados pela Petrobrás entre dezembro de 1986 e fevereiro de 1987 foram utilizados nesse trabalho. Estes foram cedidos ao LGPSR pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP)

na forma de arquivos digitais. Esses dados cobrem a parte nordeste da Província Borborema, bem como porções leste do domínio Ceará Central e norte do domínio Rio Grande do Norte, assim, toda a extensão da área de estudo é contemplada pelo levantamento. Os dados foram interpolados em malha regular de 500 m pelo método bidirecional gerando mapas de anomalias magnéticas. A área de estudo compreende cerca de 2.000 km² e é recoberta por linhas geofísicas de média densidade de amostras, com direção NW-SE, espaçamento de 2 km entre si e altura de voo de 500 m.

Além disso, foram aplicados filtros para avaliar a os dados quanto à presença de inconsistências, como o efeito pepita ou picos, estes são valores anômalos sem ter na vizinhança outro que o justifique. Outras técnicas foram utilizadas para realçar características específicas das fontes magnéticas, como as suas dimensões espaciais e profundidades. Em princípio, foram empregados filtros de redução ao polo para baixas latitudes magnéticas, sinal analítico (amplitude e fase) e Deconvolução de Euler (Telford *et al.*, 1990).

Os valores de gravidade do levantamento terrestre realizado no presente trabalho foram incorporados aos dados oriundos do banco de dados geofísicos da ANP. Uma importante análise estatística foi feita com o intuito de avaliar a contribuição dos novos dados e a correlação entre os diferentes bancos de dados (novo levantamento, banco de dados da ANP e a integração dos dois bancos de dados). A interpolação foi feita pelo método *Kriging* (Geosoft, 2010) em uma malha regular de 500 m. Foi utilizado filtro Gaussiano de separação regional-residual, além de outros filtros para a extração da derivada vertical e Deconvolução de Euler (Telford *et al.*, 1990).

2.4. Etapa Final

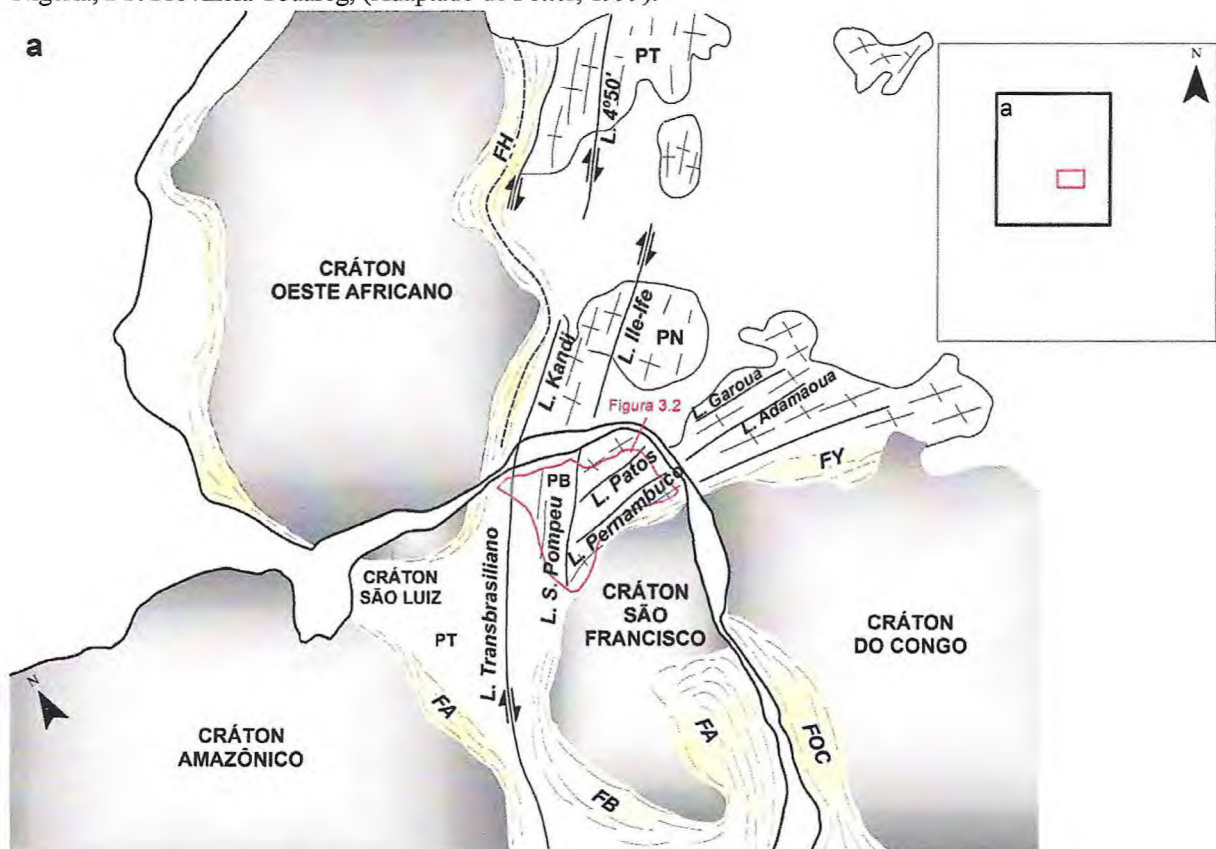
Com os resultados gerados através do processamento de dados aeromagnéticos e gravimétricos, foram feitas interpretações qualitativas e semi-quantitativas. Esta etapa consistiu principalmente na interpretação integrada dos dados geofísicos, favorecendo uma melhor correlação entre as estruturas magnéticas e gravimétricas com o arcabouço estrutural do oeste da Bacia Potiguar.

Por fim, a confecção desta monografia de final de graduação no Curso de Geologia da Universidade Federal do Ceará, com a integração final dos resultados geofísicos multidisciplinares visando, fundamentalmente, contribuir com a elucidação da problemática de evolução geodinâmica da borda oeste da Bacia Potiguar.

3. A PROVÍNCIA BORBOREMA

A Província Borborema (PB), localizada no Nordeste Oriental do Brasil, compreende uma vasta região geológica de idade pré-cambriana. Abrange aproximadamente mais de 450.000 km², cobrindo parte do norte da Bahia e sudoeste do Piauí, até o noroeste do Ceará (Almeida *et al.*, 1977). A PB é considerada como parte integrante do extenso sistema orogênico Brasileiro/Pan-Africano gerado pela convergência dos crátons Amazônico, São Luís-Oeste Africano e São Francisco-Congo durante o Neoproterozóico e responsável pela amalgamação do Gondwana Ocidental (Figura 3.1). Constitui a parte mais ocidental em território brasileiro, sendo representada na África pelas províncias Oeste-Nigeriano, Leste Nigeriano, Camarões e Touareg (Mabessone, 2002). O Fanerozóico caracteriza-se pela transição pós-orogênica (fim do ciclo Brasileiro) e estabilização da província. A reativação tectônica Wealdeniana promoveu a desagregação do continente Gondwana e individualizou a PB dentro do continente sul-americano.

Figura 3.1: Mapa esquemático de parte do Gondwana Oeste mostrando as principais massas cratônicas em cinza e as faixas móveis em amarelo claro. As zonas de sutura brasileiras/pan-africanas são marcadas pelas linhas pretas. FA: Faixa Araguaia, FB: Faixa Brasília, FA: Faixa Adamaoua, FOC: Faixa do Oeste de Congo, FH: Faixa Hoggar, FY: Faixa Yaoundé, PT: Província Tapajós, PB: Província Borborema, PN: Província Nigéria, PT: Província Touareg, (Adaptado de Fetter, 1999).



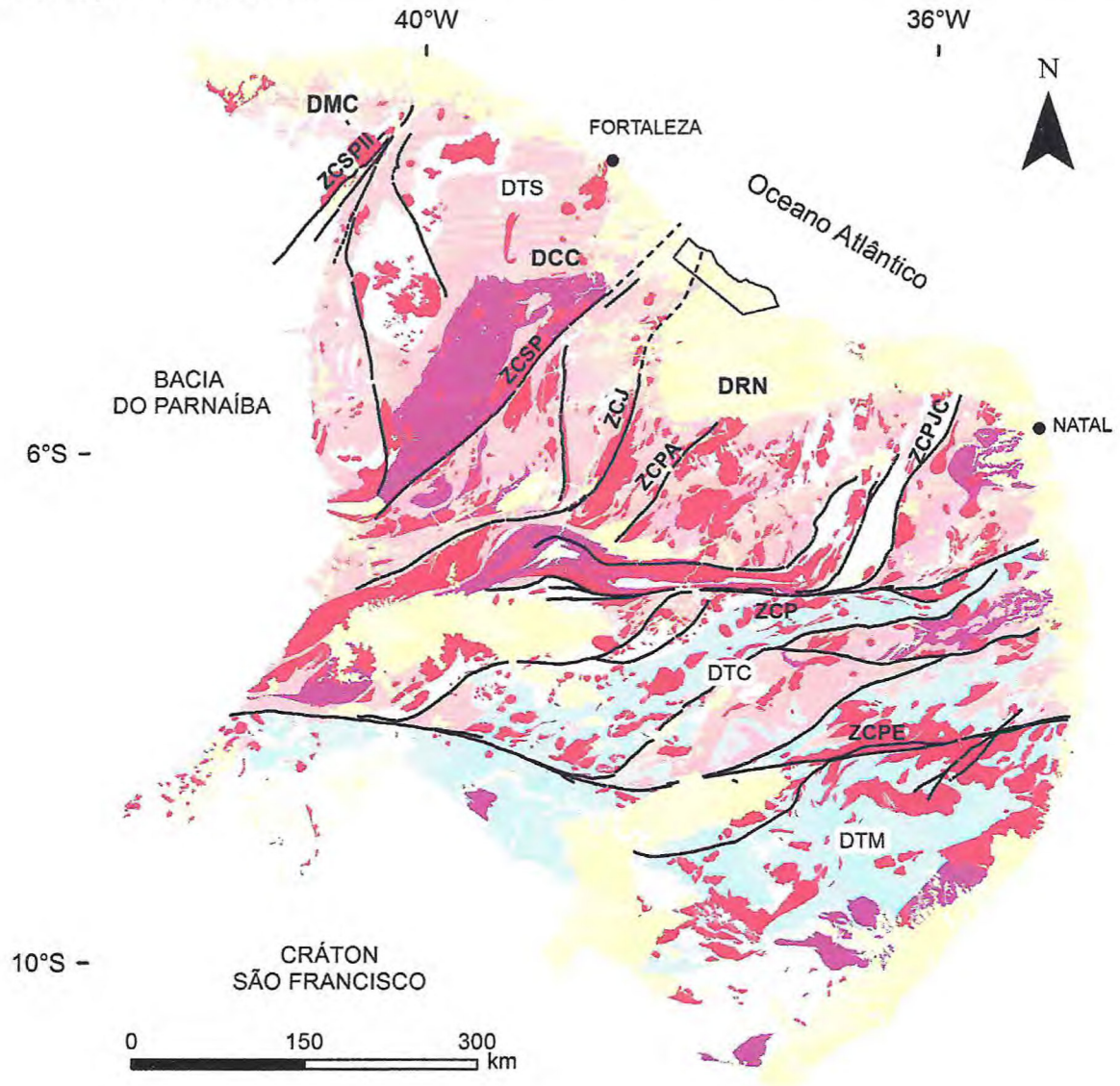
A PB é limitada a norte e leste pelo oceano atlântico, a oeste pela Bacia do Parnaíba e a sul pelo Cráton São Francisco (Figura 3.2). Constitui-se de diversas faixas de rochas supracrustais, dispersas através de terreno gnáissico-migmatítico com vários *trends* estruturais (Jardim de Sá, 1994). Estas faixas configuram-se em sistemas de dobramentos, resultantes da superposição de diversos eventos tectônicos, metamórficos e magmáticos (principalmente granitóides) em sedimentos e rochas vulcânicas acumuladas durante o Proterozóico Médio e Superior (Santos & Brito Neves, 1984). Dentre os extensos lineamentos que cortam a Província Borborema, merecem destaque os lineamentos de Patos e Pernambuco/Alagoas, orientados na direção E-W, os quais delimitam uma zona de falhamento e alinhamentos estruturais denominada de Zona Transversal (Brito Neves *et al.*, 1995; Santos *et al.*, 1997).

A separação e caracterização de conjuntos, por vezes limitados por zonas de cisalhamento, tem levado à divisão da PB em domínios que refletem, de forma geral, modelos geotectônicos diversos. São esses: Domínio Tectônico Setentrional (DTS), Domínio Tectônico Central (DTC) e Domínio Tectônico Meridional (DTM), segundo Cavalcante (1999), que teve como base os trabalhos de Brito Neves *et al.* (1995), Van Schmus *et al.* (1995, 1997), Jardim de Sá (1994) e Santos (1995, 1996).

O DTM encontra-se representado pelas associações de Terrenos Sergipanos e Riacho do Pontal e pelos Terrenos Pernambuco-Alagoas, com posicionamento marginal ao Cráton São Francisco e com distribuição até o Lineamento Pernambuco (Figura 3.2). O DTC encontra-se delimitado pelas zonas de cisalhamentos Patos, ao norte, e Pernambuco, ao sul, interligadas por um denso sistema de zonas de cisalhamento, preferencialmente sinistrais, num arranjo que levou Jardim de Sá *et al.* (1995) a sugerir uma evolução segundo uma mega-estruturação em dominó. Por fim, o DTS localiza-se em toda porção norte do lineamento de Patos. Neste trabalho, é adotada uma subdivisão tectonoestratigráfica da porção setentrional da Província Borborema formada por três domínios: Médio Coreaú, Ceará Central e Rio Grande do Norte (Van Schmus *et al.*, 1995; Brito Neves *et al.*, 2000, 2001; CPRM, 2003) (Figura 3.2). Dando enfoque ao Domínio Rio Grande do Norte por conter a área de estudo.

Capítulo 3

Figura 3.2: Mapa geotectônico da Província Borborema (modificado de Cavalcante, 1999, Brito Neves et al., 2000). Domínios Tectônicos - DTS: Setentrional, DTC: Central, DTM: Meridional. Sub-domínios do DTS – DMC: Médio Coreaú, DCC: Ceará Central, DRN: Rio Grande de Norte. Zonas de Cisalhamento – ZCSPII: Sobral-Pedro II, ZCSP: Senador Pompeu, ZCJ: Jaguaribe, ZCPA: Porto Alegre, ZCPJC: Picuí-João Câmara, ZCP: Patos, ZCPE: Pernambuco.

**LEGENDA**

- Coberturas sedimentares
- Corpos graníticos
- Sequências neoproterozóicas
- Sequências mesoproterozóicas
- Sequências paleoproterozóicas
- Sequências arqueanas
- Zonas de Cisalhamento
- Área de estudo

PROVÍNCIA BORBOREMA

a) O Domínio Médio Coreaú (DMC - NW Ceará): limitado pela Zona de Cisalhamento Sobral-Pedro II (parte norte do Lineamento Transbrasiliano) a sudeste e a noroeste pelo Cráton São Luis. Compreende rochas do embasamento gnáissico paleoproterozóico juvenil formado a 2,35 Ga (Fetter, 1999), sequências supracrustais neoproterozóicas (Santos, 1999), além de granitóides intrusivos (plútons de Meruoca e Mucambo) situados próximos aos litotipos vulcano-sedimentares da Bacia de Jaibaras.

b) O Domínio Ceará Central (DCC): é a mais extensa unidade geotectônica da região central da PB e engloba quase a totalidade do Estado do Ceará. Estando delimitada a SE pela Zona de Cisalhamento Senador Pompeu e a NW pela Zona de Cisalhamento Sobral-Pedro II. É caracterizado pela ocorrência de embasamento arqueano representado pelo Maciço de Tróia, Pedra Branca e Mombaça, por rochas supracrustais representadas por extensas faixas de dobramento de idade neoproterozóica, pela presença de extenso complexo granítico-migmatítico (Complexo Tamboril - Santa Quitéria) interpretado como arco magmático (Fetter *et al.*, 2003), além de suítes graníticas sin, tardi e pós-tectônica.

c) O Domínio Rio Grande do Norte (DRN): localizado na porção NE da província, ocupa uma área de mais de 150.000 km² e é limitado a sul pelo Lineamento de Patos e a noroeste pela Zona de Cisalhamento Senador Pompeu, além de estar encoberto a norte pela Bacia Potiguar e a norte e leste por sedimentos costeiros cenozoicos (Brito Neves *et al.*, 2000). Caracteriza-se pela ocorrência do núcleo arqueano mais antigo da Província Borborema, representado pelo Maciço São José do Campestre (Dantas *et al.* 2004), por sequências supracrustais paleoproterozóicas da Faixa Orós-Jaguaribe (Parente & Arthaud, 1995) e neoproterozóicas da Faixa Seridó, além da ocorrência de um extenso complexo gnáissico-migmatítico denominado de Complexo Caicó e grandes quantidades de corpos granitóides de idade neoproterozóica. A área de estudo está inserida dentro de tal domínio, que será descrito detalhadamente a seguir;

3.1. Domínio Rio Grande do Norte

3.1.1. Arqueano

Maciço São José do Campestre

O Maciço Arqueano São José do Campestre localiza-se na parte nordeste do DRN e foi inicialmente denominado por Brito Neves (1983) de Maciço Caldas Brandão/ São José

do Campestre. É datado como a mais antiga crosta siálica da Plataforma Sul-Americana (Dantas, 1997; Brito Neves *et al.*, 2000, Dantas *et al.*, 2004). A evolução tectônica do maciço que ocupa forma dômica com área de mais de 6.000 km², consiste em larga massa continental formada por aglomeração e retrabalhamento de fragmentos crustais que cresceram de forma independente e posteriormente foram amalgamados no Paleoproterozóico. Esses fragmentos que sofreram diferentes episódios de acreção e de magmatismo refletem uma variedade de assembleias litológicas e blocos crustais distintos.

É formado pelas seguintes unidades litológicas, da base para o topo, Gnaisse Bom Jesus, Complexo Presidente Juscelino, dominado por diatexitos e metatexitos com afinidades com rochas do tipo TTG, Complexo Brejinho (trondhjemitos peraluminosos, que variam de monzogranitos a granodioritos), rochas máficas intrusivas do Complexo Senador Eloi de Souza e *plutons* neo-arqueanos.

3.1.2. Paleoproterozóico

Complexo Gnáissico – Migmatítico

É parte do embasamento cristalino bastante abundante em toda porção nordeste da PB. Sua composição é essencialmente tipo TTG, com ortognaisses tonalíticos a granodioríticos geralmente metamorfisados sob condições do fácies anfibolito alto, apresentando graus variados de migmatização. Rochas metassedimentares ocorrem somente no domínio entre a Faixa Orós e a Zona de Cisalhamento Senador Pompeu.

A principal unidade de mapeamento deste terreno é caracterizada por ortognaisses migmatíticos cálcio-alcálicos peraluminosos a metaluminosos do Complexo Caicó, datados em 2,20 Ga a 2,15 Ga (Jardim de Sá 1994, Souza *et al.*, 2007).

Sistema Orós-Jaguaribe

Está localizado na porção centro-sul da PB e está relacionado com o Sistema Jaguaribeano de Brito Neves (1975) e Santos & Brito Neves (1984). É composto por duas faixas móveis estreitas, sobre o embasamento gnáissico migmatítico, cuja evolução iniciou-se em torno em torno de 1,9 Ga (Parente & Arthaud, 1995). A composição desse terreno é de sequências vulcano-sedimentares recortadas por intrusões ácidas e máficas e metamorfizadas sob condições do fácies xisto verde baixo a granulito. Durante o Ciclo Brasileiro, esse terreno

foi deformado em regime transcorrente. Os litotipos e a organização dos metassedimentos indicam que eles se depositaram em um ambiente plataformar e/ou paraplataformar, antecedendo um estágio rifte associado a um intenso magmatismo (Parente & Arthaud, 1995). É provável que esse sistema esteja por baixo das coberturas sedimentares na porção oeste da área de estudo (Figura 3.2).

3.1.3. Neoproterozóico

Complexo Ceará

O Complexo Ceará é caracterizado pela ocorrência de rochas metapelíticas e metapsamíticas, representadas por cianita-muscovita-gnaiss, silimanita-granada gnaiss, com contribuição menor de quartzitos, mármore, rochas calcissilicáticas, anfíbolitos e metariolitos (Arthaud, 2009, Cavalcante *et al.*, 2003, Fetter *et al.*, 2003). As associações litológicas sugerem uma típica sequência depositada em ambiente marinho plataformar (Vasconcelos *et al.*, 1998).

Faixa Seridó

O Grupo Seridó é composto por uma sequência de rochas metassedimentares aflorantes no leste do Rio Grande do Norte, estruturadas durante a Orogênese Brasileira. Compreende três formações, da base para o topo, Jucurutu, Equador e Seridó.

Granitóides Brasileiros

O referido domínio é cortado por intenso volume de suítes granitoides neoproterozóicas-eopaleozóicas, que constituem corpos de dimensões alongadas, tendo como encaixantes litotipos de diversas unidades. Apresentam relações de contato magmático-intrusivas e/ou controlada por zonas de cisalhamento (Cavalcante, 1999).

4. BACIA POTIGUAR

A Bacia Potiguar está localizada no limite entre as margens leste e equatorial brasileira e encontra-se encaixada na porção nordeste da Província Borborema. A sua origem está diretamente ligada à evolução destes dois segmentos da Placa Sul - Americana estando geneticamente relacionada a uma série de bacias neocomianas intracontinentais que compõem o Sistema de Riftes do Nordeste Brasileiro (Matos, 1987).

4.1. Gênese da Bacia Potiguar

Estudos da Bacia Potiguar feitos nos últimos anos apontam que há uma ligação genética entre esta bacia e a desagregação do paleocontinente Gondwana (Bertani *et al.*, 1985; Françolim & Szatmari., 1987).

Bertani (1985) propôs um modelo de origem e evolução da bacia, segundo o qual a fase rifte seria originada durante o Neocomiano através de um estiramento e consequente afinamento crustal causado por esforços distensivos de direção E-W. Esta direção também é sugerida por Mello (1987) para a Formação do Rifte Potiguar, associando-se aos esforços atuantes durante a abertura da margem leste brasileira.

A Bacia Potiguar está relacionada à evolução da Margem Equatorial Atlântica, iniciada no final do Jurássico. A rotação diferencial horária entre a América do Sul e a África, gerou, na Província Borborema, um regime de esforços com distensão N-S e compressão E-W propiciando o desenvolvimento de diversas bacias rifte sob regime transtensional (Rifte Potiguar) e transpressioanal. A ocorrência do enxame de diques do Magmatismo Ceará Mirim, situado a sul da Bacia potiguar, ocorreria ao longo do eixo de maior compressão e seria o responsável pela separação dos segmentos transtensionais a NE e transpressionais a SW (Françolim & Szatmari, 1987).

No modelo de Françolin e Szatmari (*op.cit.*) a movimentação, que se iniciou no Jurássico, provocou a quebra do Supercontinente Gondwana em dois fragmentos, causada por uma extensa fratura originada na porção sul do mesmo, que teria se propagado para o norte durante o cretáceo (Figura 4.1.A). No início dessa separação a intensidade do movimento ocorreu de forma diferenciada: na parte sul a divergência era maior que na parte norte, causando assim, uma rotação no sentido horário da Placa Sul-Americana em relação à África. Durante o Cretáceo Inferior a Província Borborema caracterizou-se por uma inversão dos

movimentos antes divergentes, passando então para esforços compressivos de direção E-W e distensivos N-S (Figura 4.1.B).

A rotação horária do continente Sul-Americano em relação ao Africano continuou no Aptiano, quando esforços de caráter distensivos, de direção N-S, atuaram na Província Borborema (Figura 4.1.C). No entanto, continuou o rifteamento na porção submersa, com falhas de direção E-W e deposição de uma sequência proto-oceânica. A crosta continental do Gondwana, no início do Albiano, apresentava-se rompida ao longo de toda a atual margem continental atlântica sul-americana, iniciando uma movimentação de caráter divergente com direção E-W (Figura 4.1.D), que ocasionou um cisalhamento transcorrente/transformante dextral na Margem Equatorial Brasileira, proporcionando a entrada do mar Albiano nas bacias dessa margem. A partir daí, na Bacia Potiguar, processou-se a instalação de uma sequência marinha transgressiva, entre o Albiano e o Campaniano.

Após o Campaniano, a reativação de falhas da bacia parece estar ligada a um evento compressivo de direção N-S (Figura 4.1.E), que na Bacia Potiguar está caracterizado pelo soerguimento da plataforma carbonática e reativação de diversas falhas.

Figura 4.1: Mecanismos de evolução da margem continental brasileira e processos genéticos iniciais do Rifte Potiguar (Françolin & Sztamari, 1987).



Três importantes estágios tectônicos ocorreram em resposta à dinâmica das placas tectônicas durante o início do Gondwana, são denominadas de Sin-Rifte I, Sin-Rifte II e Sin-Rifte III (Matos, 1992). O estágio Sin-rifte I é mais pronunciado nas bacias Recôncavo-Tucano-Jatobá, Sergipe-Alagoas e Araripe, como também no oeste da África. Na Bacia Potiguar o registro desse estágio inclui as rochas vulcânicas do Magmatismo rio-Ceará-Mirim, que consiste em diques máficos de orientação NE-SW a E-W que se encontram alojados no embasamento cristalino (Figura 4.2.A).

No estágio Sin-Rifte II, do Neocomiano ao Eobarremiano, ocorreu o desenvolvimento de bacias rifte controladas por falhas de rejeito preferencialmente normal, definindo meio-grabens assimétricos, a exemplo do rifte Neocomiano da porção emersa da Bacia Potiguar e dos demais riftes intracontinentais do Nordeste Brasileiro (Figura 4.2.B). No Estágio Sin-Rifte III, durante o Neobarremiano, o processo distensivo começou a concentrar a deformação ao longo da futura margem continental, causando uma grande mudança na cinemática evolutiva do rifte (Figura 4.2.C).

Na Bacia Potiguar este evento provocaria um deslocamento do eixo de rifteamento para a porção submersa da bacia, ao mesmo tempo em que causaria um levantamento e erosão na porção emersa. Este fenômeno provocou a discordância no topo da Formação Pendências e se comportou como uma ombreira do novo rifte. A direção do transporte tectônico mudaria, então, de NW para E-W, com movimentos predominantemente transtensionais dextrais, em resposta ao processo de deriva continental. O registro dessa fase na Bacia Potiguar é restrito à porção submersa das formações pendências e pescada (Matos, 1992).

A sedimentação na Bacia Potiguar, tanto no estágio Sin-Rifte II como no Sin-Rifte III, foi caracterizada como sendo tipicamente continental, com sedimentos de um sistema deposicional flúvio-lacustre.

4.2. Arcabouço Estrutural

A estrutura da Bacia Potiguar compreende três unidades básicas: grábens, altos internos e plataformas do embasamento (Figura 4.3), que contém sequências sedimentares distintas Neocomiana à Terciária. As informações aqui apresentadas foram frutos de pesquisa no trabalho de Bertani *et al.* (1990).

Os grábens do Apodi, Umbuzeiro, Guamaré e Boa vista, situados na porção emersa da bacia, mostram forma assimétrica e apresentam feições lineares de direção NE-SW.

Capítulo 4

Tais grabéns são limitados por falhas normais de direção NE-SW e NW-SE, atingindo quilômetros de rejeito. Na porção submersa os Grábens também são assimétricos, com eixos orientados subparalelo a linha de costa atual. No Cretáceo inferior os grábens foram preenchidos por seqüências sedimentares.

Os altos internos correspondem a cristas alongadas do embasamento que separam os principais grábens. Os altos internos de Quixaba, Serra do Carmo e Macau representam os principais, mostrando-se subparalelos aos eixos dos grábens subjacentes. Nos altos internos não ocorrem seqüências do Cretáceo Inferior devido à erosão ou não deposição.

As plataformas rasas do embasamento limitam os grábens centrais a leste e a oeste que correspondem aos grábens de Touros e Aracati, respectivamente. Essas plataformas são sempre recobertas por sedimentos do Aptiano e Cretáceo Superior na porção emersa da bacia e também por seqüências terciárias na porção submersa.

Figura 4.2: Modelo de reconstrução tectônica do nordeste brasileiro e sudoeste africano durante os estágios sin-rifte I, II e III (Compilado de Matos, 1992).

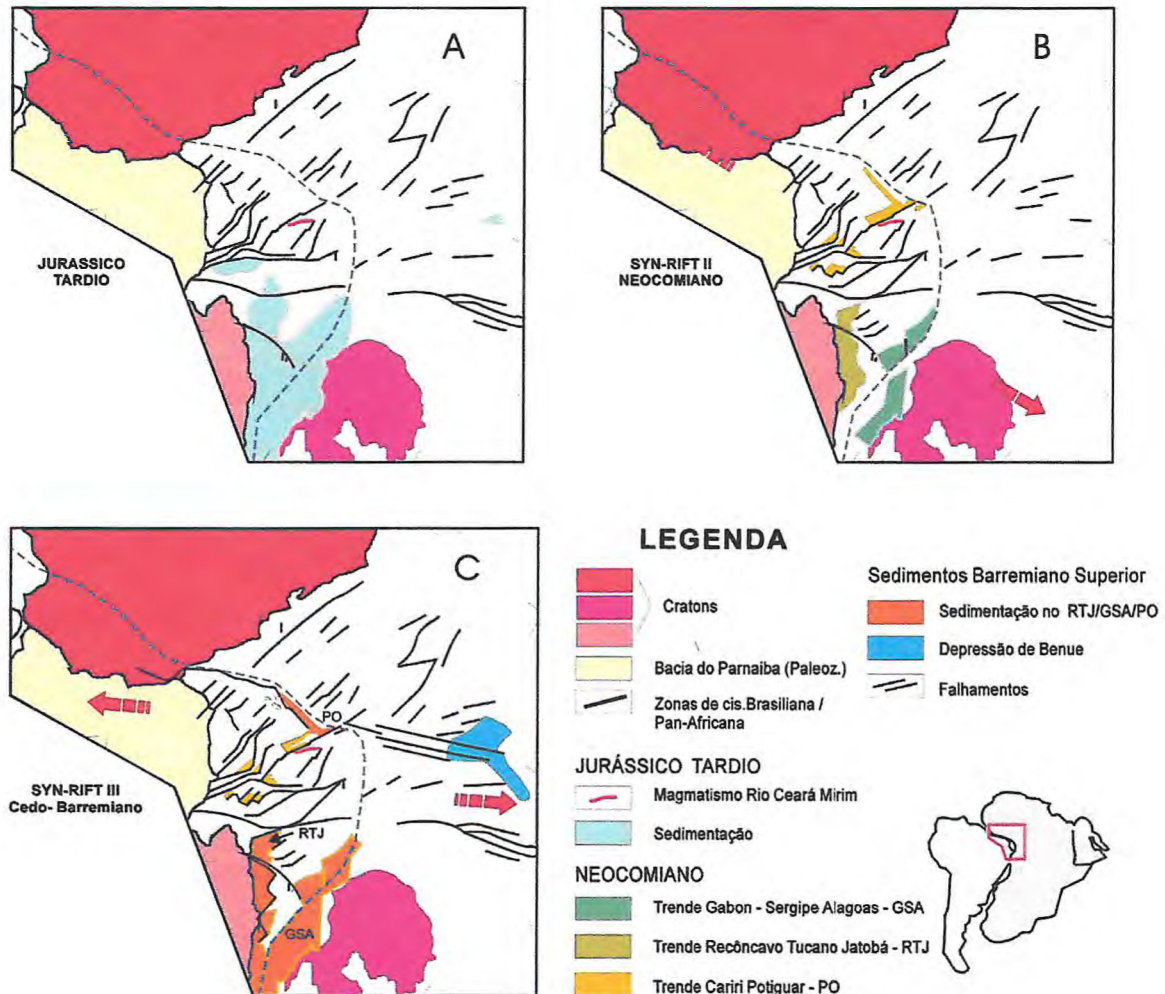
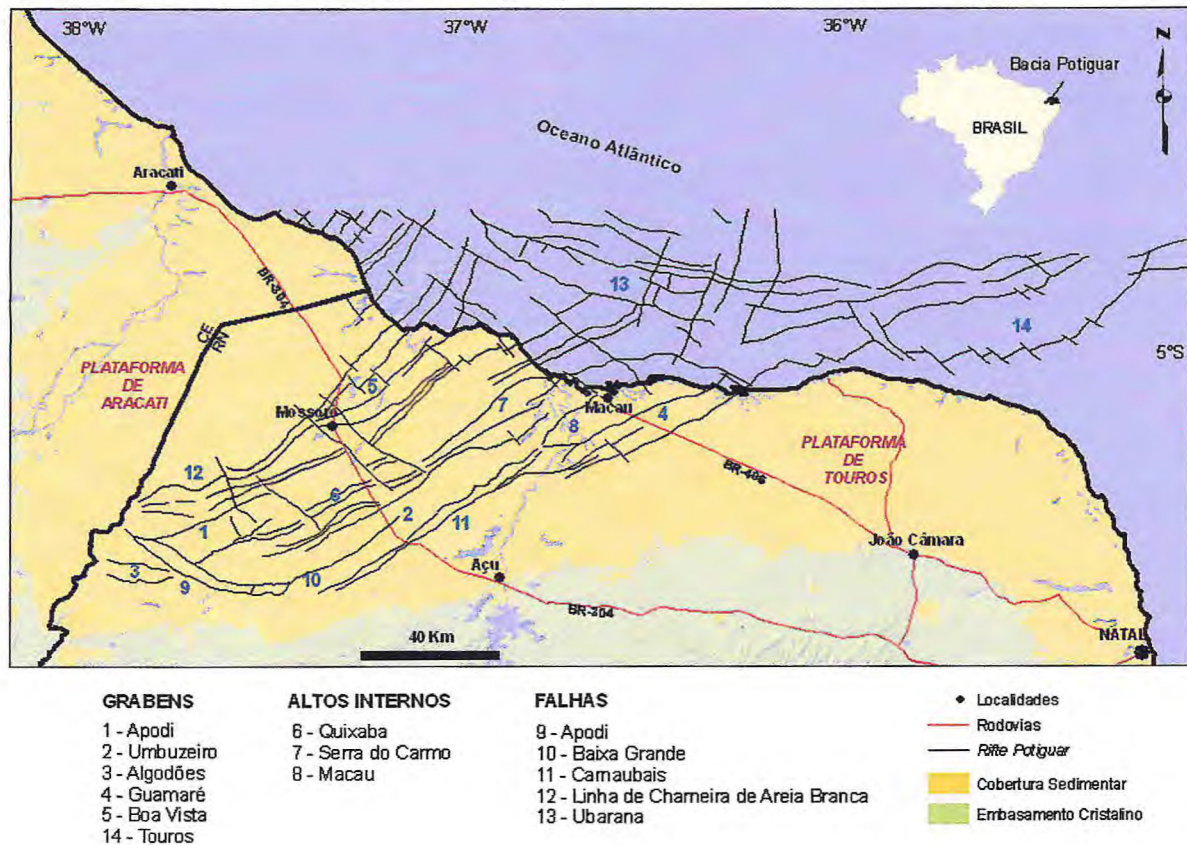


Figura 4.3: Arcabouço estrutural da Bacia Potiguar (Pedrosa Jr, 2010 e Bertani *et al.*, 1990).



4.3. Sequências Tectono-sedimentares

As sequências da Bacia Potiguar estão subdivididas em três grupos, da base para o topo: Areia Branca, Apodi e Agulha (Araripe & Feijó, 1994) (Figura 4.4) com sedimentação ocorrida durante o Neocomiano até o recente. O arcabouço litológico da bacia apresenta ainda rochas vulcânicas correspondentes às formações Rio Ceará Mirim, Serra do Cuó e Macaú (Figura 4.5). Fundamentalmente, as informações aqui apresentadas estão baseadas nos autores supracitados.

Grupo Areia Branca

É constituído predominantemente por rochas sedimentares clásticas, compreendendo as formações Pendências, Pescada e Alagamar separadas por discodâncias entre si.

- Formação Pendência é constituída por rochas sedimentares, com origem de sistemas fluviais, deltaicos e lacustre (arenitos intercalados com folhelhos e siltitos). Repousa de forma discordante sobre o embasamento, ocorrendo nas porções emersa e submersa da bacia.

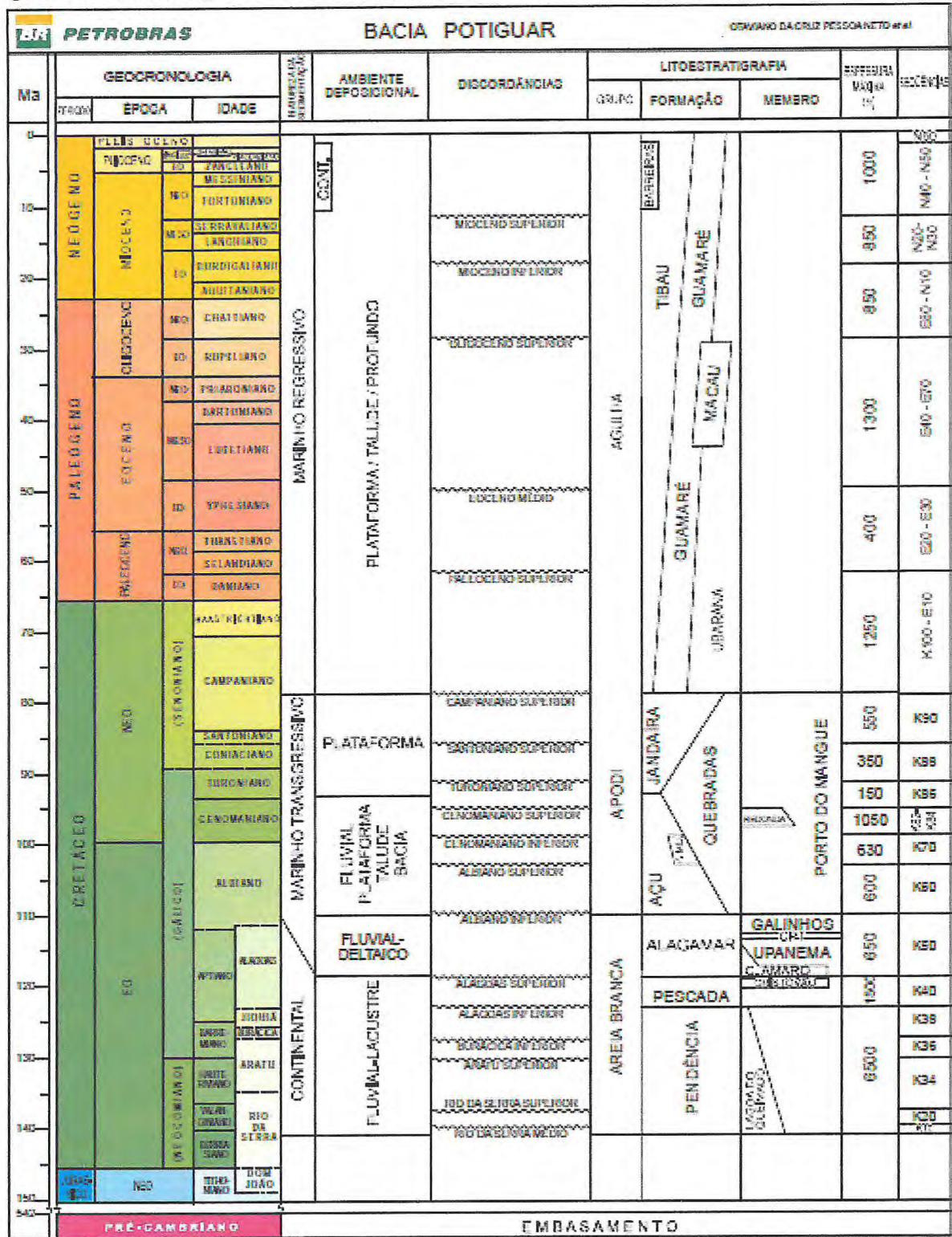
- Formação Pescada ocorre na porção submersa da bacia, é composta por arenito branco médio e arenito cinzento fino com intercalações de folhelho e siltito cinzento, representativos de um sistema de leques aluviais e sistemas-flúvio-deltáicos.
- Formação Alagamar é formada por rochas sedimentares depositadas em ambiente flúvio-deltaico (Membro Upanema) e transicional (Membro Galinhos) separados por um intervalo de rochas pertencentes a um sistema lagunar (folhelhos das Camadas Ponta do Tubarão).

Grupo Apodi

Constituído pelas formações Açú, Ponta do Mel, Quebradas e Jandaíra (Araripe & Feijó, 1994). Neste grupo há um aumento considerável de rochas carbonáticas com relação ao anterior.

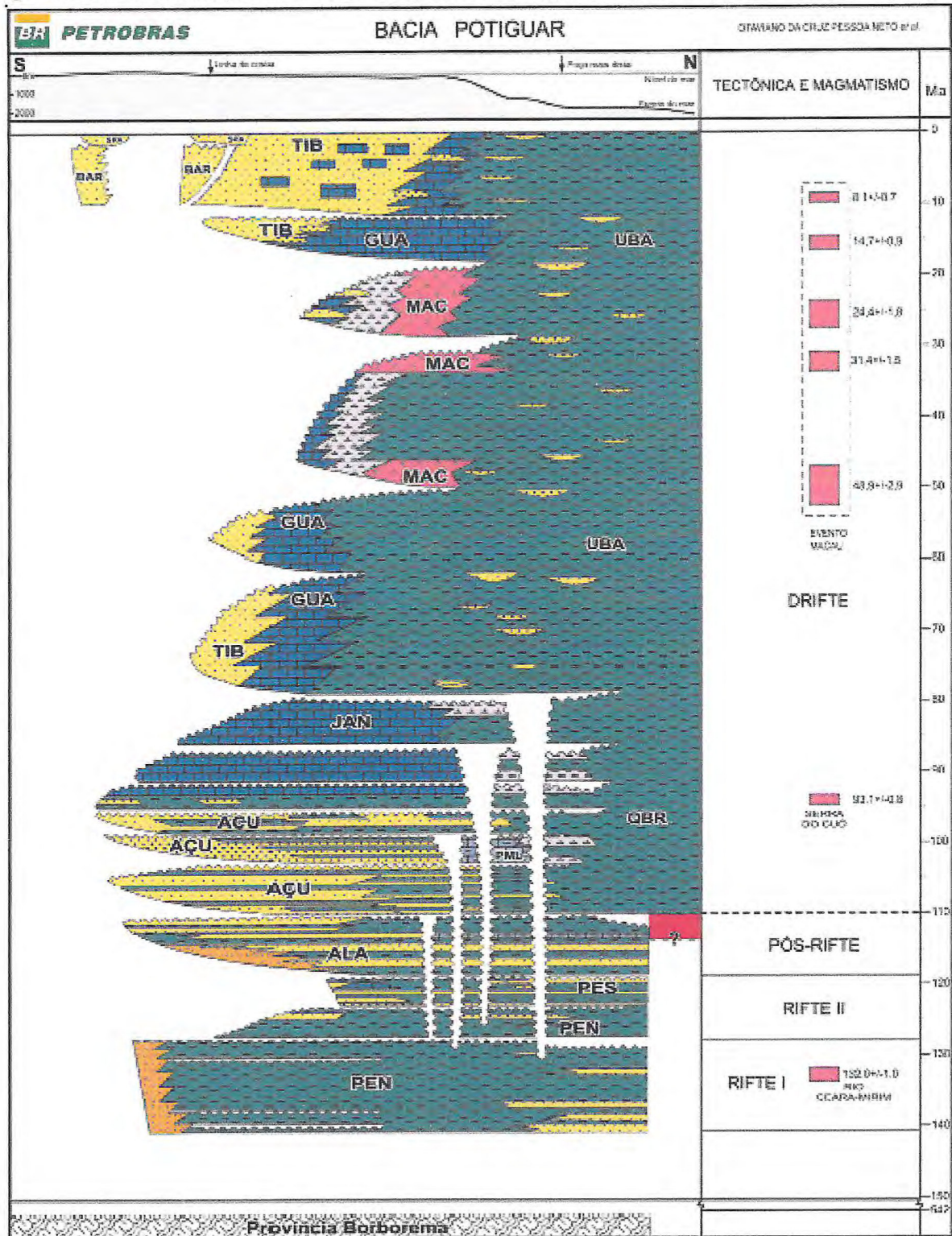
- Formação Açú é identificada pela presença de pacotes de arenito esbranquiçado médio com intercalações de folhelho, argilito verde claro e siltito castanho avermelhado, aflorantes na porção oeste da área de estudo (Figura 4.6). Apresenta contato inferior discordante e erosivo com a Formação Alagamar e com o embasamento cristalino e superior concordante com a Formação Jandaíra.
- Formação Ponta do Mel constitui a primeira plataforma carbonática da sequência transgressiva interdigitando-se lateralmente e recobrimo concordantemente os clastos da Formação Açú. Os sedimentos carbonáticos foram depositados em um ambiente de plataforma rasa, abrangendo tanto os sistemas de planície de maré quanto mar baixo.
- Formação Quebradas encontra-se posicionada entre as Formações Açú e Ubarana. É composta por arenito cinza-claro fino, folhelho e siltito cinza - esverdeado.
- Formação Jandaíra (Figura 4.6) corresponde à seção carbonática de alta energia sobreposta concordantemente as formações Açú e Quebradas e interdigita-se lateralmente com a Formação Ubarana. Esta formação é constituída por rochas de uma ampla plataforma carbonática que recobriu toda porção emersa da bacia, entre o Turoniano até o Mesocampaniano. É composta por calcarenitos bioclásticos e calcilutitos com *bird eyes*. Seu contato superior se apresenta discordante com o Grupo Agulha.

Figura 4.4: Carta estratigráfica da Bacia Potiguar (Compilado de Pessoa Neto *et al.*, 2007).



Fonte: Boletim de Geociências da Petrobrás (2007), v.15, n.2.

Figura 4.5: Carta de evolução tectono-sedimentar da Bacia Potiguar (Compilado de Pessoa Neto *et al.*, 2007).



Fonte: Boletim de Geociências da Petrobrás (2007), v.15, n.2.

Grupo Agulha

Engloba as Formações Ubarana, Guamaré, Tibau e Barreiras, formadas por rochas clásticas e carbonáticas de alta e baixa energia.

- Formação Ubarana é composta por uma espessa seção de folhelho e argilito cinzento intercalado por camadas relativamente delgadas de arenito grosso a fino esbranquiçado, siltito-acastanhado e calcarenito creme claro.
- Formação Guamaré corresponde a uma sequência carbonática entre as formações Ubarana e Tibau, com calcarenito creme-acastanhado, bioclástico com intercalações de calcilito, folhelho e arenito.
- Formação Tibau é composta por arenito grosso a conglomerático, interdigitado lateralmente com as formações Guamaré e Barreiras. Apresenta contato inferior discordante com a Formação Jandaíra e concordante com a Formação Guamaré. O ambiente deposicional é de leques costeiros.
- A Formação Barreiras (Figura 4.6) é composta por conglomerados e arenitos ferruginosos friáveis, de cor avermelhada e esbranquiçada, com matriz caolínica e abundantes concreções lateríticas. Representam depósitos de sistemas aluviais, fluviais e costeiros. Os sedimentos da Formação Barreiras recobrem indistintamente rochas cristalinas e rochas sedimentares do Grupo Apodi, constituindo superfícies em forma de tabuleiros, de topo aplainado e bordas normalmente abruptas (Amaral, 1990).

4.4. Magmatismo Meso-Cenozóico

Segundo Oliveira (1998), a Bacia Potiguar, no seu desenvolvimento, evidencia três atividades ígneas distintas: o Magmatismo Rio Ceará Mirim, Magmatismo Serra do Cuó e o Magmatismo Macau.

O Magmatismo Rio Ceará Mirim, mais antigo, está inserido dinamicamente no contexto que precedeu a abertura do Atlântico no Nordeste Oriental, talvez associado a uma pluma, cujos efeitos termomecânicos nuclearam e governaram o início do Rifting da Bacia Potiguar e adjacências, mas não foram capazes de formar grandes volumes de magmas continentais. É caracterizado por diques que se distribuem em faixa alongada E-W / NE-SW por mais de 800 km, desde Natal até adentrar na Bacia do Parnaíba. O evento teve duração contínua de 150/120 Ma, com dois picos de atividades: 145 e 130, enquanto a implantação dos processos de rifting se deu entre 138/118 Ma. De natureza toleítica, os diabásios são

enriquecidos em elementos incompatíveis. Geralmente não denotam processos de mistura de magmas e/ou contaminação crustal. A petroquímica indica que os diques formaram-se na base da litosfera, por descompressão adiabática em um regime de extensão diferenciada, cuja extensão crustal foi menor que a mantélica.

O Magmatismo Serra do Cuó ocorreu durante o Campiano/Santoniano, concomitante à deposição da plataforma carbonática da Formação Jandaíra. É caracterizado como um pulso ígneo de afinidade alcalina de curta duração (+/- 5 Ma). A assinatura geoquímica indica uma fonte mais profunda do que o Magmatismo Rio Cerá-Mirim, Devido ao seu caráter intraplaca local e afinidade temporal com outras feições tectono estratigráficas da BP, parece ser uma resposta distal ao forte tectonismo do Oeste da África nessa época.

O Magmatismo Macau, o mais importante da Bacia Potiguar, desenvolveu-se entre 45 e 25 Ma. Ocorre desde o *offshore* da bacia até dentro de Pernambuco, sob forma de *plugs*, diques, derrames e soleiras. Configura uma faixa em torno de 40 km e direção N-S, sugerindo um campo de stress extensional E-W durante sua intrusão. Sua intrusão provocou um ajuste espacial, que se manifesta através da grande quantidade de falhas transcorrentes rasas da BP. A assinatura bastante alcalina juntamente com a abundância de xenólitos peridotíticos sugere fonte mantélica profunda. Segundo Lima Neto (1998), a origem deste magmatismo estaria relacionado com a passagem da margem equatorial sobre o *hot spot* de Fernando de Noronha.

4.5. Estruturas rasas na Bacia Potiguar

Na bacia Potiguar existe uma carência quanto às discussões sobre a tectônica cenozóica (pós-rifte) desta região, diferentemente do Mesozóico. Existem vários trabalhos sobre o Cenozóico, porém não existe uma sistemática na aquisição dos dados, que são apenas pontuais (Dantas, 2003). Há também carência de dados geocronológicos. Bezerra *et al.* (2001) levantaram essa questão, ressaltando a existência de informações, como traço de fissão, vulcanismo intraplaca, soerguimento de depósitos costeiros, paleodrenagem e sismologia. Reconheceram também, a origem e reativações de diversos falhamentos durante o Cenozóico.

Desta maneira, a literatura disponível discute a existência de dois eventos que marcaram a transição do Mesozóico para o Cenozóico, e são representativos para a evolução tectono-sedimentar da era Cenozóica: o Magmatismo Serra do Cuó e o soerguimento da Bacia Potiguar no Mesocampaniano, ambos ainda no final do Mesozóico.

O Magmatismo Serra do Cuó, segundo Pereira (1992), seria o indício de um evento tectônico intraplaca que ocorreu no interior do continente, gerando uma discordância de caráter erosivo, posicionada no Neoturoniano/Eoconiano. As feições geradas em decorrência deste evento seriam o soerguimento dos vários estratos da Formação Jandaíra, provocando a divergência da drenagem para NW, com dissecação e erosão. Matos (1993, in Oliveira *et al.*, 1993) afirmou que o limite Cretáceo/Terciário, onde ocorreu este soerguimento, corresponderia a fase de grande erosão campaniana das sequências cretáceas, que seria provavelmente uma das alternativas para reativação da Falha de Afonso Bezerra.

No Cenozóico, o tectonismo atuante apresenta menor expressividade regional, não determinando o surgimento de riftes e bacias sedimentares, diferentemente do Mesozóico. Contudo, na Bacia Potiguar, durante o Cenozóico ocorreram eventos como a reativação de importantes falhamentos (Sistema de Falhas de Carnaubais e Afonso Bezerra), dobramentos com grande comprimento de onda e eixos orientados na direção N-S, resultantes de esforços compressivos E-W que afetaram essa bacia no Terciário (Cremonini, 1993), e reativações tectônicas associadas a intrusões básicas relacionadas com a Formação Macau (Costa Neto, 1985). Além disso, regiões arqueanas durante o mesozóico teriam sofrido alívio de pressão no Terciário, devido aos ajustes internos da placa Sul-Americana, os quais permitiram a ascensão de magmas relacionados aos litotipos da Formação Macau (Sial, 1975).

O Terciário, portanto, representa o período onde a movimentação do sistema de Falhas de Afonso Bezerra teria sido mais complexa. Para Hackspacker *et al.* (1985), Oliveira *et al.* (1993) e Dantas (1998), o tectonismo que gerou o Magmatismo Macau corresponderia ao mesmo evento relacionado a uma das fases de reativação mais importante deste sistema de falhas, que apresentou uma cinemática transcorrente dextral.

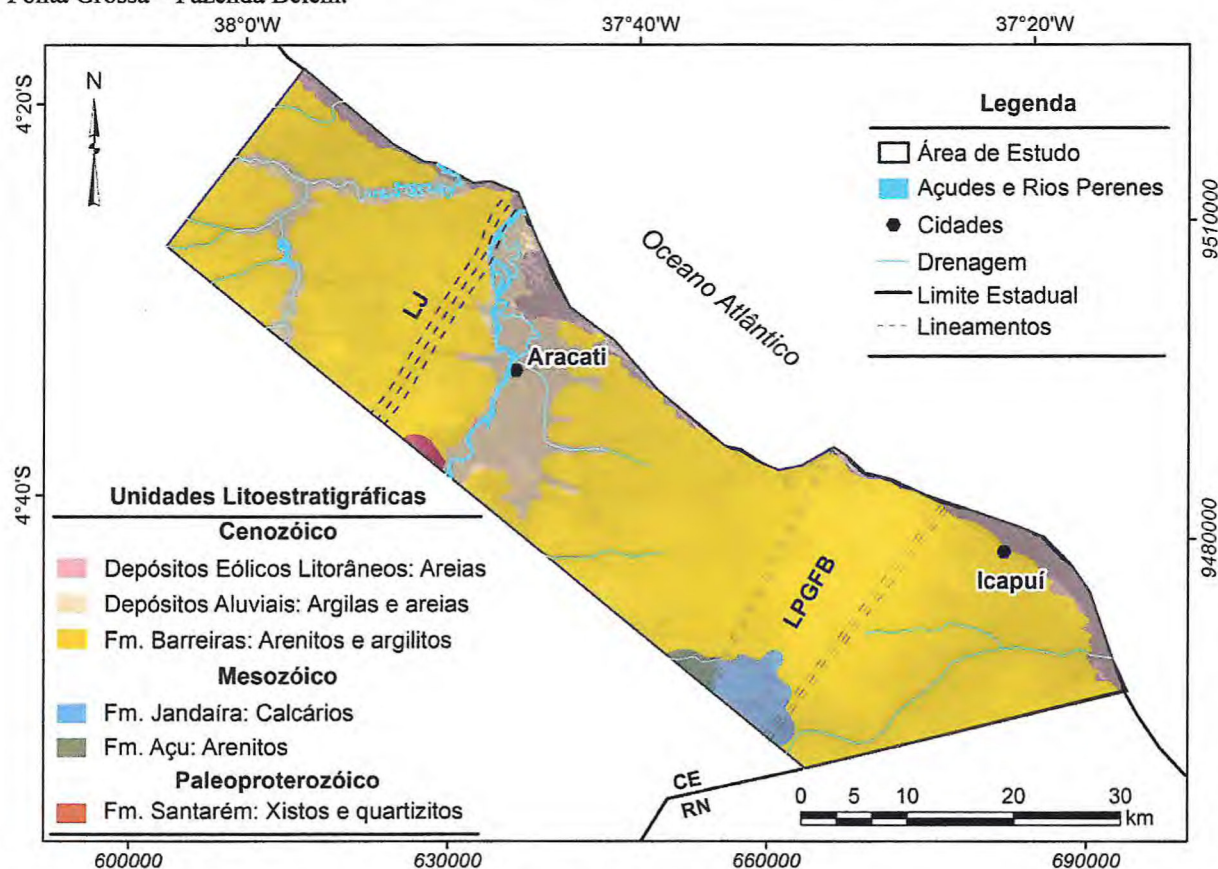
4.6. Arcabouço Geológico da Área

As principais unidades estratigráficas identificadas na área são, da base para o topo: 1) o embasamento paleoproterozóico, representado por sequência de rochas supracrustais, como micaxistos e quartzitos da Formação Santarém pertencente a Faixa Orós; 2) no extremo sudeste da área de estudo afloram arenitos da Formação Açu e calcários da Formação Jandaíra pertencentes ao Grupo Apodi; 3) a maior parte da área é coberta por arenitos e conglomerados da Formação Barreiras; e 4) sedimentos recentes associados a depósitos aluvionares e eólicos litorâneos ao longo de toda a costa (Cavalcante *et al.*, 2003) (Figura 4.6). A continuação do Lineamento Jaguaribe (LJ) é inferida na área de estudo a partir

de dados estruturais com base em Cavalcante *et al.* (2003). Já o Lineamento Fazenda Belém – Ponta Grossa (LPGFB) foi determinado por Sousa (2002), que identificou setor fortemente deformado da Formação Barreiras, cujo alinhamento tem coincidência com zonas de cisalhamento brasileiras que afloram a sul da área de estudo (Figura 4.6).

A área de estudo encontra-se enquadrada geologicamente na Plataforma de Aracati, na qual a seção sedimentar pós-aptiana (formações Açú, Jandaíra e Barreiras) capeia uma extensa área do embasamento cristalino. Esse embasamento é recoberto por cerca de 400 metros de arenitos fluviais albo-cenomanianos da Formação Açú. O registro de uma extensa plataforma carbonática, de idade turoniana-neocampaniana, é representada pela Formação Jandaíra, atingindo na área cerca de 250 metros de espessura, de acordo com dados de subsuperfície da PETROBRAS (Sousa, 2002). As rochas sedimentares da bacia encontram-se cobertas por argilitos, arenitos e conglomerados da Formação Barreiras (Figura 4.6).

Figura 4.6: Mapa Geológico simplificado da área de estudo. LJ: Lineamento Jaguaribe; LPGFB: Lineamento Ponta Grossa – Fazenda Belém.



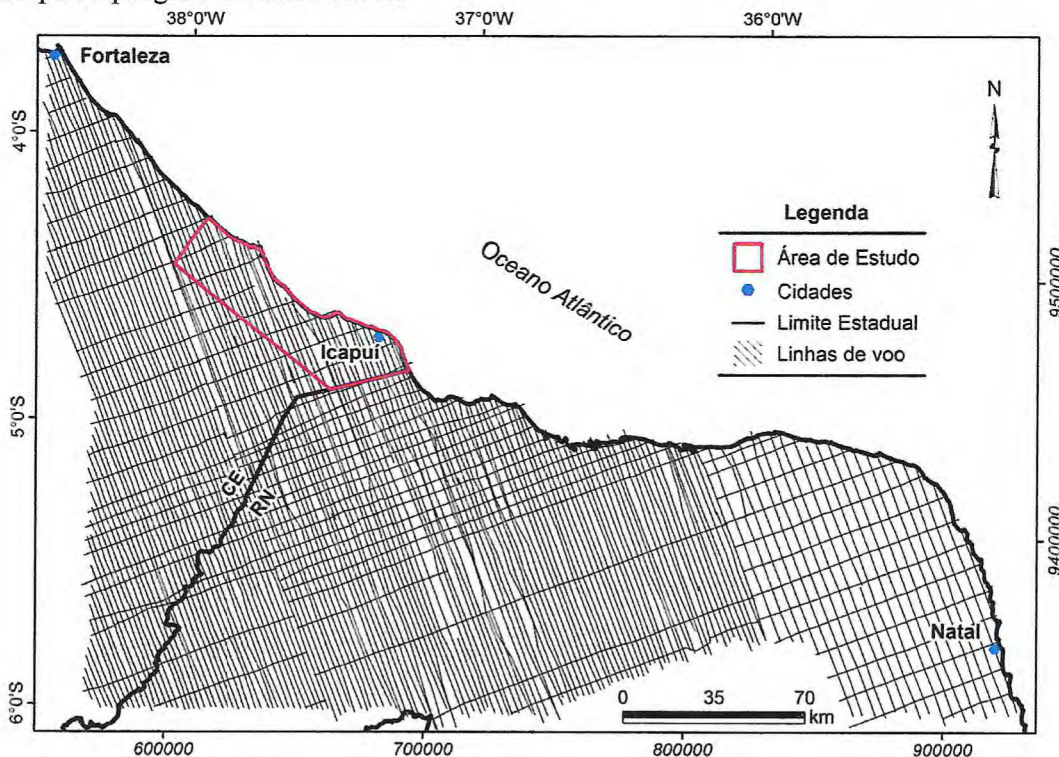
Fonte: Cavalcante *et al.*, 2003. Mapa Geológico do Estado do Ceará (1:500.000).

5. MAGNETOMETRIA

5.1. Origem dos Dados

O conjunto de dados aeromagnéticos utilizados neste estudo foi obtido através dos projetos realizados na Bacia Potiguar pela Petrobrás e disponibilizados pela ANP ao LGPSR. Tais dados foram levantados entre dezembro de 1986 e fevereiro de 1987, recobrendo uma área de 44.600 km² nas porções norte do Rio Grande do Norte e nordeste do Ceará, com linhas de voo orientadas na direção N20°W e espaçadas em 2 km a oeste do meridiano de 36°, e 4 km a leste. Foi voado um total de 26.537 km de linhas geofísicas, com intervalo de amostragem de 100 m e com uma altitude média em relação ao terreno de 500 m (Figura 5.1).

Figura 5.1: Mapa das linhas de voo do levantamento aerogeofísico do Projeto Bacia Potiguar, destaque em vermelho para o polígono da área de estudo.



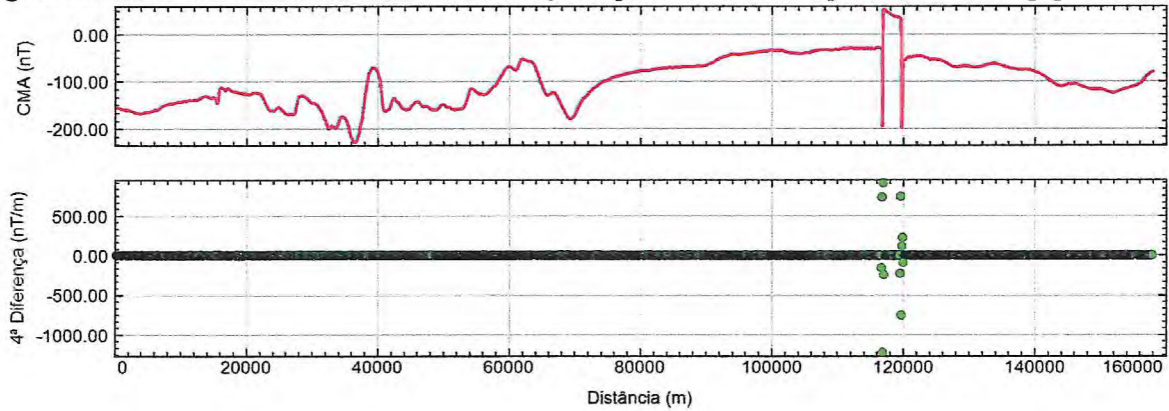
5.2. Processamento dos Dados

Inicialmente foi construído um banco de dados organizados no programa *Oasis Montaj* da GEOSOFT, com arquivos dispostos nos formatos XYZ e na escolha do DATUM SIRGAS 2000, Zona 24 S. Análise de qualidade foi aplicada ao banco de dados. Nessa análise

foi feita a observação dos dados quanto à presença de inconsistências, como valores que parecem absurdos ou um valor extremamente anômalo sem ter na vizinhança outro que o justifique. Tal problema é conhecido como efeito pepita ou picos.

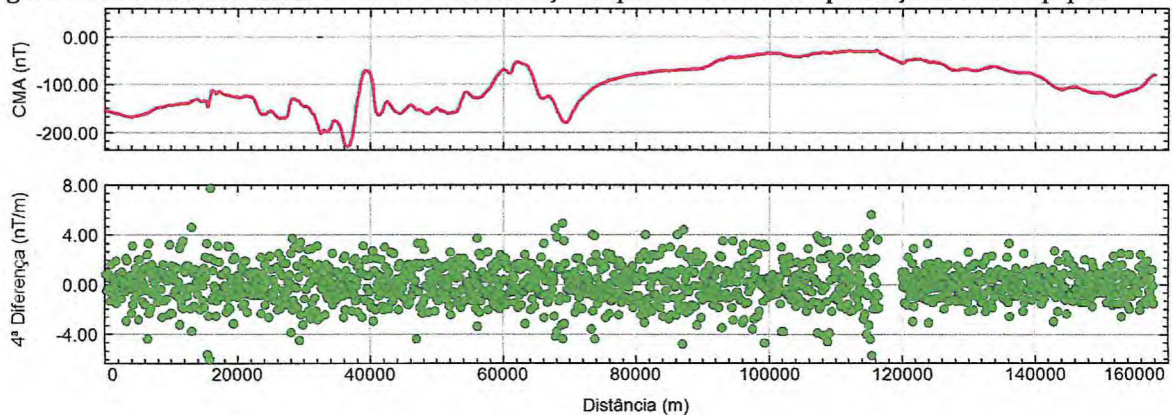
A derivada de quarta ordem, aproximada por diferenças finitas, ressalta os sinais de alta frequência. Com isso pode ser definido um “envelope” de significância do sinal medido, cuja análise do “envelope” permite identificar o que é ruído do sinal medido para serem efetuadas as devidas correções (Santos, 2006). Todas as linhas de voo foram analisadas quanto à presença de inconsistências. A Figura 5.2 mostra uma das linhas de voo com os valores de Campo Magnético Anômalo (CMA) e da diferença de quarta ordem gerada para que sejam feitas as observações quanto o efeito pepita.

Figura 5.2: Perfis com valores do CMA e da diferença da quarta ordem com a presença do efeito pepita.



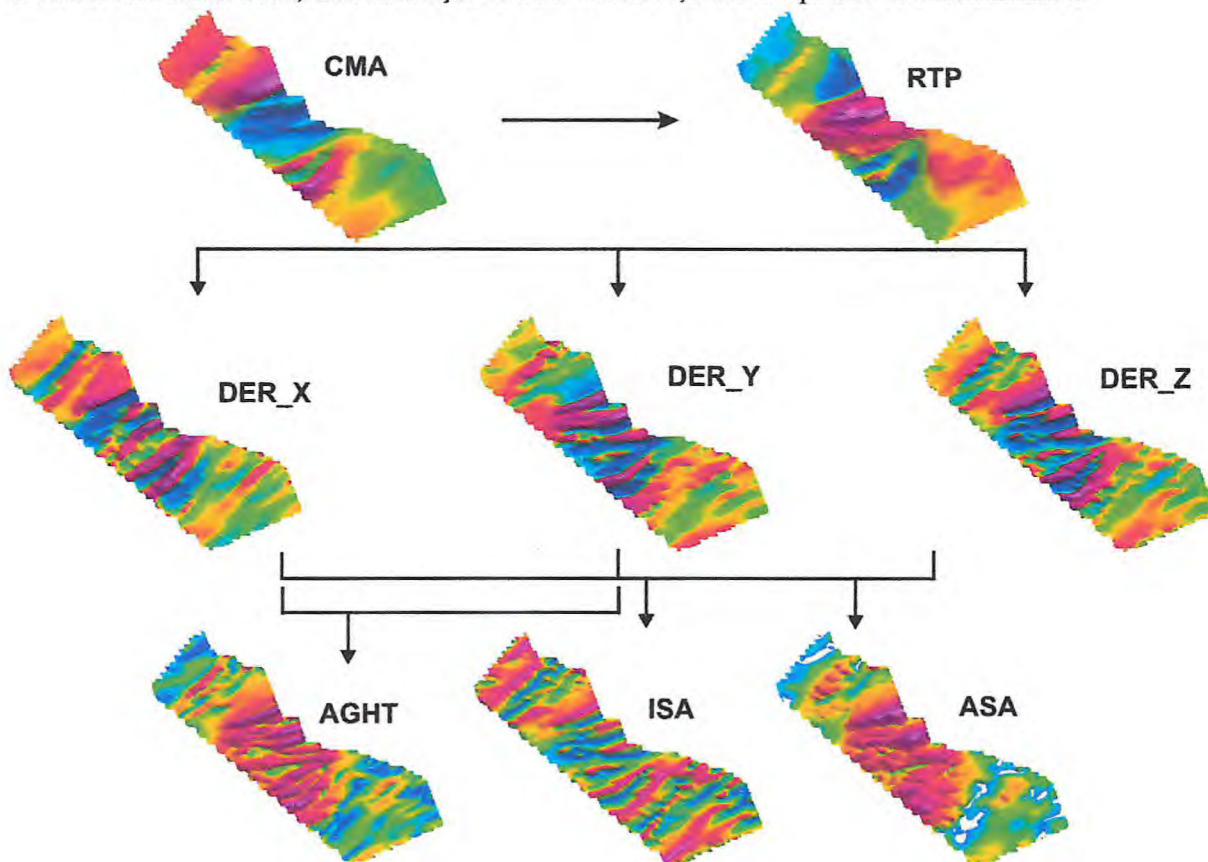
Quando encontrados, esses valores espúrios são removidos tornando os dados mais confiáveis no que diz respeito à consistência dos mesmos (Figura 5.3). A qualidade do produto a ser gerado está relacionada à densidade e à uniformidade dos pontos de amostragem.

Figura 5.3: Perfis com valores do CMA e da diferença da quarta ordem sem a presença de valores pepita.



Em seguida foi feita a interpolação dos dados corrigidos do IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) utilizando o método de gridagem Bidirecional em uma malha regular de 500 m, já que a dimensão da malha ideal é igual a um quarto do espaçamento das linhas de voo (Geosoft, 2010). Após esse procedimento, foram aplicadas outras técnicas de filtragem, com intuito de melhorar a relação sinal/ruído e realçar características específicas das fontes magnéticas. A Figura 5.4 mostra as etapas do processamento com os principais produtos magnéticos gerados na área de estudo.

Figura 5.4: Etapas de processamento dos dados aeromagnéticos da área de estudo. CMA – Campo Magnético Anômalo; RTP – Campo Magnético Reduzido ao Polo; DER_X – Primeira Derivada Horizontal em X; DER_Y – Primeira Derivada Horizontal em Y; DER_Z – Primeira Derivada Vertical em Z; AGHT: Amplitude do Gradiente Horizontal Total; ISA: Inclinação do Sinal Analítico; ASA: Amplitude do Sinal Analítico.



5.2.1. Filtro Cosseno Direcional

O Filtro Cosseno Direcional é utilizado para reduzir o ruído de alta frequência ao longo das linhas de voo, nesse caso, a alta concentração desses dados ocorrem em uma direção preferencial N20°W. Pode ser aplicado durante qualquer etapa do processamento,

porém, deve ser aplicado com critério, pois seu uso pode induzir erros de interpretação. A fórmula usada no cálculo do filtro cosseno direcional é apresentada a seguir (Figura 5.5):

$$L(N, E) = \left| \cos^n \left(\alpha - \theta + \frac{\pi}{2} \right) \right|$$

onde L é o valor do filtro dado em coordenadas geográficas, n é o grau da função cosseno, Θ é o valor do filtro, α é a direção do filtro que deve ser dado em azimuth. A Figura 5.6 mostra a assinatura magnética da região em estudo sem o efeito do ruído direcional.

Figura 5.5: Representação gráfica do filtro cosseno direcional (Geosoft, 2010).

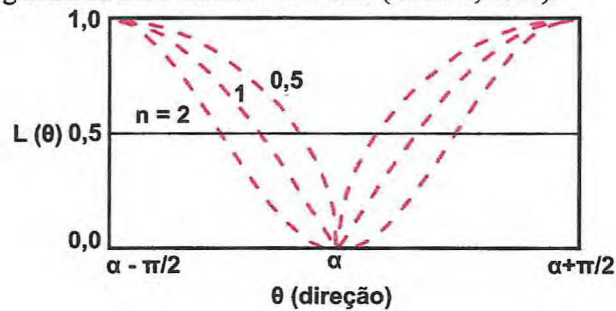
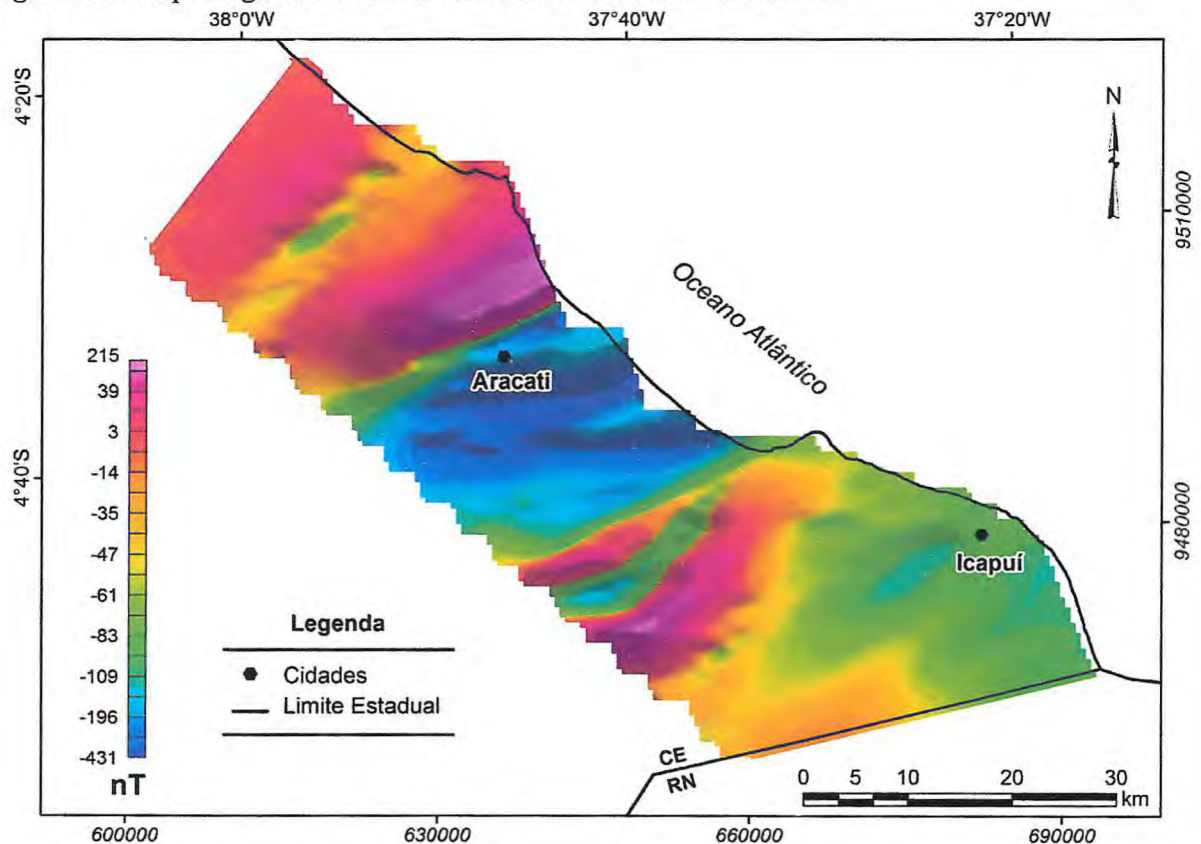


Figura 5.6: Campo Magnético Anômalo – CMA com filtro cosseno direcional.

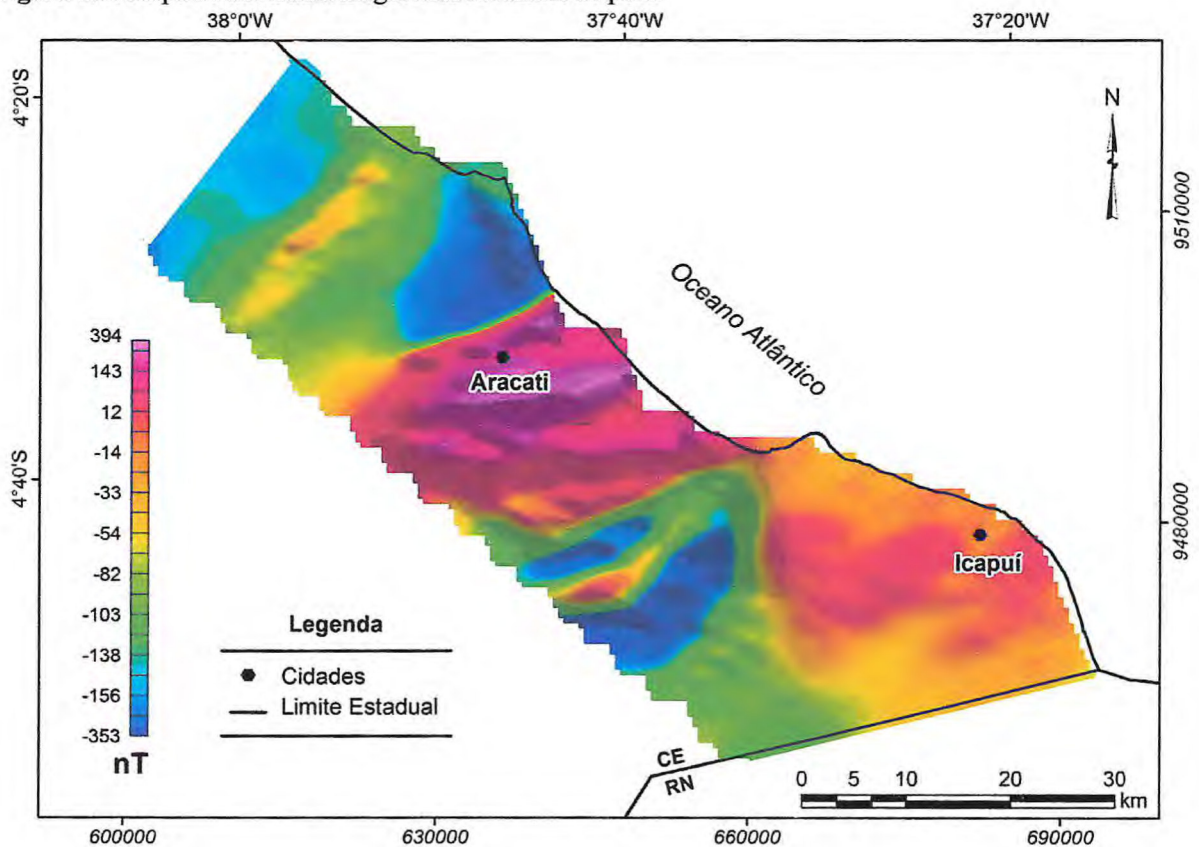


5.2.2. Filtro de Redução ao Polo

Em regiões de baixas latitudes, como ocorre na área de estudo, a interpretação dos dados magnéticos é dificultada pela característica bipolar da anomalia magnética. Isto ocorre devido ao caráter dipolar do campo magnético terrestre, o qual faz com que a direção e a inclinação do campo variem ao longo da superfície terrestre. A variação na forma das anomalias magnéticas dificulta a análise dos dados, por esse motivo, nas baixas e intermediárias latitudes magnéticas é muito comum reduzir a anomalia magnética ao polo (Figura 5.7).

Para seu cálculo são requisitados os valores médios da inclinação ($-9^{\circ}50'24''$), declinação ($-22^{\circ}14'42''$) e intensidade do campo (26.315,316 nT) na época do levantamento.

Figura 5.7: Mapa de anomalias magnéticas reduzidas ao polo.



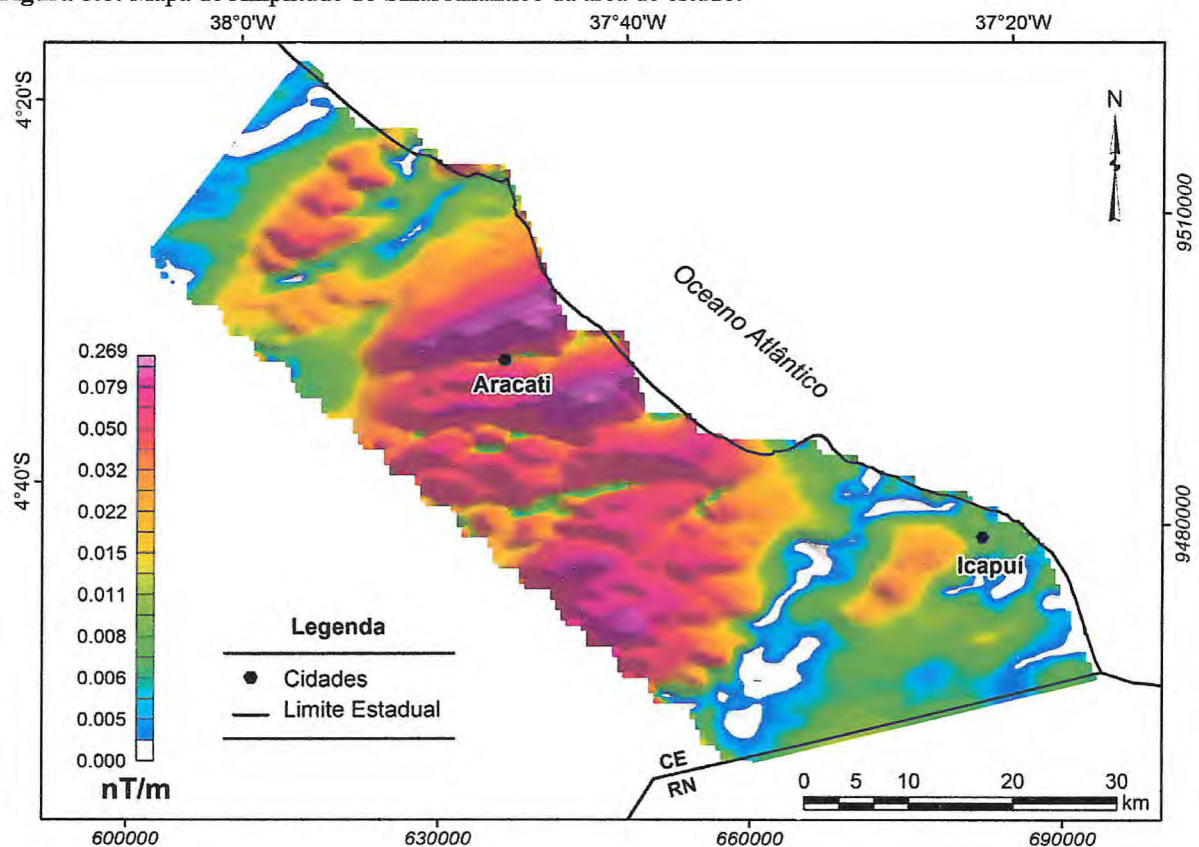
5.2.3. Amplitude do Sinal Analítico

Corresponde a uma gama de métodos automáticos ou semiautomáticos que são baseados no uso dos gradientes (derivadas) vertical e horizontais das anomalias (Nabighian, 1984; Roes *et al.*, 1992). Tem como característica principal amplificar os curtos e atenuar os longos comprimentos de onda do sinal geofísico nas três direções ortogonais, realçando as bordas e contatos de feições geológicas e falhas (Figura 5.8). Pode ser expresso por vetor de adição das derivadas de segunda ordem das componentes reais nas direções x e y e na componente imaginária na direção z, que realiza um processo de varredura para localizar contatos magnéticos e suas profundidade,

$$|ASA| = \sqrt{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}}$$

onde ASA é a Amplitude do Sinal Analítico, T o campo geomagnético, e ∂x , ∂y e ∂z são as derivadas verticais de 1ª ordem nas direções x, y e z, respectivamente (Reynolds, 1997).

Figura 5.8: Mapa de Amplitude do Sinal Analítico da área de estudo.



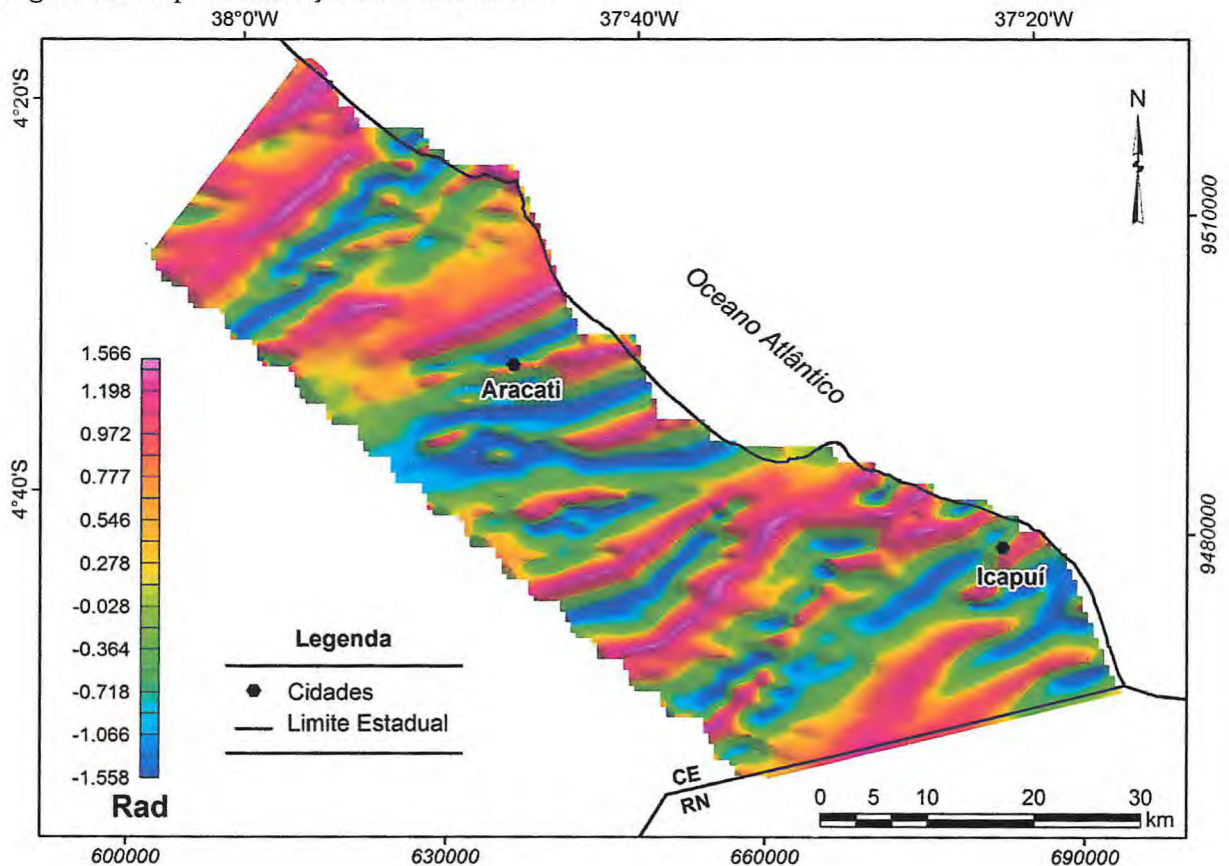
5.2.4. Inclinação do Sinal Analítico

É definida pelo ângulo formado entre os vetores imaginários da 1ª derivada vertical, pelos vetores reais da 1ª derivada em x e y (Miller & Singh, 1994). Essa expressão permite realizar a estimativa do mergulho e do contraste de susceptibilidade das fontes causadoras de anomalias. O mapa de anomalias da inclinação do sinal analítico é mostrado na Figura 5.9. A inclinação do sinal analítico é dada por,

$$\text{ISA} = \arctan \frac{\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}}{\sqrt{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}}}$$

onde ISA é a Inclinação do Sinal Analítico, T o campo geomagnético, e ∂x , ∂y e ∂z são as derivadas parciais de 1ª ordem nas direções x, y e z, respectivamente.

Figura 5.9: Mapa de Inclinação do Sinal Analítico.



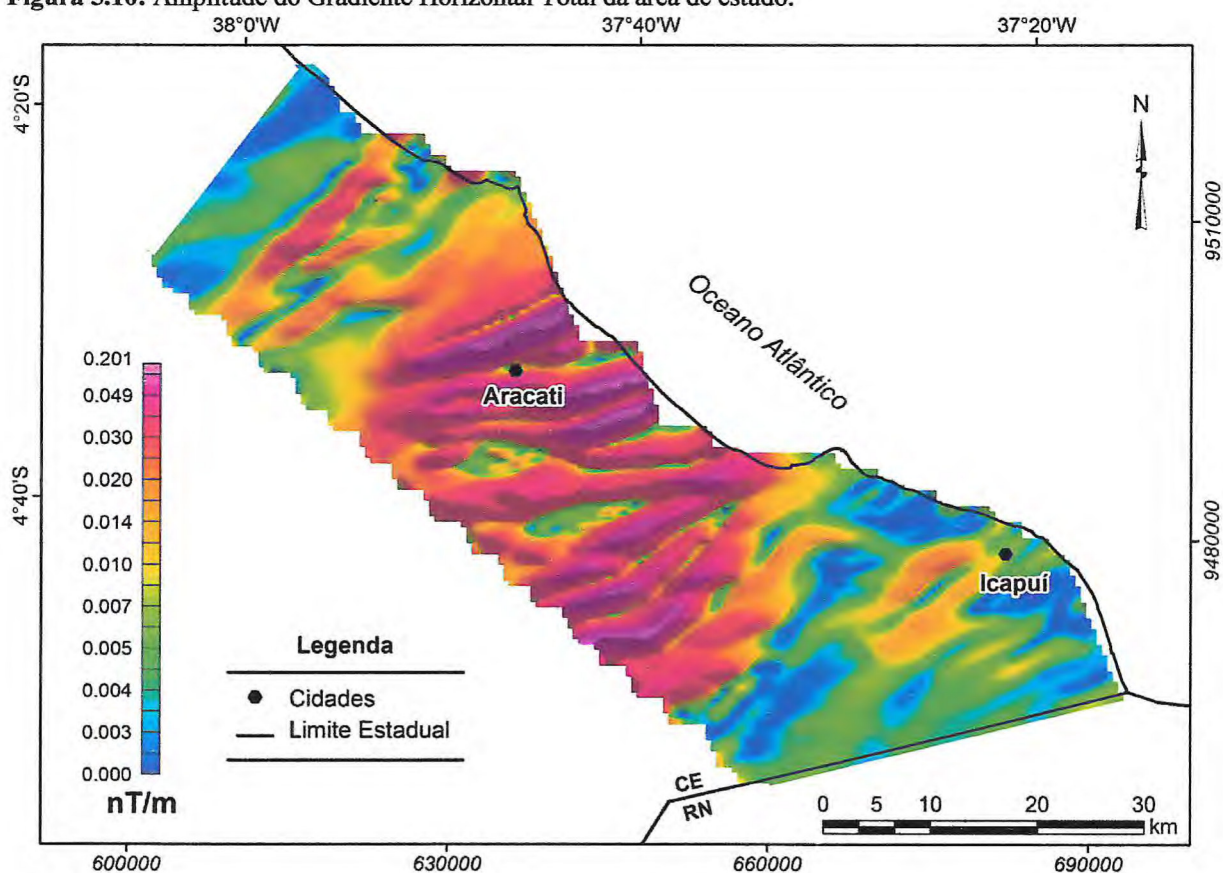
5.2.5. Amplitude do Gradiente Horizontal Total – AGHT

É gerada mediante a utilização das derivadas horizontais e representa taxa de variação lateral nos dados e realça os principais contatos geológicos (Cordell & Grauch, 1985; Verduzco *et al.*, 2004). O gradiente horizontal de ordem zero, que é o resultante das combinações das 1ª derivadas horizontais x e y, realiza um processo de transformação da fase do campo magnético (anomalias) e um realce das altas frequências. A Figura 5.10 mostra o mapa de AGHT. Pode ser calculada por meio da seguinte formulação matemática:

$$|AGHT| = \sqrt{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}}$$

onde AGHT é a Amplitude do Gradiente Horizontal Total, T o campo geomagnético, e ∂x , ∂y são as derivadas parciais de 1ª ordem nas direções x e y, respectivamente.

Figura 5.10: Amplitude do Gradiente Horizontal Total da área de estudo.



5.3. Interpretação dos Dados Magnéticos

5.3.1. Interpretação Qualitativa

A interpretação qualitativa dos dados magnéticos foi conduzida com base nas assinaturas magnéticas observáveis nos diferentes produtos mostrados anteriormente e no contexto geológico da área de estudo.

A assinatura magnética da borda oeste da Bacia Potiguar, com base nos mapas de anomalias magnéticas da primeira derivada vertical, inclinação do sinal analítico e amplitude do sinal analítico, mostra uma configuração com alinhamentos magnéticos de direção principal NE-SW e de 2ª ordem E-W e NW-SE. Os mapas de anomalias da Inclinação do Sinal Analítico e da primeira derivada vertical foram utilizadas na interpretação dos principais lineamentos magnéticos, enquanto que os mapas de Amplitude do Sinal Analítico e Redução ao Polo foram utilizados na divisão de domínios magnéticos, sendo identificados três domínios magnéticos que estão descritos e detalhados abaixo. Esta descrição pode também ser acompanhada através do exame da Figura 5.11.

Domínio Magnético Fortim (DMF)

Localizado no oeste da área de estudo, é caracterizado por baixos magnéticos (de -30 até -270 nT) (Figura 5.7) e por vezes, ausência do sinal analítico (Figura 5.8). Apresenta uma faixa anômala de curto comprimento de onda de 2 km (Figura 5.10) com maior magnetização alongada na direção NE-SW (Figura 5.12). Essas anomalias podem estar associada com a Zona de Cisalhamento Jaguaribe que não aflora na região, porém segue o mesmo *trend* do continente para o litoral (Figura 3.2).

Domínio Magnético Aracati (DMA)

Situado na região central da área de estudo, é representado por anomalias de alta amplitude do sinal analítico (até 0,269 nT/m) alongadas nas direções NE-SW e E-W (Figura 5.12) com comprimento de onda de 2 a 10 km (Figura 5.8). Foi realizado reconhecimento de campo, visando a causa aflorante de tais anomalias, no entanto, devido a expressiva cobertura sedimentar nada que possa estar relacionado foi encontrado.

Domínio Magnético Icapuí (DMI)

Posiciona-se no leste da área e é caracterizado por valores magnéticos variando entre -100 e 40 nT (Figura 5.7) e, por representativas porções com ausência do sinal analítico. Na região do domínio afloram rochas sedimentares da Formação Barreiras, além dos calcários da Formação Jandaíra e dos arenitos da Formação Açú da Bacia Potiguar. Esse domínio apresenta um pico anômalo positivo (até 0,032 nT/m) (Figura 5.8) que pode estar associado a um alto do embasamento.

Figura 5.11: Mapa de domínios magnéticos com os principais lineamentos interpretados.

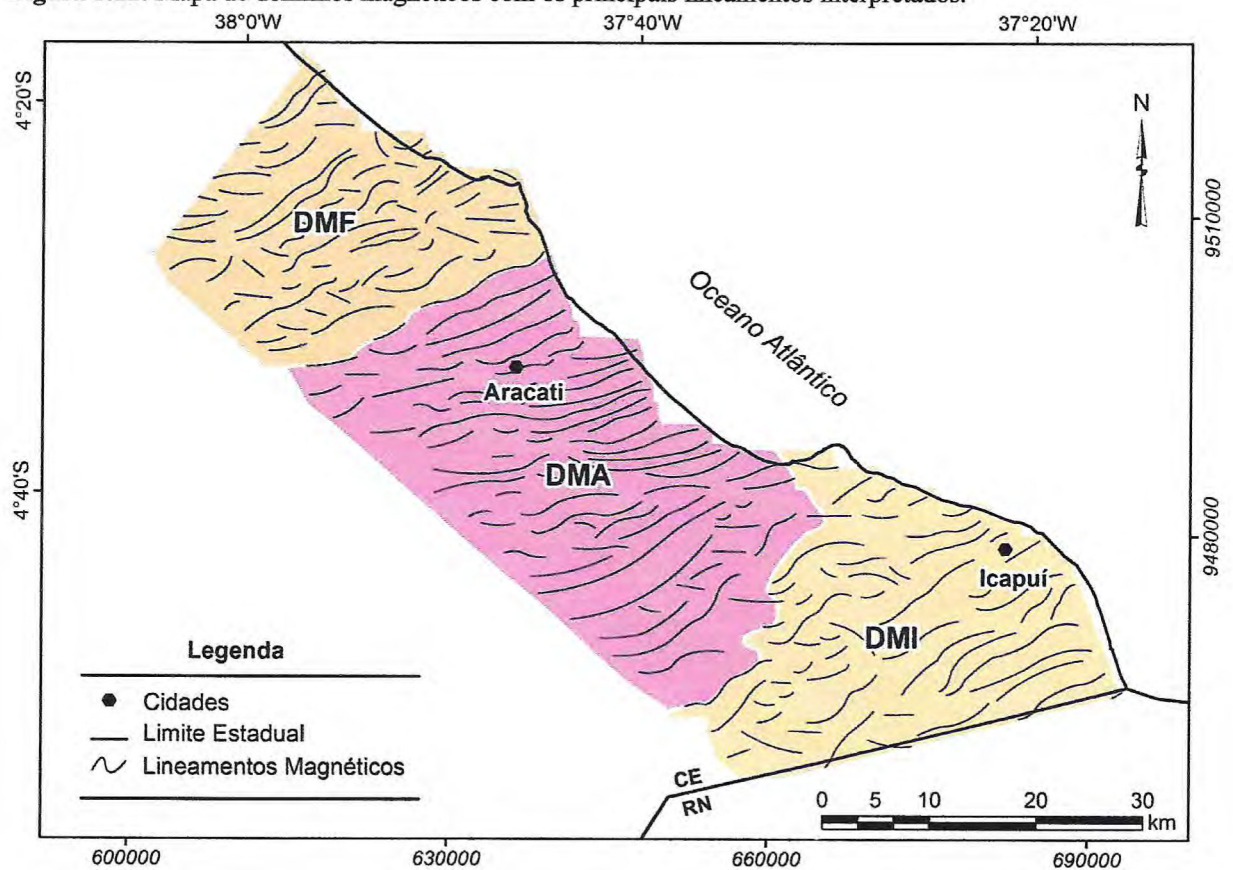
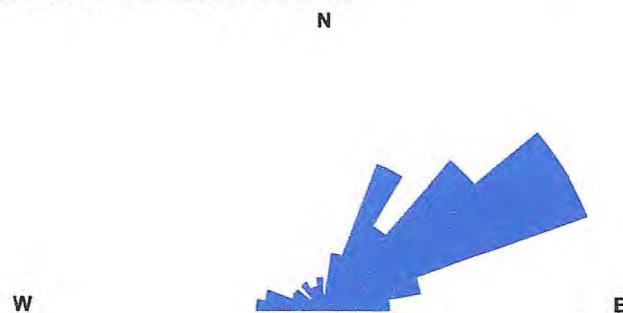


Figura 5.12: Diagrama de roseta dos principais lineamentos magnéticos interpretados na área de estudo. Notar forte tendência NE e lineamentos subordinados NW e E-W.

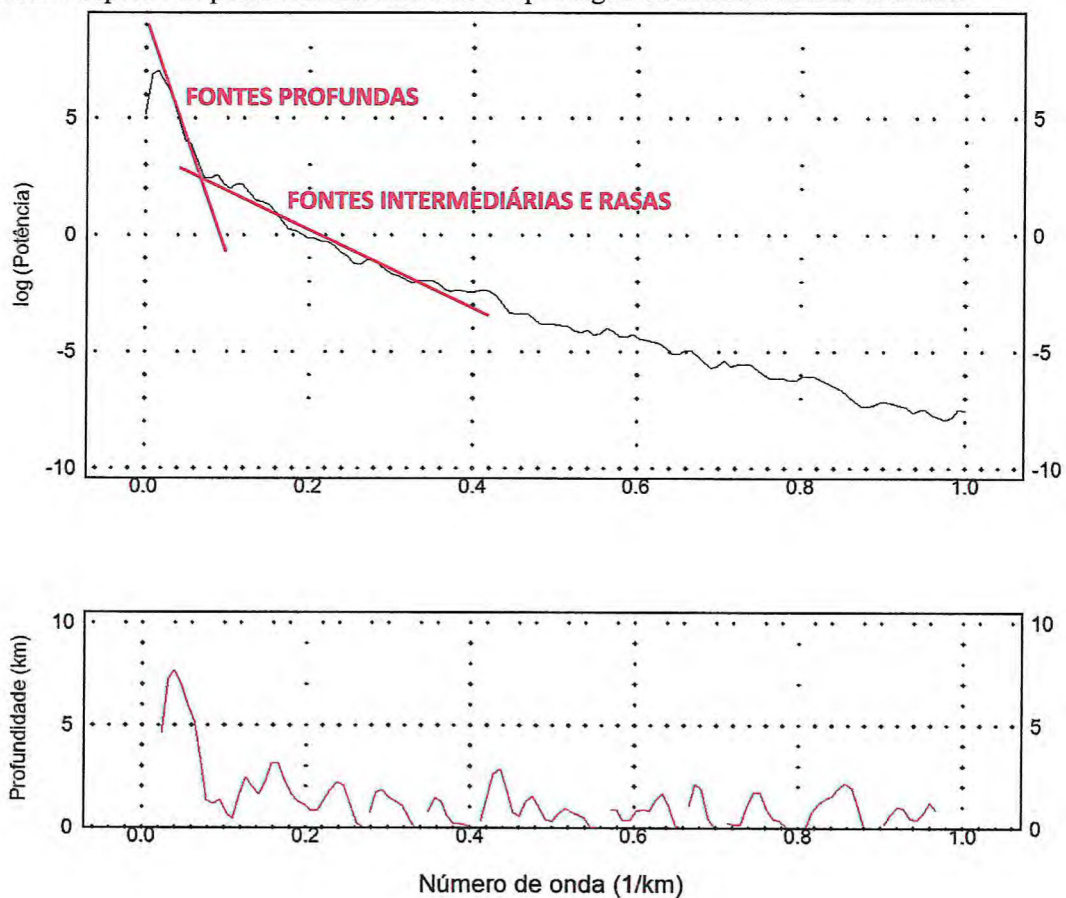


5.3.2. Interpretação Semi-Quantitativa

O espectro de potência (Spector & Grant, 1970) do sinal magnetométrico (Figura 5.13) foi gerado a fim de se obter melhor resultado interpretativo no que diz respeito à separação espectral de fontes rasas e profundas, causadoras das anomalias magnéticas. As frequências mais altas, cujo comprimento de onda é duas vezes a distância entre observações sucessivas, chamada frequência de Nyquist, foi desprezada para efeitos de interpretação dos dados (Davis, 1986).

Desta forma, foi interpretado que as fontes mais profundas, na área de estudo, chegam a atingir aproximadamente 7 km de profundidade e as fontes rasas e intermediárias variam entre 1 e 3 km. A Figura 5.13 mostra o espectro de potência radial médio do campo magnético anômalo da área de estudo.

Figura 5.13: Espectro de potência radial médio do campo magnético anômalo da área de estudo.



5.4. Deconvolução de Euler 3-D

Outro procedimento usado para interpretação quantitativa e estimativa das fontes magnetométricas, na qual são adotadas as derivadas horizontais e vertical, foi a Deconvolução de Euler 3-D (Thompson, 1982; Reid *et al.*, 1990). Essa técnica localiza as fontes magnéticas por meio das relações de homogeneidade de Euler para campos potenciais (magnetometria e gravimetria), que considera a anomalia magnética do campo total $T \equiv T(x,y,z)$, corrigida de um campo regional aditivo constante e produzida por uma fonte pontual 3-D, situada nas coordenadas cartesianas x_0 , y_0 e z_0 . A equação abaixo representa a anomalia que satisfaz a equação homogênea de Euler 3-D (Reid *et al.*, 1990).

$$(x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = -nT$$

em que n é o índice estrutural, T o valor da função (campo magnético), x e y as coordenadas do ponto medido, z a profundidade da fonte e $\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial T}{\partial y}$ e $\frac{\partial T}{\partial z}$ as primeiras derivadas parciais do campo x_0 , y_0 e z_0 .

O índice estrutural indica a forma geométrica da fonte, sendo este, um fator exponencial correspondente à taxa de decaimento do campo potencial com a distância entre a fonte e o ponto de medida (Barbosa & Silva, 2005). O grau de complexidade ou geometria da fonte magnética tem como índices (Geosoft, 2010):

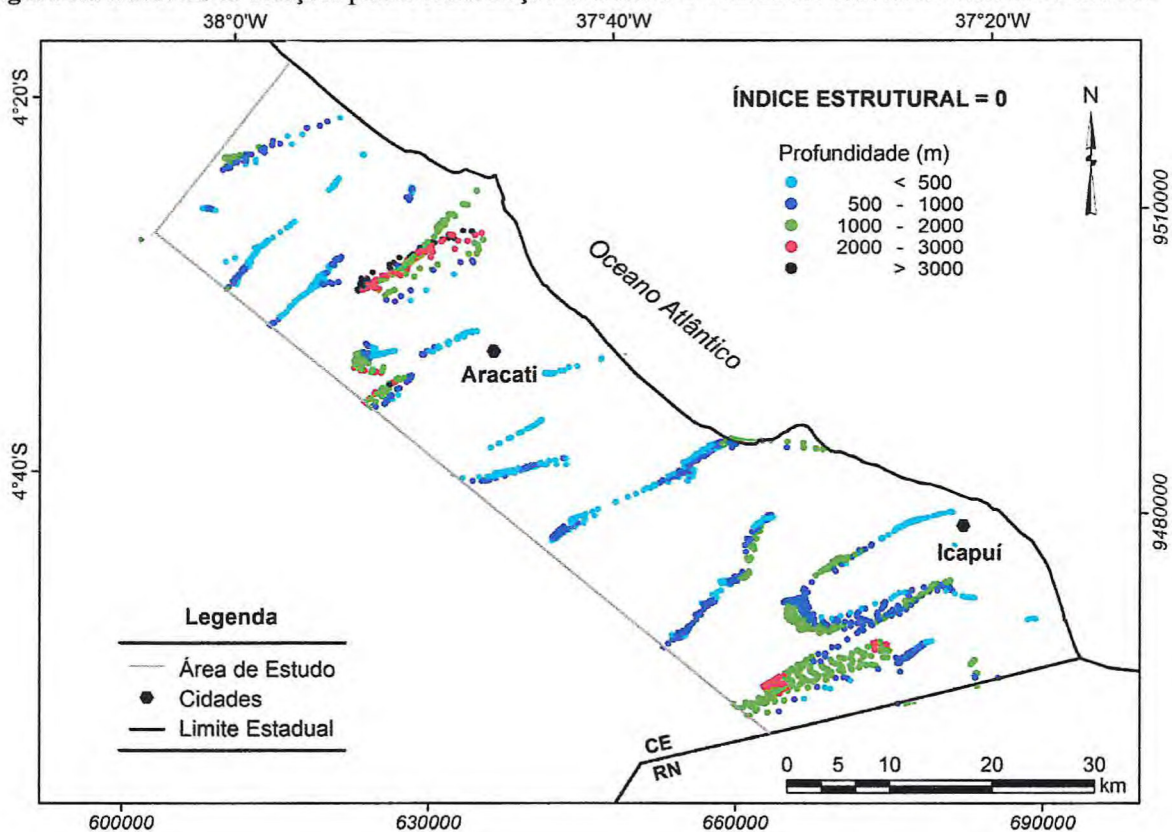
- 0 - Representa contatos geológicos simples;
- 1 - Representa diques e falhas;
- 2 - Representa cilindros horizontais;
- 3 - Representa qualquer forma tridimensional.

Outro parâmetro a ser inserido neste cálculo é o tamanho da janela espacial (Munis, 2009), na qual a solução do sistema de equações leva à localização de uma determinada fonte. Foram aplicados todos os índices para que cada fonte tenha sua solução melhor definida, porém, os índices 0 e 3 foram os que melhor se homogeneizaram com a área. Para o índice 0 foi aplicada uma janela espacial de 5 km e tolerância máxima da profundidade de 10%, enquanto que para o índice 3 foi aplicada uma janela espacial de 5 km e tolerância de 15%. Os parâmetros da janela espacial e tolerância máxima foram escolhidos de forma interativa, analisando os resultados obtidos de acordo com a mudança desses parâmetros.

As figuras 5.14 e 5.15 apresentam as principais nuvens de soluções geradas pela Deconvolução de Euler para os índices 0 e 3, respectivamente. Para o índice 0, os resultados

mostram concentração maior de soluções no intervalo entre 100 m até 1.000 m de profundidade (Figura 5.14). A área de estudo possui soluções alinhadas segundo *trend* NE-SW e E-W, sendo que a maioria das soluções encontra-se em profundidades menores que 500 m. O extremo leste do DMF possui nuvens de soluções com profundidades maiores que 3.000 m e alinhadas na direção NE-SW (Figura 5.16). Tais feições podem estar relacionadas com a Zona de Cisalhamento Jaguaribe não aflorante na região (Figura 3.2). A parte leste da área de estudo (DMI na Figura 5.16) possui nuvens de solução com profundidades até 3.000 m, o que denota fontes no embasamento.

Figura 5.14: Nuvens de soluções para Deconvolução de Euler 3-D com índice estrutural 0 na área de estudo.



Para o índice 3, os resultados mostram concentração maior de soluções no intervalo entre 3.000 m e 5.000 m de profundidade (Figura 5.15). A área de estudo possui soluções alinhadas segundo *trend* NE-SW e E-W (Figura 5.16). A parte oeste da área de estudo possui nuvens de soluções com profundidades maiores que 8.000 m, porém encontram-se dispersas. Enquanto na parte leste da área as fontes com profundidades maiores que 8.000 m encontram-se alinhadas seguindo uma direção preferencial NE-SW.

Figura 5.15: Nuvens de soluções para Deconvolução de Euler 3-D com índice estrutural 3 na área de estudo.

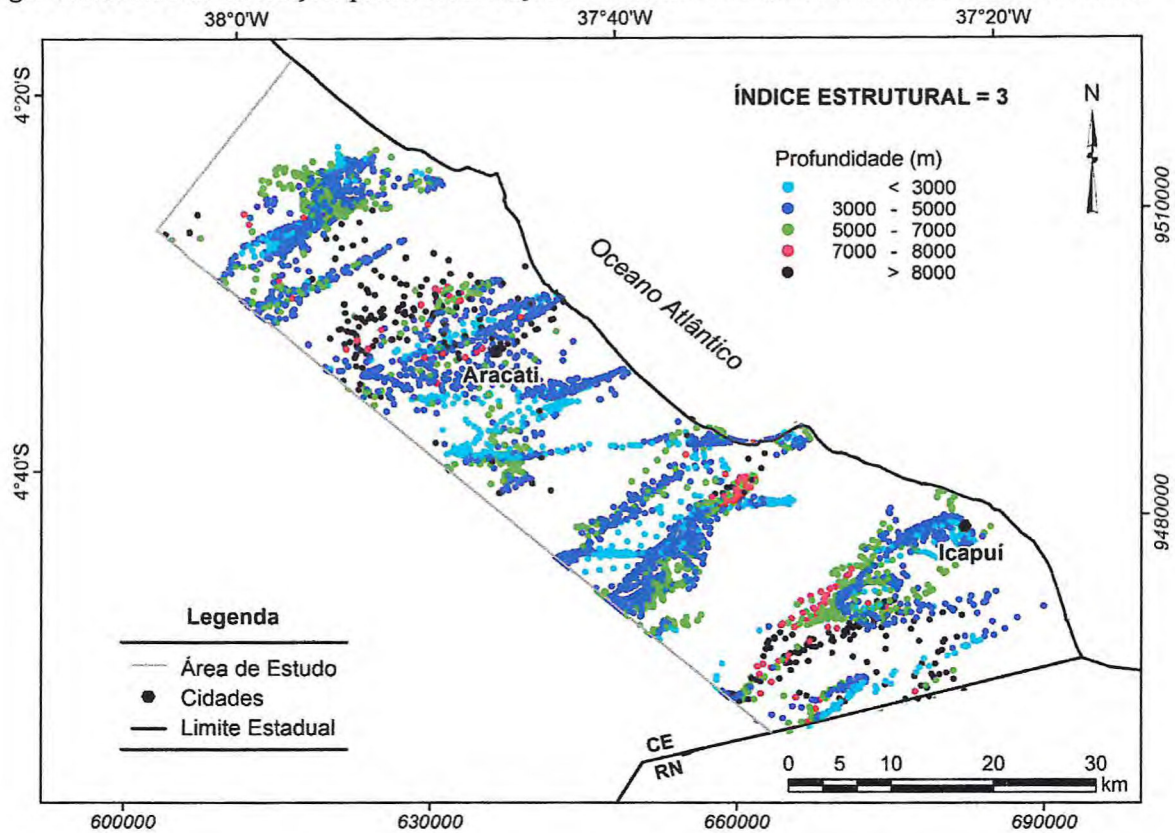
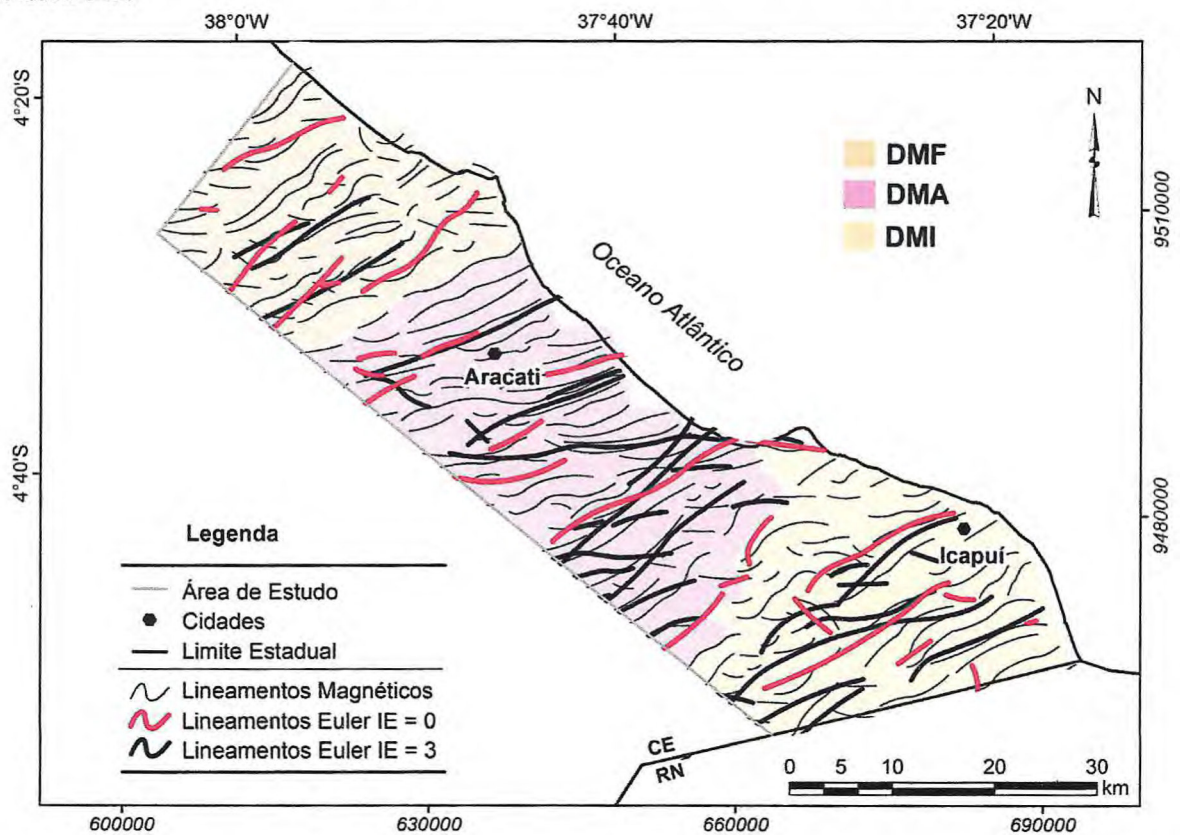


Figura 5.16: Domínios magnéticos e os lineamentos interpretados com as nuvens de soluções da Deconvolução de Euler 3-D.



6. GRAVIMETRIA

6.1. Introdução

Esse capítulo tem como objetivo principal descrever os principais procedimentos adotados na aquisição, compilação e processamento digital de dados gravimétricos e planialtimétricos adquiridos no âmbito do presente trabalho. O conjunto de dados gravimétricos utilizados é o resultado de um trabalho de compilação de dados prévios cedidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e por novos dados de campo que foram adquiridos ao longo da execução deste trabalho de pesquisa. Foram realizadas interpretações qualitativas e quantitativas dos principais produtos gravimétricos gerados, identificando variações de espessura do pacote sedimentar na borda ocidental da Bacia Potiguar e, ainda, a investigação de estruturas que permitam a acumulação de fluidos, como por exemplo, feições de grábens e *horsts*.

Nos itens abaixo são descritos o banco de dados gravimétrico, quanto à origem e a distribuição espacial de todos os dados, são também descritos os métodos, os parâmetros e os equipamentos utilizados no levantamento gravimétrico e planialtimétrico, assim como a sua distribuição geográfica na área de trabalho.

6.2. Método de Aquisição e Materiais

A estratégia para execução do levantamento gravimétrico teve início com pesquisa de informações cartográficas na área de estudo a fim de identificação das melhores rodovias e vias de acesso para realização dos circuitos gravimétricos. Foram utilizadas imagens de satélites geradas pelo Google Earth V.6.2.2 e cartas planialtimétricas da SUDENE na escala 1:100.000. Para o processamento, georreferenciamento e visualização das imagens foram utilizados os softwares *ArcGis View 10* e *Google Earth* (versão 6.2.2).

A aquisição dos dados gravimétricos e planialtimétricos foi dividida em duas etapas, que ocorreram no período de setembro a novembro de 2013. A Figura 6.1 mostra prancha com fotografias da aquisição dos dados gravimétricos e planialtimétricos. Foram adquiridas 142 estações gravimétricas e 142 estações planialtimétricas, com espaçamento médio entre as estações de 2 km. A estação Gravimétrica Aracati “B” do Observatório Nacional, cravada na calçada da Igreja Matriz, no lado esquerdo de quem entra pela sua porta

principal (Figura 6.2), foi utilizada como estação base para o levantamento gravimétrico na área de estudo. Cada etapa é descrita detalhadamente a seguir:

1ª Etapa – Estações 1 a 76.

No período de 16 de Setembro a 5 de Outubro de 2013 foram obtidos dados correspondentes a 76 estações. Nessa fase utilizou-se como estações base para o levantamento gravimétrico e planialtimétrico os seguintes pontos:

- Estação Gravimétrica – EG 200286 do ON, que está situada no município de Aracati e Estação Altimétrica – RN 1615T do IBGE, que está situada no município de Fortim, para aquisição das estações 01 a 53.
- Estação Gravimétrica – EG 200286 do ON e Estação Planimétrica – SAT 92390 do IBGE, que estão situadas no município de Aracati, para aquisição das estações 54 a 76.

2ª Etapa – Estações 76 a 142.

No período de 4 de Novembro a 28 de Novembro de 2013 foram obtidos dados correspondentes a 66 estações. Nessa fase utilizou-se como estações base para o levantamento gravimétrico e planialtimétrico os seguintes pontos:

- Estação Gravimétrica – EG 200286 do ON e estações planialtimétricas BASE situadas no extremo leste da área de estudo para uma melhor distribuição e deslocamento entre estações. A Tabela 6.1 mostra a localização das estações planialtimétricas BASE e as respectivas estações gravimétricas referentes a cada uma delas.

Tabela 6.1: Estações planialtimétricas BASE e suas estações gravimétricas referentes.

Coordenadas das Estações Planialtimétricas BASE			Estações
UTM Y(m)	UTM X (m)	Altitude (m)	Gravimétricas
9466696	675727	11	77 a 94
9462631	670722	23	95 a 106
9477316	660427	50	107 a 129
9473440	668989	59	130 a 142

Figura 6.1: Prancha de fotografias dos detalhes da aquisição gravimétrica e plani-altimétrica. A: Posição do gravímetro em relação à base gravimétrica de Aracati, B, C, D e E: Perspectiva geral de alguns locais escolhidos para a realização das estações e aquisição DGPS; F: Catálogo de informações relevantes no momento das leituras de gravidade; e G e H: Detalhe do gravímetro CG-5 em preparação para as leituras.

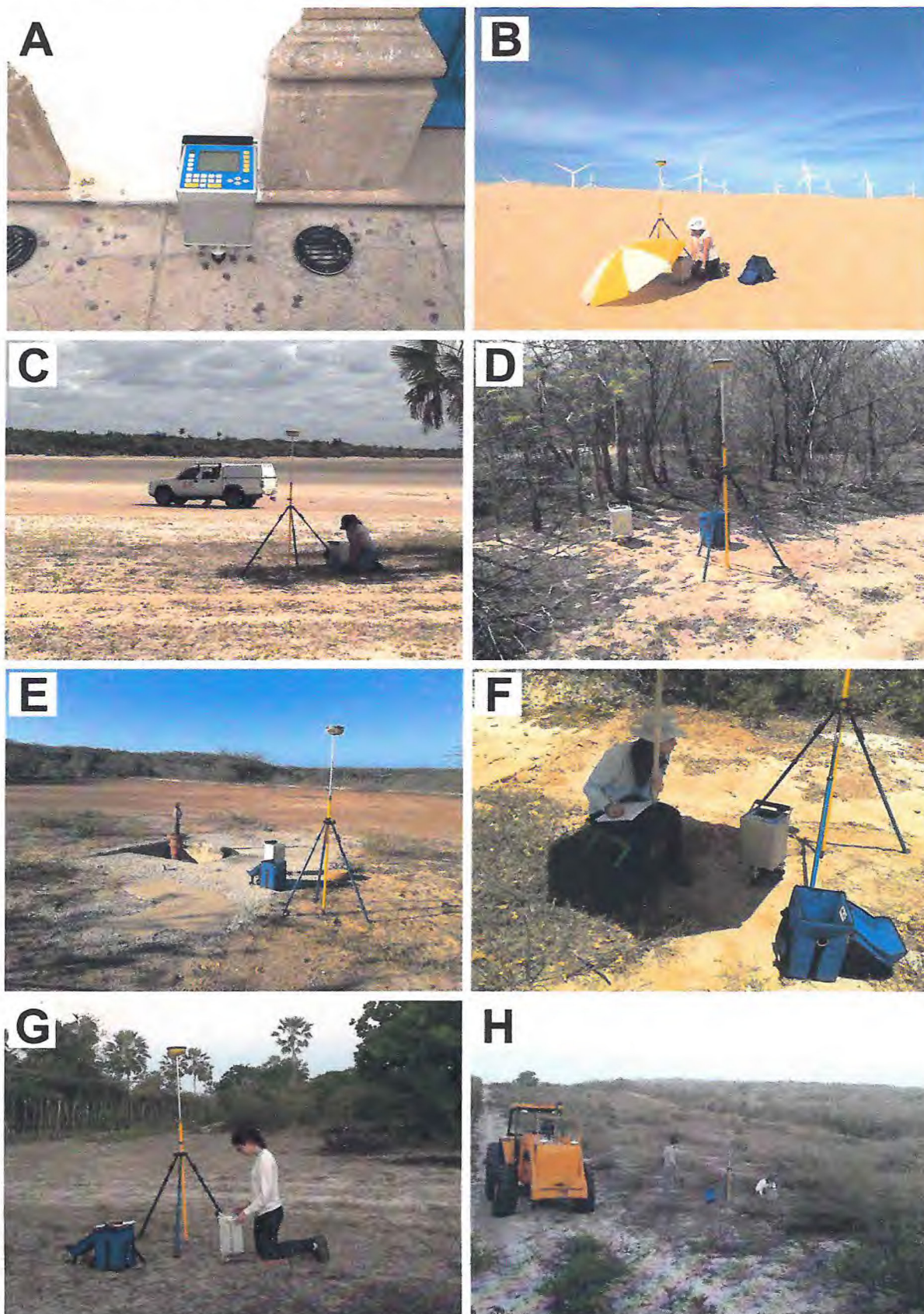
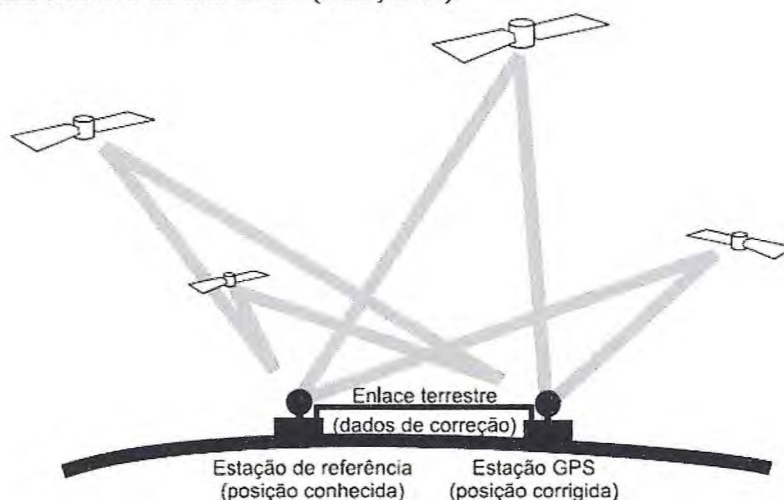


Figura 6.2: Relatório da Estação Gravimétrica Aracati “B” do Observatório Nacional utilizada como estação base na aquisição dos dados gravimétricos no extremo oeste da Bacia Potiguar.



Um aumento considerável da precisão das medidas com receptores GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) pôde ser obtido com a utilização de um segundo receptor localizado em uma posição conhecida. A diferença entre a medida contínua da posição deste receptor e suas coordenadas verdadeiras fornece a correção a ser aplicada no receptor cuja posição é desconhecida. A informação é enviada por um enlace radioelétrico para que o outro receptor efetue a correção de sua posição. A Figura 6.3 mostra a estrutura básica do método DGPS. Vale acrescentar que a melhoria obtida é função da separação entre os dois receptores. No entanto, mesmo com separações da ordem de várias dezenas de quilômetros, obtêm-se valores significativos de melhoria.

Figura 6.3: Estrutura básica do método DGPS (Assis, 2005).



O levantamento planialtimétrico foi realizado concomitantemente ao levantamento gravimétrico, estando o dispositivo utilizado na pesquisa descrito a seguir:

Hiper II

O equipamento Hiper II é um receptor GNSS multifrequência. Os receptores Hiper II podem receber e processar sinais GNSS frequências L1 e L2 dos sistemas de navegação de satélites GPS e GLONASS (*Global Navigation Satellite System*).

Esta capacidade de multifrequência e multiconstelação melhoram a precisão e confiabilidade dos pontos e posições que são produzidos pelo sistema Hiper II, especialmente em locais de difíceis condições de trabalho. O HiPer II possui vários outros recursos, incluindo o avançado multicaminhos atenuados, que ajuda a fornecer recepção sob coberturas

e em áreas de baixa intensidade de sinal. O receptor fornece a funcionalidade, precisão, disponibilidade e integridade necessárias para a coleta de dados fácil e rápido.

Nas duas etapas foram utilizados os receptores Hiper II. Durante os trabalhos realizados a altura do tripé das antenas itinerantes “*rover*” foi padronizada em 2 m. Já nas estações base ocorreram variações na altura em função da localização e posicionamento do tripé.

O processamento foi realizado por meio do *software* Topcon Tools (versão 8.2). A Tabela 6.2 mostra os principais parâmetros utilizados no processamento dos dados planialtimétricos.

Para maior precisão dos dados foram utilizadas as estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) do IBGE e a filtragem de sinal em relação ao seu tempo de observação. Essa filtragem é feita através da janela *Occupation View*, a qual apresenta o tempo de ocupação dos satélites em relação ao tempo de aquisição de sinal. Assim é possível habilitar ou desabilitar intervalos em função do tempo dos sinais dos satélites, em períodos onde a relação sinal-ruído é baixa.

Tabela 6.2: Parâmetros utilizados no processamento dos dados planialtimétricos.

Sistema de Referência	→	SIRGAS 2000
Datum Vertical	→	Elipsóide
Fuso Horário	→	(UTC -03:00) Caiena, Fortaleza
Unidade Linear	→	Metros (m)
Intervalo mínimo de tempo de observação	→	1 min
Altura válida da antena	→	De 0.000 m até 3.000 m
Fator de escala de confiança	→	1
Satélites	→	GPS e GLONASS
Precisão	→	Horizontal: 0.100 m
		Vertical: 0.100 m
Erro de controle máximo aceitável:	→	0.100 m
Intervalo VRS máximo	→	50 km

As estações da RBMC desempenham justamente o papel do ponto de coordenadas conhecidas, eliminando a necessidade de que o usuário imobilize um receptor em um ponto que, muitas vezes, oferece grandes dificuldades de acesso. Além disso, os receptores que equipam as estações da RBMC são de alto desempenho, proporcionando observações de grande qualidade e confiabilidade. Todas as estações foram processadas utilizando as RBMC, inclusive as estações planialtimétricas do IBGE, pois os relatórios destas estações não estavam atendendo a precisão desejada. Os relatórios foram construídos com o nível de confiança 68% dos dados e com critério de rejeição baseado no *Tau Criterion*.

6.4. Banco de Dados Gravimétricos

A área de estudo apresenta cobertura gravimétrica pouco densa, com estações de medidas concentradas, principalmente, ao longo das principais rodovias e estradas vicinais de alguns distritos na porção nordeste do Ceará. Tal distribuição reflete a importância de trabalhos de maior detalhe na borda oeste da bacia. As figuras 6.4 e 6.5 mostram a distribuição das estações gravimétricas da ANP e a contribuição das estações adquiridas na área de estudo, respectivamente. Como pode ser observado pela distribuição das novas estações gravimétricas, o levantamento efetuado foi imprescindível para que a cobertura de dados na borda oeste da bacia se tornasse adequada aos objetivos deste trabalho.

As estações cedidas pela ANP e utilizadas nesse estudo contabilizam um total de 416 e foram adquiridas por vários projetos independentes realizados por universidades (UFC, UFRN, entre outras), instituições de pesquisa e órgãos governamentais (Petrobras, CPRM, ON e IBGE) aplicados, preferencialmente, para o estudo da Bacia Potiguar.

As estações adquiridas para esse estudo contabilizam um total de 142. Essas estações representam ganho, tanto em termos quantitativo e qualitativo, pois cobriu uma área relativamente grande e de importância fundamental para a geração dos mapas de anomalias gravimétricas adequados aos objetivos desse estudo. A demanda de trabalho para o recobrimento dessa região também foi muito expressiva, pois não havia acesso ou possuía estradas posicionadas em lugares estratégicos, porém de difícil acesso.

Figura 6.4: Distribuição das estações gravimétricas pertencentes ao banco de dados da ANP.

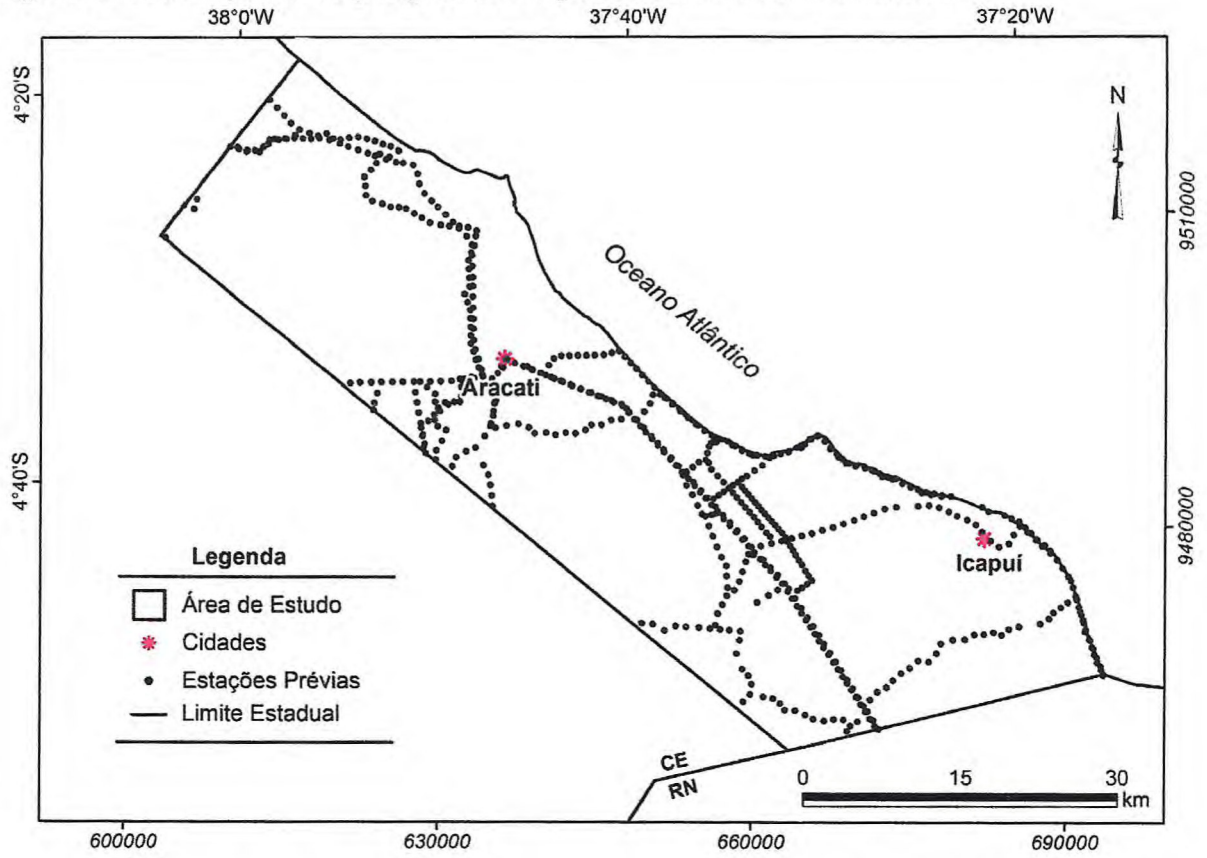
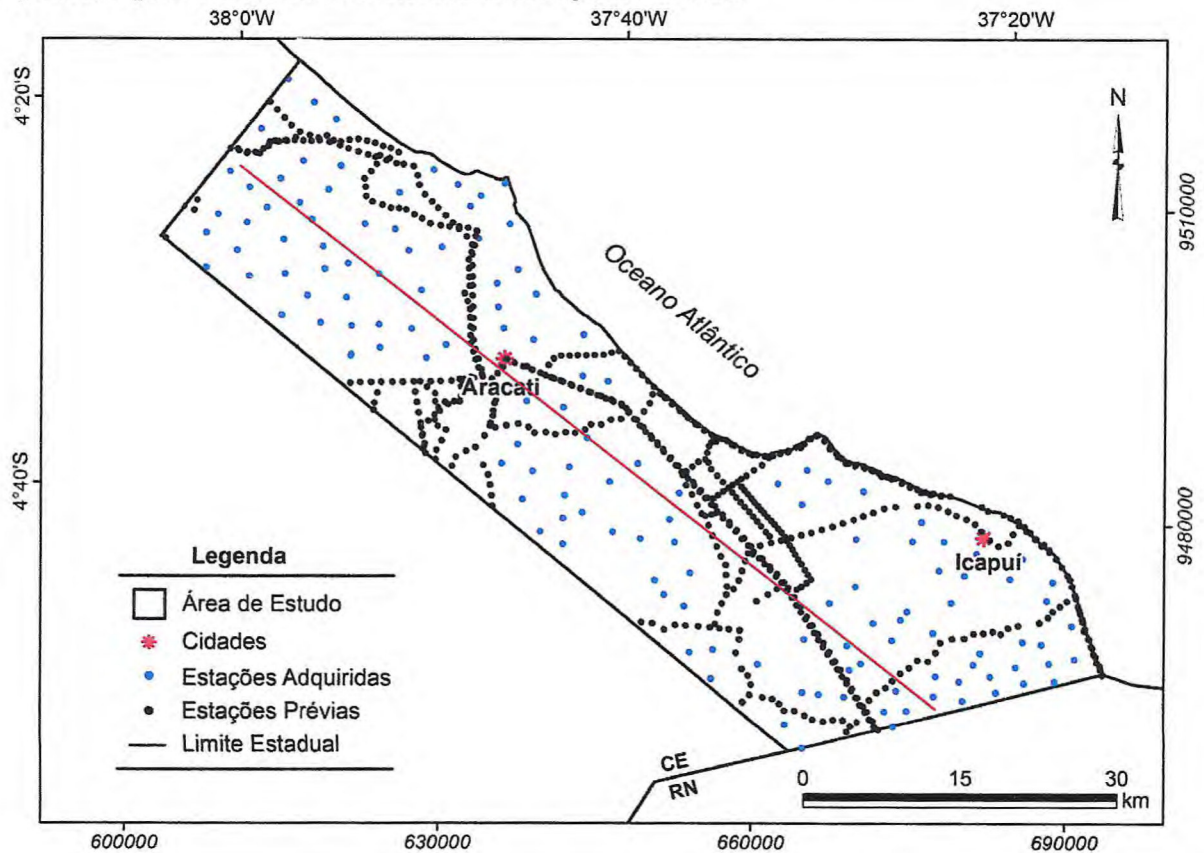


Figura 6.5: Distribuição das estações gravimétricas prévias e as novas estações adquiridas. A linha vermelha representa o perfil usado na análise estatística dos conjuntos de dados.



6.5. Levantamento Gravimétrico

O levantamento gravimétrico foi realizado com uso do gravímetro relativo digital CG-5 fabricado pela SCINTREX. Esse equipamento é baseado em um microprocessador que possui uma faixa de medição de mais de 8.000 mGals e resolução de leitura da ordem de 0,001 mGal, permitindo o uso do Autograv para investigações de campo em escalas regionais ou levantamento geodésico (SCINTREX, 2009).

No total, foram adquiridas 142 novas estações gravimétricas, regularmente espaçadas entre 2 e 4 km (Figura 6.5). O levantamento gravimétrico foi realizado em circuitos fechados, cujos pontos de partida e chegada correspondem à estação gravimétrica de primeira ordem.

6.6. Correção dos Dados Gravimétricos

O banco de dados gravimétricos integrado foi importado por meio do *software Oasis Montaj* da GEOSOFT. O projeto criado engloba todos os itens no seu diretório de trabalho, desde os arquivos de dados até as ferramentas utilizadas, incluindo ferramentas auxiliares, tais como histogramas, diagramas de dispersão, etc. Para a correção dos dados gravimétricos foi utilizada a sequência de processamento típica no *Oasis Montaj*, que envolve o cálculo dos efeitos da maré, *drift* ou deriva instrumental, altura do instrumento e latitude. A partir daí, foram calculados os valores de gravidade em cada estação de medida com base na estação gravimétrica de primeira ordem do ON com objetivo de gerar os mapas do campo de gravidade e suas anomalias Ar-Livre, Bouguer e Bouguer Completa, com a correção de terreno (Geosoft, 2010). Cada correção é descrita a seguir:

6.6.1. Correção de Maré

Todas as leituras foram corrigidas da variação de maré devido à atração gravitacional do sistema Luni-Solar para a data (dia e hora) e local da observação. A fórmula usada no cálculo da correção de maré é complexa e extensa, por isso apenas uma simplificação é apresentada aqui:

$$L_m = L + C_m$$

onde L_m é a leitura corrigida da maré, L a leitura de gravidade média e C_m a correção de maré.

Capítulo 6

6.6.2. Correção da Altura do Instrumento

Cada leitura é corrigida em função da altura do instrumento sobre a estação gravimétrica ou base sobre a qual a elevação é medida:

$$L_a = L_m + 0,308596 \cdot a_i$$

onde L_a é a leitura corrigida do instrumento, L_m a leitura corrigida da maré e a_i a altura do instrumento em metros.

6.6.3. Correção da Deriva Instrumental

A correção da variação instrumental é calculada com base no erro de fechamento entre a primeira e a última leitura na estação gravimétrica base de cada circuito:

$$D = \frac{(L_{B2} - L_{B1}) - (G_{B2} - G_{B1})}{t_{B2} - t_{B1}}$$

onde D é a deriva em mGal/hora, L_{B1} e L_{B2} as leituras na base, t_{B1} e t_{B2} a hora das leituras e G_{B1} e G_{B2} os valores absolutos de gravidade em mGal.

6.6.4. Gravidade Absoluta

A gravidade absoluta é a atração do campo de gravidade terrestre na estação:

$$G_a = G_{B1} + (L_a - L_{B1}) - (t - t_{B1}) \cdot D$$

onde G_a é a gravidade absoluta em mGal, G_{B1} a gravidade absoluta na base 1, L_a a leitura corrigida da altura do instrumento, L_{B1} a leitura na base 1, t a hora da leitura, t_{B1} a hora da leitura na base 1 e D a deriva do equipamento CG-5.

6.6.5. Correção de Latitude

Essa correção requer a gravidade teórica para o local de medida sobre o esferoide terrestre. A Fórmula Internacional de 1967 foi utilizada para o cálculo da gravidade teórica:

$$G_l = 978031,846 \cdot [1 + 0,005278895 \cdot \text{sen}^2(l) - 0,000023462 \cdot \text{sen}^4(l)]$$

onde G_l é a gravidade teórica mGal para correção de latitude e l a latitude da estação.

6.6.6. Anomalia Ar-Livre

A correção Ar-Livre é calculada pela subtração do valor de gravidade teórica para correção de latitude da gravidade absoluta, adicionando a correção para a elevação da estação:

$$G_{AL} = G_a - G_l + 0,308596 \cdot h_e$$

onde G_{AL} é a anomalia Ar-Livre em mGal, G_a a gravidade absoluta, G_l a gravidade teórica com a correção da latitude e h_e a elevação ou altitude ortométrica em metros.

6.6.7. Anomalia Bouguer

A anomalia Bouguer corrige a anomalia Ar-Livre para as massas topográficas que existem entre a elevação da estação de medida e o esferóide de referência (SIRGAS 2000):

$$G_{AB} = G_{AL} - 0,0419088 \cdot [\rho \cdot h_e + (\rho_a - \rho)h_a + (\rho_g - \rho_a)h_g]$$

onde G_{AB} é a anomalia Bouguer, G_{AL} a anomalia Ar-Livre, ρ a densidade das rochas (g/cm^3), h_e a elevação da estação em metros, ρ_a a densidade da água (g/cm^3), h_a profundidade da água e do gelo em metros, ρ_g a densidade do gelo (g/cm^3), h_g a espessura do gelo em metros.

6.6.8. Anomalia Bouguer Completa

A anomalia Bouguer Completa corrige a anomalia Bouguer das atrações gravimétricas das massas topográficas nas vizinhanças do ponto de observação:

$$G_{ABC} = G_{AB} + C_T$$

onde G_{ABC} é a anomalia Bouguer completa em mGal, G_{AB} a anomalia Bouguer simples e C_T a correção de terreno em mGal. O procedimento de correção do terreno é descrito a seguir.

6.6.9. Correção de Terreno

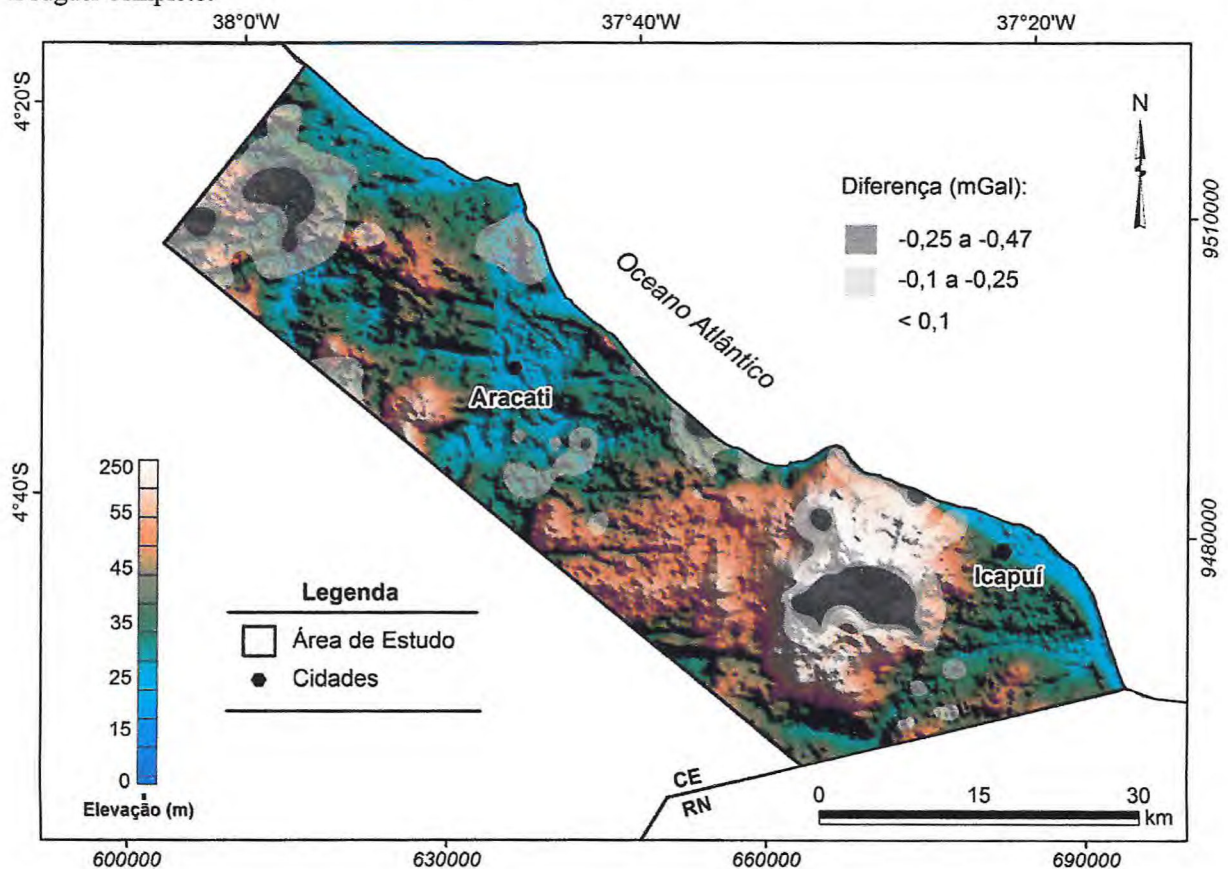
A correção do terreno é calculada utilizando uma combinação de dois métodos descritos por Nagy (1966) e Kane (1962). O programa calcula as correções de terreno para cada estação pela extração das correções regionais a partir do *grid* da correção de terreno regional e pela adição da correção de terreno local (Geosoft, 2010).

O cálculo da correção dos dados, utilizando modelos digitais de terreno - imagens SRTM, é amostrado para um *grid* de malha centrada na estação onde são feito os cálculos,

baseados nas contribuições de zonas próximas, intermediárias e distantes. Em zonas próximas (até 100 m) o algoritmo soma os efeitos de quatro seções triangulares de declive, as quais descrevem a superfície entre a estação de gravidade e elevação para cada vértice. Em zonas intermediárias (entre 100 e 800 m), o efeito do terreno é calculado para cada ponto utilizando para um prisma quadrado de superfície plana (Nagy, 1966). E nas zonas mais distantes (> 800 m) o cálculo baseia-se na aproximação de um anel para um prisma quadrado (Kane, 1962). Quaisquer valores de *dummy* no *grid* são interpolados por valores adjacentes antes do cálculo da correção de terreno. O sistema usa o *grid* da elevação médio para compensar os efeitos de terreno nas distâncias de correções regionais (Geosoft, 2010).

Nesse estudo foram gerados os mapas de anomalias Bouguer simples e Bouguer Completo com o intuito de avaliar as diferenças do campo de gravidade após a correção de terreno. Os valores de diferença das anomalias variam entre -0,02 a -0,47 mGal. As maiores variações encontram-se nas porções oeste, leste e ao longo da linha de costa (Figura 6.6). Como esperado, as variações mais significativas ocorrem em regiões de relevo mais acidentado.

Figura 6.6: Modelo digital do terreno – SRTM da área de estudo com zonas em tons de cinza que mostram os locais com maiores diferenças na variação da gravidade entre os mapas de anomalias Bouguer simples e Bouguer completo.



6.7. Análise Estatística das Anomalias Gravimétricas

Uma sequência de processamento foi realizada nos diferentes conjuntos de dados: os da ANP, as novas estações adquiridas e a integração dos dois bancos de dados. O objetivo é avaliar a contribuição dos novos dados adquiridos e a correlação entre os mesmos. Cada etapa é descrita detalhadamente a seguir:

1. Interpolação dos dados gravimétricos – os mapas de anomalia Bouguer foram confeccionados por meio da interpolação dos dados em malha regular de 500 m utilizando o método *Kriging* (Geosoft, 2010).

2. Padronização dos dados gravimétricos – depois de gerados os mapas de anomalia Bouguer nos bancos de dados, foi feito um perfil, com espaçamento de 100 m, em comum a todos os bancos de dados (Figura 6.5). Para efetuar a análise comparativa entre os dados gravimétricos ao longo do perfil, optou-se em usar como referência a localização geográfica das novas estações gravimétricas levantadas pelo presente trabalho.

3. Separação das anomalias regional e residual – Para efetuar análise diferenciada das anomalias Bouguer geradas por corpos ou fontes situados em níveis crustais distintos foi realizada a separação das componentes regional e residual do campo de gravidade. Para o presente trabalho, a separação foi efetuada por meio da aplicação do filtro de ajuste polinomial por mínimos quadrados. A determinação do grau ou ordem polinomial baseou-se na análise qualitativa dos dados gravimétricos, considerando a melhor representação do campo gravimétrico gerado. Neste caso, o filtro polinomial de 3ª ordem apresentou resultado mais consistente para a separação das componentes regional e residual para os três conjuntos de dados.

4. Perfis gravimétricos regional e residual – denominados de curva A (ANP), curva B (dados gravimétricos levantados pelo presente estudo) e curva C (integração dos dados). Para a confecção das curvas A, B e C, os valores das anomalias foram retirados ao longo de um mesmo perfil gerado nos mapas de anomalia Bouguer de cada banco de dados (Figura 6.5).

5. Análise estatística comparativa e por correlação das anomalias gravimétricas – A análise comparativa e por correlação dos dados geofísicos consistiu principalmente na sobreposição das curvas gravimétricas, com a identificação de áreas onde há diferença significativa nos valores do campo de gravidade do levantamento do presente estudo em relação aos dados gravimétricos prévios.

A Tabela 6.3 apresenta variações estatísticas entre os três conjuntos de dados gravimétricos avaliados neste estudo. As anomalias Bouguer dos três conjuntos de dados apresentam valores máximos de 31,97 a 32,60 mGal, mínimos de -10,43 a 9,58 mGal e média de 10,86 a 11,46 mGal. Em relação às anomalias regionais os valores máximos variam de 23,44 a 24,59 mGal, mínimos de -18,01 a -17,27 mGal e média de 10,86 a 11,46 mGal. Já as anomalias residuais obtiveram valores máximos de 14,67 a 16,94 mGal, mínimos de -14,78 a -12,92 mGal e média de $-2,6 \times 10^{-15}$ a $-1,5 \times 10^{-14}$. Variações da ordem de 2,3 a 0,6 mGal foram observadas entre as anomalias Bouguer, regional e residual do banco de dados prévios com os demais conjuntos de dados gravimétricos.

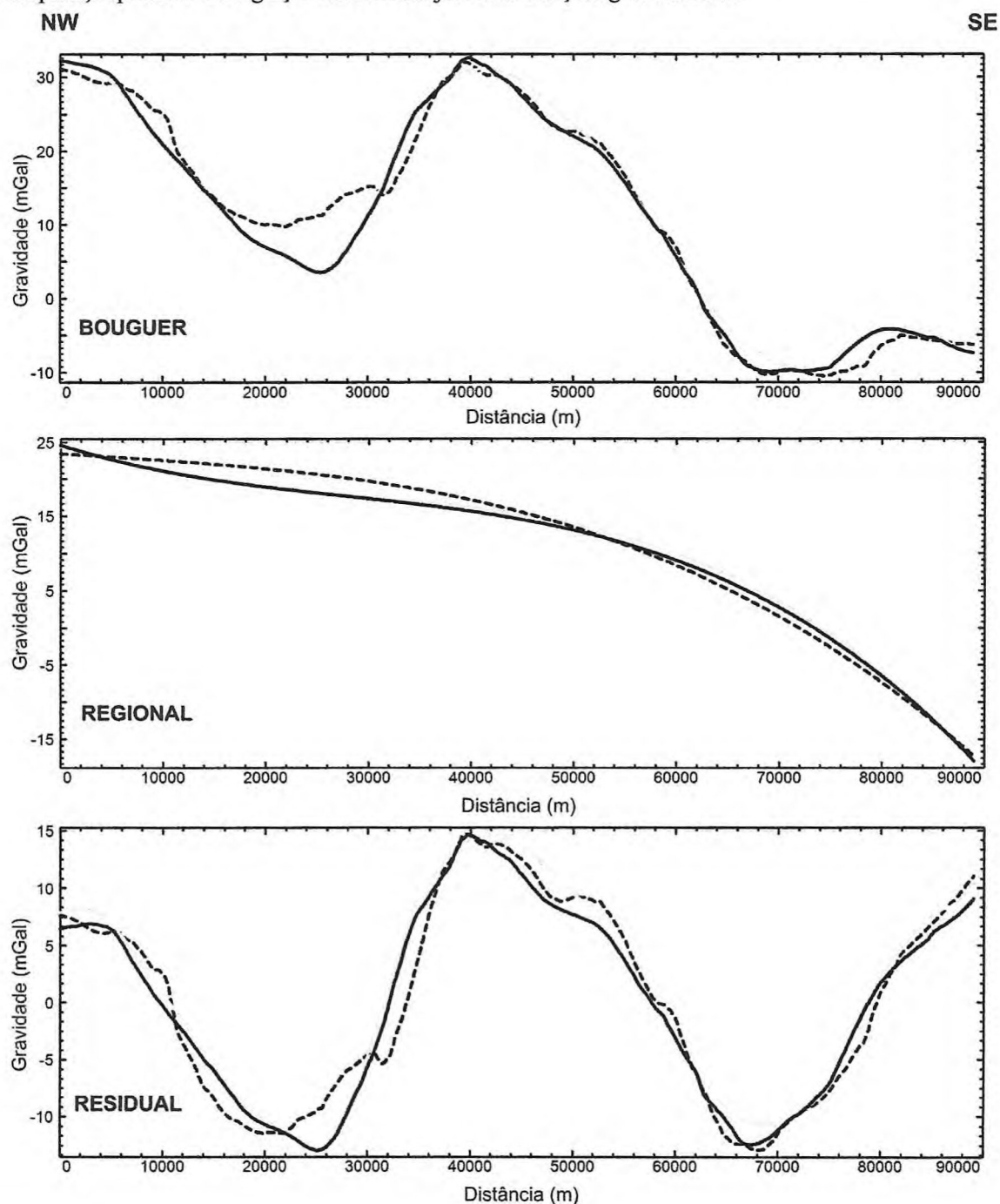
Tabela 6.3: Dados estatísticos das anomalias gravimétricas Bouguer e das componentes regional e residual do perfil traçado na área de estudo (Figura 6.5). Curvas: A – Banco de dados da ANP; Curvas B – Dados do levantamento gravimétrico; Curvas C: Integração do banco de dados da ANP com os novos dados de levantamento gravimétrico.

	Bouguer			Regional			Residual		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Valor Máximo	31,97	32,21	32,60	23,44	24,34	24,59	14,67	15,27	16,94
Valor Mínimo	-10,43	-9,58	-9,92	-17,27	-18,01	-17,89	-12,92	-14,78	-14,56
Média	11,46	11,20	10,86	11,46	11,20	10,86	$-1,5 \times 10^{-14}$	$-2,6 \times 10^{-15}$	$-2,7 \times 10^{-14}$

A Figura 6.7 mostra as anomalias Bouguer, regional e residual do banco de dados da ANP (curva A), dados do levantamento gravimétrico (curva B) e dados integrados (curva C). Nessa figura os valores de anomalias Bouguer e da componente residual diminuem da curva A para a curva B e C, principalmente a uma distância de 20 km do início do perfil, com valores que variam de 9 para 4 mGal. As diferenças entre as anomalias Bouguer nas curvas A e C destacam a contribuição significativa dos dados gravimétricos oriundos do levantamento, sobretudo em regiões onde o banco de dados pretéritos possui uma baixa cobertura de estações gravimétricas (Figura 6.4). Na região central do perfil, observa-se diferença nos valores de anomalia Bouguer e residuais das curvas A e C em relação a curva B (Figura 6.7). Este fato ressalta que os novos dados gravimétricos (curva B) nessa região específica diferem sutilmente da anomalia gravimétrica integrada (curva C) e do banco de dados da ANP (curva A). Essa região é coberta por número considerável de estações gravimétricas oriundas de projetos distintos (Figura 6.4), cujas medidas gravimétricas foram obtidas com a utilização de diferentes equipamentos, o que deve ter resultado em um conjunto de dados gravimétricos

localmente heterogêneo, com pequeno intervalo entre os valores do campo gravitacional. Os valores das anomalias gravimétricas da curva B podem então ser considerados como mais confiáveis, devido ao melhor controle da qualidade das medidas geofísicas durante sua aquisição e da etapa das correções gravimétricas adotadas no levantamento da presente pesquisa.

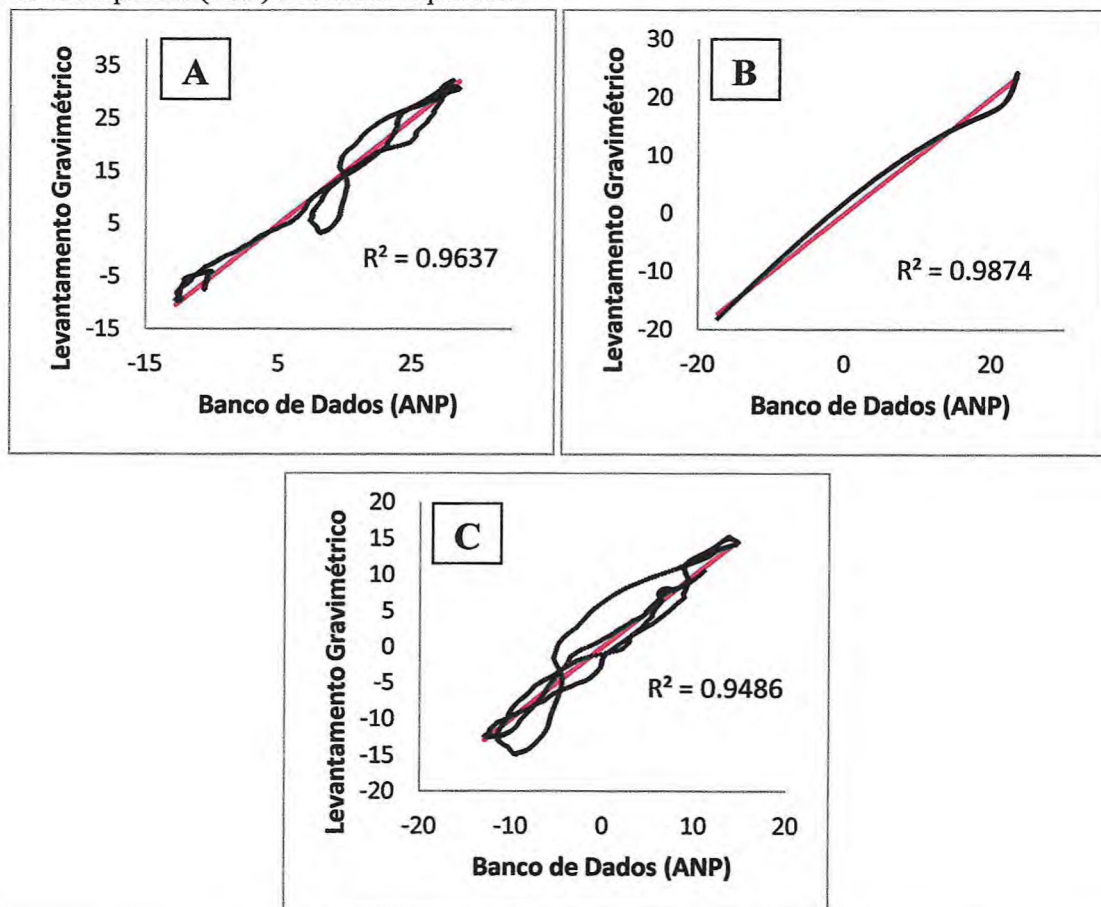
Figura 6.7: Anomalias gravimétricas Bouguer (1), regionais (2) e residuais (3) do perfil NW-SE extraído da parte central da área de estudo. A curva gravimétrica A (linha tracejada) considera apenas o bando de dados prévios da ANP. A curva B (linha cinza) foi obtida somente com os dados levantados para a pesquisa. A curva C (linha preta) representa a integração dos dois conjuntos de estações gravimétricas.



As anomalias gravimétricas regionais das três curvas apresentam pouca variação quanto aos valores de medidas analisadas. Variações da ordem de 4 mGal, na porção NW da área de estudo podem ser atribuídas à contribuição das novas estações gravimétricas à assinatura geofísica regional.

Os diagramas de correlação dos três conjuntos de dados gravimétricos são apresentados na Figura 6.8. As anomalias Bouguer e residual apresentam grau de correspondência R^2 igual a 0,9637 e 0,9486, respectivamente. Observa-se claramente uma contribuição significativa das novas estações gravimétricas para a assinatura gravimétrica da área de estudo – borda oeste da Bacia Potiguar. Os diagramas destacam aumento nos valores gravimétricos do banco de dados prévios para os dados do levantamento nas regiões central e sudeste e diminuição dos valores gravimétricos na região noroeste da área. Os dados das anomalias regionais entre o banco de dados prévios e o levantamento gravimétrico mostram boa correlação, com grau de correspondência R^2 igual a 0,9874, mostrando que as maiores diferenças nas anomalias correm na componente residual, cujo sinal geofísico apresenta menor comprimento de onda.

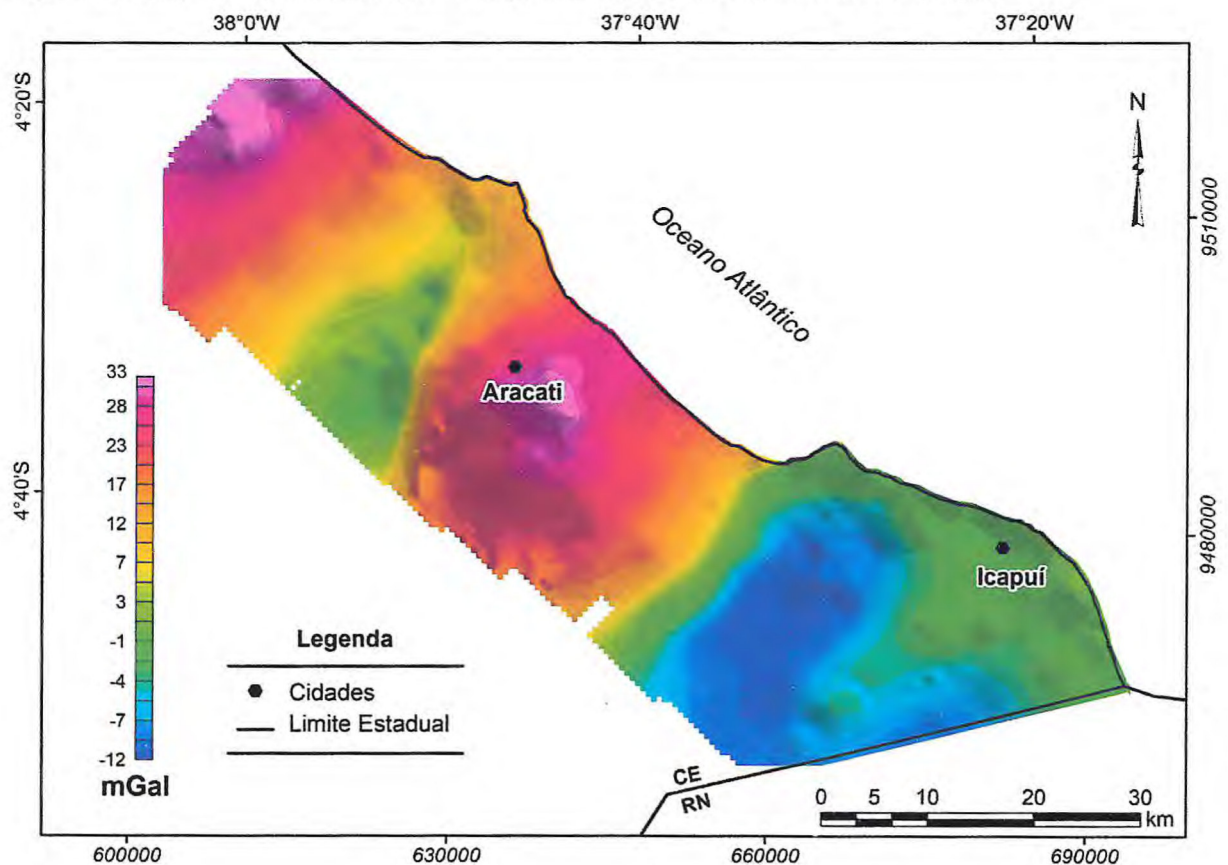
Figura 6.8: Diagramas de correlação das anomalias gravimétricas Bouguer (A), regionais (B) e residuais (C) entre os dados prévios (ANP) e os dados adquiridos.



6.8. Processamento dos Dados Gravimétricos

Após as reduções gravimétricas e análise estatística dos bancos de dados, o novo conjunto de dados integrado foi organizado em um banco de dados, com arquivos dispostos em XYZ. A partir daí o mapa de anomalias Bouguer foi confeccionado por meio da interpolação dos dados gravimétricos, em uma malha regular quadrada de 500 m utilizando o método *Kriging* (Geosoft, 2010). A Figura 6.9 mostra o mapa de anomalias Bouguer da área de estudo, cuja porção central apresenta anomalia arredondada com significativo comprimento de onda (20 km) e amplitudes máximas da ordem de 33 mGal. Já a porção leste apresenta um expressivo mínimo gravimétrico (-12 mGal) com menores comprimento de onda (10 km), orientada segundo direção NE-SW. A porção oeste da área apresenta anomalias positivas e negativas, com mínimo de -1 mGal e máximo de 30 mGal, com direção preferencial NE-SW.

Figura 6.9: Mapa de anomalias Bouguer Completo da borda oeste emersa da Bacia Potiguar.

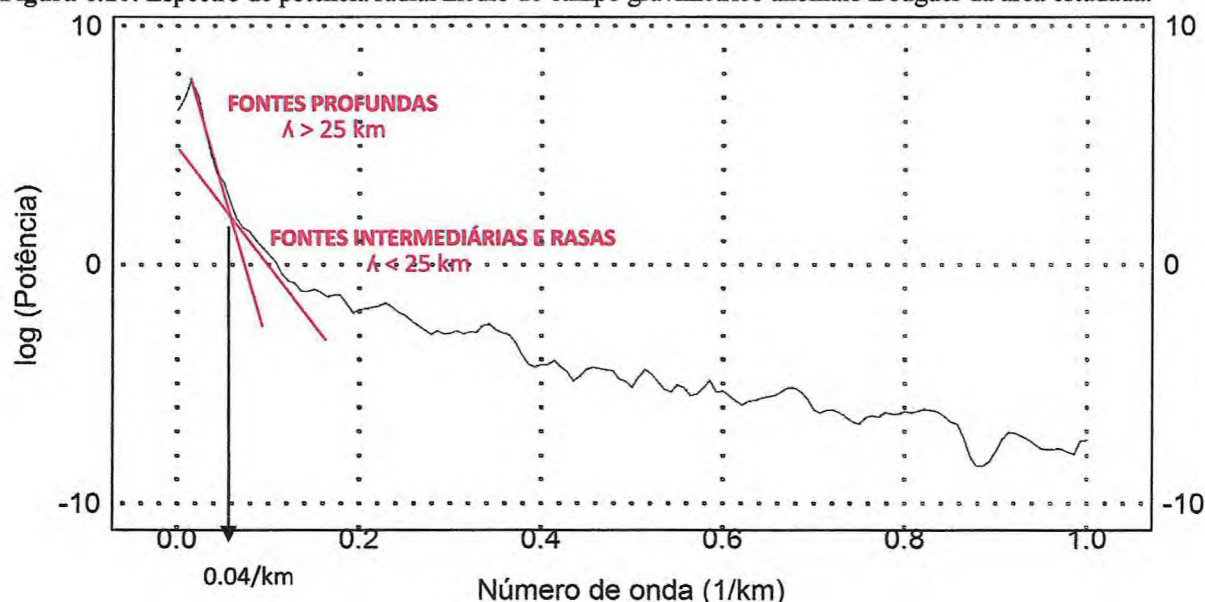


Separação em Componentes Regional e Residual

O espectro de potência radial médio do sinal gravimétrico – anomalia Bouguer - foi gerado a fim de obter melhores resultados na análise dos intervalos de número de onda no

que diz respeito à separação espectral das fontes rasas e profundas, causativas das anomalias gravimétricas (Spector & Grant, 1970). Foi verificado que o comprimento de onda ideal é de 25 km, ou seja, a componente residual corresponde a anomalias com comprimentos de onda menores que 25 km e ressaltam fontes essencialmente crustais, enquanto que a componente regional terá anomalias de maior comprimento de onda (> 25 km) e conterá fontes mais profundas - interface crosta/manto (Oliveira, 2008) (Figura 6.10).

Figura 6.10: Espectro de potência radial médio do campo gravimétrico anômalo Bouguer da área estudada.



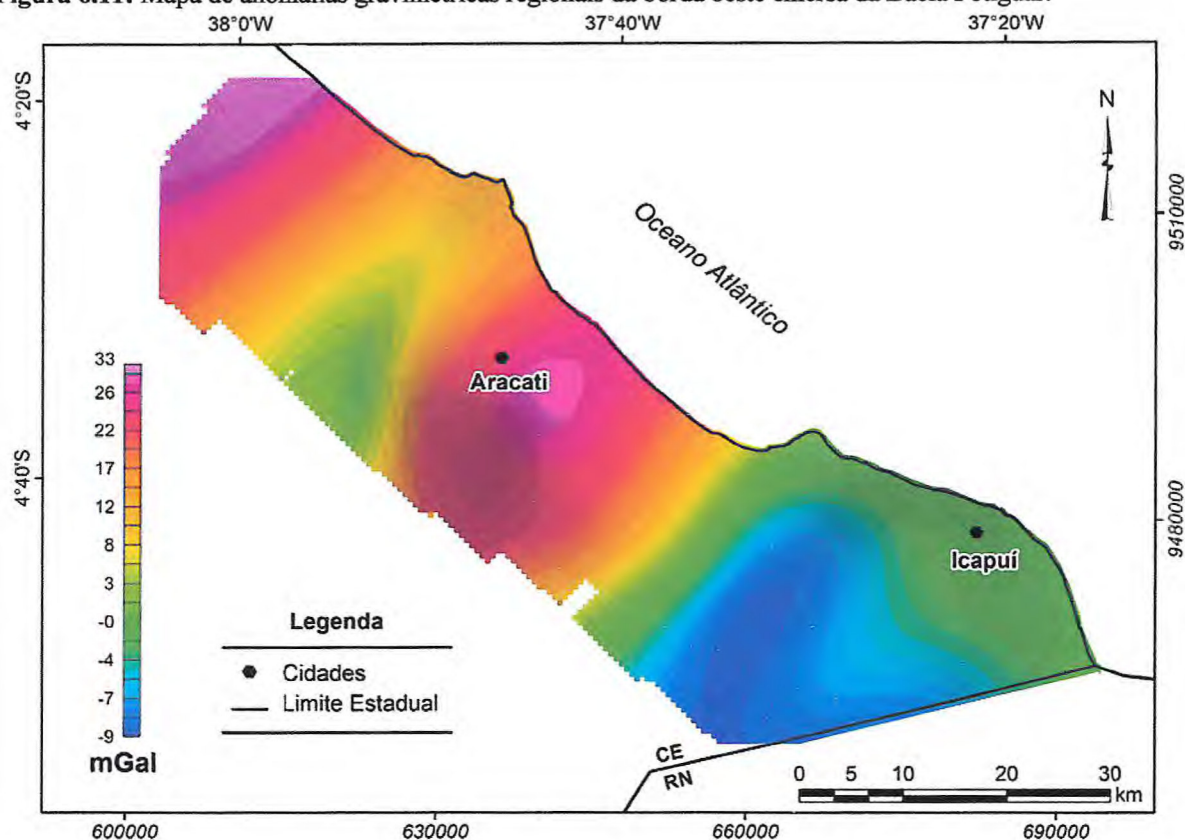
As componentes regional (Figura 6.11) e residual (Figura 6.12) do campo gravimétrico foram separadas por meio de um filtro de separação regional-residual, que se baseia na distribuição gaussiana das fontes gravimétricas em função de suas profundidades. Este filtro consiste de operador matemático que atua como passa-baixa ou passa-alta das frequências do sinal escolhido no domínio do número de ondas. O *trend* gravimétrico regional da área pôde ser distinguido satisfatoriamente (Figura 6.11), realçando a resposta gravimétrica das heterogeneidades crustais mais rasas, evidenciadas no mapa de anomalias residuais (Figura 6.12).

6.9. Mapa de Anomalias Gravimétricas Regional

As anomalias gravimétricas regionais apresentam longo comprimento de onda (> 25 km), variando de aproximadamente 33 mGal a valores próximos de -9 mGal, do sentido de oeste para leste (Figura 6.11). Nota-se um aumento suave nos valores de gravidade em

direção ao Oceano Atlântico. Esse aumento pode ser ocasionado pelo desnível da Moho associado com o afinamento crustal, característico da margem continental passiva do Nordeste brasileiro ou pelo simples fato das rochas serem mais densas (Castro *et al.*, 1998, Pedrosa Jr. *et al.*, 2010).

Figura 6.11: Mapa de anomalias gravimétricas regionais da borda oeste emersa da Bacia Potiguar.



6.10. Mapa de Anomalias Gravimétricas Residual

O mapa de anomalias gravimétricas residuais (Figura 6.12), o qual corresponde a componente residual do campo sem a influência das anomalias de maior comprimento de onda da componente regional (Figura 6.11) é representado por assinatura gravimétrica de relevo bastante acidentado, com anomalias negativas e positivas de comprimento de onda curto e intermediário (5 a 25 km), dispostas segundo direções preferenciais NE-SW, E-W e N-S. A partir dos dados do campo gravimétrico residual foi gerado o mapa de anomalias gravimétricas da primeira derivada vertical (Figura 6.13). Esse mapa destaca fontes mais rasas e anomalias de menor comprimento de onda, cuja assinatura foi utilizada para interpretar os principais lineamentos gravimétricos da área de estudo.

Capítulo 6

Figura 6.12: Mapa de anomalias gravimétricas residuais da borda oeste da porção emersa Bacia Potiguar.

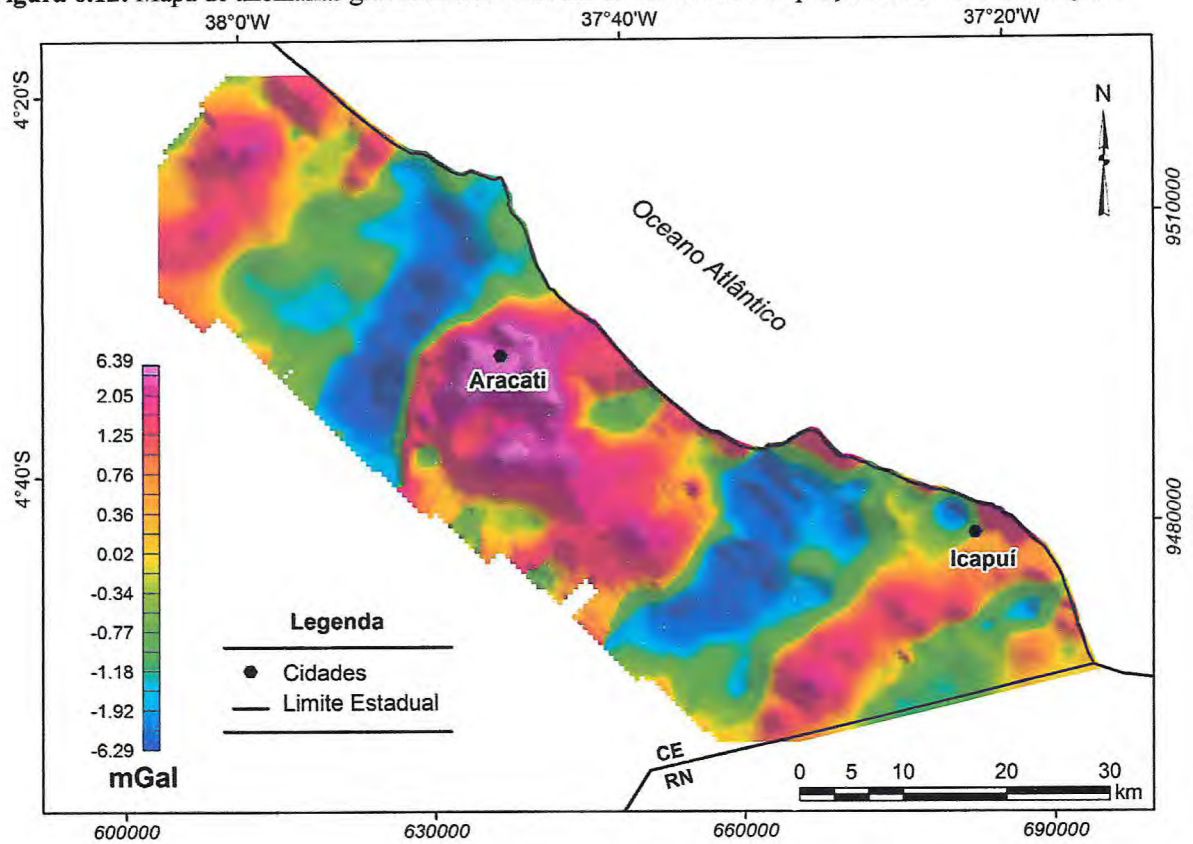
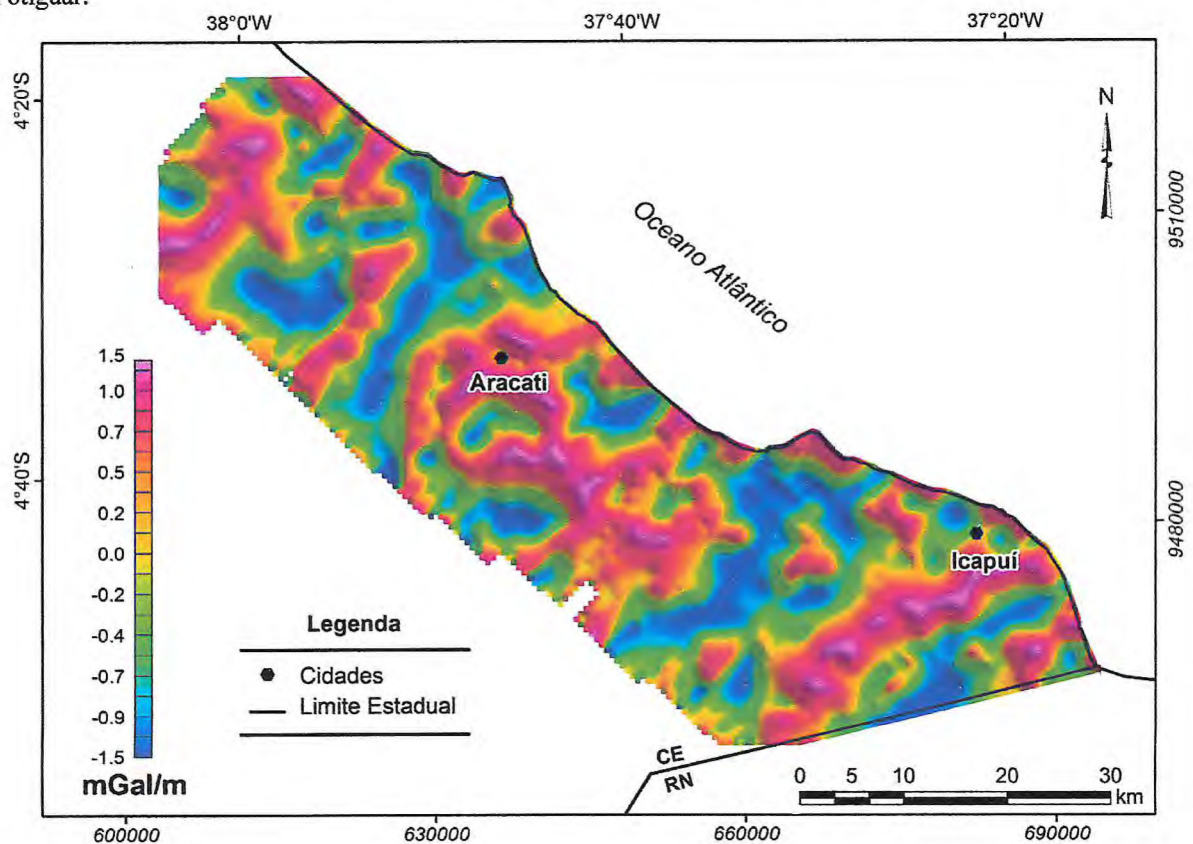


Figura 6.13: Mapa de anomalias gravimétricas da primeira derivada vertical da borda oeste emersa da Bacia Potiguar.



Três domínios gravimétricos distintos podem ser individualizados com base em sua assinatura gravimétrica (Figura 6.14), como interpretado abaixo:

Domínio Gravimétrico Fortim (DGF)

Localiza-se na porção oeste da área e é representado por relevo gravimétrico bastante acidentado, com anomalias que variam desde -6 mGal a 3 mGal e de pequeno a médio comprimento de onda (até 10 km). As anomalias estão dispostas de forma alongada, nas direções NE-SW e NW-SE (Figuras 6.14 e 6.15). O alto gravimétrico que ocorre no extremo oeste da área, seguido do baixo gravimétrico à medida que se caminha para leste também ocorre nos mapas magnetométricos (Figura 5.8), com distribuição espacial bastante semelhante. Essa região diz respeito a rochas supracrustais da Faixa Jaguaribe, sendo essa não aflorante, coberta por rochas sedimentares da Formação Barreiras e sedimentos recentes (Figura 4.6).

Domínio Gravimétrico Aracati (DGA)

A assinatura gravimétrica da porção central da área é marcada por um corpo anômalo que ocorre de forma arredondada e com relevo gravimétrico bastante acentuado, com curto a médio comprimento de onda do sinal geofísico (até 15 km). Os valores das anomalias variam de aproximadamente -1 mGal nas porções norte e sul a anomalias de maior amplitude na parte central (6 mGal). Esse corpo anômalo apresenta feições lineares com direção preferencial NE-SW e lineamentos de segunda ordem NW-SE e E-W (Figuras 6.14 e 6.15). Nessa região, afloram rochas sedimentares da Formação Barreiras e sedimentos recentes (Figura 4.6), assim esse domínio pode estar associado a feições de maior densidade no embasamento.

Domínio Gravimétrico Icapuí (DGI)

O DGI está localizado na porção leste da área, que é marcada por anomalias gravimétricas positivas e negativas, com máximo de 2,5 mGal e mínimo de -3 mGal, e comprimento de ondas de até 15 km dispostos de forma alongada seguindo direção preferencial NE-SW. É caracterizado por baixo relevo gravimétrico, no qual é truncado por anomalia positiva alongada na direção NE-SW. Nessa região, afloram as rochas sedimentares das formações Açu e Jandaíra (Figura 4.6).

Figura 6.14: Domínios gravimétricos com os principais lineamentos interpretados na área de estudo.

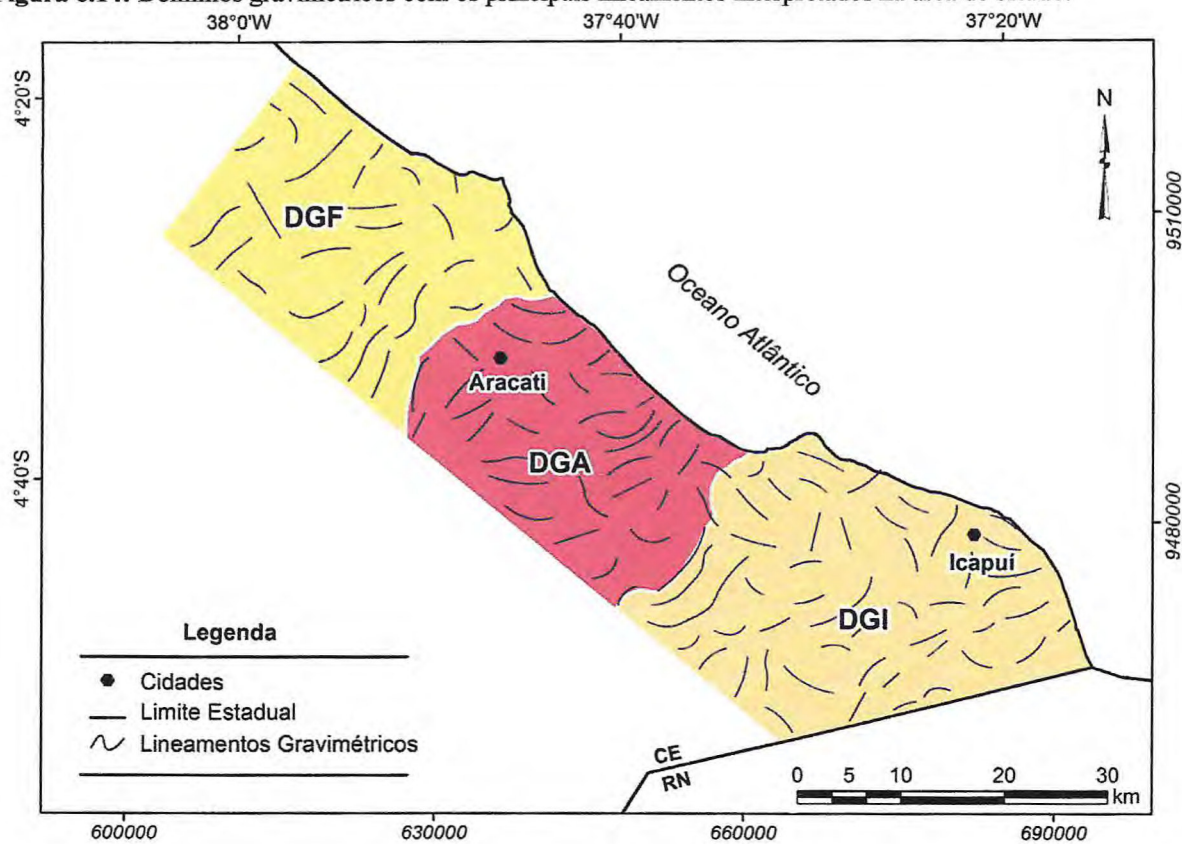
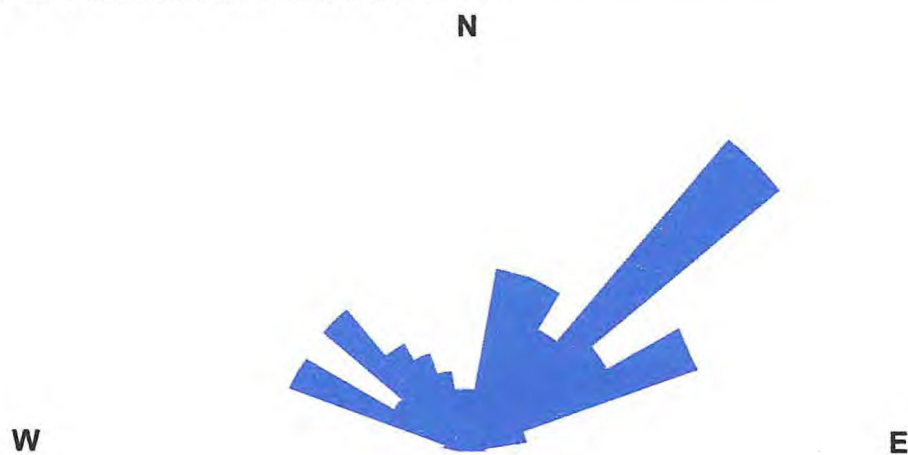


Figura 6.15: Diagrama de roseta dos principais lineamentos gravimétricos interpretados na área de estudo. Notar forte tendência NE e lineamentos subordinados NW e E-W.



6.11. Deconvolução de Euler 3-D

Deconvolução de Euler (Nabighian, 1972; Thompson, 1982; Reid *et al.*, 1990) foi realizada no mapa de anomalias Bouguer residual (Figura 6.12) com intuito de estimar a profundidade das principais fontes gravimétricas na porção mais superior da crosta terrestre. O índice estrutural é um fator exponencial que corresponde à taxa de decaimento do campo com a distância, para uma fonte de geometria conhecida. O índice estrutural indica a forma geométrica da fonte, sendo este, um fator exponencial correspondente à taxa de decaimento do campo potencial com a distância entre a fonte e o ponto de medida (Barbosa & Silva, 2005). O grau de complexidade ou geometria da fonte gravimétrica tem como índices (Geosoft, 2010):

- 0 - Representa falhas e diques;
- 1 - Representa cilindros horizontais;
- 2 - Representa um corpo tridimensional.

Outro parâmetro a ser inserido neste cálculo é o tamanho da janela espacial (Munis, 2009), na qual a solução do sistema de equações leva à localização de uma determinada fonte. O índice estrutural 0 foi o que melhor se homogeneizou com os dados da área de estudo, aplicando uma janela espacial de 5 km e tolerância máxima da profundidade em 15%. Estes parâmetros foram escolhidos de forma interativa, analisando os resultados obtidos de acordo com a mudança desses parâmetros.

A Figura 6.16 apresenta as principais nuvens de soluções geradas pela Deconvolução de Euler 3-D. Os resultados mostram concentração maior de solução no intervalo entre 500 e 1.000 m de profundidade. A porção leste da área de estudo possui fontes de direção NE-SW que vão desde profundidades menores que 500 m a maiores que 2.000 m, sendo essas concentrações provavelmente associadas a falhas durante o desenvolvimento da bacia. A porção central da área possui nuvens de soluções mais dispersas, no entanto, destaca-se um expressivo lineamento E-W com leve inflexão para NW no sul do DGA (Figuras 6.15 e 6.16). O DGF possui nuvens de soluções dispersas, porém destacam-se alinhamentos de direções NE-SW e NW-SE, estando o primeiro com maior concentração de nuvens de solução entre 500 m a 1.000 m, provavelmente, associado à Zona de Cisalhamento Jaguaribe, enquanto que o segundo apresenta profundidades maiores que 1.000 m (Figuras 6.16 e 6.17).

A Figura 6.17 mostra integração dos domínios gravimétricos e lineamentos interpretados com alinhamento das nuvens de soluções geradas na deconvolução de Euler 3-D.

Figura 6.16: Nuvens de soluções para Deconvolução de Euler 3-D na área de estudo.

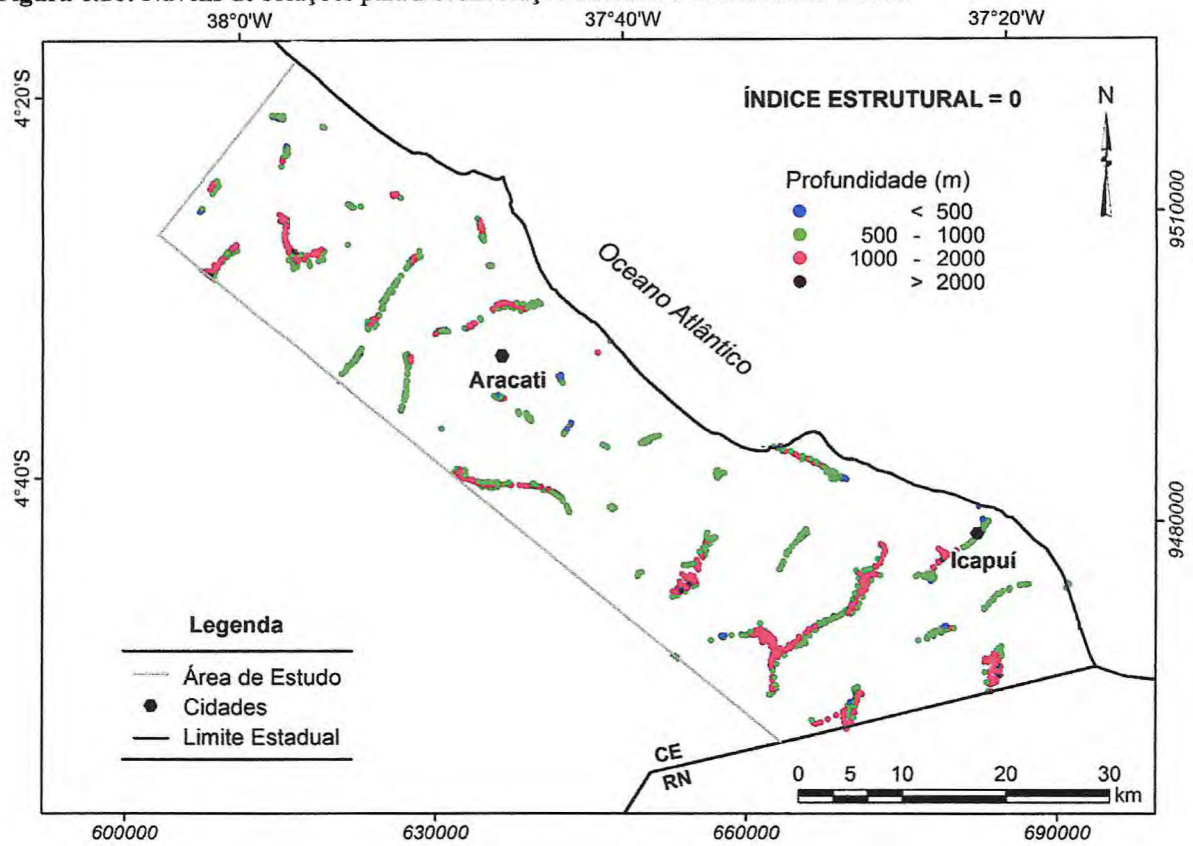
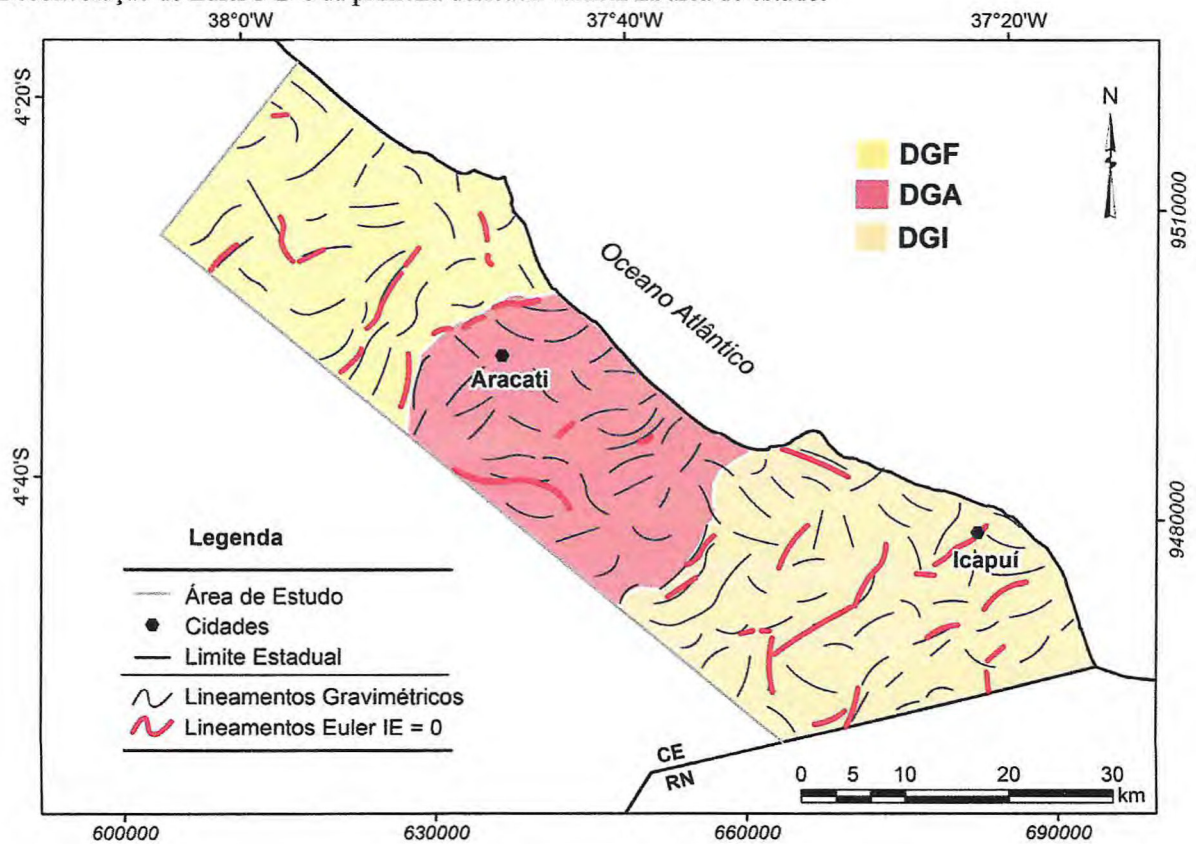


Figura 6.17: Domínios gravimétricos e os lineamentos interpretados com as nuvens de soluções da Deconvolução de Euler 3-D e da primeira derivada vertical na área de estudo.



6.12. Modelagem Gravimétrica 2-D

A base computacional para a modelagem gravimétrica foi realizada utilizando o *software* GM-SYS (NGA Inc., 2004) que foi desenvolvido por Talwani *et al.* (1959) e Talwani & Heirtzler (1964), enquanto que os algoritmos e rotinas usados para calcular a resposta dos modelos geométricos das fontes gravimétricas em profundidade são descritos por Won & Bevis (1987). Esse programa permite criar e manipular de forma interativa modelos geológicos 2-D permitindo o ajuste otimizado entre as curvas gravimétricas calculada e observada. Os modelos iniciais foram criados baseados em algumas informações bibliográficas (Sousa, 2002) de outros métodos geofísicos (Figura 6.18), informações de poços do SIAGAS e da ANP e na deconvolução de Euler 3-D (Figura 6.16). As densidades foram estabelecidas baseando-se em bibliografia existente para as principais unidades litoestratigráficas presentes na área (Telford *et al.*, 1990 e Castro, 2011). Nesta pesquisa foram selecionadas três seções gravimétricas, cujas posições sobre o mapa de anomalias Bouguer residual estão na Figura 6.19.

Figura 6.18: Linha sísmica interpretada para a utilização da informação de profundidade do embasamento (Sousa, 2002).

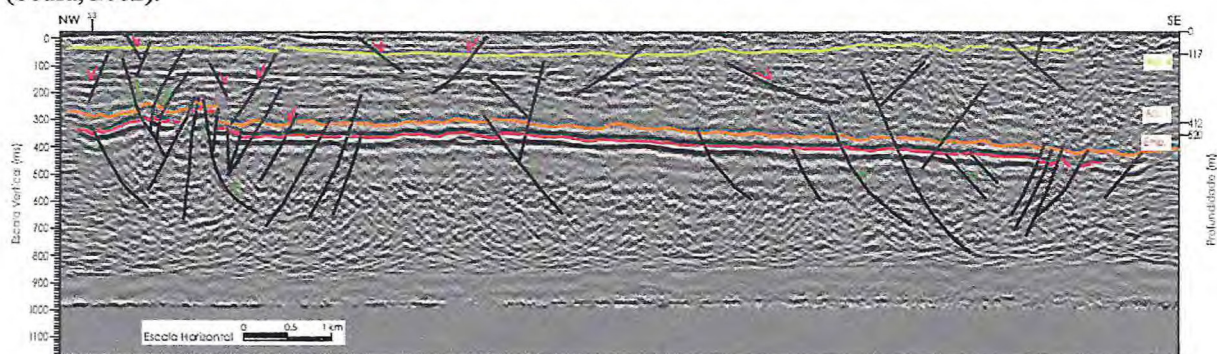
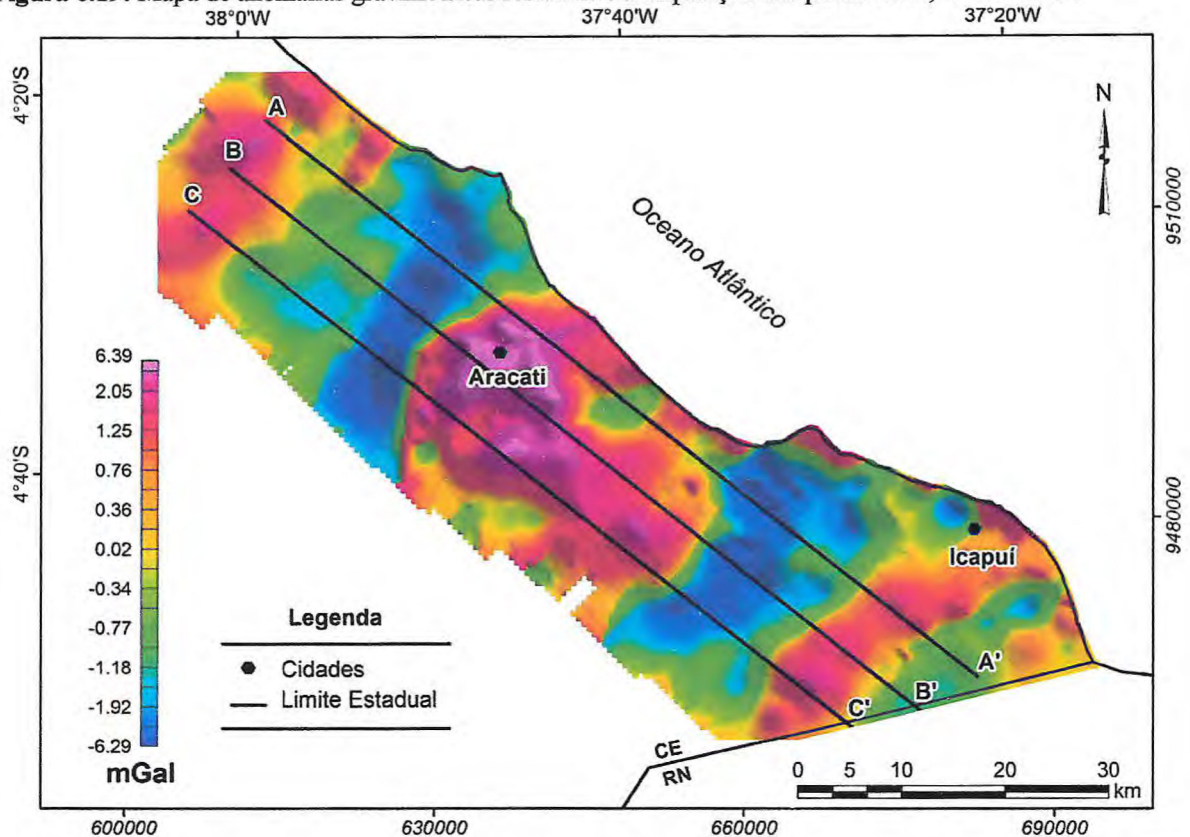


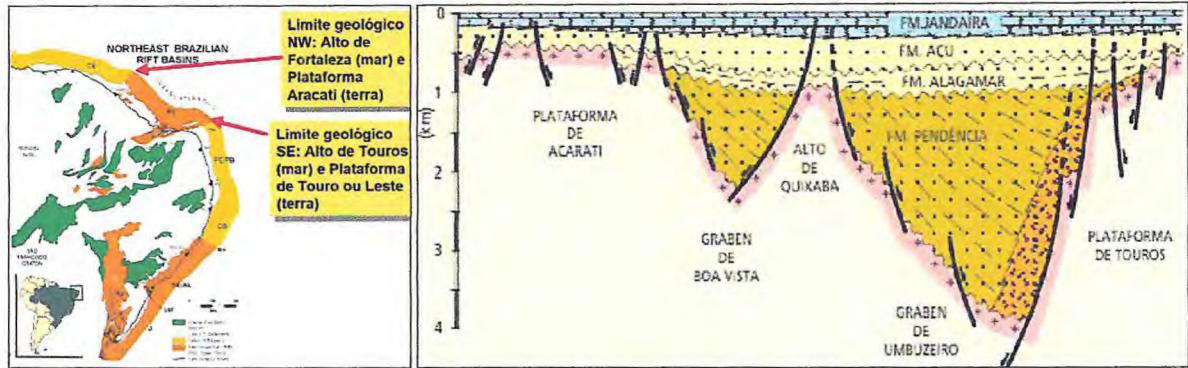
Figura 6.19: Mapa de anomalias gravimétricas residuais e a disposição dos perfis A-A', B-B' e C-C'.



Os ajustes entre as curvas observada e calculada para os modelos são muito bons, com erro inferior a 0,147. Um número elevado de blocos foi inserido nos modelos com a finalidade de representar as heterogeneidades crustais no embasamento. No geral, foram adotadas densidades médias de 2,55 g/cm³ para as rochas do pacote sedimentar envolvendo as formações Barreiras, Açú e Jandaíra. Uma densidade de 2,67 g/cm³ foi adotada para as rochas supracrustais da Faixa Orós – Jaguaribe; uma densidade de 2,68 g/cm³ foi adotada para os gnaisses e anfibólitos do Complexo Jaguaretama (Cavalcante *et al.*, 2003). Já para as rochas vulcânicas (neste caso possivelmente diques básicos não aflorantes) foi adotada uma densidade média de 2,685 g/cm³.

O alto gravimétrico denominado de Alto Gravimétrico de Aracati e aqui exposto como DGA (Figura 6.17) já havia sido mencionado por Marinho *et al.* (1990) em um projeto de pesquisa para a SECIRM. Este anomalia está inserida no contexto da Plataforma de Aracati a oeste da Bacia Potiguar, onde, para o lado leste daquela bacia, está a Plataforma de Touros (Bertani *et al.*, 1990) (Figura 6.20). Com base nessas informações e em outras advindas de poços para água e petróleo foram modeladas as seções A-A', B-B' e C-C' cujos resultados se encontram apresentados nas figuras 6.21, 6.22 e 6.23, respectivamente.

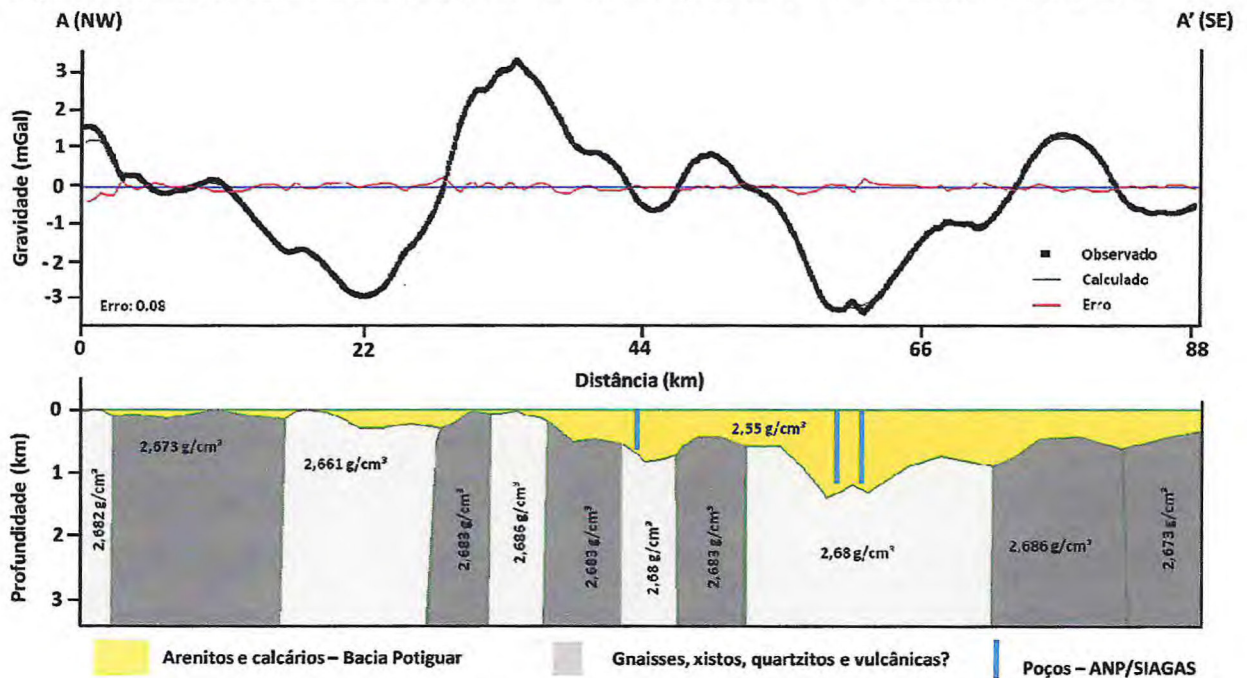
Figura 6.20: Mapa da Província Borborema ilustrando os limites da Bacia Potiguar (esquerda) e perfil E-W da bacia mostrando suas plataformas e seus altos do embasamento (Bertani *et al.*, 1990).



Seção A – A’

Na seção A – A’ (Figura 6.21), no tocante as estimativas de profundidades no modelo, houve contribuição de perfis geológicos cadastrados no banco de dados do SIAGAS e da ANP. Desta forma, foi possível estimar que ao longo desta seção a espessura dos litotipos na borda oeste da Bacia Potiguar pode chegar a atingir 1.200 m. No geral, a anomalia gravimétrica presente nesta seção varia entre 3 e -3 mGal, onde os dois baixos gravimétricos mais acentuados atingem -2,5 mGal e -3 mGal. Os dois mínimos gravimétricos, posicionados em 22 e 60 km, respectivamente, estão separados por este alto gravimétrico (3 mGal) que encontra-se a 33 km do início do perfil.

Figura 6.21: Modelo Geofísico 2-D da seção A – A’. Notar o ajuste entre as curvas observada e calculada.



Seção B – B'

Assim como na seção A – A', nesta seção também foi utilizada informações de poços SIAGAS e ANP. A espessura dos litotipos da borda oeste da Bacia Potiguar pode chegar a 1.200 m. No geral, a anomalia gravimétrica presente nesta seção varia entre 6,3 e -4,5 mGal (Figura 6.22), onde os dois baixos gravimétricos mais acentuados atingem -4,5 e -3,8 mGal. Os dois mínimos gravimétricos, posicionados em 22 e 62 km, também encontram-se separados pelo Alto Gravimétrico de Aracati, que nesta seção chega a atingir valores máximos de 6,3 mGal. O baixo gravimétrico situado a 22 km (-4,5 mGal), nesta seção, encontra-se mais pronunciado que o baixo gravimétrico da borda oeste da Bacia Potiguar (-4,5 mGal).

Seção C – C'

Na seção C-C' apresentada na Figura 6.22, bem como nas seções anteriores, as informações de poços do SIAGAS e ANP tiveram boa contribuição para as estimativas de profundidades adotadas no modelo. Na borda oeste da Bacia Potiguar (SE do perfil), a espessura das rochas sedimentares pode chegar a 1.500 m. No geral, a anomalia gravimétrica presente nesta seção varia entre 4,3 e -4,3 mGal (Figura 6.23), com um baixo gravimétrico situado a 22 km do início do perfil (-4,3 mGal) continuando mais acentuado que o baixo gravimétrico da bacia (-3,1 mGal) como na seção B-B'. O Alto Gravimétrico de Aracati continua separando os dois baixos gravimétricos, porém é menos pronunciado nesta seção que nas seções anteriormente mostradas.

Figura 6.22: Modelo Geofísico 2-D da seção B– B'. Notar o ajuste entre as curvas observada e calculada.

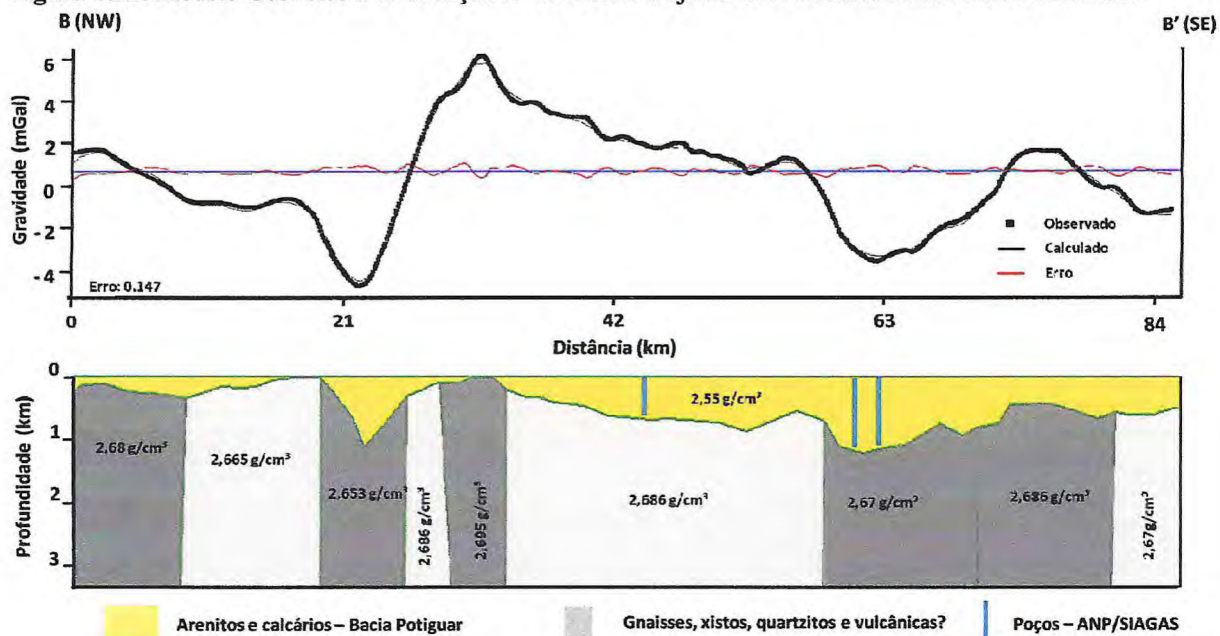
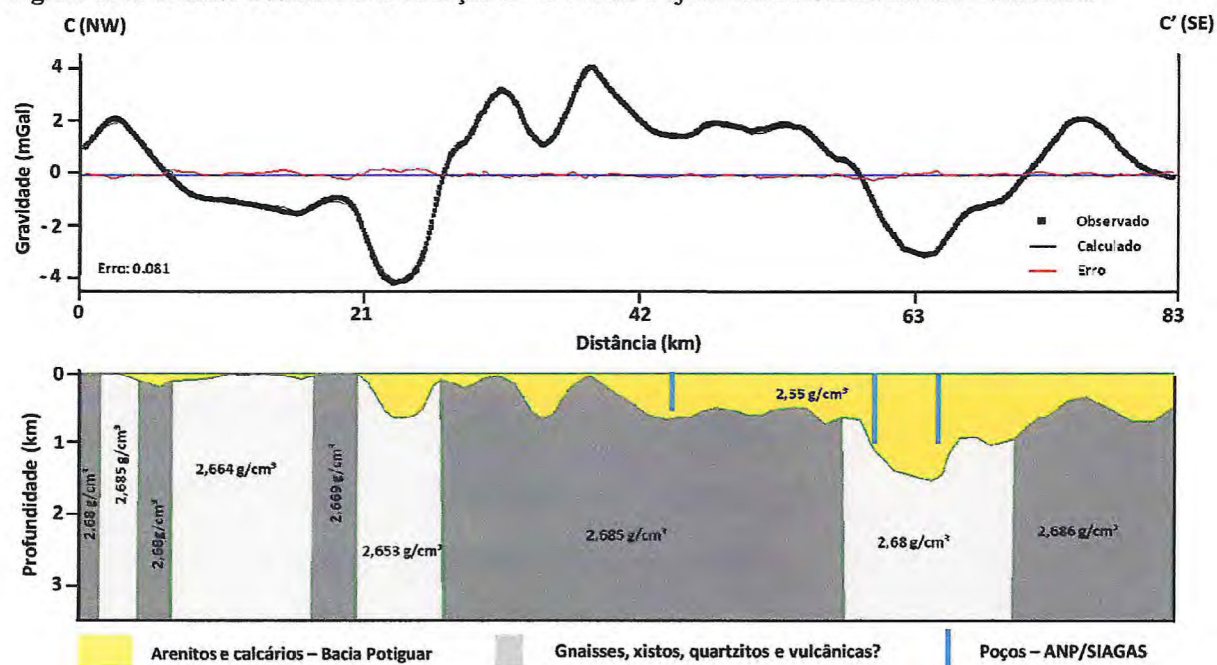


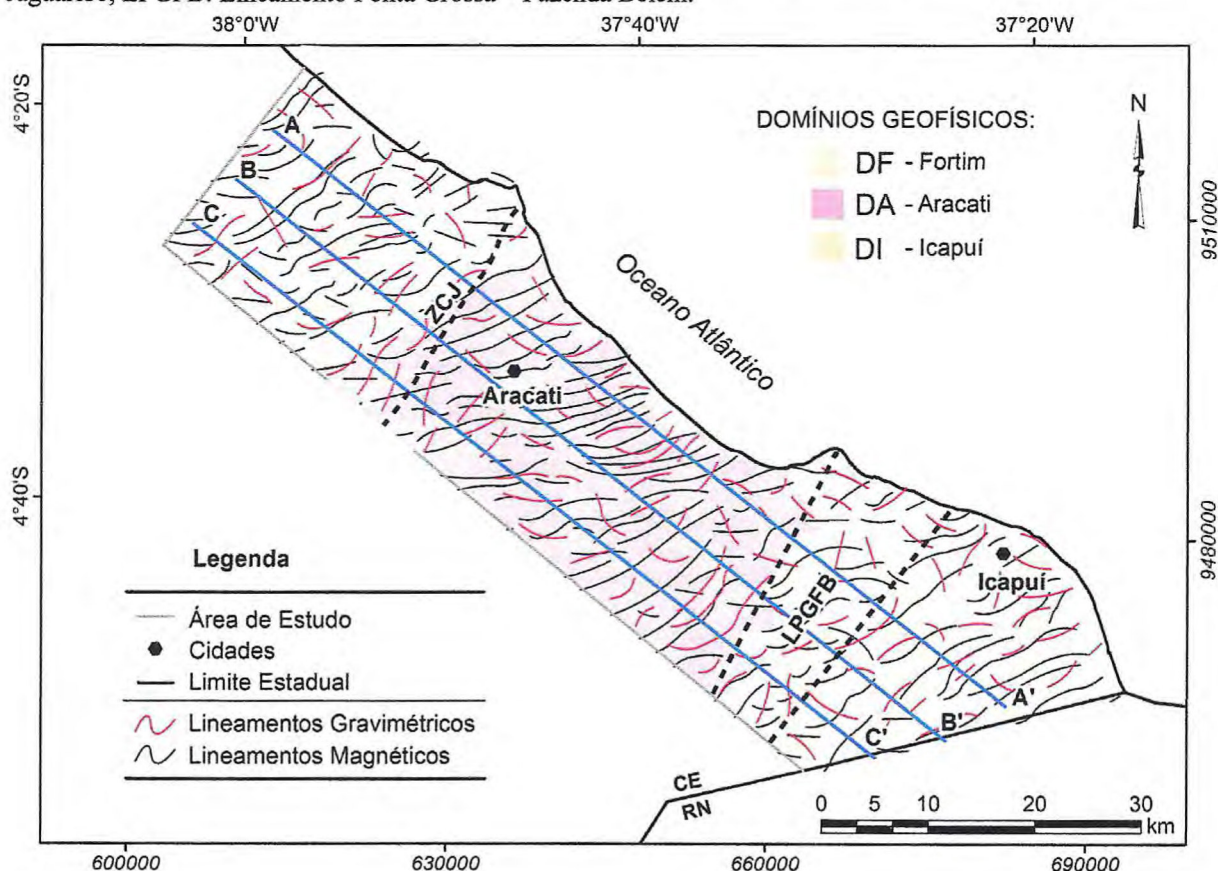
Figura 6.23: Modelo Geofísico 2-D da seção C– C'. Notar o ajuste das curvas observada e calculada.



7. INTEGRAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS E GEOLÓGICOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados da integração dos produtos magnetométricos, gravimétricos e dados geológicos. A Figura 7.1 apresenta a integração das assinaturas magnéticas e gravimétricas com dados geológicos e estruturais de superfície (Sousa, 2002 e Cavalcante *et al.*, 2003), bem como os perfis utilizados na interpretação conjunta para estimativa de fontes magnéticas e gravimétricas e nas modelagens gravimétricas. Observa-se notável coincidência entre os lineamentos geofísicos e os principais *trends* estruturais, bem como extensas zonas de cisalhamento brasileiras e seus prolongamentos na borda oeste da Bacia Potiguar.

Figura 7.1: Mapa de domínios geofísicos com os principais alinhamentos estruturais, zonas de cisalhamentos brasileiras e os perfis geofísicos utilizados nas modelagens e estimativa de fontes. ZCJ: Zona de Cisalhamento Jaguaribe; LPGFB: Lineamento Ponta Grossa – Fazenda Belém.



7.1. Deconvolução de Euler 2-D

Nos três perfis gerados para a modelagem gravimétrica (Figura 7.1) foi realizada deconvolução de Euler 2-D, utilizando o *software* Euler V. 1.5 (Cooper, 2002) para estimar a profundidade das principais fontes gravimétricas e magnéticas. Foram utilizados índices estruturais de: 0.0, 0.25, 0.50, 0.75 e 1.0, o que permitiu ressaltar feições mais lineares, como falhas e contatos geológicos (Castro, 2011).

A Figura 7.2 mostra os perfis geofísicos com as principais soluções de Euler. Comparação entre as curvas magnéticas e gravimétricas mostra a excelente consistência dos dados, lembrando que a curva magnética em baixa latitude apresenta comportamento invertido com relação as suas fontes, isto é, uma anomalia negativa em baixa latitude pode estar associada a materiais com maior susceptibilidade magnética (Telford *et al.*, 1990). As regiões próximas às bordas dos perfis possuem soluções mais profundas (3 km) enquanto que a parte central possui soluções mais rasas (1,5 km), o que pode justificar a presença de fontes relacionadas a diques de rochas vulcânicas ou descontinuidades estruturais no embasamento.

Vale ressaltar que o prolongamento da Zona de Cisalhamento Jaguaribe (ZCJ) (Figura 3.2) e os lineamentos Ponta Grossa (LPG) e Fazenda Belém (LFB) que foram caracterizados em superfície, são bem pronunciados pelas nuvens de soluções e atingem profundidade de até 3 km. A ZCJ coincide, em parte, com o limite entre os domínios geofísicos DF e o DA, enquanto que o LPG marca o limite entre os domínios geofísicos DA e DI (Figuras 7.1 e 7.2). Notar que a aproximadamente 55 km do início dos perfis outro lineamento é interpretado. Esse exibe características semelhantes à ZCJ, LPG e LFB com nuvens de soluções que variam de 1,5 a 2 km de profundidade e mergulho subvertical, tal feição será denominada Lineamento Fazenda Retiro Grande (LFRG).

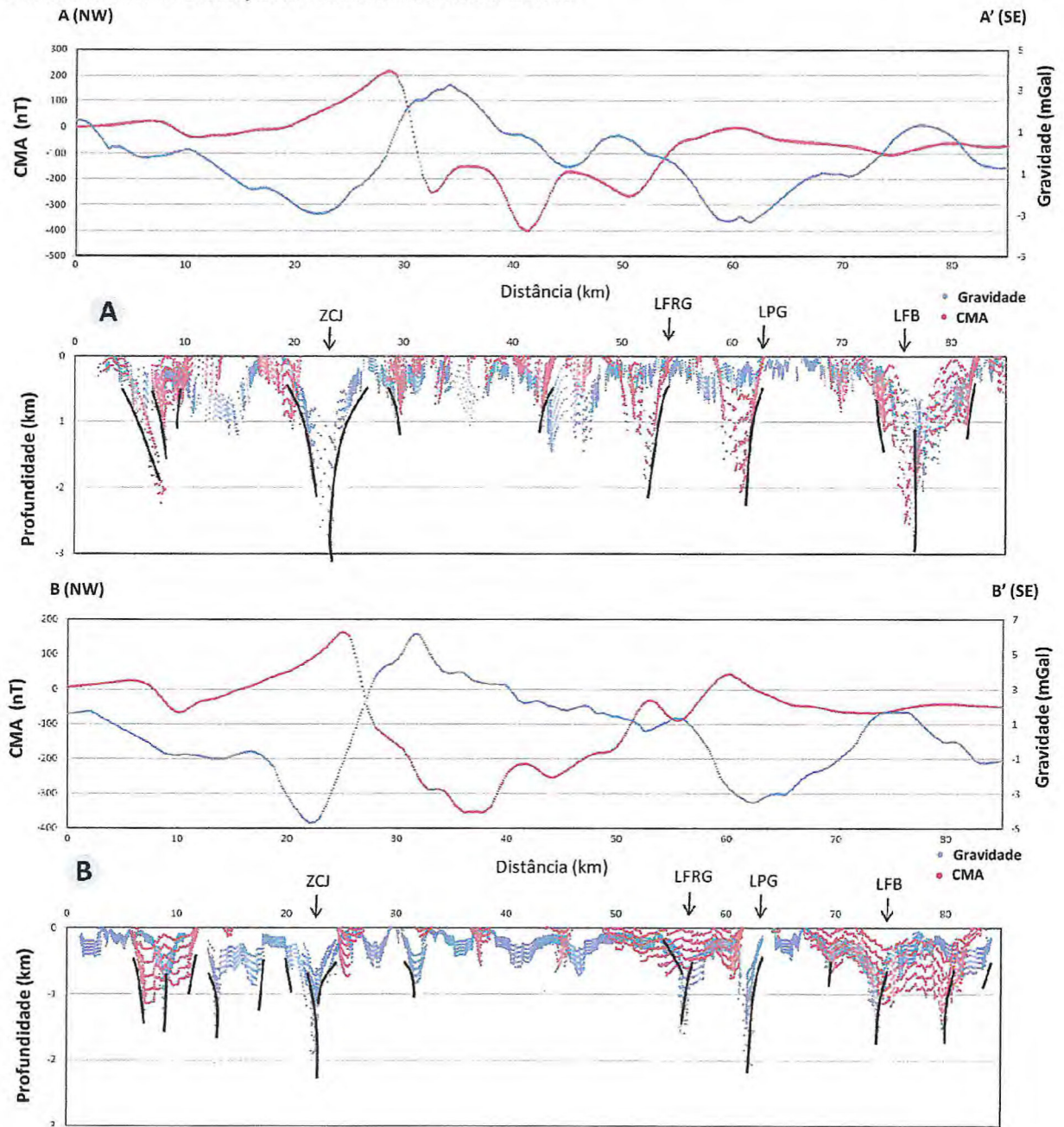
7.2. Modelos Geológicos

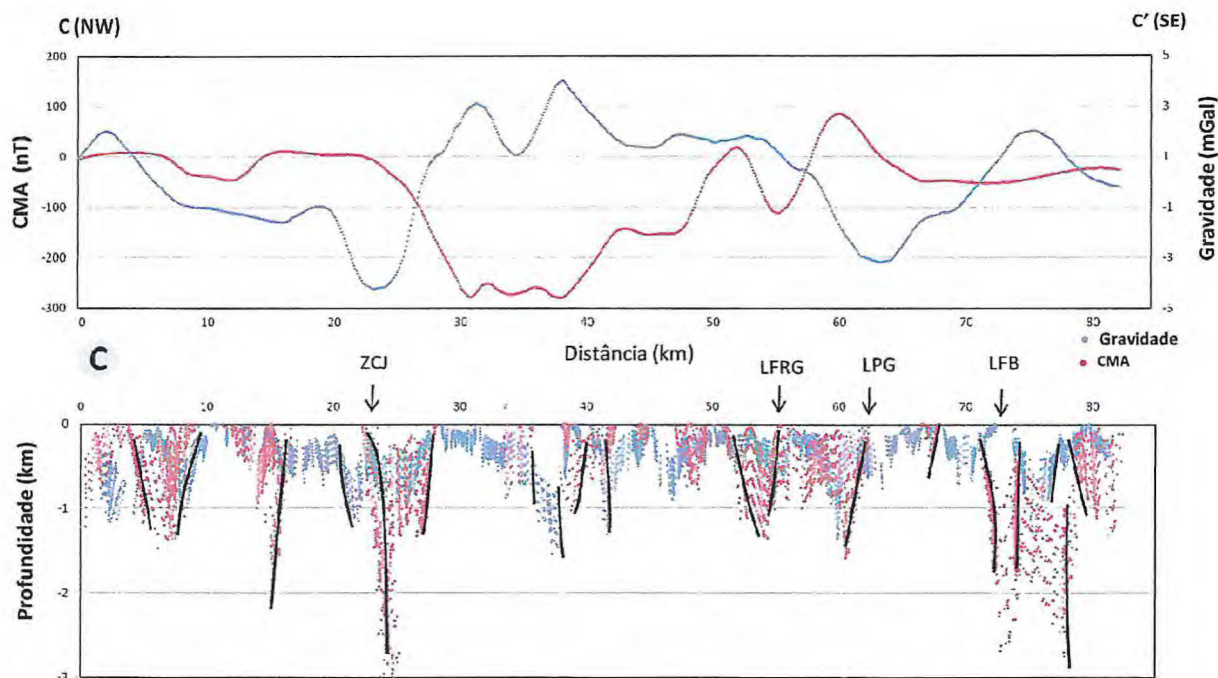
A partir dos modelos gravimétricos abordados no capítulo 6, das interpretações dos dados magnetométricos e nas estimativas de fontes a partir das deconvoluções de Euler 3-D e 2-D foram gerados os modelos geológicos para cada perfil (Figura 7.3). Estes modelos mostram a geometria da borda oeste da Bacia Potiguar, cujo embasamento cristalino se mostra bastante heterogêneo. Estruturas grabeniformes são identificadas nas porções SE dos perfis, sendo limitadas pelos lineamentos Ponta Grossa e Fazenda Belém. Os modelos

Capítulo 7

também evidenciam que tal gráben é mais largo e mais profundo à medida que se direciona para o sul da área (Figuras 7.1, 7.2 e 7.3).

Figura 7.2: Perfis gravimétricos e magnéticos na parte superior e as nuvens de soluções geradas pela deconvolução de Euler 2-D na parte inferior. A: seção A-A'; B: seção B-B' e C: seção C-C'. As linhas pretas representam as principais falhas ou lineamentos interpretados. ZCJ: Zona de Cisalhamento Jaguaribe; LPG: Lineamento Ponta Grossa; LFB: Lineamento Fazenda Belém.





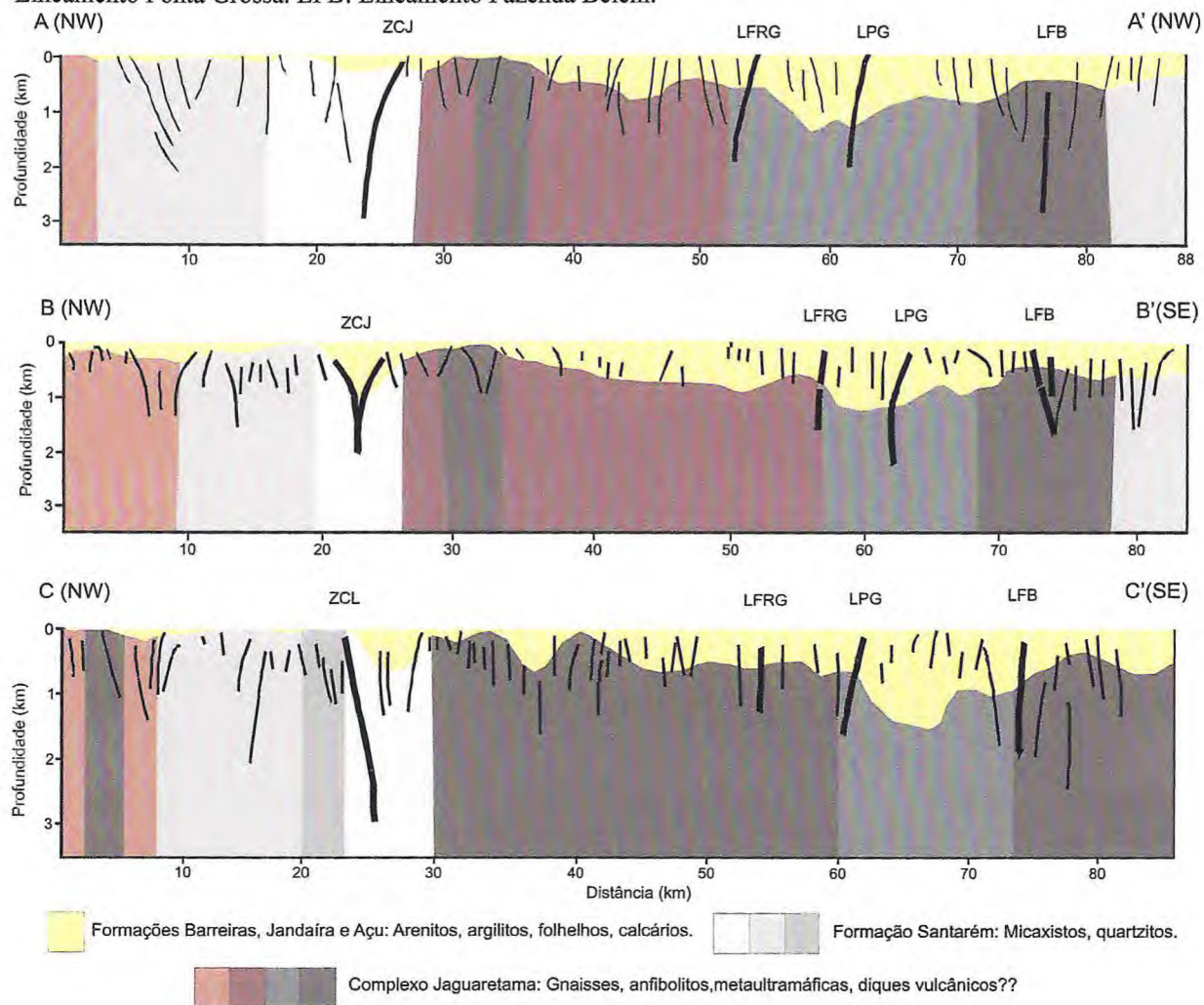
A ZCJ se torna mais pronunciada no embasamento à medida que se direciona para o interior do continente, denotando um caráter mais profundo, podendo estar associado à deformação mais pronunciada das rochas supracrustais da Formação Santarém (Figuras 4.6 e 7.3). Também é possível notar maior heterogeneidade das rochas do embasamento à medida que se caminha para o interior do continente. A presença de rochas mais densas no embasamento é fortemente acusada pelas anomalias positivas nos perfis como mostrado no capítulo 6. Essas fontes foram modeladas e interpretadas como pertencentes às rochas do Complexo Jaguaretama baseado no mapa geológico da região (Cavalcante *et al.*, 2003).

É provável que na região (Figura 7.1) ocorram diques de rochas vulcânicas, associadas ao magmatismo recente Rio Ceará-Mirim de direção aproximada E-W que se desenvolveu durante a abertura do Oceano Atlântico no cretáceo inferior. Esses dados corroboram, principalmente, com os resultados obtidos com a aplicação da deconvolução de Euler 3-D para os dados magnéticos (Figura 5.15) e no aumento nos valores de densidade determinados nas modelagens gravimétricas 2-D (Figuras 6.20, 6.21 e 6.22).

Os contatos entre as sequências de rochas do embasamento dar-se-ão por meio de descontinuidades ou lineamentos interpretados nas estimativas de fontes magnéticas e gravimétricas, bem como nos modelos gravimétricos realizados. Os alinhamentos mais rasos, localizados na porção SE dos perfis, são interpretados como falhas ou descontinuidades intrabaciais, que por sua vez, podem representar reativações das principais zonas de cisalhamento que se prolongam na área de estudo.

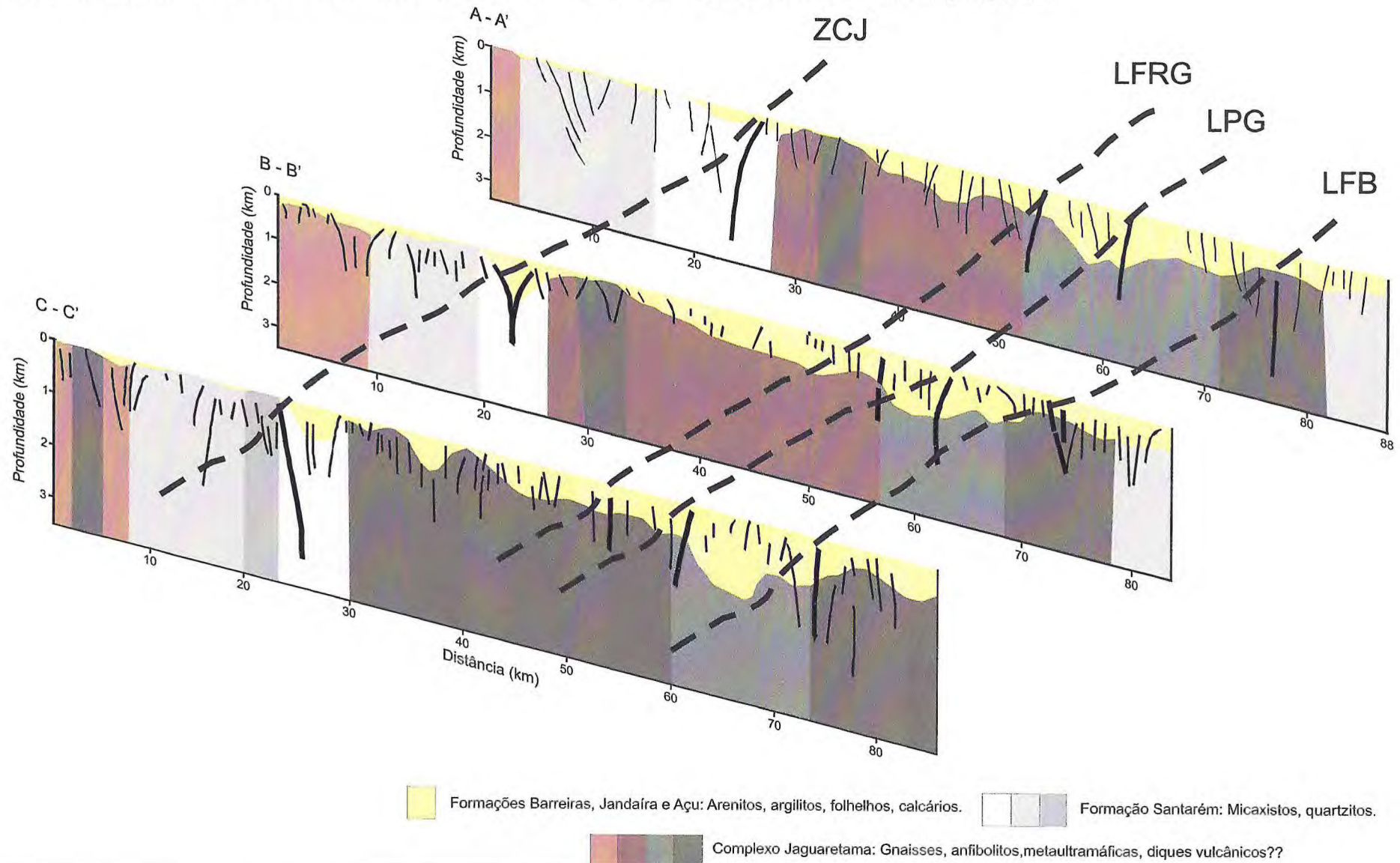
Capítulo 7

Figura 7.3: Modelos geológicos dos perfis A-A', B-B' e C-C'. ZCJ: Zona de Cisalhamento Jaguaribe. LPG: Lineamento Ponta Grossa. LFB: Lineamento Fazenda Belém.



A Figura 7.4 apresenta visualização em perspectiva das três seções modeladas e interpretadas, bem como o prolongamento das principais zonas de cisalhamento brasileiras que cortam a área de pesquisa.

Figura 7.4: Representação em 2,5-D da geometria interna da borda oeste da Bacia Potiguar obtida através da modelagem geofísica.



8. SÍNTESE DAS PRINCIPAIS CONCLUSÕES

A realização do levantamento gravimétrico com o acompanhamento de todo o processo de aquisição, processamento e interpretação dos dados permitiu estabelecer uma relação de contribuição e confiabilidade quanto aos dados gravimétricos levantados. Um longo e criterioso processo de avaliação da qualidade dos dados foi levado a efeito. Isto também foi realizado com relação ao processamento, modelagens e interpretação.

A interpretação qualitativa dos dados magnéticos e gravimétricos permitiu uma compartimentação geofísica em três domínios que mostram alinhamentos com *trend* principal NE-SW e de 2ª ordem E-W e NW-SE, os quais estão associados às continuidades das principais zonas de cisalhamento brasileiras. Tais alinhamentos podem também estar associados a reativações cenozoicas, como as ocorridas no sistema de falhas Afonso Bezerra que se encontra na região do Rifte Potiguar (Moura Lima *et al.*, 2011).

A disposição espacial dos domínios geofísicos está relacionada com os lineamentos brasileiros que ocorrem na região. A Zona de Cisalhamento Jaguaribe coincide, em parte, com o limite entre os domínios geofísicos Fortim e Aracati, enquanto que o Lineamento Ponta Grossa marca o limite entre os domínios geofísicos Aracati e Icapuí.

- O DF apresenta baixos magnéticos, por vezes com ausência do sinal analítico, já o revelo gravimétrico se apresenta bastante acidentado. Estreita faixa anômala de alta magnetização está associada à ZCJ-

- O DA apresenta anomalias de alta amplitude do sinal analítico e relevo gravimétrico bastante acentuado com corpos alongados de direção preferencial NE-SW e de 2ª ordem E-W. Essas anomalias estão associadas a feições de maior densidade no embasamento, como anfíbolitos do Complexo Jaguaretama e/ou rochas vulcânicas não aflorantes.

- DI é caracterizado por representativas porções com ausência do sinal analítico magnético e um relevo anômalo de alta magnetização, essa configuração é semelhante à assinatura gravimétrica da região. Estando a anomalia de alta susceptibilidade magnética e densidade associada à provável alto do embasamento.

A ZCJ que não é bem marcada em superfície, aparece bem pronunciada em subsuperfície nos diversos mapas e modelos geofísicos. O LPG e LFB apresentam características similares a ZCJ e parecem limitar estruturas grabeniformes da borda oeste da Bacia Potiguar. Outro lineamento, de expressão e profundidades semelhantes aos demais,

aparece bem marcado pelas soluções de Euler 2-D a NW do LPG e foi nomeado de lineamento Fazenda Retiro Grande.

A ZCJ e a variação do embasamento heterogêneo também muda à medida que se caminha para o interior do continente, denotando um caráter mais profundo para a ZCJ provavelmente associado à deformação mais pronunciada das rochas supracrustais da Formação Santarém. Enquanto que a maior heterogeneidade do embasamento a sul da área é interpretada como variação nas densidades das rochas do Complexo Jaguaretama.

Fortes evidências de diques de rochas vulcânicas associadas ao magmatismo Rio Ceará-Mirim são mostradas pela Deconvolução de Euler 3D nos dados magnéticos e gravimétricos e no aumento dos valores de densidade determinados nas modelagens gravimétricas 2-D, com disposição preferencial E-W.

As modelagens gravimétricas nos três perfis mostram a geometria da borda oeste da Bacia Potiguar, a qual possui feições grabeniformes que podem estar associadas à acumulação de hidrocarbonetos já explorados na região da Fazenda Belém. O embasamento cristalino de toda a região de estudo se mostra bastante heterogêneo. A vista em perspectiva da disposição dos modelos geológicos evidencia que tal gráben é mais largo e mais profundo à medida que se caminha para o sul da área de estudo.

Os alinhamentos mais rasos, localizados na porção SE dos perfis, são interpretados como falhas ou descontinuidades intrabaciais, que por sua vez, podem representar reativações das principais zonas de cisalhamento que se prolongam na área de estudo. Essas regiões são importantíssimas do ponto de vista da exploração de petróleo e gás na borda oeste da Bacia Potiguar, uma vez que essas feições podem se comportar como trapas ou armadilhas geológicas e estruturais.

Evidentemente, muitas outras conclusões deverão se agregar a estas resumidamente aqui apresentadas e em trabalhos futuros que decorrerão desta monografia.

Por fim, vale ressaltar o enorme e imprescindível aprendizado profissional no campo da geofísica aplicada envolvendo diversas técnicas geofísicas de aquisição, processamento e interpretação. Associa-se, ainda, o fato da importância prática, acadêmica e profissional desta disciplina obrigatória do Curso de Geologia da Universidade Federal do Ceará na formação do aluno no campo da geofísica.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F.F.M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B.B. & FUCK, R.A., 1977. Províncias estruturais brasileiras. 7º Simpósio de Geologia do Nordeste, Campina Grande, p. 363 - 391.
- AMARAL, C.A., 1990. Folha João Câmara, escala 1:100.000. DNPM/CPRM. 88p.
- ANP, Bacia Potiguar, Brasília-DF, 2005, disponível em: <
http://www.anp.gov.br/brnd/round5/round5/Apres_SemTec/R5_Potiguar.pdf>, acesso em: 17 de outubro de 2013.
- ANP, Produção de petróleo e gás natural por poço, Brasília-DF, 2012, disponível em: <
<http://www.bdep.gov.br/?pg=5776&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1341628491735>>, acesso em: 17 de outubro de 2013.
- ARARIPE, P.T. & FEIJÓ, F.J., 1994. Bacia Potiguar. Boletim de geociências da Petrobrás, 8 (1): p. 127-141.
- ARTHAUD, M. H., 2008. Evolução Neoproterozóica do grupo Ceará (Domínio Ceará Central, NE Brasil): da sedimentação à colisão continental brasileira. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasil. 130 p.
- ASSIS, M. S., 2005. Curso de Sistemas Modernos de Telecomunicações – Sistemas Via Satélite. UFF – Departamento de Engenharia de Telecomunicações. 168p.
- BARBOSA, V. C. F. & SILVA, J. B. C., 2005. Deconvolução de Euler: passado, presente e futuro - um tutorial. Revista Brasileira de Geofísica 23(3): p. 243-250.
- BERTANI, R. T., ARARIPE, P. T., BELTRAMI, C. V., 1985. Evolução tectono-sedimentar das bacias sedimentares do Ceará e Potiguar. UFPE, v. 1, p. 34-35. (Série D: textos didáticos).
- BERTANI, R.T., COSTA, I.G. & MATOS, R.M.D., 1990. Evolução tectonosedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar. In: Gabaglia G.P.R. & Milani, E.J. (eds), Origem e evolução de Bacias Sedimentares. Petrobrás, Rio de Janeiro p. 291-310.
- BEZERRA, F.H.R., AMARO, V.E., VITA-FINZI, C. & SAADI, A. 2001. Pliocene-Quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil. Journal of South American Earth Sciences, 14, p. 61-75.
- BRITO NEVES B.B. 1983. O Mapa Geológico do Nordeste Oriental do Brasil. Escala 1/1.000.000. Instituto de Geociências da Universidade de S. Paulo, São Paulo-SP, Tese de Livre Docência, 171 p.
- BRITO NEVES. B.B., 1975. Regionalização geotectônica do Pré-cambriano nordestino. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 198 p.
- BRITO NEVES, B.B.; VAN SHUMUS, W.R. & FETTER, A. 2001. Noroeste da África – Nordeste do Brasil (Província Borborema: ensaio comparativo e problemas de correlação). Revista do Instituto de Geociências da USP (Série Científica, 1): p. 59 – 78.

BRITO NEVES, B.B., SANTOS E.J., VAN SCHMUS W. R., 2000. Tectonic History of the Borborema Province, NW Brazil. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (eds): Tectonic Evolution of South America, Rio de Janeiro, p. 151 – 182.

BRITO NEVES, B.B.; VAN SHUMUS, W.R.; SANTOS, E.J.; CAMPOS NETO, M.C.; KOZUCH, M. 1995. O Evento Cariris Velhos na Província Borborema: integração de dados, implicações e perspectivas. Revista Bras. de Geociências, 25 (4): p. 281-296.

CASTRO, D. L., MEDEIROS, W. E., SÁ, E. F. J., MOREIRA, J. A. M., 1998. Mapa gravimétrico do Nordeste Setentrional do Brasil e margem continental adjacente: interpretação com base na hipótese de isostasia. Brazilian Journal of Geophysics, 16 (2/3): p. 115-131.

CASTRO, D. L., 2011. Gravity and magnetic joint modeling of the Potiguar Rift Basin (NE Brazil): Basement control during Neocomian extension and deformation. Journal of South American Earth Sciences, 31: p. 186-198.

CAVALCANTE, J.C., 1999. Limites e evolução do Sistema Jaguaribeano, Província Borborema, Nordeste do Brasil. Dissertação de Mestrado, UFRN, 183p. CPRM, 2003. Mapa Geológico do Estado do Ceará em escala de 1:500.000. Formato digital: *shapefile (ESRI)*.

CAVALCANTE, J.C., VASCONCELOS A.M., MEDEIROS M.D.F., & PAIVA, I.G., 2003. Mapa geológico do estado do Ceará, escala 1:500.000.

COOPER, G. R. J., 2002. An improved algorithm for the Euler deconvolution of potential field data. The Leading Edge, 21(12): p. 1197-1198.

CORDELL, L. & GRAUNCH, V. J. S., 1985. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. In: Hinze, W. J. (Ed.). The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomalies Maps. Society of Exploration Geophysicists, p.181-197.

COSTA NETO, L. X., 1985. Geologia da área entre Macauzinho e Boa Vista (sul de MacaúRN). Natal. Relatório de Graduação em Geologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 61 p.

CPRM, 2003. Mapa Geológico do Estado do Ceará em escala de 1:500.000. Formato digital: *shapefile (ESRI)*.

CREMONINI, O. A., 1993. Caracterização estrutural e evolução tectônica da área de Ubarana, porção submersa da Bacia Potiguar, Brasil. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 143 p.

DANTAS, E.L., 1997. Geocronologia U-Pb e Sm-Nd de Terrenos Arqueanos e Paleoproterozoicos do Maíço Caldoso Brandão, NE do Brasil. Tese de Doutorado, UNESP, Rio Claro, 208 p.

DANTAS, E.L., HACKSPACHER, P.C., VAN SCHUMUS, W.R. & BRITO NEVES, B.B., 1998. Archean accretion in the São José do Campestre massif, Borborema Province, northeast Brazil. Revista Brasileira de Geociências, 28 (2): p. 221 – 228.

DANTAS, E. L.; SILVA, A. M.; ALMEIDA, T.; MORAES, R. A. V. 2003. Old geophysical data applied modern geological mapping problems: a study case in Seridó belt, NE Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 33, número 2 Suplemento junho.

DANTAS, E.L., VAN SCHMUS, W.R., HACKSPACHER, P.C., FETTER, A.H., BRITO NEVES, B.B., CORDANI, U., NUTMAN, A.P & WILLIAMS, I.S., 2004. The 3.4-3.5 Ga São José do Campestre massif, NE Brazil: remnants of the oldest crust in South América. *Precambrian Research*, 130, p. 113-137.

DAVIS, J. C., 1986. *Statistics and data analysis in geology*. Jonh Wiley & Sons, 2ª Ed., U.S.A., 646 p.

FETTER A.H., 1999. U-Pb and Sm-Nd geochronological constraints on the crustal framework and geologic history of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the assembly of Gondwana. Tese de doutorado, University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA, 164 p.

FETTER, A.H; DOS SANTOS, T.J.S.; VAN SCHMUS, W.R.; HACKSPACHER, P.C.; BRITO NEVES, B.B.; ARTHAUD, M.; NOGUEIRA NETO, J.A.; WERNICK, E., 2003. Evidence for Neoproterozoic continental arc magmatism in the Santa Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brasil: Implications for the assembly of west Gondwana. *Gondwana Research*, 6 (2): p. 265-273.

FRANÇOLIN, J. B. L., SZATMARI, P., 1987. Mecanismo de rifteamento da porção oriental da margem norte brasileira. *Revista Bras. de Geociências*. 17 (2): p. 196-207.

GEOSOFT INC., 2010A. Montaj GridKnit. Grid Stitching Extension for Oasis montaj v. 7.1. Tutorial and user guide. Toronto, ON Canadá, 28 p.

GEOSOFT INC., 2010B. Oasis montaj versão 7.1 Sistema de Mapeamento e Processamento. A Plataforma para o trabalho com grandes volumes de dados espaciais. TUTORIAIS™. Toronto, ON Canadá, p. 113-124.

GEOSOFT INC., 2010C. Filtragem montaj MAGMAP. Processamento de dados de campos potenciais no domínio da frequência. Extensão para o Oasis Montaj, v. 7.1. Tutorial e guia do usuário. Toronto, ON Canadá, 77 p.

GM-SYS, 2004. *Gravity/Magnetic Modeling Software: User's Guide V. 4.9*. NGA Inc., 101.

HACKSPACKER, P. C.; CORSINO, A. R.; SRIVASTAVA, N. K.; Tiriba, V. F., 1985. A Falha de Afonso Bezerra como Evidência de um Significativo Tectonismo Frágil NW-SE, na Bacia Potiguar Emersa-RN. *Boletim*, nº 10, UFRN-CCET/DG.

JARDIM DE SÁ, E. F., 1994. A evolução proterozóica da Província Borborema. In: SBG/Núcleo Nordeste, Simpósio de Geologia do Nordeste, 11, Natal, atas, p. 291-316.

JARDIM DE SÁ, E. F., MEDEIROS, V.C., AMARO, V.E., 1995. Os cisalhamentos brasileiros na zona Transversal, NE do Brasil: Uma megaestrutura em dominó. In: SBG/Núcleo Nordeste, Simpósio de Geologia do Nordeste, 16, Recife, Boletim nº 14, 1: p. 134-138.

KANE, M.F., 1962. A comprehensive system of terrain corrections using a digital computer, *Geophysics*, vol. 27, n. 4.

LIMA NETO, F.F., 1998. O exemplo da interferência mecânica de uma interface fraca: o campo atual de tensões na Bacia Potiguar. Universidade Federal do Ouro preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 320 p.

MABESSONE, J.M., 2002. História Geológica da Província Borborema (NE do Brasil). *Revista de Geologia (UFC)*, 15: p. 119-129.

MARINHO, J.M.L., CASTELO BRANCO, R.M.G., VASCONCELOS, S.M.S. & MAIA, L.P., 1990. Reconhecimento Geofísico da Região Costeira entre Aracati e Beberibe, Ceará. Projeto Reconhecimento Global dos Sistemas Depositionais Costeiros do Ceará. Relatório Técnico Convênio SECIRM/FCPC/LGPSR/UFC. Inédito.

MATOS, R. M. D., 1987. Expressão sísmica de prováveis falhas de transferência na Bacia Potiguar emersa e *Graben* de Jacaúna/CE. Seminário de Geofísica, 2, Nova Friburgo. *Anais...* Nova Friburgo: Petrobras/Depex.

MATOS. R. M. D., 1992. Deep seismic profiling, basin geometry and tectonic evolution of intracontinental rift basins in Brazil. Tese de Doutorado, Cornell Univ.. U.S.A., 276 p.

MELLO, U. T. Afinamento crustal e suas implicações na formação da Bacia Potiguar. In: SEMINÁRIO DE TECTÔNICA DA PETROBRAS, 1, 1987, (TECTOS), Rio de Janeiro. *Atas...* Rio de Janeiro: PETROBRÁS/DEPEX. 1987, p. 190-220.

MILLER, H. G. & SINGH, V., 1994. Potential field tilt - a new concept for location of potential field sources: *Journal of Applied Geophysics*, 32: p. 213-217.

MONICO, J. F. G., 2000. Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, fundamentos e aplicações. São Paulo: Editora UNESP. 289p.

MOURA LIMA, E. N., SOUSA, M. O. L., BEZERRA, F. H. R., CASTRO, D. L., DAMASCENA, R. V. C., VIEIRA, M. M., LEGRAND, J. M., 2011. Reativação Cenozoica do Sistema de Falhas de Afonso Bezerra, Bacia Potiguar. *Revista de Geociências (UNESP) – São Paulo*, v.30, n.1, p. 77 – 93, 2011.

MUNIS, M. B., 2009. Caracterização Geomagnética do Graben Purus e suas implicações na evolução das bacias do Solimões e do Amazonas. Tese de doutorado – FRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro.

NABIGHIAN, M., 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: fundamental relations, *Geophysics*, 49: 780-786.

NAGY, D., 1966. The gravitational attraction of a right rectangular prism, *Geophysics*, vol. 31, n. 2.

NETTLETON, L.L., 1976. Gravity and magnetic in oil prospecting, McGraw-Hill Book Co.

OLIVEIRA, D.C., MATOS, R.D. e SOARES, U.M., 1993. Contribuição ao Estudo de Estruturas Rasas na Bacia Potiguar: Análise Estrutural do Afloramento de Afonso Bezerra (RN) e adjacências. In: IV Simp. Nac. Est. Tectônicos, Belo Horizonte, 12: p. 306-311.

OLIVEIRA, D.C., 1998. Evolução Magmática da Bacia Potiguar. Anais do 40º Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, 102 p.

OLIVEIRA, R.G., 2008. Arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo cenozoico da Província Borborema e de sua margem continental (Nordeste do Brasil). Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, p 79 -112.

OSAKO, L. S., CASTRO, D. L., FUCK, R., A., CASTRO, N. A., PITOMBEIRA, J. P. A., 2011. Contribuição de uma seção gravimétrica transversal ao estudo da estruturação litosférica na porção setentrional da Província Borborema, NE do Brasil. Revista Brasileira de Geociências. 29(2), p 309 – 329.

PARENTE, C.V. & ARTHAUD, M., 1995. O sistema Orós-Jaguaribe no Ceará, NE do Brasil. Revista Brasileira de Geociências, 25: p. 21-32.

PEDROSA JR, N.C., CASTRO, D.L., MATOS, J.P.L., 2010. Assinaturas magnéticas e gravimétricas do arcabouço estrutural da Bacia Potiguar emersa, NE do Brasil. Revista Brasileira de Geofísica 28 (2), p. 265e278.

PEREIRA, M. J., 1992. Considerações sobre a estratigrafia do Cenomaniano-Santoniano em algumas bacias marginais brasileiras e sua implicação na história tectônica e sedimentar da margem continental. Rio de Janeiro, Boletim. de Geociências Petrobras. N.6, V. 3/4, p. 171-176.

PESSOA NETO, O.C., SOARES, U.M., SILVA, J.G.F., ROESNER, E.H., FLORENCIO, C.P., SOUZA, C.A.V., 2007. Bacia Potiguar. Boletim de Geociências da Petrobras 15 (2), p. 357-369.

REID, A. B., ALLSOP J. M., GRANSER H., MILLETT A. J., SOMERTON I. W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. Geophysics, 55: p. 80-91.

REYNOLDS, J. M., 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Chichester, John Wiley & Sons. 796 p.

ROEST, W. R., VERHOEF, J., PILKINGTON, M., 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytical signal. Geophysics, 57 (1): p. 116-125.

SIAL, A.N., 1975. Petrologia e Química Mineral dos Basaltos Mesozóicos de Porto Franco e Grajaú, Maranhão. VII Simp. Geologia Nordeste, Fortaleza, p. 223-241.

SANTOS E.J., GUSMÃO R., PAIVA I.P. 1997. Terrenos no Domínio Transversal da Província Borborema: controles sobre acreção e retrabalhamento crustais ao sul do Lineamento Patos. In: SBG/Núcleo Nordeste, Simpósio de Geologia do Nordeste, 17, Fortaleza, Boletim 15, Resumos Expandidos, p 141-144.

- SANTOS, E. J & BRITO NEVES, B. B., 1984. Província Borborema. In: ALMEIDA, F. F. M. & HASUI, Y. (Coord.). O Pré-Cambriano do Brasil. São Paulo, Edgard Blücher, 378p. p. 123–186.
- SANTOS, E.J., 1995. O Complexo granítico Lagoa das Pedras: acreção e colisão na região de Floresta (Pernambuco), Província Borborema. Tese Doutorado, USP, São Paulo, 220 p.
- SANTOS, E.J., 1996. Ensaio preliminar sobre terrenos e tectônica acrescionária na Província Borborema. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 39, Salvador, Anais, 6: p. 47-50.
- SANTOS, T.J.S., 1999. Evolução tectônica e geocronológica do extremo noroeste da Província Borborema. Tese de doutorado, IGCE/UNESP, 186 p.
- SANTOS, M. H. L., 2006. Processamento, nivelamento e integração de levantamentos aerogeofísicos magnetométricos no estado de Minas Gerais e sua contribuição à geologia da porção sul do cráton São Francisco. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. 157 p.
- SCINTREX, 2009. Operation Manual. Scintrex Autograv System CG-5 Manual - part # 867700 Revision 5. Ontario, Canadá. 312 p.
- SOUSA, D. do CARMO., 2002. Litoestratigrafia e deformação cenozoica na região de Icapuí, Ceará, e implicações para a estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Potiguar. Tese de Doutorado, UFRN, 222 p.
- SPECTOR, A. & GRANT, F. S., 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35(2): p. 293-302.
- TALWANI, M., WOREL, J. L., LANDISMAN, M., 1959. Rapid gravity computations for two dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *Journal of Geophysical Research*, 64: p. 49-59.
- TALWANI, M. & HEIRTZLER, J. R., 1964. Computation of magnetic anomalies caused by two dimensional bodies of arbitrary shape. In: Parks, G.A. (Ed.), *Computers in the Mineral Industries*, Part 1, vol. 9. Stanford University Publications, Geological Sciences, p. 464-480.
- TELFORD, W.M., GELDART, F.E.M. & SHERIFF, R.E., 1990. *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, USA, 2 (3), p. 62-64.
- THOMPSON, D. T., 1982. EULDPH: A new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47: p. 31-37.
- VAN SCHUMUS, W.R., BRITO NEVES, B.B., HACKSPACHER, P.C., BABINSKI, M., 1995. Neoproterozoic and Late Mesoproterozoic sedimentary and volcanic in the Borborema Province. In: *Simp. de Geol. Nordeste.*, 16, Recife, n.14, 2:391-393.
- VASCONCELOS, A.M., PRADO, F.D., CAVALCANTE, J.C., PAIVA, I.O., SILVA, L.C., MARQUES, M.T.G., SOUZA, E.C., GOMES, F.E.M., FRIZZO, S.J., RODRIGUES, J.C., DELGADO, I.M., 1998. Folha Iguatu (Folha SB. 24-Y-B) - Ceará. Escala 1:250.000.

VERDUZCO, B., FAIRHEAD, J. D., GREEN C. M., MACKENZIE, C., 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23(2): 116-119.

WON, I. J. & BEVIS, M., 1987. Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: algorithms and Fortran subroutines. *Geophysics*, 52: 232-238.