

LEANDSON ROBERTO FERNANDES DE LUCENA

**IMPLICAÇÃO DA COMPARTIMENTAÇÃO ESTRUTURAL NO AQUÍFERO
BARREIRAS NA ÁREA DA BACIA DO RIO PIRANGI-RN**

Tese apresentada ao curso de pós-graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geologia.

Orientador:

**Prof. Dr. Ernani Francisco da Rosa
Filho**

Co-orientadores:

**Prof. Dr. André V. Lima Bittencourt
Prof. Dr. Francisco J. Fonseca Ferreira**

CURITIBA

2005

LEANDSON ROBERTO FERNANDES DE LUCENA

**IMPLICAÇÃO DA COMPARTIMENTAÇÃO ESTRUTURAL NO Aqüífero
BARREIRAS NA ÁREA DA BACIA DO RIO PIRANGI-RN**

Tese apresentada ao curso de pós-graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geologia.

Orientador:

**Prof. Dr. Ernani Francisco da Rosa
Filho**

Co-orientadores:

**Prof. Dr. André V. Lima Bittencourt
Prof. Dr. Francisco J. Fonseca Ferreira**

CURITIBA

2005

Lucena, Leandson Roberto Fernandes de

Implicação da compartimentação estrutural no Aquífero Barreiras na área da Bacia do Rio Pirangi-RN / Leandson Roberto Fernandes de Lucena. - Curitiba, 2005.

151 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Ernani Francisco da Rosa Filho

Co-orientador: Prof. Dr. André Virmond Lima Bittencourt

Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira

Tese (Doutorado) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Inclui Bibliografia.

1. Aquífero Barreiras. 2. Geologia estrutural. 3. Bacia do Rio Pirangi-RN. 4. Aquíferos . Rosa Filho, Ernani Francisco da. II. Bittercourt, André Virmond Lima. III. Ferreira, Francisco José Fonseca. III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.

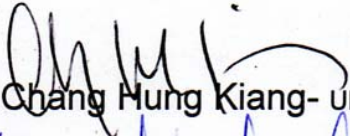
CDD 551.49

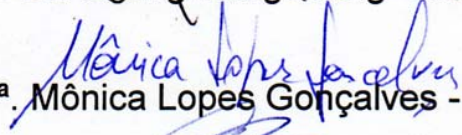
TERMO DE APROVAÇÃO

LEANDSON ROBERTO FERNANDES DE LUCENA


**“IMPLICAÇÃO DA COMPARTIMENTAÇÃO ESTRUTURAL NO
AQÜÍFERO BARREIRAS NA ÁREA DA BACIA DO RIO PIRANGI - RN”**

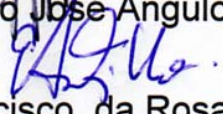
**Tese de Doutorado aprovada como requisito parcial para
obtenção do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação
em Geologia, com área de concentração em Geologia
Ambiental, da Universidade Federal do Paraná, pela
Comissão formada pelos Professores:**


Prof. Dr. Chang Hung Kiang- UNESP


Prof.ª Dr.ª Mônica Lopes Gonçalves - UNIVILLE


Prof. Dr. Augustinho Rigotti – UFPR


Prof. Dr. Rodolfo José Angulo – UFPR


Prof. Dr. Ernani Francisco da Rosa Filho - UFPR
Presidente

Curitiba, 01 de Julho de 2005.

*A toda minha família, especialmente
minha filha Lorena e esposa Romine.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos à Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte-EMPARN pelo afastamento concedido e incentivo ao aperfeiçoamento técnico-científico, através do seu programa de pós-graduação ao qual estive integrado.

Externo minha gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Ernani Francisco da Rosa Filho pela receptividade pessoal e profissional, tendo o mesmo transcendido o papel de mera orientação acadêmica para o de amizade, a exemplo do nosso co-orientador Prof. Dr. André Virmond Lima Bittencourt. Aos Professores Dr. Emanuel Ferraz Jardim de Sá e Dr. Walter Eugênio de Medeiros (PPGG-UFRN), agradeço pelas discussões e sugestões sobre a caracterização tectono-estrutural da área e estudos geofísicos (incluindo a cessão de equipamentos geofísicos da UFRN), respectivamente.

Meu reconhecimento ao amigo Marcelo Queiroz pelas discussões sobre o Aquífero Barreiras e informações de poços da CAERN, bem como às Empresas HIDROPOÇOS, PROPOÇO, GEPÊ ENGENHARIA, PROSENG, além da Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte pelo acesso aos seus acervos de perfis de poços.

Aos amigos Edwaise Carvalho Junior (PETROBRÁS) e José Ronaldo de Araújo (CAERN), agradeço pelas discussões no tocante à caracterização hidroquímica da área e pela ajuda nas medições e amostragens de campo, respectivamente. Agradeço ainda aos bons amigos Valter Becegato (UDESC) e Eduardo Hindi (LPH-UFPR) pela acolhida em Curitiba e sugestões feitas ao longo de todo o nosso doutoramento e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização da presente pesquisa.

Por fim, minha gratidão àquele que representa o principal incentivador de toda minha carreira acadêmica, meu pai Leandro Severiano de Lucena.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1- INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - APRESENTAÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.2 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA E VIAS DE ACESSO.....	2
1.3 - METODOLOGIA GERAL.....	2
2 - ASPECTOS FISIOGRAFICOS E SÓCIO-ECONÔMICOS.....	4
2.1 - CLIMA.....	4
2.2 - BALANÇO HÍDRICO.....	5
2.2.1 - Elementos do Balanço Hídrico.....	6
2.2.2 - Estabelecimento do Balanço Hídrico-Método de Thornthwaite.....	8
2.3 - RELEVO - ASPECTOS GERAIS.....	9
2.4 - HIDROGRAFIA - ASPECTOS GERAIS.....	9
2.5 - VEGETAÇÃO.....	10
2.6 - ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS.....	11
3 - A GEOLOGIA REGIONAL.....	13
3.1 - A SEQÜÊNCIA ESTRATIGRÁFICA NÃO AFLORANTE.....	13
3.2 - A SEQÜÊNCIA ESTRATIGRÁFICA AFLORANTE.....	14
3.2.1 - Sedimentos Cenozóicos Terciários-Quaternários.....	14
3.2.1.1 - Grupo Barreiras.....	14
3.2.1.2 - Formação Potengi.....	17
3.2.2 - Sedimentos Cenozóicos Quaternários Sub-recentes.....	18
3.2.2.1 - <i>Beachrocks</i>	18
3.2.2.2 - Dunas Fixas.....	18
3.2.2.3 - Depósitos Praiais.....	19
3.2.3 - Sedimentos Cenozóicos Quaternários Recentes.....	20

3.3 - CONDICIONAMENTO ESTRUTURAL: UMA PRIMEIRA ABORDAGEM.....	21
4 - CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA.....	24
4.1 - O CONTEXTO HIDROLÓGICO SUBTERRÂNEO.....	24
4.1.1 - O Sistema Aquífero Barreiras.....	24
4.1.2 - A Potenciometria da Área.....	25
4.1.3 - Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero.....	30
4.1.3.1 - Interpretação dos resultados.....	30
4.1.3.2 - Discussão dos parâmetros obtidos.....	34
4.1.4 - Avaliação Preliminar de Reservas e Disponibilidades.....	36
4.1.4.1 - Reservas permanentes.....	36
4.1.4.2 - Reservas reguladoras.....	37
4.1.5 - Aspectos Hidroquímicos.....	37
4.1.5.1 - Objetivos do levantamento e procedimentos de campo.....	37
4.1.5.2 - Classificação hidroquímica.....	40
4.1.5.3 - Adequabilidade para consumo humano e irrigação...	42
4.1.5.4 - O mapa de condutividade elétrica do Aquífero Barreiras.....	45
4.2 - O CONTEXTO HIDROLÓGICO SUPERFICIAL.....	48
4.2.1 - A Bacia do Rio Pirangi.....	48
4.2.2 - O Monitoramento de Descargas Fluviais.....	49
4.2.3 - As Principais Lagoas.....	52
4.2.3.1 - A Lagoa do Jiqui.....	54
4.2.3.2 - A Lagoa do Pium.....	55
4.2.4 - A Relação Entre Mananciais Subterrâneos e Superficiais.....	56
5 - ANÁLISE GRAVIMÉTRICA.....	59
5.1 - A BASE DE DADOS GRAVIMÉTRICOS.....	59
5.2 - A SEPARAÇÃO REGIONAL X RESIDUAL DO MAPA BOUGUER.....	60

5.3 - INTERPRETAÇÃO DO MAPA GRAVIMÉTRICO RESIDUAL.....	62
6 - ANÁLISE TOPOGRÁFICA E HIDROGRÁFICA.....	66
6.1 - TOPOGRAFIA.....	66
6.1.1 - A Base de Dados Topográficos.....	66
6.1.2 - A Separação Regional x Residual do Mapa Topográfico.....	67
6.1.3 - Interpretação do Mapa Topográfico Residual.....	70
6.2 - A REDE HIDROGRÁFICA.....	72
6.2.1 - A Metodologia e Origem dos Dados.....	72
6.2.2 - Apresentação dos Dados.....	72
6.2.3 - Análise dos Resultados e Padrões de Drenagens.....	73
7 - SÍNTESE DA ESTRUTURAÇÃO REGIONAL.....	77
7.1 - ANÁLISE CONJUNTA DOS DADOS GRAVIMÉTRICOS, GEOMORFOLÓGICOS E DE POÇOS.....	77
7.2 - DADOS DE AFLORAMENTOS E GEOCRONOLÓGICOS.....	83
7.3 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	89
8 - O LEVANTAMENTO DE ELETRO-RESISTIVIDADE.....	92
8.1 - OBJETIVOS DO LEVANTAMENTO E PROCEDIMENTOS DE CAMPO.....	92
8.2 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	93
8.2.1 - O Modelo Geo-elétrico.....	93
8.2.2 - Interpretação das Sondagens Elétricas.....	94
8.2.2.1 - As calibrações geo-elétricas.....	95
8.2.2.2 - As demais sondagens elétricas executadas.....	99
8.2.2.3 - Outros resultados geo-elétricos.....	105
9 - IMPLICAÇÕES DO CONDICIONAMENTO ESTRUTURAL NO AQÜÍFERO BARREIRAS.....	107
9.1 - VARIAÇÕES DE ESPESSURAS SATURADAS.....	107
9.1.1 - Aspectos Qualitativos.....	107
9.1.2 - Aspectos Quantitativos.....	113
9.2 - O CONTROLE ESTRUTURAL DO FLUXO SUBTERRÂNEO.....	121

9.2.1 - Considerações Gerais e Aspectos Metodológicos.....	121
9.2.2 - Discussão dos Resultados.....	122
9.3 - INFLUÊNCIAS DA ESTRUTURAÇÃO NO MAPA POTENCIOMÉTRICO.....	125
9.3.1 - Considerações Gerais e Aspectos Metodológicos.....	125
9.3.2 - Discussão dos Resultados.....	127
9.4 – A OTIMIZAÇÃO DO CÁLCULO DE RESERVAS.....	129
9.4.1 - Considerações Gerais e Aspectos Metodológicos.....	129
9.4.2 - Discussão dos Resultados.....	130
9.5 - CONSIDERAÇÕES DO IMPACTO NO CONTEXTO HIDROGEOQUÍMICO.....	133
9.5.1 - Considerações Gerais e Aspectos Metodológicos.....	133
9.5.2 - Discussão dos Resultados.....	134
9.6 - OUTROS ASPECTOS DE CARÁTER REGIONAL.....	138
10 - CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES.....	140
11 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	146
ANEXOS	
ANEXO 1 - MAPA GEOLÓGICO DA BACIA DO RIO PIRANGI	
ANEXO 2 - RELAÇÃO DE POÇOS TUBULARES UTILIZADOS NO TÓPICO	
9.1.2	

RESUMO

A presente tese compreende os resultados de uma pesquisa desenvolvida na região litorânea sul do Estado do Rio Grande do Norte, especificamente no setor oriental da bacia do Rio Pirangi. O objetivo central é avaliar as influências da estruturação regional na hidrogeologia dos terrenos sedimentares cenozóicos, particularmente no Aquífero Barreiras. A metodologia adotada foi fundamentada no emprego conjunto de técnicas de caracterização estrutural, geofísica (gravimetria e eletro-resistividade) e hidrogeologia. A estruturação regional, assinalada nas direções preferenciais NW, NE e E-W, aproximadamente, mostrou-se exercer forte influência nos mais diversos aspectos do contexto do Aquífero Barreiras. Estas influências foram verificadas com base nas análises de dados geológicos, hidrogeológicos e geo-elétricos, sobretudo no que diz respeito à geometria do aquífero, na forma de variações bruscas de espessuras saturadas provocadas por falhamentos. A configuração quantitativa de maiores transmissividades, decorrente de aumentos locais destas espessuras saturadas, foi evidenciada por correlações estatísticas efetuadas entre vazões exploradas e espessuras saturadas ou extensão de seções filtrantes, obtendo-se fatores de correlação de até 0,79. As demais influências da compartimentação estrutural do Aquífero Barreiras envolvem desde um controle do fluxo subterrâneo, até evidências no mapa potenciométrico, sob a forma de mudanças bruscas no espaçamento ou inflexões das equipotenciais. No contexto hidrogeoquímico, estudos iniciais revelam a possibilidade do incremento da migração de alguns elementos em meio saturado como consequência do fluxo subterrâneo estruturalmente controlado. Adicionalmente, foi efetuado um cálculo de reservas permanentes na área da bacia do Rio Pirangi, considerando as variações da geometria do aquífero decorrente da estruturação local. Outros aspectos de caráter regional foram também abordados, dentre os quais a probabilidade de alguns falhamentos na linha de costa, especificamente aqueles de comportamento distensional ou transtensional, estarem associados com a formação de cunhas salinas.

ABSTRACT

The present Thesis encompasses the results of a research carried out in the southern coastal region of Rio Grande do Norte State, specifically on the eastern section of the Pirangi River basin. The main objective is to assess the influences of regional structuring on the hydrogeology of the Cenozoic sedimentary terrains, particularly on the Barreiras Aquifer. The adopted methodology was based on the joint application of structural characterization, geophysics (gravimetry and electrical-resistivity) and hydrogeology. The regional structuring, outlined by the overall preferential directions NW, NE and W-W, revealed as exerting strong influence on a diverse array of aspects of the Barreiras Aquifer context. These influences were attested by several aspects, based on the analysis of geological, hydrogeological and geo-electrical data, notably on the aquifer geometry, as witnessed by sudden variations of saturated thicknesses caused by faulting. Quantitative configuration of major transmissivities, resulting from local increase of these saturated thicknesses, was evidenced through statistical correlations carried out between exploitation flows and saturated thicknesses or extensions of filtering sections, where correlation coefficients up to 0.79 were obtained. The remaining influences of the structural framework of the Barreiras Aquifer include from a control of the underground flow to evidences on the potentiometric map, as expressed by sudden changes in spacing or inflexion of the equipotentials. In the hydrogeochemical context, preliminary studies disclose a possible increment in migration of some elements in the saturated zone as a consequence of the structurally controlled underground flow. In addition, quantification of permanent reserves was carried out in the area of the Pirangi River basin, taking into consideration variations in the aquifer geometry resulting from local structuring. Other aspects of regional implication were also addressed, among them the probability that some coastal line faults, particularly the distensional and transtensional ones, be associated to the formation of saltwater wedges.

1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é apresentada uma breve visão do tema desta tese, em termos de motivação da pesquisa, além dos objetivos e da metodologia geral adotada.

1.1 – APRESENTAÇÃO E OBJETIVOS

Estudos envolvendo relações entre fenômenos hidrológicos e estruturais em terrenos sedimentares cenozóicos ainda se constituem num segmento recente e relativamente pouco estudado destas duas ciências. Lucena e Queiroz (1996), mostraram a delimitação de áreas com elevada transmissividade na zona sul de Natal-RN, com base na associação dos parâmetros litologia, hidrodinâmica e, principalmente, espessura do aquífero. Este último foi avaliado como sendo resultado do condicionamento estrutural regional, o qual se revelou estar exercendo um nítido controle na geometria do aquífero. Tal relação ficou bem caracterizada pelo aumento substancial de vazões em poços de uma mesma bateria que se aproximava e adentrava os domínios de um proeminente bloco estrutural local tipo *graben*. Posteriormente, Lucena *et al.* (1999) incluíram, também como resultado do arcabouço estrutural destes terrenos, o condicionamento de fluxos subterrâneos.

Diante desse contexto, a presente pesquisa possui como objetivo primordial analisar as implicações da compartimentação estrutural do Aquífero Barreiras, no âmbito do setor oriental da bacia do Rio Pirangi-RN. Tais estudos justificam-se pela necessidade de desenvolver e aprimorar uma metodologia básica de trabalho na abordagem do assunto, face ao conhecimento ainda recente sobre o mesmo e escassez de bibliografia específica.

Em termos de objetivos específicos, pode-se enumerar:

- ✓ Caracterizar a bacia em termos fisiográficos, geológicos e, sobretudo, hidrológicos, com ênfase no Aquífero Cenozóico Barreiras;
- ✓ Caracterizar quantitativamente os mananciais superficiais da bacia do Rio Pirangi, incluindo dados de descargas fluviais e a interação com o Aquífero Barreiras;
- ✓ Realizar uma avaliação qualitativa do manancial subterrâneo (Aquífero Barreiras);

- ✓ Analisar o impacto do condicionamento neotectônico-estrutural na ocorrência e quantificação de mananciais do Aquífero Barreiras no setor oriental da bacia do Rio Pirangi.
- ✓ Fornecer subsídios adicionais a um melhor conhecimento do comportamento hidrogeológico local e conseqüentemente auxiliar na gestão otimizada destes recursos hídricos por parte dos órgãos governamentais competentes.

1.2 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA E VIAS DE ACESSO

A bacia do Rio Pirangi, alvo da pesquisa, localiza-se no litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte e possui uma área de aproximadamente 430 km², abrangendo parte dos municípios de Parnamirim, São José de Mipibú, Vera Cruz, Nísia Floresta, Macaíba e zona sul da capital Natal (figura 1.1). Os estudos de natureza hidrogeológica concentraram-se no setor leste da referida bacia hidrográfica. As vias de acesso compreendem um sistema de rodovias federais (BR-101 e BR-304), estaduais (RN-063, RN-066, RN-002, etc.) e municipais (RM-080, RM-304, RM-212, RM-102, RM-246, etc.) pavimentadas ou não, bem como estradas carroçáveis e veredas que cortam a área em questão.

1.3 – METODOLOGIA GERAL

A caracterização fisiográfica, geológica e hidrológica da área foi realizada a partir da revisão e atualização de material bibliográfico, cartográfico e de produtos de sensoriamento remoto disponíveis sobre a área da bacia, incluindo averiguações e levantamentos específicos de campo (potenciometria do Aquífero Barreiras, geofísica aplicada à determinação da espessura do aquífero em locais de pouca informação, testes de aquífero, além de levantamentos batimétricos e medições de descargas fluviais). A caracterização qualitativa e adequabilidade das águas do Aquífero Barreiras foram efetuadas através de análises físico-químicas em amostras coletadas em poços tubulares previamente selecionados, distribuídos na área do levantamento potenciométrico.

A análise do impacto do condicionamento neotectônico-estrutural no contexto hidrogeológico físico, objetivo principal da presente pesquisa, foi realizada basicamente através da superposição de informações relativas ao mapeamento geológico (com ênfase para o quadro tectono-estrutural local) e hidrogeológico do setor oriental da bacia, incluindo mapas potenciométricos e de espessuras saturadas, perfis hidrogeológicos e geofísicos (eletro-resistividade). As metodologias e resultados específicos de cada técnica utilizada acham-se detalhadas nos respectivos capítulos.

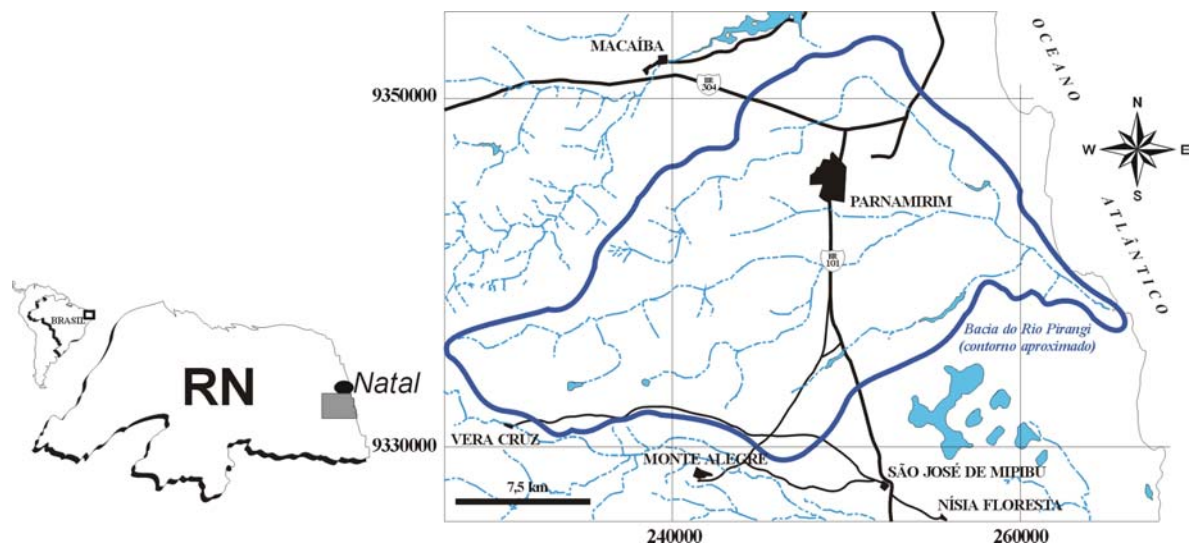


Figura 1.1 – Localização da área de pesquisa.

2 – ASPECTOS FISIAGRÁFICOS E SÓCIO-ECONÔMICOS

Nesta seção, é realizada uma descrição geral da área, abordando informações sobre o clima, aspectos gerais do relevo e hidrografia, vegetação e atividades sócio-econômicas.

2.1 – CLIMA

Segundo a classificação de Köppen (Azevedo e Moreira, 1981), a área estudada está situada no domínio do clima As' - quente e úmido. Este é caracterizado por apresentar apenas duas estações bem definidas: uma seca (meses de setembro a fevereiro) e outra chuvosa (meses de março a agosto). Os ventos apresentam uma predominância no quadrante sudeste, a temperatura média anual é em torno de 26,8°C, com uma insolação anual média de 2.954 horas e umidade relativa do ar normalmente apresentando-se em patamares iguais ou superiores a 75% (segundo dados da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte-EMPARN).

A pluviometria anual (ainda segundo dados da EMPARN) é variável ao longo de toda a bacia, abrangendo valores relativamente elevados no seu setor oriental e já com índices de regiões semi-áridas no setor ocidental. Em geral, tem-se valores de 1562,6 mm/ano, verificando-se um mínimo de 530,1 mm/ano em 1954 e um máximo de 3510,9 mm/ano em 1973 (de acordo com a série histórica de 1910 a 1979 do posto pluviométrico de Natal-RN), para o setor oriental, e de aproximadamente 800,0 mm/ano de média histórica para o setor ocidental, tendo um mínimo de 411,1 mm/ano ocorrido em 1979 e máximo de 1994,8 mm/ano em 1985 (dados de 36 anos do posto pluviométrico de Bom Jesus-RN, situado próximo ao limite oeste da bacia hidrográfica em questão).

No biênio 2000-2001, coincidindo com o início da presente pesquisa, foi observado para o setor oriental da bacia (posto pluviométrico da base física da EMPARN em Parnamirim-RN, situado na margem da Lagoa do Jiqui), um índice pluviométrico mensal variando desde a ausência de chuvas (em novembro de 2000) a 460,5mm (em julho de 2000), conforme visualizado na figura 2.1.

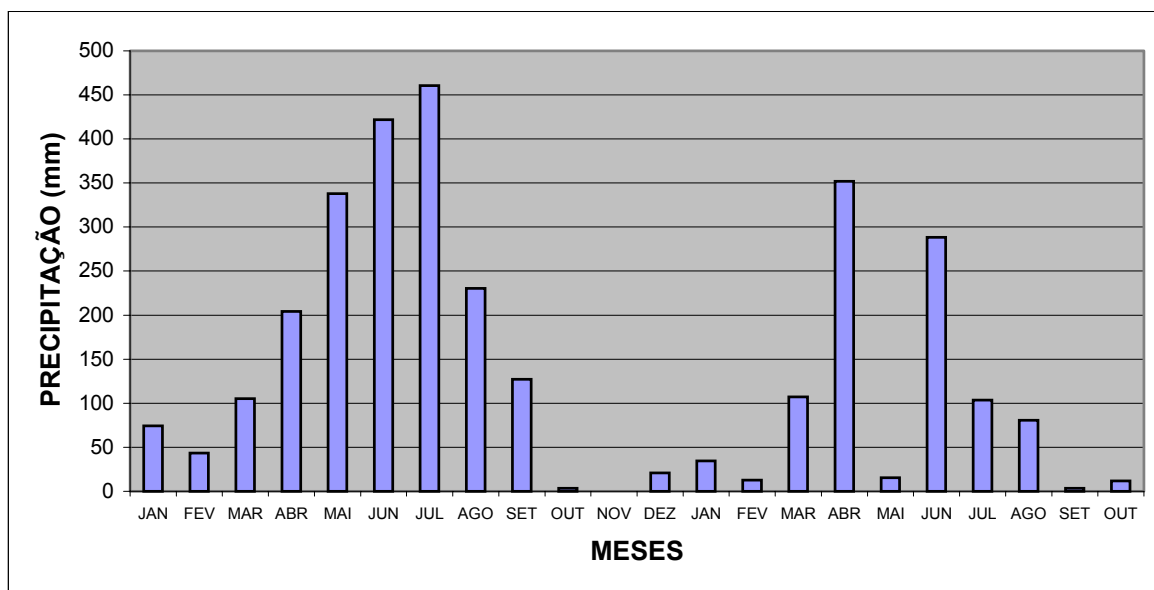


Figura 2.1 – Distribuição pluviométrica nos meses de janeiro de 2000 a outubro de 2001, posto pluviométrico da base física da EMPARN em Parnamirim-RN, situado na margem da Lagoa do Jiqui.

2.2 – BALANÇO HÍDRICO

A metodologia do balanço hídrico consiste no estudo da variação das reservas d'água em uma área considerada, permitindo o reconhecimento da dinâmica das águas, bem como o cálculo dos recursos hídricos exploráveis.

Nesse trabalho, foi dada ênfase ao entendimento da dinâmica das águas na bacia do rio Pirangi (sobretudo no seu setor oriental), no tocante à definição dos períodos de entrada d'água no solo, de excedente hídrico, de perda d'água e de déficit hídrico. Para tanto, foram obtidos dados climatológicos de temperatura e de precipitação pluviométrica médias mensais da cidade de Natal/RN junto a EMPARN, para o período de 1911 a 2000.

Uma primeira análise de tais dados permitiu observar os seguintes aspectos:

1. Os dados de precipitação média mensal obtidos para o período de 1911 a 2000 estavam incompletos, sendo o caso dos anos de 1977, 1978 e 1979, enquanto que simplesmente inexistem para os anos de 1980, 1981, 1982 e 1983, em função de paralisações das atividades da estação;
2. Os dados de temperaturas médias mensais disponíveis eram referentes ao período de 1960 a 1990.

Diante do exposto, foram considerados os valores de precipitações médias mensais referentes ao período de 1911 a 2000, excetuando-se o intervalo entre 1977 a 1983 (no qual se verificou a ausência ou inexistência de dados), totalizando 83 anos de informações. Para a temperatura média mensal, considerou-se o período entre 1960 e 1990, totalizando 31 anos de dados. Embora não seja a metodologia essencialmente correta no estabelecimento de um balanço hídrico regional, face às informações disponíveis, os resultados obtidos permitiram a visualização da dinâmica geral das etapas que compõem tal estudo, desde a entrada d'água no solo até o déficit hídrico.

2.2.1 – Elementos do Balanço Hídrico

A quantidade de água precipitada (P) sobre a superfície do terreno é subdividida da seguinte forma: parte escoada superficialmente (R), parte se infiltra (I) e outra é evapotranspirada (E). Essa generalização pode ser descrita segundo a equação geral do balanço hídrico médio (Castany, 1975):

$$P = R + I + E$$

A infiltração total (I) inclui a água retida no solo (Ir) e a água que penetra no subsolo (Iw), a qual é denominada de infiltração eficaz, correspondendo à parcela da precipitação que alimenta os recursos hídricos subterrâneos.

As perdas normais de água no solo consistem na evaporação e transpiração das plantas que o recobrem. Dessa forma, as quantidades de água retiradas/perdidas nesse solo (evaporação + transpiração) são definidas como evapotranspiração potencial (ETP), a qual trata-se de um fenômeno estritamente físico, sendo função dos dados meteorológicos. A ETP é calculada através de fórmulas baseadas em fatores climáticos, exprimindo a capacidade de água em potencial para ser evaporada. Outro termo que compõe a evapotranspiração é a evapotranspiração real (ETR), a qual constitui-se no principal termo de perda d'água em um balanço hídrico. A ETR é obtida através da comparação da ETP com a precipitação, considerando-se que a quantidade máxima de água que o solo pode armazenar é de 100 mm.

O cálculo da evapotranspiração potencial (ETP) foi efetuado utilizando-se o método de *Turc* (Castany, 1975), aplicável em regiões onde a umidade relativa do ar

(h_r) é superior a 50% e o suprimento de água do solo é suficiente, sendo expressa pela seguinte equação:

$$ETP = 0,40 (I_g + 50) (t/t+15) ,$$

onde:

ETP = Evapotranspiração potencial (mm/mês);

I_g = Radiação global do mês considerado ($\text{Cal}/\text{cm}^2/\text{dia}$), sobre uma superfície horizontal;

t = Temperatura média mensal do período ($^{\circ}\text{C}$).

Para o mês de fevereiro deve-se substituir o valor de 0,40 por 0,37, decorrente do menor número de dias.

A tabela 2.1 apresenta os dados utilizados para o cálculo dos valores de ETP mensal para o período estudado, onde o total anual calculado corresponde a 1.553,05 mm.

MÊS	T ($^{\circ}\text{C}$)	I_g ($\text{Cal}/\text{cm}^2/\text{dia}$)	ETP (mm/mês)
JAN	27,8	450	129,91
FEV	27,9	435	116,71
MAR	27,8	465	133,80
ABR	27,4	385	112,44
MAI	26,9	375	109,14
JUN	26,1	375	107,96
JUL	25,3	435	121,79
AGO	26,1	435	123,20
SET	26,3	500	140,10
OUT	27,1	550	154,49
NOV	27,2	560	157,27
DEZ	27,5	515	146,24
TOTAL ANUAL DA ETP			1.553,05

Tabela 2.1 – Determinação da evapotranspiração potencial pelo método de *Turc* (Castany, 1975).

2.2.2 – Estabelecimento do Balanço Hídrico-Método de Thornthwaite

Com base nos dados de precipitação e evapotranspiração potencial obtidos, foi efetuado o balanço hídrico de *Thornthwaite*, exposto na tabela 2.2. A partir dessa metodologia, obteve-se valores de evapotranspirações reais mensais (1.081,14 mm/ano), déficit (471,91 mm/ano), excedente (501,94 mm/ano) e escoamento superficial (501,14 mm/ano).

A representação gráfica deste balanço hídrico (figura 2.2) mostra que as reservas d'água do solo começam a se constituir a partir de março, atingindo a saturação em abril (admitida altura máxima d'água de 100 mm susceptível de ser armazenada no solo). Nos meses de maio, junho e julho ocorre um excedente d'água, constituindo-se num escoamento superficial. Os meses de agosto, setembro e outubro marcam o período de perda d'água do solo, culminando com um déficit hídrico nos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, onde o regime pluviométrico é insuficiente para assegurar reservas d'água úteis no solo.

Parâmetro / Mês	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANO
Precipitação (mm)	55,63	108,77	205,53	256,75	246,89	263,73	214,17	115,03	53,05	19,41	18,68	25,44	1583,06
ETP	129,91	116,71	133,80	112,44	109,14	107,96	121,79	123,20	140,10	154,49	157,27	146,24	1553,05
P - ETP	- 74,28	- 7,94	71,73	144,31	137,75	155,77	92,38	- 8,17	- 87,05	- 135,08	- 138,59	- 120,80	---
ΔH_2O Solo	---	---	+ 71,73	+ 28,27	---	---	---	- 8,17	- 87,05	- 4,78	---	---	---
Reserva d'água útil (mm)	0,0	0,0	71,73	100,0	100,0	100,0	100,0	91,83	4,78	0,0	0,0	0,0	---
ETR	55,63	108,77	133,80	112,44	109,14	107,96	121,79	123,20	140,10	24,19	18,68	25,44	1081,14
D (déficit)	74,28	7,94	---	---	---	---	---	---	---	130,30	138,59	120,80	471,91
S (excesso)	---	---	---	116,04	137,75	155,77	92,38	---	---	---	---	---	501,94
R (escoamento)	1,72	0,86	0,0	58,02	97,89	126,83	109,61	54,81	27,41	13,71	6,86	3,43	501,15

Tabela 2.2 – Balanço hídrico mensal para a bacia do Rio Pirangi. Método de Thornthwaite. Dados de precipitação média: 1911-2000; Dados de temperatura e ETP: 1960-1990.

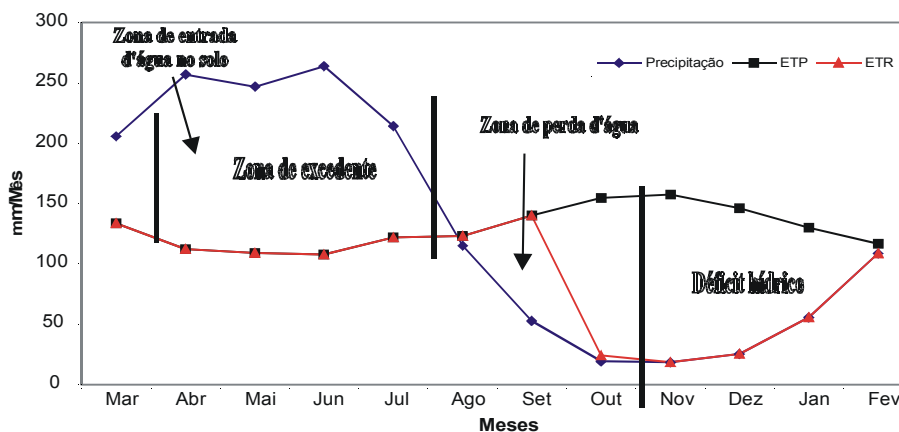


Figura 2.2 – Representação gráfica do balanço hídrico para o setor oriental da bacia do Rio Pirangi.

2.3 – RELEVO - ASPECTOS GERAIS

O relevo exerce importante papel na hidrologia, uma vez que determina os divisores d'água e modela as superfícies hidrostáticas. A região possui dois domínios morfológicos distintos: os platôs do litoral leste (superfície dos tabuleiros), com seus vales encaixados (incluindo as várzeas, terraços fluviais e ambientes lacustres) e a planície litorânea, envolvendo principalmente as praias, os cordões dunares e mangues.

Os platôs do litoral leste compreendem superfícies de aplainamento, correspondendo a domínios dos sedimentos do Grupo Barreiras. Tais platôs ocorrem em faixas acompanhando todo o litoral leste do Estado, limitando-se a oeste com o cristalino e a leste estendendo-se até o mar, por vezes terminando abruptamente e formando falésias. O relevo destas áreas apresenta-se predominantemente plano a suavemente ondulado, com declives entre 0 e 5%, exceto próximo às linhas principais de drenagem onde são consideravelmente mais acentuados. As cotas variam em geral de 80-90 m, nos divisores hídricos superficiais, até 40 m em torno das lagoas e 10-30 m nos talvegues dos vales fluviais encaixados, decrescendo com a proximidade do oceano. As várzeas e os terraços destes vales representam ótimos terrenos para a agricultura quando bem drenados.

As praias são cordões arenosos, planos e estreitos, interrompidos apenas pelas desembocaduras dos rios e pelas falésias. As dunas são deposições eólicas que ocorrem em todo o litoral do estado, apresentando um relevo ondulado, com altitudes de 40-60 m, não raro superando estes valores. Os mangues são constituídos por terrenos estuarinos, sob influência das marés, e resultam do alargamento de alguns leitos fluviais em direção ao oceano.

2.4 – HIDROGRAFIA - ASPECTOS GERAIS

A região estudada situa-se no contexto dos “vales úmidos”, definição esta adotada pelos órgãos governamentais para a faixa costeira oriental do Rio Grande do Norte, entre o vale do Rio Ceará-Mirim (a norte de Natal) e a fronteira com a Paraíba. A designação de vales úmidos deve-se a alta pluviometria (1.200 - 1.500 mm/ano),

ocorrência de formações sedimentares de elevada capacidade de infiltração e armazenamento d'água, rios perenes e grande número de lagoas. Dessa maneira, pode-se dizer que o regime perene dos rios, sobretudo nos seus baixos cursos, decorre basicamente do índice pluviométrico relativamente elevado e contribuições subterrâneas.

A bacia do Rio Pirangi, com aproximadamente 430 Km² de área, situa-se na região litorânea oriental potiguar, limitando-se a SE com o Sistema Lacustre da Lagoa do Bonfim, a norte com áreas de escoamento difuso (ocasionado pela disposição/ocorrência das diversas gerações de dunas na região), a SW com a bacia do Rio Trairi e a NW com a bacia do Rio Potengi. O Rio Pirangi, por sua vez, desemboca na praia homônima e forma uma pequena extensão de manguezais, propiciada por um ligeiro alargamento do seu leito na depressão costeira local.

2.5 – VEGETAÇÃO

A vegetação da região é representada, principalmente, pelos tipos: floresta tropical úmida (mata atlântica), vegetação de várzeas, cerrado e formações litorâneas (Salgado, *et al.*, 1981).

A floresta úmida compreende, atualmente, apenas algumas manchas isoladas dentro dos grandes conjuntos fitogeográficos regionais. Designada de Mata Atlântica, ela ocorre numa faixa paralela ao litoral oriental, apresentando formações descontínuas, porém densas, de médio porte e bem menos exuberante que aquelas existentes nos baixos platôs dos estados vizinhos (PB e PE). Sua preservação, embora recebendo aparente incentivo dos órgãos governamentais, restringe-se a poucas propriedades particulares.

A mata de várzea tem cedido lugar às culturas de subsistência diversificadas. As pequenas ocorrências vegetais ainda existentes aparecem numa faixa paralela e próxima à mata atlântica, sendo os tipos mais conhecidos os ingás, o mandacará e o camaçari.

A vegetação do cerrado possui o aspecto de savanas arborizadas, sendo composta por elementos arbóreos e herbáceos. Esta vegetação é caracterizada por

árvores e arbustos tortuosos, com folhas coriáceas e ásperas, como as espécies *Anacardium occidentale* (cajueiro), *Hancornia speciosa* (mangabeira), *Byrsonima cydonizafolia* (murici do tabuleiro), dentre outras.

A faixa litorânea apresenta uma vegetação menos diversificada, podendo ser classificada de acordo com o local de sua ocorrência em: praias, restingas, dunas e manguezais. A vegetação das praias e dunas é de pequeno porte e arbustiva, destacando-se *Ipomoea pescapera* (salsa de praia), *Remirea marítica* (espécie fixadora de dunas), *Cocas nucifera* (coqueiro) e *Anacardium occidentale* (cajueiro), sendo as duas últimas espécies arbóreas. Os manguezais (*Rhizophora mangle*) aparecem nas desembocaduras dos principais rios, particularmente no Rio Pirangi, em locais da ação das marés, estando perfeitamente adaptados à salinidade do mar e não sobrevivendo em outro meio.

2.6 – ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS

A economia da área em estudo é constituída principalmente por um conjunto de atividades agropecuárias. A agricultura é bastante diversificada, encontrando-se cultivos significativos de coco, cana-de-açúcar, mandioca, banana, mamão, laranja e hortaliças em geral. A existência de um grande número de culturas justifica-se tanto pelas condições técnicas (dentre as quais os perímetros irrigados com água proveniente das lagoas locais), como pela proximidade com o grande centro consumidor que é Natal. Em termos de pecuária, destacam-se a bovino-cultura de corte e a de leite, além da avicultura de corte e de postura. Já a atividade industrial vem obtendo novos incentivos do Governo do Estado, através de melhorias na infra-estrutura do Centro Industrial Avançado-CIA, situado no parque industrial de Parnamirim-RN. Este fato propiciou a instalação de novas indústrias na região, além da conseqüente geração de novos postos de trabalho.

A atividade econômica, porém, que vem tomando grande impulso ultimamente é o turismo. Este passou a representar um importante item sócio-econômico regional, principalmente a partir de investimentos por parte do governo estadual nas décadas de oitenta e noventa, dentre os quais merece destaque o projeto

"Rota do Sol", com a duplicação e pavimentação da RN-063 e melhorias na infraestrutura hoteleira e turística em geral.

3 – A GEOLOGIA REGIONAL

No presente capítulo, é efetuada uma caracterização lito-estratigráfica, além de uma breve revisão bibliográfica sobre o arcabouço tectono-estrutural regional. A caracterização lito-estratigráfica foi realizada a partir da revisão da bibliografia disponível sobre a área, particularmente do setor oriental da bacia do Rio Pirangi (reavaliação de contatos) e mapeamento do setor ocidental desta, envolvendo nova fotointerpretação e averiguações de campo, além de descrições litológicas. Os resultados destes estudos acham-se sintetizados no mapa geológico do anexo 1 da presente tese.

A coluna estratigráfica, apresentada no anexo 1, é constituída por duas seqüências básicas: uma não aflorante (envolvendo o embasamento cristalino Pré-Cambriano e sedimentos da bacia sedimentar mesozóica) e outra aflorante (sedimentos cenozóicos).

3.1 – A SEQÜÊNCIA ESTRATIGRÁFICA NÃO AFLORANTE

Esta seqüência é constituída pelo embasamento cristalino e sedimentos mesozóicos, ambos detectados em perfis de poços da região. O embasamento cristalino é representado por granitos, granodioritos, migmatitos e gnaisses, correlacionados ao Complexo Caicó (Bezerra *et al.*, 1993). Suas exposições mais próximas acham-se a sudoeste e noroeste da área mapeada, nos municípios de Monte Alegre e Macaíba-RN, respectivamente.

Os sedimentos mesozóicos, de provável idade cretácica, compreendem basicamente duas unidades: uma arenítica (basal) e outra calcárea (topo), com intercalações areníticas, repousando em discordância sobre o embasamento cristalino (Costa, 1971). A correlação estratigráfica dessas duas unidades não é totalmente esclarecida, sendo ainda motivo de discussão entre os pesquisadores. Contudo, duas hipóteses são normalmente utilizadas: a primeira defende a idéia de que estes sedimentos podem ser enquadrados no Grupo Apodi da Bacia Potiguar, com suas Formações Açú (arenitos) e Jandaíra (calcários); a outra hipótese correlaciona tais

sedimentos ao Grupo Paraíba da Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba, nas suas Formações Beberibe (arenitos) e Gramame-Maria Farinha (calcários).

No atual estágio de conhecimento, com base na bibliografia disponível (incluindo dados gravimétricos, sondagens elétricas, perfis de poços e correlações lito-estratigráficas), existe uma tendência para a aceitação da segunda hipótese. Neste caso, o limite entre as duas bacias seria na forma de interdigitação entre os calcários da Formação Jandaíra com os arenitos da Formação Beberibe na região de Natal (CONTEGE, 1970), ou de natureza estrutural, sendo controlado possivelmente por falhamentos associados ao *Graben* Natal (Feitosa, 1997).

3.2 – A SEQÜÊNCIA ESTRATIGRÁFICA AFLORANTE

Esta seqüência envolve a coluna sedimentar cenozóica da região, representada pelo Grupo Barreiras e Formação Potengi, ambas de idade terciária-quadernária, além de toda sedimentação quadernária, onde se incluem os *beachrocks*, arenitos praias, depósitos aluvionares, eólicos e de mangues e as coberturas arenosas (figura 3.1). A terminologia recente/sub-recente, utilizada na individualização lito-estratigráfica do Quadernário, é estritamente empírica e diz respeito ao fato das unidades estarem ou não amplamente submetidas a processos de sedimentação atuais.

3.2.1 – Sedimentos Cenozóicos Terciários-Quadernários

3.2.1.1 – Grupo Barreiras

De acordo com dados de poços, o Grupo Barreiras repousa discordantemente sobre as unidades mesozóicas da região e ocupa a base da coluna estratigráfica aflorante, sendo representado de forma predominante na área da bacia do Rio Pirangi (aproximadamente 75% do total) pela sua Formação Guararapes (Mabesoone *et al.*, 1972; Nogueira, 1982; Lucena, 1993). Existe uma controvérsia entre os pesquisadores no que diz respeito à designação de *Grupo* ou *Formação* Barreiras. Optou-se pela primeira designação, a mais antiga, por entender-se que qualquer mudança nesse sentido requer a execução de trabalhos mais amplos e consensuais sobre o assunto.

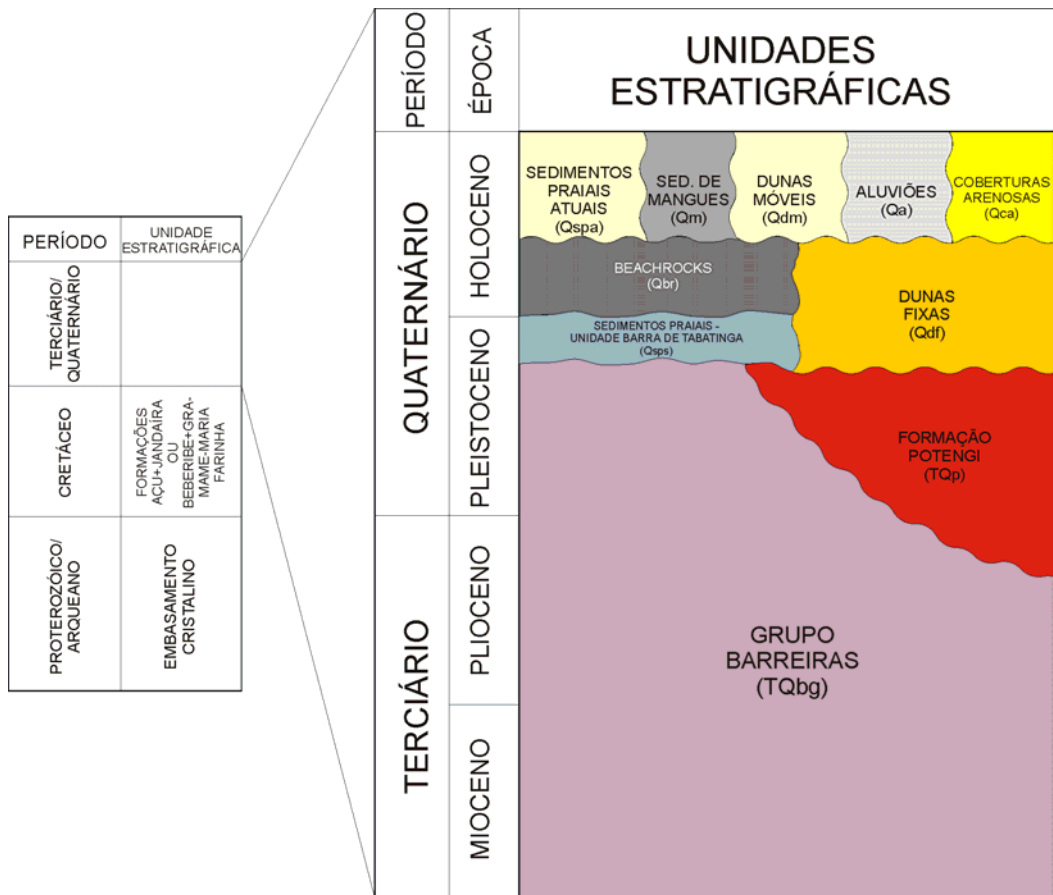


Figura 3.1 – Coluna estratigráfica simplificada da área estudada (adaptado de Nogueira, 1982).

O Grupo Barreiras abrange todo o setor oeste e centro-leste da área, além de pequenas faixas na linha de costa. O relevo associado é predominantemente plano a suavemente ondulado, exceto nas proximidades de algumas drenagens expressivas (Riachos Pium, Taborda-Mendes e Água Vermelha) onde adquire a inclinação acentuada natural destes vales. O término abrupto, na linha de costa, dos afloramentos dessa unidade sedimentar resulta na ocorrência de grandes falésias (Ponta do Flamengo, Barra de Tabatinga e Barreira do Inferno), fato este relacionado com o condicionamento morfotectônico regional, conforme será discutido nos capítulos subsequentes.

Litologicamente, a Formação Guararapes envolve localmente desde rochas argilo-arenosas ou areno-argilosas até conglomeráticas. Contudo, pode-se agrupá-las

em duas fácies sedimentares principais: uma areno-argilosa (basal) e outra conglomerática (topo). Esta seqüência nem sempre é observada, podendo geralmente estar ausente a fácies conglomerática, conforme observado nas grandes falésias da formação.

A fácies areno-argilosa possui uma coloração variada, que pode ser esbranquiçada, amarelada ou avermelhada, podendo também apresentar mudanças na sua granulometria, conforme o menor ou maior teor de argila presente. Em geral, são rochas friáveis, à exceção de alguns afloramentos plano-horizontais em que a menor atuação da erosão linear origina um aspecto mais compactado.

A fácies conglomerática, por sua vez, é constituída por arenitos conglomeráticos a conglomerados de coloração avermelhada. Esta fácies possui, em seu arcabouço, seixos sub-angulosos a sub-arredondados de quartzo e limonita, com tamanhos variáveis desde 1 mm até 5 cm (em sua maioria), distribuídos caoticamente numa matriz areno-ferruginosa. São também características marcantes dessa fácies, na grande maioria das exposições, a presença de bolsões areno-argilosos e uma crosta intempérica oxidada. Alguns afloramentos mostram, ainda, conglomerados com seixos da própria Formação Guararapes, com tamanhos de até 30 cm de diâmetro médio, evidenciando um retrabalhamento no próprio local de deposição (conglomerado intra-formacional).

A Formação Guararapes, quer na fácies conglomerática, quer na fácies areno-argilosa, apresenta-se na forma de sedimentos de coloração escura, bastante litificados, quando em contato direto com o mar ou mesmo submersa (Praias de Pirangi e Búzios). Tais fatores são provocados pela alta precipitação de óxido de ferro.

A interpretação paleo-ambiental da formação é de que esta seja resultante de processos deposicionais fluviais (Mabesoone, 1983; Nogueira, 1982), embora haja ausência de estruturas sedimentares bem preservadas (salvo algumas estratificações cruzadas acanaladas e tabulares de pequeno a médio porte). Mabesoone (1983), entre outros, individualizam ainda três sub-ambientes: leques aluviais (com corridas de lama e de areia com sedimentos mal selecionados e distribuídos caoticamente), canais

anastomosados e planícies de inundação, sendo os dois últimos constituídos por sedimentos de granulometria média a fina.

3.2.1.2 – Formação Potengi

Sob este título enquadram-se a formação homônima descrita por Bigarella (1975) e a Formação Natal de Nogueira (1982). Seus sedimentos acham-se dispostos sobre os da Formação Guararapes, em discordância com estes, correspondendo a pequenas superfícies aflorantes no mapa geológico e horizontes pouco espessos nas falésias, pois se encontram capeados por coberturas arenosas e dunas móveis.

Litologicamente, esta formação é constituída por areias quartzosas de coloração amarelo-avermelhada e moderadamente selecionadas, por vezes confundida com solos do Grupo Barreiras (Nogueira, 1982). Ocasionalmente, observa-se um certo teor argiloso nesses sedimentos, não sendo, contudo, expressivo a ponto de mudar sua caracterização litológica.

A disposição, forma e litologia desses sedimentos sugerem uma interpretação paleoambiental de natureza eólica (Nogueira, 1982; Lucena, 1993), correspondendo a uma geração de dunas, já descaracterizadas, entre outras existentes na região. Grãos de quartzo, relativamente maiores (milimétricos), dispostos aleatoriamente na matriz são indícios de um posterior retrabalhamento, possivelmente recebendo contribuições do próprio Grupo Barreiras.

Um aspecto bastante interessante é a aparente intercalação dos sedimentos da Formação Potengi nos da Guararapes em alguns locais da linha de costa (Barreira do Inferno). Explica-se o fato pela própria evolução da faixa costeira do nosso litoral, onde a formação de pequenos terraços no Grupo Barreiras, provavelmente provocados por abrasão marinha, favoreceu o acúmulo de sedimentos eólicos nesses “batentes”. A posterior erosão indiferenciada desta seqüência resultou nesta aparente intercalação, além de originar um depósito que é característico da Formação Potengi, embora com fragmentos do próprio Barreiras sendo observados na porção superior.

3.2.2 – Sedimentos Cenozóicos Quaternários Sub-Recentes

Estes sedimentos compõem-se de *beachrocks*, dunas fixas e sedimentos praias relacionados a um paleonível marinho, nos quais apenas as dunas fixas não são restritas à linha de costa.

3.2.2.1 – *Beachrocks*

Os arenitos de praia ou simplesmente “*beachrocks*”, são observados em vários pontos do litoral leste potiguar, particularmente no SE da área mapeada. Ocorrem na forma de estreitas faixas paralelas à linha de costa e alinhados segundo a direção norte-sul. Seu real posicionamento na coluna estratigráfica e os tipos de contato com as outras rochas aflorantes ainda não são totalmente esclarecidos. Todavia, de acordo com a atual concepção evolutiva do litoral norterio-grandense, pode-se considerar que os *beachrocks* sejam aproximadamente contemporâneos de algumas gerações de dunas mais antigas da região (aquelas hoje fixadas por vegetação).

Sua litologia é representada por arenitos de coloração acinzentada a amarelada e granulometria variada, com intercalações de níveis finos e grossos. O arcabouço da rocha é constituído em sua grande maioria por grãos de quartzo, sub-angulosos a sub-arredondados, feldspatos e bioclastos, cimentados por calcita microcristalina e, mais raramente, criptocristalina (indicativos de variações climáticas e do nível do mar pelos quais passaram esses depósitos). Estruturas tipo estratificações cruzadas acanaladas de médio porte e plano-paralelas de baixo ângulo, evidenciam sub-ambientes de deposição na zona baixa de estirâncio (*lower foreshore*) e parte média desta (*middle foreshore*), respectivamente (Oliveira *et al.*, 1990).

3.2.2.2 – Dunas Fixas

Esta unidade é formada pela ação eólica dos ventos alísios e ocupa o extremo nordeste da área e partes do sudeste desta, representando cerca de 8% do total. O relevo associado é tipicamente ondulado, com cotas predominantemente variando de 40 m a 70 m. A forma parabólica bem estirada (*hair pin*) e a cobertura vegetal fixadora característica são comumente observadas em produtos de sensoriamento

remoto. Tais depósitos são representados por areias quartzosas bem selecionadas, típicas de ambientes eólicos, com coloração variando desde o amarelo e o vermelho até tonalidades de cinza e branco.

Estes sedimentos estão dispostos ora diretamente sobre o Grupo Barreiras, ora sobre a Formação Potengi, em discordância erosional com estas, sendo observado inclusive contatos laterais retilíneos entre ambos, de provável natureza estrutural (sudeste da área mapeada).

3.2.2.3 – Depósitos Praiais

Estes depósitos, estudados inicialmente e denominados por Lucena (1995 e 1997) de Unidade Barra de Tabatinga, possuem sua ocorrência restrita à linha de costa e são observados apenas em perfil, com suas melhores exposições nas praias de Barra de Tabatinga e Cotovelo. Consistem, litologicamente, de arenitos friáveis branco-amarelados com níveis mais grosseiros na base a arenitos argilosos amarelo-avermelhados mais compactados no topo, apresentando espessuras totais da ordem de 4 m no seu afloramento tipo (Barra de Tabatinga). Toda a seqüência acha-se depositada sobre um nível conglomerático, de aproximadamente 30 cm, constituído por seixos sub-arredondados de quartzo, de origem indefinida, e por fragmentos igualmente sub-arredondados do próprio Grupo Barreiras. Estes dois tipos de constituintes possuem diâmetros variando desde poucos milímetros até 6 cm. Tal nível é interpretado como sendo um terraço proveniente de abrasão marinha.

As estruturas sedimentares do tipo estratificações cruzadas de baixo ângulo e acanaladas de médio porte na porção inferior, cruzada de pequeno porte e maior ângulo na parte média e plano-paralelas no topo, bem como a presença de microfósseis (foraminíferos), indicam um depósito resultante de um paleonível marinho (intermaré e pós-praia). Este paleonível está situado a aproximadamente 2 m acima do nível médio do mar atual e, provavelmente, representa o mesmo evento transgressivo que seria responsável pela origem de terraços com aparentes intercalações da Formação Potengi em sedimentos mais antigos do Grupo Barreiras na praia de Cotovelo (ver item 3.2.1.2).

3.2.3 – Sedimentos Cenozóicos Quaternários Recentes

Os sedimentos cenozóicos quaternários recentes estão representados na área pelas coberturas arenosas, aluviões, dunas móveis, sedimentos de mangues e praias atuais. Estes se encontram capeando o Grupo Barreiras e a Formação Potengi ou simplesmente representando a própria faixa litorânea.

As coberturas arenosas ocupam grandes porções no noroeste e centro da área estudada, cobrindo aproximadamente 10% desta. Compreendem areias quartzosas branco-acinzentadas, moderadamente selecionadas e de granulometria média. Estas areias encontram-se acumuladas na forma de lençóis ou preenchendo depressões localizadas, podendo ser interpretadas como depósitos resultantes da dissipação de dunas, onde algumas lagoas instalaram-se nas áreas mais baixas.

As aluviões aparecem no centro-norte e ao sul, constituindo cerca de 5% da área. Estes depósitos representam, em mapa, os próprios terraços dos riachos Água Vermelha, Ponte Velha (Rio Pitimbu), Taborda-Mendes, Pium e Rio Pirangi. Litologicamente, as aluviões são acumulações de pobre selecionamento, com partículas desde sílticas até matacões, predominantemente quartzosas e coloração branco-acinzentada.

Os sedimentos de mangue ocorrem na desembocadura do Rio Pirangi, entre as praias homônimas de Pirangi do Norte e Pirangi do Sul, sendo facilmente identificáveis pela flora (*Rhizophora mangle*), fauna e odor característicos. O conteúdo sedimentológico é formado por um substrato lamoso de coloração escura, com uma crescente percentagem de areia em direção ao domínio de praias recentes, embora esse contato não seja estritamente transicional. A origem desses depósitos está associada à evolução paleogeográfica de estuários, preenchendo depressões e reentrâncias morfológicas, bem como às flutuações do nível do mar e efeito das correntes de marés.

As dunas móveis constituem cordões arenosos acompanhando todo o litoral, sendo caracterizadas por tonalidades claras em fotos aéreas e imagens de radar devido à ausência de cobertura vegetal. Estas dunas compreendem areias quartzosas

esbranquiçadas de granulometria média e bom selecionamento, dispostas ou condicionadas segundo a direção dos ventos predominantes.

Os sedimentos praias recentes não são diferenciados das dunas móveis na escala de trabalho e constituem a fonte de sedimentos para estas últimas, possuindo, dessa forma, composição litológica idêntica, salvo a elevada quantidade de bioclastos presentes, especialmente testas de foraminíferos.

Os sedimentos cenozóicos sub-recentes e recentes ora descritos, somados com a Formação Potengi e excetuando-se as unidades de dunas fixas, coberturas arenosas e aluviões, totalizam aproximadamente 2% de toda a área mapeada.

3.3 – CONDICIONAMENTO ESTRUTURAL: UMA PRIMEIRA ABORDAGEM

Estudos de natureza estrutural no litoral sul do Rio Grande do Norte, particularmente a partir de Natal, remontam à década de 70, com destaque para o trabalho de Costa (1971). Este autor, fazendo uso de prospecção geofísica e correlação litológica em poços, caracterizou uma tectônica com falhas de gravidade de direção nordeste no estuário do Rio Potengi (delimitando o então denominado *Graben* Natal), e direção noroeste em Parnamirim-RN (*Graben* Parnamirim). Resultados semelhantes foram obtidos por Salim *et al.* (1974), ao definir a ocorrência de vales estruturais no litoral leste do Estado.

Esse padrão estrutural, com falhamentos NE e NW, mostrou-se consistente em trabalhos posteriores publicados já na década de 90, incluindo levantamentos realizados pelo Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Bezerra *et al.*, 1993; Lucena, 1993; Araújo, 1995; Coriolano *et al.*, 1999). Essas estruturas ocasionam a existência de blocos estruturais tipo *grabens* e *horsts*, destacando-se o *Graben* Papary no município de Nísia Floresta-RN (Lucena e Queiroz, 1996); o controle dos principais vales da região e a disposição de unidades estratigráficas quaternárias segundo direções preferenciais.

A integração de dados geológicos, geofísicos e geomorfológicos das pesquisas já realizadas sugere um regime distensional, com os principais falhamentos sendo de caráter normal. As prováveis componentes transcorrentes, embora integrem

praticamente todas as especulações sobre o campo de tensões atuante, não foram ainda avaliadas consistentemente, a exemplo de variações deste campo ao longo do tempo geológico.

A figura 3.2 reproduz uma imagem de radar do litoral sul de Natal (Prates *et al.*, 1981), bastante sugestiva no tocante ao condicionamento estrutural regional. O contraste entre os terrenos aplainados dos tabuleiros costeiros e seus vales fluviais encaixados, o aspecto poligonal dos campos dunares e a disposição das principais drenagens segundo direções preferenciais, representam algumas das assinaturas da tectônica da área. Tais observações reforçam a importância de uma análise geomorfológica (topográfica e hidrográfica) como ferramenta importante para uma caracterização estrutural, especialmente em terrenos sedimentares cenozóicos. Esta caracterização morfo-estrutural regional e suas implicações, particularmente na hidrogeologia, por serem objetivos principais da presente pesquisa, serão discutidas com detalhe nos capítulos subseqüentes.

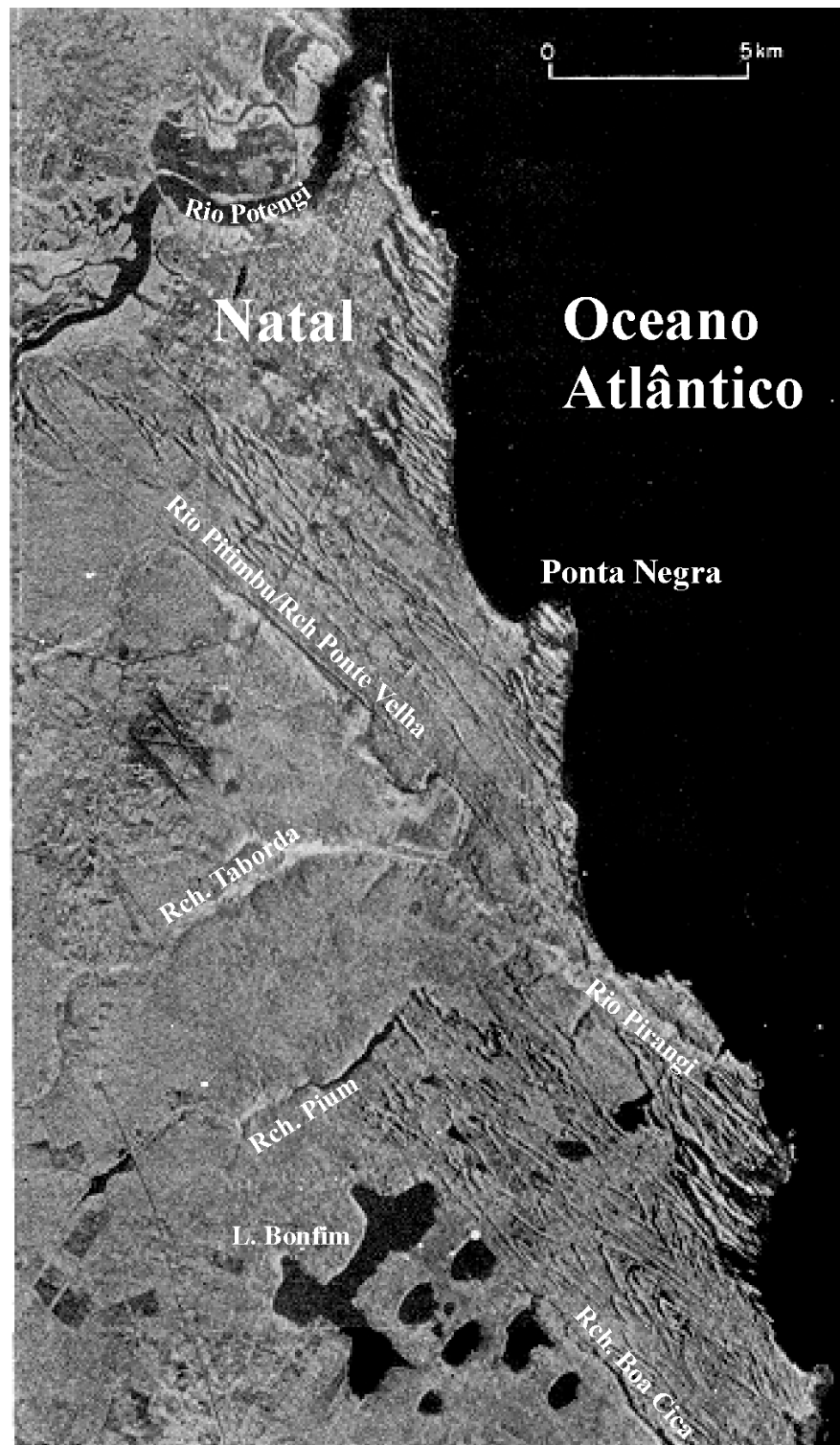


Figura 3.2 – Imagem de radar do litoral sul de Natal-RN, destacando-se os campos de dunas, os vales fluviais dispostos segundo as direções NE e NW, e a Lagoa do Bonfim. A margem maior da figura é orientada segundo o norte geográfico (Prates *et al.*, 1981).

4 – CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA

A hidrologia local, a exemplo de grande parte do litoral leste potiguar, possui suas características decorrentes de fatores como a alta pluviometria (para os padrões do Estado do Rio Grande do Norte), o relevo predominantemente plano a suavemente ondulado e elevadas taxas de infiltração e armazenamento d'água nas formações rochosas. Como consequência, tem-se a ocorrência de importantes reservas hídricas subterrâneas, rios perenes e um considerável número de lagoas, encontrando-se estas nos tabuleiros costeiros ou em vales interdunares. O contexto hidrológico da área é representado pelo Aquífero Barreiras e pela bacia hidrográfica do Rio Pirangi. Conforme os objetivos, os aquíferos estratigraficamente inferiores aos sedimentos cenozóicos não serão tratados na presente pesquisa.

4.1 – O CONTEXTO HIDROLÓGICO SUBTERRÂNEO

4.1.1 – O Sistema Aquífero Barreiras

Constituindo-se atualmente no mais importante reservatório da bacia costeira, o Aquífero Barreiras é responsável pelo abastecimento da maioria das cidades da faixa litorânea oriental do Rio Grande do Norte, incluindo Natal. O limite inferior deste aquífero é o topo da seqüência carbonática mesozóica não aflorante da região, a qual foi individualizada nas perfurações como sendo constituída por sedimentos areno-argilosos a argilosos de composição calcífera e baixa potencialidade hidrogeológica, ou mesmo o embasamento cristalino, nas áreas próximas do contato deste último com a bacia sedimentar costeira. O aquífero apresenta vazões de exploração elevadas em determinadas localidades, sobretudo naquelas de maior espessura dos sedimentos do Grupo Barreiras, conforme observado em algumas captações na região sul de Natal e Parnamirim-RN (vazões da ordem de $100 \text{ m}^3/\text{h}$). Por outro lado, valores reduzidos de vazões explotadas são atribuídos a causas diversas, dentre as quais espessuras reduzidas do Barreiras e a forma de construção e desenvolvimento de poços mais antigos, face às atuais técnicas de perfuração. Um estudo realizado pelo IPT (1982) para o Governo do Estado revelou transmissividades da ordem de $2,8 \cdot 10^{-3}$ a $9,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ para a região compreendida entre Natal e São José de Mipibú-RN.

No tocante à condição hidrodinâmica, o Aquífero Barreiras comporta-se de maneira bastante variável, sobretudo na região sul de Natal até a fronteira com a Paraíba. Este comportamento pode apresentar-se de livre a semiconfinado, onde a camada semiconfinante no topo é representada por lentes argilosas do Grupo Barreiras, por vezes de considerável extensão superficial (IPT, 1982). Somado a isso, a Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte-CAERN observou em estudos recentes na zona sul de Natal a ocorrência de aquíferos suspensos localizados, igualmente ocasionados por camadas intercaladas de natureza argilosa.

O papel que exercem os aspectos litológicos é igualmente preponderante na exploração. Afora as unidades já descritas, não raro observam-se passagens bruscas de arenitos pouco argilosos para argilas ou vice-versa, na forma de mudanças laterais de fácies, bem como a presença de níveis grossos (cascalhos) ou finos (argilas), evidenciando a heterogeneidade do aquífero numa escala mais ampla.

A denominação de Dunas-Barreiras foi introduzida por Melo *et al.* (1994), sendo amplamente utilizada desde então. Este estudo mostrou que as formações dunares, devido a sua elevada porosidade e baixo índice de escoamento superficial, atuam como receptoras das precipitações pluviométricas, constituindo-se em fonte de recarga do Barreiras. As dunas, embora funcionem predominantemente como agente transmissor e não acumulador, foram dessa forma consideradas como parte de um sistema hidráulico único e indiferenciado. Comportamento semelhante é observado pela unidade mapeada como “Coberturas Arenosas” (ver mapa geológico em anexo), as quais se constituem igualmente como fonte de recarga do Aquífero Barreiras, face às suas características litológicas e hidrodinâmicas (elevada porosidade e baixo índice de escoamento superficial). Nesta pesquisa, entretanto, foi convencionado o uso do termo Dunas, precedendo o Barreiras, apenas nos locais de ocorrências dunares ora mapeadas.

4.1.2 – A Potenciometria da Área

O mapa potenciométrico do setor oriental da bacia do Rio Pirangi foi elaborado segundo os procedimentos clássicos utilizados neste tipo de levantamento

(Castany, 1975). Inicialmente foi realizado um cadastro de poços do setor oriental da bacia do Rio Pirangi, com posterior identificação dos mesmos em campo e checagem se estes, dentre outras características, encontravam-se inseridos verticalmente no Aquífero Barreiras. As captações selecionadas foram então submetidas a um nivelamento topográfico tipo geométrico (nivelamento e contra-nivelamento). O equipamento utilizado foi um nível automático SOKISHA (mod. 19754-B-Z), sendo os poços referenciados em relação à RN (referência de nível) 1829 do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), situada no degrau lateral da igreja católica matriz da cidade de Parnamirim-RN na praça João Paulo II. Estes poços foram submetidos a duas medições de nível, sendo uma ao final do período chuvoso e outra ao final do período de estiagem, com vistas à obtenção de possíveis variações das equipotenciais e eventuais inversões locais do fluxo subterrâneo.

Esta potenciometria foi elaborada a partir de levantamentos realizados no setor oriental da bacia, conforme reportado, tendo em vista um esperado aumento das relações águas superficiais x águas subterrâneas nesta área. Este mapeamento possuiu como objetivos primordiais a delimitação/individualização de zonas de recarga e descargas das águas subterrâneas locais, situar as lagoas do Jiqui e Pium no contexto hidrogeológico regional e definir as principais frentes de escoamento. O mapa potenciométrico da figura 4.1, elaborado ao final da estação seca (março de 2001), evidenciou as principais características peculiares da região, incluindo algumas surpresas. Em termos de zonas de recarga, duas importantes sub-áreas foram diferenciadas, a partir das quais se originam as principais frentes de escoamento subterrâneo. A primeira situa-se na altura da cidade de Parnamirim, fato que denota alguma preocupação face às condições deficitárias de saneamento básico na cidade e a presença de determinados “lixões”, particularmente um localizado nas proximidades do final da margem direita da pista do aeroporto internacional Augusto Severo (margem da RN-066 – Rodovia Trapolim da Vitória). A outra grande zona de recarga provém do Sistema Lacustre do Bonfim (Nísia Floresta-RN), constituindo-se num aspecto bastante relevante e confirmando um outro levantamento realizado por Lucena *et al.* (2002) entre este sistema lacustre e a bacia do Rio Pirangi. Tal

importância resulta do fato de que estudos prévios realizados na área da Lagoa do Bonfim (Costa, 1997), destinados ao conhecimento da disponibilidade hídrica desta área, tendo em vista o sistema de adução Agreste-Trairi do Governo do Estado, não mostra esta conexão hidráulica. O sistema do Bonfim, até então considerado como praticamente endorrêico sob o ponto de vista subterrâneo, deve ser reavaliado, principalmente o contexto geológico do limite com a bacia do Pirangi e as respectivas conexões hidráulicas entre os dois sistemas.

A grande zona de descarga abrange o “binômio” Rio Pitimbu – Taborda/Pirangi, incluindo a Lagoa do Jiqui. Esta observação eleva-se em importância, a exemplo da área de recarga de Parnamirim, uma vez que a referida lagoa abastece boa parte da zona sul de Natal (aproximadamente 40% de toda a água encanada) devendo, portanto, receber especial atenção no tocante às suas margens e contexto subterrâneo adjacente, principalmente em termos qualitativos (monitoramento da qualidade da água de poços nas vizinhanças, por exemplo). Uma outra observação não menos importante diz respeito ao considerável espaçamento entre as isopiezas em determinados locais, refletindo baixos gradientes hidráulicos (da ordem de 10^{-3}), favorecendo as condições de recarga, enquanto que valores relativamente elevados são mostrados nas áreas de descarga do aquífero, sobretudo no baixo curso do Rio Pirangi (gradientes hidráulicos da ordem de 10^{-2}).

Uma segunda potenciometria é apresentada na figura 4.2, com base em dados coletados ao final do período chuvoso (agosto de 2000), objetivando confrontar os dois mapas e identificar possíveis alterações do contexto já explicitado. Tal levantamento, no entanto, não evidenciou maiores diferenças daqueles resultados mostrados no mapa da figura 4.1. As exceções ficam por conta de uma pequena tendência de aumento das áreas das zonas de recarga de Parnamirim e sistema lacustre do Bonfim, além do incremento da configuração da zona de descarga regional (rios Pitimbu e Taborda nos seus baixos cursos). Outra mudança foi observada na altura da Lagoa do Pium, com uma pequena inversão de fluxo subterrâneo na sua margem esquerda. A disposição das equipotenciais neste local demonstra uma superfície potenciométrica inclinada, com caimento para NNE, ocasionando o aspecto de aquífero influente de sul para

norte-nordeste e afluente neste mesmo sentido a partir da lagoa. Esta configuração deve ser decorrente do aumento do aporte subterrâneo proveniente da área de recarga do sistema do Bonfim durante o período chuvoso. Afora este caso, não foram observadas outras inversões significativas de fluxos.

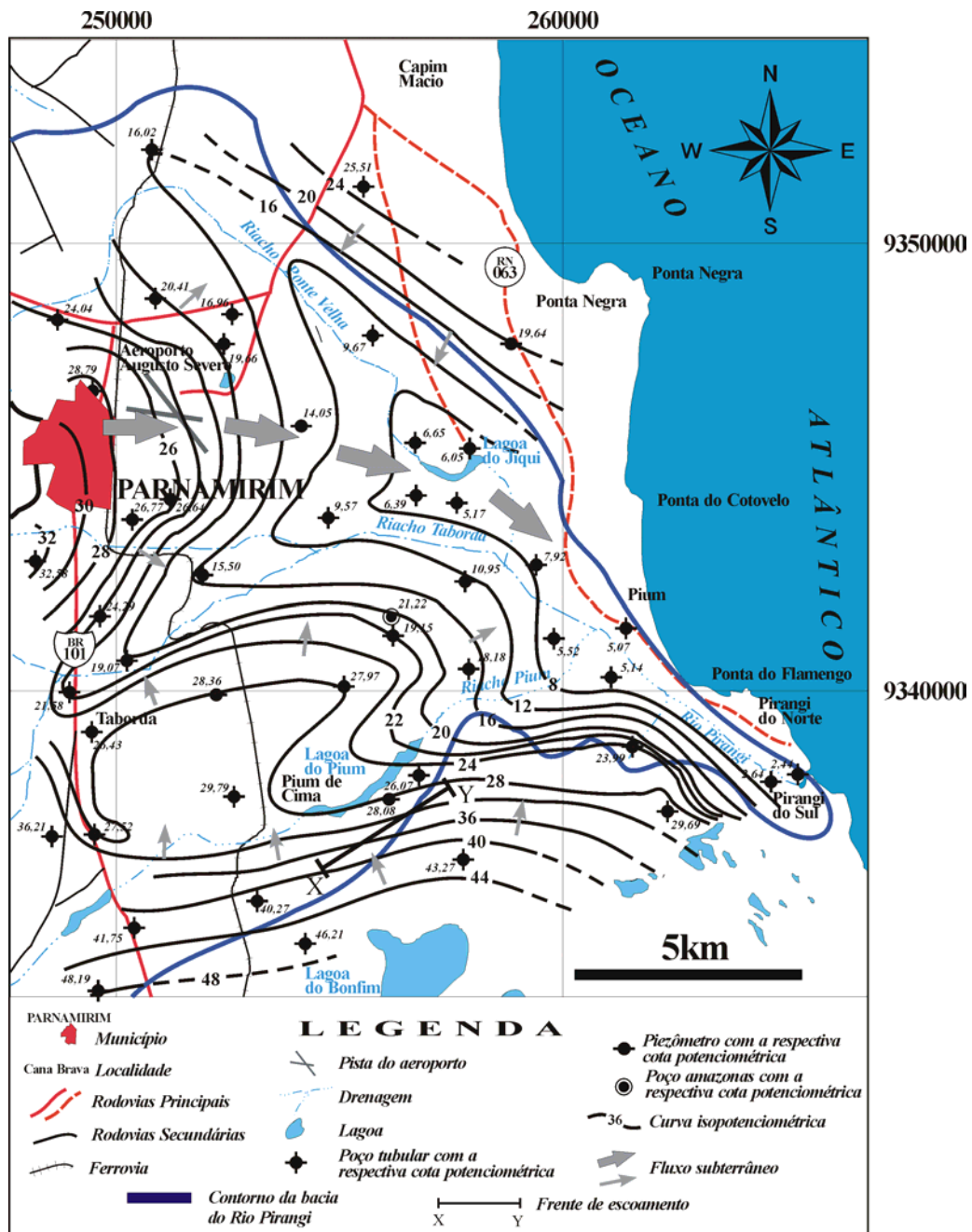


Figura 4.1 – Mapa potenciométrico do Aquífero Barreiras no setor oriental da bacia do Rio Pirangi, elaborado ao final do período de estiagem da região (março de 2001).

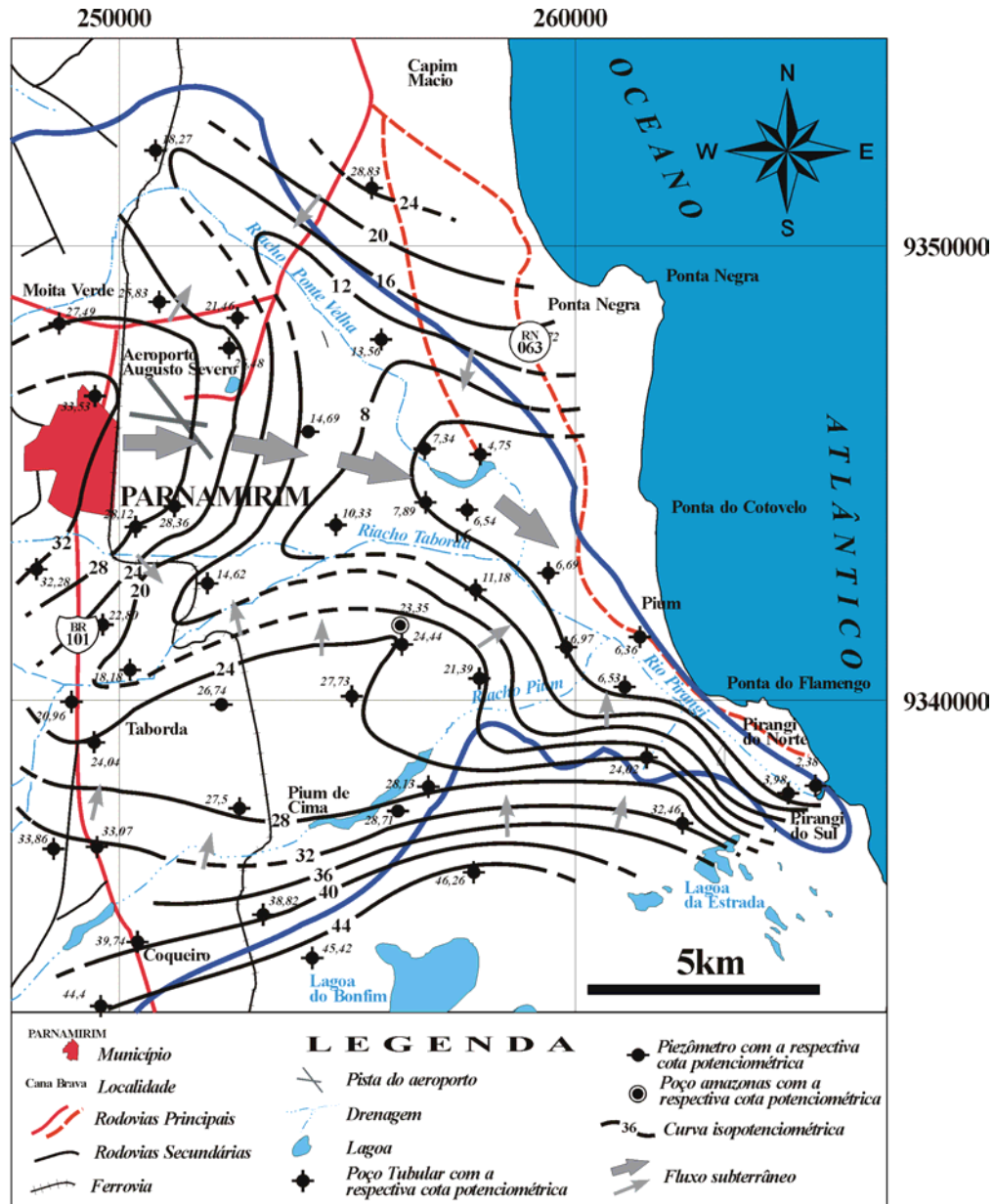


Figura 4.2 – Mapa potenciométrico do Aquífero Barreiras no setor oriental da bacia do Rio Pirangi, elaborado ao final do período chuvoso da região (agosto de 2000).

Uma proeminente feição que se mostra em ambos os mapas diz respeito a uma área situada no quadrante SW dos mesmos, delimitada aproximadamente pela equipotenciais de 32 e 28 (na figura 4.1) e 28 e 24 (na figura 4.2). Tal área é indicativa de um aumento da transmissividade local, estando associada com o aumento de espessura saturada decorrente de falhamentos (Lucena e Queiroz, 1996; Lucena *et*

al., 1999). No tocante aos limites subterrâneos, além da não caracterização do limite da bacia com o Sistema do Bonfim ao sul, não se observaram limites regionais marcantes.

4.1.3 – Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero

Os parâmetros hidrodinâmicos do Aquífero Barreiras, no âmbito do setor oriental da bacia do Rio Pirangi, foram obtidos a partir da avaliação e interpretação dos dados de dois testes de aquífero efetuados na área estudada. O teste de aquífero nº 1 foi realizado na captação da CAERN na Lagoa do Jiqui, tendo sido efetuado o bombeamento do poço PT-02 com bomba submersa e vazão em descarga livre, com observação do rebaixamento apresentado pelo PT-01 a 115 m de distância. O teste de aquífero nº 2 foi realizado em 08/09/1996 pela equipe técnica de um projeto efetuado para a Secretaria de Recursos Hídricos do Estado, com vistas à caracterização hidrogeológica da região da lagoa do Bonfim (Costa, 1997). Nesse teste, foi efetuado o bombeamento de um poço tubular com 65 m de profundidade, situado na localidade de Mira Flor em São José de Mipibu/RN (sul da bacia), com observação dos rebaixamentos em um piezômetro posicionado a 9 m do mesmo. Os resultados ora apresentados, relativos a este segundo teste, representam uma reinterpretação dos dados inicialmente coletados pela equipe técnica do referido projeto.

4.1.3.1 – Interpretação dos resultados

➤ Teste de aquífero nº 1

O bombeamento do poço PT-02 (ver perfil geológico na figura 4.3) foi efetuado com vazão constante de 84,7 m³/h, tendo uma duração de 18 horas. A seguir, são apresentadas as principais características do teste.

Poço bombeado (PT-02/CAERN)	Poço observado (PT-01/CAERN)
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade: 60 m • Nível estático: 12,0 m • Vazão bombeada: 84,7 m³/h • Tempo de bombeamento: 18 horas 	<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade: 58 m • Nível estático: 11,50 m • Distância para o poço bombeado: 115,0 m

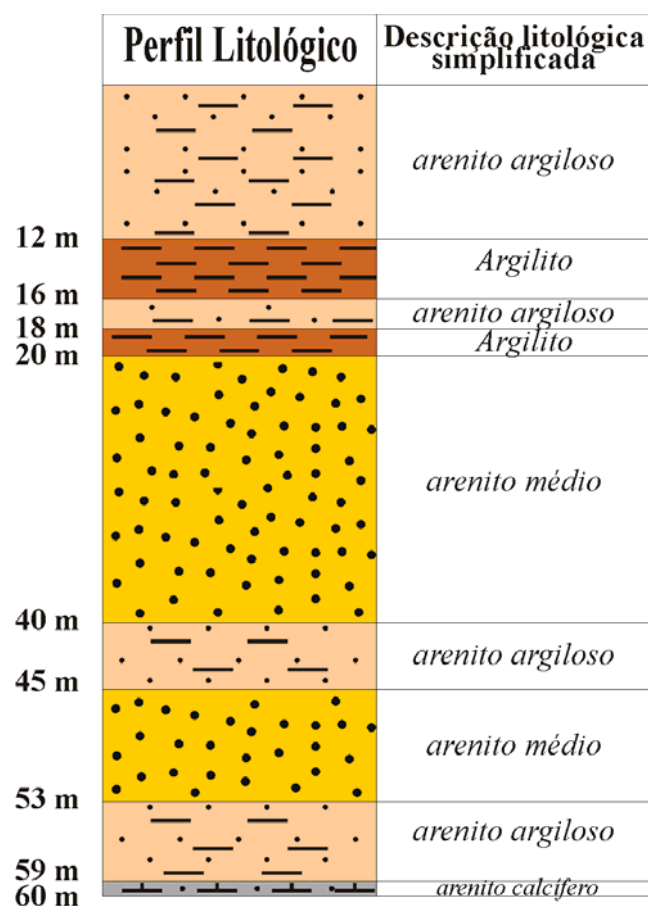


Figura 4.3 – Perfil da captação PT-02 da CAERN, na margem esquerda da Lagoa do Jiqui (Parnamirim-RN).

Para a obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero foi utilizado o método de aproximação logarítmica de Jacob, o qual forneceu um valor de transmissividade (T) de 3,11 m²/min ou 5,18 x 10⁻² m²/s. O gráfico de rebaixamento (s) X tempo (t), bem como o respectivo ajuste da curva, é apresentado na figura 4.4.

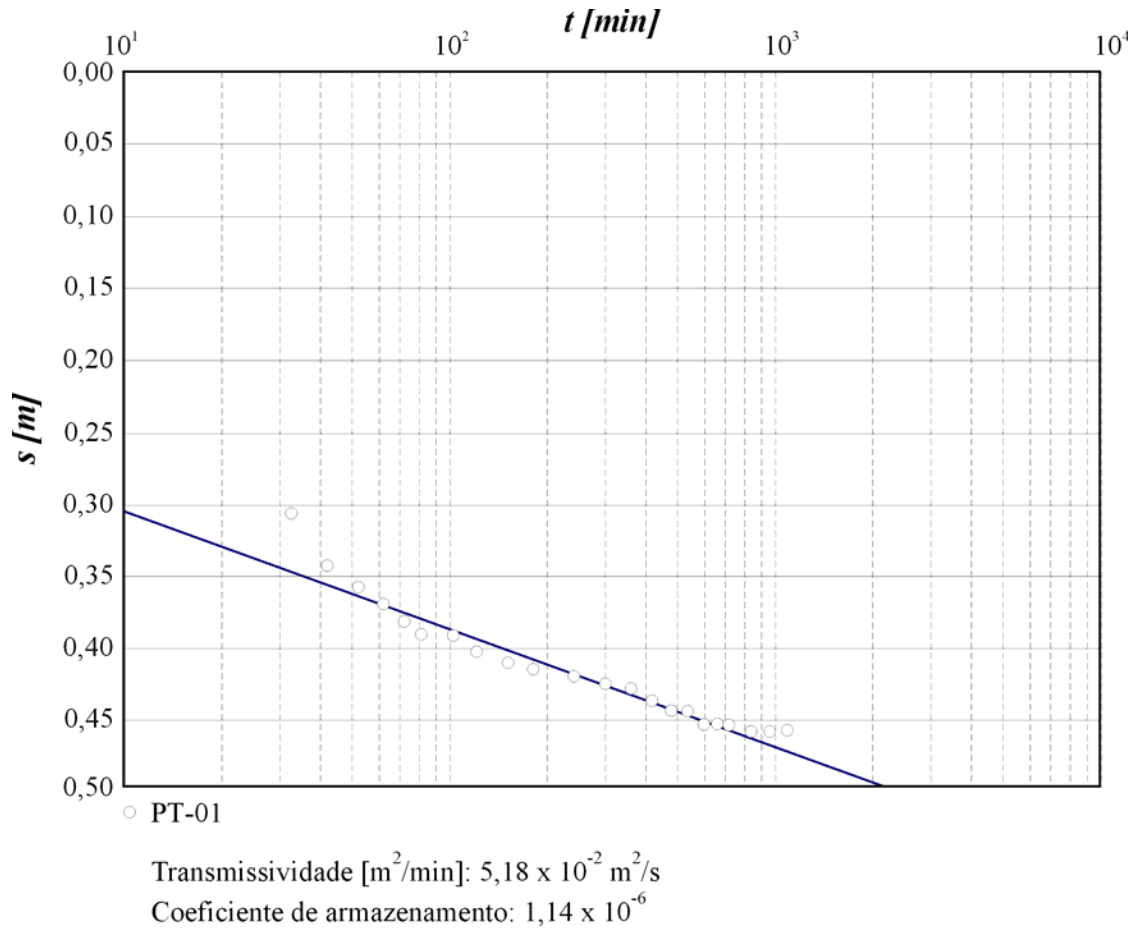


Figura 4.4 – Gráfico de rebaixamento (s) X tempo (t), na interpretação do teste de aquífero nº 1.

➤ Teste de aquífero nº 2

Nesse teste, o poço tubular situado na localidade de Mira Flor (ver perfil geológico na figura 4.5) foi bombeado a uma vazão de $4,93 m^3/h$ durante 24 horas, sendo os rebaixamentos observados em um piezômetro distando 9 m. A seguir, são apresentadas as principais características do referido teste.

Poço bombeado	Poço observado
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade: 65 m • Nível estático: 16,04 m • Vazão bombeada: 4,93 m³/h • Tempo de bombeamento: 24 horas 	<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade: 68 m • Nível estático: 16,26 m • Distância para o poço bombeado: 9,0 m

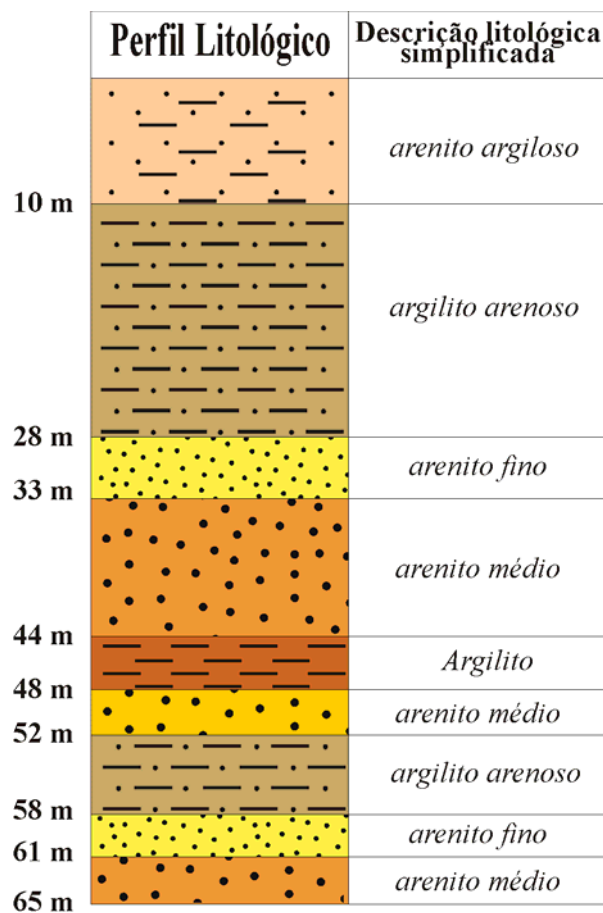


Figura 4.5 – Perfil do poço bombeado, na localidade de Mira Flor (São José de Mipibu-RN).

A exemplo do teste n^o 1, os dados de rebaixamento do poço observado com o tempo foram lançados em papel mono-log, utilizando-se posteriormente a metodologia de aproximação logarítmica de Jacob, com a obtenção de uma transmissividade (T) de

$9,18 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{min}$ ou $1,53 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. O gráfico de rebaixamento (s) X tempo (t), bem como o respectivo ajuste da curva, é apresentado na figura 4.6.

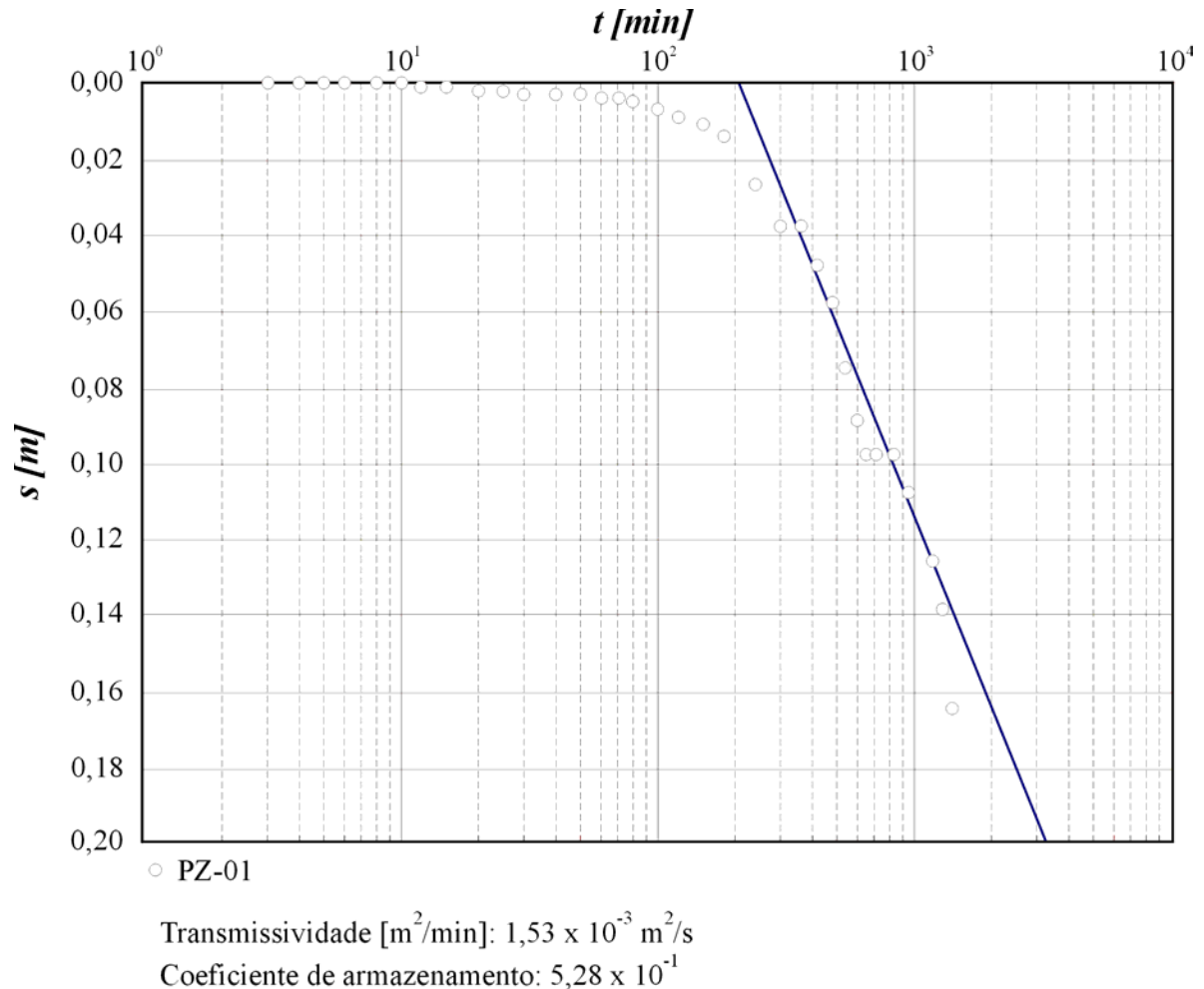


Figura 4.6 – Gráfico de rebaixamento (s) X tempo (t), na interpretação do teste de aquífero nº 2.

4.1.3.2 Discussão dos parâmetros obtidos

Em linhas gerais, os valores de transmissividade (T) mostraram-se dentro de uma mesma ordem de grandeza e compatíveis com outros estudos previamente realizados no Aquífero Barreiras na região (IPT, 1982; Melo *et al.*, 1994), incluindo a área metropolitana de Natal. Tal compatibilidade de resultados é observada, apesar da esperada heterogeneidade no comportamento hidrodinâmico do aquífero e sua composição litológica, particularmente ao longo do setor oriental da bacia do Rio Pirangi.

Os testes ora apresentados, contudo, não possibilitaram a obtenção de valores relativos a coeficiente de armazenamento ou porosidade efetiva uniformes e compatíveis com a realidade hidrogeológica local. O teste número 1, particularmente, revelou um coeficiente de armazenamento compatível com uma condição hidráulica de confinamento. Deve-se considerar, no entanto, esta condição como sendo de caráter local na margem esquerda da Lagoa do Jiqui, conforme observado em outras captações da CAERN, inclusive com relatos de técnicos desta companhia sobre a elevação do “nível freático” no decorrer da conclusão da perfuração. Os perfis de poços locais mostram ainda uma razoável continuidade de camadas argilosas sobrepostas aos níveis arenosos filtrados (ver figura 4.3), sendo provavelmente o fator responsável por este aspecto de confinamento localizado. Esta observação, contudo, não deve invalidar a condição de livre a semi-confinamento representativa do Aquífero Barreiras na região sul de Natal. O IPT (1982), por sua vez, com base em múltiplos testes de aquíferos executados na região compreendida entre Natal e o limite estadual com a Paraíba, evidenciou a existência de subáreas com caráter hidráulico de semiconfinamento e livre. Os valores revelados por este levantamento foram da ordem de $3,1 \times 10^{-3}$ e 0,07, respectivamente, sendo este último melhor caracterizado nas proximidades do contato litológico do Grupo Barreiras com o embasamento cristalino aflorante a oeste. Costa (1997), em estudos que envolveram inclusive a parte sul da bacia do Rio Pirangi, fala da ocorrência de semiconfinamentos localizados, apesar de incipientes, embora o comportamento livre possa ser adotado como representativo, com valor de porosidade efetiva de 0,15.

Somado a esse contexto, levantamentos geo-elétricos realizados por Lucena *et al.* (1999) e na presente pesquisa (conforme será abordado no capítulo 8) não caracterizaram camadas de natureza argilosa que atuem como horizontes confinantes ou semiconfinantes por longas extensões, apenas em caráter localizado, a exemplo do que defende Costa (1997). Diante de todos estes estudos e das evidências de um comportamento hidráulico predominantemente livre, será adotada na presente pesquisa uma porosidade efetiva da ordem de 0,1 (10%) para o Aquífero Barreiras no setor oriental da bacia do Rio Pirangi. Este valor, embora seja mais conservador se

comparado com aquele sugerido por Costa (1997), mantém-se coerente com o caráter livre do aquífero ora reportado.

4.1.4 – Avaliação Preliminar de Reservas e Disponibilidades

No presente tópico é apresentada uma avaliação preliminar das reservas permanentes, reguladoras e totais, segundo as metodologias usuais e de cunho geral, ou seja, buscando-se tão somente a ordem de grandeza destas reservas, face à abrangência da área em questão. A superfície considerada da bacia é a mesma daquela do levantamento potenciométrico, compreendendo o setor oriental da bacia do Rio Pirangi, limitando-se a oeste aproximadamente pela BR-101. Para efeito de cálculo, alguns termos foram tomados como valores médios representativos, embora rigorosamente dentro da realidade do contexto hidrogeológico regional.

4.1.4.1 – Reservas permanentes

As reservas permanentes correspondem ao volume de água subterrânea situada na porção saturada, abaixo da posição mínima da variação sazonal do aquífero (menor nível da superfície potenciométrica num dado período de tempo). Assumindo o comportamento do Aquífero Barreiras na área como sendo de caráter livre (apesar do esperado semi-cofinamento em alguns locais), o cálculo das reservas permanentes é dado pelo volume de saturação (V_s), sendo este definido por:

$$V_s = A.b.\eta_e$$

Onde:

A = área de ocorrência do aquífero (m^2);

b = espessura média saturada do aquífero (m);

η_e = porosidade efetiva.

Considerando uma área de ocorrência do aquífero no setor oriental da bacia de 231,02 km^2 (231,02 x $10^6 m^2$), uma espessura média saturada de 40 m e uma porosidade efetiva de 10%, tem-se um volume de saturação da ordem de 924,08 x $10^6 m^3$.

4.1.4.2 – Reservas reguladoras

As reservas reguladoras correspondem, sob condições de equilíbrio natural do aquífero, ao volume d'água infiltrado, ou seja, à recarga anual do sistema. Dentre as metodologias utilizadas na avaliação das reservas reguladoras, foi adotada aquela que trata da Vazão de Escoamento Natural (VEN). Este parâmetro é calculado a partir do coeficiente de porosidade efetiva da área de ocorrência do aquífero e da variação do nível da superfície potenciométrica. Esta última variação, no caso um valor médio representativo, foi adotada com base em comunicação verbal de pesquisadores da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte-EMPARN no tocante a monitoramento de poços na área. Diante do exposto, tem-se o volume de escoamento natural como sendo:

$$VEN = A.\Delta h.\eta_e$$

Onde:

A = área de ocorrência do aquífero (m²);

Δh = variação média da superfície potenciométrica (m);

η_e = porosidade efetiva.

Considerando a área de ocorrência do aquífero de $231,02 \times 10^6$ m², a variação média adotada da superfície potenciométrica de 6 m e uma porosidade efetiva de 10%, as reservas reguladoras são da ordem de $0,15 \times 10^9$ m³. Este valor pode ser tomado como base no tocante às descargas explotáveis do sistema aquífero, ou aquelas que podem ser utilizadas sem prejuízo do mesmo. As reservas totais são obtidas através da soma entre as reservas permanentes e as reguladoras, resultando um valor da ordem de $1062,69 \times 10^6$ m³.

4.1.5 – Aspectos Hidroquímicos

4.1.5.1 – Objetivos do levantamento e procedimentos de campo

Estudos da composição das águas de mananciais subterrâneos são de fundamental importância, sobretudo em áreas com crescente adensamento populacional, onde se busca uma otimização do aproveitamento dos mesmos em condições de uso doméstico. Dessa forma, o presente trabalho apresenta uma síntese

preliminar das características hidroquímicas e adequabilidades das águas do Aquífero Barreiras no setor oriental da bacia do Rio Pirangi, litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte. Ressalta-se aqui a carência de tais estudos nesta região, principalmente se comparado àqueles existentes além dos seus limites norte e sul, respectivamente a região metropolitana da capital Natal e o sistema lacustre do Bonfim.

A análise dos constituintes físico-químicos das águas do aquífero local permitiu classificá-las segundo o padrão de aceitação para consumo humano, expresso pela Portaria do Ministério da Saúde (MS) N° 518, de 26 de março de 2004, além de uma classificação para fins de irrigação. Esta última, efetuada com base nos valores de condutividade elétrica e de RAS (razão de adsorção de sódio), deve-se à ocorrência de áreas agricultáveis nas proximidades dos núcleos municipais locais.

A metodologia geral de trabalho compreendeu inicialmente a coleta de 16 amostras em poços tubulares do Aquífero Barreiras (em 25/09/2001), especialmente bem distribuídos e inseridos no setor oriental da bacia do Rio Pirangi (figura 4.7). A amostragem foi precedida de um bombeamento dos respectivos poços por um período mínimo de cerca de 15 minutos, com vistas à obtenção de dados representativos do manancial subterrâneo, em que se minimiza a coleta de águas estagnadas e/ou contaminadas no interior da captação.

Este processo de amostragem apresentou como objetivo principal a determinação em laboratório dos seguintes parâmetros físico-químicos: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), cor (uH), turbidez (UT), pH, condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), sólidos totais a 105°C (mg/L), sólidos dissolvidos totais (mg/L), sólidos em suspensão (mg/L), alcalinidade total (mg/L CaCO_3), alcalinidade de hidróxido (mg/L CaCO_3), alcalinidade de carbonato (mg/L CaCO_3), alcalinidade de bicarbonato (mg/L CaCO_3), dureza total (mg/L CaCO_3), nitrogênio amoniacal (mg/L N-NH_3), nitrito (N-NO_2^-), nitrato (N-NO_3^-), cálcio (mg/L Ca^{2+}), magnésio (mg/L Mg^{2+}), sódio (mg/L Na^+), potássio (mg/L K^+), ferro (mg/L Fe_{Total}), carbonato (mg/L CO_3^{2-}), bicarbonato (mg/L HCO_3^-), sulfato (mg/L SO_4^-) e cloreto (mg/L Cl^-).

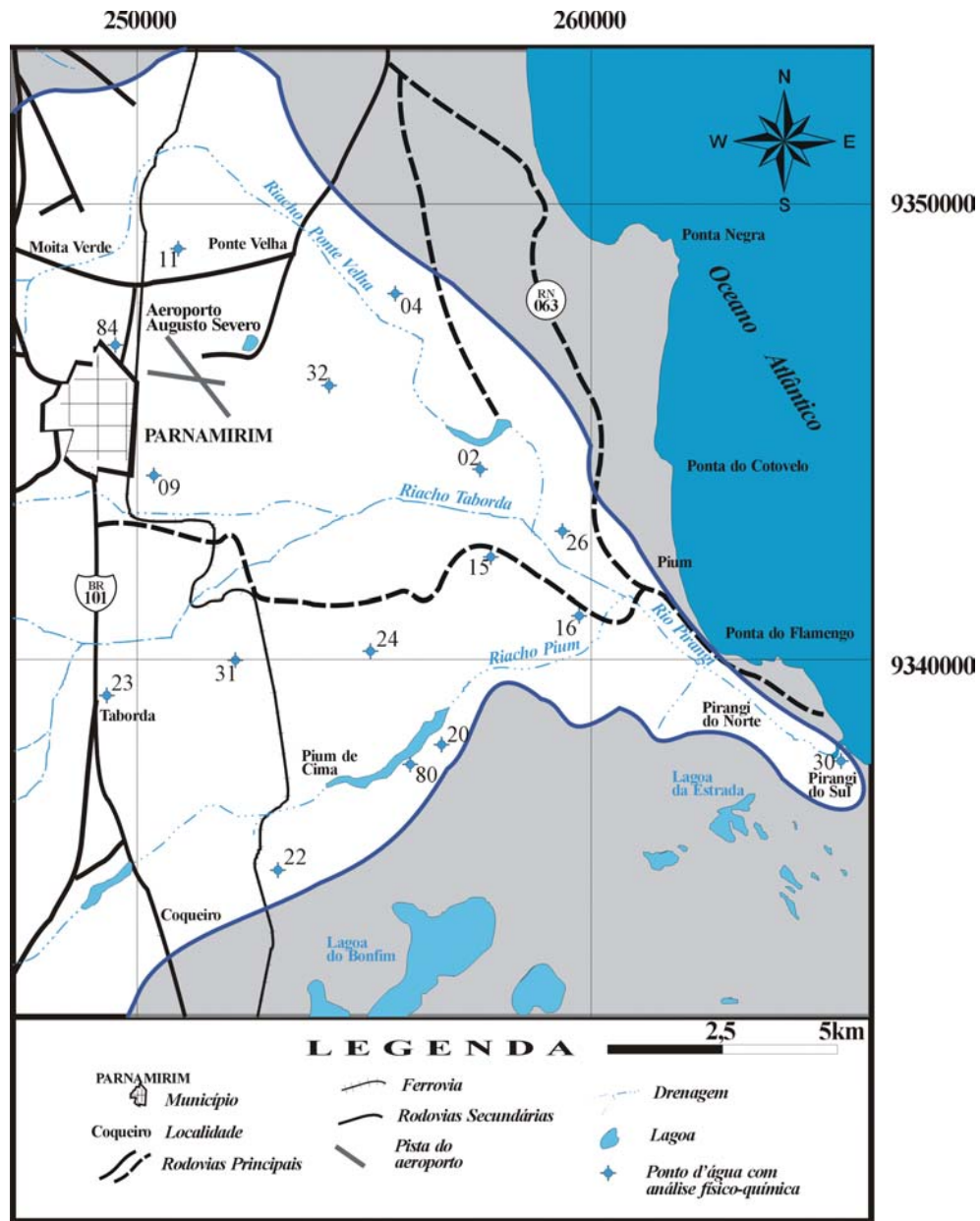


Figura 4.7 – Localização dos poços, inseridos no setor oriental da bacia do Rio Pirangi, com coleta de amostras para análise físico-química.

O procedimento básico adotado nesta campanha de amostragem consistiu na tomada de um volume de cerca de 2,0L de água em recipiente plástico de polietileno, lavado e esterilizado, sendo em seguida fechado, de modo a não acumular o ar atmosférico no seu interior. Tais recipientes foram igualmente lavados com as próprias águas a serem coletadas por três vezes antes da coleta final.

Após a obtenção dos resultados analíticos para os parâmetros físico-químicos, os mesmos foram submetidos a testes de consistência, através do cálculo da diferença do balanço iônico-DBI, onde se adotou um erro máximo permissível de 10% (*in* Feitosa e Manoel Filho, 1997). Posteriormente os dados foram tratados através da construção de tabelas comparativas e elaboração de diagramas hidrogequímicos.

4.1.5.2 – Classificação hidroquímica

Os resultados das análises físico-químicas encontram-se sintetizados na tabela 4.1, enquanto que o diagrama de Piper (Piper, 1944) da figura 4.8 exhibe a classificação das águas do Aquífero Barreiras, com base nos valores dos íons dominantes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, HCO_3^- , SO_4^{2-} e Cl^-) expressos em unidade de meq/L.

A adoção dessa metodologia permitiu classificar a grande maioria das amostras como águas do tipo cloretada-sódica. Dentre as feições mais marcantes, destaca-se a configuração de uma tendência ao enriquecimento dos íons " Na^+ " e " Cl^- ", associado à proximidade da linha de costa. Neste aspecto, vale ressaltar que a característica cloretada-sódica das amostras está diretamente relacionada com o *spray* salino e a provável presença desses elementos na precipitação pluviométrica local, somado ao fato do Aquífero Barreiras possuir caráter local predominantemente livre (favorecendo a infiltração de tais elementos) e à presença de campos dunares capeando determinadas áreas de ocorrência do aquífero (considerando que estes depósitos resultam da ação eólica sobre sedimentos arenosos praias). Algumas amostras, contudo, apresentaram um incremento relativo dos íons Ca^{2+} , Mg^{2+} e HCO_3^- , fato este que ocasionou uma classificação das mesmas como águas bicarbonatadas mistas (2 amostras) e cloretada mista (1 amostra).

PARÂMETRO	VMP *	RESULTADOS ANALÍTICOS															
		NÚMERO DE REFERÊNCIA (POÇOS TUBULARES)															
		20	31	32	09	84	26	16	15	24	22	23	11	04	02	80	30
Temperatura (°C)	---	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	
Cor (uH)	15	0	>100	>100	0	0	0	0	0	7,5	0	0	0	0	0	0	
Turbidez (UT)	5	0	>200	>200	0,05	0,05	0	0,1	0,15	2,16	0,1	0,1	0	0,05	0	0,2	0,05
pH	6 - 9,5	5,8	7,6	5,5	6,8	6,3	6,8	6,4	6,6	6	5,9	6,3	5,8	6	6,2	6,8	7,5
Condutividade elétrica (µS/cm)	---	51,2	196,8	39,2	120,5	142,6	71,3	271,2	79,3	47,2	91,4	64,3	73,3	51,2	163,7	74,3	130,6
Sólidos totais a 105°C (mg/L)	---	34,82	4019	1553	81,94	96,97	48,48	184,42	53,92	214,0	62,15	43,72	49,84	34,82	111,32	50,52	88,81
S.T.D (mg/L)	1000	34,82	1000	988	81,94	96,97	48,48	184,42	53,92	96,0	62,15	43,72	49,84	34,82	111,32	50,52	88,81
Sólidos em suspensão (mg/L)	---	0,00	3019	565	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	118,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	---	1,31	67,63	1,69	11,45	5,45	5,81	7,79	8,17	2,82	4,97	4,51	2,34	3,00	7,13	18,59	43,77
Alcalinidade de hidróxido (mg/L CaCO ₃)	---	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Alcalinidade de carbonato (mg/L CaCO ₃)	---	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Alcalinidade de bicarbonato (mg/L CaCO ₃)	---	1,31	67,63	1,69	11,45	5,45	5,81	7,79	8,17	2,82	4,97	4,51	2,34	3,00	7,13	18,59	43,77
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	500	4,53	64,44	11,07	24,17	16,62	6,04	21,15	13,09	5,04	10,07	7,55	6,54	7,05	21,15	18,12	45,32
Nitrogênio amoniacal (mg/L N-NH ₃)	1,5	0,02	0,17	0,09	0,04	0,11	0,32	0,05	0,12	0,13	0,07	0,13	0,19	0,15	0,11	0,12	0,03
Nitrito (mg/L N-NO ₂ ⁻)	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nitrato (mg/L N-NO ₃ ⁻)	10	0,05	0,19	0,56	4,31	6,19	3,14	3,28	1,85	0,01	0,33	0,29	1,33	0,69	5,02	0,00	0,00
Cálcio (mg/L Ca ²⁺)	---	0,60	14,31	3,22	4,43	2,41	0,86	4,03	3,73	1,21	2,62	1,61	0,80	1,00	2,82	5,04	10,08
Magnésio (mg/L Mg ²⁺)	---	0,73	6,97	0,73	3,18	2,57	1,00	2,69	0,86	0,49	0,95	0,86	0,10	1,26	3,42	1,75	4,83
Sódio (mg/L Na ⁺)	200	9,15	14,81	7,15	12,61	17,45	13,90	45,45	11,11	8,01	14,45	8,88	12,11	7,41	21,33	7,05	8,63
Potássio (mg/L K ⁺)	---	0,83	5,38	0,83	6,54	5,77	0,42	0,50	0,42	0,50	0,42	3,33	0,83	0,83	5,77	4,17	2,92
Ferro (mg/L Fe _{Total})	0,3	0,01	22,00	22,40	0,04	0,03	0,03	0,04	0,06	0,35	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,11	0,05
Carbonato (mg/L CO ₃ ²⁻)	---	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bicarbonato (mg/L HCO ₃ ⁻)	---	1,60	82,50	2,06	13,98	6,65	7,10	9,51	9,97	3,44	6,07	5,50	2,86	3,67	8,71	22,69	53,40
Sulfato (mg/L SO ₄ ²⁻)	250	0,27	4,97	1,95	0,22	0,00	0,00	4,59	0,00	1,08	0,43	0,00	0,43	0,22	1,45	1,57	1,14
Cloreto (mg/L Cl ⁻)	250	16,53	28,24	16,23	23,12	25,31	12,23	70,60	15,69	15,02	25,39	18,83	19,13	13,95	34,51	15,26	17,46

Valor máximo permitido para consumo humano: Portaria MS-Brasil 518/2004

Parâmetro fora dos limites do VMP

Tabela 4.1 – Síntese dos resultados das análises físico-químicas.

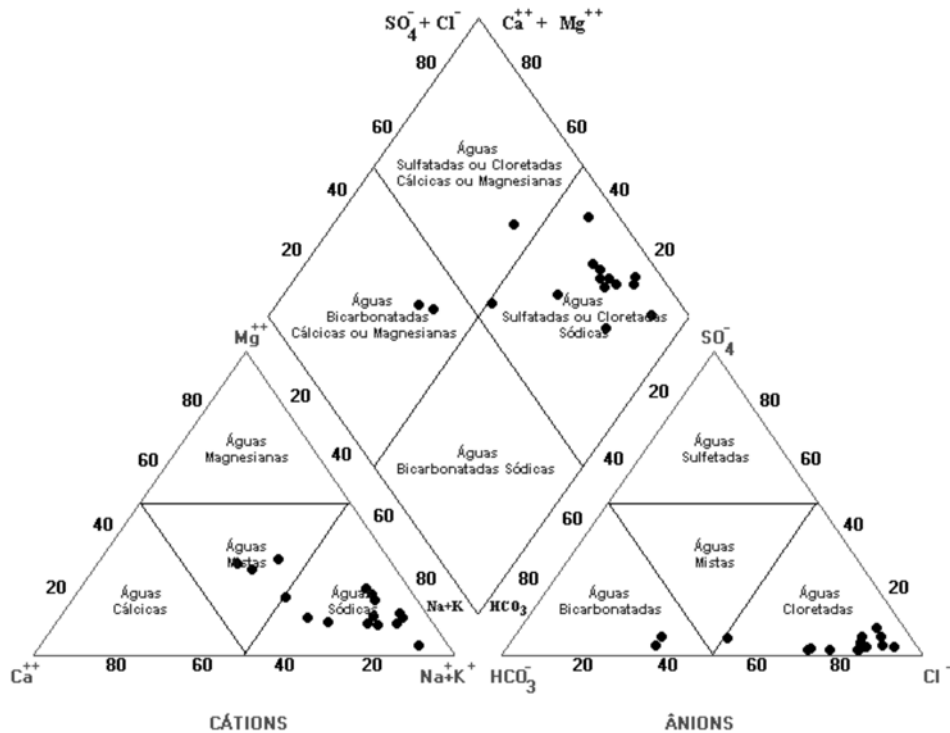


Figura 4.8 – Diagrama de Piper para as amostras de água do Aquífero Barreiras na bacia do Rio Pirangi.

4.1.5.3 – Adequabilidade para consumo humano e irrigação

Tomando-se como base a tabela 4.1, realizou-se uma comparação entre os diferentes parâmetros analisados e os valores máximos permitidos (VMP) para consumo humano, segundo a Portaria MS N^o 518, de 26 de março de 2004, permitindo a classificação dessas águas como propícias ou não para o consumo humano. Neste aspecto, ressalta-se que o padrão de qualidade ambiental das águas objetiva, em última análise, a proteção da saúde pública e o controle de substâncias potencialmente prejudiciais à população (Feitosa e Manoel Filho, 1997).

Dessa forma, a maioria das amostras avaliadas mostra-se dentro do padrão de aceitação para o consumo humano em suas condições naturais. Contudo, os valores de pH obtidos para as águas dos poços 11, 20, 22 e 32, são citados no presente estudo como fora da faixa recomendada para o sistema de distribuição pelo Ministério da

Saúde. As amostras relacionadas aos poços 24, 31 e 32 mostraram-se igualmente fora dos padrões para consumo humano, sem tratamento prévio. As análises da água dos poços 31 e 32, particularmente, evidenciaram valores referentes aos parâmetros cor, turbidez e Fe_{Total} acima do VMP, enquanto que o poço 24 apresentou apenas o teor de Fe_{Total} acima do VMP. Estes três pontos de amostragem merecem uma investigação mais apurada, uma vez que podem estar refletindo problemas de construção e desenvolvimento das captações (poços 31 e 32 que são do tipo piezômetro) ou mesmo desgaste de tubulações antigas (provavelmente de ferro galvanizado).

No tocante à classificação das águas destinadas ao uso na agricultura, adotou-se aquela utilizada pelo *United States Salinity Laboratory-USSL* (in Feitosa e Manoel Filho, 1997), sendo uma das mais difundidas internacionalmente. Esta técnica é baseada na condutividade elétrica (C) e na razão de adsorção de sódio (RAS) das amostras, as quais são plotadas em um diagrama contendo as diferentes categorias de águas para irrigação. Estes valores denotam, em última análise, a susceptibilidade do solo à salinização, possibilitando a Agronomia identificar os tipos de cultura mais ou menos compatível com estas características físico-químicas.

Os valores da RAS são mostrados na tabela 4.2 e foram calculados através da equação abaixo, em unidades de meq/L:

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{(Ca + Mg)}{2}}}$$

Posteriormente, utilizando-se igualmente os valores de condutividade elétrica (C), os pontos correspondentes a cada amostra foram lançados no diagrama da figura 4.9, possibilitando a obtenção do tipo de classe e os principais usos na irrigação de culturas.

Parâmetros	Número de Referência dos Poços Tubulares							
	20	31	32	09	84	26	16	15
Na (meq/L)	0.398	0.644	0.311	0.548	0.759	0.605	1.977	0.483
Ca (meq/L)	0.030	0.714	0.161	0.221	0.120	0.043	0.201	0.186
Mg (meq/L)	0.600	0.573	0.060	0.262	0.211	0.082	0.221	0.071
C (μ S/cm)	51.2	196.8	39.2	120.5	142.6	71.3	271.2	79.3
RAS	0.709	0.803	0.936	1.115	1.866	2.420	4.304	1.347
C	C ₀	C ₁	C ₀	C ₁	C ₁	C ₀	C ₂	C ₀
S	S ₁	S ₁	S ₁	S ₁	S ₁	S ₁	S ₁	S ₁
Parâmetros	Número de Referência dos Poços Tubulares							
	24	22	23	11	04	02	80	30
Na (meq/L)	0.348	0.629	0.386	0.527	0.322	0.928	0.307	0.375
Ca (meq/L)	0.060	0.131	0.080	0.040	0.050	0.141	0.251	0.503
Mg (meq/L)	0.040	0.078	0.071	0.008	0.104	0.281	0.144	0.397
C (μ S/cm)	47.2	91.4	64.3	73.3	51.2	163.7	74.3	130.6
RAS	1.556	1.946	1.405	3.402	1.160	2.020	0.691	0.559
C	C ₀	C ₀	C ₀	C ₀	C ₀	C ₁	C ₀	C ₁
S	S ₁	S ₁	S ₁	S ₁	S ₁	S ₁	S ₁	S ₁

Tabela 4.2 – Valores de razão de adsorção do sódio (RAS) e condutividade elétrica (C) para os poços amostrados no setor oriental da bacia do Rio Pirangi.

Considerando um universo de 16 amostras analisadas, apenas 6 apresentaram valores de “C” iguais ou superiores a 100 μ S/cm, o qual corresponde ao valor mínimo a ser lançado no referido diagrama (figura 4.9). As demais 10 amostras apresentaram valores de “C” inferiores a 100 μ S/cm (tabela 4.2), o que classifica as mesmas como do tipo “C₀”, ou seja, águas de muito baixa salinidade que podem ser utilizadas sem restrição para a irrigação. Com relação a sodicidade, estas mesmas 10 amostras foram classificadas como do tipo “S₁” (fraco risco de formação de teores nocivos de sódio susceptível de troca). Apenas uma amostra (poço de número referencial 16), apresentou uma condutividade elétrica da ordem de 270 μ S/cm, fato que a classifica como “C₂” (salinidade média). Todavia, as características locais dos solos, neste caso predominantemente siltico-arenosos a areno-argilosos com uma lixiviação relativamente moderada, permite o cultivo de vegetais com baixa tolerância salina.

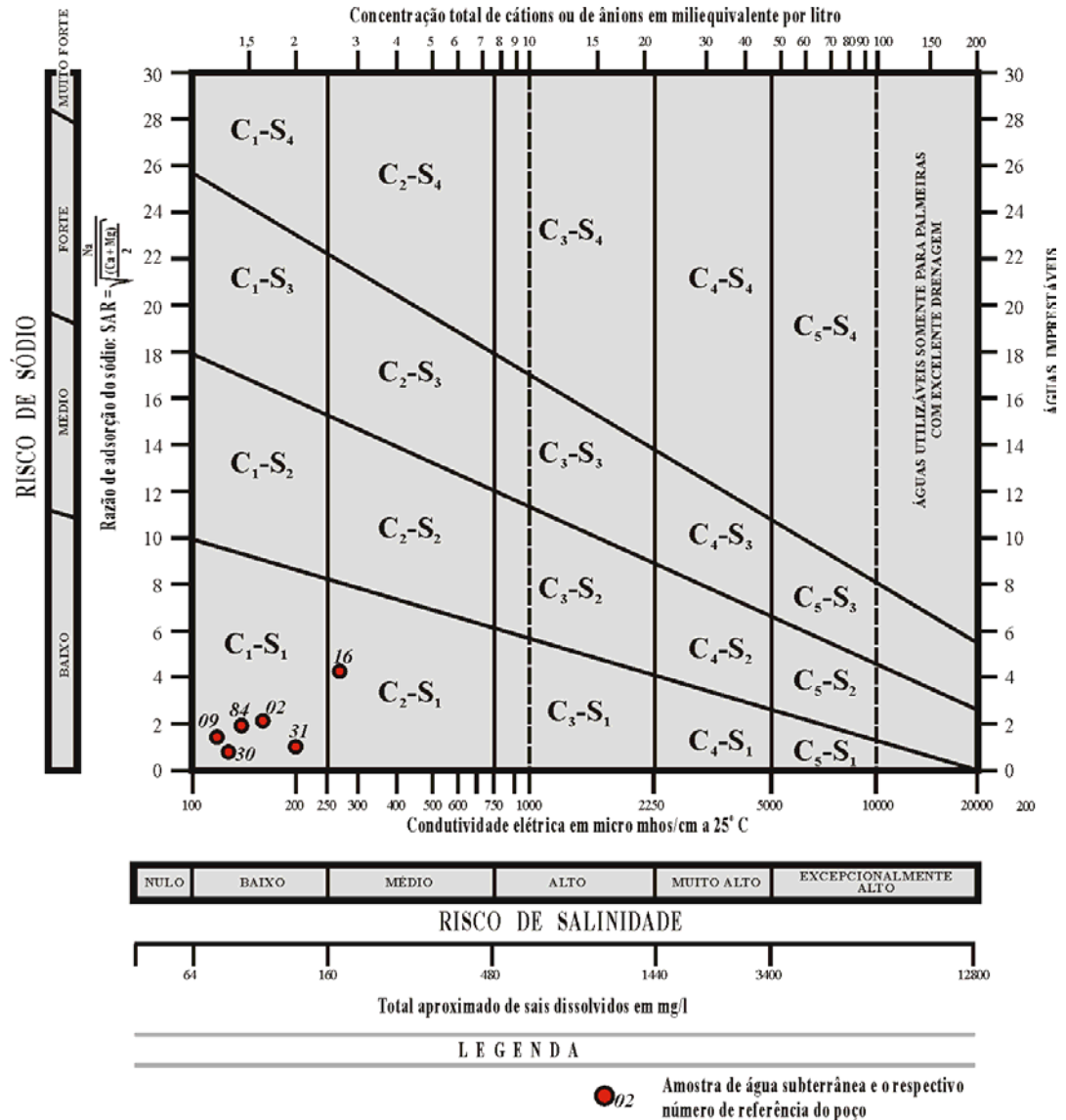


Figura 4.9 – Diagrama de classificação de águas do Aquífero Barreiras, inserido no setor oriental da bacia do Rio Pirangi, para fins de irrigação.

4.1.5.4 – O mapa de condutividade elétrica do Aquífero Barreiras

O parâmetro condutividade elétrica é amplamente utilizado na hidrogeologia, estando diretamente relacionado com as variações da mineralização das águas subterrâneas, a temperaturas constantes. Em outras palavras, a condutividade elétrica evidencia o maior ou menor grau de concentração de compostos iônicos dissolvidos na água subterrânea, associada costumeiramente ao padrão de qualidade deste manancial.

Os pontos levantados são apresentados na forma de um mapa de isolinhas, sendo este resultado da interpolação dos dados de campo efetuados através do *software*

Surfer for Windows (figura 4.10). O equipamento utilizado nas medições de campo foi um condutivímetro modelo HI933300 da Hanna Instruments, o qual já fornece valores corrigidos de acordo com a temperatura da amostra.

Os resultados obtidos com a interpolação dos dados de campo, adotado um “background” de 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$, revelaram a ocorrência de algumas anomalias relativas, aqui interpretadas como indícios de uma tendência à poluição local do aquífero. Tais anomalias são de caráter pontual, não perfazendo extensas superfícies, exceto a área da sede municipal de Parnamirim. Esta última, está associada com as condições pouco satisfatórias de esgotamento sanitário e a conseqüente disposição de esgotos em sistemas de fossas sépticas e sumidouros. Outro aspecto a se considerar é a deposição de resíduos sólidos diretamente em “lixões” sobre o solo, com partículas contaminantes atingindo as camadas aquíferas pela lixiviação de poluentes. Já os valores anômalos situados a sul de Parnamirim podem ser resultado da migração de sais dissolvidos provenientes da referida sede municipal, tendo em vista a presença de linhas de fluxo subterrâneas nesse sentido, conforme dados da potenciometria da região (ver tópico 4.1.2). A continuação desta mesma superfície anômala, localizada a leste-nordeste da localidade de Taborda, por sua vez, sugere a influência de alguns perímetros irrigados para atividades agrárias nas proximidades das margens esquerda e direita da Lagoa do Pium e norte da Lagoa do Bonfim. É notório o uso local de fertilizantes de natureza química, face à maior disponibilidade e menor preço no mercado. Somado a este fato, Lucena *et al.* (2002) caracterizaram linhas de fluxo subterrâneas a partir do sistema lacustre do Bonfim, no sentido norte até a margem direita do Riacho Taborda e já no âmbito da bacia do Rio Pirangi, o que explicaria a migração de íons que teriam atingido a zona saturada nas áreas irrigadas. Este possível processo de migração iônica na zona saturada será abordado com mais detalhes no capítulo 9 da presente tese.

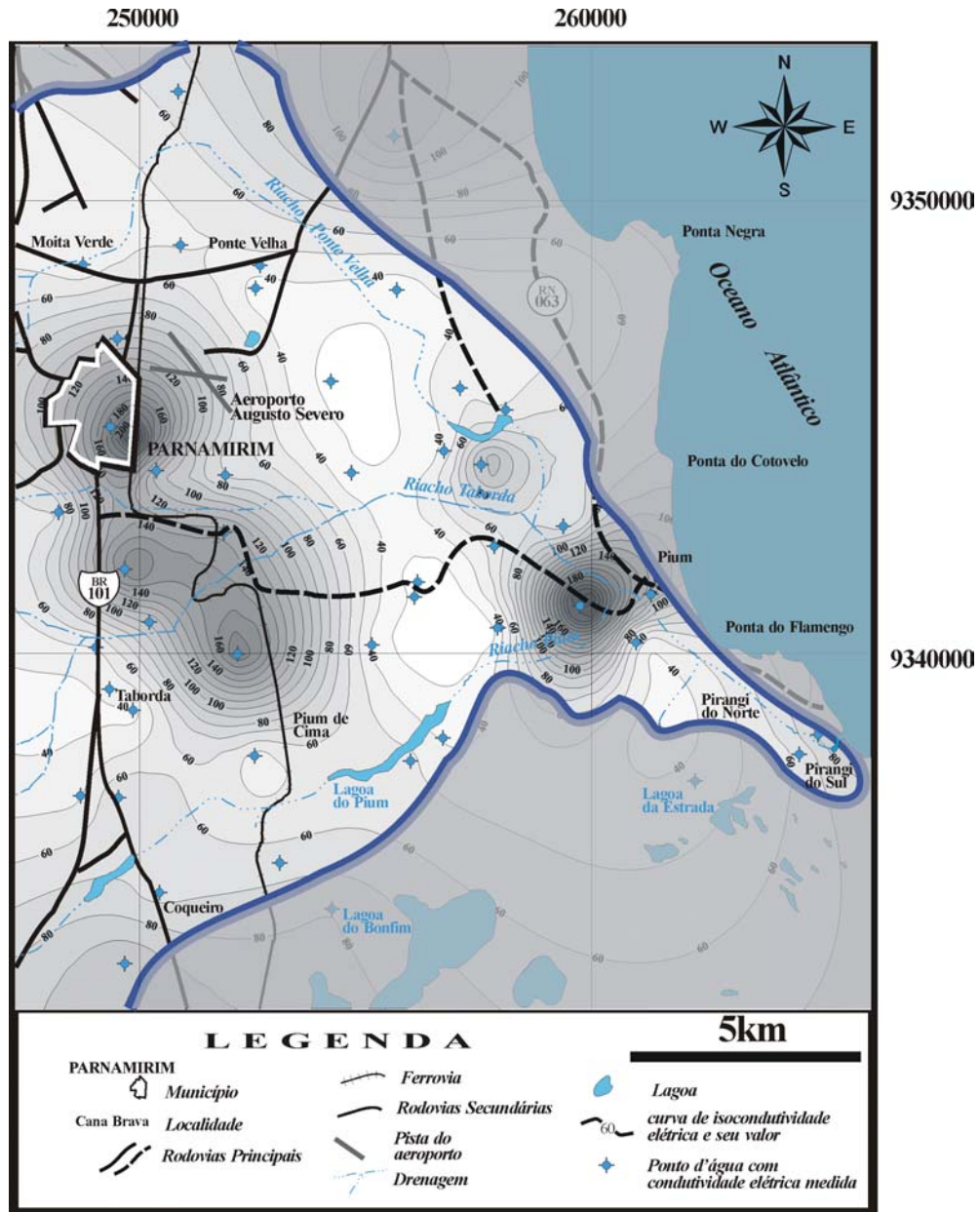


Figura 4.10 – Mapa de condutividade elétrica do Aquífero Barreiras no setor oriental da bacia do Rio Pirangi. Os pontos d'água amostrados acham-se assinalados em azul.

Em outros dois pontos do mapa destacam-se anomalias pontuais de razoável amplitude relativa, da ordem de 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 110 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A primeira, localiza-se na confluência dos riachos Pium e Taborda e deve estar relacionada também com o adensamento populacional local, refletindo a ausência de um sistema adequado de esgotamento sanitário, a exemplo da sede municipal de Parnamirim. A segunda anomalia localiza-se na margem direita da Lagoa do Jiqui, na altura da base física da

Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte-EMPARN, devendo estar associada a práticas agrárias. Esta área também recebe constantes adubações, sobretudo de natureza química, destinadas aos campos de produção de mudas e de desenvolvimento de árvores frutíferas das pesquisas agropecuárias desta empresa. A irrigação, por sua vez, é realizada por poços e adutoras provenientes da referida lagoa. Portanto, tal anomalia deve resultar da percolação de alguns desses componentes até o meio saturado, contribuindo para o aumento da salinidade local desse manancial.

4.2 – O CONTEXTO HIDROLÓGICO SUPERFICIAL

4.2.1 – A Bacia do Rio Pirangi

A bacia hidrográfica do Rio Pirangi, localizada inteiramente na mesoregião Litoral Leste do Estado do Rio Grande do Norte, possui uma área de aproximadamente 430 km². O índice pluviométrico relativamente elevado (da ordem de 1562,6 mm/ano em média para o setor oriental), associado ao fato da bacia estar esculpida totalmente em sedimentos do Grupo Barreiras (considerando o aquífero predominantemente *influyente*), origina um sistema de drenagens perenes em praticamente toda sua extensão, conforme já reportado. O Rio Pirangi nasce da confluência dos três principais tributários da bacia, que são os riachos Ponte Velha (Rio Pitimbu), Taborda-Mendes e Pium, na altura da localidade de Pium, indo desaguar na praia homônima após um percurso de 6 km.

A sua importância sob o ponto de vista da potencialidade hídrica é bastante significativa, sobretudo graças à proximidade de grandes centros como Parnamirim, Macaíba e parte da zona sul de Natal. Esta última é parcialmente abastecida pela captação da Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte-CAERN na Lagoa do Jiqui, situada no leito do Rio Pitimbu, de onde é extraída uma descarga da ordem de 12×10^6 m³/ano.

Em termos fisiográficos, vários tópicos foram levantados, incluindo a área da bacia, o comprimento do rio principal, o perímetro, a ordem de drenagem dos cursos de água e a densidade de drenagens. O rio principal recebe o nome, na nascente, de Riacho Taborda e, na sua foz, de Rio Pirangi, apresentando uma extensão total de 42 km, enquanto que os tributários, riachos Pium, Mendes, Água Vermelha, Lamarão

(Ponte Velha/Rio Pitimbu) e Rio Pirangi-Pium, possuem 16,5, 14,0, 11,2, 35,0 e 6,0 km, respectivamente; a área da bacia hidrográfica é de 430 km² e perímetro de 100 km.

Quanto ao sistema de drenagens, verifica-se que a bacia é de 3^a ordem, segundo a classificação de Strahler (*in* Guerra e Cunha, 1995), apresentando 29 segmentos de drenagens de 1^a ordem, 6 segmentos de drenagens de 2^a e um segmento de drenagem de 3^a ordem, este último constituindo-se no rio principal. Em termos de extensão dos mesmos, tem-se 53,0 km de drenagens de 1^a ordem, 69,5 km de drenagens de 2^a ordem e 26,0 km de drenagens de 3^a ordem, resultando em uma densidade de drenagem (razão entre o somatório dos cursos d'água e a área da bacia) da ordem de 0,35 km/km². A forma de escoamento geral denota uma bacia tipicamente exorrêica, enquanto que a geometria dos canais exibe um padrão paralelo a sub-paralelo com rios e riachos pouco ramificados. Tal geometria é originada por controles estruturais (conforme será discutido com detalhes no capítulo 6 da presente tese), incluindo lineamentos topográficos paralelos, ou seja, resulta da adaptação às condições tectônicas-estruturais regionais. Neste contexto, os rios Pitimbu e o próprio Pirangi atuam como eixo principal (com direção SE), onde as demais drenagens deságuam transversalmente (com direção NE). Tal fato define uma tropia (elemento textural de drenagem) do tipo bidirecional para a referida bacia.

4.2.2 – O Monitoramento de Descargas Fluviais

As estações fluviométricas foram locadas de forma a contemplar os principais cursos d'água da bacia do Rio Pirangi, incluindo entradas e saídas das lagoas do Pium e Jiqui e a foz do Rio Pirangi, num total de 06 (seis) estações (figura 4.11). Nestas estações foram realizadas medições de vazões no biênio 2000-2001, objetivando tão somente disponibilizar ordens de grandeza das descargas mensais nas referidas seções. As vazões de cada seção são dadas pelo produto da velocidade do fluxo e a área da seção transversal nestes trechos dos canais fluviais. As medidas de velocidade de fluxo d'água foram obtidas com micro-molinetes, sendo um digital da Global Water Instrumentation modelo FP101/201 e outro da General Oceanics modelo 2030R.

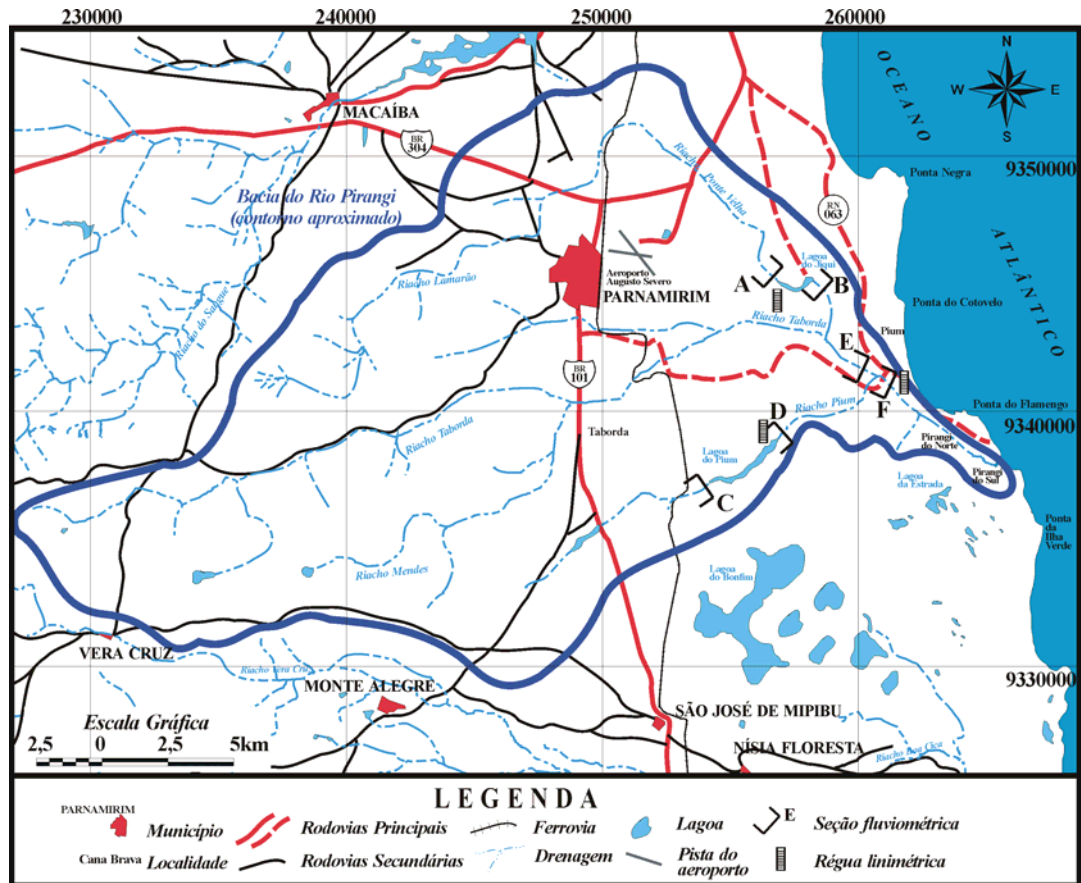


Figura 4.11 – Localização das estações de medições fluviométricas na bacia do Rio Pirangi.

Um fator relevante relacionado com as medições diz respeito à influência da maré no nível d’água do Rio Pirangi e Riacho Taborda-Mendes (na localidade de Pium, a aproximadamente 6 km da desembocadura da bacia na Praia de Pirangi do Sul), deduzida a partir do fato de que este nível apresentava variações mesmo em dias da não ocorrência de precipitações. Dessa forma, foi efetuado um monitoramento deste nível d’água ao longo de 8 horas em uma régua linimétrica na estação de medição no Rio Pirangi (estação fluviométrica “F” na figura 4.11), envolvendo uma baixa-mar e uma preamar, com a finalidade de estabelecer um horário de medição nas referidas seções, sem que estas apresentassem influência da maré.

A figura 4.12 mostra a variação do nível d’água observado na régua linimétrica, onde estabeleceu-se que os horários em que o rio flui naturalmente, ou seja, sem o “barramento” ocasionado pela maré no seu baixo curso, era aproximadamente 3 horas após a baixa-mar (período determinado para as medições). Ressalta-se que este

monitoramento foi realizado em fase de lua crescente (maré de quadratura), esperando-se, portanto, uma amplitude maior dos valores (cota maior – cota menor) em marés de sizígia (maré de lua nova ou cheia). O comportamento, no entanto, deve ser idêntico, ou seja, após aproximadamente 3 horas da baixa-mar, as leituras subseqüentes da régua são crescentes até atingir um pico de máximo (1 a 2 horas após a preamar), tornando a decrescer no sentido da baixa-mar. Análises químicas da água neste ponto do Rio Pirangi, entretanto, não revelaram índices salinos (água salobra), evidenciando que esta influência da maré neste ponto do rio é apenas de ordem física (“barramento” da água do rio pelo mar nas proximidades da desembocadura).

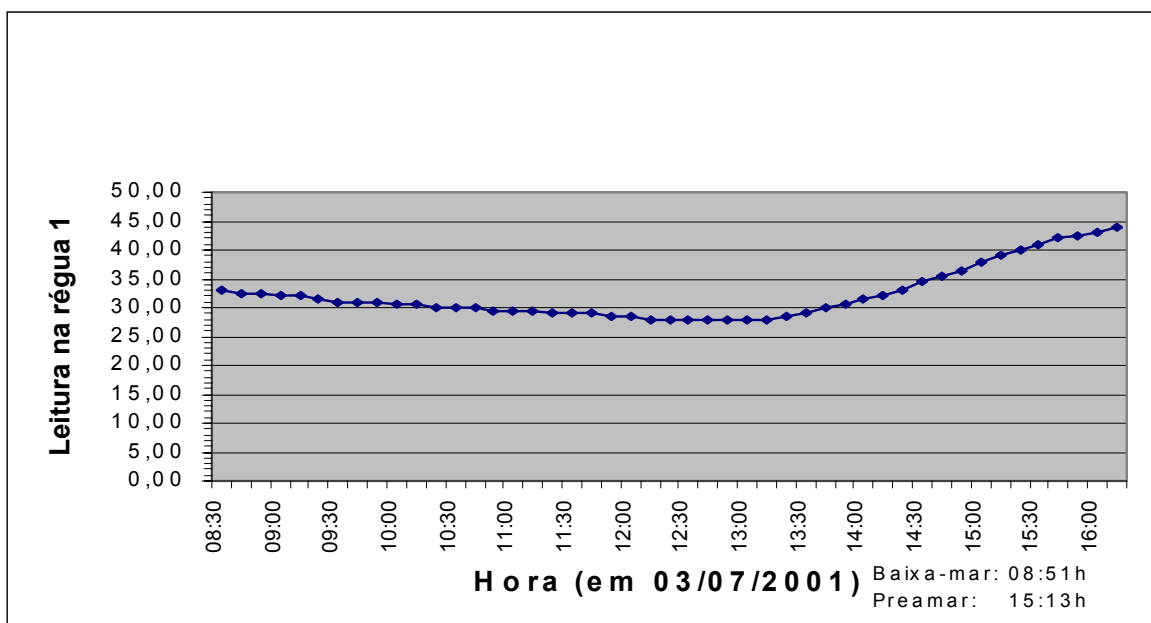


Figura 4.12 – Variação do nível d’água na régua do Rio Pirangi, decorrente da maré; estabeleceu-se que os horários de medições deveriam situar-se no período de 3 horas após a baixa-mar.

A metodologia usada para o cálculo das vazões constou da utilização de molinete para medir a velocidade do fluxo, conforme mencionado, onde em cada seção foi feito o levantamento transversal dos perfis de velocidade, calculando-se a velocidade média de cada perfil, sendo o somatório do produto da velocidade média pela área de influência a vazão total do rio. Os perfis de velocidade de cada seção dos rios a montante e a jusante das lagoas do Jiqui e Pium e no Rio Pirangi foram espaçadas de 0,5 m enquanto que a seção no Riacho Taborda/Mendes foi de 1,0 m. As

referidas vazões podem ser visualizadas na tabela 4.3, na qual se percebe a resposta dos tributários da bacia às precipitações, particularmente durante e após o período chuvoso da região.

No Rio Pitimbu, os valores de vazão encontrados na entrada da Lagoa do Jiqui mostraram-se sistematicamente maiores que aqueles de saída da lagoa, compatível portanto com a prática de retirada d'água por parte da CAERN (abastecimento público de parte da zona sul de Natal) e da EMPARN (destinada à irrigação de 36 ha na base física do Jiqui). Neste caso, o balanço hídrico superficial prevalece à contribuição subterrânea, mesmo considerando que a Lagoa do Jiqui situa-se numa zona de descarga do aquífero.

No Riacho Pium, por sua vez, observa-se uma situação inversa, ou seja, as descargas de saída da Lagoa do Pium são sistematicamente maiores que aquelas de entrada. Esta conjuntura decorre da concentração de importantes linhas de fluxo subterrâneas no sentido da lagoa, sobretudo a partir de sua metade e no sentido de sua juzante (conforme discutido no tópico 4.1.2), incrementando as vazões de saída da referida lagoa (considerando um volume estável da mesma, já que as medições mensais foram sempre efetuadas no mesmo dia, a exemplo da Lagoa do Jiqui). Nesse caso, tem-se um predomínio da contribuição subterrânea em relação ao balanço hídrico superficial local.

4.2.3 – As Principais Lagoas

As lagoas do Jiqui e Pium, por se tratarem de reservas hídricas estratégicas do setor oriental da bacia do Rio Pirangi, foram alvo de estudos específicos recentes, com destaque para o trabalho de Santos e Lucena (2003). Estes autores efetuaram um levantamento batimétrico automatizado (envolvendo um sistema integrado com Sistema de Posicionamento Global-GPS de precisão métrica a submétrica, *notebook* e ecobatímetro) nestes corpos d'água, com vistas a disponibilizar os respectivos volumes armazenados e possibilitar um acompanhamento mensal destas reservas hídricas.

MED. MENSAIS Q (m ³ /s)	ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS					
	Rio Pitimbu (in Lagoa Jiqui)-A	Rio Pitimbu (out Lagoa Jiqui)-B	Rch. Pium (in Lagoa Pium)-C	Rch. Pium (out Lagoa Pium)-D	Rch. Taborda- E	Rio Pirangi- F
JANEIRO/2000	-	-	-	-	-	-
FEVEREIRO/2000	-	-	-	-	1,0186	1,3705
MARÇO/2000	0,4267	-	0,0784	0,3085	0,8328	1,1409
ABRIL/2000	0,7486	0,3226	0,1258	0,4290	1,6597	2,2908
MAIO/2000	0,8054	0,4820	0,1429	0,2021	1,9496	2,5576
JUNHO/2000	3,3254	3,2569	0,1678	0,8336	-	-
JULHO/2000	3,0253	-	0,2501	1,0839	-	6,9656
AGOSTO/2000	2,8795	2,6549	0,3420	1,4226	5,3040	7,8391
SETEMBRO/2000	3,3387	3,1438	0,4017	1,2336	4,4212	7,5157
OUTUBRO/2000	2,4768	2,2181	0,3896	1,0702	4,1373	5,5374
NOVEMBRO/2000	2,3982	2,0076	0,3605	1,0362	3,5197	5,4746
DEZEMBRO/2000	2,06874	1,82837	0,32799	0,92808	3,12841	4,92328
JANEIRO/2001	-	-	0,33094	-	-	-
FEVEREIRO/2001	-	-	-	-	-	-
MARÇO/2001	2,02583	1,48393	0,31107	1,17835	3,88875	6,95664
ABRIL/2001	1,66649	1,48886	0,38560	0,73313	3,34195	4,62655
MAIO/2001	1,34412	0,90022	0,25743	0,70395	2,40389	3,21716
JUNHO/2001	1,59480	1,36667	0,17793	0,74822	-	3,60115
JULHO/2001	1,45440	0,90392	0,11353	0,51002	2,33858	3,45646
AGOSTO/2001	1,12501	0,81524	0,09799	0,41457	2,02763	3,07435
SETEMBRO/2001	1,04101	0,60978	0,08546	0,34740	1,55175	2,50390
OUTUBRO/2001	0,90082	0,51586	0,08632	0,33901	1,77673	2,55696
NOVEMBRO/2001	0,79617	0,37974	0,14810	0,20684	1,42359	2,09665
DEZEMBRO/2001	0,80006	0,37312	0,10703	0,28344	1,39744	2,30853

Tabela 4.3 – Evolução mensal das descargas nas seções fluviométricas selecionadas.

4.2.3.1 – A Lagoa do Jiqui

A Lagoa do Jiqui localiza-se em Parnamirim, próximo ao limite com a zona sul da capital Natal, possuindo um comprimento de 1210 m e uma largura máxima de 200 m na seção de captação da CAERN. Encontra-se inserida no próprio leito do Rio Pitimbu, o qual possui uma bacia hidrográfica de 98 km². Este mesmo rio drena a lagoa, indo desaguar no Riacho Taborda, na localidade Caturana. Sua exploração teve início nos anos 60 através de poços amazonas nas suas margens e, posteriormente, com uma tomada d'água na própria lagoa. Atualmente, somaram-se a este sistema 3 poços tubulares, os quais respondem pelo abastecimento de boa parte da zona sul de Natal (cerca de 35%). Observações locais indicam uma íntima relação deste manancial com o Aquífero Barreiras, sendo este último de caráter influente.

Os resultados obtidos por Santos e Lucena (2003) evidenciaram um volume acumulado de 466.093 m³, numa área de 15,25 ha, uma profundidade máxima de 5,5 m, além do fato de que o fundo da lagoa situa-se a 4,45 m acima do nível médio do mar. As figuras 4.13 e 4.14 exibem a síntese do levantamento batimétrico e a curva “cota x área x volume” da Lagoa do Jiqui.

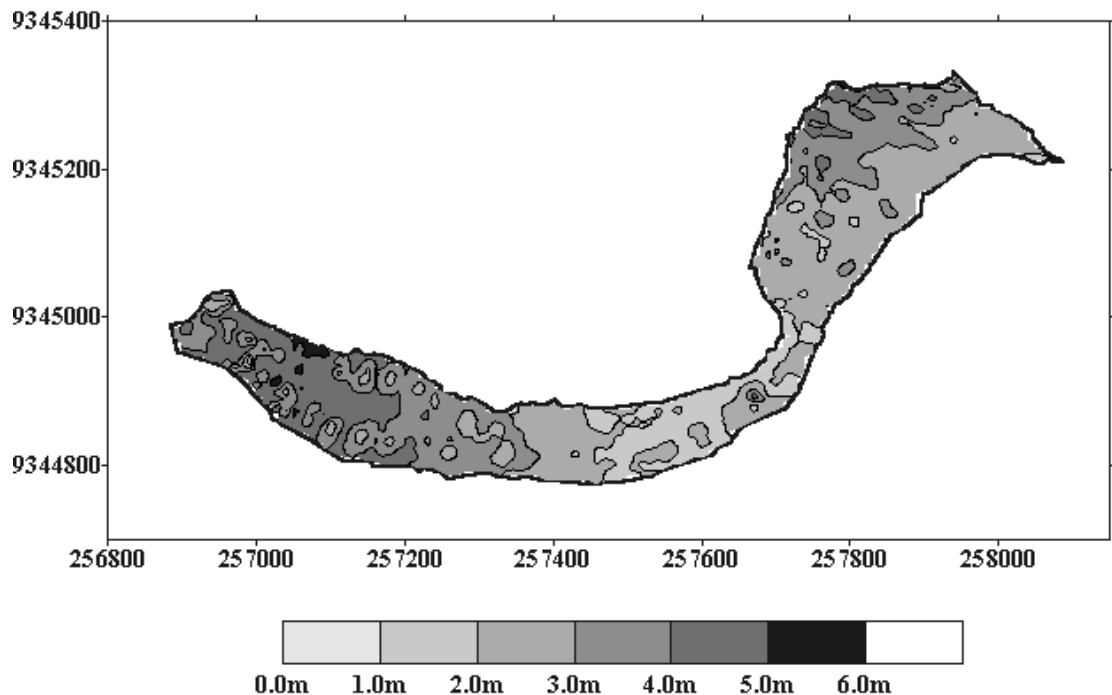


Figura 4.13 – Mapa da bacia hidráulica e das curvas iso-batimétricas da Lagoa do Jiqui, segundo Santos e Lucena (2003).

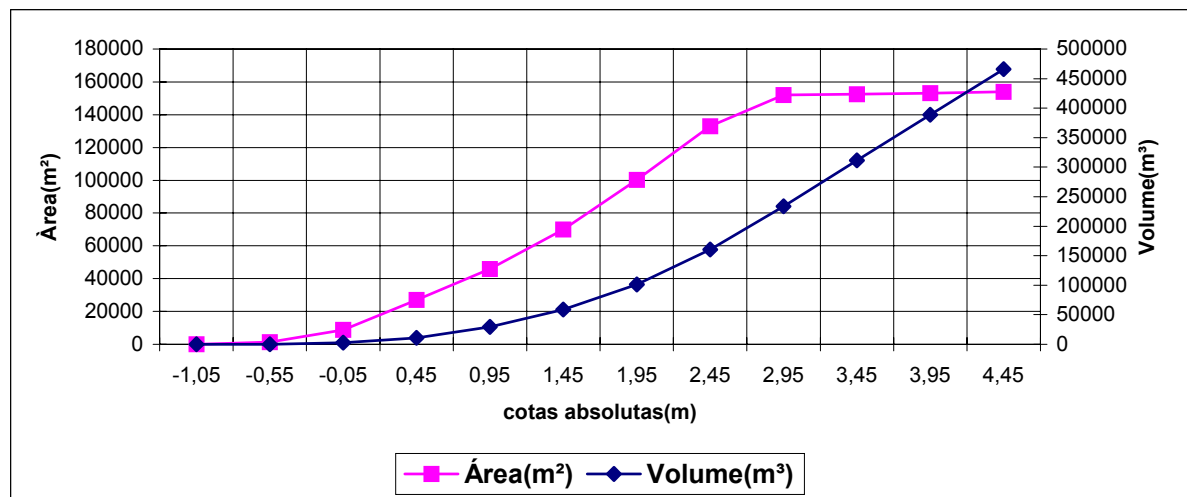


Figura 4.14 – Curva cota-área-volume da lagoa do Jiqui, segundo Santos e Lucena (2003).

4.2.3.2 – A Lagoa do Pium

A Lagoa do Pium localiza-se nas proximidades da localidade de Pium de Cima, município de Nísia Floresta, distando cerca de 6 km a sul da Lagoa do Jiqui. Acha-se inserida no leito do Riacho Pium, o qual possui uma bacia hidrográfica de 34 km², sendo drenada pelo mesmo canal fluvial até o Rio Pirangi em Pium. A lagoa apresenta uma forma estreita e alongada, na direção NE, com 2715 m de comprimento e largura máxima de 250 m e, a exemplo da Lagoa do Jiqui, exibe uma considerável interconexão hidráulica com o Aquífero Barreiras.

Os resultados obtidos por Santos e Lucena (2003) dão conta de um volume acumulado de 4.266.550 m³ em uma área de 49,44 ha, uma profundidade máxima de 13,5 m e o fundo da lagoa situando-se a 20,91 m acima do nível médio do mar. Observou-se ainda uma profundidade em torno de 9,5 m em praticamente toda sua extensão. As figuras 4.15 e 4.16 exibem a síntese do levantamento batimétrico e a curva “cota x área x volume” da Lagoa do Pium.

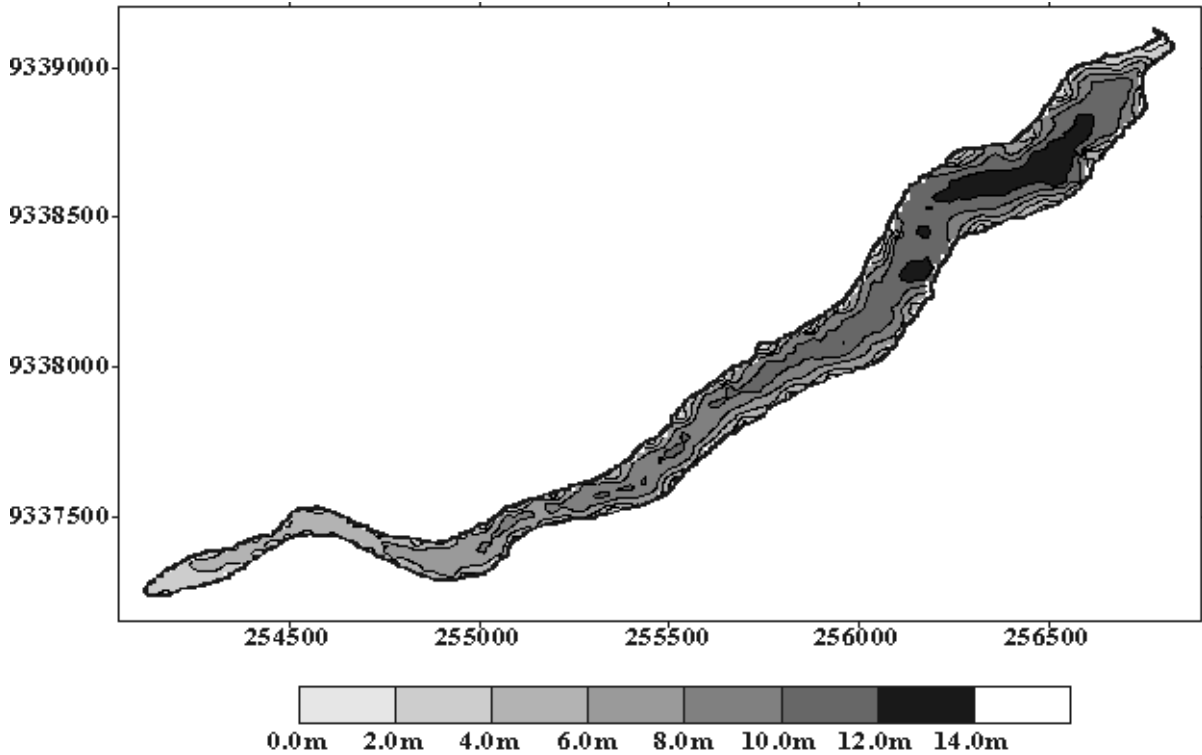


Figura 4.15 – Mapa da bacia hidráulica e das curvas iso-batimétricas da Lagoa do Pium, segundo Santos e Lucena (2003).

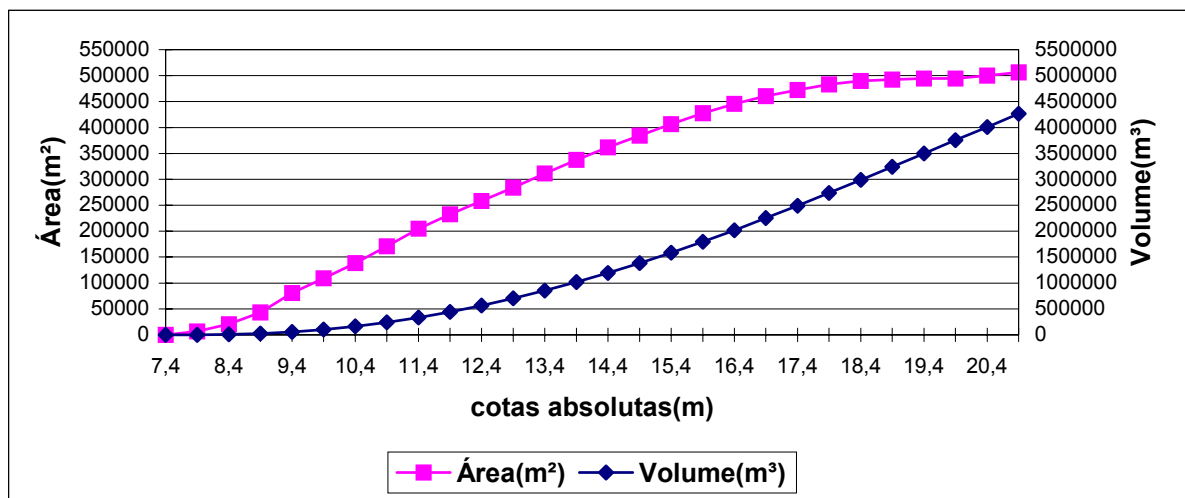


Figura 4.16 – Curva cota-área-volume da lagoa do Pium, segundo Santos e Lucena (2003).

4.2.4 – A Relação Entre Mananciais Subterrâneos e Superficiais

Em termos gerais, o aquífero apresenta relação de influência com todo o contexto hídrico superficial, incluindo as lagoas do Jiqui e Pium, rios e riachos da área. A exceção deve ser creditada tão somente a um curto período de tempo,

invariavelmente logo após a consolidação do período chuvoso no litoral leste do Rio Grande do Norte (Maio-Junho), conforme discutido no capítulo 2 da presente tese. Esta observação decorre do intervalo de tempo entre o aumento do volume d'água dos rios e riachos, proporcionado pela precipitação direta sobre estas drenagens, e a resposta posterior do aquífero às chuvas (subida da superfície potenciométrica).

Os valores relativos às descargas do Rio Pirangi (*output* da bacia), confrontados com a pluviometria no período (ver figura 4.17), podem fornecer uma idéia inicial do fluxo de base, responsável pelo regime perene do referido canal e de todo o setor leste desta bacia de drenagem. Tomando-se como referência o período de Janeiro de 2000 a Janeiro de 2001 (considerando este um ano de distribuição pluviométrica próxima da normal para a região), além de dados imediatamente anteriores a este intervalo, com valores de precipitação nulos ou inferiores a 10 mm conforme o setor de meteorologia da EMPARN, as descargas observadas em Fevereiro e Março de 2000 (ver tabela 4.3) podem ser encaradas como sendo do período de recessão do rio. Dessa forma, pode-se dizer que o escoamento do Rio Pirangi durante este período é associado ao fluxo de base proveniente do Aquífero Barreiras. Projetando-se a descarga medida no mês de Março/2000 ($1,14 \text{ m}^3/\text{s}$) e adotando-se um coeficiente de recessão de $0,05 \text{ dia}^{-1}$ na equação de recessão de um rio ($Q_t = Q_0 \exp(-\alpha t)$, *in* Feitosa & Manoel Filho, 1997), a descarga relativa ao fluxo de base, decorridos 30 dias após a cessão do evento de recarga, seria da ordem de $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$.

As principais lagoas da área, Jiqui e Pium, acham-se igualmente conectadas hidráulicamente com o sistema aquífero. A Lagoa do Jiqui situa-se no início da grande zona de descarga subterrânea regional (ver tópico 4.1.2), atuando assim como exutório natural do Aquífero Barreiras no setor norte-nordeste da bacia do Rio Pirangi. Já a Lagoa do Pium, mostra-se como um reservatório bastante singular, sobretudo em relação às suas descargas medidas de entrada (*in*) e saída (*out*) apresentadas na tabela 4.3.

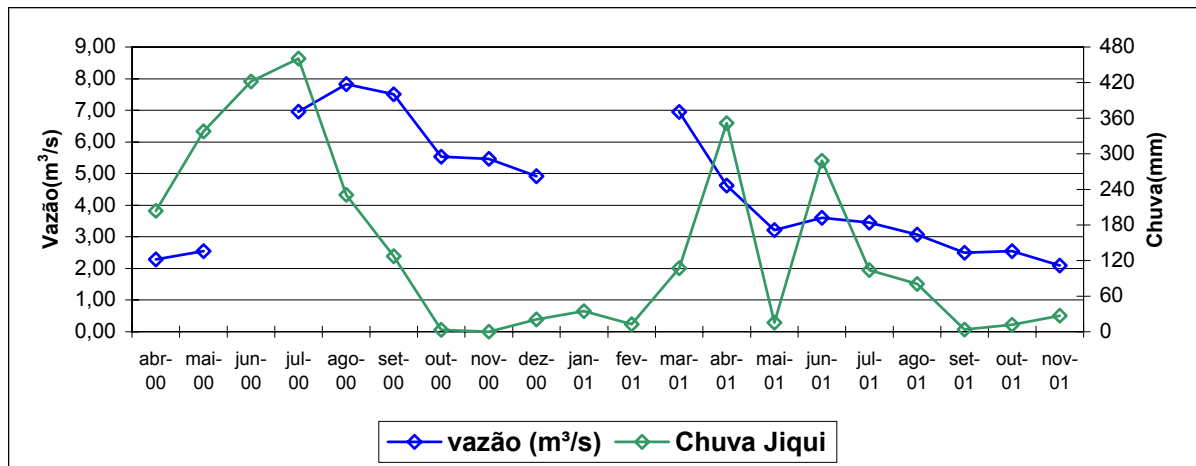


Figura 4.17 – Evolução das descargas do Rio Pirangi com as precipitações mensais observadas no posto pluviométrico da base física da EMPARN, situado na margem direita da Lagoa do Jiqui.

Estas vazões de saída da Lagoa do Pium são sistematicamente maiores de que as vazões de entrada, sem que seu volume acumulado sofra variações consideráveis, de acordo com observações linimétricas diárias efetuadas ao longo do biênio 2000-2001. A aproximada regularização da descarga na lagoa deve ser creditada à contribuição subterrânea do sistema Bonfim, de acordo com a potenciométrica da área (tópico 4.1.2), podendo ser estimada quantitativamente através da expressão (Feitosa e Manoel Filho, 1997):

$$Q = T i l$$

Adotando-se uma transmissividade de $5,5 \text{ m}^2/\text{h}$ (modificado de Costa, 1997), um gradiente hidráulico de $0,0108$ (avaliado no mapa da figura 4.1) e uma frente de escoamento de 3780 metros (figura 4.1), a descarga subterrânea que aporta na margem direita da Lagoa do Pium, proveniente do sistema Bonfim, é de aproximadamente $224 \text{ m}^3/\text{h}$.

5 – ANÁLISE GRAVIMÉTRICA

A caracterização tectono-estrutural da área, sobre a qual o contexto hidrogeológico está inserido, com vistas aos objetivos desta pesquisa, foi realizada através da análise conjunta de dados de geofísica profunda (gravimetria), geomorfológicos (topográficos e hidrográficos), correlação litológica em perfis de poços, além de levantamentos e averiguações de campo. Os capítulos 5 (análise gravimétrica), 6 (análise topográfica e hidrográfica) e 7 (síntese da estruturação regional) que se seguem representam uma sinopse dos estudos desenvolvidos no Programa de Pesquisa e Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica-PPGG da UFRN pelo autor da presente tese (Lucena, 1999), por ocasião do seu curso de mestrado nesta instituição. Estes estudos abrangeram a região litorânea compreendida entre os municípios de Natal e Nísia Floresta, envolvendo uma parte da área da bacia do Rio Pirangi, o sistema lacustre do Bonfim e o baixo curso do Rio Trairi (bacia homônima). Os resultados ora apresentados, contudo, incluem adicionalmente levantamentos de campo realizados em toda a área da bacia do Rio Pirangi, além de análises geomorfológicas e seções geológicas específicas da referida bacia.

O estudo gravimétrico foi realizado numa área mais ampla do que aquela delimitada no mapeamento geológico, de modo a melhor caracterizar o campo anômalo. O objetivo deste estudo foi evidenciar possíveis relações entre a estruturação profunda (embasamento cristalino) e aquela caracterizada nas seqüências sobrepostas.

5.1 – A BASE DE DADOS GRAVIMÉTRICOS

Os dados gravimétricos utilizados fazem parte do banco de dados do Grupo de Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN. Os levantamentos foram realizados com gravímetros do tipo LaCoste & Romberg, altimetria efetuada com barômetros (com correções de temperaturas seca e úmida) e posicionamento horizontal por GPS. A área alvo deste estudo tem cerca de 3.000 km² e contém 429 estações, representando uma densidade média de 0,14 estações/km². O mapa de anomalias Bouguer, apresentado na figura 5.1, é resultante da interpolação dos dados,

utilizando o método *kriging*, em uma malha retangular com 40 linhas na direção N-S, espaçadas de 1,36 km, e 50 linhas na direção E-W, espaçadas de 1,35 km.

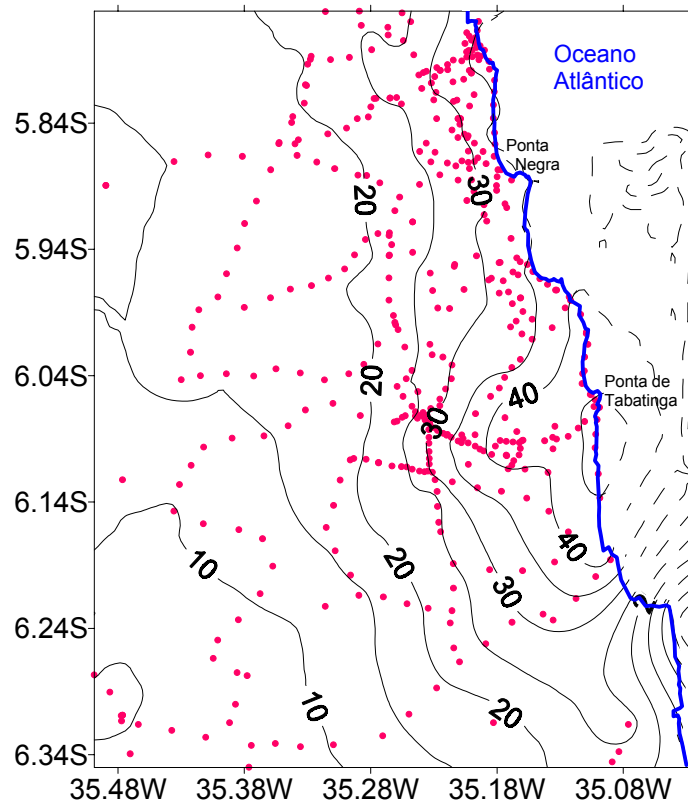


Figura 5.1 – Mapa Bouguer da região estudada. Intervalo de contorno: 5 mGal. As estações gravimétricas estão assinaladas por pontos vermelhos.

5.2 – A SEPARAÇÃO REGIONAL X RESIDUAL DO MAPA BOUGUER

O campo Bouguer da área é dominado por dois efeitos regionais. O primeiro é o forte gradiente, de oeste para leste, com as curvas isogálicas aproximadamente paralelas à linha de costa, que é provocado pela diminuição da profundidade da descontinuidade de Mohorovicic próximo à costa, associado à transição de crosta continental para crosta oceânica. Este gradiente é localmente bastante acentuado, tendo em vista a região apresentar uma plataforma continental de largura comparavelmente reduzida, o que ocasiona um mascaramento das anomalias residuais negativas provocadas pela coluna sedimentar local. O segundo efeito é uma grande anomalia positiva, situada nas proximidades da Ponta de Tabatinga, que foi atribuída por Rand (1977) e Rand e Manso (1990) à ocorrência de rochas máficas/ultramáficas

mais rasas, relacionadas a um antigo *hot spot* fragmentado por ocasião da separação continental África-América do Sul.

Objetivando realçar as anomalias locais, realizou-se uma separação do mapa Bouguer em componentes regionais e residuais. A metodologia usada foi desenvolvida por Beltrão *et al.* (1991) e consiste em estimar o campo regional através de um ajuste polinomial, utilizando critérios estatísticos robustos de ajuste. Estes critérios tendem a concentrar os resíduos onde é grande o desajuste entre os dados observados e o polinômio ajustado, reforçando assim o isolamento de feições residuais do campo observado. O grau do polinômio deve ser escolhido de maneira que a componente regional incorpore as feições esperadas pelo intérprete, consistindo, deste modo, numa etapa interpretativa (e não automática). O polinômio de grau seis (figura 5.2) foi o que mais adequadamente incorporou as feições acima descritas para o campo regional; o campo residual associado está mostrado na figura 5.3. Os valores situados no mar devem ser encarados com reservas, devido à ausência de estações, motivo pelo qual as anomalias são mostradas em linhas tracejadas.

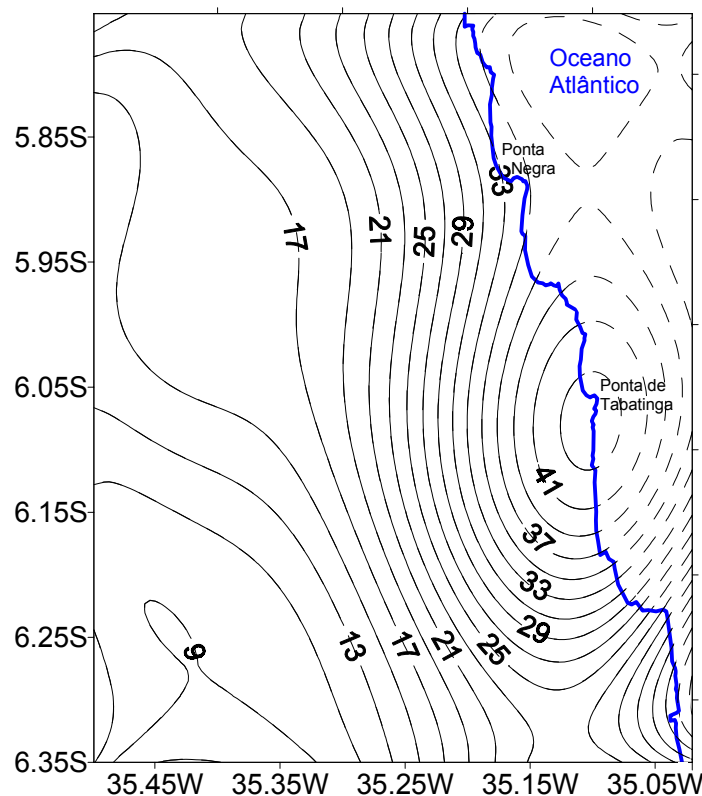


Figura 5.2 – Mapa gravimétrico regional. Intervalo de contorno: 2 mGal.

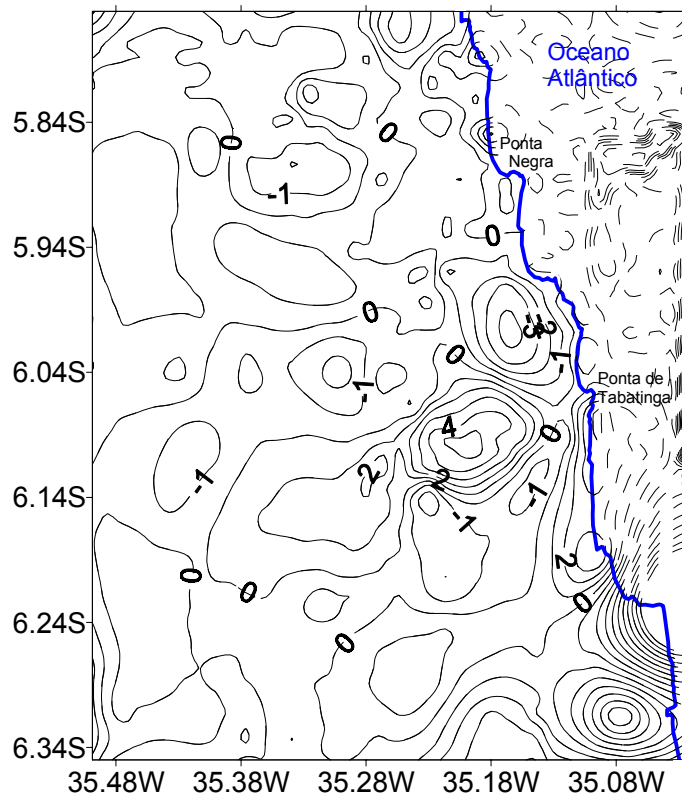


Figura 5.3 – Mapa gravimétrico residual. Intervalo de contorno: 2 mGal.

5.3 – INTERPRETAÇÃO DO MAPA GRAVIMÉTRICO RESIDUAL

O campo residual foi interpretado com base em um modelo simples, constituído por blocos de embasamento cristalino sotopostos à coluna sedimentar, admitindo-se que os contrastes de densidade são lateralmente uniformes dentro de cada unidade. Dessa forma, altos e baixos gravimétricos são associados com soerguimentos e rebaixamentos do embasamento, respectivamente, estando estes rebaixamentos associados com aumentos de espessuras da coluna sedimentar.

Dois aspectos são predominantes no tocante à interpretação do mapa gravimétrico residual (figura 5.4) associado ao regional de grau 6. O primeiro é a ocorrência de altos e baixos gravimétricos, com alguns se apresentando na forma de extensas superfícies contínuas, representando altos e baixos estruturais internos da bacia costeira, respectivamente. Entretanto, determinados altos gravimétricos da figura 5.4 não se enquadram, a princípio, no conceito específico de alto estrutural interno, ou seja, não se adaptam ao modelo interpretativo ora adotado. Este parece ser

o caso das anomalias positivas da ordem de 4 mGal, nas proximidades da Ponta de Tabatinga, correspondendo ao alto gravimétrico da praia homônima, bem como no extremo sudeste do mapa. Tais feições, conforme já reportado, estariam relacionadas com intrusões básicas na crosta, embora não deva ser descartada a possibilidade da ocorrência conjunta de *horsts* nestes locais. Outra importante feição diz respeito a um baixo gravimétrico, de magnitude -4 mGal, imediatamente contíguo à anomalia de Tabatinga e estendendo-se no sentido noroeste. Este baixo gravimétrico é associado ao *Graben* Papary, descrito por Lucena e Queiroz (1996) e Lucena (1999), e expõe o contraste de densidade decorrente do aumento da coluna sedimentar neste bloco estrutural.

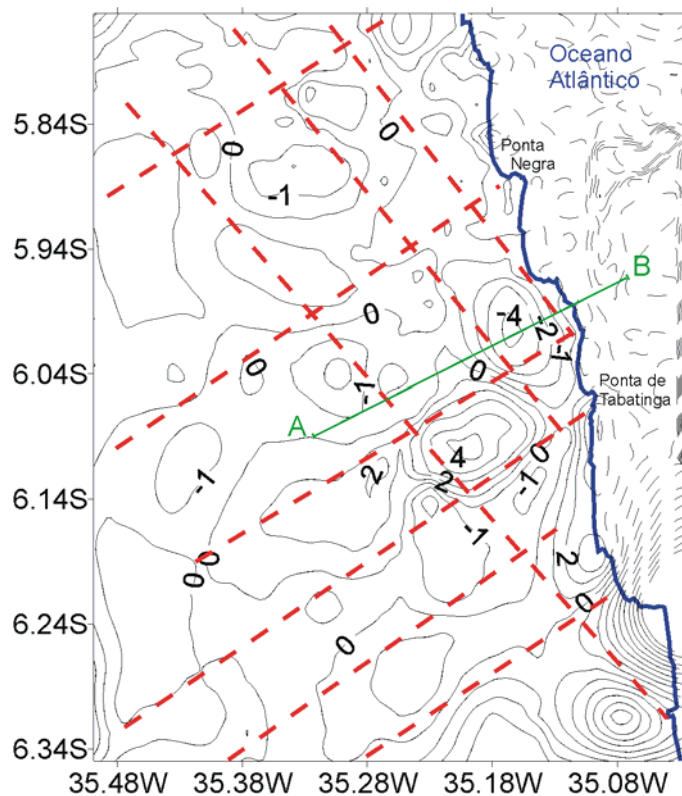


Figura 5.4 – Mapa residual interpretado. Intervalo de contorno: 2 mGal. Os segmentos tracejados representam os principais alinhamentos gravimétricos do embasamento cristalino. A-B: perfil gravimétrico.

O segundo aspecto importante na interpretação do mapa residual envolve a caracterização de alinhamentos gravimétricos, definidos com base em continuidade de isogálicas e/ou limites entre anomalias positivas e negativas, sendo traçados

aproximadamente nas bordas de tais anomalias. Estes alinhamentos configuraram-se segundo as direções noroeste e nordeste, subsidiando a análise do arcabouço tectono-estrutural predominante no embasamento cristalino e na seqüência sedimentar mesozóica sobreposta. Essa avaliação encontra respaldo em observações de campo, em afloramentos do embasamento cristalino a oeste da área, bem como em trabalhos envolvendo ramificações do Lineamento Patos na costa do Rio Grande do Norte e Paraíba (Bezerra *et al.*, 1994).

Um perfil gravimétrico de direção SW-NE (A-B na figura 5.4), foi elaborado com vistas a estimar espessuras de toda a seqüência fanerozóica da bacia costeira na área considerada. Este perfil, confeccionado a partir de dados provenientes do mapa residual, revelou valores de espessura que podem atingir 650 m no âmbito da anomalia negativa de -4 mGal (figura 5.5). Vale ressaltar que os pontos (medidas) no mar foram desprezados, conforme reportado no início desta seção. A profundidade de 650 m deve ser entendida como uma estimativa mínima, uma vez que foi adotado um contraste de densidade entre os sedimentos e o embasamento igual a $-0,20$ g/cm³. Face aos efeitos de compactação dos sedimentos (produzido pelo próprio peso da coluna sedimentar), este contraste tende a ser menor, o que implicaria numa profundidade maior para o embasamento. Outro fato que igualmente sugere que o embasamento esteja situado numa maior profundidade diz respeito ao nível de base adotado no presente modelamento. Este nível de base foi considerado como sendo igual a zero, de modo a ficar consistente com o máximo valor de anomalia residual (em torno de $0,3$ mGal). Tal consideração, no entanto, implica na suposição de que o embasamento é praticamente aflorante no ponto em que a anomalia gravimétrica é zero, o que não pode ser comprovado para a área. Dessa forma, adotar-se um nível de base abaixo da superfície da terra traz como conseqüência um acréscimo no valor de profundidade estimado para o embasamento.

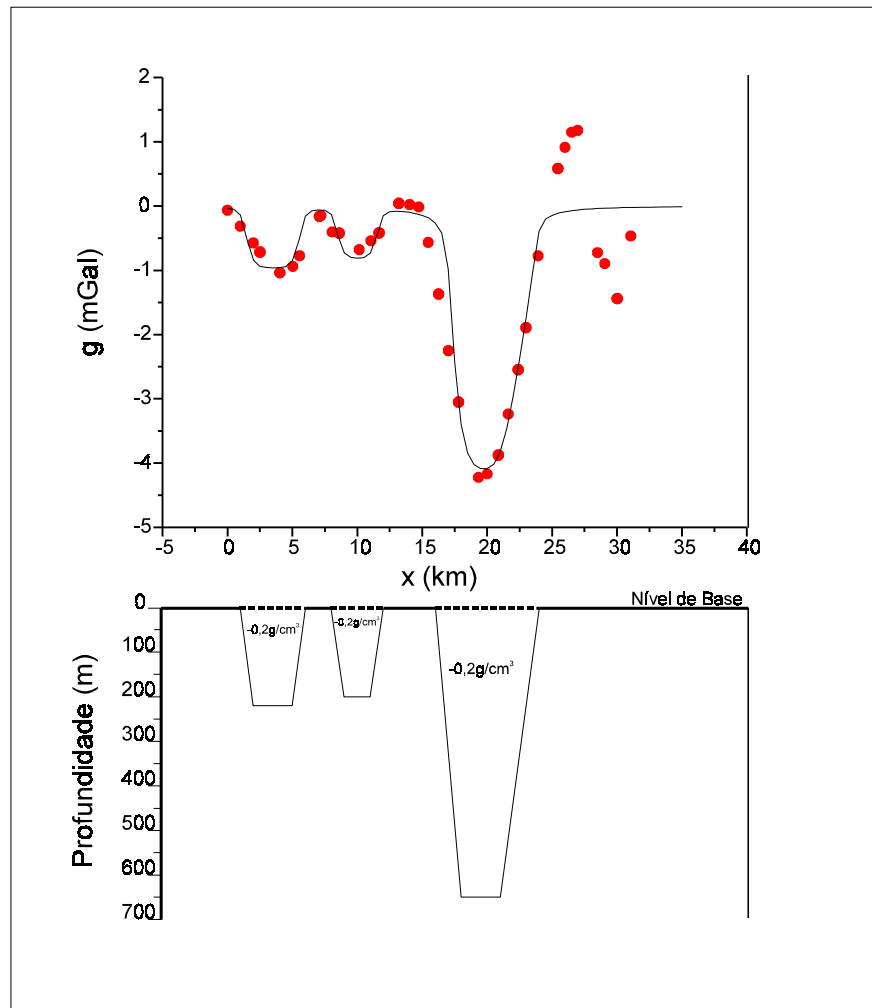


Figura 5.5 – Perfil gravimétrico A-B (ver figura 5.4) com estimativas de espessuras totais da bacia sedimentar costeira na área; os pontos vermelhos referem-se às medidas, enquanto que a curva contínua representa o modelo obtido de distribuição de densidades. A estrutura mais profunda corresponde ao *Graben Papary*.

6 – ANÁLISE TOPOGRÁFICA E HIDROGRÁFICA

Estudos de natureza geomorfológica e hidrográfica são fundamentais para a caracterização estrutural de uma área, especialmente em terrenos sedimentares. Algumas feições individualizadas em determinados tipos de relevo, bem como anomalias na rede de drenagem, podem estar refletindo a ocorrência de estruturas ativas encobertas, que não apresentam expressão superficial significativa. As várias formas de relevo, em particular, resultam da atuação de fatores exógenos e endógenos à superfície do planeta. Entende-se por fatores exógenos todos aqueles envolvidos na interação atmosfera-hidrosfera-litosfera, e endógenos, atividades que envolvem variações físicas e químicas ou movimento de rochas no interior da Terra (Guerra & Cunha, 1995). As forças derivadas desses processos atuam modelando a superfície, buscando constantemente uma situação de equilíbrio, seja a nível global (caso dos processos orogênicos e da tectônica de placas) ou local (uma pequena escarpa gerada por um falhamento, por exemplo).

Diversas pesquisas foram realizadas nesse campo, alcançando resultados bastante satisfatórios. Dentre estas, no Estado do Rio Grande do Norte, citam-se os estudos morfo-neotectônicos no baixo curso do Rio Açu (Fonseca, 1996) e a avaliação de reativações recentes de estruturas no contexto da Bacia Potiguar (Caldas, 1998; Dantas, 1998).

6.1 – TOPOGRAFIA

6.1.1 – A Base de Dados Topográficos

O estudo topográfico da área da Bacia do Rio Pirangi e adjacências foi realizado a partir de um levantamento mais amplo, extrapolando-se os limites definidos no mapeamento geológico, objetivando-se uma melhor visualização das feições locais no contexto regional, a exemplo do procedimento adotado na análise gravimétrica. Foram utilizadas 678 cotas altimétricas, oriundas de barometria com correção de temperaturas úmida e seca, cartas topográficas da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste-SUDENE (folhas SB.25-V-C-V-Natal e SB.25-Y-A-II/III-São José de Mipibu, incluindo referências de nível), cotas batimétricas absolutas

das principais lagoas do Sistema Lacustre do Bonfim (Costa, 1997) e pontos de cota virtualmente iguais a zero, tomados ao longo da linha de costa (tabela 6.1). Os pontos acham-se dispostos numa área de aproximadamente 1.500 km², originando uma densidade média de 0,45 pontos/km².

DADOS / ORIGEM	NÚMERO DE PONTOS
Barometria	374
Cartas topográficas e RN's	158
Linha de costa (nível do mar)	136
Cotas batimétricas absolutas de lagoas	10
Total	678

Tabela 6.1 – Origem e distribuição dos dados altimétricos

A interpolação destes dados foi feita segundo o método *kriging*, utilizando-se o software *Surfer for Windows* na sua versão 6.0. Foi gerada uma malha retangular com 37 linhas na direção N-S e 50 linhas na direção E-W, espaçadas de 1,43 e 1,41 km, respectivamente. O mapa altimétrico resultante está mostrado na figura 6.1. O método *kriging* foi escolhido por produzir contornos bem definidos, inclusive a partir de pontos irregularmente espaçados, e realçar *trends* existentes nos dados pelo fato de que valores de magnitudes semelhantes tendem a ser conectados ao longo de alinhamentos, ao invés de serem isolados, incorporando assim eventuais anisotropias.

6.1.2 – A Separação Regional x Residual do Mapa Topográfico

O mapa da figura 6.1 retrata as características gerais do comportamento topográfico da área estudada. Contudo, variações plano-altimétricas regionais normalmente esperadas, como por exemplo a tendência de diminuição no sentido do mar, podem mascarar feições locais potencialmente importantes para a caracterização estrutural da área. Diante disso, optou-se por realizar uma separação do mapa topográfico em componentes regionais e residuais, sendo o mapa topográfico residual

obtido simplesmente pela diferença entre o campo topográfico e a componente regional.

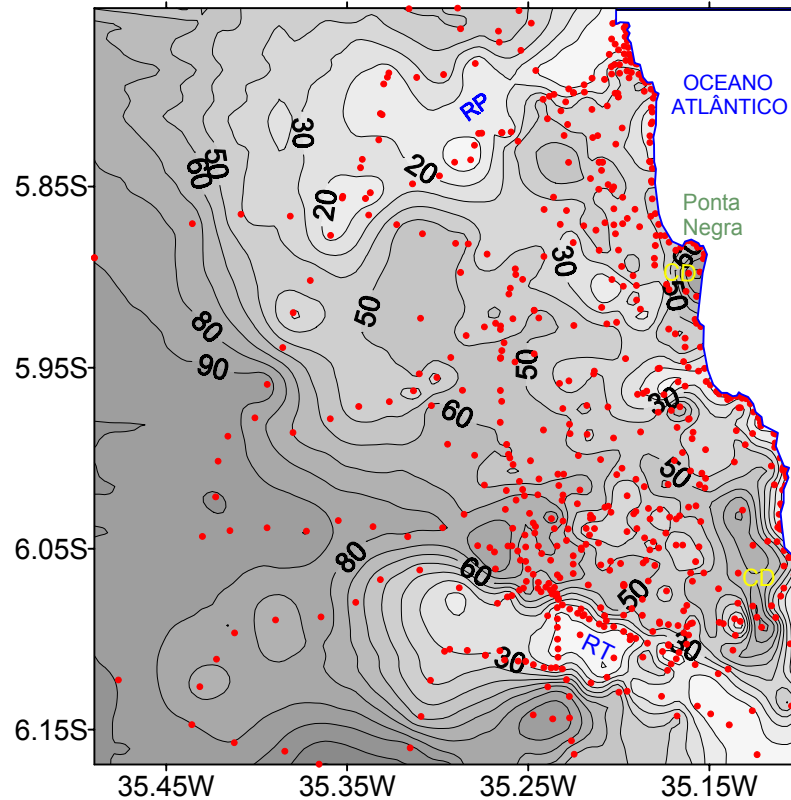


Figura 6.1 – Mapa altimétrico da região estudada. Intervalo de contorno: 10 m. As estações estão assinaladas por pontos vermelhos. RP: Rio Potengi; RT: Rio Trairi; CD: campos dunares.

A metodologia utilizada nessa separação foi desenvolvida por Beltrão *et al.* (1991) e aplicada originalmente a dados gravimétricos (ver tópico 5.2). No entanto, resultados bastante satisfatórios foram obtidos por Caldas (1998) em estudos dessa natureza, ao avaliar aspectos morfológicos associados ao neotectonismo no âmbito da Bacia Potiguar.

Conforme a metodologia já reportada no tópico 5.2, foi feita uma análise qualitativa prévia dos dados, com vistas à definição de uma componente regional para a área. Espera-se que esta componente evidencie o *trend* regional de diminuição altimétrica no sentido do mar (de oeste para leste), os vales dos rios Potengi e Trairi, bem como a região com elevações superiores a 80 m do setor sudoeste da área. A

partir da base de dados do mapa da figura 6.1, foram gerados mapas topográficos regionais empregando os polinômios de graus 1 a 10. Dentre estes mapas, aquele de grau 6 foi o que melhor incorporou as feições regionais pré-definidas (figura 6.2). O mapa residual associado ao regional de grau 6 é mostrado na figura 6.3.

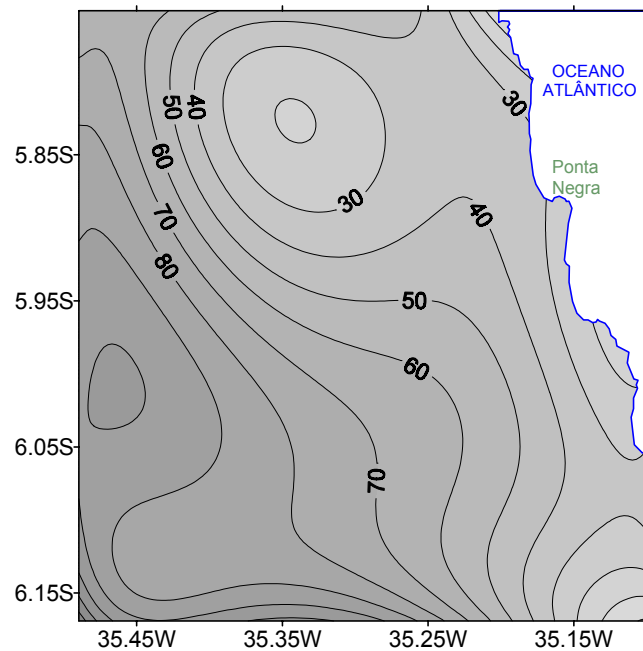


Figura 6.2 – Mapa topográfico regional de grau 6. Intervalo de contorno: 10 m.

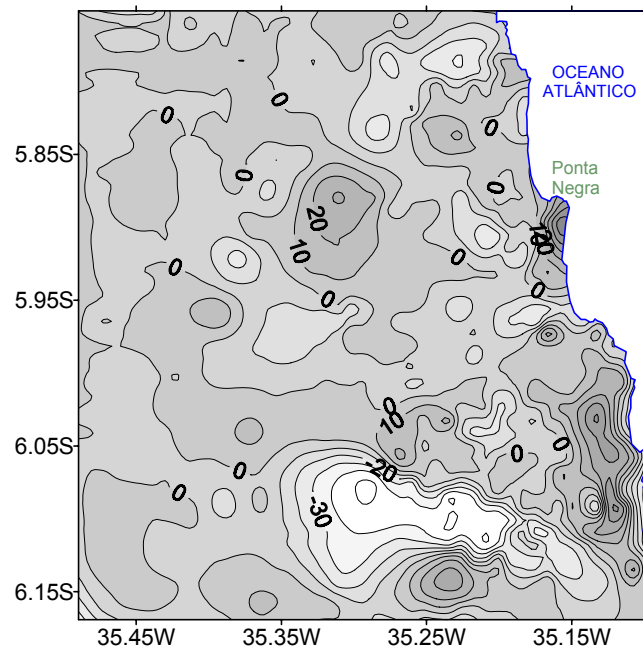


Figura 6.3 – Mapa topográfico residual de grau 6. Intervalo de contorno: 10 m.

6.1.3 – Interpretação do Mapa Topográfico Residual

Afora as características que determinaram a própria escolha do regional de ajuste polinomial 6, particularmente a disposição dos vales dos rios Potengi (ao norte) e Trairi (ao sul), o seu correspondente residual revelou importantes aspectos na compreensão do condicionamento morfológico da área. A análise deste mapa residual envolveu a caracterização de *trends*, denominados de alinhamentos morfotectônicos (AMT's) face às suas conotações estruturais, sendo definidos basicamente por continuidades de linhas de isovalores e/ou limites entre altos e baixos altimétricos. Estes alinhamentos foram bem caracterizados em três direções principais: nordeste (N40°-60°E), noroeste (N40°-50°W) e E-W, aproximadamente, e revelam variações topográficas entre platôs do Grupo Barreiras e os vales fluviais, orientações preferenciais destes últimos e a delimitação dos campos de dunas (figura 6.4).

A interpretação ora apresentada envolveu a associação dos dados do mapa da figura 6.4 com feições de campo (reconhecimento em campo destas anomalias topográficas), bem como a continuidade e disposição dos *trends* regionais. Em se tratando do reconhecimento em campo das anomalias topográficas, foi confirmado, dentre outros aspectos, a vinculação das maiores elevações presentes em todo o setor oriental do mapa com os campos dunares, ao passo que as maiores depressões correspondem aos vales fluviais do Rio Potengi (ao norte) e Trairi (no sul). Outras variações altimétricas pronunciadas dizem respeito à ocorrência de encostas mais íngremes, com destaque para as vertentes das drenagens e as falésias costeiras.

A análise conjunta do mapa da figura 6.4 com a checagem de campo mostra que as principais feições topográficas da área decorrem, direta ou indiretamente, de um condicionamento estrutural regional. Estas estruturas, associadas aos *trends* topográficos na superfície do terreno, são evidenciadas por direções preferenciais, segundo as quais vales fluviais são alinhados, limites superficiais na disposição de determinadas litologias (o confinamento dos campos de dunas, por exemplo) e a associação de AMT's de direção NE com falésias costeiras (que são atribuídas a deslocamentos do Grupo Barreiras na linha de costa).

A terceira direção morfo-estrutural, aproximadamente E-W, é especialmente caracterizada nas duas margens do vale do Rio Trairi (sul da área) e estaria, a princípio, associada a um evento morfotectônico relativamente mais jovem, uma vez que se sobrepõem aos dois outros trends (NW e NE). Vale salientar que estes dois AMT's do vale do Rio Trairi poderiam ser interpretados alternativamente por um escalonamento de pequenos alinhamentos NW e NE, em ambas as margens do vale. No entanto, tal interpretação tornou-se menos provável na medida que outros dados vieram a somar-se com vistas à caracterização estrutural regional, conforme será discutido no capítulo subsequente.

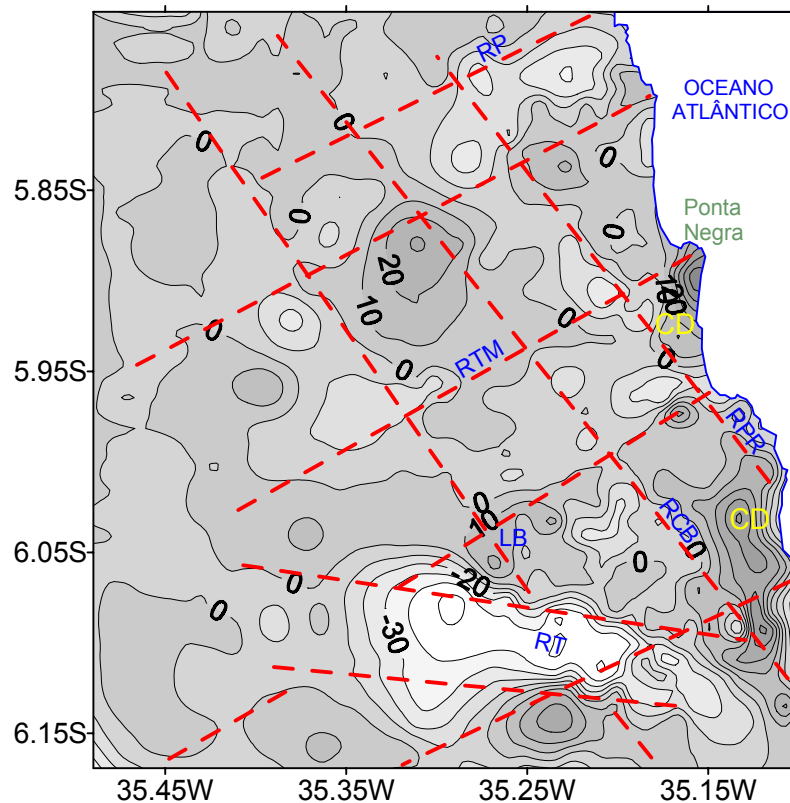


Figura 6.4 – Mapa topográfico residual interpretado. Intervalo de contorno: 10 m. Notar a associação dos AMT's (tracejados em vermelho) com as principais drenagens da área e com a delimitação dos campos de dunas. RP: Rio Potengi; RT: Rio Trairi; RPR: Rio Pirangi; RTM: Riacho Taborda-Mendes; RCB: Riacho Boa Cica; LA: Lagoa do Bonfim; CD: campos dunares.

6.2 – A REDE HIDROGRÁFICA

Objetivando fundamentar o estudo da topografia e melhor caracterizar os próprios alinhamentos morfotectônicos traçados, foi realizado um exame detalhado de toda a rede hidrográfica da região. O mesmo procedimento da análise topográfica de extrapolar os limites geográficos inicialmente definidos foi adotado, visando a uma melhor caracterização de padrões e feições hidrográficas da área.

6.2.1 – A Metodologia e Origem dos Dados

A metodologia básica consistiu em efetuar medições de segmentos de drenagem e de suas respectivas direções, agrupando-os posteriormente de acordo com a hierarquia fluvial, objetivando uma melhor visualização de direções preferenciais. Na determinação desta ordem hierárquica, foram seguidos os critérios de ordenação propostos por Strahler (1952, *in* Guerra & Cunha, 1995). Segundo estes autores, canais sem tributários são denominados de primeira ordem; a confluência de dois destes canais origina os de segunda ordem (que só recebem afluentes de ordem inferior, ou seja, de primeira ordem); já os canais de terceira ordem surgem da junção de dois de segunda (que por sua vez só recebem afluentes de ordem inferior), e assim sucessivamente.

Os segmentos foram medidos diretamente sobre um mapa de drenagens, elaborado a partir de cartas topográficas da SUDENE (folhas SB.25-V-C-V-Natal e SB.25-Y-A-II/III-São José de Mipibu) e fotografias aéreas na escala 1:70.000 e 1:40.000. As medições abrangeram parte das bacias hidrográficas dos rios Potengi, Pirangi, Trairi e Jacu, além da bacia de escoamento difuso do Riacho Boa Cica, onde acha-se incluso o Sistema Lacustre do Bonfim.

6.2.2 – Apresentação dos Dados

Foram realizadas 549 medidas, sendo 297 referentes a drenos de primeira ordem, 120 de segunda ordem, 46 de terceira, 6 de quarta, 18 de quinta, 40 de sexta e 22 de sétima ordem, os quais são apresentados na forma de um diagrama de rosetas com intervalos de classe iguais a 10° (figura 6.5). Um segundo diagrama de rosetas,

elaborado especificamente a partir de segmentos de drenagens medidos na bacia do Rio Pirangi (figura 6.6), mostrou-se consistente com os dados de abrangência mais regional (figura 6.5).

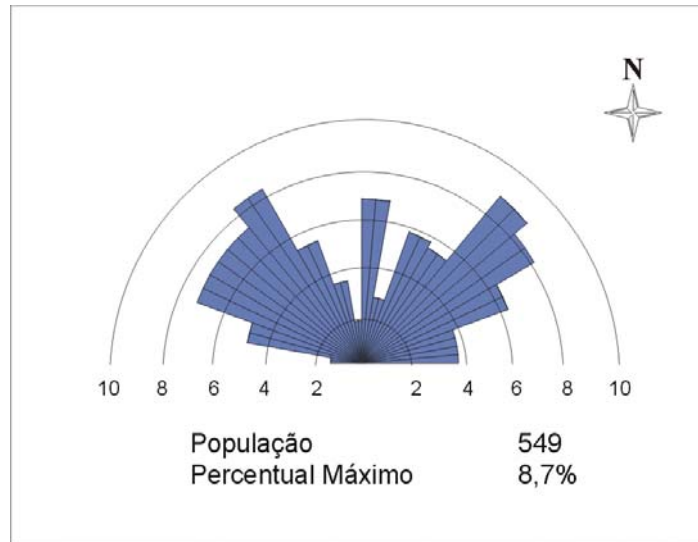


Figura 6.5 – Diagrama de rosetas para segmentos de drenagens.

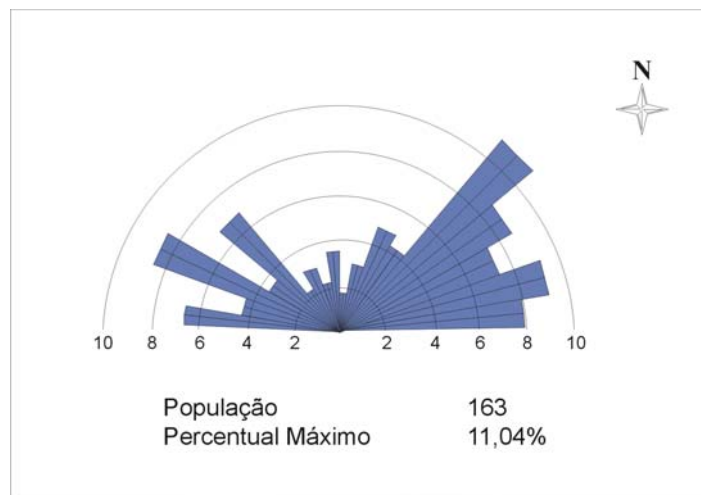


Figura 6.6 – Diagrama de rosetas para segmentos de drenagens da bacia do Rio Pirangi.

6.2.3 – Análise dos Resultados e Padrões de Drenagens

Nos diagramas de rosetas das figuras 6.5 e 6.6, duas direções principais: N30°-60°W e N40°-60°E, além de uma terceira, de reduzida expressividade, com orientação

aproximada N-S, foram bem caracterizadas. A análise detalhada da rede hidrográfica, resumida na figura 6.7 para fins de auxiliar na caracterização estrutural da área, faz uso do conceito adicional de padrões de drenagens. Estes são definidos simplesmente como sendo a disposição espacial dos rios, controlados em grande parte pela estrutura geológica (Howard, 1967 *in* Guerra & Cunha, 1995).

Das várias formas de classificação desses padrões, utilizou-se a que trata da geometria dos canais, onde os principais tipos identificados, no âmbito dos limites geográficos ora definidos, foram: sub-dentrítica no quadrante SW (rios Trairi e Jacu) e extremo NW (Rio Grande); sub-paralelo na porção NE (Rio Pirangi); retangular no quadrante SE (baixo curso dos rios Trairi, Baldum, Jacu e Riacho Boa Cica). O primeiro padrão reflete litologias de resistência uniforme e/ou estratificações horizontais; o segundo (com rios pouco ramificados) e terceiro tipo são indicativos de adaptações às condições estruturais e tectônicas, em que confluências angulares de rios, capturas e deflexões orientadas de drenagens são anomalias normalmente presentes.

A bacia hidrográfica do Rio Trairi, no litoral leste potiguar, apresenta uma feição bastante peculiar. Esta feição diz respeito à assimetria da bacia, evidenciada pelo seu divisor de águas N-NE com a bacia hidráulica do Bonfim e a bacia do Rio Pirangi (figura 6.7), na qual se tem a ampla maioria dos tributários desaguando apenas na margem direita do Rio Trairi, enquanto o número de afluentes pela sua margem esquerda é praticamente nulo nesta faixa do mapa. Este limite, aproximadamente retilíneo, é provocado por um proeminente alinhamento morfotectônico de direção N70°-W/E-W. As observações de campo dão conta deste AMT na forma de uma encosta, com acentuado gradiente topográfico, a exemplo do que ocorre na margem oposta do vale, embora em menor escala. A caracterização deste alinhamento, igualmente traçado na análise topográfica (figura 6.4), sugere que a porção sul, até o limite N-NE da bacia do Trairi, esteja basculada no sentido SW para NE, em relação à porção norte da área. A direção N-S, mostrada de maneira incipiente no diagrama de roseta da figura 6.5, reflete este comportamento na medida que se tem drenagens fluindo no sentido norte, como consequência deste basculamento. Este evento

morfotectônico, a julgar pelas observações ora apresentadas (análise topográfica e hidrográfica), estaria relacionado a uma provável distensão N-S.

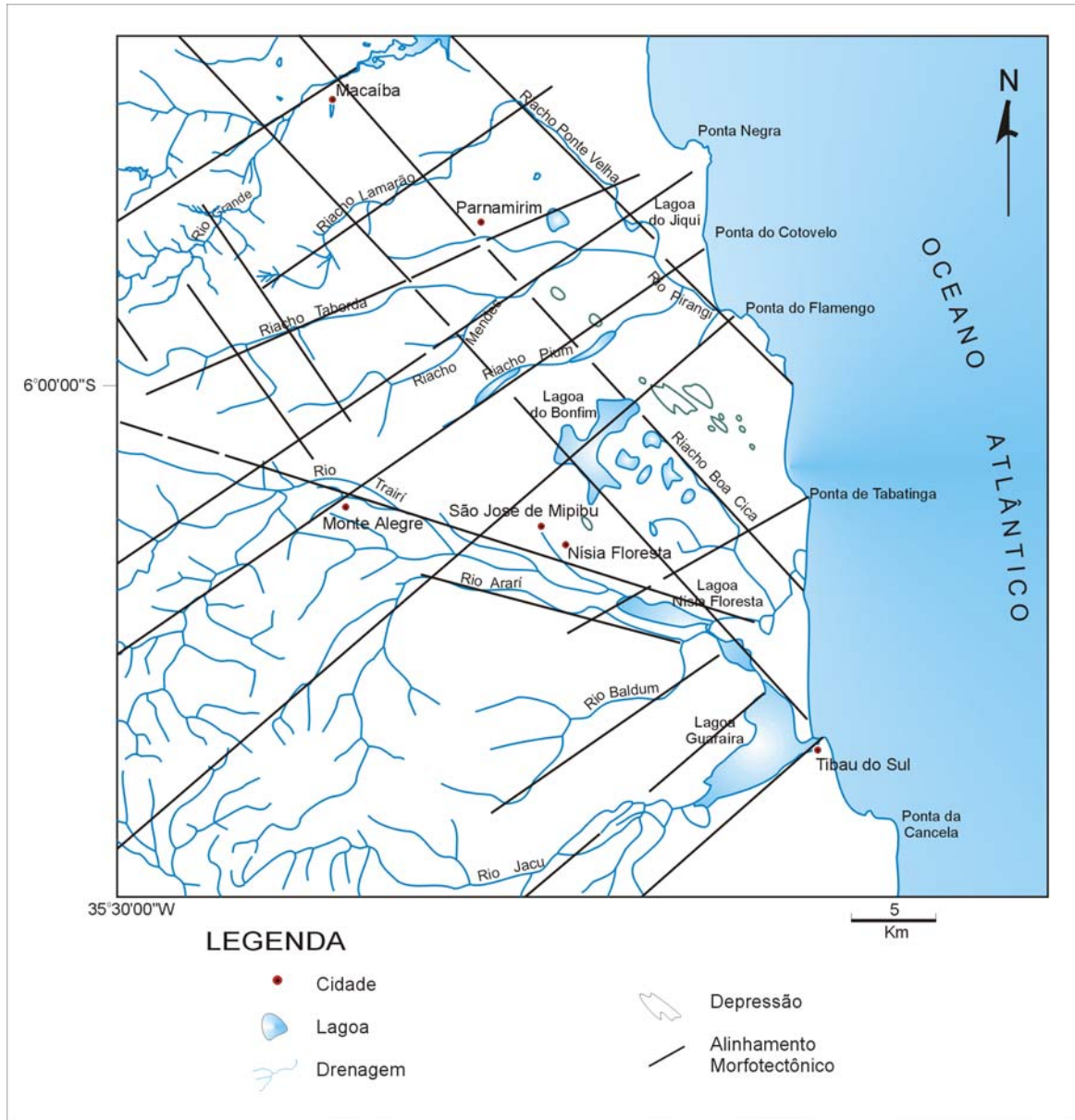


Figura 6.7 – Síntese da análise dos dados topográficos e hidrográficos.

Restringindo-se a análise à bacia do Rio Pirangi, observa-se que sua tropia tipo bidirecional (NE e SE) igualmente reflete uma nítida adaptação às condições estruturais regionais, conforme reportado no tópico 4.2.1. Neste aspecto, os vales fluviais apresentam-se “encaixados” e delineados por alinhamentos morfotectônicos (figura 6.8).

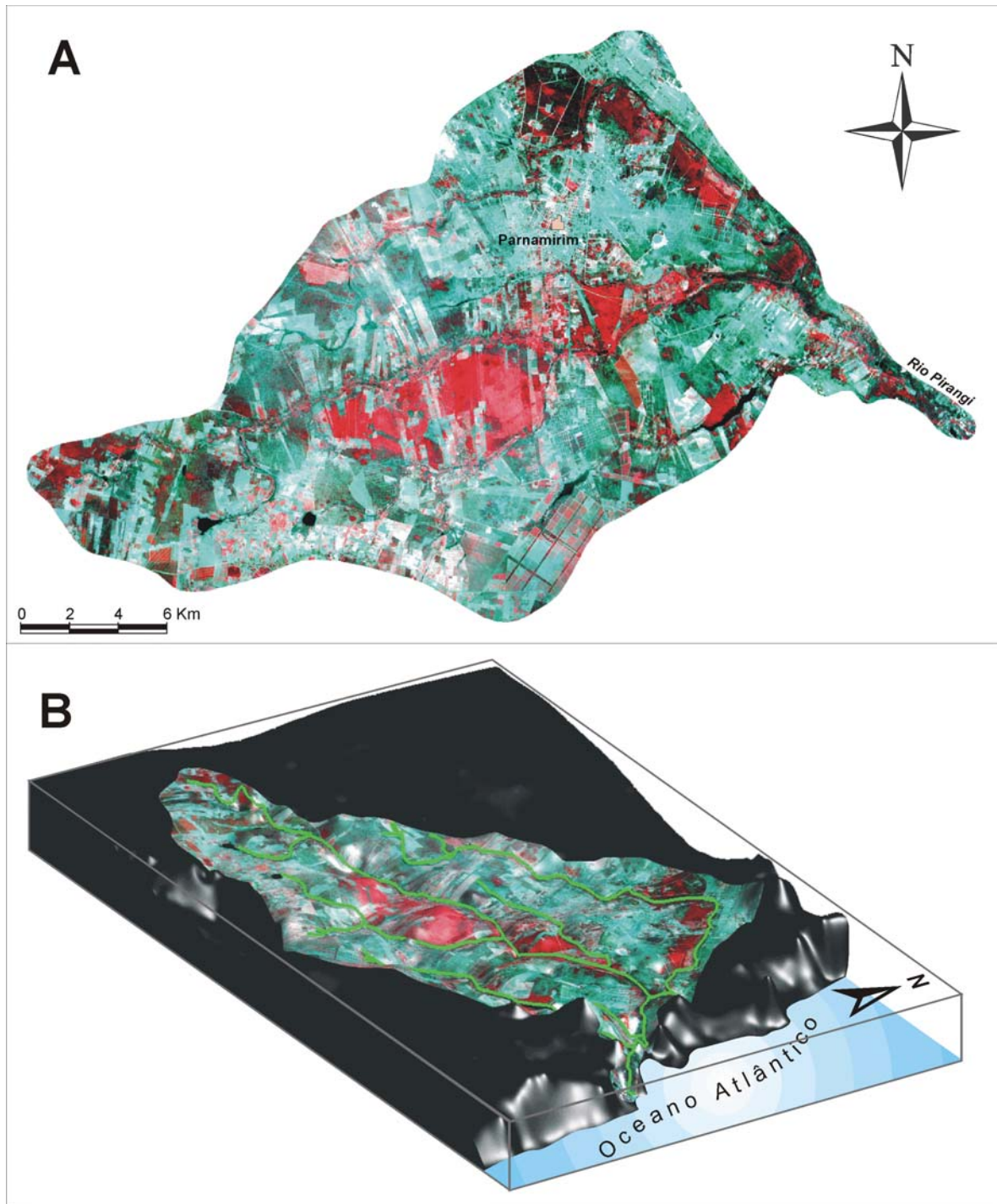


Figura 6.8 – Imagem orbital do sensor SPOT (19/06/88) da área da bacia do Rio Pirangi (A) e seu modelamento 3-D (B), elaborado em ambiente SIG e base altimétrica das cartas topográficas da SUDENE (SB.25-V-C-V-Natal e SB.25-Y-A-II/III-São José de Mipibu); notar os vales “encaixados” segundo as direções NE e SE. Tratamento de imagens realizado no Dpto. de Geologia-UFRN.

7 – SÍNTESE DA ESTRUTURAÇÃO REGIONAL

No presente capítulo, será apresentada uma síntese da estruturação regional, com base nas análises gravimétrica, geomorfológica (topografia e hidrografia) e geológica. Esta caracterização foi obtida graças à integração destes dados e mediante averiguações de campo.

7.1 – ANÁLISE CONJUNTA DOS DADOS GRAVIMÉTRICOS, GEOMORFOLÓGICOS E DE POÇOS

A análise conjunta dos resultados confirmou a existência de duas direções estruturais principais: $N40^{\circ}-60^{\circ}E$ e $N40^{\circ}-50^{\circ}W$ (figura 7.1 e mapa geológico em anexo), além de uma terceira, menos expressiva, com orientação aproximada $N70^{\circ}-W/E-W$. As três direções, segundo a adoção de critérios interpretativos rígidos, são configuradas basicamente por alinhamentos morfotectônicos (AMT's), embora estejam eventualmente encobertos por sedimentos eólicos ou aluvionares. A caracterização destes alinhamentos como falhamentos ficaria na dependência da quantificação de rejeitos e/ou feições apropriadas no terreno. Estes deslocamentos verticais foram então definidos em seções geológicas, elaboradas com o auxílio de perfis de poços disponíveis da região (tabela 7.1), sendo confeccionadas de forma a interceptarem alguns dos AMT's/falhamentos.

Tomando-se como horizonte guia o topo da seqüência mesozóica não aflorante (arenitos calcíferos), foi possível definir variações de cota da ordem de 20-40 m, ou mesmo superiores a 50 m, no quadrante sudeste da área. Este procedimento conduziu à caracterização de blocos estruturais tipo *horsts* e *grabens*, identificados nas seções geológicas por soerguimentos e abatimentos do arenito calcífero, respectivamente (figuras 7.2, 7.3 e 7.4). Dentre estes, destaca-se o *Graben* Papary (Lucena e Queiroz, 1996), situado na altura das praias de Tabatinga e Búzios (Nísia Floresta), e estendendo-se no sentido noroeste até as proximidades da sede municipal de Parnamirim (figura 7.1). O mesmo acha-se limitado pelas falhas do Riacho Boa Cica e do Rio Pirangi, ambas na direção SE-NW, representando o resultado de falhamentos escalonados, exibindo rejeitos gradualmente maiores no sentido sudeste (figura 7.3).

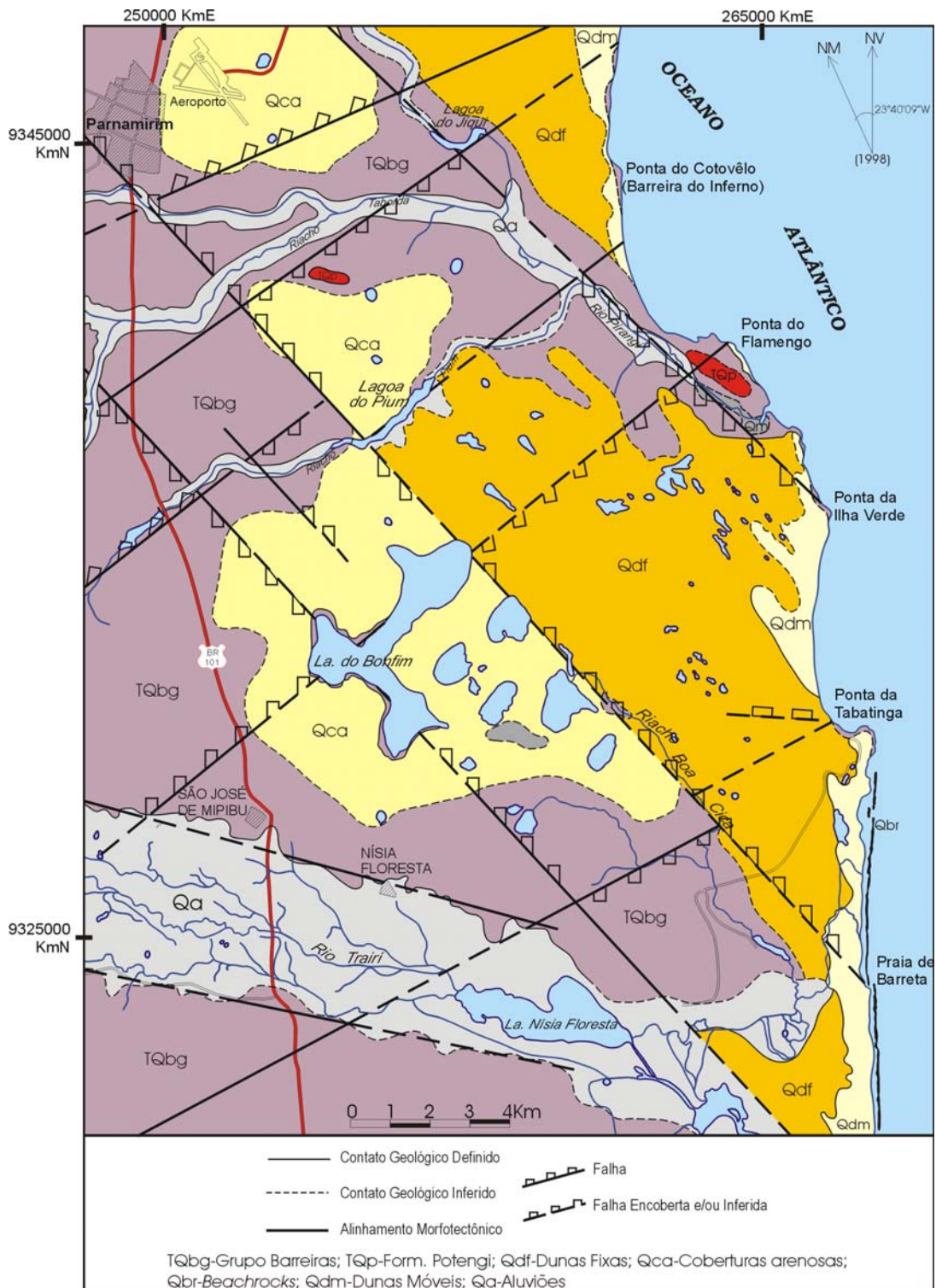


Figura 7.1 – Síntese da estruturação regional da área litorânea compreendida entre Parnamirim e Nísia Floresta-RN, incluindo o setor oriental da bacia do Rio Pirangi; um mapa geológico completo desta última é apresentado no anexo 1.

POÇO	Nº REF. MAPA	COORDENADAS UTM		LOCAL.	PROF. (m)	ESPESS. SATUR. Tbg (m)
46 C PT-02	1	232379	9332764	COBÉ/ VERA CRUZ	46,0	31,04
122 SRH-RN	2	236000	9332300	COBÉ CIMA/ VERA CRUZ	28,0	21,04
247 SRH-RN	3	239200	9334500	JACARACIC./ S. J. MIPIBÚ	38,0	27,83
281 P PROPOÇO	4	243000	9335700	MENDES/ S. J. MIPIBU	86,0	65,52
132 SRH-RN	5	249400	9339100	TABORDA/ S. J. MIPIBU	60,0	26,68
31 C EMPARN	6	252200	9340000	CAJUPIR/ PARNAMIR.	50,0 (Pz)	23,49
54 C PT-01	7	256300	9340420	LAGO AZUL N. FLOREST.	51,1	24,24
188 SRH-RN	8	260700	9342000	PIUM/ PARNAMIR.	60,0	33,28
112 C PT-07	9	245066	9349790	G. RECEIO/ MACAÍBA	56,0	28,3
223 P SRH-RN	10	247300	9348500	MACAÍBA	51,0	24,01
82 C PT-27	11	248809	9347314	JÓQUEI CLB/ PARNAMIR.	66,0	41,0
185 SRH-RN	12	249400	9345600	PQ. A. FERN./ PARNAMIR.	75,0	49,79
25 SRH-RN	13	254734	9344017	F. MOROM/ PARNAMIR.	42,0	20,35
167 SRH-RN	14	256600	9341300	VALE PIUM/ PARNAMIR.	54,0	30,07
296 SRH-RN	15	262100	9337200	HOTIGRAN/ N. FLOREST.	120,0	101,0
251 SRH-RN	16	241080	9344710	G. LUANA/ MACAÍBA	28,0	11,1
222 SRH-RN	17	242500	9344300	LAMARÃO/ MACAÍBA	38,0	21,92
129 SRH-RN	18	243500	9340200	G. S/ NOME/ S. J. MIPIBU	45,0	36,85
283 P PT-04	19	243650	9331350	SÍT. BANAN./ M. ALEGRE	37,0	18,4

Tabela 7.1 – Relação de poços utilizados na elaboração dos perfis geológicos (ver localização no mapa geológico do anexo 1); P = poço tubular perfurado por empresa particular, C = poço tubular perfurado pela CAERN, SRH-RN = poço tubular perfurado pela Secretaria de Recursos Hídricos/RN (1ª coluna); a profundidade diz respeito ao embasamento cristalino ou aquífero cretácico.

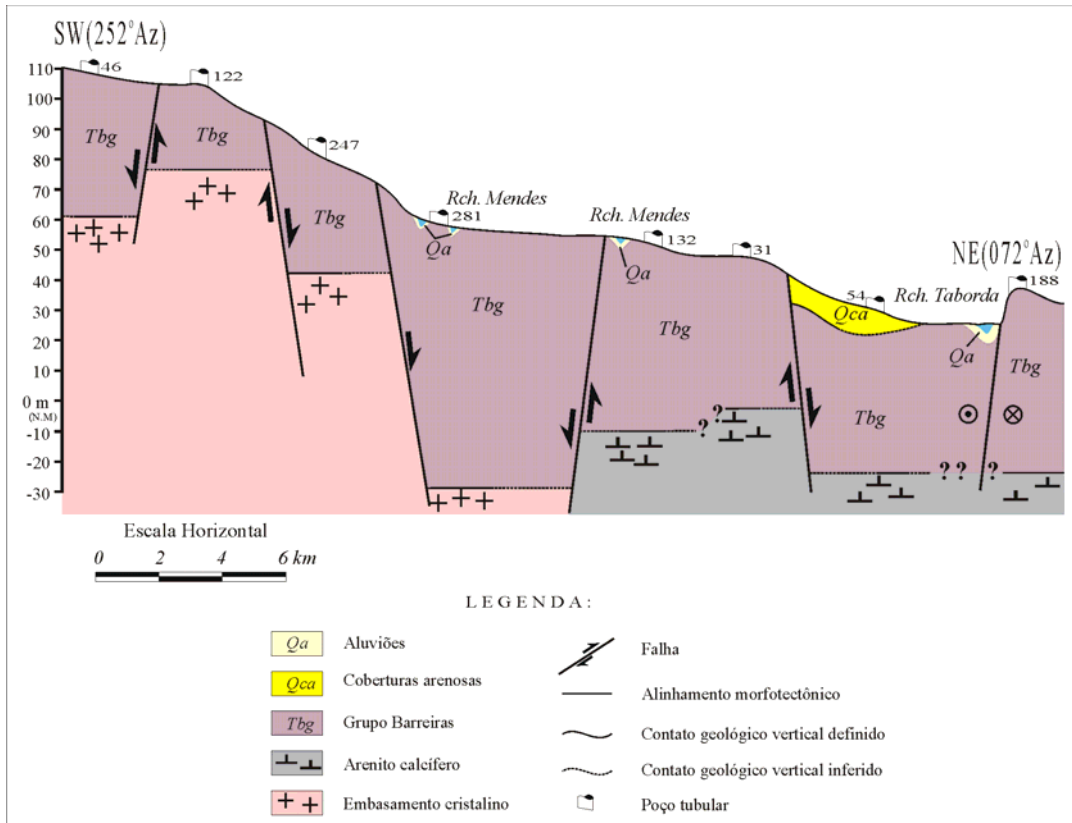


Figura 7.2 – Esboço esquemático da seção geológica A-B (ver mapa geológico do anexo 1).

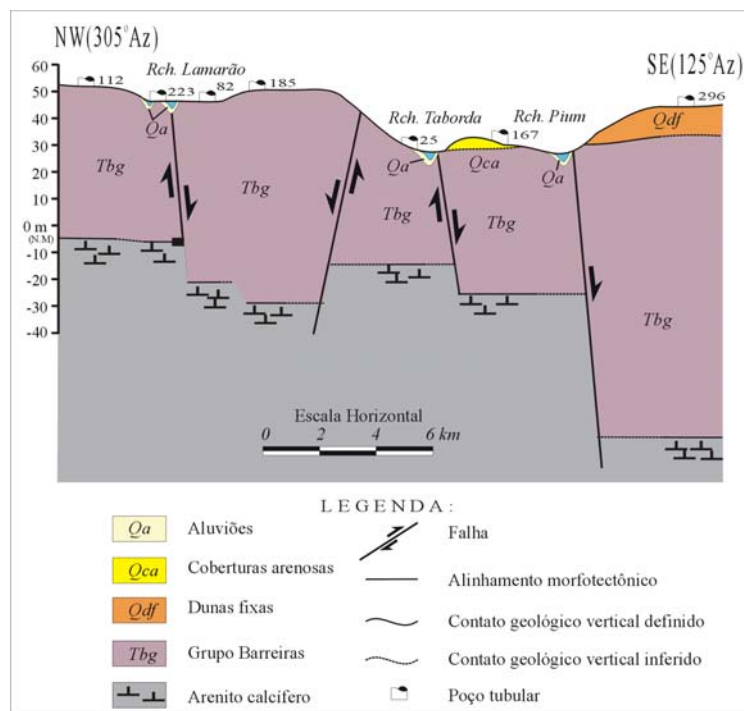


Figura 7.3 – Esboço esquemático da seção geológica C-D (ver mapa geológico do anexo 1).

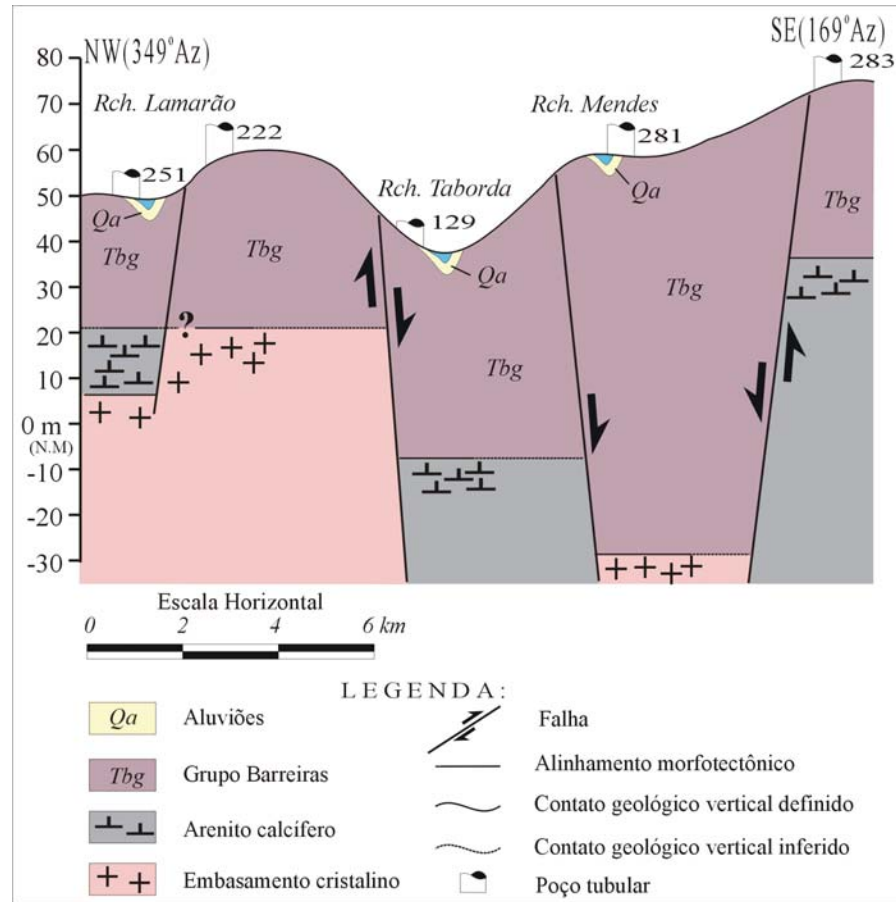


Figura 7.4 – Esboço esquemático da seção geológica E-F (ver mapa geológico do anexo 1).

A presença de falhamentos afetando o Grupo Barreiras - datado do Mioceno-Pleistoceno, segundo Mabesoone *et al.*, (1972), incluindo variações de espessura destes sedimentos nas seções geológicas (figuras 7.2, 7.3 e 7.4), indica uma contemporaneidade (pelo menos em parte) dessas estruturas com a deposição da citada unidade.

Por outro lado, a continuidade dessa deformação ao longo do Quaternário é evidenciada pelas principais feições de superfície demarcadoras das estruturas, conforme o mapa geológico. Dentre estas, destacam-se o controle de vales fluviais e da forma de alguns corpos d'água superficiais, o deslocamento do Grupo Barreiras na linha de costa originando falésias (Tabatinga, Cotovelo e Barreira do Inferno), e contatos litológicos retilíneos entre unidades quaternárias e terciárias (Grupo Barreiras, Dunas Fixas e Coberturas Arenosas na porção oriental do mapa da figura 7.1).

A estruturação SW-NE segue um padrão observado no embasamento cristalino, aflorante a oeste da área alvo. A idéia de que se trate de uma estruturação de idade relativamente antiga, com reativações posteriores, é defendida em trabalhos como o de Bezerra *et al.* (1994), atribuindo-as a ramificações do Lineamento Patos, de idade Brasileira, as quais atingiriam a costa potiguar e paraibana com direção nordeste. Esta hipótese é compatível com alguns elementos coletados na presente pesquisa, particularmente os dados da rede hidrográfica, topográficos e gravimétricos. As drenagens de maior ordem, por exemplo, avaliadas inclusive no contexto do embasamento aflorante a oeste, retratam a direção predominante NE. Outro importante indício dessa provável relação é a semelhança entre os alinhamentos gravimétricos (ver figura 5.4), refletindo uma estruturação profunda e mais antiga, e alinhamentos morfotectônicos (ver figuras 6.4 e 6.7), representando uma seção crustal rasa.

A direção estrutural SE-NW, por sua vez, mostra-se como uma das predominantes em diagramas de rosetas para segmentos de drenagens (ver figuras 6.5 e 6.6) e por deflexões nas drenagens que fluem de nordeste e mudam para sudeste, classicamente exemplificada pelo baixo curso do Rio Pirangi, após a confluência dos riachos Taborda-Mendes com o Pium (ver figura 7.1). O falhamento que provoca esta anomalia hidrográfica é igualmente responsável pelo limite nordeste do *Graben* Papary que, a exemplo de outros blocos rebaixados nas mesmas características e circunstâncias, teria funcionado como um corredor de sedimentação, condicionando neste caso, parte da deposição da Unidade Dunas Fixas (Lucena, 1993). Já o limite sudoeste do *Graben*, representado pelo falhamento do Riacho Boa Cica, origina os contatos retilíneos entre as Dunas Fixas e as Coberturas Arenosas (Quaternário-Quaternário) e entre as Dunas Fixas e o Grupo Barreiras (Quaternário-Terciário).

São ainda observados exemplos da associação de baixos estruturais com altos topográficos, enfatizada no âmbito do *Graben* Papary. Esta associação parece ser resultado da deposição preferencial de sedimentos eólicos no *graben*, com reflexos na topografia, compatível com a idéia dos corredores de sedimentação. No entanto, vale salientar que a direção preferencial dos ventos na região (sudeste) também exerce sua

parcela de contribuição neste aspecto, sendo os processos deposicionais direcionados de sudeste para noroeste.

A estruturação com orientação N70°W/E-W foi caracterizada inicialmente nas análises topográfica e hidrográfica. A mesma é evidenciada pelo alinhamento das encostas que limitam o leito maior do Rio Trairi, e pela assimetria desta bacia hidrográfica no seu trecho litorâneo. A figura 6.7 (capítulo 6) revela um proeminente divisor de águas na margem esquerda deste rio, originando um sentido de fluxo fluvial geral de sul/sudoeste para norte/nordeste, até este limite. Tal fato sugere um componente de abatimento no bloco sul, que teria basculado para norte, em direção à falha interpretada.

7.2 – DADOS DE AFLORAMENTOS E GEOCRONOLÓGICOS

Os principais dados estruturais de campo (planos de fraturas e eventuais marcadores cinemáticos) foram coletados ao longo das falésias costeiras do Grupo Barreiras na área (Barreira do Inferno, Cotovelo e Tabatinga), uma vez que exposições mais interiores mostraram-se impróprias para este tipo de estudo. Além destes dados, foram utilizadas observações em *beachrocks* na praia de Barreta, incluindo dados bibliográficos de Caldas *et al.* (1997). A busca por afloramentos dessas duas unidades estratigráficas justifica-se pelas suas características litológicas (diagênese/compactação), as quais propiciam uma melhor preservação de estruturas, ao contrário das coberturas quaternárias inconsolidadas. Estes dados foram responsáveis pela interpretação de transcorrência de alguns falhamentos (ver figura 7.1 e mapa geológico em anexo), face à impossibilidade de tal interpretação a partir das análises geomorfológica, gravimétrica e correlação litológica em perfis de poços.

Os *beachrocks* na praia de Barreta apresentam um padrão de fraturamento bastante regular ao longo de todo o corpo rochoso (figura 7.5a e 7.5b). No geral, Caldas *et al.* (1997) individualizaram fraturas verticalizadas, transversais (**A**) e paralelas (**D**) à orientação N-S dos cordões de arenito, além de outras (**B** e **C**) com direções diagonais (NE e NW, respectivamente), com predomínio das duas primeiras. A observação de mini-escarpas e abatimento de blocos nas estruturas **A** e **D**, em

condições superficiais, indicam compatibilidade com um regime distensional. Os conjuntos **B** e **C**, por sua vez, foram interpretados como um sistema conjugado de cisalhamento, relacionado à movimentação transcorrente. A partir de critérios cinemáticos adicionais, localmente definidos pelos autores (disposição escalonada de fraturas distensionais e estruturas em dominó associadas, dentre outros), este padrão estrutural foi interpretado como sendo resultado da atuação de um sistema de tensões envolvendo distensão (σ_3) e compressão (σ_1) máximas nas direções N-S e E-W, respectivamente (figura 7.5c). As juntas longitudinais (**D**) poderiam ser provocadas pela ação do impacto frontal das ondas e solapamento da base dos arenitos, embora sem descartar uma origem tectônica (Caldas *et al.*, 1997).

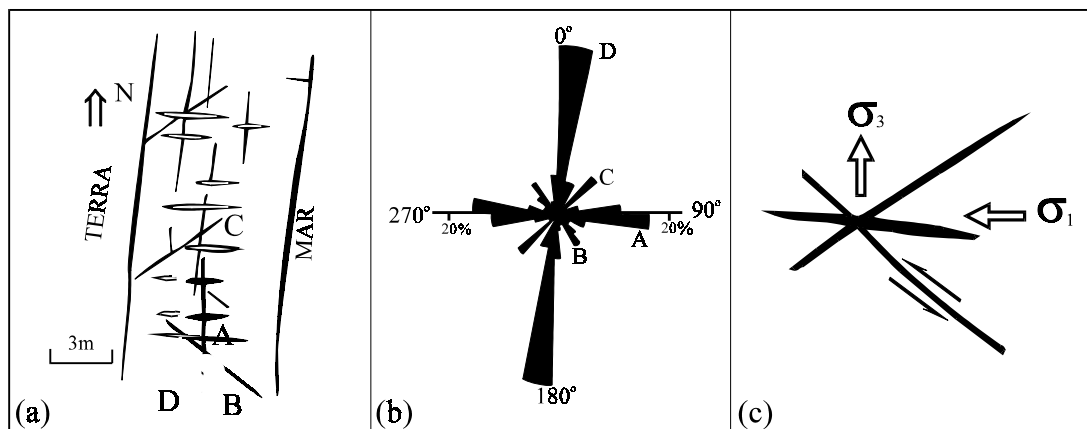


Figura 7.5 – (a) Padrão de fraturas nos *beachrocks* da praia de Barreta (Nísia Floresta-RN); (b) tratamento estatístico de 539 fraturas observadas; (c) sistema de tensões proposto, com base em critérios cinemáticos localmente definidos. Adaptado de Caldas *et al.* (1997).

Nos afloramentos do Grupo Barreiras, quatro conjuntos de fraturas foram medidas, com direções aproximadas NE, NW, E-W e N-S. Os conjuntos de fraturas NE e E-W, predominantes nas falésias da Barreira do Inferno, Cotovelo e Tabatinga, apresentam características distensionais, a julgar pelas feições de campo observadas. Dentre estas feições, destacam-se: fraturas E-W, subverticalizadas e com eventual preenchimento clástico (diques neptunianos), sugerindo que a extensão é, pelo menos em parte, sin-sedimentar (topo do Barreiras); falhas E-W conjugadas de alto ângulo, e fraturas subverticais de direção NE, com estrias de médio a alto *rake* no sentido NNE,

eventualmente apresentando material brechado e cimentado por óxido de ferro. Todas essas estruturas estão relacionadas a uma distensão N-S, originando falhamentos normais E-W e transcorrência dextral NE, além de outras feições equivalentes do ponto de vista cinemático.

Na Ponta do Cotovêlo (Barreira do Inferno) e em Tabatinga, o Grupo Barreiras encontra-se soerguido nestas falésias. Este fato é igualmente compatível com a hipótese de falhas normais E-W ou transcorrência dextral NE, caracterizada em fraturas observadas nas duas falésias. Nas proximidades do extremo norte da falésia de Tabatinga, os depósitos da Unidade Barra de Tabatinga (Lucena, 1997), datados por Barreto *et al.* (2002) em aproximadamente 210.000 anos, encontram-se truncados por uma estrutura de provável orientação E-W (figura 7.6). Além da interrupção brusca da unidade e um deslocamento vertical (componente normal) de cerca de 15 m do topo do Grupo Barreiras, esta estrutura é realçada por um canal erosional. A base dos sedimentos da Unidade Barra de Tabatinga diminui gradativamente de cota no sentido norte, a partir da falha, até atingir o nível do mar atual pouco mais de 100 m adiante. Tal fato coaduna-se com o basculamento do bloco norte, sugerindo uma possível influência da falha distensional do Rio Pirangi (de orientação NW), que atinge a linha de costa na altura da vila antiga da praia de Búzios.

Considerando que a Unidade Barra de Tabatinga é interpretada como um depósito relativo a um pulso transgressivo marinho no Quaternário (Lucena, 1997), e a julgar pela ocorrência das deformações distensionais E-W e NE afetando em especial o topo do Grupo Barreiras e atenuando-se acima, esta distensão máxima (σ_3) N-S teria atuado a partir do referido período. Esta suposição é igualmente compatível com o sistema de fraturas impresso nos *beachrocks* e evidenciaria “pulsos” distensionais desde o final da deposição do Grupo Barreiras.

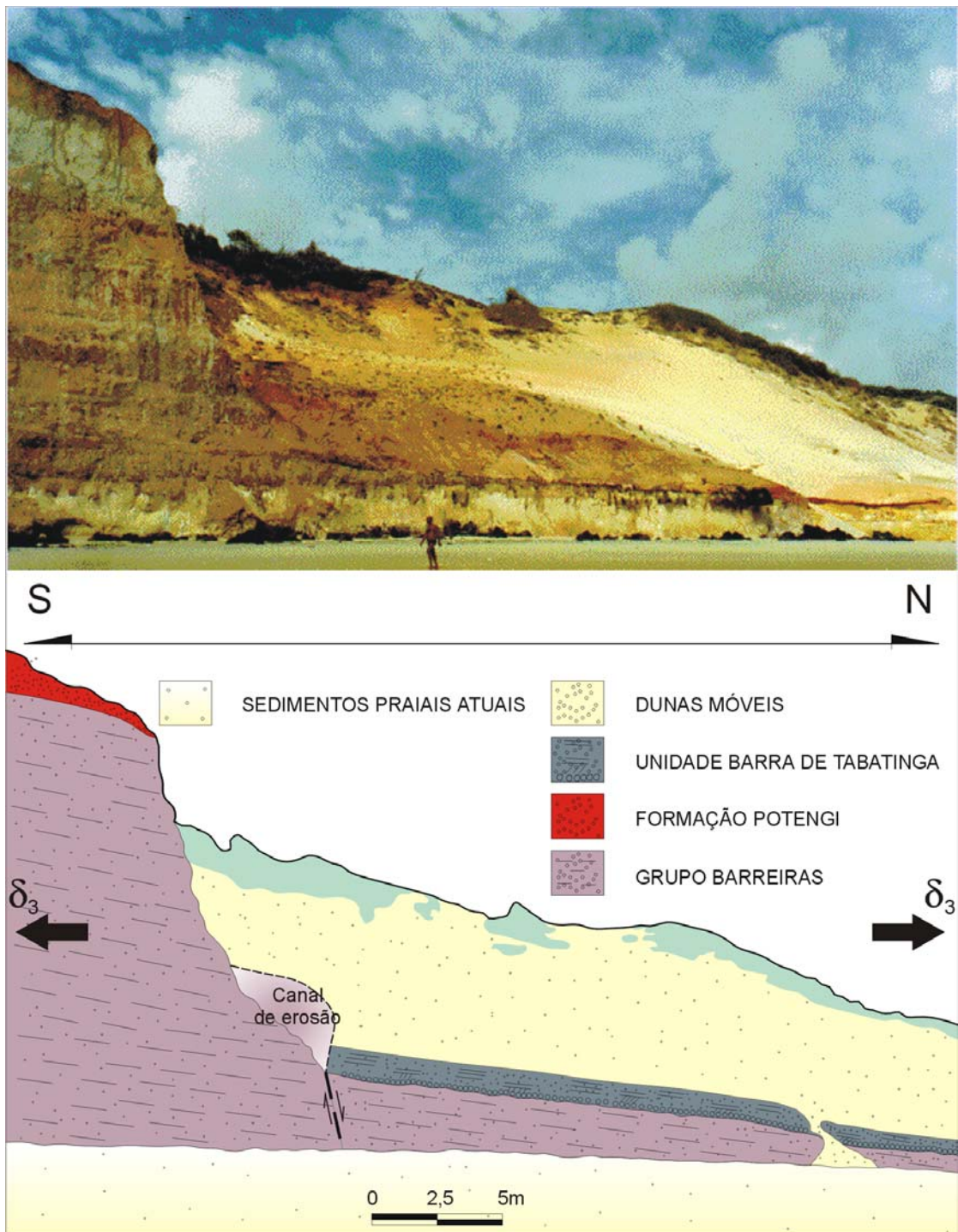


Figura 7.6 – Estrutura na extremidade norte da falésia de Tabatinga (a) e sua interpretação (b), sugerindo um falhamento normal compatível com uma distensão N-S.

As estruturas NW apresentam-se na forma de fraturas e falhas distensionais (subverticalizadas), particularmente nas falésias de Cotovelo e Tabatinga, além de um falhamento oblíquo (distensional sinistral) afetando *beachrocks* na praia de Barreta

(Bezerra, 1998). As fraturas observadas em Georgino Avelino-RN (afloramento tipo corte de estrada, na saída para Arês-RN e distando cerca de 20 km no sentido sul da desembocadura do Rio Pirangi) acham-se preservadas em uma face com direção NE, fortemente tectonizada. Estas fraturas mostram-se afetando material parcialmente inconsolidado do Grupo Barreiras, com base no aspecto deformacional hidrolástico de níveis argilosos (provável deformação associada a paleosismos), denotando um caráter sin-sedimentar em relação a citada unidade.

A estrutura que atinge os *beachrocks* da praia de Barreta representa a continuidade, até a costa, da falha do Riacho Boa Cica (ver figura 7.1). A partir de datações realizadas com o método ^{14}C em constituintes bioclásticos destas rochas, Bezerra (1998) individualizou dois *beachrocks*: um mais afastado do continente e datado de 7.250-5.840 anos A. P., e outro mais próximo datado de 5.110-4.520 anos A. P. Observando que apenas o primeiro é afetado pela falha, no caso um deslocamento vertical da ordem de 4 m, o autor pôde situar tal deslocamento dentro deste intervalo de idades (figura 7.7). Esta cronologia provavelmente evidencia uma reativação de uma estrutura preexistente, que já estava ativa quando da deposição do Grupo Barreiras, com base nas deformações sin-sedimentares deste grupo em Georgino Avelino. Por outro lado, o mesmo sistema de tensões imprime estruturas nos *beachrocks* mais jovens, conforme discutido por Caldas *et al.* (1997).

Estruturas N-S, relativamente menos evidenciadas nas falésias estudadas, são caracterizadas por fraturas e falhas normais, com planos irregulares. Na Ponta do Cotovêlo (Barreira do Inferno), foi possível identificar critérios cinemáticos, no caso estrias de alto ângulo em planos com forte mergulho para leste, evidenciando um comportamento distensional de direção E-W. O número reduzido destes planos no campo (com boa preservação) pode ser decorrente do fato destes se encontrarem submetidos à ação frontal de processos intempéricos, nas paredes das falésias.

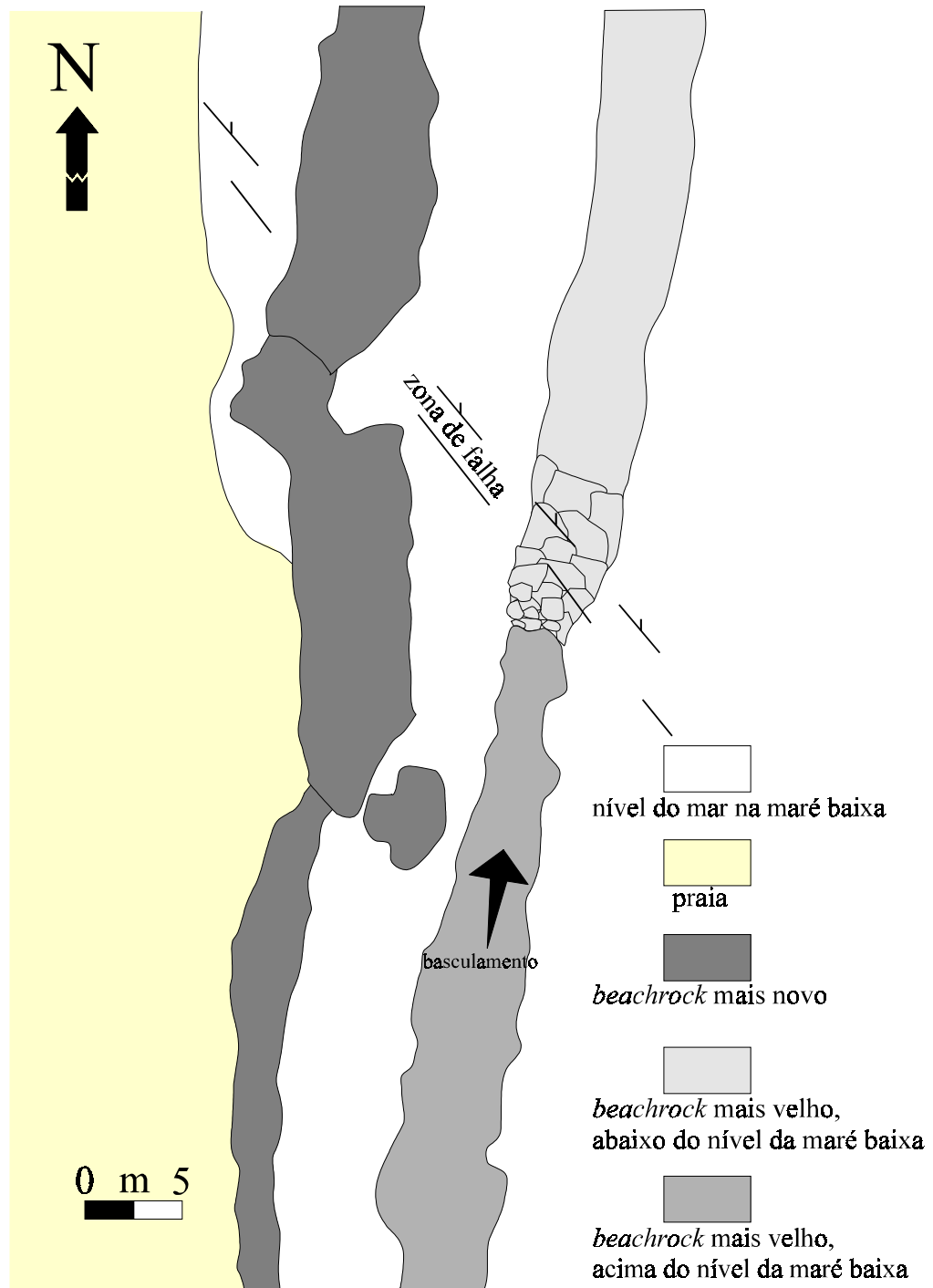


Figura 7.7 – Falha com componente normal, de direção NW, afetando *beachrock* datado de 7.250-5.840 anos A.P., enquanto que um segundo *beachrock*, datado de 5.110-4.520 anos A.P., não apresenta deformações atribuídas à mesma estrutura. Modificado de Bezerra (1998).

O conjunto de estruturas NE, NW, e E-W, identificadas em escala de afloramento, a julgar pelas suas características de campo e critérios cinemáticos observados, são compatíveis com um modelo de tensões envolvendo compressão e distensão máximas em aproximadamente E-W e N-S, respectivamente. Por outro lado, as estruturas de direção N-S parecem refletir um evento tectônico diferenciado que, numa primeira análise, poderia ser cronologicamente distinto do sistema tectônico que gerou fraturas distensionais E-W, significando talvez a atuação intermitente de um outro agente dinâmico.

7.3 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A integração dos resultados apresentados nas duas primeiras seções deste capítulo foi conduzida de maneira a se avaliar o condicionamento estrutural regional. As principais feições de mapa, provenientes das análises topográfica, hidrográfica e gravimétrica, mostraram-se consistentes com os dados coletados em campo, tendo estes últimos desempenhado um papel fundamental na averiguação e teste da cinemática das estruturas caracterizadas. Nesse contexto, por exemplo, ficou evidenciado um comportamento nitidamente distensional nas estruturas de direção E-W, seja pelas feições em escala de afloramento (falhas/fraturas verticais, com indicação de movimentação normal), seja pela interpretação dos mapas topográficos e hidrográficos (falha do Rio Trairi). As estruturas NE e NW mostram forte influência do regime distensional N-S, além de apresentarem localmente critérios cinemáticos relacionados a movimentações horizontais dextrais e sinistrais (falhas/fraturas em *beachrocks* e nas falésias), respectivamente, o que resulta em falhamentos oblíquos.

O campo de tensões deduzido, envolvendo uma compressão (σ_1) e distensão (σ_3) máximas em E-W e N-S, respectivamente, é compatível com aquele proposto por Ferreira (1997), com base em dados sismotectônicos. A própria disposição em mapa das estruturas NE e NW, aparentemente segmentadas e/ou com movimentos horizontais secundários (ver mapa geológico em anexo), é condizente com os modelos de estruturas conjugadas e associadas aos mesmos eixos de tensão. Esta segmentação deve ser a causa de aparentes truncamentos do *trend* NE pelo de direção NW, sugerido

na análise topográfica e hidrográfica, que todavia não implica em uma interpretação de eventos cronologicamente distintos.

A análise do mapa gravimétrico residual (figura 5.4) revela a existência de *trends* nas direções NE e NW, em geral coincidentes com os alinhamentos morfotectônicos nestas direções, caracterizados nas análises topográfica e hidrográfica (figura 6.7). Considerando que a gravimetria representa uma seção crustal mais profunda, envolvendo feições tectono-estruturais regionais do embasamento cristalino e da seqüência mesozóica, sua relação com a estruturação de superfície representa uma evidência de reativações de lineamentos antigos e profundos, afetando toda a coluna sedimentar cenozóica. Dentro deste aspecto, é válido ressaltar que tais reativações estão condicionadas ao ângulo com que as estruturas preexistentes se situam em relação ao novo eixo compressivo, sendo que o intervalo de 22° a 32° entre falhamentos e o σ_1 constitui a situação ideal (Sibson, 1985). Algumas falhas do sistema NE acham-se orientadas favoravelmente à reativação, uma vez que estão inclusas no intervalo angular acima reportado. Entretanto, outras estruturas de direção NE, em ângulo superior a 32° com σ_1 , bem como todo o sistema NW, não estão orientadas favoravelmente para reativações por um σ_1 E-W. Duas hipóteses foram utilizadas por Bezerra (1998), com base em critérios sugeridos por Sibson (1985), para explicar estas reativações: a presença de material incoesivo/pouco resistente, favorecendo a reativação do fraturamento, e a alta pressão de fluidos nas zonas de falha. Esta última hipótese é reforçada pela presença de água abundante nos sedimentos cenozóicos (Aqüífero Barreiras).

Em síntese, uma complexa estruturação foi caracterizada na área, afetando os sedimentos do Grupo Barreiras (Mioceno-Pleistoceno) e as unidades holocênicas sobrejacentes. O arcabouço estrutural local é resultado da evolução do campo de tensões ao longo do tempo geológico, com influências de falhas cretácicas e zonas de cisalhamento pré-cambrianas, impressas no embasamento cristalino (*trends* NE e NW). Este sistema de esforços teria atuado a partir do Mioceno, ocasionando sucessivas reativações (pulsos tectônicos), com a nítida predominância da compressão imposta pela cadeia meso-atlântica (σ_1 na direção E-W e σ_3 N-S; Ferreira, 1997). As

estruturas distensionais N-S poderiam refletir períodos de quiescência da cadeia meso-atlântica, com a momentânea configuração de um regime distensional secundário na direção E-W, em função do desequilíbrio de massas na interface crosta continental-crosta oceânica (Ferreira, 1997). Neste caso, o padrão de fraturamento N-S nos *beachrocks*, estaria correlacionado a este evento distensional, a exemplo de falhamentos caracterizados nas falésias, alternativamente à hipótese de origem atectônica (ação das ondas; Caldas *et al.*, 1997).

As informações contidas no presente capítulo, somadas a outros dados de investigações geo-elétricas (Capítulo 8), serão utilizadas na análise das implicações desta estruturação regional no contexto do Aquífero Barreiras (Capítulo 9), conforme o objetivo principal da pesquisa.

8 – O LEVANTAMENTO DE ELETRO-RESISTIVIDADE

8.1 – OBJETIVOS DO LEVANTAMENTO E PROCEDIMENTOS DE CAMPO

O levantamento geofísico raso foi realizado com o objetivo principal de suprir de informações locais onde os dados de poços, quando existentes, não eram suficientes para a elaboração de um modelo geométrico preliminar para o Aquífero Barreiras na área. Neste aspecto, a informação preponderante buscada foi a profundidade da base do aquífero, indicada regionalmente pelo topo da seqüência carbonática mesozóica não aflorante (arenitos e argilitos calcíferos, segundo a terminologia conhecida e historicamente mais utilizado para a região).

O método geofísico adotado, face à sua reconhecida aplicabilidade na pesquisa de águas subterrâneas, foi o da eletro-resistividade (Astier, 1975). Dentre as modalidades de utilização deste método, a técnica escolhida de acordo com os objetivos a serem alcançados foi a de Sondagem Elétrica (S.E.), com arranjo de eletrodos Schlumberger. Esta técnica permite caracterizar as variações da resistividade em função da profundidade, desde que seja válido para a área um modelo de camadas planas e paralelas.

O equipamento utilizado no presente levantamento foi um resistivímetro modelo GEOTEST R85. Este aparelho possui as características de minimizar a instabilidade das leituras, devido aos fenômenos de polarização de eletrodos, além de efetuar uma filtragem eletrônica no sinal, atenuando ruídos provocados por correntes telúricas e linhas de transmissão. Ruídos atribuídos a possíveis induções eletromagnéticas foram controlados mantendo-se distâncias adequadas entre os cabos de recepção e transmissão.

Outros procedimentos operacionais envolveram cuidados na locação das sondagens e na redução de resistências de contato. Na locação, buscaram-se áreas de menor fluxo de pessoas e animais (evitando acidentes e danos aos equipamentos) e topografia suave, que permitisse uma abertura de eletrodos compatível com a profundidade de exploração. As resistências de contato foram reduzidas com o uso de água salgada em torno dos eletrodos, além da realização de limpezas periódicas nestes. Na execução de cada sondagem, utilizou-se ainda a técnica da “embreagem”

(Orellana, 1972). Esta técnica consiste em se efetuar leituras com o mesmo AB (eletrodos de corrente) e utilizando diferentes aberturas de MN (eletrodos de potencial). Tais mudanças buscam melhorar a relação sinal/ruído, além de permitir a identificação de efeitos de variação lateral de resistividade nas proximidades dos eletrodos de potencial.

Foram executadas um total de 15 sondagens elétricas na área de estudo (apresentadas na tabela 8.1), com uma abertura máxima de eletrodos de 1,2 km ($AB/2 = 600$ m). Os valores de altimetria foram estimados a partir das cartas topográficas da SUDENE, Folhas SB.25-V-C-V (Natal) e SB.25-Y-A-II E III (São José de Mipibú), enquanto que os de espessura dizem respeito apenas ao aquífero e não à coluna sedimentar Terciária-Quaternária.

8.2 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

8.2.1 – O Modelo Geo-elétrico

De acordo com a necessidade de se adotar um modelo consistente com o ambiente geológico com vistas à interpretação de dados geo-elétricos, ressalta-se que a área estudada é representada por terrenos sedimentares e com estratificações aproximadamente horizontalizadas. Somado a isso, as distâncias entre as descontinuidades horizontais expressivas (falhas) são bem maiores que as máximas aberturas de eletrodos utilizadas. Dessa forma, o modelo geo-elétrico adotado possui as seguintes características:

- i. O subsolo é constituído por uma seqüência de camadas com espessuras (E_i) finitas, excetuando-se a última que é dada como infinita;
- ii. Cada camada é admitida como sendo eletricamente homogênea e isotrópica, sendo caracterizada por uma resistividade (ρ_i);
- iii. As interfaces de separação entre as camadas são planas e horizontais e paralelas à superfície da terra.

S.E's	LOCALIDADE	COORDENADAS (UTM)		AB/2 (m)	Alt. (m)	Espessura Aqüif. (m)
		Km W	Km N			
1	Próx Ponte Velha (Parnamirim)	251855	9350532	300	41,81	40,0
2	Lot. Pq. Das Árvores (Parnamirim)	254308	9346151	200	30,62	50,0*
3	Prox. final aeroporto (Parnamirim)	253135	9344710	300	35,71	45,0
4	Lot. Sonho Verde (Parnamirim)	250072	9341890	400	51,07	47,0
5	Pium de Cima (Nísia Floresta)	253300	9337890	600	47,18	90,0
6	RN - 313 (Nísia Floresta)	254350	9341400	600	40,0	58,0
7	Próx. Taborda (Nísia Floresta)	251007	9338660	500	50,0	80,0
8	Próx. Pium de Cima (Nísia Floresta)	253045	9339440	600	46,48	40,0
9	Próx Lagoa do Pium (Nísia Floresta)	255220	9340140	500	43,50	38,0
10	Granja Canaã (S. José de Mipibu)	249030	9336820	400	54,23	40,0
11	Coqueiro-BR 101 (S. José de Mipibu)	250400	9335000	500	59,0	55,0
12	Próx. Lagoa Bonfim (Nísia Floresta)	254010	9336080	500	50,50	90,0
13	Próx. Lagoa do Pium (Nísia Floresta)	257070	9338020	450	55,0	55,0
14	Prox. Lagoa Bonfim (Nísia Floresta)	252300	9335300	500	50,0	31,0
15	Bica (S. José de Mipibu)	252918	9327905	200	37,0	35,0

Tabela 8.1 – As sondagens elétricas executadas na área (ver mapa geológico em anexo). O valor de espessura da SE2 foi estimado, face à impossibilidade de aberturas de eletrodos maiores em campo (elevado ruído/potencial espontâneo).

8.2.2 – Interpretação das Sondagens Elétricas

A interpretação da curva experimental ($\rho_a \times AB/2$) de uma S.E. consiste basicamente na obtenção de estimativas numéricas dos parâmetros geo-elétricos, no caso, resistividades e espessuras, para o modelo de camadas planas e paralelas. Os ajustes entre as curvas de campo e aquelas interpretadas foram feitos mediante sucessivas tentativas de variações dos parâmetros de um modelo inicialmente

proposto, finalizando quando se obteve, ao mesmo tempo, um ajuste satisfatório e a incorporação de vínculos conhecidos sobre o modelo geo-elétrico.

8.2.2.1 – As calibrações geo-elétricas

Diante da inexistência de perfis elétricos de poços, que revelassem os valores de resistividades *in situ* dos diversos horizontes estratigráficos locais, adotou-se a estratégia de executar sondagens elétricas de “calibração”, adjacentes a poços de perfis estratigráficos conhecidos. As interpretações destas sondagens foram feitas fixando-se os valores de espessuras das camadas (fornecidas pelos perfis litológicos) e estimando-se as resistividades, de maneira a ajustar a curva usando intervalos de valores característicos (dados bibliográficos) das respectivas litologias (Medeiros e Silva, 1996).

A primeira calibração geo-elétrica foi realizada contígua a um poço da CAERN (S.E. 15 na tabela 8.1) de perfil litológico conhecido (figura 8.1), apesar de situada fora dos limites da área estudada. O ajuste da curva referente a esta calibração (figura 8.2) foi bastante satisfatório, embora pequenas variações texturais e no conteúdo matricial das litologias, descritas no perfil litológico do poço (pequenas mudanças no grau de compactação e/ou na porcentagem de materiais finos/grosseiros, dentre outros) não tenham sido evidenciadas. O fato do embasamento condutivo ter sido identificado a uma profundidade menor que no perfil do poço, é atribuído à variação topográfica observada entre este último e o centro da sondagem (diminuição de cota no sentido da S.E.), uma vez que esta não foi efetuada imediatamente contígua ao poço (face ao elevado tráfego de animais e pessoas no local).

Sete principais horizontes geológicos mostraram-se influentes na sondagem, incluindo solo, porções não saturadas e saturadas do Aquífero Barreiras e o início do embasamento hidrogeológico deste último (seqüência mesozóica não aflorante na área). O modelo ora proposto envolve inicialmente um solo areno-argiloso, úmido e com bastante matéria orgânica, de espessura igual a 2 m e resistividade em torno de 350 Ω .m. Logo abaixo, tem-se uma seqüência indiferenciada, com espessura total de

12 m e resistividade de 65 Ω .m, litologicamente representada por variações de siltito arenoso a arenito fino.

A seguir, caracterizou-se um pequeno nível de 1 m de arenito fino a grosso e resistividade da ordem de 500 Ω .m, sobreposto a duas camadas silticas arenosas, com espessuras de 4 m e 8 m e resistividades iguais a 30 e 20 Ω .m, respectivamente. Finalmente, uma nova camada com 10 m de espessura e resistividade da ordem de 600 Ω .m, correlacionada pelo perfil de poço a um arenito fino a médio, acha-se repousando sobre um embasamento condutivo de resistividade igual a 40 Ω .m e associado ao topo dos sedimentos mesozóicos regionais (arenito calcífero). Considerando que o centro da sondagem não foi locado exatamente sobre o poço (e sim a, aproximadamente, 20 m deste), conforme mencionado anteriormente, pequenas variações das espessuras são esperadas. Além disto, a camada siltica de 1 m, na parte inferior do perfil, não foi caracterizada, provavelmente devido ao fenômeno geo-elétrico de supressão de camadas (Orellana, 1972). Em particular, os valores maiores de resistividades (500 - 600 Ω .m) dizem respeito às camadas de maior transmissividade hídrica do aquífero no local, e, por isso, encontram-se filtradas para captação d'água no perfil construtivo do referido poço.

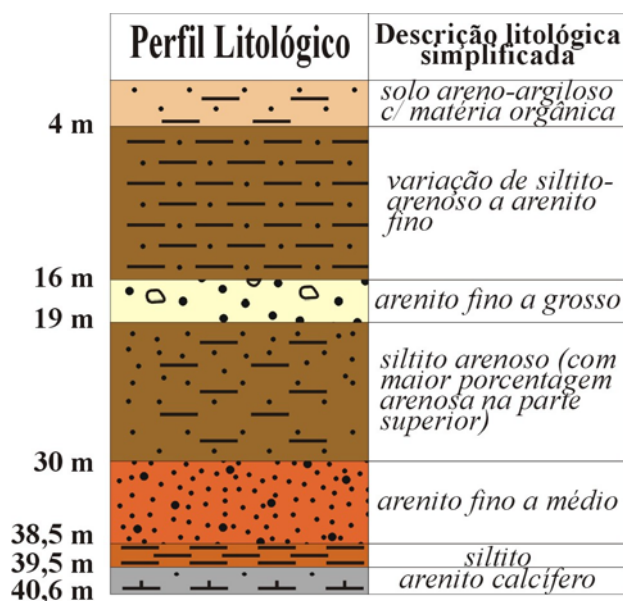


Figura 8.1 – Perfil litológico do poço de propriedade da CAERN, na localidade de Bica-São José de Mipibu-RN.

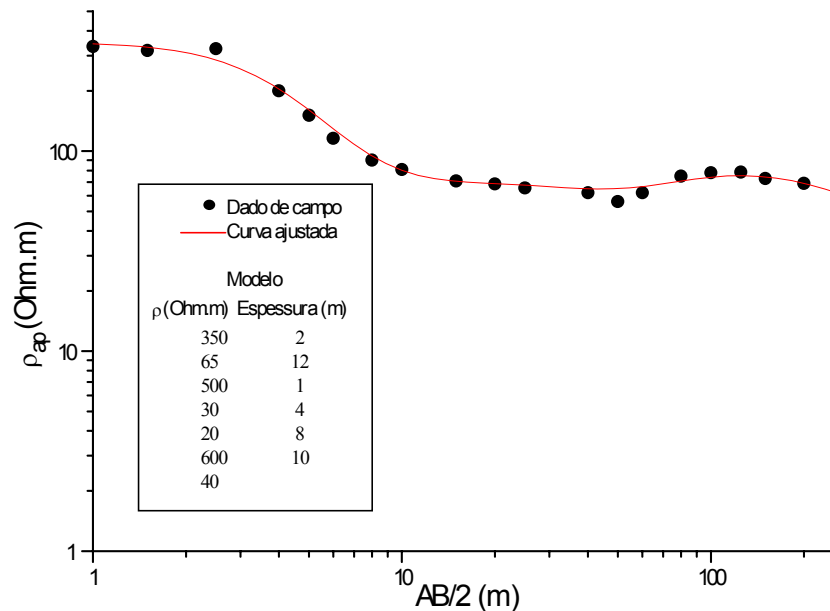


Figura 8.2 – Sondagem elétrica de calibração (S.E.15)

A segunda calibração, situada na localidade do loteamento Sonho Verde em Parnamirim (S.E. 4 na tabela 8.1) e adjacente ao poço perfurado recentemente no local (figura 8.3), definiu um modelo geo-elétrico estratigráfico constituído da base para o topo por (figura 8.4): calcário (referente a bacia sedimentar cretácica), arenito calcífero com resistividade de 30 Ω .m, arenito argiloso passando a arenito fino a grosso com resistividades de 180 e 500 Ω .m, respectivamente, e sedimentos arenosos com eventual presença argilosa e umidade, apresentando resistividades de 1200 a 5500 Ω .m. A exemplo da primeira calibração, a sondagem não foi executada exatamente sobre a boca do referido poço, o que pode explicar a pequena variação do valor total de espessura até o topo da seqüência mesozóica (arenito calcífero) da ordem de 3 m (66 m no perfil litológico do poço e 63 m na interpretação geo-elétrica).

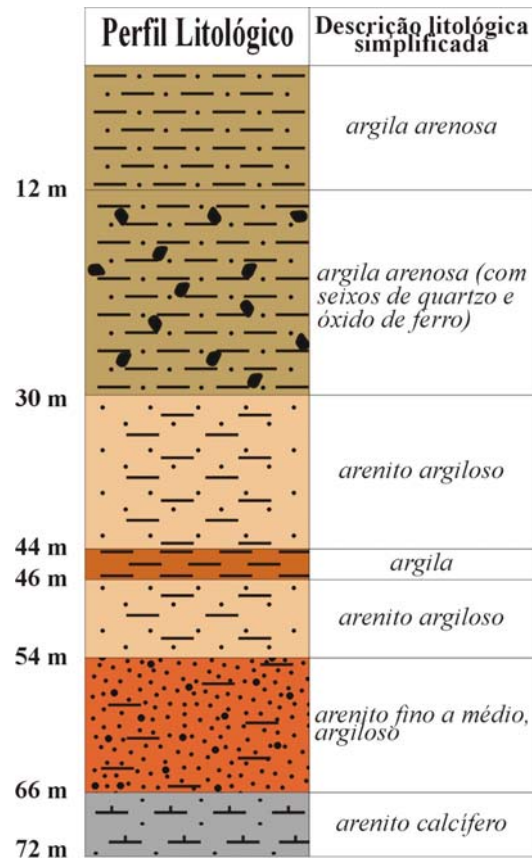


Figura 8.3 – Perfil litológico do poço tubular situado no loteamento Sonho Verde em Parnamirim.

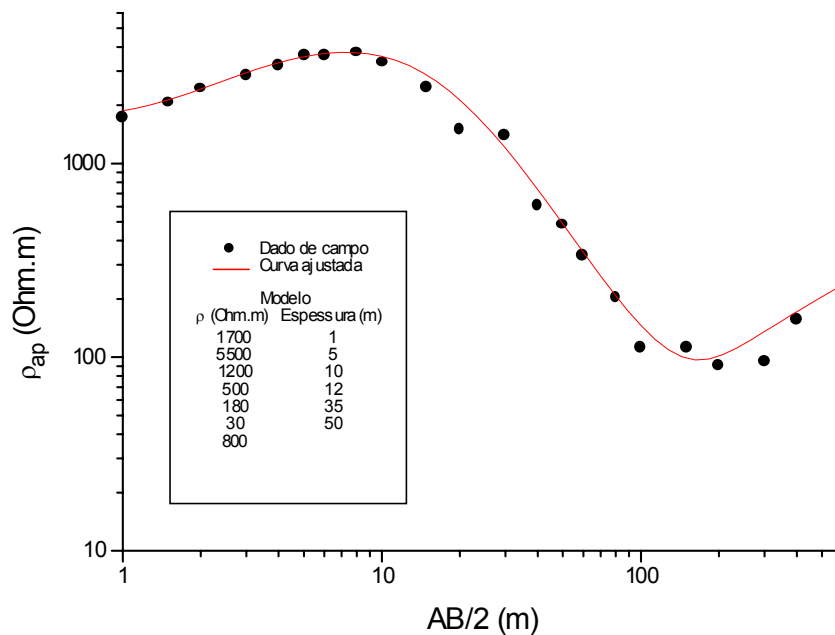


Figura 8.4 – Segunda sondagem elétrica de calibração (S.E.4).

8.2.2.2 – As demais sondagens elétricas executadas

As figuras 8.5 a 8.17 a seguir apresentam as demais sondagens elétricas executadas, incluindo os respectivos modelos geo-elétricos.

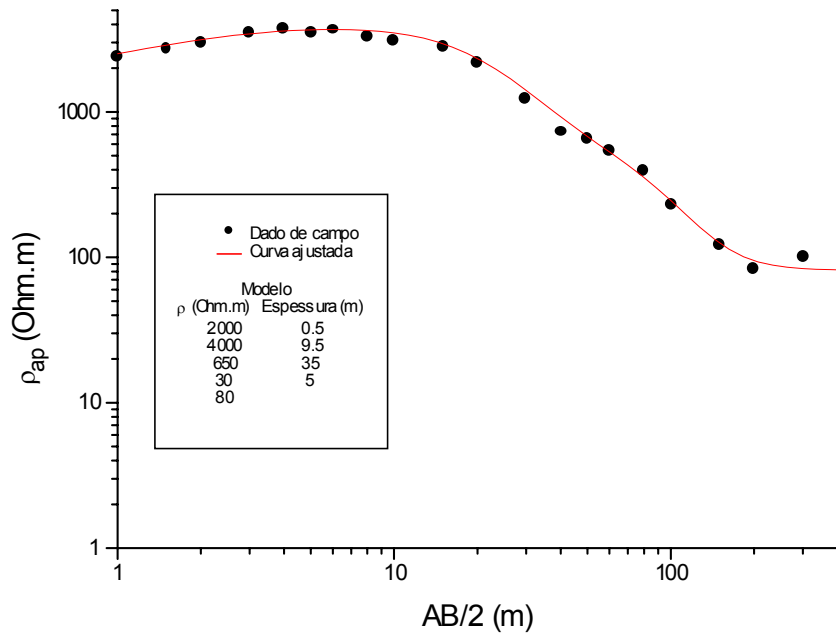


Figura 8.5 – Sondagem elétrica 1 e seu modelo geo-elétrico.

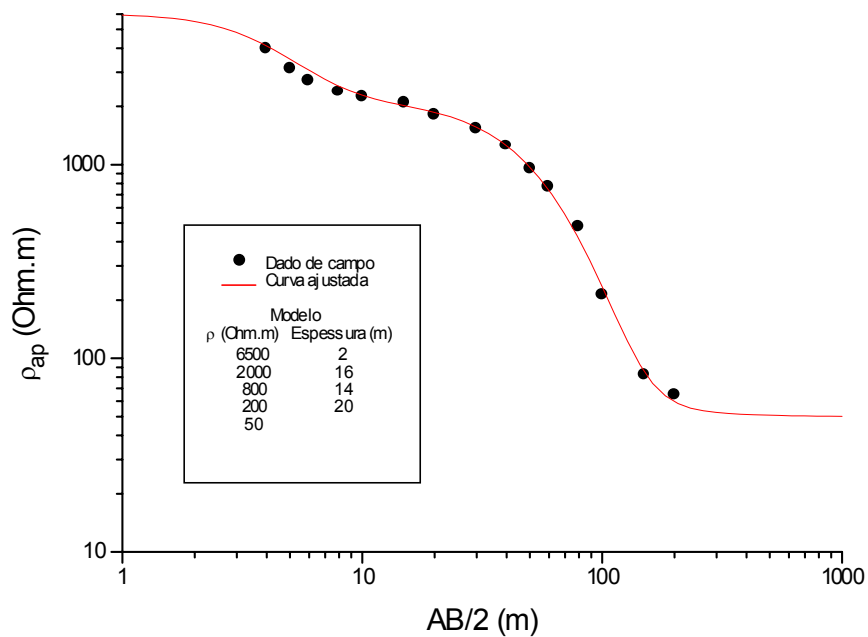


Figura 8.6 – Sondagem elétrica 2 e seu modelo geo-elétrico.

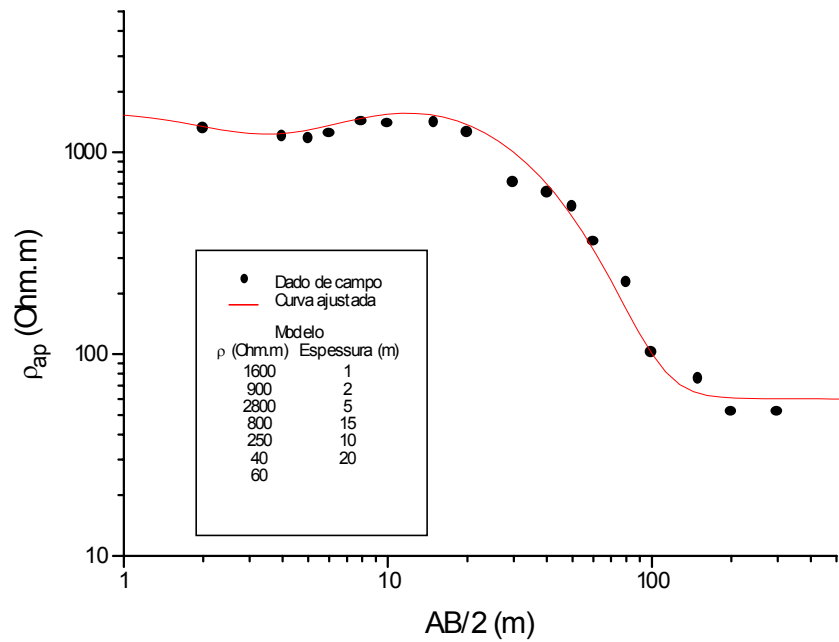


Figura 8.7 – Sondagem elétrica 3 e seu modelo geo-elétrico.

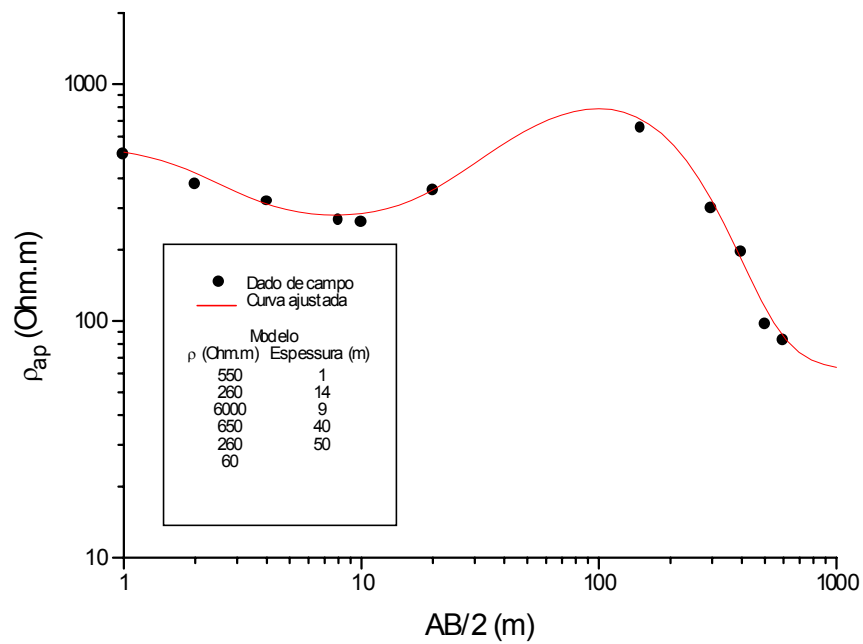


Figura 8.8 – Sondagem elétrica 5 e seu modelo geo-elétrico.

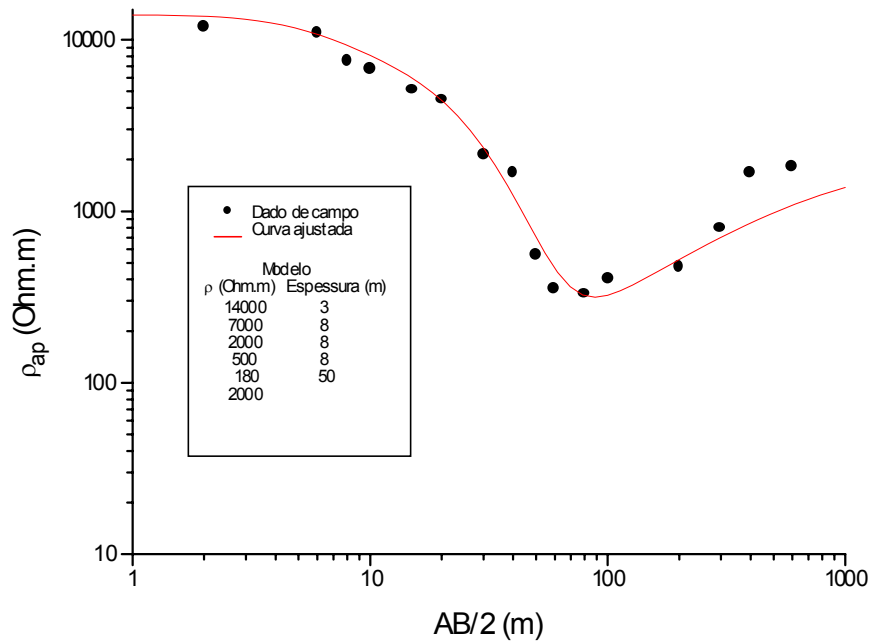


Figura 8.9 – Sondagem elétrica 6 e seu modelo geo-elétrico.

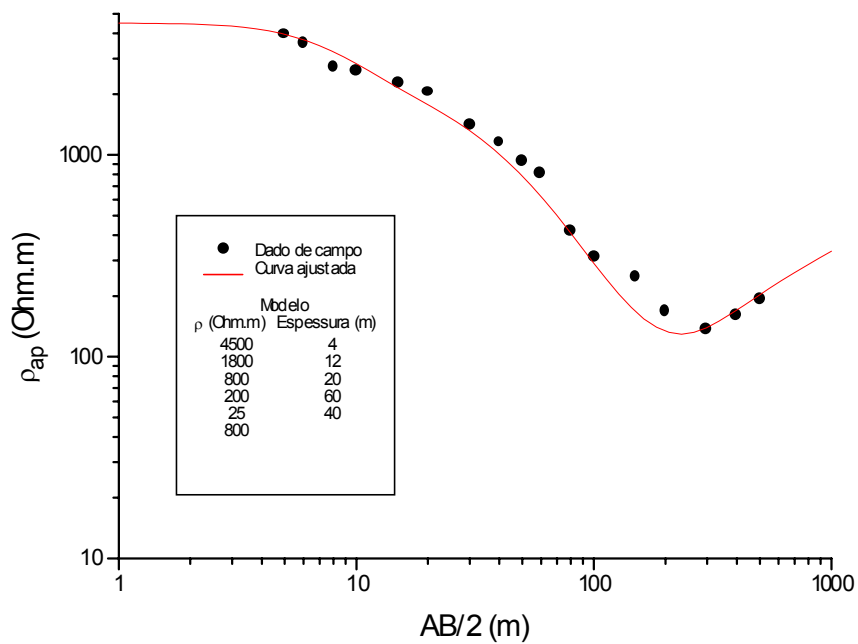


Figura 8.10 – Sondagem elétrica 7 e seu modelo geo-elétrico.

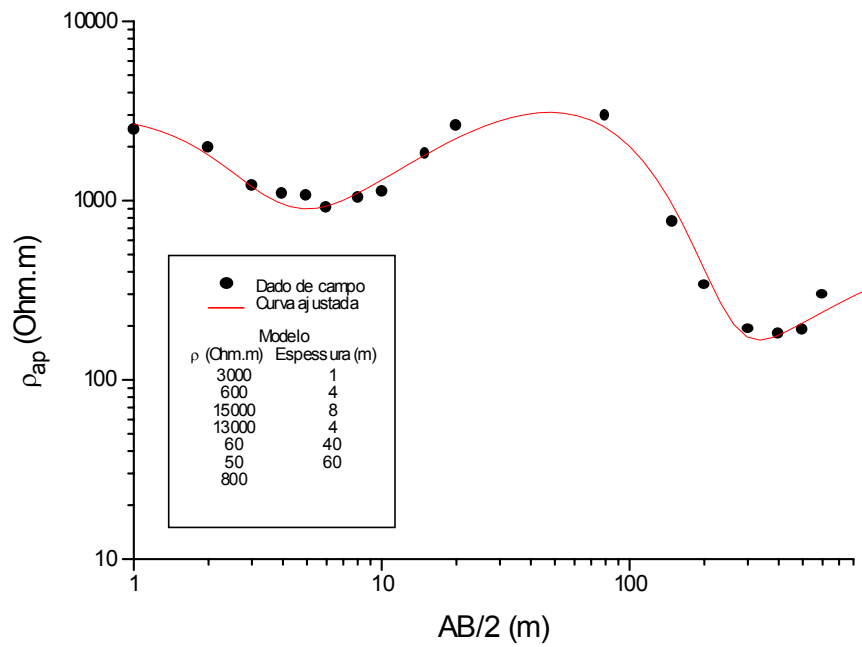


Figura 8.11 – Sondagem elétrica 8 e seu modelo geo-elétrico.

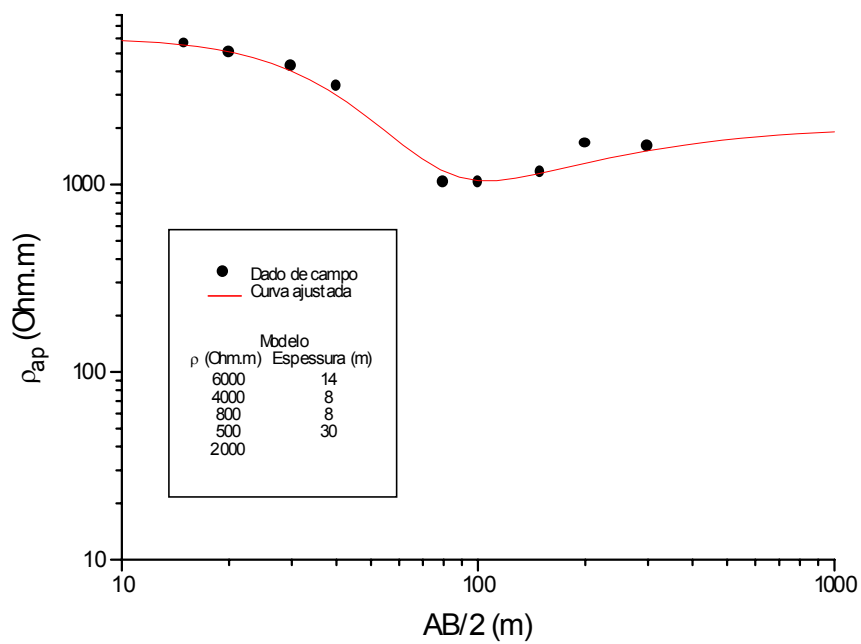


Figura 8.12 – Sondagem elétrica 9 e seu modelo geo-elétrico.

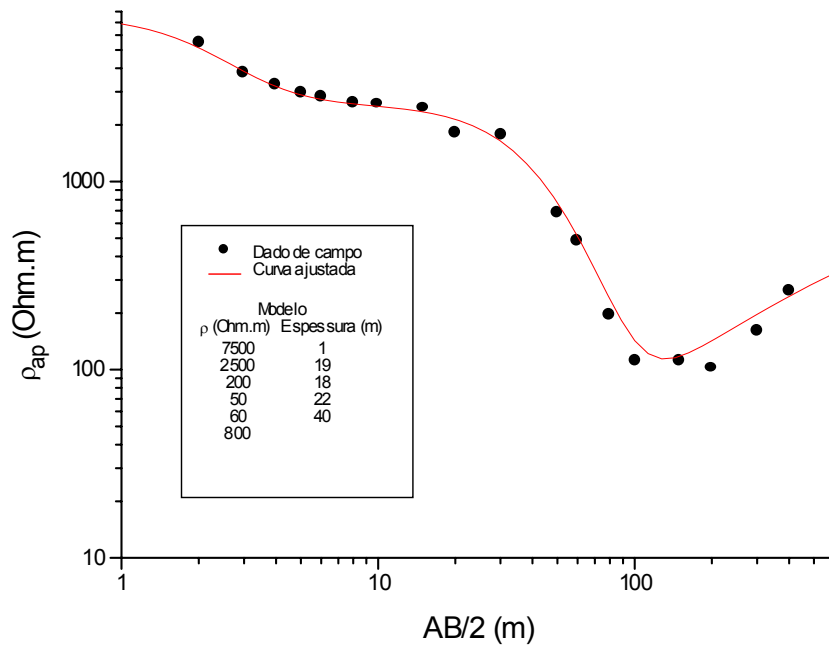


Figura 8.13 – Sondagem elétrica 10 e seu modelo geo-elétrico.

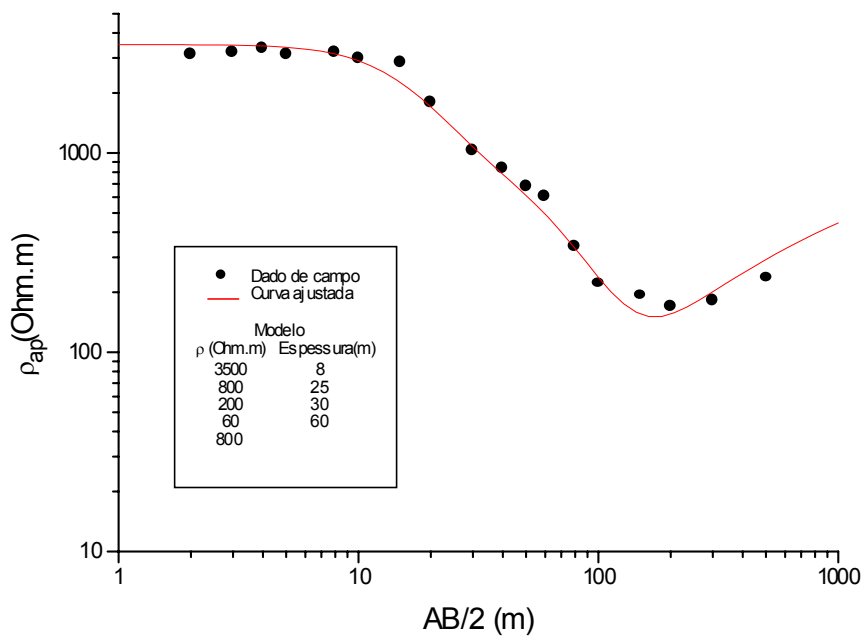


Figura 8.14 – Sondagem elétrica 11 e seu modelo geo-elétrico.

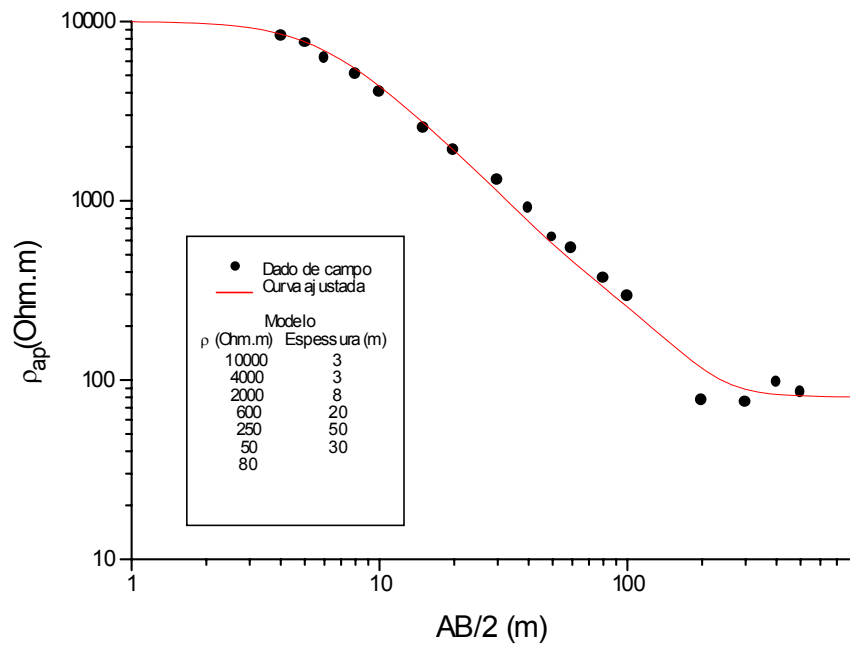


Figura 8.15 – Sondagem elétrica 12 e seu modelo geo-elétrico.

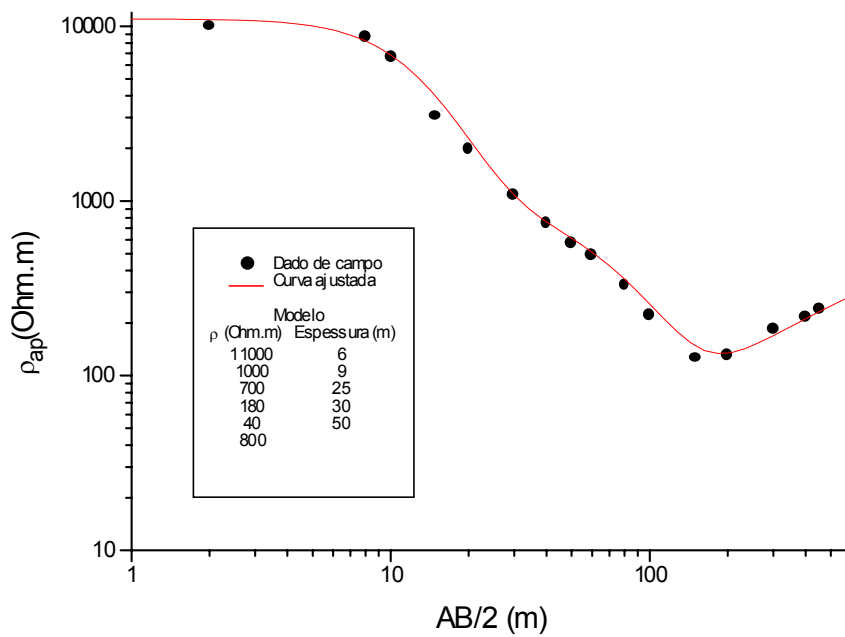


Figura 8.16 – Sondagem elétrica 13 e seu modelo geo-elétrico.

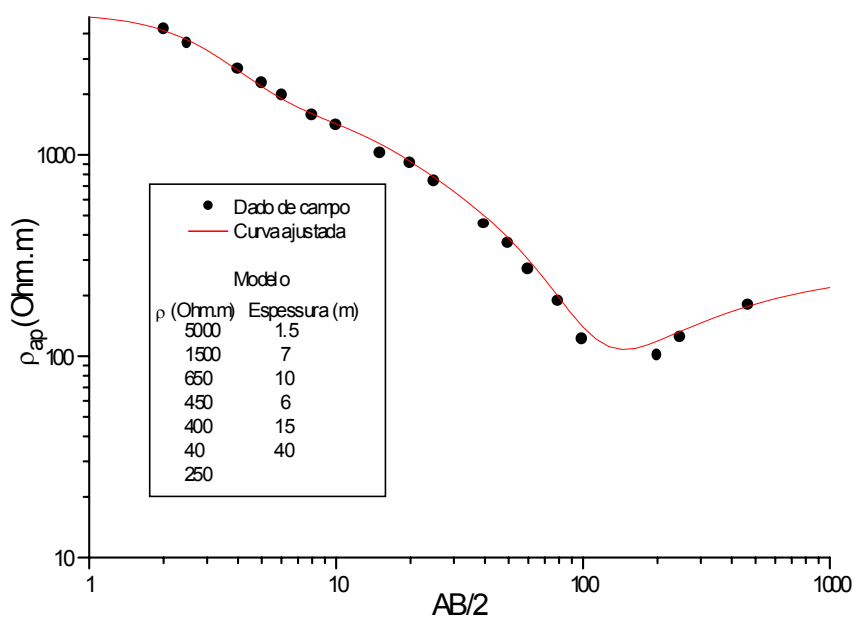


Figura 8.17 – Sondagem elétrica 14 e seu modelo geo-elétrico.

8.2.2.3 – Outros resultados geo-elétricos

Afora os valores buscados prioritariamente, no caso a espessura total do Aquífero Barreiras na área, outros resultados do levantamento geo-elétrico são apresentados na tabela 8.2, incluindo relações entre os tipos litológicos e suas respectivas resistividades e espessuras estimadas. Os calcários da seqüência cretácica, apesar de aparecerem na interpretação de algumas sondagens elétricas (resistividades da ordem de 800 a 1200 Ω .m na base da coluna estratigráfica) não foram caracterizados satisfatoriamente por requererem maiores aberturas de eletrodos (maior penetração de corrente elétrica) e não se incluírem nos objetivos da presente pesquisa.

LITOLOGIAS	OBSERVAÇÕES	RESISTIVIDADES ESTIMADAS (Ohm.m)	ESPESSURAS ESTIMADAS (m)
Areias quartzosas, pouco compactas (Cob. Arenosas)	Eventual presença de matéria orgânica e/ou fração argilosa.	1700 - ∞	0,5 - 14
Solo areno-argiloso (Grupo Barreiras)	Eventual presença de matéria orgânica e/ou umidade.	350 - 1600	1 - 2
Argilito arenoso a Arenito argiloso (Grupo Barreiras)	Eventual presença de matéria orgânica e/ou umidade.	260 - 1800	2 - 14
Arenito fino a grosso (Grupo Barreiras)	Eventual presença de umidade.	2000 - ∞	4 - 19
Argilito/siltito (Grupo Barreiras)	com eventual fração arenosa, saturado.	20 - 65	4 - 40
Arenito argiloso (Grupo Barreiras)	Saturado.	180 - 260	10 - 60
Arenito fino a grosso (Grupo Barreiras)	Saturado	400 - 800	1 - 40
Arenito calcífero (topo da seqüência mesozóica)	Embasamento hidrogeológico do Aq. Barreiras	25 - 80	∞

Tabela 8.2 – Principais litologias e estimativa dos respectivos valores de resistividade e espessura.

9 – IMPLICAÇÕES DO CONDICIONAMENTO ESTRUTURAL NO AQUÍFERO BARREIRAS

No presente capítulo, serão mostradas as principais relações e influências do condicionamento estrutural regional no Aquífero Barreiras, conforme os objetivos primordiais da presente pesquisa. Esta abordagem concentrou-se no setor oriental da bacia do Rio Pirangi, sendo realizada através da interação dos diversos levantamentos que levaram à caracterização do quadro hidrológico subterrâneo e superficial local, somado ao mapeamento estrutural da área.

9.1 – VARIAÇÕES DE ESPESSURAS SATURADAS

9.1.1 – Aspectos Qualitativos

As implicações de uma estruturação na área afetando o Grupo Barreiras e, por conseguinte, o aquífero homônimo, envolvem, principalmente, a delimitação de zonas com maior ou menor valor de espessura saturada, decorrente de falhamentos. Como exemplo desta influência, Lucena e Queiroz (1996) definiram como causa do aumento da vazão explorada em poços de uma mesma bateria (captação Granja Recreio - Macaíba-Parnamirim/RN), o aumento de espessura saturada do Aquífero Barreiras, decorrente da continuação da estrutura do *Graben* Papary que intercepta parte desta bateria de poços.

Tomando-se como base as seções geológicas apresentadas no tópico 7.1 da presente tese, foram confeccionadas seções hidrogeológicas correspondentes, com vistas a subsidiar e ilustrar inicialmente a influência qualitativa do condicionamento estrutural no contexto hidrogeológico do Aquífero Barreiras (figuras 9.1, 9.2 e 9.3).

A cinemática dos falhamentos, interceptados pelas seções hidrogeológicas, foi interpretada com base nos diversos estudos e levantamentos de campo que possibilitaram a caracterização do quadro estrutural regional, apresentada nos capítulos 5, 6 e 7. O horizonte-guia adotado nestas seções foi o topo da seqüência mesozóica não aflorante (correlacionado ao Aquitardo Cretácico), de acordo com o exposto no tópico 7.1. Os rejeitos normais detectados são da ordem de 15 a 70 m e, a julgar pela disposição estratigráfica local, sugerem um tectonismo sincrônico com a deposição do Grupo Barreiras.

As seções hidrogeológicas podem ser analisadas de forma mais objetiva através de subdivisões estratigráficas destas em três partes, com características hídricas bem distintas. A primeira, basal, envolve litologicamente “arenitos calcíferos”, passando a calcáreos e margas em profundidade (de acordo com dados de poços). Seguindo a nomenclatura usual dos técnicos da CAERN, designou-se por Aquitardo Cretácico a porção superior desta seqüência estratigráfica, representando o embasamento hidrogeológico do Aquífero Barreiras, conforme reportado em capítulos anteriores. A porção intermediária corresponde à espessura saturada do aquífero, englobando desde sedimentos argilosos até arenitos grosseiros. A parte superior, situada acima do nível estático (sedimentos não saturados) é constituída, em geral, por arenitos argilosos a arenitos grosseiros do Grupo Barreiras, Coberturas Arenosas e solos indiferenciados. Estas coberturas, particularmente, parecem atuar como zona de recarga para o Aquífero Barreiras, o que elevaria esta unidade à posição de integrante do sistema aquífero local, face a esta importante conexão hidráulica (drenança vertical).

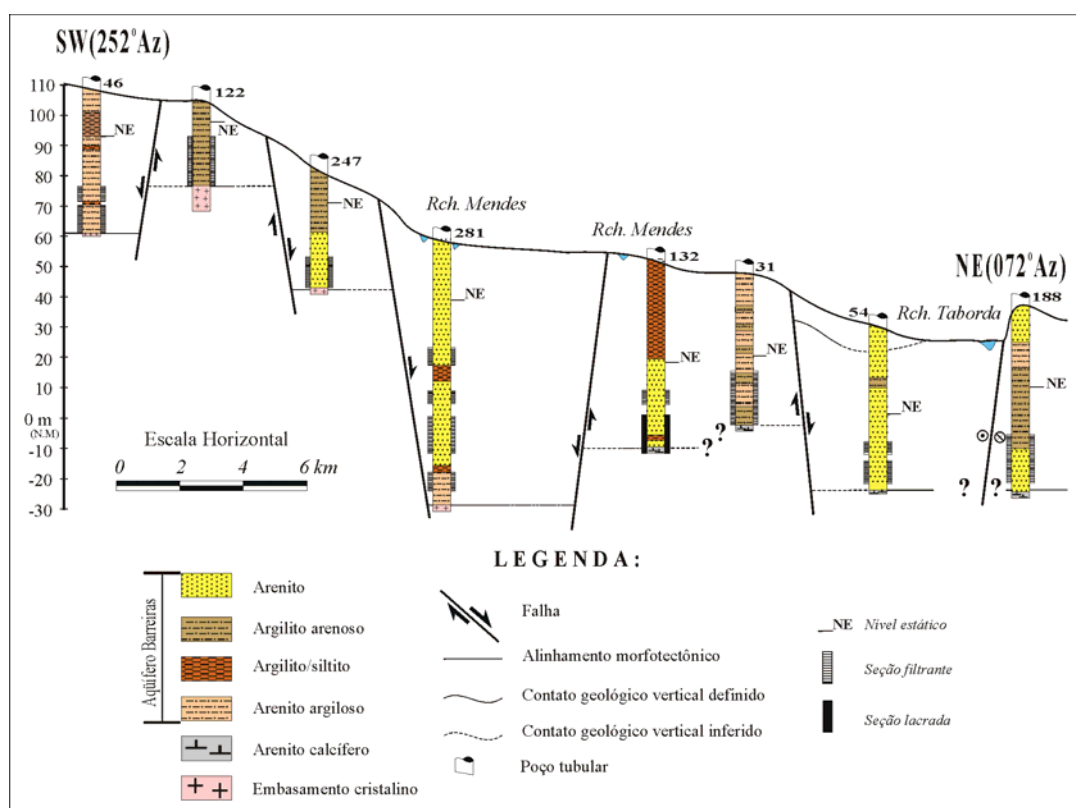


Figura 9.1 – Seção hidrogeológica A'-B', coincidente com a seção geológica correspondente apresentada no tópico 7.1 (ver localização no mapa geológico em anexo).

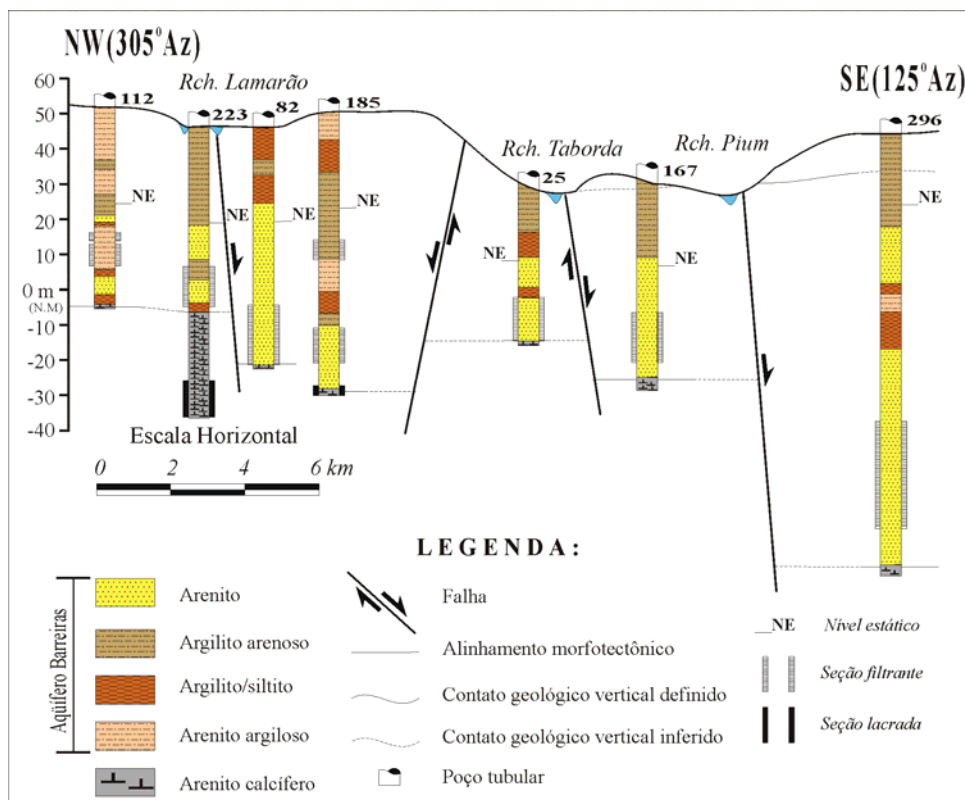


Figura 9.2 – Seção hidrogeológica C'-D', coincidente com a seção geológica correspondente apresentada no tópico 7.1 (ver localização no mapa geológico em anexo).

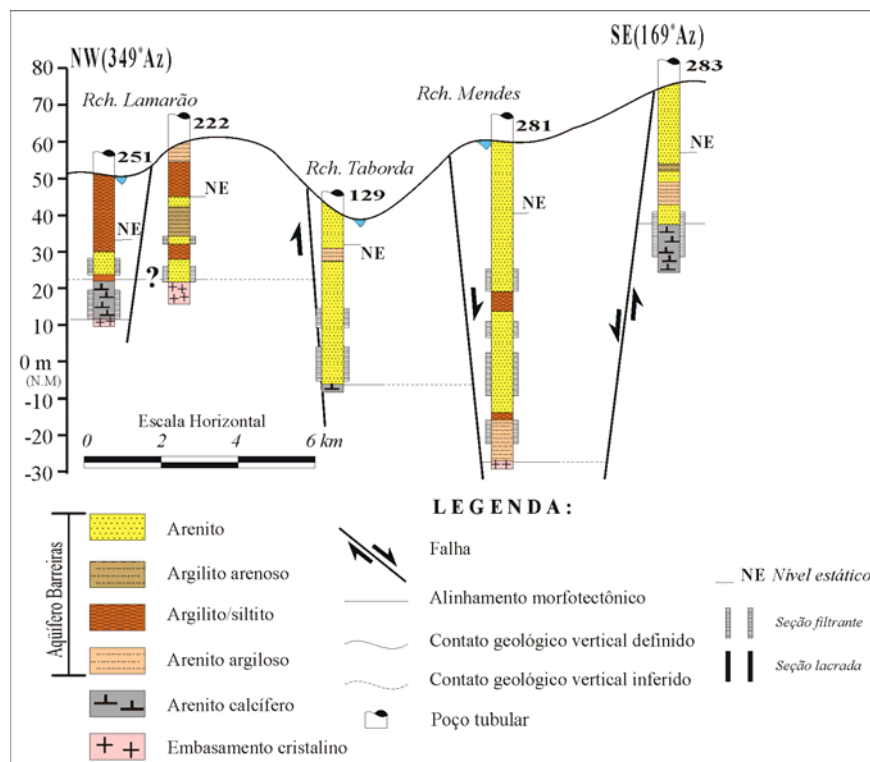


Figura 9.3 – Seção hidrogeológica E'-F', coincidente com a seção geológica correspondente apresentada no tópico 7.1 (ver localização no mapa geológico em anexo).

Diante do exposto, a implicação fundamental dos falhamentos diz respeito aos afundamentos ou soerguimentos de horizontes estratigráficos, particularmente do Aquitardo Cretácico, mesmo que relativos a blocos estruturais adjacentes (figura 9.1, 9.2 e 9.3). Estes afundamentos proporcionaram um maior acúmulo de sedimentos do Grupo Barreiras, o que produziu, em última análise, zonas de maior transmissividade em virtude do aumento da espessura saturada do aquífero.

A interpretação e modelamento matemático de sondagens geo-elétricas, discutida no capítulo 8, somados a dados de poços que seccionam todo o Grupo Barreiras (quando disponíveis) e pontos de espessura saturada zero, tomados ao longo da linha de costa, possibilitaram a elaboração de um mapa de espessura do Aquífero Barreiras no setor oriental da bacia do Rio Pirangi (figura 9.4). As informações dos poços tubulares ora utilizados foram obtidos nos acervos da Secretaria de Recursos Hídricos-SERHID/RN e da CAERN, além de empresas particulares locais de perfuração de reconhecida capacidade técnica (PROPOÇO, HIDROPOÇOS, GEPÊ ENGENHARIA E PROSENG). A distribuição e origem dos dados são apresentadas na tabela 9.1. Estas informações pontuais, envolvendo coordenadas XY (UTM) e respectivos valores de espessura, foram gridadas e interpoladas no *software Surfer for Windows* pelo método *Kriging*.

DADOS /ORIGEM	NÚMERO DE PONTOS
Linha de costa (esp. saturada zero)	47
Poços tubulares	31
Sondagens elétricas	14
Total	92

Tabela 9.1 – Origem dos dados utilizados na confecção do mapa de espessura saturada do Aquífero Barreiras no setor oriental da bacia do Rio Pirangi.

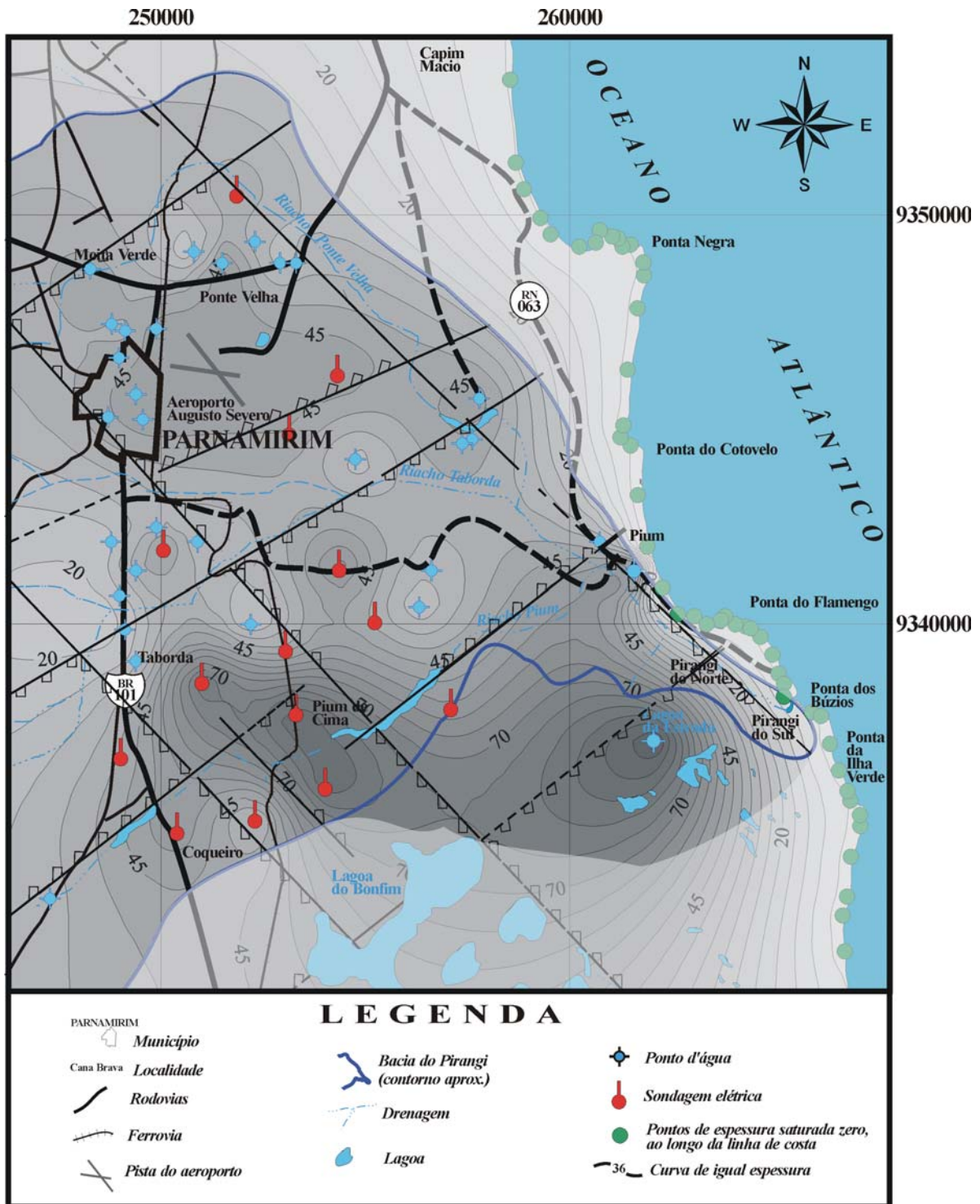


Figura 9.4 – Mapa de espessura do Aquífero Barreiras e o esboço estrutural da área do setor oriental da bacia do Rio Pirangi.

A figura 9.4, resultante do tratamento dos dados, revela valores de espessuras bastante variáveis, da ordem de 30 m em alguns locais do centro norte do mapa, alcançando cerca de 100 m nos extremos SE (já além do limite da bacia do Rio Pirangi) e SW do mesmo. Tais valores, quando confrontados com o arcabouço estrutural da região, discutido nos capítulos 5, 6 e 7 da presente tese, refletem a ampla influência desta estruturação na geometria do aquífero. Nesse contexto, as maiores espessuras do aquífero estão associadas com o abatimento, por falhas, do substrato carbonático do Grupo Barreiras, destacando-se a área sob influência do *Graben* Papary (Lucena e Queiroz, 1996) no SE do mapa. As menores espessuras, por sua vez, relacionam-se normalmente com o soerguimento (mesmo que relativo) desse mesmo substrato carbonático, igualmente decorrente da evolução tectono-estrutural da região. O gradiente E-W bem definido, observado no setor oriental do mapa, deve-se à influência de valores de espessura do aquífero iguais a zero ao longo da linha de costa; dessa forma, os valores de espessuras saturadas neste setor do mapa, igualmente resultantes da interpolação e gridagem dos dados de origem, devem ser encarados com reservas.

Ressalta-se ainda que o mapa da figura 9.4 representa uma abordagem inicial das variações de espessura do Aquífero Barreiras na área em questão, tendo em vista principalmente o reduzido número de informações disponíveis de poços que seccionam toda esta unidade estratigráfica. Tais variações de espessuras saturadas podem ser igualmente visualizadas nos perfis hidrogeológicos A' - B', C' - D' e E' - F' das figuras 9.1, 9.2 e 9.3, respectivamente.

Uma outra forma de visualização qualitativa do impacto do condicionamento estrutural regional na geometria do Aquífero Barreiras é apresentada na figura 9.5. Nesta, tomou-se como base o próprio arcabouço tectono-estrutural da área de toda a bacia do Rio Pirangi (ver mapa geológico em anexo) e os dados que foram utilizados na elaboração do mapa de espessura saturada (figura 9.4). Para cada bloco estrutural, delimitado por alinhamentos morfotectônicos ou falhamentos (quando possível a identificação de rejeitos), foi atribuído um valor aproximadamente representativo da profundidade do topo da seqüência carbonática cretácica (embasamento hidrogeológico do Aquífero Barreiras). Este procedimento permitiu evidenciar, em última análise, uma

maior ou menor espessura saturada do Aquífero Barreiras, conforme abatimento ou soerguimento (mesmo que relativo) deste substrato carbonático, respectivamente.

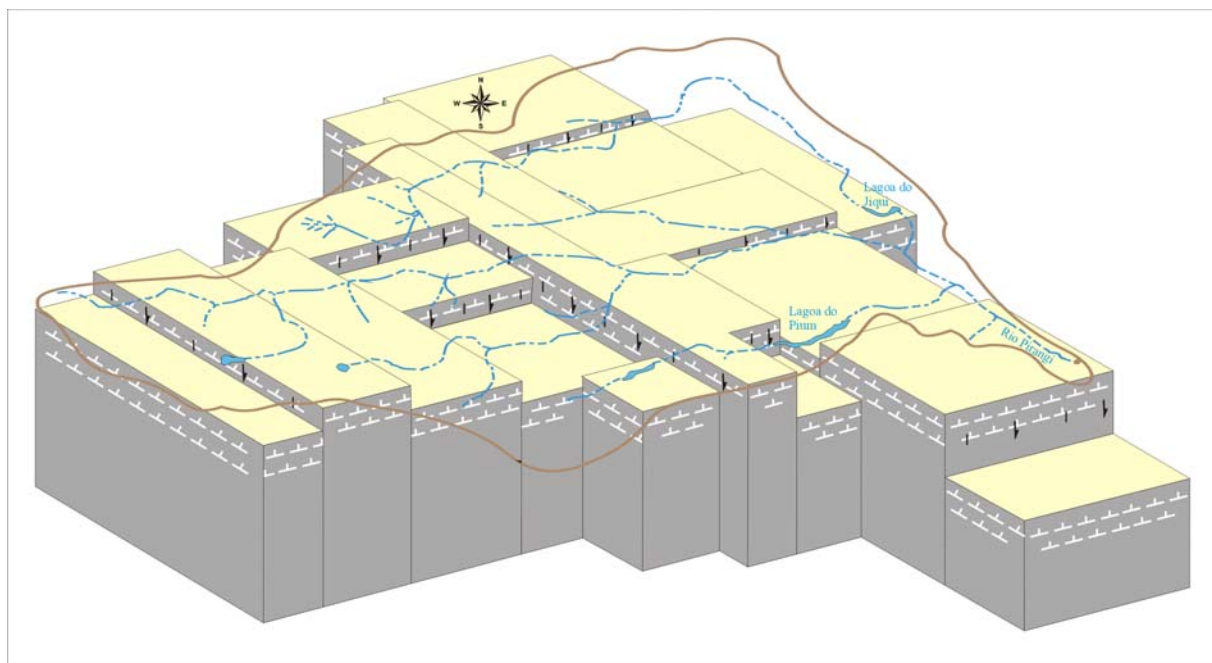


Figura 9.5 – Bloco diagrama esquemático da bacia do Rio Pirangi; os blocos estruturais com abatimento relativo acham-se associados com variações positivas de espessura do Aquífero Barreiras.

9.1.2 – Aspectos Quantitativos

A tarefa de quantificar a influência do condicionamento tectono-estrutural no contexto do Aquífero Barreiras, bem como de outros aquíferos porosos, é bastante complexa. Este fato, particularmente no tocante a variações de espessuras saturadas, deve-se principalmente ao grande número de variáveis hidrogeológicas e físicas envolvidas. Entretanto, resultados satisfatórios foram aqui obtidos, adotando-se procedimentos que objetivaram atenuar esta problemática.

Dentre tais procedimentos, destaca-se inicialmente a seleção de poços tubulares destinados ao referido estudo. Estas captações, num total de 87 (anexo 2), abrangem poços da CAERN (77) e das empresas particulares locais já mencionadas (10), sendo todas com perfis geológicos e construtivos conhecidos, além de valores respectivos de vazões recomendadas a partir de testes de produção. Estas informações possibilitaram a

confeção de perfis hidrogeológicos (figuras 9.6 e 9.7), nos quais se pode visualizar a influência preponderante da estruturação da área nas vazões dos poços locais.

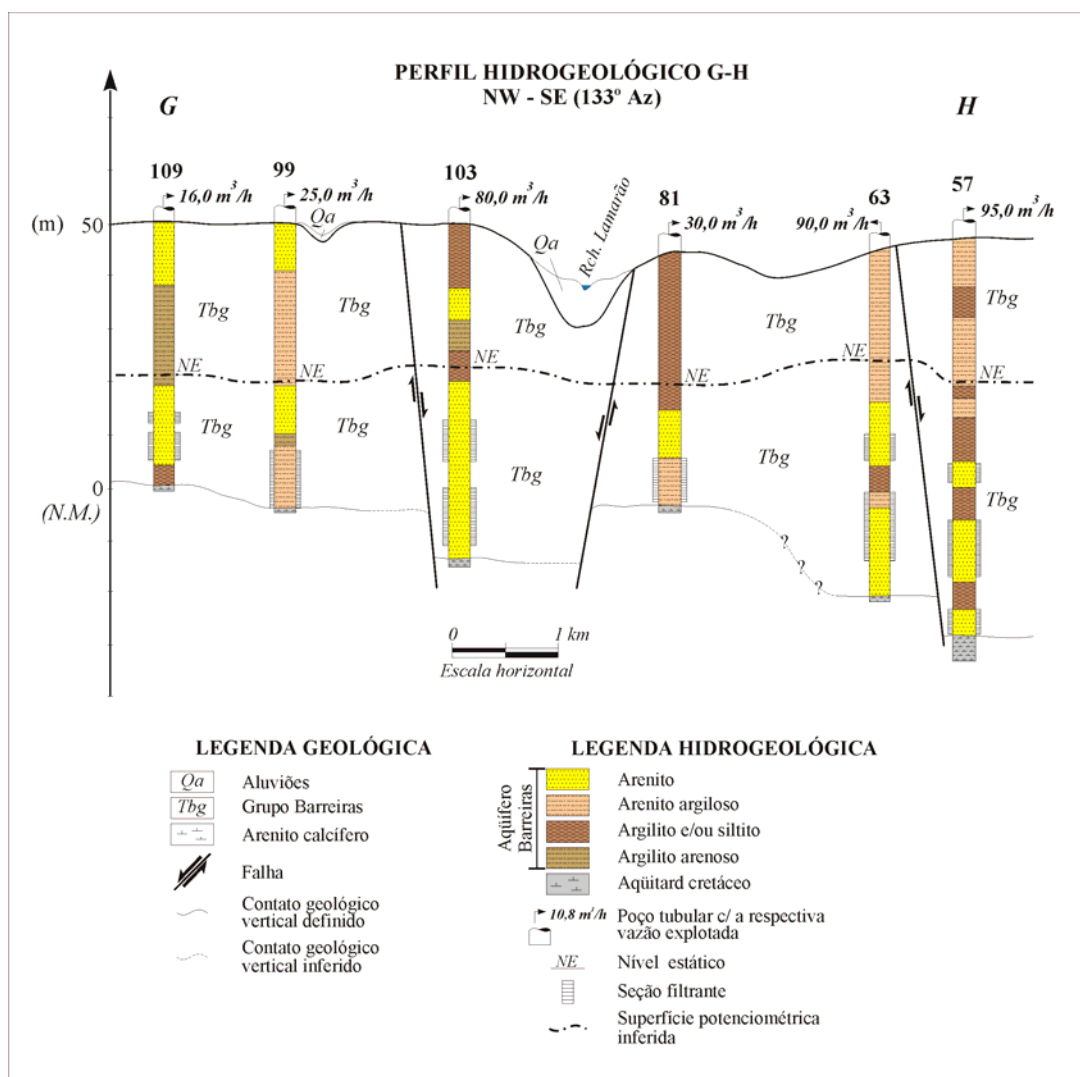


Figura 9.6 – Seção hidrogeológica G–H; ver localização no mapa geológico em anexo.

A captação 103 do perfil G-H (figura 9.6), separada por uma distância de pouco mais de 1,5 km da captação 99 e situada em um bloco estrutural local distinto desta última, apresenta uma vazão explotada de 3,2 vezes maior, enquanto que poços com espessuras saturadas aproximadamente iguais mostram produtividades idênticas (captações 46 e 282 no perfil I-J, figura 9.7). Estes perfis hidrogeológicos (figuras 9.6 e 9.7), entretanto, revelam igualmente as dificuldades a serem vencidas na tarefa de se encontrar um fator de correlação entre vazões explotadas e as respectivas espessuras saturadas.

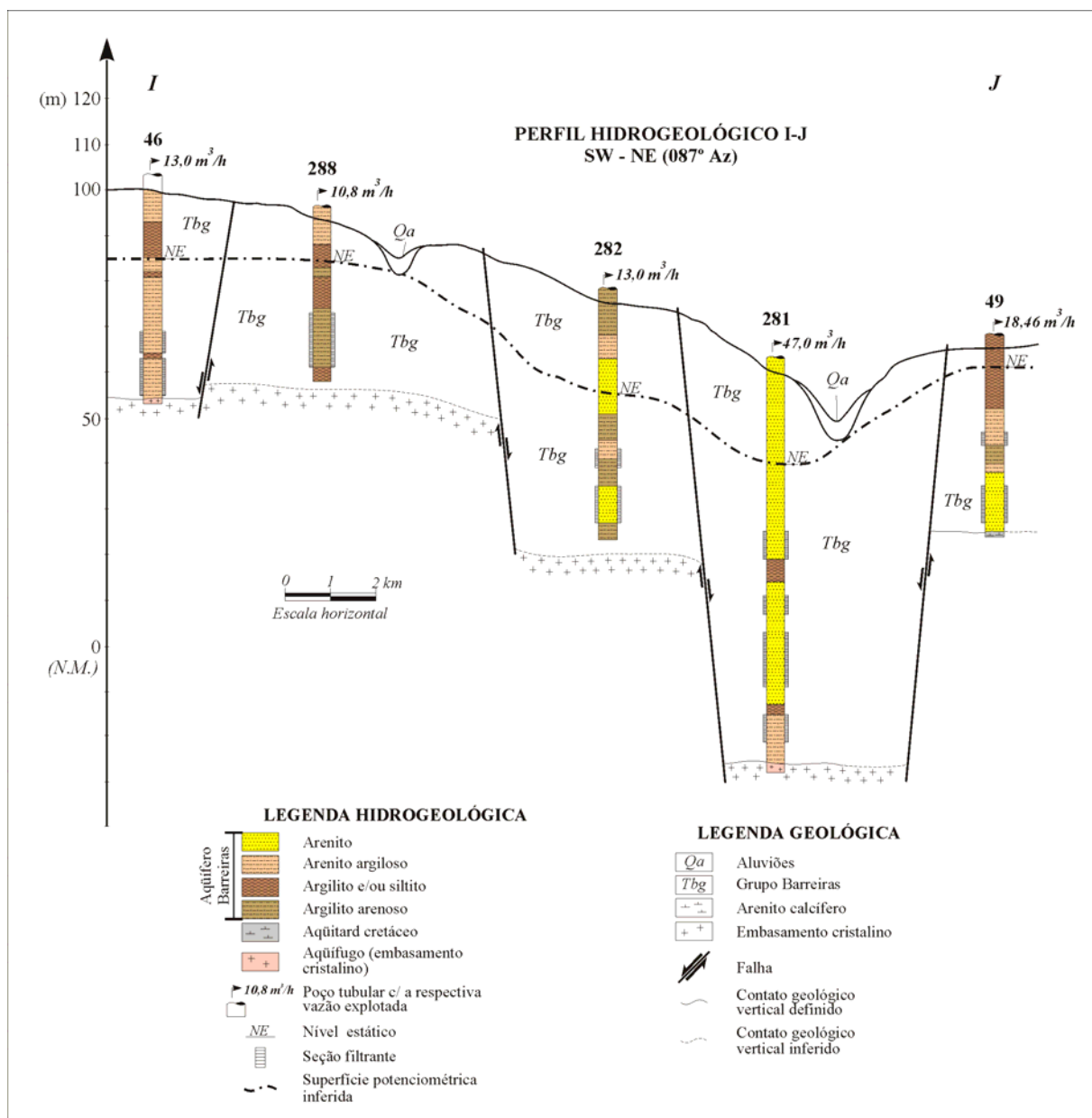


Figura 9.7 – Seção hidrogeológica I-J; ver localização no mapa geológico em anexo.

A busca por um coeficiente de correlação satisfatório entre vazão explotada e espessura saturada, para uma determinada área de pesquisa, deve considerar algumas simplificações e incorporar alguns vínculos, intrínsecos nesta relação. A principal simplificação adotada no presente estudo diz respeito ao gradiente hidráulico, adotado como sendo constante, já que se objetiva correlacionar a descarga medida e a espessura do aquífero, a partir da Lei de Darcy, numa área já caracterizada em termos de

potenciometria (excetuando-se assim a influência do gradiente hidráulico local na descarga final de uma captação). No tocante aos demais parâmetros que, de uma maneira ou outra, influem diretamente na relação ora estudada, destaca-se a disposição vertical das captações, ou seja, se estas seccionam ou não todo o Grupo Barreiras, bem como a extensão vertical das seções filtrantes. Estas últimas acham-se implicitamente associadas com a proporção argilas/areias, já que horizontes mais argilosos normalmente não são revestidos por filtros.

Dentro deste contexto, quatro tipos de análises foram efetuadas, considerando os poços que seccionam ou não todo o Grupo Barreiras, além de correlacionar os parâmetros espessura saturada ou extensão das seções filtrantes com as respectivas vazões exploradas (figuras 9.8, 9.9, 9.10 e 9.11). Tais correlações foram realizadas buscando-se o melhor ajuste dos pontos, segundo a metodologia de regressão linear, as quais se acham resumidas na tabela 9.2. As captações apresentam diâmetros de revestimento de 6 ou 8 polegadas.

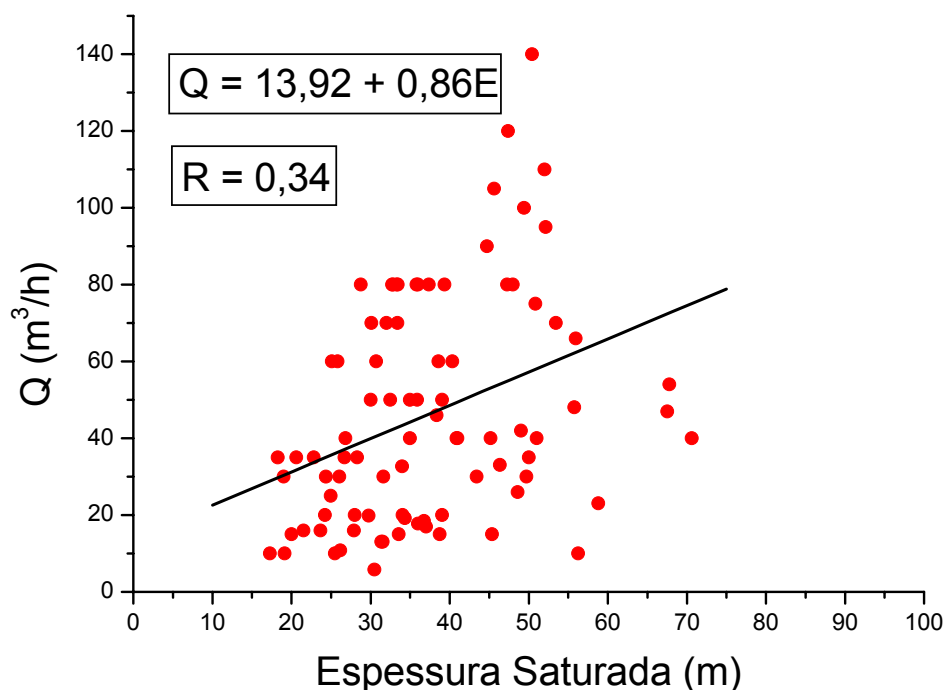


Figura 9.8 – Representação gráfica da relação “espessura saturada x vazão”; população analisada: 87 poços que seccionam ou não todo o Grupo Barreiras.

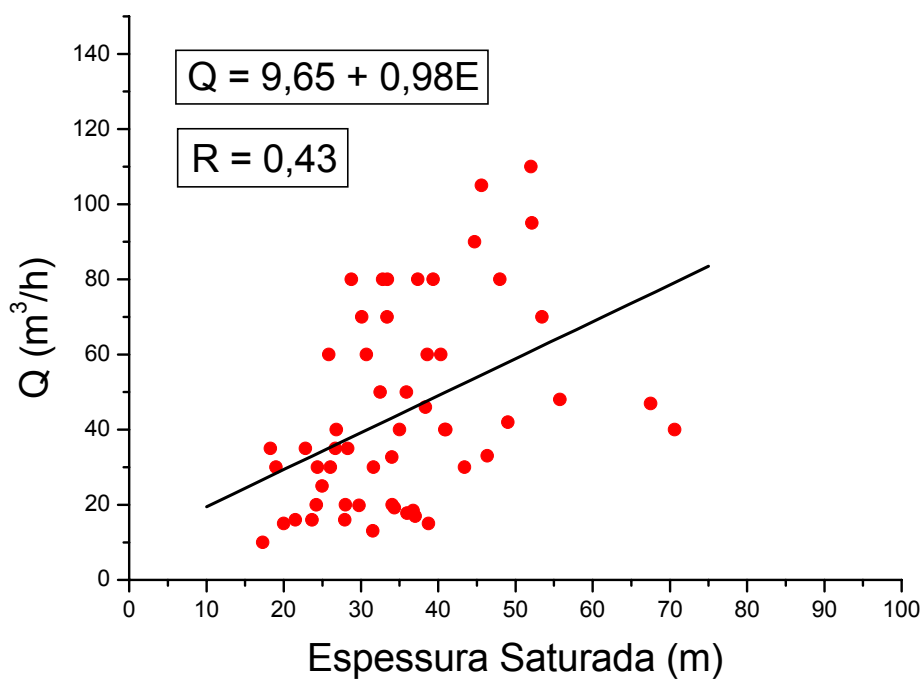


Figura 9.9 – Representação gráfica da relação “espessura saturada x vazão”; população analisada: 55 poços que seccionam todo o Grupo Barreiras.

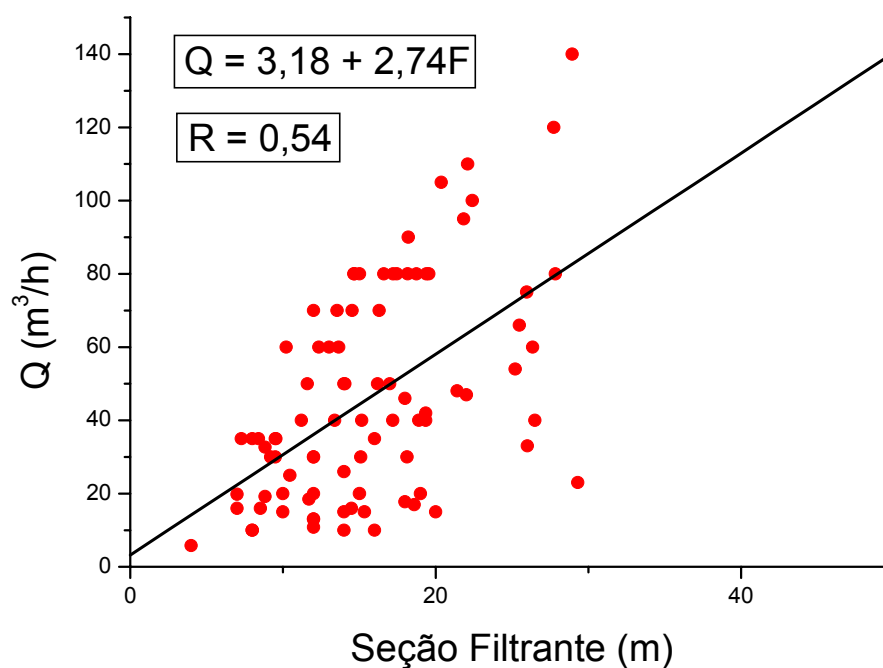


Figura 9.10 – Representação gráfica da relação “extensão de seções filtrantes x vazão”; população analisada: 87 poços que seccionam ou não todo o Grupo Barreiras.

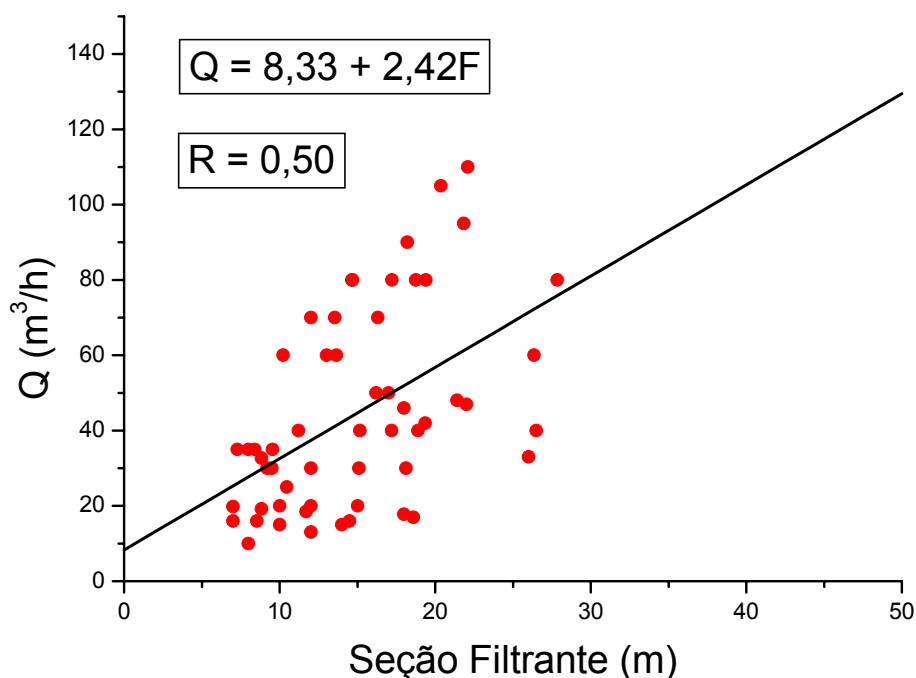


Figura 9.11 – Representação gráfica da relação “extensão de seções filtrantes x vazão”; população analisada: 55 poços que seccionam todo o Grupo Barreiras.

PARÂMETROS	POPULAÇÃO (Nº DE POÇOS)	EQUAÇÃO DE CORRELAÇÃO	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO – R (REGRESSÃO LINEAR)
Q e E (1)	87	$Q = 13,92 + 0,86E$	0,34
Q e E (2)	55	$Q = 9,65 + 0,98E$	0,43
Q e F (1)	87	$Q = 3,18 + 2,74F$	0,54
Q e F (2)	55	$Q = 8,33 + 2,42F$	0,50

Tabela 9.2 – Síntese das correlações efetuadas. Q=vazão explotada, E=espessura saturada e F=extensão de filtros. 1-poços que seccionam ou não todo o Grupo Barreiras; 2-poços que seccionam todo o Grupo Barreiras.

As relações obtidas, embora incipientes, mostraram-se ligeiramente mais proeminentes quando se correlacionou as extensões de seções filtrantes com as vazões, em captações que seccionam ou não todo o Grupo Barreiras (coeficientes de correlação de 0,50 e 0,54, respectivamente). As relações entre espessuras saturadas e vazões evidenciaram coeficientes de correlação menores, apesar de igualmente positivos

(proporcionalidade direta), da ordem de 0,34 e 0,43, para poços que seccionam ou não todo o Grupo Barreiras e aqueles que seccionam toda esta unidade estratigráfica, respectivamente. Eventuais coeficientes lineares devem ser creditados a fatores nos quais o controle é mais complexo, como por exemplo, particularidades nas características construtivas dos poços, percentuais argilosos e arenosos, dentre outros.

As figuras 9.12 e 9.13, contudo, apresentam resultados mais refinados do presente estudo. Este incremento do coeficiente de correlação, apesar da redução da população de amostragem (15), foi obtido ao se restringir os poços analisados apenas àqueles que seccionam todo o Grupo Barreiras, com 8 polegadas de diâmetro de revestimento e pertencentes a uma única empresa de perfuração, no caso a CAERN.

Em linha gerais, evidencia-se que ao se incorporar vínculos os quais se refletem nas descargas finais de poços (diâmetros de revestimento e uniformidade nas descrições de amostras e conseqüente melhor definição de horizontes mais arenosos e filtrados, p. ex.), obtém-se fatores de correlação cada vez mais elevados na relação entre espessuras saturadas ou extensão das seções filtrantes com as descargas de exploração. Neste caso, um coeficiente de correlação de 0,79 (figura 9.13) evidencia a preponderância da estruturação regional e as decorrentes variações de espessuras saturadas do Aquífero Barreiras nas vazões exploradas dos poços locais.

Os procedimentos e a metodologia ora discutidos representam, em última análise, uma homogeneização do aquífero, no que diz respeito à transmissividade e conseqüente vazão explorada numa captação com determinada espessura saturada. Neste caso, admite-se que a transmissividade total (T_{total}), considerada ao longo de toda a espessura saturada do poço, é dada pela somatória dos produtos das espessuras dos diversos sub-horizontes estratigráficos (E_i) e seus respectivos valores de condutividade hidráulica (K_i), conforme equação abaixo.

$$T_{total} = K_{médio} * E_{total}, \text{ sendo } Q \propto T \text{ e } T_{total} = \sum K_i * E_i$$

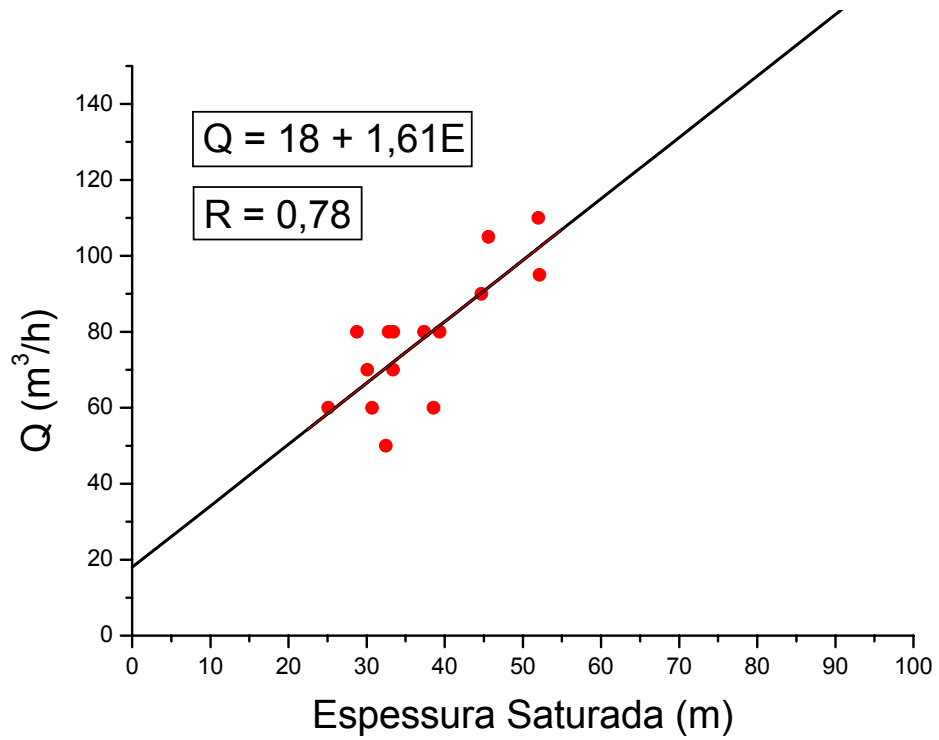


Figura 9.12 – Representação gráfica da relação “espessura saturada x vazão”; população analisada: 15 poços (8”) que seccionam todo o Grupo Barreiras.

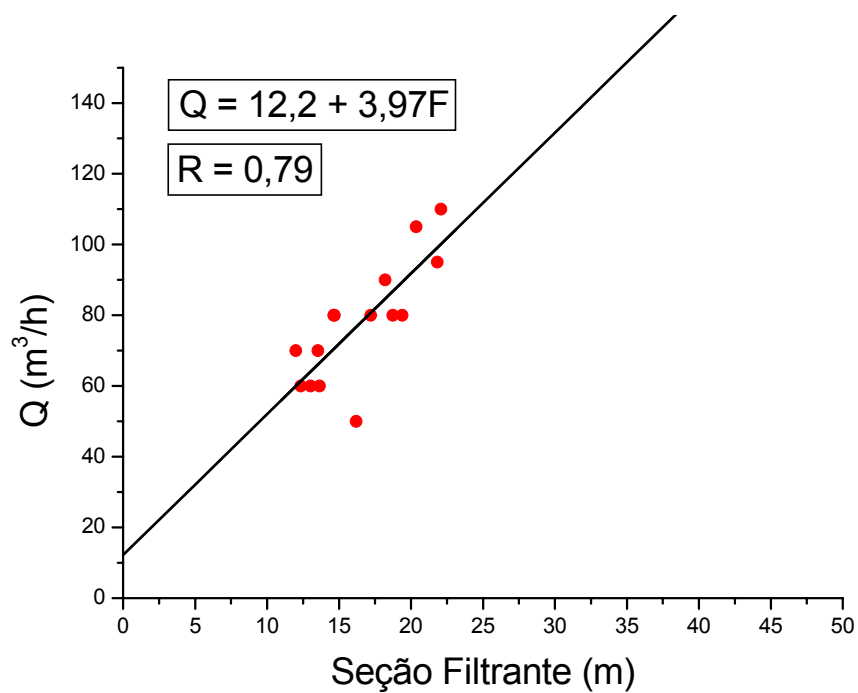


Figura 9.13 – Representação gráfica da relação “extensão de seções filtrantes x vazão”; população analisada: 15 poços (8”) que seccionam todo o Grupo Barreiras.

Entretanto, ressalta-se que uma maior produtividade dos poços não deve ser entendida tão somente como resultado dos aumentos de espessuras saturadas, provocados por falhamentos locais. Estas variações positivas de espessuras saturadas aumentam, sim, a probabilidade de captação de horizontes mais transmissivos hidráulicamente, decorrente do acúmulo de sedimentos mais arenosos, considerando uma parte do condicionamento tectono-estrutural regional sincrônico com a deposição do Grupo Barreiras, conforme reportado no capítulo 7.

9.2 – O CONTROLE ESTRUTURAL DO FLUXO SUBTERRÂNEO

9.2.1– Considerações Gerais e Aspectos Metodológicos

O escoamento subterrâneo em meio saturado origina-se quando há diversificações de carga potenciométrica ou de acordo com o gradiente hidráulico, sendo ministrado ainda pela disposição em subsuperfície de horizontes com diferentes condutividades hidráulicas. Esta anisotropia do aquífero, em geral decorrente de variações litológicas, ocasiona sucessivas refrações nessas linhas de fluxo (Todd, 1959). Afora estas componentes de natureza hidráulica, o fluxo subterrâneo pode, eventualmente, encontrar-se submetido ao condicionamento estrutural da formação aquífera.

As evidências de um controle estrutural do fluxo subterrâneo no Aquífero Barreiras foram inicialmente estudadas por Lucena *et al* (1999), no âmbito do sistema lacustre do Bonfim, sul da bacia do Rio Pirangi. Estes autores caracterizaram uma canalização do fluxo subterrâneo a oeste da Lagoa do Bonfim e no sentido desta, conforme mostrado no mapa potenciométrico da área (Costa, 1997), através de uma estrutura local tipo *graben*. Esta estrutura seria ainda a responsável pela configuração da principal frente de escoamento subterrâneo que abastece a referida lagoa.

Nesse contexto, pesquisas específicas foram realizadas na área de fronteira entre o sistema lacustre do Bonfim e a bacia do Rio Pirangi, motivadas pela presença de um alto potenciométrico imediatamente a norte da Lagoa do Bonfim. Este alto potenciométrico representa uma importante fonte de recarga do Aquífero Barreiras no setor oriental da bacia do Rio Pirangi, conforme a potencimetria da área (ver tópico 4.1.2), sugerindo uma conexão hidráulica subterrânea entre os dois sistemas.

O estudo foi conduzido partindo-se da caracterização geológica (capítulos 3 e 7) e hidrológica (capítulo 4) prévia da área, além da execução de um levantamento geo-elétrico. Este último, envolvendo 4 sondagens elétricas (sondagens elétricas 11, 12, 13 e 14; ver capítulo 8), possibilitou a composição de uma seção hidrogeológica, interpretada a partir dos dados geo-elétricos, na área compreendida entre a Lagoa do Bonfim e o Riacho Pium (com lagoa homônima). A geofísica de eletro-resistividade foi adotada tendo em vista sua notória aplicabilidade à hidrogeologia, somado ao fato da ausência de informações de poços locais. O objetivo final deste levantamento foi avaliar e confirmar a possível conexão hidráulica subterrânea entre os dois sistemas.

9.2.2 – Discussão dos Resultados

As sondagens geo-elétricas (figura 9.14) revelaram valores de resistividades da ordem de 50 a 600 Ohm.m, respectivamente para porções mais argilosas e arenosas do aquífero, com base nas calibrações geo-elétricas (tópico 8.2.2). As sondagens apresentaram ainda proeminente influência da camada condutiva basal, com resistividades da ordem de 40 a 80 Ohm.m, associada ao Aquífero Cretácico (embasamento hidrogeológico do Aquífero Barreiras). Tal influência possibilitou o modelamento matemático das espessuras do aquífero em cada ponto de sondagem, bem como da porção não saturada (com resistividades superiores a 1000 Ohm.m).

No tocante aos limites subterrâneo e superficial que separam o sistema lacustre do Bonfim e a bacia hidrográfica do Rio Pirangi, verifica-se que os mesmos acompanham aproximadamente um alinhamento morfotectônico local de direção nordeste. Por outro lado, o limite subterrâneo, especificamente, não é bem caracterizado imediatamente a norte da Lagoa do Bonfim, a julgar pelo mapa potenciométrico do Sistema Bonfim, elaborado por Costa (1997), bem como da potenciometria do setor oriental da bacia do Rio Pirangi (tópico 4.1.2).

O referido alinhamento morfotectônico, situado entre a Lagoa do Bonfim e o Riacho Pium/Lagoa homônima (ver mapa geológico em anexo), é resultado da atuação de falhamentos que atingem o Grupo Barreiras e sedimentos mesozóicos na região, de acordo com a evolução tectono-estrutural desta (Bezerra *et al.*, 1993; Lucena e Queiroz, 1996; Coriolano *et al.*, 1999) e caracterização de rejeitos verticais em perfis geológicos

elaborados em toda a região (Lucena e Queiroz, 1996). As evidências do alinhamento morfotectônico ora estudado como sendo decorrente de falhamentos decorreu igualmente da caracterização de rejeitos verticais. Estes últimos foram definidos através da composição da seção hidrogeológica/geo-elétrica, paralela ao citado limite e envolvendo as quatro sondagens elétricas (figura 9.15). O corte hidrogeológico/geo-elétrico resultante evidenciou um abatimento do substrato carbonático mesozóico do Grupo Barreiras, e conseqüente aumento brusco do aquífero homônimo, da ordem de até 70 metros, disposto transversalmente ao limite entre a Lagoa do Bonfim e a bacia do Rio Pirangi.

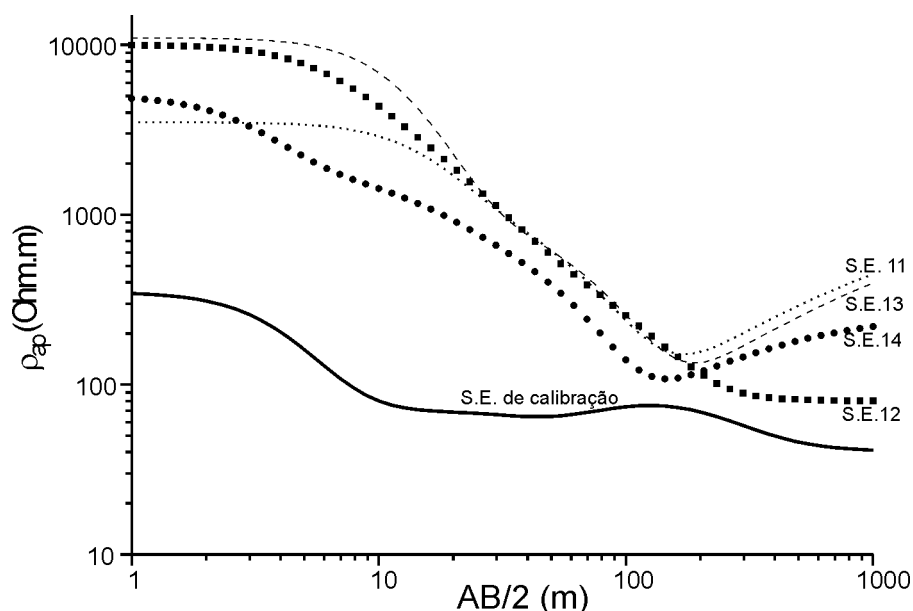


Figura 9.14 – Sondagens elétricas executadas entre o sistema lacustre do Bonfim e a bacia do Rio Pirangi (ver localização das mesmas no mapa geológico do anexo 2).

Este movimento de blocos ocasionou, além do aumento de espessura do aquífero neste bloco central, a configuração de barreiras laterais semi-impermeáveis, constituídas pelo substrato carbonático do Grupo Barreiras (Aqüitardo Cretácico), resultando em limites subterrâneos localizados (Lucena, 1999) e canalizando o fluxo subterrâneo. Este último teria sua origem relacionada com a ocorrência de cotas potenciométricas relativamente maiores nas proximidades da Lagoa do Bonfim, fato este incrementado durante e logo após o período chuvoso da região (abril a agosto).

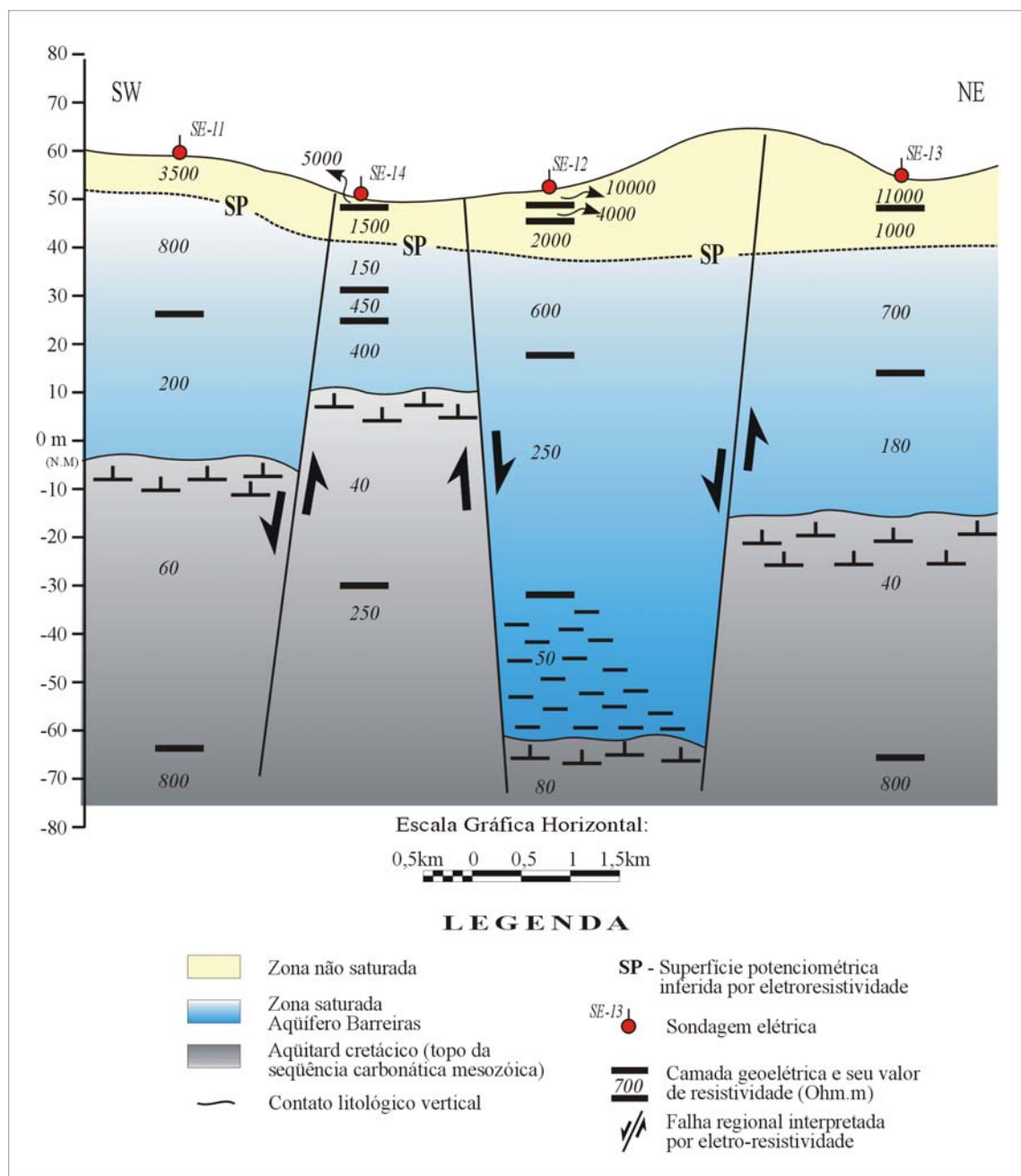


Figura 9.15 – Seção hidrogeológica K-L, interpretada a partir de dados geo-elétricos (ver localização no mapa geológico em anexo). As partes tracejadas do Aquífero Barreiras indicam horizontes com maior percentual argiloso.

Tal observação encontra respaldo na potenciométrica da área (figura 4.1), a qual evidencia um fluxo secundário proveniente da Lagoa do Bonfim e no sentido do Riacho Pium (Bacia do Rio Pirangi), ou mesmo a não configuração do limite subterrâneo nesse setor do mapa, conforme já reportado. A frente de escoamento X-Y, individualizada na figura 4.1, possibilitou uma avaliação preliminar da contribuição subterrânea recebida

pela Lagoa do Pium (ver tópico 4.2.4). Neste contexto, deve-se considerar que um dado percentual desta descarga estimada seja creditado ao fluxo estruturalmente controlado neste setor do mapa, tendo em vista a influência do parâmetro transmissividade hidráulica (e, por conseguinte, das variações de espessuras saturadas) no referido cálculo.

Eventualmente, pode-se observar uma “canalização” praticamente total do fluxo, numa situação extrema de rebaixamento regional do nível d’água. Neste caso, o fluxo em meio poroso estaria direcionado tão somente sobre os locais de abatimento do substrato semi-impermeável ou impermeável (*grabens* locais). Outra situação possível neste mesmo contexto seria a total delimitação de uma porção do aquífero, em caráter bastante localizado, limitado igualmente por barreiras laterais e substrato semi-impermeável ou impermeável. Estas condições, todavia, não devem ser esperadas para a área da bacia do Rio Pirangi, visto que envolveria rebaixamentos regionais bastante elevados e incompatíveis, até o momento, com a realidade hidrogeológica do Aquífero Barreiras.

9.3 – INFLUÊNCIAS DA ESTRUTURAÇÃO NO MAPA POTENCIOMÉTRICO

9.3.1 – Considerações Gerais e Aspectos Metodológicos

As influências do arcabouço estrutural, ao qual um aquífero poroso está submetido, refletem-se num mapa potenciométrico principalmente na disposição das linhas equipotenciais. Esta observação decorre, sobretudo, da cinemática dos falhamentos que atingem e moldam tanto o relevo superficial (ver capítulo 6) como também o substrato do aquífero, resultando em variações da carga potenciométrica ao longo de uma área considerada. Desta forma, depressões estruturais na forma de *grabens* correspondem a reduções da respectiva carga potenciométrica (Castany, 1975). As falhas desempenham ainda um papel de barreiras subterrâneas naturais, tendo em vista que põem em contato horizontes estratigráficos com diferentes condutividades hidráulicas, inclusive com horizontes semi-impermeáveis a impermeáveis, conforme discutido no tópico 9.2. Somado a isso, ressalta-se que as linhas de fluxo sofrem refração ao passar de um limite entre meios de diferentes condutividades hidráulicas (Todd, 1959). Todas estas feições repercutem num mapa potenciométrico mediante alterações bruscas no espaçamento ou inflexões das curvas equipotenciais. O estudo de tais feições no mapa

potenciométrico do Aquífero Barreiras no setor oriental da bacia do Rio Pirangi foi realizado, sobrepondo-se a este, informações do arcabouço estrutural regional (ver capítulos 5, 6 e 7), conforme observado na figura 9.16.

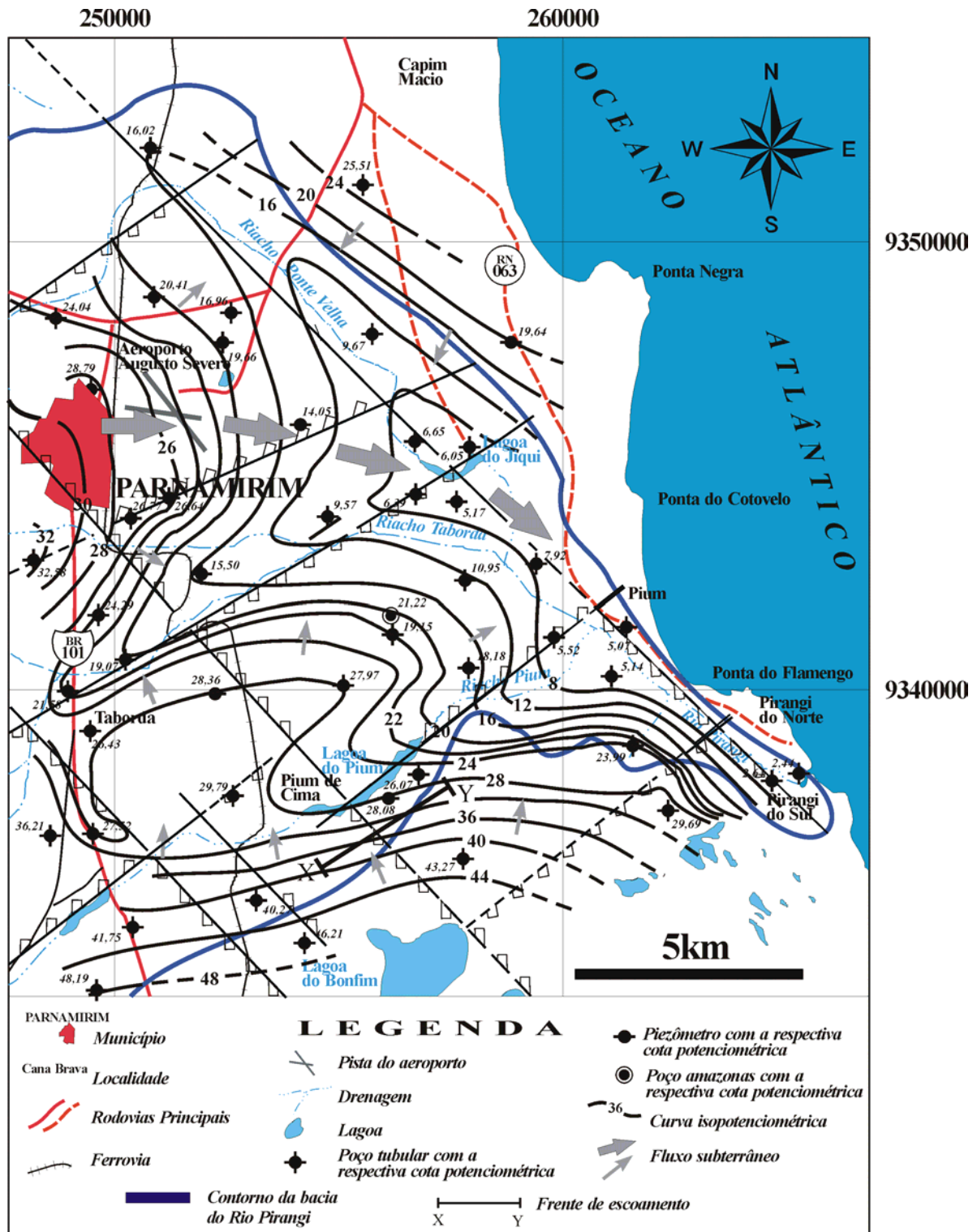


Figura 9.16 – Potenciometria do Aquífero Barreiras no setor oriental da bacia do Rio Pirangi e o esboço da estruturação regional.

9.3.2 – Discussão dos Resultados

Na área da bacia do Rio Pirangi, mais precisamente no seu setor oriental, algumas características mostraram-se como resultado do condicionamento estrutural sob o qual se encontra submetido o Aquífero Barreiras. A principal destas feições observadas diz respeito à disposição e espaçamento das equipotenciais 32 e 28 na altura da localidade de Pium de Cima (SW do mapa da figura 9.16). Considerando um fluxo d'água subterrânea uniforme, os maiores espaçamentos entre as equipotenciais (gradientes brandos) denotam condutividades hidráulicas maiores (Todd, 1959) e, conseqüentemente, transmissividades também maiores. De fato, esta anomalia na potenciometria local está associada, ou sob influência, da configuração de um pequeno *graben* situado imediatamente a oeste da Lagoa de Pium. Este bloco estrutural revelou espessuras saturadas da ordem de 100 m (ver tópico 9.1), o que, em última análise, reflete-se no mapa potenciométrico na forma de um espaçamento substancialmente maior entre as referidas equipotenciais (figura 9.17).

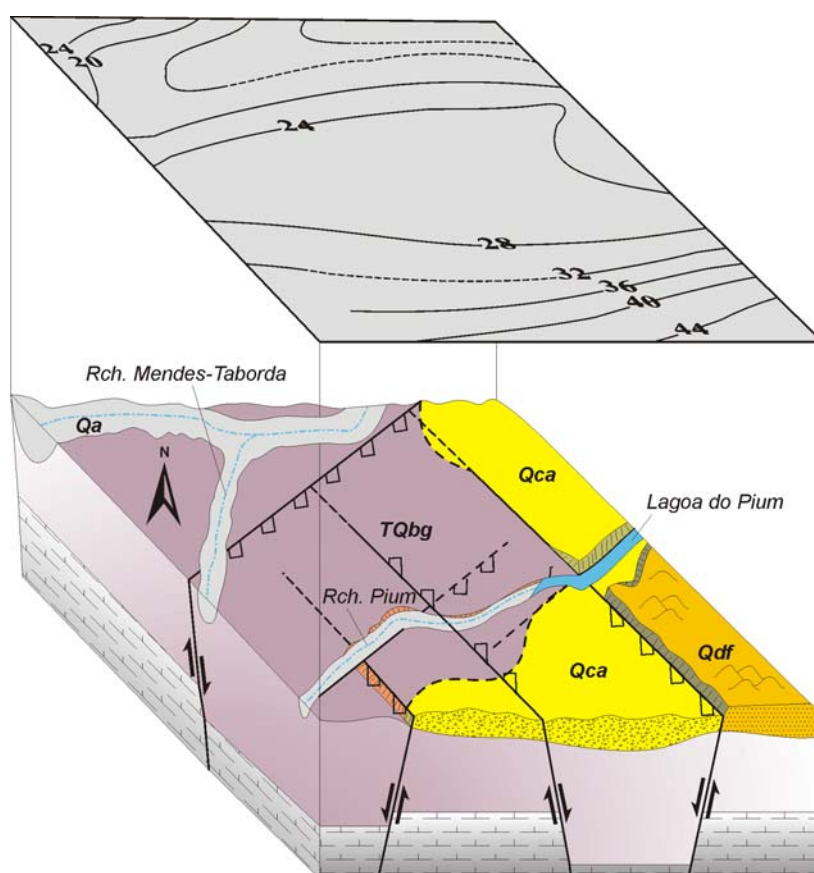


Figura 9.17 – Bloco diagrama esquemático mostrando a influência de um *graben* na Potenciometria local do Aquífero Barreiras; localidade de Pium de Cima.

Em linhas gerais, percebe-se que a superfície potenciométrica reflete a movimentação dos blocos estruturais em subsuperfície (ver figura 9.7, perfil hidrogeológico I-J), ou seja, um bloco estrutural com abatimento relativo proporcionará uma subsidência igualmente relativa da superfície potenciométrica face à configuração de perda de carga. Contudo, esta observação deve ser encarada com reservas. A idade dos falhamentos e suas eventuais e posteriores reativações exercem influência neste contexto. Um bloco estrutural soerguido, por exemplo, estará mais susceptível à erosão e conseqüentemente à redução de cota absoluta. As cotas potenciométricas na área deste bloco estariam atenuadas, modificando a proposta inicialmente reportada.

Outro aspecto não menos importante diz respeito à presença de inflexões das equipotenciais, de caráter bastante localizado, nas imediações de falhamentos. Estas anomalias decorrem do controle estrutural das drenagens superficiais da bacia (ver capítulos 6 e 7) e da condição de efluência da rede fluvial em relação ao Aquífero Barreiras. Espera-se que pelo menos uma parte desta contribuição deva ser creditada à cinemática das estruturas regionais (ver tópico 9.2), através do posicionamento resultante de horizontes com melhor condutividade hidráulica favoravelmente ao fluxo subterrâneo e no sentido dos canais fluviais. Estas características podem ser melhor observadas nos riachos Ponte Velha, Taborda e Pium. Por outro lado, seções da coluna estratigráfica imediatamente adjacentes a falhamentos podem dispor de sedimentos mais grosseiros e decorrentes das próprias falhas e suas respectivas reativações ao longo do tempo geológico. Neste caso, pode-se observar um desvio positivo e localizado da transmissividade hidráulica, além de uma zona de alívio de pressão. Esta configuração pode ocasionar uma “convexidade” na superfície potenciométrica, além de que determinado falhamento pode estar atuando como conduto de ligação entre os contextos hidrogeológicos mesozóicos e cenozóicos. A sede municipal de Parnamirim, coincidente com uma zona de recarga do Aquífero Barreiras, apresenta-se como uma área candidata à ocorrência desta conjunção de fatores. Esta área situa-se sobre a interseção de duas falhas, ambas de caráter profundo na crosta e, pelo menos uma delas (falha do Riacho Boa Cica que delimita a face oeste do *Graben* Papary), com evidências de reativações ao longo do Quaternário, a julgar pela análise gravimétrica (ver capítulo 5) e datações em *beachrocks* (ver capítulo 7), respectivamente.

9.4 – A OTIMIZAÇÃO DO CÁLCULO DE RESERVAS

9.4.1 – Considerações Gerais e Aspectos Metodológicos

A avaliação de reservas de um aquífero sedimentar, particularmente aqueles de caráter livre, costumeiramente envolve muitas discussões, seja nas diversas metodologias empregadas, seja nos próprios valores encontrados, especialmente em relação ao termo disponibilidade explotável. Dentre essas discussões, um aspecto bastante relevante diz respeito ao parâmetro espessura saturada. Para esta última, normalmente, adota-se um valor médio que se imagina ser representativo do aquífero em toda a área explorada. Considerando uma avaliação de caráter bastante localizada ou preliminar (ver tópico 4.1.4), os resultados encontrados podem ser tomados como aceitáveis, apesar de sempre com reservas. Entretanto, quando se trata da avaliação de reservas hidrogeológicas em áreas extensas (no caso uma bacia hidrográfica) e, sobretudo, sob proeminente controle estrutural, os valores encontrados podem revelar consideráveis distorções.

Nesse contexto, um cálculo mais consistente de reservas deverá considerar as variações de espessuras saturadas ao longo de toda a área pesquisada, decorrente da evolução tectono-estrutural regional. Dessa forma, a área do setor oriental da bacia do Rio Pirangi, utilizada na avaliação preliminar de reservas no tópico 4.1.4 da presente tese (231,02 km²), foi subdividida em blocos estruturais delimitados por alinhamentos morfotectônicos ou falhamentos, além dos próprios limites da referida bacia hidrográfica (figura 9.18). Somado a isso, para cada bloco estrutural foi adotado um valor representativo de espessura saturada (conforme mapa da figura 9.4) e de variação da superfície potenciométrica, com base em monitoramento de poços locais fornecido verbalmente pelo setor de recursos hídricos da EMPARN.

O cálculo das subáreas foi efetuado em um ambiente SIG, após georeferenciamento e tratamento de dados, no laboratório de geoprocessamento do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN. As reservas permanentes e reguladoras do Aquífero Barreiras na área considerada são dadas, respectivamente, pelas seguintes expressões matemáticas (Feitosa e Manoel Filho, 1997):

$$V_{s\text{ TOTAL}} = \sum A_n \cdot b_n \cdot \eta_e \quad (I)$$

Onde:

V_s = volume de saturação/reservas permanentes (m^3);

A_n = subárea de ocorrência do aquífero (m^2);

B_n = espessura média saturada do aquífero na subárea considerada (m);

η_e = porosidade efetiva média do aquífero.

$$VEN_{TOTAL} = \Sigma A_n \cdot \Delta h_n \cdot \eta_e \text{ (II)}$$

Onde:

VEN = volume de escoamento natural/reservas reguladoras (m^3);

A_n = subárea de ocorrência do aquífero (m^2);

Δh_n = variação local média da superfície potenciométrica (m);

η_e = porosidade efetiva média do aquífero.

9.4.2 – Discussão dos Resultados

De acordo com os procedimentos ora explicitados, foram individualizadas 22 subáreas no setor oriental da bacia do Rio Pirangi. Os respectivos parâmetros relativos ao cálculo das reservas permanentes e reguladoras de cada bloco são apresentados na tabela 9.3, considerando uma porosidade efetiva média do aquífero de 10%.

Os valores encontrados para as reservas permanentes e reguladoras revelaram-se próximos em relação àqueles obtidos com os procedimentos usuais, apresentados no tópico 4.1.4 ($924,08 \times 10^6 m^3$ e $138,61 \times 10^6 m^3$, respectivamente). A semelhança dos resultados, neste caso, deve-se ao fato de que os valores de 40 m para espessura saturada média e 6 m de sazonalidade (considerando o cálculo tradicional) foram tomados com base nos dados da área municipal de Parnamirim, local de maior concentração de poços.

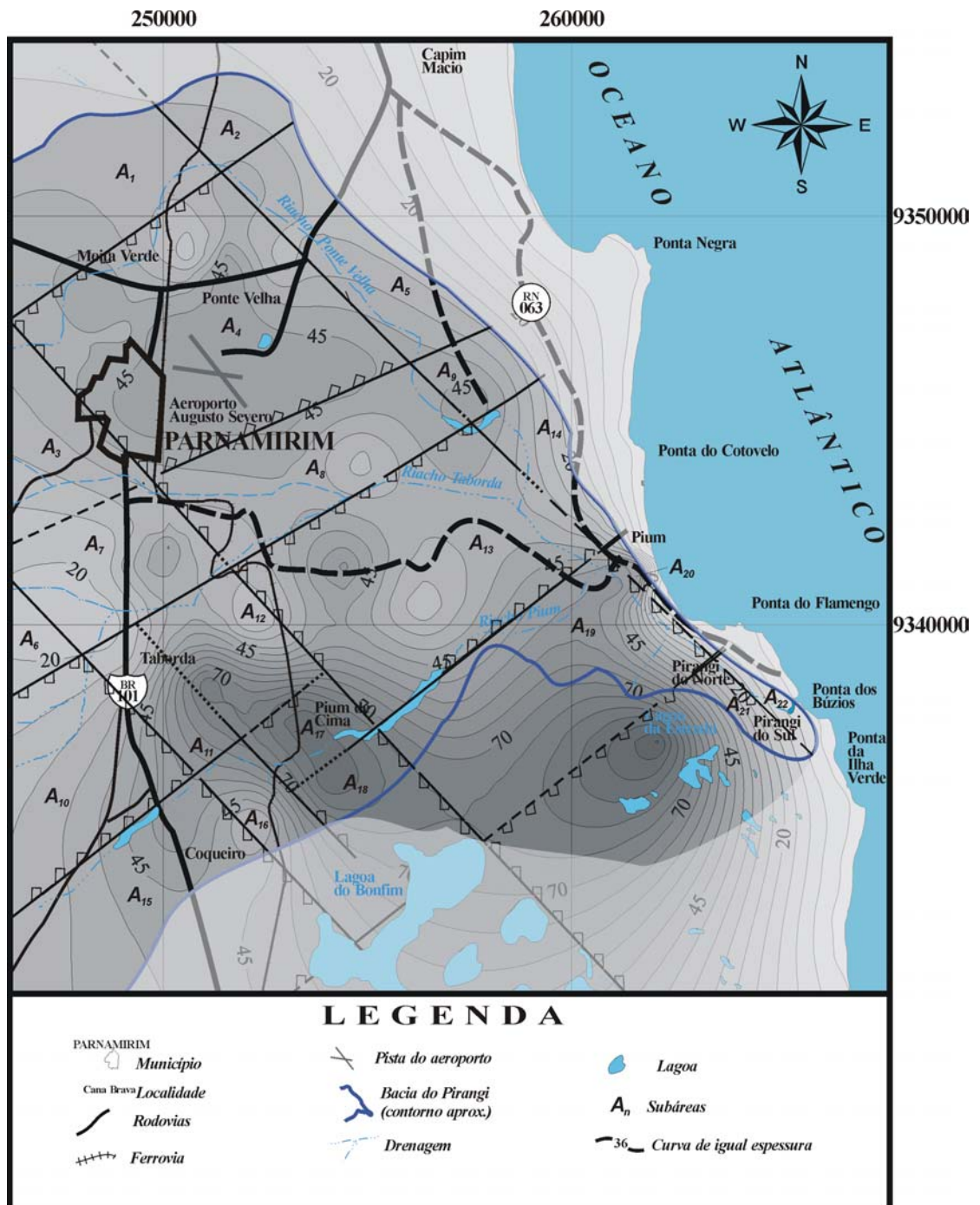


Figura 9.18 – Subdivisão do setor oriental da bacia do Rio Pirangi em blocos estruturais, associada com o mapa de espessura do Aquífero Barreiras e o esboço da estruturação regional.

SUB- ÁREAS	PARÂMETROS OBTIDOS				
	A_n (x 10 ⁶ m ²)	B_n (m)	Δh_n (m)	V_{s_n} (x 10 ⁶ m ³)	VEN_n (x 10 ⁶ m ³)
1	14,74	35	08	51,59	11,79
2	4,83	35	08	16,90	3,86
3	9,59	35	07	33,56	6,71
4	37,65	45	08	169,42	30,12
5	11,87	35	04	41,54	4,74
6	2,53	20	04	5,06	1,01
7	12,81	30	04	38,43	5,12
8	16,76	40	05	67,04	8,38
9	3,85	40	03	15,4	1,15
10	16,11	35	06	56,38	9,66
11	5,60	50	05	28,0	2,8
12	9,65	50	05	48,25	4,82
13	33,04	40	07	132,16	23,12
14	5,19	30	03	15,57	1,55
15	16,60	40	05	66,4	8,3
16	4,18	50	06	20,9	2,5
17	4,80	75	06	36,0	2,88
18	3,46	75	05	25,95	1,73
19	12,68	45	04	57,06	5,07
20	1,19	25	02	2,97	0,23
21	2,36	30	02	7,08	0,47
22	1,53	15	02	2,29	0,3
TOTAL	231,02	-	-	937,95	133,31

Tabela 9.3 – Parâmetros obtidos relativos ao cálculo das reservas permanentes e reguladoras de cada subárea no setor oriental da bacia do Rio Pirangi.

Por outro lado, resultados regionais bem distintos para reservas permanentes teriam sido alcançados se a área de captação tomada como base (aquela que tivesse informações disponíveis), apresentasse, por exemplo, uma espessura saturada média com variação de 20%, positiva ou mesmo negativa. O desenvolvimento e incremento desta metodologia poderiam ainda considerar variações do parâmetro porosidade efetiva ao longo da área explorada, por intermédio da realização de múltiplos testes de aquífero. Este procedimento possibilitaria a elaboração de um zoneamento em termos da capacidade de armazenamento, acrescentando uma coluna na tabela 9.3 e respeitando a heterogeneidade do aquífero.

A busca por uma otimização do cálculo de reservas objetiva, em última análise, disponibilizar dados mais concretos aos órgãos gestores no planejamento e uso racional dos recursos hídricos subterrâneos numa bacia sedimentar.

9.5 – CONSIDERAÇÕES DO IMPACTO NO CONTEXTO HIDROGEOQUÍMICO

9.5.1 – Considerações Gerais e Aspectos Metodológicos

O conhecimento de possíveis influências do arcabouço tectono-estrutural regional num meio hidrogeoquímico, particularmente em terrenos sedimentares cenozóicos, é bastante incipiente na literatura especializada. Apesar deste fato, alguns aspectos desta relação são discutidos no presente tópico, tomando-se como exemplo a ocorrência e provável migração de constituintes iônicos no Aquífero Barreiras. Estes estudos, entretanto, são de caráter preliminar, face à complexidade e abrangência do assunto.

A metodologia geral de trabalho compreendeu basicamente a associação de dados relativos ao mapeamento geológico, com ênfase ao quadro estrutural local, o mapa de condutividade elétrica do Aquífero Barreiras e análises físico-químicas de poços em que se buscou evidenciar, dentre outros parâmetros, os respectivos teores de nitrato e potássio. A escolha de tais elementos deve-se ao fato deles estarem associados à contaminação da água subterrânea por atividade humana e/ou práticas agrárias (uso de fertilizantes), possibilitando o uso dos mesmos como “marcadores” no presente estudo. Com relação a estas análises físico-químicas, foi efetuada uma amostragem nos mesmos 16 poços tubulares do Aquífero Barreiras utilizados no item 4.1.5.1, especialmente bem

distribuídos e inseridos no setor oriental da bacia do Rio Pirangi, conforme discutido no tópico 4.1.5 (ver figura 4.7). Os resultados analíticos, em relação a teores de nitrato e potássio dos poços amostrados são apresentados na tabela 9.4.

Elementos analisados	POÇOS TUBULARES (N ^o DE REFERÊNCIA)															
	20	31	32	09	84	26	16	15	24	22	23	11	04	02	80	30
Nitrato (mg/L N-NO ₃ ⁻)	0,05	0,19	0,56	4,31	6,19	3,14	3,28	1,85	0,01	0,33	0,29	1,33	0,69	5,02	0,00	0,00
Potássio (mg/L K ⁺)	0,83	5,38	0,83	6,64	5,77	0,42	0,50	0,42	0,50	0,42	3,33	0,83	0,83	5,77	4,17	2,92

Tabela 9.4 – Teores de nitrato e potássio para amostras coletadas em poços tubulares, inseridos no setor oriental da bacia do Rio Pirangi.

9.5.2 – Discussão dos Resultados

O mapa de condutividade elétrica do Aquífero Barreiras (ver tópico 4.1.5.4) revelou a ocorrência de algumas anomalias deste parâmetro, adotando-se um “background” de 60 μ S/cm. Dentre as anomalias caracterizadas no mapa da figura 4.10, interpretadas como indícios de uma tendência à poluição local do aquífero, a que se mostrou mais intrigante foi aquela situada a nordeste da localidade de Taborda. Tal observação decorre da aparente ausência de fontes de contaminação localizadas exatamente nesta área. As demais anomalias, sede municipal de Parnamirim e confluência dos riachos Taborda e Pium, são coincidentes com zonas de adensamento populacional e estão associadas com condições pouco satisfatórias de esgotamento sanitário e/ou com a deposição de resíduos sólidos diretamente em “lixões” sobre o solo, conforme reportado no tópico 4.1.5.4.

Outra anomalia no mapa da figura 4.10, apesar de menos intensa que as demais já mencionadas, localiza-se na margem direita da Lagoa do Jiqui, na altura da base física da EMPARN, devendo estar associada com adubações de natureza química e destinadas às pesquisas agropecuárias desta empresa. Um outro dado que vem reforçar esta hipótese diz respeito à análise físico-química da água de um dos poços da EMPARN (número de referência 2, na tabela 9.4), o qual apresenta o segundo maior índice de nitrato (5,02 mg/L) e potássio (5,77 mg/L) dentre os 16 poços amostrados no setor leste da bacia do

Rio Pirangi. O nitrogênio, normalmente revelado nas águas subterrâneas na forma de nitrato (NO_3^-), além do potássio, constituem-se em dois dos principais nutrientes exigidos pelas culturas e presentes nos fertilizantes. As amostras referentes aos poços 09, 84, 26 e 16 (tabela 9.4), com concentrações de nitrato (N-NO_3^-) de 4,31, 6,19, 3,14 e 3,28 mg/L, respectivamente, acham-se diretamente associadas com águas residuais urbanas, uma vez que tais captações encontram-se inseridas nas proximidades do centro de Parnamirim e localidade de Pium. Já os teores de potássio dos poços 31 e 80 (5,38 e 4,17 mg/L, respectivamente) estão associados com o uso de fertilizantes, a exemplo da anomalia da base física da EMPARN.

Em linhas gerais, sabe-se que a migração de eventuais elementos contaminantes em subsuperfície é governada basicamente pela advecção e dispersão, que dão razão ao movimento e diluição do contaminante ou soluto (Morais, 1996). Outros fatores tais como o tipo de aquífero, parâmetros hidrodinâmicos, geologia do terreno e as próprias características químicas das águas subterrâneas e dos poluentes, exercem forte influência nesse processo. Somado a isso, os mecanismos pelos quais os elementos ou contaminantes passam a fazer parte do fluxo subterrâneo e, por conseguinte, ficam submetidos a este, são igualmente importantes em toda esta ação migratória.

Nesse contexto, e excetuando-se as demais influências de estruturas frágeis em aquíferos costeiros (Lucena *et al.*, 1999), a estruturação regional exerce sua parcela de contribuição na migração de elementos ou contaminantes em subsuperfície através do controle estrutural do fluxo subterrâneo. A este último aspecto, reportado nos trabalhos de Lucena *et al.* (1999) e Lucena *et al.* (2002), pode-se imputar o decréscimo ou mesmo incremento, no caso de uma convergência local do fluxo, da concentração de determinado elemento/contaminante. Vale ressaltar ainda que a heterogeneidade do aquífero resulta em diferentes velocidades no movimento da água subterrânea e nos elementos nela contidos, já que envolve a ocorrência/alternância de locais de alta e baixa condutividade hidráulica. Tal parâmetro, por sua vez, possui proporção inversa à espessura saturada local, estando assim susceptível a variações bruscas desta mesma espessura, ocasionada por falhamentos.

Com base na análise do mapa de condutividade elétrica do Aquífero Barreiras no setor oriental da bacia do Rio Pirangi (figura 4.10), os valores relativos elevados

observados a nordeste da localidade de Taborda mostram-se como candidatos em potencial da migração de elementos contaminantes em subsuperfície. Conforme já referido, esta abrangente “superfície” de condutividade elétrica das águas do Aquífero Barreiras não pode ser explicada pela simples lixiviação/infiltração de águas residuais não tratadas, seja de esgotos domésticos, seja de origem industrial ou da atividade agropecuária. Tal afirmação deve-se à baixa densidade populacional local, principalmente a leste de Taborda, bem como a ausência de indústrias e/ou grandes áreas agricultáveis (ressaltando-se aqui o uso de fertilizantes e agrotóxicos/pesticidas). Por outro lado, tem-se a ocorrência dos perímetros irrigados nas proximidades de Pium de Cima, nas margens esquerda e direita da Lagoa do Pium, além da área situada imediatamente a norte-noroeste da Lagoa do Bonfim. Tais áreas possuiriam, dessa forma, uma tendência periódica à contaminação decorrente do uso de agrotóxicos/pesticidas e principalmente de fertilizantes.

Sobrepondo-se informações preliminares da potenciometria local e do arcabouço estrutural do setor oriental da bacia do Rio Pirangi ao mapa de condutividade elétrica, reforça-se a hipótese de migração de elementos contaminantes em subsuperfície decorrente de fluxos subterrâneos estruturalmente controlados. Vale ressaltar que a espessura saturada relativamente menor ocasiona uma maior condutividade hidráulica, obviamente que se admitindo uma isotropia e homogeneidade do aquífero, enquanto que uma espessura saturada relativamente maior (neste caso, proporcionada por falhas locais) aumenta a área de uma frente de escoamento e conseqüentemente do meio físico para o transporte em subsuperfície. O aumento do valor da condutividade hidráulica, por sua vez, proporciona uma redução no tempo de chegada de determinado elemento contaminante conservativo a um ponto adjacente ao foco pontual da contaminação considerada. A interação destes fatores, somada à presença de uma zona de recarga do Aquífero Barreiras na área da bacia do Rio Pirangi, proveniente do sistema lacustre do Bonfim (Lucena *et al.*, 2002), compatibiliza-se com a ocorrência de anomalias de condutividade elétrica do aquífero na localidade de Taborda (figura 9.19). Esta anomalia, sob esta hipótese, é resultado da migração de elementos em subsuperfície, favorecida pelo fluxo subterrâneo parcialmente controlado estruturalmente, após estes terem atingido o aquífero nas citadas áreas de perímetros irrigados, como decorrência do uso de

fertilizantes e agrotóxicos/pesticidas. Neste contexto, a análise referente ao poço de número 2, na EMPARN (ver tabela 9.4), confirma uma tendência à contaminação *in situ* do aquífero por parte destas práticas agrárias, enquanto que os poços 31 e 80 exemplificam a hipótese acima reportada, sobretudo pelos teores relativamente elevados de potássio.

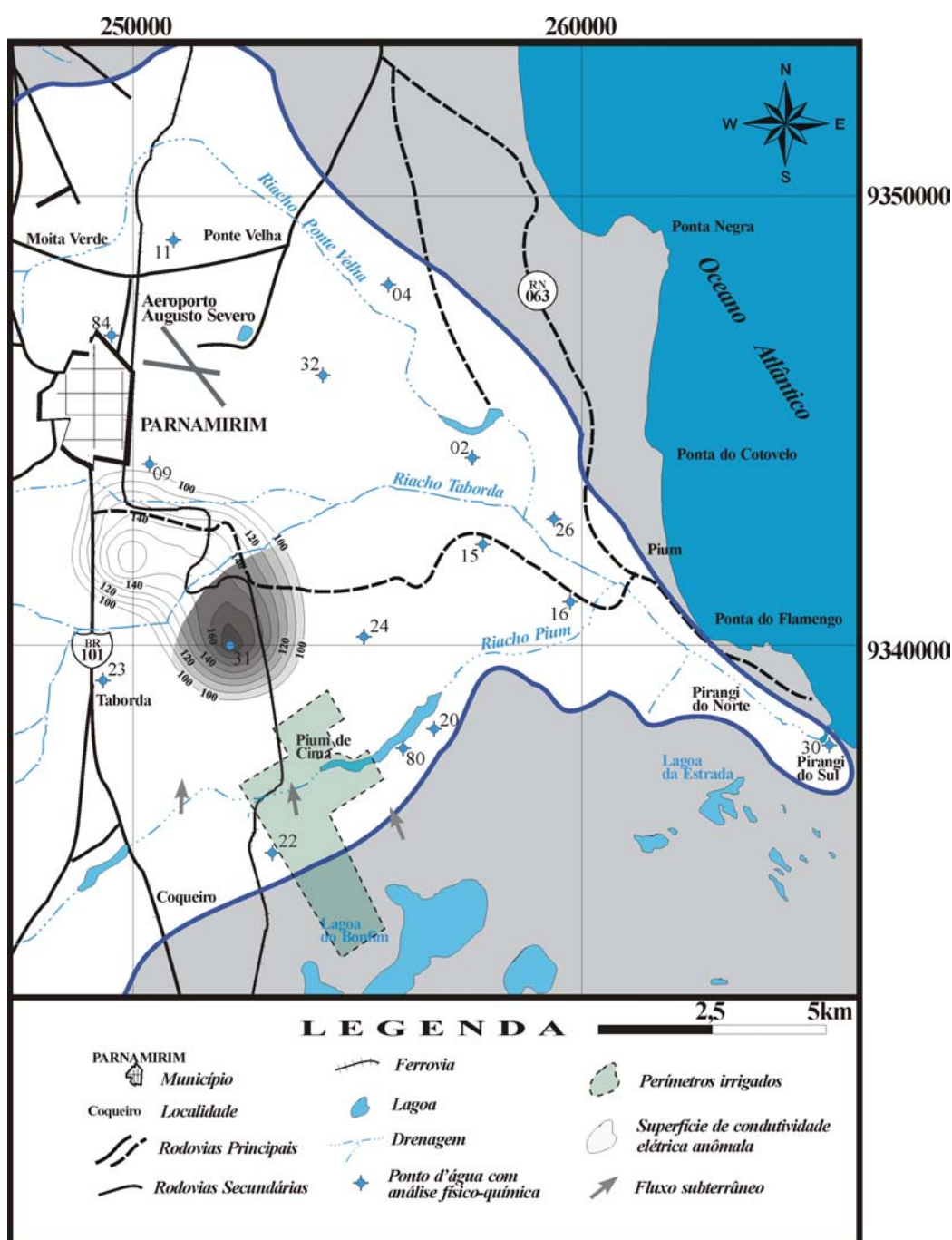


Figura 9.19 – Síntese da influência da estruturação regional no contexto hidrogeoquímico do Aquífero Barreiras, com ênfase na localidade de Taborda.

Ressalta-se que a superfície que envolve valores de condutividade elétrica iguais ou superiores a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na figura 9.19, apesar de compor uma anomalia única, na realidade deve ser creditada a origens distintas. Aquela porção situada a norte do Riacho Taborda resulta da atuação de linhas de fluxo subterrâneas provenientes da sede municipal de Parnamirim e estando, portanto, associadas à lixiviação de lixões e infiltração de águas residuais não tratadas, conforme mencionado. Já a porção anômala situada a sul da referida drenagem é que estaria relacionada com a migração de constituintes iônicos oriundos dos perímetros irrigados, migração esta incrementada em parte pelo fluxo subterrâneo estruturalmente controlado e com origem no alto potenciométrico a norte da Lagoa do Bonfim.

9.6 – OUTROS ASPECTOS DE CARÁTER REGIONAL

Os falhamentos, no contexto hidrogeológico da faixa litorânea leste do Estado, podem apresentar duas outras conseqüências que, dada a complexidade envolvida, não integraram o escopo da presente pesquisa. Embora tais relações necessitem de estudos específicos, alguns comentários sobre o assunto são feitos, com o objetivo de situá-los no contexto geral da presente tese.

A primeira conseqüência, não caracterizada na área, envolve a ocorrência de condutividades hidráulicas relativamente elevadas, de provável natureza fissural, associada a reativações de estruturas antigas do embasamento cristalino e da coluna sedimentar mesozóica. Este fato é relatado por Feitosa (1997), com base nas informações de dois poços da CAERN na cidade de Goianinha-RN (distando cerca de 20 km do limite sul da área ora mapeada). Estes poços revelaram elevadas transmissividades, com descargas da ordem de 50-60 m^3/h , se comparadas com valores de outras captações posteriormente efetuadas nas proximidades, que acusaram reduzidas espessuras do Grupo Barreiras (14-21 m) e conseqüente baixa produtividade. Tais valores anômalos de transmissividade são atribuídos por Feitosa (1997) a uma provável interceptação de zonas fraturadas no arenito calcífero pelas captações, apesar das locações terem sido realizadas de forma quase aleatória na época. Feitosa (1997) ressalta ainda a possibilidade de captações futuras serem realizadas em zonas de falha do substrato do Aquífero Barreiras, sobretudo onde este último não se mostrar satisfatoriamente produtivo.

A segunda consequência diz respeito à relação de alguns falhamentos com a origem de cunhas salinas ao longo da linha de costa. Por definição, as cunhas salinas resultam da exploração contínua dos aquíferos costeiros, acima da sua capacidade de recarga. Este processo causa um desequilíbrio hidrodinâmico na interface água doce-água salgada, o que permite um avanço desta última para o continente. Em geral, as cunhas salinas ocorrem em caráter local, não se estendendo por grandes extensões da linha de costa. Neste aspecto, as falhas podem se constituir em caminhos preferenciais para a contaminação do aquífero, por água salgada, no caso de exploração de poços perfurados nas proximidades de tais falhamentos.

Na zona costeira da área, uma complexa estruturação afeta sedimentos saturados do Aquífero Barreiras, conforme amplamente abordado em seções e capítulos prévios. Dentre estas estruturas, pelo menos uma merece atenção especial, uma vez que foi verificada a ocorrência de poços salinizados (normalmente com profundidades não superiores a 50 m) nas suas proximidades, no local em que esta atinge a linha de costa. Tal observação foi verificada na altura da praia de Barreta, envolvendo o falhamento de direção NW do Riacho Boa Cica e que afeta os *beachrocks* locais (ver figuras 7.1 e 7.7), tendo como base informações (a respeito das captações) de moradores da área. Este fato, embora careça de confirmação técnico-científica e de estudos mais aprofundados, revela fortes indícios de que determinados falhamentos, principalmente aqueles de regime distensional ou transtensional, estejam condicionando a instalação de cunhas salinas. Eventuais pesquisas futuras sobre o referido assunto deverão possuir, como ponto de partida, a caracterização de falhamentos de caráter distensional/transtensional e informações de captações salinizadas ao longo da linha de costa do Estado.

10 – CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES

Os estudos de natureza estrutural, realizados a partir da integração de dados geológicos, geomorfológicos (topografia e hidrografia), gravimétricos, além de dados de campo, evidenciaram uma complexa estruturação na área da Bacia do Rio Pirangi, litoral oriental do Rio Grande do Norte. Esta estruturação foi caracterizada nas direções gerais NW-SE, NE-SW (com base nas análises gravimétricas, geomorfológicas e de campo) e E-W (mostrada nas análises geomorfológicas e de campo), bem como numa quarta direção, menos expressiva e individualizada apenas em escala de afloramento, com orientação N-S. Tais estruturas mostraram-se bem marcadas nos terrenos cenozóicos da região, afetando desde sedimentos do Grupo Barreiras até as seqüências quaternárias sobrepostas, a julgar pela observação de deformações sin-sedimentares nestas unidades estratigráficas. Dentre as feições associadas a esta estruturação geral (à exceção daquela com orientação N-S), destacam-se os diversos tipos de acidentes superficiais do relevo e da hidrografia, exemplificados pela definição de alinhamentos topográficos e anomalias na rede de drenagens, respectivamente, bem como contatos litológicos retilíneos e padrões de fraturamento em escala de afloramento.

As evidências dos falhamentos em subsuperfície se traduziram na definição de rejeitos. Estes rejeitos, determinados a partir da correlação litológica em perfis de poços e da interpretação de dados geo-elétricos, variam desde 20 metros até valores superiores a 100 m, todos de caráter interpretativo normal. Estas descontinuidades estruturais evidenciaram, igualmente, a ocorrência de *horsts* e *grabens*, com destaque para o *Graben* Papary, que se estende desde o extremo sudeste da bacia do Rio Pirangi, excedendo o limite desta, até o noroeste da área mapeada. As estruturações regionais NW e NE, particularmente, acham-se “enraizadas” em lineamentos antigos e profundos, a julgar pela análise do campo gravimétrico residual e a semelhança entre alinhamentos gravimétricos (investigação crustal profunda) e morfotectônicos (investigação crustal rasa), comprovando reativações de falhamentos preexistentes.

No cômputo geral, o arcabouço tectono-estrutural foi interpretado como sendo resultado de reativações sucessivas, mediante um campo de tensões em que os eixos de

distensão e compressão máximas estão orientados aproximadamente em N-S e E-W, respectivamente, sendo este último conferido ao empurrão da cadeia meso-atlântica. O evento relacionado às estruturas N-S de comportamento distensional, evidenciadas em escala de afloramento, é, ao que tudo indica, relacionado a períodos de quiescência da cadeia meso-atlântica, fato este que teria permitido a instalação de um regime distensional secundário na direção E-W.

As influências desta estruturação regional no contexto hidrogeológico da área, particularmente no Aquífero Barreiras, foram evidenciadas sob diversos aspectos, com base nas análises de dados geológicos, hidrogeológicos e geo-elétricos. A principal destas influências diz respeito à geometria do aquífero, na forma de variações bruscas de espessuras saturadas. Estas variações foram caracterizadas qualitativamente e quantitativamente em seções hidrogeológicas, tomando-se como horizonte guia o topo da seqüência carbonática mesozóica (correlacionado ao aquífero cretácico). As espessuras saturadas observadas nestas seções variaram de 20 metros a pouco mais de 100 metros, de acordo com a cinemática das falhas, refletindo-se explicitamente nas vazões explotadas dos poços locais. Tais descargas mostraram-se proporcionalmente maiores na medida que se tem um aumento das respectivas espessuras saturadas, normalmente decorrente dos falhamentos. Estes são preponderantes na determinação das descargas, inclusive, em relação a outros fatores como a composição litológica e condutividade hidráulica. Uma análise estatística desta influência foi realizada adicionalmente, através da correlação entre vazões explotadas e espessuras saturadas, além destas vazões com respectivas extensões de seções filtradas (associadas com horizontes mais arenosos e condutivos hidraulicamente) em poços da região. Os resultados mostraram coeficientes de correlação da ordem de 0,34 entre vazões explotadas e espessuras saturadas para poços que secionam ou não todo o Grupo Barreiras (aquífero homônimo), até 0,79, entre vazões explotadas e extensões de seções filtradas. Este último valor foi obtido refinando-se a base de dados, limitando-a àqueles poços de 8" e perfurados por uma única empresa, no caso a CAERN, além de considerar apenas as captações que secionam todo o aquífero.

Dentro desse contexto, vale ressaltar a importância da elaboração prévia de perfis geológicos/hidrogeológicos a partir de dados disponíveis da área pesquisada, inclusive utilizando informações de sondagens geo-elétricas, como parte da sistemática de locação de poços tubulares em terrenos sedimentares (particularmente de idade cenozóica). Esta prática, apesar de pouco usual, mostra-se como uma eficiente ferramenta, sobretudo se a área em questão encontrar-se sob evidente controle tectono-estrutural.

O controle estrutural do fluxo subterrâneo foi individualizado no sul da área, através da análise conjunta do mapa potenciométrico, do arcabouço estrutural e do levantamento de eletro-resistividade. A seção hidrogeológica elaborada entre o sistema lacustre do Bonfim e a bacia do Rio Pirangi, interpretada a partir de dados geo-elétricos, revelou a ocorrência de um abatimento do bloco central desta seção, originando o aumento brusco de espessura saturada do Aquífero Barreiras, enquanto que as camadas semi-impermeáveis do aquífero cretácico atuam como limites laterais de fluxo. A interação deste contexto físico (a presença de um meio de comunicação hidráulica subterrânea entre os dois sistemas), somada à configuração de cotas potenciométricas relativamente maiores imediatamente ao norte da Lagoa do Bonfim, ocasiona uma “canalização” do fluxo subterrâneo, incrementado através desta porção mais espessa do aquífero, no sentido da bacia do Rio Pirangi.

Entretanto, ressalta-se a necessidade da realização de estudos mais aprofundados na área específica situada entre a Lagoa do Bonfim e o Riacho Pium/Lagoa do Pium (bacia do Rio Pirangi). Tais estudos devem contemplar um detalhamento do levantamento geológico e geo-elétrico da área, a elaboração de uma potencimetria local, bem como a perfuração de piezômetros e posterior monitoramento dos mesmos. Estas sugestões viriam a aperfeiçoar um balanço hídrico mais consistente do Sistema Bonfim, face à importância deste para a Adutora Agreste-Trairi-Potengi da Secretaria de Recursos Hídricos do Estado (SERHID-RN).

As evidências da estruturação no mapa potenciométrico dizem respeito à disposição das linhas equipotenciais, na forma de variações bruscas no espaçamento ou inflexões destas. A configuração de blocos estruturais reflete-se diretamente na

carga potenciométrica, na medida que reduções desta última encontram-se associadas com depressões estruturais na forma de *grabens*, por exemplo. Estas diferenças de carga potenciométrica ao longo de uma área decorrem ainda da cinemática dos falhamentos que atingem e moldam tanto o relevo superficial como também o substrato do aquífero. Neste último caso, as estruturas podem desempenhar um papel de barreira subterrânea natural, uma vez que põem em contato horizontes estratigráficos com diferentes condutividades hidráulicas, inclusive com horizontes semi-impermeáveis, no caso do Aquífero Barreiras e o aquífero carbonático mesozóico. Nesse contexto, um proeminente espaçamento das equipotenciais na localidade de Pium de Cima encontra-se nitidamente associado com um *graben* local, o qual apresenta espessuras saturadas da ordem de 100 m. Esta feição, particularmente, merece ser detalhada em estudos futuros, tendo em vista sua potencialidade hidrogeológica, inclusive como alvo de captações destinadas a reforçar o sistema adutor do Bonfim. Já as inflexões de linhas equipotenciais na área da bacia do Rio Pirangi estão relacionadas principalmente com o regime influente do aquífero em relação aos canais fluviais, apesar destes estarem sob forte condicionamento estrutural. Espera-se que uma parte desta contribuição deva ser creditada à cinemática das estruturas regionais, através do posicionamento resultante de horizontes com melhor condutividade hidráulica, favoravelmente ao fluxo subterrâneo e no sentido das drenagens superficiais. Especula-se ainda a possibilidade de algumas falhas estarem atuando como conduto de ligação entre o Aquífero Barreiras e aquíferos mesozóicos sotopostos. Esta proposição poderia ser confirmada através de estudos que contemplassem a elaboração de uma potenciometria do(s) aquífero(s) mesozóico(s) e/ou correlações hidrogeoquímicas deste(s) com o Aquífero Barreiras.

O cálculo de reservas hidrogeológicas na presente pesquisa, por sua vez, foi realizado considerando as variações de espessuras saturadas decorrente da estruturação regional, buscando-se a obtenção de valores mais compatíveis com a realidade da geometria do aquífero e suas variações. Este procedimento envolveu a divisão da área total do setor oriental da bacia do Rio Pirangi em subáreas, com base na delimitação de blocos estruturais e adotando-se suas respectivas espessuras saturadas, ao contrário da

metodologia tradicional em que se assume um valor médio de espessura do aquífero para toda a área explorada. Esta nova metodologia, na medida em que fornece estimativa mais real, possibilita aos órgãos gestores governamentais otimizar o planejamento e utilização sustentável de aquíferos sedimentares porosos.

No tocante às influências da estruturação regional no contexto hidrogeoquímico do Aquífero Barreiras, resultados preliminares foram alcançados e respaldados na análise conjunta de dados de condutividade elétrica do aquífero, potenciometria da área, análises físico-químicas e o arcabouço tectono-estrutural regional. Esta conjunção de fatores possibilitou a identificação de uma anomalia no mapa de condutividade, na altura da localidade de Tabora, como sendo provavelmente resultante da migração de constituintes iônicos em meio saturado, proporcionado por um fluxo subterrâneo que, em parte, encontra-se estruturalmente controlado, conforme resultados reportados. Esta anomalia, sob esta hipótese, origina-se pela infiltração de elementos associados principalmente com a utilização de fertilizante, com destaque para nitrogênio e potássio, em áreas de perímetros irrigados a norte da Lagoa do Bonfim e margens da Lagoa do Pium, com posterior migração em subsuperfície de acordo com o fluxo subterrâneo. Neste contexto, análises físico-químicas em águas de poços da base física da EMPARN confirmam uma tendência à contaminação *in situ* do aquífero pelas práticas agrárias, enquanto que a anomalia na localidade de Tabora não pode ser explicada também como de caráter *in situ*, face à ausência local de áreas agricultáveis e baixíssima concentração populacional (entendendo esta como a impossibilidade de infiltração de águas residuais urbanas não tratadas). Dentro desta nova linha de pesquisa e a título de sugestão para futuros trabalhos na área em questão, pode-se vislumbrar uma reavaliação e detalhamento do mapa de condutividade elétrica do aquífero. Outros fatores importantes seriam a elaboração de mapas de distribuição de alguns componentes dissolvidos, notoriamente aqueles presentes nas formulações químicas dos principais fertilizantes e agrotóxicos utilizados na região, bem como o confronto com análises físico-químicas completas em poços situados sobre a área da referida anomalia de condutividade e dos perímetros irrigados das lagoas do Bonfim (a norte desta) e Pium.

Outros aspectos gerais da influência das estruturas na hidrologia subterrânea foram também abordados. Dentre estes destaca-se a possibilidade de aumento da permeabilidade local no Aquífero Barreiras, em decorrência do fraturamento relacionado a zonas de falha nos sedimentos mesozóicos não aflorantes da região, além do fato de alguns falhamentos na linha de costa (especificamente aqueles de comportamento distensional ou transtensional) estarem possivelmente associados com a formação de cunhas salinas.

A integração das várias técnicas utilizadas na presente pesquisa, mostrou-se bastante eficaz na abordagem do tema ora exposto. Entretanto, a utilização de outros métodos de investigação geofísica em regiões semelhantes deve ser considerada, podendo-se citar os métodos sísmicos e, eventualmente, levantamentos com radar penetrante no solo (GPR) para o caso de pesquisas em profundidades reduzidas.

As conseqüências decorrentes do condicionamento estrutural dos sistemas hidrogeológicos sedimentares, sobretudo em aquíferos porosos, produzem uma série de fatores que, na gestão dos recursos hídricos (planejamento e uso racional), devem ser profundamente avaliados. Tais avaliações devem integrar os mais diversos projetos nesta área, inclusive o manejo de drenagens e reservatórios superficiais estruturalmente condicionados.

11 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, M.A.T. **Mapeamento geológico e geofísico do litoral leste do Rio Grande do Norte (RN): área entre São José de Mipibu e Tibau do Sul (área II)**. Natal, 1995. 49 p. Relatório de Graduação. Departamento de Geologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- ASTIER, J.L. **Geofísica aplicada a la hidrogeología**. Madrid: Ed. Paraninfo, 1975. 344 p.
- AZEVEDO, L.M.P. E MOREIRA, R.C. Climatologia. In: Brasil, Ministério das Minas e Energia, Projeto **RADAMBRASIL**. Rio de Janeiro, 1981. Folhas SB. 24-25 Jaguaribe-Natal. p. 706-728.
- BARRETO, A.M.F.; BEZERRA, F.H.R.; SUGUIO, K.; TATUME, S.H.; YEE, M.; PAIVA, R.P. E MUNITA, C.S. Late pleistocene marine terrace deposits in northeastern Brazil: sea-level change and tectonic implications. **Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology**. 179, p. 57-69, 2002.
- BELTRÃO, J.F.; SILVA, J.B.; COSTA, J.C. Robust polynomial fitting method for regional gravity estimation. **Geophysics**, 56 (1): 80-89, 1991.
- BEZERRA, F.H.R. **Neotectonics in Northeastern Brazil**. Londres, 1998. 208 p. Ph.D. Thesis, University of London, Inglaterra.
- BEZERRA, F.H.R.; ACCIOLY, P.C.V.; MACHADO, M.F.; DUARTE, M.I.M.; ARAÚJO, M.A.T.; AMARO, V.E. Correlação preliminar entre estruturas do embasamento cristalino e da faixa sedimentar costeira oriental do RN/PB. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, XXXVIII., 1994, Balneário Camboriú-SC. **Bol. de Resumos Expandidos**. Balneário Camboriú-SC: SBG, 1994. p. 562-563.
- BEZERRA, F. H. R.; SAAD, A.; MOREIRA, J. A. M.; LINS, F. A. P. L.; NOGUEIRA, A. M. B.; MACEDO, J. W. P.; LUCENA, L. R. F. DE; NAZARÉ JR. D. Estruturação neotectônica do litoral de Natal-RN, com base na correlação entre dados geológicos, geomorfológicos e gravimétricos. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, IV., 1993, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte-MG: SBG, Núcleo MG. Bol. 12: p. 317-321.

- BIGARELLA, L. **Étude sédimentologique des roches meubles - techniques et méthodes**. Paris: Doin Éditeurs, 1975. 278 p.
- BRASIL, Ministério da Saúde. Portaria MS nº 518 de 26 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativas ao controle e vigilância de qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília-DF, nº 59, seção I, p. 266-270.
- CALDAS, L.H.O. **Estudo geológico e geofísico da falha do Carnaubais, Bacia Potiguar - RN, e implicações neotectônicas**. Natal, 1998. 89 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- CALDAS, L.H.O.; CORIOLANO, A.C.F.; DANTAS, E.P. & JARDIM DE SÁ, E.F. Os *beachrocks* no litoral do Rio Grande do Norte: potencial como marcadores neotectônicos. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, XVII., 1997, Fortaleza. **Resumos Expandidos...** Fortaleza: SBG, 1997. Bol. nº 15, p. 369-374.
- CASTANY, G. **Prospección y explotación de las aguas subterráneas**. Barcelona: Ed. Omega, 1975. 738 p.
- CONTEGE. Estudo hidrogeológico de Natal-RN. Consultoria Técnica de Geologia e Engenharia Ltda. Natal, 1970. Relatório inédito, Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte.
- CORIOLANO, A.C.F.; LUCENA, L.R.F.; JARDIM DE SÁ, E.F.; SAADI, A. A deformação quaternária no litoral oriental do Rio Grande do Norte. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, VIII., 1999, Lençóis. **Anais...** Lençóis-BA: SBG, 1999. P. 67-70.
- COSTA, W.D. Estudos hidrogeológicos de Natal-RN. Consultoria técnica de Geologia e Engenharia Ltda. Natal, 1971. p. 20-54. Relatório inédito, Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte.

- COSTA, W.D. Estudo da disponibilidade hídrica da Lagoa do Bonfim. Costa Consultoria e Serviços Técnicos e Ambientais. Natal, 1997. 83 p. Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte.
- DANTAS, E.P. **Gravimetria e sensoriamento remoto: uma aplicação ao estudo da tectônica recente entre Macau e São Bento do Norte (RN)**. Natal, 1998. 103 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- FEITOSA, E.C. Plano estadual de recursos hídricos do Rio Grande do Norte - os recursos hídricos subterrâneos. HIDROSERVICE Engenharia Ltda. Natal, 1997. v.1. 96 p. Relatório diagnóstico. Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte.
- FEITOSA, F.A.C. E MANOEL FILHO. **Hidrogeologia - conceitos e aplicações**. 2^a ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 1997. 391 p.
- FERREIRA, J.M. **Sismicidade e esforços no Nordeste do Brasil**. São Paulo, 1997. 126 p. Tese de Doutorado. Instituto de Astrofísica e Geologia. Universidade de São Paulo.
- FONSECA, V.P. **Estudos morfo-tectônicos na área do baixo curso do Rio Açu (Açu-Macau) - Rio Grande do Norte**. Belo Horizonte, 1996. 103 p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais.
- GUERRA, A.J.T. E CUNHA, S.B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. 472 p.
- IPT. Estudo hidrogeológico regional detalhado do Estado do Rio Grande do Norte. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A. Natal, 1982. 389 p. Secretaria de Indústria e Comércio do Estado do Rio Grande do Norte. Relatório técnico IPT nº 15.795.
- LUCENA, L. R. F. **Mapeamento geológico-gravimétrico da faixa costeira entre Parnamirim e São José de Mipibu-RN**. Natal, 1993. 76 p. Relatório de Graduação. Departamento de Geologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

- LUCENA, L. R. F. Unidade Barra de Tabatinga: caracterização e ocorrência no pacote sedimentar quaternário sub-recente na região sul de Natal-RN. In: SIMPÓSIO SOBRE PROCESSOS SEDIMENTARES E PROBLEMAS AMBIENTAIS NA ZONA COSTEIRA NORDESTE DO BRASIL, I., 1995, Recife. **Anais...** Recife: 1995. v. 1: 136-138.
- LUCENA, L.R.F. Unidade Barra de Tabatinga, novas evidências de um paleodépósito Quaternário de praia no litoral potiguar. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, XVII., 1997, Fortaleza. **Resumos Expandidos...** Fortaleza: SBG, 1997. Bol. 15. p. 168-171.
- LUCENA, L.R.F. **Implicações tectônicas na hidrologia do Aquífero Barreiras e Sistema Lacustre do Bonfim, Nísia Floresta-RN.** Natal, 1999. 105 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- LUCENA, L.R.F.; OLIVEIRA, S.K.; MEDEIROS, W.E. Condicionamento estrutural sobre o Aquífero Barreiras e Sistema Lacustre do Bonfim, Nísia Floresta-RN. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRASILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, VI., 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro-RJ: SBGf, 1999. 1 CD-Rom.
- LUCENA, L.R.F. E QUEIROZ, M.A. Considerações sobre as influências de uma tectônica cenozóica na pesquisa e prospecção de recursos hídricos - o exemplo do litoral sul de Natal-RN, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**, ABAS, São Paulo, Vol. 1, n. 15: 81-88, 1996.
- LUCENA, L.R.F.; ROSA FILHO, E.F.; HINDI, E.C. O fator estrutural atuante na conexão hidráulica subterrânea entre o sistema lacustre do Bonfim e a bacia do Rio Pirangi, litoral leste do Rio Grande do Norte. **Revista Águas Subterrâneas**, ABAS, São Paulo, n. 16: 69-75, 2002.
- MABESOONE, J.M. **Sedimentologia.** 2ª ed. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, Ed. Universitária, 1983. 475 p.

- MABESOONE, J.M.; CAMPOS E SILVA, A. E BEURLIN, K. Estratigrafia do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 2 (3), p. 173-188, 1972.
- MEDEIROS, W.E. E SILVA, J.B.C. Geophysical inversion using approximate equality constraints. **Geophysics**, v. 61, p. 81-88. 1996.
- MELO, J.G.; REBOUÇAS, A.C.; QUEIROZ, M.A. Análise dos componentes hidrogeológicos da área de Natal-RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, VIII., 1994, Recife. **Anais...** Recife: ABAS. 1994. p. 471-480.
- MORAIS, J.O. Geologia no planejamento ambiental: impactos na água. **Revista de Geologia**. V. 8: 225-258. 1996.
- NOGUEIRA, A.M.B. **O Cenozóico continental da região de Natal-RN**. Recife, 1982. 219 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia. Universidade Federal de Pernambuco.
- OLIVEIRA, M.I.M.; BAGNOLI, E.; FARIAS, C.C.; NOGUEIRA, A.M.B. E SANTIAGO, M. Considerações sobre a geometria, petrografia, sedimentologia, diagênese e idade dos Beachrocks do Rio Grande do Norte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, XXXVI., 1990, Natal. **Anais...** Natal: SBG, 1990. v. 2, p. 621-634.
- ORELLANA, E. **Prospeccion geoeletrica en corriente continua**. Madrid: Ed. Paraninfo, 1972. 523 p.
- PIPER, A.M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. **Trans. Amer. Geophysical Union**. V. 25: p. 914-928. 1944.
- PRATES, M; GATTO, L.C.S. E COSTA, M.I.P. Geomorfologia. In: Brasil, Ministério das Minas e Energia, Projeto **RADAMBRASIL**. Rio de Janeiro, 1981. Folhas SB. 24-25 Jaguaribe-Natal. p. 317.
- RAND, H.M. Reconhecimento gravimétrico da bacia de João Pessoa. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, VIII., 1977, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: SBG, 1977. p. 429-437.

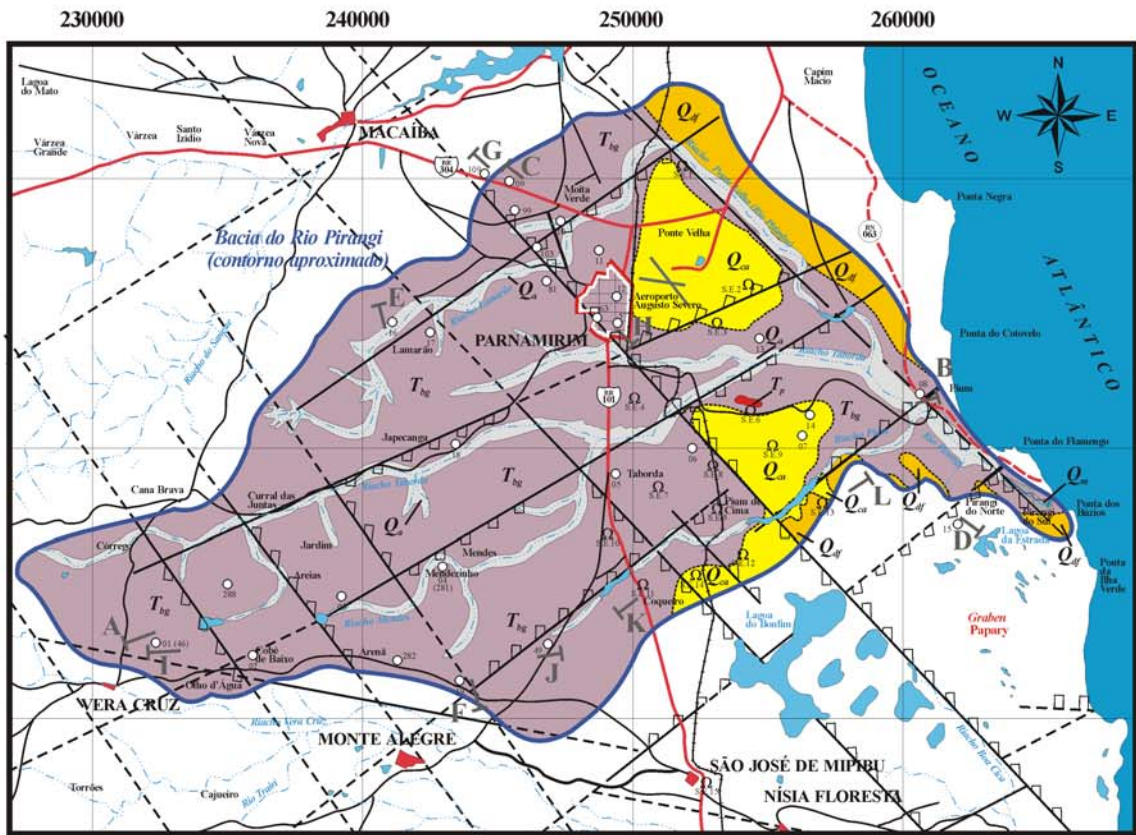
- RAND, H.M. E MANSO, V.A.V. Mapas gravimétricos e magnetométricos da faixa costeira do Nordeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, XXXVI., 1990, Natal. **Anais...** Natal: SBG, 1990. V. 5, p. 2431-2438.
- SALGADO, O.A.; JORDY FILHO, S. E GONÇALVES, L.M.C. Vegetação. In: Brasil, Ministério das Minas e Energia. Projeto **RADAMBRASIL**. Rio de Janeiro, 1981. Folhas SB. 24-25 Jaguaribe-Natal. p. 485-544.
- SALIM, J.; LIMA, M.S. E MABESOONE, J.M. Vales estruturais no litoral leste do Rio Grande do Norte. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, VI., 1974, Maceió. **Anais...** Maceió: SBG, 1974. p. 41-47.
- SANTOS, N.C.F. E LUCENA, L.R.F. Levantamento batimétrico automatizado das lagoas do Jiqui e Pium, litoral sul de Natal-RN: uma alternativa viável na avaliação de reservas hídricas superficiais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XV., 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABRH, 2003. 1 CD-Rom.
- SIBSON, R.H. A note on fault reactivation. **Journal of Structural Geology**, v. 7, p. 751-754. 1985.
- TODD, D. K. **Ground water hydrology**. New York: John Wiley & Sons, 1959. 332 p.

ANEXOS

ANEXO 1 – MAPA GEOLÓGICO DA BACIA DO RIO PIRANGI.

ANEXO 2 – RELAÇÃO DE POÇOS TUBULARES UTILIZADOS NO TÓPICO
9.1.2.

ANEXO 1 – MAPA GEOLÓGICO DA BACIA DO RIO PIRANGI.



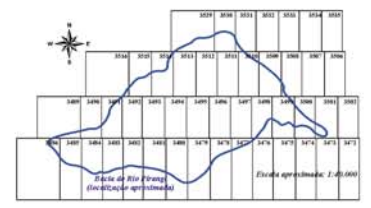
Convenções Cartográficas

- Rodovia Federal
- Rodovia Estadual
- Rodovia Secundária
- Linha Férrea
- Cidade
- Localidade
- Lagoa
- Drenagem
- Pista do aeroporto

Convenções Geológicas, Hidrogeológicas e Geofísicas

- Contato Geológico Definido
- Contato Geológico Inferido
- Alinhamento Morfotectônico
- Falha
- Falha Encoberta e/ou Inferida
- Perfil Geológico/Hidrogeológico/Geofísico
- Poço Tubular
- Sondagem Elétrica

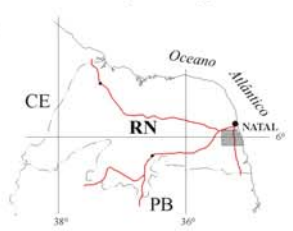
Articulação das fotografias aéreas



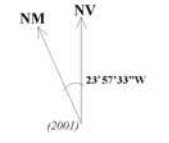
Unidades Estratigráficas

- Aluviões/Terraços (Qa)
 - Coberturas arenosas (Qc)
 - Sedimentos de mangue (Qm)
 - Dunas fixas
 - Dunas antigas descaracterizadas
 - Sedimentos areno-argilosos e conglomeráticos (T_{ag})
- discordância erosional
- discordância erosional

Localização Geográfica

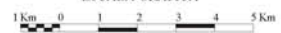


Declinação Magnética



A declinação cresce 5,8\"/>

ESCALA GRÁFICA



Mapa Geológico da Área da Bacia Hidrográfica do Rio Pirangi

Universidade Federal do Rio Grande
 Instituto de Geociências
 Departamento de Geologia

Fonte: fotografias aéreas (Serviços Aerofotogramétricos Cruzleite do Sul S.A., fevereiro 1979), escala aproximada 1:40.000; cartas topográficas da SUDENE (escala 1:100.000 SB.25-V-C-V; Natal e SB.25-V-A-IL S.J. de Mipibu)

Autor: Leandson Roberto F. de Lucena Data: 2005

ANEXO 2 – RELAÇÃO DE POÇOS TUBULARES UTILIZADOS NO TÓPICO
9.1.2.

POÇO (REF.)	COORDENADAS UTM		PROF. (m)	LOC.	ESPESS. SATUR. (m)	FILTRO (m)	VAZÃO EXP. (m ³ /h)
	X (Km E)	Y (Km N)					
2 P PROPOÇO	257590	9344200	78,0 S	PARNAMIR. EMPARN	46,35	26,0	33,0
4 C PT-13	255704	9348100	77,5 S	COLINAS DE PITIMBU	40,35	26,35	60,0
6 C	249681	9341865	49,5 N	PARNAMIR. USCA	19,13	8,0	10,0
9 C PT-05	250376	9344062	75,0 N	BAIRRO PLANALTO	49,7	12,0	30,0
11 C PT-21	250904	9349070	48,0 S	PARNAMIR. PQ. INDUST.	18,28	8,0	35,0
21 C PT-01	264620	9337838	53,0 N	PIRANGI DO SUL	51,0	13,4	40,0
45 C PT-01A	232306	9332663	35,56 S	VERA CRUZ	25,83	10,21	60,0
46 C PT-02	232379	9332764	46,5 S	VERA CRUZ	31,54	12,0	13,0
47 C PT-01	247310	9333312	37,77 S	MONTE ALEGRE	33,99	8,83	32,7
48 C PT-01A	247310	9333312	32,48 S	MONTE ALEGRE	29,76	7,0	19,8
49 C PT-02	247231	9333354	40,8 S	MONTE ALEGRE	36,77	11,7	18,46
50 C PT-03	247315	9333370	37,77 S	MONTE ALEGRE	34,34	8,83	19,23
52 C PT-01	260480	9341930	83,4 N	PARNAMIR. PIUM	58,8	29,3	23,0
53 C PT-02	260450	9340780	65,1 N	N. FLOREST. BAT. PIUM	45,36	20,0	15,0
54 C PT-01	256300	9340420	51,1 S	N. FLOREST. LAGO AZUL	24,24	12,0	20,0
55 C PT-01	249262	9345020	77,0 S	PARNAMIR. ESCRITÓRIO	53,43	16,3	70,0
56 C PT-02	249331	9344978	74,0 N	PARNAMIR. ESCRITÓRIO	50,85	25,97	75,0
57 C PT-03	249569	9344986	80,0 S	PARNAMIR. CAMPO POT.	52,15	21,83	95,0
58 C PT-04	249767	9344774	61,0 S	PARNAMIR. ESC. E. MAIA	45,61	20,37	105,0
60 C PT-06	251236	9344456	79,0 N	PARNAMIR. JD. PRIMAV.	56,26	16,0	10,0
61 C PT-07	248187	9343816	37,0 N	PARNAMIR. RCH. VERM.	32,0	14,54	70,0
62 C PT-08	248392	9343696	41,0 N	PARNAMIR. RCH. VERM.	39,04	11,6	50,0
63 C PT-09	248725	9345044	67,0 S	PARNAMIR. COHABINAL	44,73	18,2	90,0
64 C PT-10	248725	9345044	74,0 S	PARNAMIR. COHABINAL	52,02	22,1	110,0
65 C PT-11	247392	9344766	57,0 S	PARNAMIR. R. VENTOS	30,11	13,54	70,0
66 C PT-12	248088	9345696	56,0 S	PARNAMIR. LOT. SP	30,72	13,64	60,0
67 C PT-13	248187	9343816	50,0 S	PARNAMIR. VALE SOL	38,57	13,02	60,0
68 C PT-14	248985	9346490	67,0 S	PARNAMIR. M. CASTELO	43,4	18,13	30,0
69 C PT-15	249139	9347150	70,0 N	PARNAMIR. PQ. A. FERN.	47,27	15,0	80,0
70 C PT-16	246514	9345294	57,0 S	PARNAMIR. BELA VISTA	31,6	15,1	30,0
71 C PT-17	245920	9345320	58,0 S	PARNAMIR. MOR. NOVA	34,04	15,0	20,0
72 C PT-18	252500	9348070	59,0 S	PARNAMIR. EMAÚS	37,01	18,6	17,0

POÇO (REF.)	COORDENADAS UTM		PROF. (m)	LOC.	ESPESS. SATUR. (m)	FILTRO (m)	VAZÃO EXP. (m ³ /h)
	X (Km E)	Y (Km N)					
73 C PT-18A	252911	9348804	52,0 S	PARNAMIR. EMAÚS	26,83	15,16	40,0
74 C PT-19	252486	9348046	58,0 N	PARNAMIR. EMAÚS	30,0	14,06	50,0
75 C PT-20	252299	9349324	52,0 S	PARNAMIR. PQ. ORQUÍD.	33,39	12,0	70,0
77 C PT-22	250726	9349404	80,0 N	PARNAMIR. J. AEROPOR.	50,0	16,0	35,0
78 C PT-23	250894	9349356	50,0 S	PARNAMIR. J. AEROPOR.	20,0	10,0	15,0
79 C PT-24	251574	9349350	80,0 N	PARNAMIR. J. AEROPOR.	49,4	22,4	100,0
81 C PT-26	246993	9346142	49,5 S	PARNAMIR. PASS. AREIA	24,36	9,2	30,0
82 C PT-27	248809	9347314	66,0 S	PARNAMIR. JÓQUEI CLB.	41,0	17,2	40,0
83 C PT-28	246693	9343626	50,0 N	PARNAMIR. JAPECANGA	39,06	19,0	20,0
84 C PT-29	249139	9347150	67,0 S	PARNAMIR. PQ. A. FERN.	39,36	18,74	80,0
85 C PT-30	245912	9346164	54,8 S	PARNAMIR. BELA VISTA	32,5	16,2	50,0
86 C PT-31	247725	9343508	42,0 N	PARNAMIR. PIRANGI D.	34,99	14,0	50,0
87 C PT-32	-	-	48,0 S	PARNAMIR. MOR. NOVA	26,05	12,0	30,0
88 C PT-01	250830	9352450	67,0 S	NATAL PLANALTO	35,88	17,0	50,0
89 C PT-02	-	-	65,5 S	NATAL PLANALTO	40,88	18,9	40,0
90 C PT-03	-	-	71,0 N	NATAL PLANALTO	45,18	19,36	40,0
91 C PT-01	-	-	83,0 S	NATAL CID. SATÉL.	70,62	26,5	40,0
92 C PT-02	-	-	79,0 N	NATAL CID. SATÉL.	67,76	25,2	54,0
93 C PT-03	-	-	62,0 S	NATAL CID. SATÉL.	49,04	19,35	42,0
94 C PT-04	-	-	78,5 S	NATAL CID. SATÉL.	55,76	21,4	48,0
95 C PT-05	-	-	78,0 N	NATAL CID. SATÉL.	55,92	25,48	66,0
96 C PT-01	-	-	62,0 S	NATAL HORT. FLOR.	38,73	14,0	15,0
97 C PT-01	246943	9349103	60,0 N	MACAÍBA CIA	35,79	18,17	80,0
98 C PT-02	246676	9348822	47,3 S	MACAÍBA CIA	32,83	14,65	80,0
99 C PT-03	245116	9349333	55,3 S	MACAÍBA CIA	24,96	10,45	25,0
100 C PT-04	246339	9348786	62,0 N	MACAÍBA CIA	36,0	19,54	80,0
101 C PT-05	246010	9348616	61,5 N	MACAÍBA CIA	33,57	15,34	15,0
102 C PT-06	245584	9348562	57,8 S	MACAÍBA CIA	33,44	17,22	80,0
103 C PT-07	246244	9348132	64,5 S	MACAÍBA CIA	37,37	19,39	80,0
104 C PT-08	245875	9348776	60,0 N	MACAÍBA CIA	33,3	17,45	80,0
105 C PT-09	246170	9348674	60,0 N	MACAÍBA CIA	32,75	16,6	80,0
106 C PT-01	244378	9350012	52,0 S	MACAÍBA GJ. RECREIO	23,68	14,5	16,0

POÇO (REF.)	COORDENADAS UTM		PROF. (m)	LOC.	ESPESS. SATUR. (m)	FILTRO (m)	VAZÃO EXP. (m ³ /h)
	X (Km E)	Y (Km N)					
107 C PT-02	244383	9350368	52,2 S	MACAÍBA GJ. RECREIO	19,0	9,51	30,0
108 C PT-03	244270	9350676	55,0 N	MACAÍBA GJ. RECREIO	20,6	9,5	35,0
109 C PT-04	244112	9350082	51,0 S	MACAÍBA GJ. RECREIO	21,5	7,0	16,0
110 C PT-05	244570	9349950	54,0 S	MACAÍBA GJ. RECREIO	26,7	7,28	35,0
111 C PT-06	244776	9349878	54,0 S	MACAÍBA GJ. RECREIO	27,92	8,54	16,0
112 C PT-07	245066	9349790	56,0 S	MACAÍBA GJ. RECREIO	28,3	8,4	35,0
113 C PT-08	245370	9349692	60,0 S	MACAÍBA GJ. RECREIO	35,0	11,22	40,0
114 C PT-09	245733	9349572	48,3 S	MACAÍBA GJ. RECREIO	22,81	9,54	35,0
115 C PT-10	245987	9349494	51,0 N	MACAÍBA GJ. RECREIO	25,11	12,36	60,0
116 C PT-11	246208	9349420	56,0 S	MACAÍBA GJ. RECREIO	28,78	14,68	80,0
117 C	244953	9349202	50,0 S	MACAÍBA ÁGUA MIN.	28,0	10,0	20,0
118 C PT-01	-	-	58,88 N	NATAL L. JIQUI	47,38	27,74	120,0
119 C PT-02	257800	9345500	60,0 S	NATAL L. JIQUI	48,0	27,83	80,0
120 C PT-03	-	-	60,0 N	NATAL L. JIQUI	50,4	28,95	140,0
268 P GEPÊ	-	-	78,0 N	PARNAMIR. CHARF-RN	48,6	14,0	26,0
270 P GEPÊ	250900	9342000	74,0 S	PARNAMIR. SONHO VER.	36,0	18,0	17,8
271 P GEPÊ	249900	9342350	72,0 S	PARNAMIR. CAJUPIRAN.	38,35	18,0	46,0
272 P GEPÊ	262350	9340400	37,0 N	PARNAMIR. COTOVELO	30,5	4,0	5,8
274 P PROSENG	247690	9342040	48,0 N	PARNAMIR. F. POTENGI	25,5	14,0	10,0
277 P GEPÊ	-	-	38,0 S	MACAÍBA C. JUNTAS	17,3	8,0	10,0
281 P PROPOÇO	243000	9335700	88,0 S	S. J. MIPIBÚ MENDEZIN.	67,52	22,0	47,0
282 P PROPOÇO	241000	9332500	52,0 N	M. ALEGRE ARENÁ	31,35	12,0	13,0
288 P HIDROP.	235312	9335121	36,0 N	VERA CRUZ AREIAS	26,16	12,0	10,8

Cadastro de poços utilizados no tópico 9.1.2; P = poço tubular perfurado por empresa particular e C = poço tubular perfurado pela CAERN (1ª coluna); S/N (coluna 4) = poço tubular que seciona todo o Aquífero Barreiras (S) ou apenas parcialmente (N).