

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
MESTRADO EM SAÚDE E AMBIENTE

LUIS ALFREDO LOPES SOARES

**ANÁLISE DA VULNERABILIDADE À SALINIZAÇÃO DAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS DA ILHA DE SÃO LUÍS:**
Estudo de caso na área Itaqui - Bacanga

São Luís
2004

LUIS ALFREDO LOPES SOARES

**ANÁLISE DA VULNERABILIDADE À SALINIZAÇÃO DAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS DA ILHA DE SÃO LUÍS:**
Estudo de caso na área Itaquí - Bacanga

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Saúde e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão, para obtenção do título de Mestre, área de concentração em Qualidade Ambiental.

Orientadora: Prof. Dra. Flávia Rebelo Mochel

LUIS ALFREDO LOPES SOARES

**A ANÁLISE DA VULNERABILIDADE À SALINIZAÇÃO DAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS DA ILHA DE SÃO LUÍS:**

Estudo de caso na área Itaqui - Bacanga

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Saúde e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão, para obtenção do título de Mestre, área de concentração em Qualidade Ambiental.

Aprovado em / / .

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª Dra. Flávia Rebelo Mochel (Orientadora)
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Alberto Kioharu Nishida
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Paulo Roberto Saraiva Cavalcante
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Lúcio Antônio Alves de Macedo
Universidade Federal do Maranhão

Aos meus pais B. J. Soares (*in memoriam*) e
Maria Luisa, à minha esposa Ivone Soares, e
filhos Luis Alfredo, Michèlle e Luis Fernando,
alicerces da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sua infinita bondade.

Aos familiares, pelo apoio e colaboração em todas as fases do trabalho.

À Professora Flávia Rebelo Mochel pelo incentivo, amizade e conhecimentos dedicados a esta investigação.

Ao Professor Paulo Roberto Saraiva Cavalcante pela leitura e contribuição valiosa.

Agradecimento especial ao amigo Hélio de Oliveira Sousa Costa, pela valiosa contribuição ao desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal do Maranhão e Universidade Estadual do Maranhão, que cederam seus laboratórios, permitindo assim o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos geólogos Eduardo Pinheiro Padilha e Afonso Braúna, pelo acesso propiciado ao cadastro de poços tubulares da Companhia de Água e Esgotos do Maranhão – CAEMA.

A Associação dos Geólogos do Maranhão – AGEMA, na pessoa de seu presidente, Geólogo Agenor Aguiar Teixeira Jaguar, pelo apoio e contribuição para esta pesquisa.

Enfim, a todos os colegas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

“Água que nasce na fonte e que abre um profundo grotão [...] que leva a fertilidade ao sertão, águas que banham aldeias e matam a sede da população [...] água dos igarapés [...] que o sol evapora, pro céu vai embora, virar nuvem de algodão, gotas de água da chuva [...] sobre a plantação [...] são lágrimas na inundação [...] são as mesmas águas que encharcam o chão, e sempre voltam tranqüilas, pro fundo da terra”.

Guilherme Arantes

RESUMO

A vulnerabilidade à salinização das águas subterrâneas na área Itaquí – Bacanga, consequência da super exploração de aquíferos costeiros provoca, em geral, o fenômeno de intrusão salina, decorrente do avanço da interface água doce/água salgada, podendo ocorrer uma situação de contaminação generalizada. O uso de metodologias tradicionais para avaliação de contaminação não se aplica a esta situação. Em consequência, utiliza-se metodologia distinta e bem mais complexa, envolvendo conhecimentos de hidrogeologia e hidroquímica, que necessitam de numerosas ferramentas para a obtenção de parâmetros hidrogeoquímicos. Na costa noroeste da ilha de São Luís, na área Itaquí – Bacanga, o sistema aquífero encontra-se, em alguns setores, gravemente afetado por este fenômeno, já tendo ocorrido desativação de poços salinizados. A partir da análise de perfis litológicos, análises físico-químicas e de seções integrando dados geotopográficos e químicos, foi gerado um mapa de vulnerabilidade que considerou também situações históricas.

Palavras-chave: Água subterrânea, vulnerabilidade, intrusão salina, hidrogeologia, hidroquímica.

ABSTRACT

The salinization vulnerability of groundwater in the Itaquí-Bacanga area, caused by the super exploitation in the coastal aquifers usually creates the phenomenon of seawater intrusion, justified by the increasing of the freshwater/ seawater interface, which can bring a scenario of general contamination. Instead of using traditional methods for contamination evaluation, which are not applicable in this case, different methods must be applied using much more complex knowledges about hydrogeology and hydrochemistry that demand more tools for collecting hydrogeochemistry parameters. In the northwest coast of the island of São Luís, Itaquí-Bacanga area, some zones in the aquifer system are already seriously damaged by reasons explained above, causing deactivation of some wells through salinization. From the analysis of lithologic profiles, physicochemical parameters and integrating geotopographics and chemical datas, a vulnerability map was built, also considering historical features.

Keywords: Groundwater, vulnerability, seawater intrusion, hydrogeology, hydrochemical.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil litológico característico dos poços do bairro Sá Viana (sem escala)	82
Figura 2 - Perfil litológico do poço do Corpo de Bombeiros (sem escala)	83
Figura 3 - Perfil litológico característico do poço do Residencial Paraíso (sem escala)	84
Figura 4 - Perfil litológico característico do poço do Tamancão (sem escala).....	85
Figura 5 - Perfil litológico característico do poço do Bonfim (sem escala)	86
Figura 6 - Perfil litológico característico dos poços do setor Norte (sem escala).....	87
Figura 7 - Perfil litológico característico da expansão da Vila Mauro Fecury I (sem escala)	88
Figura 8 - Perfil litológico característico dos poços C-01 e C-02, do Porto do Itaquí (sem escala)	89
Figura 9 - Perfil Litológico do Poço C-10 do Anjo da Guarda (sem escala).....	91
Figura 10 - Perfil litológico característico dos poços da Vila Embratel (sem escala).....	93

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Aspecto de uma moradia de ocupação desordenada na área Itaquí-Bacanga.....	30
Fotografia 2 - Vista parcial da praia do Bonfim em São Luís, na área Itaquí – Bacanga.....	31
Fotografia 3 - Vista da Barragem do Bacanga em São Luís.....	31
Fotografia 4 - Vista parcial do Terminal de Ferry boat na Ponta de Espera no Porto do Itaquí	32
Fotografia 5 - Vista parcial do estuário do Igarapé Itapecuraíba no Porto da Vovó, próximo à Barragem do Bacanga.....	34
Fotografia 6 - Afloramento do contato Terciário/Cretáceo, na Ponta do Bonfim	35
Fotografia 7 - Grotão no bairro Gancharia na área Itaquí – Bacanga.....	38
Fotografia 8 - Reservatório R -12 da CAEMA, no bairro do Anjo da Guarda.....	49
Fotografia 9 - Poço raso, tipo cacimba, utilizado por moradores da Vila Jambeiro.....	50
Fotografia 10 - Poço comunitário no bairro Jambeiro na área Itaquí-Bacanga.....	77
Fotografia 11 - Poço em área pública na área Itaquí - Bacanga, depredado por vandalismo ...	77

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição de Poços.....	74
Gráfico 2 - Dendrograma referente às águas da área Itaquí – Bacanga.....	106
Gráfico 3 - Razões iônicas $r\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ e $\text{Mg}^{+2}/\text{Ca}^{+2}$	107
Gráfico 4 - Histogramas de Distribuição de Frequência.....	108
Gráfico 5 - Variação do Íon Cloreto	109
Gráfico 6 - Variação da Condutividade Elétrica.....	109
Gráfico 7 - Seção Hidrogeoquímica com Ânions (W-E/SE).....	112
Gráfico 8 - Seção Hidrogeoquímica com Cátions (W-E/SE)	113
Gráfico 9 - Seção Hidrogeoquímica com Ânions (SW-NE/NW).....	115
Gráfico 10 - Seção Hidrogeoquímica com Cátions (SW-NE/NW)	116

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 - Localização.....	22
Mapa 2 - Ilha de São Luís/ Área de Estudo	23
Mapa 3 - Uso e Ocupação do Solo.....	28
Mapa 4 - Localização dos Poços.....	79
Mapa 5 - Variação da Condutividade Elétrica.....	95
Mapa 6 - Variação Hidroquímica do Íon Cloreto	97
Mapa 7 - Variação da Razão Iônica (rCl/HCO_3^-)	98
Mapa 8 - Variação da Razão Iônica (rMg^{+2}/rCa^{+2}).....	99
Mapa 9 - Zoneamento da Vulnerabilidade dos Aquíferos	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pluviometria e Evaporação registrada na Estação da Praia do Boqueirão, no período de 1985 a 2002.....	33
Tabela 2 - Cadastro dos 29 poços ativos da área Itaquí – Bacanga	75
Tabela 3 - Cadastro dos 13 poços desativados da área Itaquí – Bacanga, com dados históricos	76
Tabela 4 - Poços de propriedade da CVRD, na área Itaquí-Bacanga	78
Tabela 5 - Dados Históricos do poço H-01.....	103
Tabela 6 - Dados Históricos dos poços da CVRD.....	105

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
CAEMA	Companhia de Águas e Esgotos do Maranhão.
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce.
DPRM	Departamento de Pesquisas de Recursos Minerais.
GERCO	Programa de Gerenciamento Costeiro.
NMP	Número mais provável.
PVC	Polivinil Cloride
VMP	Valor Máximo Permitido
UEMA	Universidade Estadual do Maranhão.
UFMA	Universidade Federal do Maranhão.
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Localização da área de estudo	21
1.2 A Problemática da área Itaquí-Bacanga	21
1.3 Objetivos	25
1.3.1 Geral.....	25
1.3.2 Específicos	25
2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ITAQUÍ-BACANGA	26
2.1 Uso e ocupação do solo	26
2.2 Clima	32
2.3 Relevo e vegetação	33
2.4 Geologia	34
2.5 Hidrologia	36
2.6 Hidrogeologia	37
3 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA	39
3.1 Abordagem teórica nos estudos de contaminação de águas subterrâneas	39
3.1.1 Conceitos e usos da água subterrânea.....	39
3.1.2 Contaminação das águas subterrâneas.....	42
3.1.3 Água subterrânea e seus constituintes químicos.....	45
3.1.4 Usos da água subterrânea na área de estudo	47
3.2 Técnicas para avaliação da intrusão salina	52
3.3 O problema da intrusão salina.	56
3.3.1 A intrusão salina em aquíferos no Brasil.	57
3.3.2 Síntese dos estudos realizados na ilha de São Luís e na área Itaquí-Bacanga.....	58
4 MATERIAL E MÉTODOS	66
4.1 Planejamento e coleta de dados básicos	66
4.2 Trabalhos de campo	67
4.3 Análise dos dados	70
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
5.1 Cadastramento dos poços	74
5.2 Análise dos perfis litológicos.	80
5.2.1 Análise dos perfis do setor leste	81
5.2.2 Análise dos perfis do setor norte.....	84

5.2.3	Análise dos perfis do setor oeste.....	89
5.2.4	Análise dos perfis setor centro-sul.....	90
5.3	Análise hidroquímica.....	93
5.3.1	Análise hidroquímica do setor leste.....	93
5.3.2	Análise hidroquímica do setor norte.....	100
5.3.3	Análise hidroquímica do setor oeste.....	102
5.3.4	Análise hidroquímica do setor centro-sul.....	104
5.4	Análise do grau de homogeneidade química.	106
5.5	Análise hidrogeoquímica.....	110
5.5.1	Análise dos gráficos da seção W-E/SE.....	110
5.5.2	Análise dos gráficos da seção SW-NE/NW.....	111
5.6	Elaboração do mapa de zoneamento da vulnerabilidade dos aquíferos.....	117
5.6.1	Definição dos parâmetros para o zoneamento.....	117
6	CONCLUSÃO.....	122
	REFERÊNCIAS.....	125
	GLOSSÁRIO.....	129
	APÊNDICES.....	131
	ANEXO.....	144

1 INTRODUÇÃO

Água e Saúde estão intimamente ligadas e associadas à qualidade de vida das populações ao longo do tempo. Dentre os diversos usos dados à água é, sem dúvida, como alimento que ela representa fator indispensável à sobrevivência humana.

Estudos têm demonstrado que a água, em qualidade e quantidade suficiente ao atendimento das necessidades de uma comunidade, é fator de redução de doenças a ela vinculadas como as diarreias infecciosas, salmoneloses, cólera, verminoses, giardíase, amebíase, dentre outras. Na população infantil essa redução é então ainda mais significativa, visto que nessa faixa etária os mecanismos de defesa são mais vulneráveis.

Pesquisas realizadas no Vale do Ribeira e na Região do Médio Paranapanema, no Estado de São Paulo, em 1992 e 1996, no período de um ano após a implantação de sistemas de abastecimento de água, constataram que, apesar da manutenção das condições sócio-econômicas das comunidades, houve reduções de até 78 % na prevalência das doenças relacionadas à água contaminada, nas populações observadas (MARTINS, 1995, 2000 apud TSUTIYA, 2004. p 5).

O Brasil é um país com significativo potencial de recursos hídricos, destacando-se no cenário mundial pelo grande volume de água doce dos seus rios, cuja vazão média de 177.900 m³/s somada aos mais de 73.100 m³/s da Amazônia Internacional, representa 53 % da água doce do continente Sul Americano (334.000 m³/s) e 12 % do total mundial (1.488.000 m³/s) (REBOUÇAS, 2002). Assim, tomando-se a população de 170 milhões de habitantes, tem-se uma disponibilidade hídrica de 33.000 m³/hab/ano, valor este que coloca o Brasil na classe dos países ricos em água doce. Entretanto, a má distribuição espacial dos recursos hídricos faz com que algumas áreas sofram com a escassez de água (REBOUÇAS, 2001).

Por outro lado, a inexistência de uma política ambiental séria tem levado o homem a intervir de forma cada vez mais desordenada nas bacias hidrográficas através de atividades como: desmatamentos, queimadas, práticas agrícolas nocivas, atividades

extrativistas agressivas, lançamentos de resíduos sólidos, esgotos industriais e domésticos em nossos rios e lagos, além de ocupações urbanas irregulares gerando problemas quanto aos aspectos de quantidade e qualidade da água.

Deste modo, a perda de qualidade dessas águas superficiais impõe a necessidade de técnicas de tratamento cada vez mais sofisticadas e caras. O agravamento dessa situação levará, sem dúvida, em um curto espaço de tempo à impossibilidade de tratamento dessas águas, dado os altos custos a que estarão envolvidos.

Como alternativa ao uso de águas superficiais, recorre-se às águas subterrâneas onde o Brasil também dispõe de uma reserva importante. De um modo geral as águas subterrâneas representam uma disponibilidade de 5.000 m³/hab/ano o que significa valor suficiente para abastecer com água de qualidade cerca de 80% das comunidades urbanas do Brasil (REBOUÇAS, 2002). Essa reserva resulta principalmente das formações de rochas sedimentares encontradas em nosso país, as quais normalmente são boas formadoras de aquíferos, e que ocupam cerca de 40% do território nacional. No restante do país predominam os escudos cristalinos, de fraca ou regular vocação hidrogeológica.

Essas águas, filtradas naturalmente no solo ao longo de seu trajeto, possuem normalmente uma qualidade tal que, na maioria dos casos, dispensam o uso de estações de tratamento para se adequarem aos padrões de potabilidade para consumo humano. Sua utilização tem sido principalmente para uso na agricultura e na indústria. Como abastecimento doméstico, é nas comunidades de médio e pequeno porte que se encontra sua maior utilização. No Estado de São Paulo as águas subterrâneas têm importante papel no abastecimento público e privado, onde 72 % dos municípios são total ou parcialmente abastecidos por esse recurso hídrico (CETESB, 2004). Apesar de todas as vantagens apresentadas, somente nas últimas décadas é que seu uso veio a ser valorizado no Brasil, principalmente em virtude do grau de degradação a que chegaram as águas superficiais.

Embora as águas subterrâneas sejam naturalmente mais bem protegidas dos agentes contaminantes do que as de superfície, uma vez comprometidas sua recuperação é lenta, o que na maioria das vezes inviabiliza o seu uso. Llamas e Custódio (1999) lembram que a descontaminação de um aquífero, além de difícil e caro, na maioria das vezes é inviável. A grande expansão das atividades antrópicas, nas áreas urbanas e rurais tem provocado a poluição pontual das águas subterrâneas, sobretudo através de lixões, aterros industriais, armazenamento, manuseio e descarte inadequados de produtos químicos, efluentes e resíduos, incluindo o uso indiscriminado de agrotóxicos e fertilizantes.

Além das citadas, outra forma de contaminação de aquíferos é a salinização de suas águas. Uma delas decorrente da utilização de métodos inadequados de irrigação, principalmente em regiões com déficit hídrico anual, característica das regiões áridas e semi-áridas, quando é intensa a evapotranspiração, com consequente deposição de sais no solo, que posteriormente vão até os lençóis d'água por lixiviação, aumentando desta maneira seus teores. A salinização das águas subterrâneas pode ocorrer também pela existência, nas formações sedimentares, de águas conatas ou de rochas evaporíticas, além dos aerossóis marinhos, ou "sea sprays" (em inglês), nas áreas de costa. Outra forma de salinização diz respeito à super exploração dos aquíferos costeiros, que por sua localização próxima às águas marinhas podem sofrer a intrusão destas em suas águas, provocando uma mistura com acentuada elevação dos teores de sais.

A ilha de São Luís, sendo de natureza sedimentar, possui todos os requisitos favoráveis à ocorrência desse último processo de salinização. Assim propõe-se, utilizando a hidrogeoquímica, efetuar uma análise da vulnerabilidade à salinização das águas subterrâneas na ilha, buscando conhecer a dinâmica do processo em uma área escolhida para investigação.

Vulnerável, segundo o Dicionário Michaelis, é o conjunto de fatores que pode aumentar ou diminuir o risco a que estamos expostos em todas as situações de nossa vida.

Assumindo uma abordagem ambiental de cunho hidrogeológico Ribeiro (2002) conceitua a vulnerabilidade como a maior ou menor capacidade de atenuação das camadas superiores do aquífero à passagem dos poluentes. Trata-se, portanto, de uma propriedade intrínseca do sistema.

Verifica-se, de modo geral, a dificuldade em se retratar de modo satisfatório a vulnerabilidade de um aquífero. Apresentar em mapa todas as situações geológicas, hidrogeológicas, hidroquímicas, etc., que exerçam alguma influência sobre o comportamento dos contaminantes, sem levar em conta as características destes e os cenários de contaminação, é praticamente impossível, afirma Ribeiro (2002), pois se sabe que cada grupo de contaminantes é afetado por variados fatores que incluem o tipo e espessura de solo, características e espessura da zona não saturada, taxa de recarga, características do aquífero, etc.

Assim, na prática, são utilizados índices que sintetizam num único valor a influência de todos os fatores que direta ou indiretamente contribuem para avaliar a vulnerabilidade, como os citados por Ribeiro (2002):

- Índice AVI (Aquifer Vulnerability Index);
- Índice DRASTIC (Depth, Recharge, Aquifer, Soil, Topography, Impact, Conductivity), que se baseia em sete parâmetros: profundidade do nível freático, recarga, material do aquífero, tipo de solo, topografia, impacto da zona não saturada e condutividade hidráulica;
- Índice baseado numa classificação litológica;
- Índice de Susceptibilidade;

Assim, quando se objetiva avaliar vulnerabilidade de aquíferos em uma determinada área, está se usando o termo em sentido estrito, sempre se referindo geralmente à

obtenção destes índices, pois se referem a contaminantes adicionados sobre a superfície do terreno.

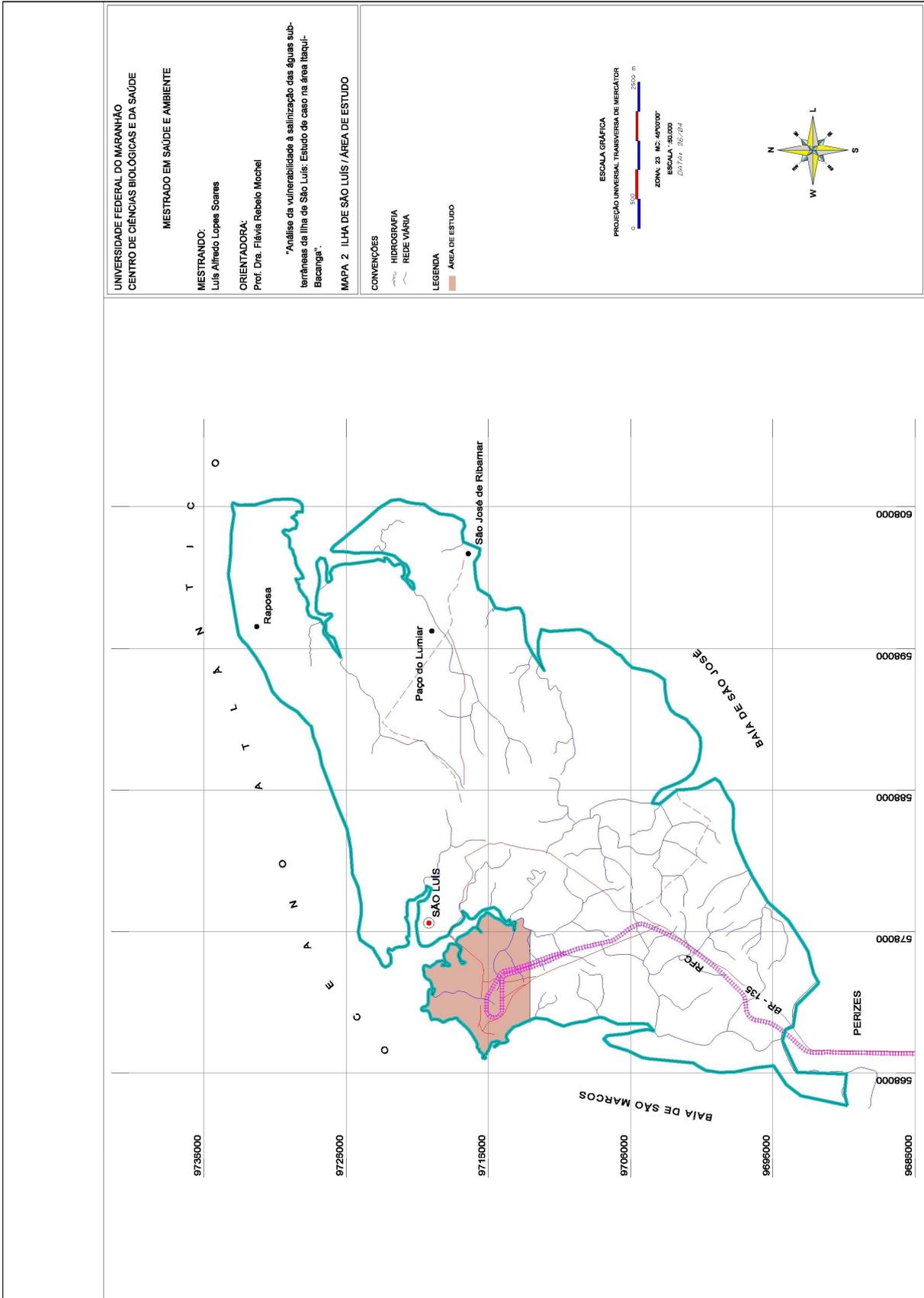
Porém, o termo “vulnerabilidade”, em um sentido mais amplo, será o usado neste trabalho, uma vez que não serão aplicados nenhuns dos métodos anteriormente citados, pois a contaminação da água doce pela água do mar em aquíferos costeiros envolve características diferentes, que obrigam a sua avaliação com metodologia distinta e geralmente mais complexa, requerendo numerosas ferramentas para o conhecimento dos cenários hidrogeológicos envolvidos.

1.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se ao longo da BR 135, no trecho compreendido da Avenida dos Portugueses, conhecida como eixo Itaqui-Bacanga, em virtude de se iniciar na barragem do rio Bacanga e terminar no porto do Itaqui. Ocupa a porção noroeste da ilha de São Luís, onde se situa a capital do estado do Maranhão (Mapa 1). Delimita-se ao norte e oeste com a baía de São Marcos, e a Leste com o rio Bacanga. A área possui as seguintes coordenadas extremas: Norte $02^{\circ}31'36''$, Leste $44^{\circ}16'58''$, Sul $2^{\circ}35'44''$, Oeste $44^{\circ}22'43''$, e ocupa uma área de 5.537,22 ha (Mapa 2).

1.2 A PROBLEMÁTICA DA ÁREA ITAQUÍ-BACANGA

A ilha de São Luís ocupa uma área de 905 km² e situa-se na costa Setentrional do Brasil, mais precisamente no Golfão Maranhense. Político-administrativamente, este espaço é composto por quatro municípios: São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa.



Mapa 2 - Ilha de São Luís / Área de Estudo

Até o final da década de 1960 a ilha de São Luís ainda não apresentava problemas associadas às águas subterrâneas, visto serem ainda poucos os poços perfurados. Sua população era da ordem de 200.000 habitantes distribuídos praticamente no centro urbano antigo e ao longo do divisor de águas das bacias dos rios Anil e Bacanga, em uma extensão de aproximadamente treze quilômetros, chamado de “caminho grande”.

Com a construção da barragem do Bacanga e da ponte José Sarney, em 1968 e 1970, respectivamente, novos eixos urbanos foram criados, acelerando o processo de crescimento horizontal da cidade e com ele os problemas de infra-estrutura básica. Com um sistema de abastecimento de água deficiente à época, surgiu então a necessidade de novos mananciais de água para enfrentar o aumento na demanda. Assim, a exploração de águas subterrâneas, através de poços tubulares profundos, passou a ser uma opção bastante interessante pelas vantagens oferecidas, principalmente quanto a sua localização próxima ao consumo e sua qualidade, quase sempre atendendo aos padrões de potabilidade para uso doméstico, de acordo com a Portaria 518/2004 – Ministério da Saúde, Brasil (2004).

Deste modo, com o aumento do número de poços perfurados, os problemas do excesso na concentração de sais na água passaram a ser identificados, em particular em áreas próximas à costa como, nos bairros de São Francisco, Renascença e Calhau e nas ocupações no eixo Itaquí-Bacanga.

Considerando a possibilidade de salinização, a exploração de águas subterrâneas em áreas costeiras precisa ser mais bem estudada, no sentido de se preservar esse recurso natural das ações danosas dessa forma de contaminação.

A salinização de poços tubulares hoje verificados no eixo Itaquí-Bacanga possui causas diversas, que vão desde o sistema de uso e ocupação do solo à super exploração de águas subterrâneas, e até ao desconhecimento das peculiaridades da geologia local por parte de alguns perfuradores que atuam no setor. A identificação dessas causas justifica a

necessidade de estudos nessa área, com a formulação de sugestões para a exploração racional das águas subterrâneas, tendo-se sempre em mente a preservação para uso sustentado desse recurso.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

O objetivo principal deste trabalho é o de avaliar a vulnerabilidade à salinização das águas subterrâneas da área Itaquí – Bacanga, e fornecer subsídios para uma gestão adequada e uso sustentável desse recurso hídrico.

1.3.2 Específicos

- Identificar e cadastrar os poços tubulares existentes no eixo Itaquí-Bacanga;
- Avaliar os diferentes graus de salinização da água subterrânea por meio de análises físico-químicas nos poços em estudo;
- Identificar os prováveis fatores envolvidos no processo de salinização, correlacionando-se as análises físico-químicas, com os dados de perfuração, operação e manutenção dos poços em estudo;
- Identificar com base nos parâmetros físico-químicos estudados, fatores de risco da incidência de doenças de veiculação e/ou origem hídrica, decorrentes do uso da água;
- Identificar as áreas vulneráveis e passíveis de salinização, confrontando perfis estratigráficos com resultados das análises físico-químicas;
- Sugerir medidas que visem minimizar o avanço no processo de salinização da área em estudo.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ITAQUÍ-BACANGA

Geograficamente, o chamado eixo Itaquí-Bacanga se desenvolve na direção leste-oeste, iniciando-se na barragem do rio Bacanga e indo até o porto de Itaquí. É servido pela BR 135, que o divide em dois setores: norte e sul. No setor norte localizam-se, principalmente: o Quartel de Corpo de Bombeiros, os bairros de Vila Bacanga, Vila Izabel, Anjo da Guarda, Mauro Fecury I e II, Vila São Luís, Vila Ariri, Vila Nova, Ponta do Bonfim, Gancharia, Residencial Ana Jansen, Tamancão, Escritório da Companhia Vale Rio Doce – CVRD, Ponta de Espera, Porto Ponta da Madeira e Porto de Itaquí. No setor sul tem-se, principalmente: o Campus da Universidade Federal do Maranhão, os bairros de Sá Viana, Vila Jambreiro, Vila Embratel, Residencial Paraíso, Residencial Resende, Argola e Tambor I e II, Pátio de Minério e Terminal Ferroviário da CVRD.

Próximo ao Porto de Itaquí, na Avenida dos Portugueses, existe um trevo com um ramal rodoviário na direção Norte-Sul, até o entroncamento com a BR 135/316 no povoado de Pedrinhas.

2.1 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

O processo de ocupação da área Itaquí-Bacanga deu-se, prioritariamente, a partir da construção da barragem no rio Bacanga, no final da década de 1960, que possibilitou a ligação da área central da cidade com o porto do Itaquí. Criava-se desta forma um novo eixo de crescimento populacional.

Inicialmente, no local havia apenas a vila Anjo da Guarda, porém com a construção do Campus da Universidade Federal do Maranhão - UFMA e da Escola de

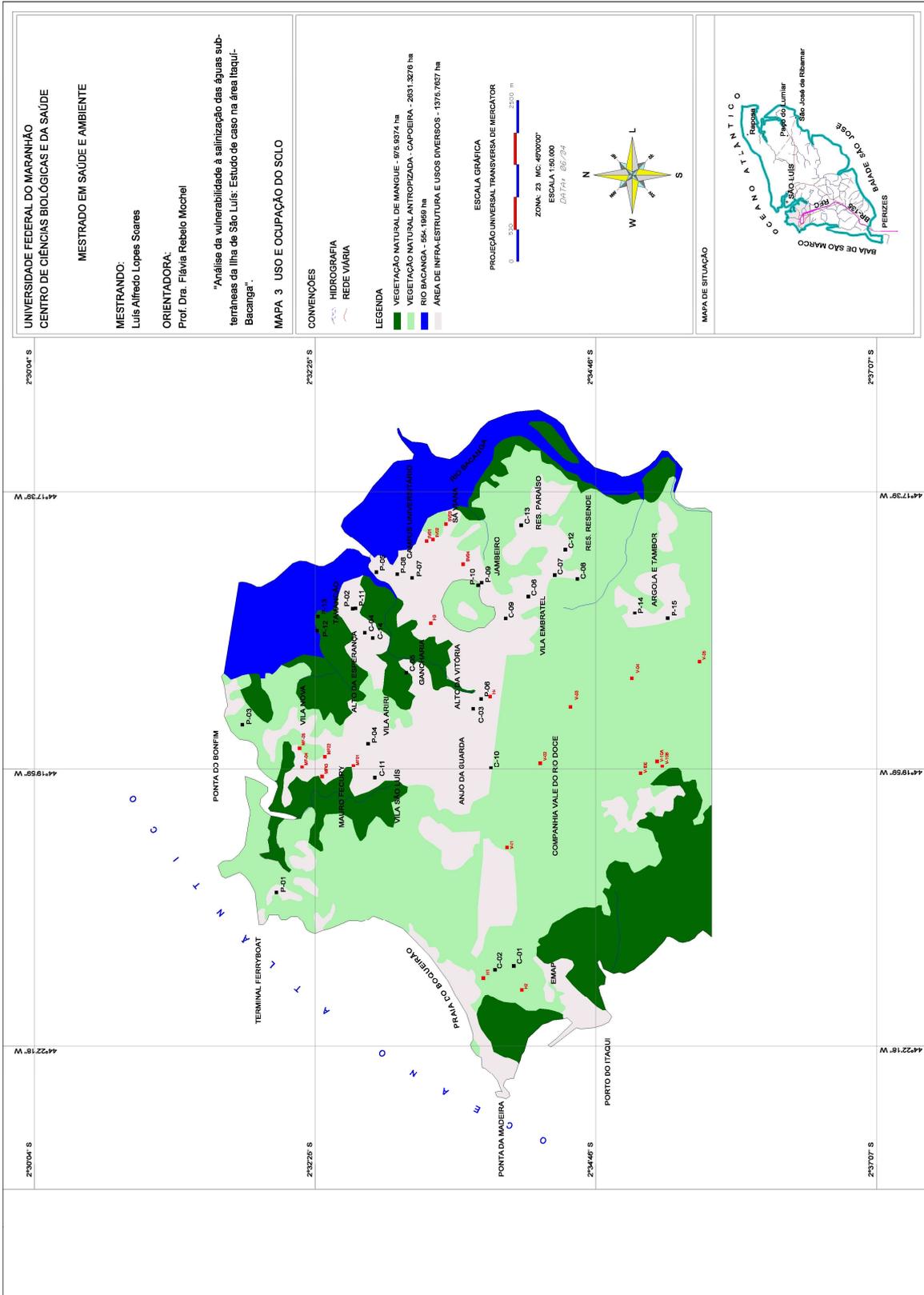
Engenharia do Maranhão, ocorreram as primeiras ocupações, como: Sá Viana I e II, Vila Embratel e outras. Em seguida, e principalmente com a implantação do Complexo da Companhia Vale do Rio Doce – CVRD, a migração para a área intensificou-se, surgindo adjacente ao bairro do Anjo da Guarda novos povoados, como: Vilas Mauro Fecury I e II, Fumacê, Vila Nova, dentre outros (Mapa 3).

Segundo o relatório de Maranhão (1998a), a expropriação de uma grande população esparsa que habitava o oeste da ilha, para efeito de ocupação da área pelo Consórcio Alumar, trouxe também um grande contingente de pessoas que além de aumentar as áreas palafitadas deu origem à outras grandes ocupações bem próximas ao centro urbano, surgindo bairros desordenados, sem nenhuma infra-estrutura, sem saneamento e sem planejamento urbano. Dentre esses, destacam-se o Anjo da Guarda, Vila Nova, Vila Embratel, Vila Bacanga (este surgiu em cima de um lixeiro público, em frente ao Campus da UFMA, à margem direita da Avenida dos Portugueses, cujo primeiro nome foi Lixeiro), Sá Viana I e Sá Viana II, todos a menos de trinta minutos de ônibus para o centro da cidade.

No período de 1970-91, São Luís registra um incremento populacional significativo de 162%, tendo a população aumentada de 265.000 em 1971, para próximo de 700.000 habitantes em 1991. Esse crescimento demográfico foi resultado da implantação do Programa Grande Carajás bem como da construção da Estrada de Ferro Carajás, da ALUMAR, do Terminal Pesqueiro, do porto do Itaquí, além da criação do Distrito Industrial.

Dentre as categorias de uso e ocupação do solo, adotadas segundo o conceito de função e forma preconizadas por Maranhão (1998a), destacam-se:

- a) Área urbanizada



Mapa 3 - Uso e Ocupação do Solo

Corresponde àquelas que possibilitam uma melhor representação da intensidade da ocupação do espaço, como os usos residenciais padronizados ou áreas residenciais consolidadas, bem como aquelas em que se destacam atividades terciárias. Estas se desenvolvem principalmente ao longo das Avenidas principais como: Avenida dos Portugueses, Avenida Sarney Filho na Vila Embratel e Avenida Dom Luís no Anjo da Guarda. No Itaquí-Bacanga a área urbanizada e usos diversos ocupam um total de 1.375,76 ha.

b) Restrita à ocupação

A categoria de usos restritos à ocupação corresponde aos tipos de cobertura da terra que promovam ou harmonizem o equilíbrio do ambiente com a qualidade de vida, e que tenham seus usos definidos e regulamentados como: os manguezais e matas galeria. Na área de estudo os manguezais ocupam 975,94 ha.

c) Jurisdicional

Nessa categoria situa-se o Distrito Industrial, jurisdicionado através do Decreto Federal nº 66.227/70 e Lei Estadual nº 3589/74 (área Itaquí-Bacanga).

d) Ocupação desordenada

Correspondem às áreas ocupadas de maneira irregular revelando os conflitos pela posse e uso do solo. Essas ocupações se particularizam pela ausência de regularidade no traçado das vias de acesso e de um mínimo de ordenamento, bem como, pela ausência e/ou deficiência de equipamentos urbanos básicos. Inicialmente, apresentam um aspecto subumano como o da Fotografia 1, entretanto, quando essas áreas passam a dispor de infra-estrutura (água, energia, transporte coletivo, etc.) o padrão de construção melhora, caracterizando o processo de consolidação e o caráter de bairro. A ocupação da área de estudo se deu praticamente em sua totalidade desse modo.



Fotografia 1 - Aspecto de uma moradia de ocupação desordenada na área Itaqui-Bacanga

A cidade de São Luís não possui tradição em planejamento territorial, visto o primeiro plano diretor datar de 1974 e o segundo de 1992. Esperou-se, portanto, 18 anos para se implementarem políticas urbanas em uma cidade, que é capital estadual, e cujo crescimento urbano, impulsionado pelo desenvolvimento econômico, se intensificou a partir de 1980.

e) Turismo

Como opção de turismo nessa área destacam-se principalmente as praias do Bonfim (Fotografia 2), da Guia e do Boqueirão, sendo que esta última se localiza em área da CVRD.

f) Expansão

Destaca-se a área reservada para expansão das atividades da CVRD, que possui grande importância por se encontrar, atualmente, preservada e livre de atividades antrópicas, além de representar uma área importante para recarga de águas subterrâneas.



Fotografia 2 - Vista parcial da praia do Bonfim em São Luís, na área Itaquí – Bacanga

g) Água

Esta categoria relaciona-se aos tipos de ocupação estabelecida, em que se reserva a lâmina d'água. Na área destaca-se a Barragem do Bacanga (Fotografia 3), com um total de 554,20 ha, e as lagoas da CVRD.



Fotografia 3 - Vista da Barragem do Bacanga em São Luís

h) Pontos Notáveis

Na área de estudo assinalam-se os seguintes pontos notáveis: Terminal de Ferry boat (Fotografia 4), Terminal Ferroviário (CVRD), Pátio de Estocagem de Minério de Ferro (CVRD), Terminal da Marinha e os Portos de Ponta da Madeira e do Itaqui.



Fotografia 4 - Vista parcial do Terminal de Ferry boat na Ponta de Espera no Porto do Itaqui

2.2 CLIMA

O clima predominante na área de estudo é do tipo tropical semi-úmido, de zona equatorial, caracterizada por uma estação úmida, marcada por chuvas intensas durante quatro a cinco meses no ano, com temperatura média anual em torno de 26°C.

A Tabela 1 apresenta os valores médios mensais e anuais, registrados na Praia do Boqueirão (com registro contínuo desde 1985) no período de 1985 a 2002. A pluviometria anual tem variado entre 1.332,6 mm (obtido em 1992, ano muito seco) e 3.118,4 mm (obtido em 1986, ano muito chuvoso), com precipitação média anual de 2.122,3 mm, correspondendo os meses mais secos ao período de setembro a novembro e os mais chuvosos de março a maio. A evaporação potencial anual registrada no mesmo período apresenta variação entre

1.379,8 mm (obtido no ano de 1991) e 2.204,8 mm (obtido no ano de 1987), com um valor médio anual de 1.767,4 mm.

Tabela 1 - Pluviometria e Evaporação registrada na Estação da Praia do Boqueirão, no período de 1985 a 2002

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
Pluviometria													
Mínimo	58,3	46,6	304,3	83,3	68,2	32,8	35,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1332,6
Máximo	1175,9	390,5	961,4	650,2	576,1	315,4	264	123,8	52,2	100,0	80,5	452,9	3118,4
Médio	265,0	240,4	464,5	378,6	311,2	191,7	141,6	45,2	12,3	16,3	9,6	111,6	2122,3
Evaporação													
Mínimo	71,5	78,4	78,2	63,7	49,8	74,3	92,5	133,2	158,8	161,6	122,5	120,9	1379,8
Máximo	229,8	197,3	124,5	151,5	183,3	175,0	198,1	237,5	260,6	280,0	296,2	266,9	2204,8
Médio	137,5	115,9	99,8	88,0	107,0	118,0	138,5	175,4	201,1	213,6	200,2	189,0	1767,4

Fonte: Raimundo Júnior et al. (2003).

2.3 RELEVO E VEGETAÇÃO

O relevo é constituído pelas planícies aluviais, que são inundáveis pelas marés altas, e as áreas mais elevadas com relevo bastante ondulado e altitudes que variam de alguns metros até 40 metros. Segundo Sudene (1972), esta superfície é freqüentemente recoberta de formações lateríticas, constituída de amêndoas de limonita de tamanhos variáveis. Esse tipo de relevo é, de certa forma, extremamente arrasado pelos agentes erosivos, com os elementos da rede hidrográfica entalhando profundos grotões que descem rapidamente aos níveis dos planos inundáveis e igarapés (ver Fotografia 5).

A cobertura vegetal é do tipo floresta de transição entre equatorial e cerrados, ocupando as áreas elevadas. Esse tipo de vegetação cobre a maior parte da área. Nos vales e ao longo da drenagem desenvolvem-se mata galeria, com os mangues dominando o ambiente costeiro flúvio-marinho.



Fotografia 5 - Vista parcial do estuário do Igarapé Itapecuraíba no Porto da Vovó, próximo à Barragem do Bacanga

2.4 GEOLOGIA

Na ilha de São Luís ocorrem rochas sedimentares e sedimentos pertencentes à bacia marginal cretácica de São Luís. Esta bacia, assim como a de Barreirinhas, foi implantada no extremo norte da bacia do Parnaíba, como resultado de esforços tectônicos de grande magnitude, que atingiram a plataforma brasileira no final do Cretáceo.

A porção continental e insular da bacia de São Luís, onde se insere a ilha de São Luís, compreende uma área de 33.000 km², onde foram acumulados cerca de 4.500 metros de espessura de sedimentos, dos quais 2.500 metros correspondem a sedimentos do Cretáceo, Terciário e Quaternário. Mesner e Wooldrigne (1984) *apud* Rodrigues (1994), referem-se a uma sedimentação tipicamente deltaica e continental na bacia de São Luís.

As rochas cretácicas são atribuídas à Formação Itapecuru, constituindo o substrato consistente da ilha de São Luís e ilhas vizinhas, assim como da porção continental a oeste do

rio Mearim. A Formação Itapecuru repousa concordantemente sobre outra unidade do Cretáceo, a Formação Codó, e também sobre sedimentos mais antigos, e sobre o embasamento Cristalino, mas tal contato só é observável na porção continental da bacia.

O contato superior é discordante com os sedimentos do Terciário, sendo observável em pontos restritos das ilhas citadas. Na área em estudo, ocorrem afloramentos desse contato na base das falésias do Bonfim e Itaquí, em situação de maré baixa (Fotografia 6).



Fotografia 6 - Afloramento do contato Terciário/Cretáceo, na Ponta do Bonfim

Os litotipos associados à Formação Itapecuru são siltitos vermelhos, ocre e esbranquiçados, contendo intercalações de arenito fino a muito fino, bem selecionado; argilitos e folhelhos vermelhos, com intercalações de arenitos cinza, muito fino e argilas carbonáticas. É destacada uma camada característica de calcário e dolomito argilosos, isenta de sílica, creme esbranquiçado a acinzentada, sendo tal camada um guia estratigráfico importante para o conhecimento do final da sedimentação do Cretáceo na zona costeira atual.

Os sedimentos do Terciário, segundo Rodrigues (1994), são sobrepostos discordantemente sobre a sequência anterior. Os litotipos integrantes da base da estratificação

terciária são siltitos e argilitos róseo-avermelhados e esbranquiçados, contendo intercalações de arenitos finos a médios, brancos a róseos. O autor destaca a expressiva caulinição e laterização sofrida por tais rochas sedimentares, e reconhece um estágio mais recente de sedimentação terciária, de natureza areno-argilosa, às vezes conglomerática, de coloração róseo-avermelhado a amarelado, bastante ferruginosa, que é atribuída à Formação Barreiras.

A seqüência do terciário constitui-se no pacote sedimentar mais importante aos objetivos deste trabalho, considerando que tal seqüência contém as camadas aquíferas produtoras de água subterrânea na área de trabalho.

A sedimentação recente (Haloceno) é caracterizada por material arenoso inconsolidado e argilas não adensadas, que preenchem os baixos topográficos. Também são considerados de idade halocênica as areias de praias da orla marítima da área.

2.5 HIDROLOGIA

A área Itaquí-Bacanga forma um ístimo constituído do vale do Rio Bacanga a leste e da Baía de São Marcos a oeste.

A drenagem da área de estudo é constituída principalmente pela bacia do rio Bacanga com seus afluentes, onde se destacam os igarapés Anjo da Guarda, o Tamancão, o Itapecuráiba, o Voadeira. Pela costa oeste observam-se pequenas bacias formando uma série de igarapés, onde se destacam o Arapopai, Pindoba e Buenos Aires, tendo como divisor de águas uma linha de altos topográficos formados no sentido norte-sul.

Sudene (1972) relata que esses cursos d'água e estuários são profundamente entalhados nos sedimentos areno-argilosos, de forma que a passagem do relevo mais elevado aos igarapés é quase sempre brusca, formando encostas íngremes. A passagem na orla marítima, também se faz de maneira quase sempre brusca.

2.6 HIDROGEOLOGIA

A ilha de São Luís como um todo, excluindo as áreas de mangue e as praias onde se encontram depósitos recente são capeadas por sedimentos terciários do grupo Barreiras. A espessura deste capeamento terciário, bem como a granulometria dos sedimentos que o constitui, são extremamente variáveis nos diversos pontos da ilha. De maneira geral pode-se dizer que os mesmos repousam discordantemente sobre o cretáceo e aumentam de espessura de norte para sul e de oeste para leste (CVRD, 1983).

Na área do Itaquí essa variação de espessura é bem marcante, onde na extremidade oeste os sedimentos terciários desaparecem totalmente, dando lugar ao afloramento do leito chave de calcário que separa o terciário do cretáceo.

Deste modo, no Itaquí a geologia é representada por sedimentos predominantemente argilosos do terciário que repousam discordantemente sobre o cretáceo, apresentando uma espessura que varia de praticamente zero, na borda oeste (próximo ao porto do Itaquí), até algumas dezenas de metros, nas extremidades leste e sul desta área (CVRD, 1983).

O modelo hidrogeológico elaborado para a ilha de São Luís pela empresa pernambucana Aqua-Plan, no início da década de 1970, relata que na área em estudo, foram identificados um sistema aquífero livre, relacionado aos sedimentos terciários, e um aquífero subjacente semiconfinado relacionado aos sedimentos cretáceos (SUDENE, 1972).

Segundo Sudene (1972) o sistema livre é constituído pelos níveis mais arenosos dos depósitos terciários. A extrema heterogeneidade destes depósitos faz com que pequenas fontes apareçam, em diferentes níveis, ao longo das encostas dos grotões profundos escavados pelos riachos (Fotografia 7). O comportamento da superfície topográfica torna inviável a exploração racional das águas armazenadas neste sistema, tendo em vista as profundidades em que se encontram.



Fotografia 7 - Grotão no bairro Gancharia na área Itaquí – Bacanga

Com relação ao aquífero confinado (cretáceo) vários autores deixam claro que a camada confinante superior tem uma sequência cíclica de níveis de composição variável entre argila e areia, e admitem a realimentação do aquífero a partir da infiltração das águas pluviais, com percolação através das camadas mais permeáveis superiores. Nesse contexto, esse aquífero poderá ser considerado então como semiconfinado (COSTA, 2003).

A base desse aquífero semiconfinado é uma espessa camada argilosa, com 100 metros de espessura, em média, que seria uma barreira impermeável contra ascensão da interface, visto que a água salgada satura o estrato arenoso do cretáceo localizado abaixo da camada de argila (COSTA, 2003).

Sudene (1972) relata a esse respeito a necessidade de se ajustar os valores das descargas com a recarga evitando assim uma diminuição da superfície piezométrica abaixo do nível do mar, nas áreas onde possa existir conexão da água marinha com o aquífero, possibilitando a contaminação do sistema. Esse fator se torna, portanto, uma limitação à exploração das águas subterrânea nesse aquífero.

3 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

3.1 ABORDAGEM TEÓRICA NOS ESTUDOS DE CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

As águas subterrâneas constituem uma porção do sistema circulatório de água na Terra. O seu aproveitamento data de tempos antigos e sua evolução tem acompanhado a própria evolução da humanidade.

As águas subterrâneas representam um pouco mais de 97% de toda a água doce disponível na Terra, enquanto que as águas superficiais (rios, represas e lagos) respondem por menos de 3%.

3.1.1 Conceitos e usos da água subterrânea

Embora toda a água situada abaixo da superfície da Terra seja evidentemente subterrânea entende-se por água subterrânea em hidrogeologia, à água que circula na zona saturada, isto é, na zona situada abaixo da superfície freática. Enquanto que se denomina aquífero, a uma formação geológica que contém água e permite que quantidades significativas dessa água se movimentem no seu interior, em condições naturais.

Feitosa e Filho (1997) citam os dados da UNESCO referentes ao período de 1970 a 1995, quando foram perfurados no mundo cerca de 300 milhões de poços. Essas obras fornecem água subterrânea para o abastecimento de mais de 50% da população do planeta, e para a irrigação de, aproximadamente, 90 milhões de hectares.

No Brasil a falta de controle na utilização da água subterrânea não permite fazer estimativas sem erros significativos. Mesmo assim, os dados disponíveis IBGE (1991) apud

Rebouças (1992) revelam que 61% da população brasileira é abastecida com água subterrânea, sendo 43% através de poços tubulares, 12% por fontes ou nascentes e 6% por poços escavados. Nas regiões Sul e Sudeste, 90% das cidades do Paraná e Rio Grande do Sul e 76% das cidades do estado de São Paulo, são abastecidos por poços. No Nordeste, cidades importantes como Maceió, Recife, Olinda, Natal e Mossoró têm seu abastecimento público, em parcelas significativas, fornecidas por poços (REBOUÇAS, 1992).

No Brasil, as águas subterrâneas ocupam diferentes tipos de reservatórios, desde as zonas fraturadas do embasamento cristalino até os depósitos sedimentares cenozóicos. Dessa diversificação, resultaram sistemas aquíferos que, pelo seu comportamento, podem ser reunidos em: sistemas porosos (rochas sedimentares) correspondendo a 42,0% do território nacional; b) sistemas fissurados (rochas cristalinas) correspondendo a 53,8% ; c) sistemas cársticos (rochas carbonáticas com fraturas e outras descontinuidades submetidas a processos de dissolução cárstica) (LEAL, 1999).

O Brasil possui importantes reservas de água subterrânea, ocorrendo principalmente nos aquíferos de rochas sedimentares. Dentre elas e por ordem as mais importantes são: Bacia sedimentar Paraná, com volumes estocados de 50.400 km³, a Bacia sedimentar Amazonas com 32.500 km³ e Bacia sedimentar do Maranhão (Parnaíba) com 17.500 km³ (LEAL, 1999).

Estima-se em mais de 200.000 o número de poços tubulares em atividade no Brasil, utilizados para diversos fins, como irrigação, abastecimento industrial, pecuária etc. O maior volume de água ainda é, todavia, destinado ao abastecimento público.

Do mesmo modo que em todo o Brasil, o Maranhão também possui um importante potencial hídrico subterrâneo. A Bacia do Maranhão, também chamada de Bacia do Parnaíba, Bacia do Meio-Norte ou Bacia do Piauí-Maranhão, é a mais rica do Nordeste. Possui uma área de cerca de 550.000 km² abrangendo a quase totalidade dos estados do

Maranhão e Piauí, e partes do Pará, Tocantins e Ceará. No Maranhão os aquíferos mais explorados são Corda-Motuca, Codó e Itapecuru.

Ao longo do litoral nordestino desenvolve-se a província costeira, desde o extremo norte do Maranhão até a Bahia. A ilha de São Luís ocupa a sub-província Costeira São Luís, com área de 30.000 km², e potencial hídrico da ordem de 2.800,00 x 10⁶ m³/ano (COSTA, 1997 apud LEAL, 1999).

Um levantamento feito por Vale (1997) para o Primeiro Fórum de Debates em São Luís, realizado em 1997, apresentou os seguintes resultados:

- a) A água subterrânea explorada atende a demanda de água de 1.674.000 habitantes dos centros urbanos do estado do Maranhão, correspondendo a 31,74% da sua população.
- b) A água subterrânea contribui com 35% da água fornecida em São Luís e que esse percentual sobe para 75% no interior do Estado.
- c) A ocorrência no Estado de 2.506 poços e em São Luís de 390 poços perfurados.

É citado por Vale (1997), ainda no documento apresentado ao Fórum, que 35,71% dos poços existentes não tiveram nenhum acompanhamento técnico por parte dos órgãos oficiais. Na Capital, esse percentual aumenta para 44,64%, o que é bastante preocupante visto que, atualmente, já foram evidenciados sinais de poluição e salinização das águas subterrâneas na ilha de São Luís.

Costa (2003) e Luz (2003) efetuaram análises hidrogeológicas na ilha de São Luís, tendo o primeiro estudado a região Oeste da Ilha e o segundo a região Leste. Para elaboração de suas pesquisas realizam detalhado inventário da água subterrânea nestas áreas, tendo sido catalogados no total 276 poços. Sabe-se, entretanto que esse número é muitas vezes maior.

Desta maneira, comparando-se apenas os dois levantamentos disponíveis (um que apresenta 390 poços e outro com 276) nota-se que, infelizmente, não existe nenhum controle sobre a locação e perfuração de poços tubulares no âmbito da ilha de São Luís, principalmente no tocante aos particulares, o que sugere que o número de poços existentes seja realmente muitas vezes o valor levantado.

3.1.2 Contaminação das águas subterrâneas

A falta de controle sobre as perfurações de poços tubulares por parte dos órgãos responsáveis coloca em risco eminente as águas subterrâneas, tanto pela ótica da quantidade quanto de sua qualidade. Pelo aspecto quantitativo temos o risco da super exploração de aquíferos, situação em que a quantidade de água retirada é superior a de recarga, o que em um primeiro momento causa a exaustão do aquífero com reduções contínuas de vazão até a perda total do mesmo, em seguida, estando o aquífero localizado em áreas costeiras, a super exploração poderá acarretar intrusão salina, que é a penetração da água do mar nos aquíferos continentais adjacentes, ocorrendo salinização e conseqüente perda de sua utilização.

Quanto ao aspecto qualitativo, a não observância das normas técnicas (ABNT NBR 12.212/1992 – Projeto de poço para captação de água subterrânea e NBR 12.244/1992 – Construção de poço para captação de água subterrânea), bem como o desconhecimento das condições hidrogeológicas da área de perfuração por parte de alguns perfuradores, pode levar, de diversas maneiras, à contaminação do aquífero explorado, podendo também ocorrer a salinização da água quando se tratar de aquífero em área costeira.

Devido à interdependência entre a qualidade da água subterrânea e o processo de urbanização, Ross (1981), relata que a água subterrânea na Região Metropolitana de São Paulo, no período de 1959 a 1975, já se encontrava comprometida tanto nos poços rasos,

como nas nascentes que aproveitam águas do lençol freático, tendo em vista que foram genericamente atingidas pela contaminação fecal e pela amônia transmitidas através de fossas sépticas. Já os poços artesianos e semi-artesianos, aproveitando águas de lençóis profundos ou confinados, apresentavam ainda melhor qualidade da água que os poços comuns.

Outras formas de contaminação das águas subterrâneas, além das geradas por poços construídos com deficiência técnica, são as provenientes, sobretudo, dos rejeitos industriais, dos esgotos domésticos, do lixo urbano, de águas superficiais poluídas, de mineração, dos postos de gasolina e de cemitérios.

Uma questão importante que precisa ser abordada, diz respeito aos usuários que utilizam a água subterrânea para o seu abastecimento doméstico. Quando se está usando água de uma concessionária, ela é a responsável pelo controle de qualidade das águas distribuídas, no entanto, quando o usuário é o dono do poço esse problema passa a ser dele. Muitos deles não possuem nenhum conhecimento dos parâmetros necessários para assegurar a potabilidade das águas. Esse problema é comum e bastante grave nos grandes centros urbanos, onde hoje, as grandes ameaças são os solventes clorados, extremamente tóxicos em concentrações de alguns poucos mg/L, e os metais pesados tais como o cromo, zinco, chumbo, cádmio, mercúrio (HIRATA, 2003).

Com relação às limitações quanto à qualidade da água, Maranhão (1998a) relata que nas áreas urbanas da ilha de São Luís, é notório o efeito da superimposição de alterações das condições naturais e da exploração exagerada da água subterrânea, ocorrendo os seguintes fatores:

- rebaixamento dinamicamente crescente dos níveis piezométricos conduzindo à exaustão dos aquíferos;
- abundância de vetores e agentes de contaminação e poluição, devido à infiltração de esgotos;

- disposição inadequada de resíduos sólidos (lixões, aterros sanitários e industriais, etc.).

Algumas indústrias exploram as reservas de água subterrânea de forma quase sempre predatória, com a extração desordenada, sem obedecer à recarga natural, consumindo as reservas geológicas em curto prazo.

Nas áreas rurais da ilha de São Luís, embora a agricultura seja pouco expressiva, a utilização crescente de agrotóxicos tem acelerado significativamente a poluição nos aquíferos, devido às suas características sedimentares.

As áreas costeiras são em muitos casos densamente urbanizadas, o que tem como reflexo uma crescente procura de água para abastecimento público. A exploração intensiva e irracional dos aquíferos costeiros provoca uma descida do nível piezométrico relativamente ao nível inicial, caso não haja uma compensação desse rebaixamento, por recarga natural ou artificial, pode desenvolver-se então o fenômeno de intrusão salina. A intensa exploração dos aquíferos resulta, na maioria dos casos, da inexistência de controle sobre o volume das extrações efetuadas e da falta de ordenamento das captações, conduzindo em casos extremos a situações de ruptura do equilíbrio água doce/água salgada, cujas consequências poderão ser dramáticas. O avanço da interface água doce/água salgada é, pois, uma consequência lógica dessas situações. A principal repercussão deste avanço traduz-se por um aumento do teor de cloretos nas águas captadas em poços em bombeamento, podendo ocorrer a contaminação generalizada do aquífero.

Portanto, das formas citadas de contaminação das águas subterrâneas, a salinização de poços localizados em aquíferos costeiros apresenta particular interesse de estudos, se considerarmos que o Brasil possui uma extensa faixa costeira, e que sua ocorrência implica na perda irreversível de sua qualidade.

De acordo com a Portaria nº 518, de 25 de março de 2004 do Ministério da Saúde, Brasil (2004) que estabelece os Padrões de Potabilidade da Água para abastecimento público, o VMP¹ de aceitação para consumo humano de cloreto é de 250 mg/L.

A Resolução nº 20/86 do CONAMA, de 18 de julho de 1986, estabelece a classificação das águas (doces, salinas e salobras) do território nacional em nove classes distintas, e para cada uma delas são estabelecidos limites e, ou, condições, em função de sua destinação final, ou segundo seus usos preponderantes. Em seu Art. 2º, define:

- águas doces: águas com salinidade igual ou inferior a 0,50 UPS²;
- águas salobras: águas com salinidade igual ou maior que 0,50 UPS e inferior a 30 UPS;
- águas salinas: águas com salinidade igual ou superior a 30 UPS.

3.1.3 Água subterrânea e seus constituintes químicos

A água é uma substância quimicamente muito ativa e que tem grande facilidade de dissolver e reagir com outras substâncias orgânicas ou inorgânicas. Sua efetividade na dissolução de sais deve-se à elevada constante dielétrica e porque suas moléculas tendem a combinar-se com íons para formar íons hidratados. Os cátions ligam-se aos terminais negativos da molécula polarizada da água, e reúnem diversas moléculas em um arranjo relativamente estável. O número dessas moléculas de água atadas a um cátion depende do tamanho do cátion. Cátions pequenos como o Be^{+2} forma o íon hidratado $\text{Be}(\text{H}_2\text{O})_4^{+2}$. Os cátions grandes como o Mg^{+2} ou Al^{+2} têm formas hidratadas como $\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})_6^{+2}$ e $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$ (FREEZE e CHERRY, 1979).

¹ VMP – Valor Máximo Permitido.

² UPS – Unidade Padrão de Salinidade.

Os ânions têm uma tendência menor à hidratação. Nesse caso, os ânions atraem os terminais positivos das moléculas de água. O tamanho dos íons em suas formas hidratadas é importante para muitos processos que ocorrem no ambiente da água subterrânea.

Como resultado das interações químicas e bioquímicas, entre a água subterrânea e as rochas percoladas, e ainda, devido às contribuições da atmosfera e da água superficial, as águas subterrâneas contêm uma grande variedade de constituintes inorgânicos dissolvidos. A concentração de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), é invariavelmente de substâncias inorgânicas, com reduzida participação de matéria orgânica.

A água subterrânea pode, portanto, ser vista como uma solução eletrolítica porque quase todos os seus maiores e menores constituintes dissolvidos estão presentes na forma iônica. Os constituintes principais em sua forma iônica são Na^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{-2} , com mais de 90% do total de sólidos dissolvidos na água.

As concentrações dos constituintes inorgânicos secundários e traços são controlados pela disponibilidade dos elementos nos solos e nas rochas percoladas pelo fluxo da água, através de processos geoquímicos, tais como, solubilidade e adsorção, e pela sequência de contato da água com os vários minerais ocorrentes ao longo do fluxo.

As atividades humanas, entretanto, estão cada vez mais influenciando as concentrações dos constituintes inorgânicos, de modo que, os elementos listados como secundários ou traços passam a ocorrer como contaminantes, em níveis bem acima dos constituintes normais.

As substâncias orgânicas de origem natural, como por exemplo, os ácidos húmicos e fúlvicos, são os principais constituintes dissolvidos na água subterrânea, e embora ocorram em baixa concentração estão bem disseminados.

Os gases dissolvidos mais abundantes são N_2 , O_2 , CO_2 , CH_4 , H_2S e N_2O . Os três primeiros constituem a atmosfera da terra sendo, portanto, natural que estejam presentes na

água de subsuperfície. Gases como o CH₄, H₂S e N₂O podem ocorrer em grandes concentrações, pois são produtos de processos biogeoquímicos ocorrentes em zonas não aeradas de subsuperfície.

3.1.4 Usos da água subterrânea na área de estudo

A área Itaquí – Bacanga teve o seu crescimento urbanístico desenvolvido de forma totalmente aleatória, ao longo da Avenida dos Portugueses (BR 135). As invasões iniciais foram se incorporando ao cenário urbano local, e se transformando em bairros e vilas trazendo consigo toda a demanda por serviços públicos. Destes, sem dúvida, o saneamento básico aparece como o mais importante, pois se relaciona diretamente com a saúde da população.

Inicialmente, os núcleos habitacionais, organizações privadas e particulares, e as instalações industriais, eram abastecidos de água através de captações em manancial subterrâneo, como poços tubulares profundos, ou poços rasos tipo cacimba. O abastecimento público, de responsabilidade da CAEMA, utilizava poços tubulares instalados próximos aos bairros consumidores, e a distribuição era feita através de redes de canalizações com ligações prediais independentes, ou centralizada em chafarizes com torneiras públicas. O abastecimento doméstico era complementado por poços comunitários, patrocinados por Associações ou Organizações Não-Governamentais.

A área Itaquí – Bacanga abriga além de instalações portuárias, uma Universidade, Corporações do Exército, da Marinha e de Bombeiros além de indústrias, sendo a mais importante o complexo industrial da Companhia Vale do Rio Doce. A ausência de mananciais de superfície na área condicionou o abastecimento de água dessas instalações à captação através de poços tubulares.

O aumento da população determinou um acréscimo na demanda de água e a consequente necessidade de perfuração de novos poços. A construção destes, somados aos já existentes na área, gerou em determinadas localidades, um aumento na salinidade da água. A ingestão de água com teores elevados de cloreto de sódio, além dos problemas de saúde que o relacionam com o aumento na pressão arterial, apresenta um sabor desagradável sendo na maioria das vezes rejeitadas pelos usuários.

Deste modo, com o agravamento da situação, e a baixa produção dos poços na área, a CAEMA promoveu a substituição paulatina do uso dos poços tubulares profundos, passando a abastecer alguns setores com o Sistema Italuís a partir de 1989. Essa política favoreceu a população, que passou a contar com água de melhor qualidade. O porto do Itaquí e área do entorno, por exemplo, que sofrem há mais tempo com problemas de salinização, passou a ser abastecido, também pelo Sistema Italuís, através de uma adutora com 9,4 km de extensão em PVC, com diâmetro de 300 mm, a partir do reservatório do bairro Anjo da Guarda.

Atualmente o abastecimento de água na área Itaquí - Bacanga é feito na quase totalidade pelo Sistema Italuís. Esse sistema na área compõe-se de dois reservatórios, um no bairro do Anjo da Guarda (R-12) e outro na Vila Embratel (R-17) que são responsáveis pela distribuição de água tratada para suas respectivas áreas de influência. O volume mensal³ distribuído pelo reservatório R-12 (Fotografia 8) é de aproximadamente 323.000 m³/mês, enquanto que o reservatório R-17 distribui 277.000 m³/mês, totalizando 600.000 m³/mês, ou 85,7% do total.

³ Valor aproximado fornecido pela CAEMA.



Fotografia 8 - Reservatório R -12 da CAEMA, no bairro do Anjo da Guarda

O sistema de poços responde ainda por uma demanda em torno de 100.000 m³/mês, ou 14,3%. Esses valores correspondem à operação de 14 poços, com uma produção individual média aproximada de 10 m³/h.

A Companhia Vale do Rio Doce para atender a demanda de seu parque industrial opera atualmente com uma bateria de 13 poços, com uma produção mensal em torno de 85.000 m³ e uma vazão individual de 9,0 m³/h.

Entretanto o grande problema no abastecimento de água na área são os poços rasos, utilizados pelos moradores de mais baixa renda, que ocupam áreas favelizadas nas periferias dos pólos habitacionais. Segundo Macedo (2002), essas populações buscam suprir sua demanda, com o consumo de água obtida em poços rasos tipo cacimba (Fotografia 9), cuja profundidade são inferiores a 15 metros. São poços bastante vulneráveis à poluição e contaminação por águas de infiltração e de escoamento superficial, estando quase todos instalados em locais impróprios e insustentáveis por conflitos de uso e ocupação do solo,

servindo, portanto de focos potenciais e pontuais na propagação de doenças de veiculação hídrica.



Fotografia 9 - Poço raso, tipo cacimba, utilizado por moradores da Vila Jembeiro

Esse problema é minimizado em alguns setores, pela atuação de Organizações Não-Governamentais (ONG), como é o caso da Plan Internacional que vem atuando em comunidades da área Itaquí - Bacanga, como Riacho Doce, Zagueiro e Residencial Paraíso, no sub-pólo Vila Embratel, e no Residencial Primavera, S. J. da Boa Vista e Gapara no sub-pólo Argola e Tambor. Essa participação envolve a perfuração de poços tubulares e elaboração de projetos para implantação e/ou melhorias no sistema de abastecimento de água, e implantação de sistemas de esgotamento sanitário, individuais ou coletivos (MACEDO, 2002).

Alguns estudos efetuados na área abordam sobre a qualidade das águas subterrâneas, como o de Coutinho (2002), que efetuou uma pesquisa para avaliar a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos na bacia do rio Bacanga. Foram amostrados sete poços, sendo que três deles na área Itaquí – Bacanga, mais precisamente na Vila Embratel (poço tubular profundo), Residencial Resende (idem) e Sá Viana (uma nascente). Os parâmetros

analisados foram: temperatura, turbidez, pH, condutividade elétrica, alcalinidade, nitrogênio total, fósforo total, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), coliformes totais e fecais. Foram coletados quatro amostras em cada poço, nos meses de maio, agosto, setembro e outubro.

O estudo apresentou resultados expressivos para a nascente do Sá Viana, quanto ao índice de coliformes, tendo sido encontrados valores que variaram entre 340 e 1100 (NMP/100 ml) de coliformes fecais. Esses valores classificam essa água como imprópria para o consumo por se encontrar fora dos Padrões de Potabilidade para uso doméstico (Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde). Os resultados dos poços da Vila Embratel e Residencial Resende apresentaram valores mais elevados nos parâmetros condutividade elétrica e pH, em relação a nascente do Sá Viana, esses valores eram esperados considerando que os dois primeiros são poços tubulares profundos onde existe uma maior interação água/rocha, enquanto que a nascente representa uma descarga do aquífero livre na área.

Miranda (2002) efetuou análises físico-químicas nos mesmos pontos do estudo anterior, acrescentando os parâmetros cloreto e dureza. Os resultados apresentaram valores similares quanto à condutividade elétrica e pH nos poços da Vila Embratel, Residencial Resende e na nascente do Sá Viana. Quanto à dureza, estes pontos mostraram valores elevados variando de 50 a 400 mg/L em CaCO_3 , enquanto que para cloreto os valores foram inferiores a 0,5 mg/L em Cl⁻.

Mesmo com todo o esforço efetuado pela CAEMA, na substituição dos poços pelo abastecimento através do Sistema Italuís, ainda permanecem em operação, considerando todos os usuários, cerca de 47 poços tubulares profundos, não incluídos os inúmeros poços rasos existentes na área, que são exatamente aqueles que apresentam maiores riscos a saúde dos consumidores, pela alta vulnerabilidade a que estão expostas essas águas à contaminação.

3.2 TÉCNICAS PARA AVALIAÇÃO DA INTRUSÃO SALINA

Quando um aquífero costeiro sofre um processo de intrusão salina, a primeira manifestação é o aumento da salinidade nos poços em exploração. Temos então um caso típico de causa-efeito.

Quanto ao fenômeno, a água salgada encontra-se em contato com água doce. Antes de ser iniciado o bombeamento em um poço existe um equilíbrio dinâmico entre as duas regiões. A água salgada em virtude da sua maior densidade, penetra pela parte inferior da região de água doce como se fosse uma cunha. A contínua pressão de água doce sobre a salgada, e o contínuo escoamento para o mar conseguem manter a posição dessa cunha salina em equilíbrio.

Entretanto, quando é iniciado a exploração do aquífero costeiro, o bombeamento faz reduzir a pressão de água doce, diminuindo assim a sua descarga para o mar. A cunha salina começa então a avançar, podendo atingir os poços da área e salinizar todo o aquífero. O fenômeno ocorre tanto em aquíferos livres, quanto em aquíferos confinados ou semiconfinados.

A intrusão salina é bastante estudada em todo o mundo e existe, atualmente, uma extensa bibliografia sobre o assunto, tanto do ponto de vista hidrogeológico como da análise matemática e computacional.

As metodologias utilizadas para detectar, definir e conhecer a evolução da intrusão salina nos aquíferos costeiros são similares às utilizadas nas investigações hidrogeológicas.

Entre os diversos métodos de estudo destacam-se:

a) Métodos Geofísicos.

- Sondagem Elétrica Vertical (SEV);
- Sondagem Elétrica de Polarização Induzida;

- Perfil Eletromagnético no Domínio de Frequência;
- Sondagem Eletromagnética no Domínio de Tempo.

b) Estudos Hidroquímicos.

- Estudo com íons majoritários e minoritários;
- Índices ou razões Hidrogeoquímicas;
- Isótopos.

Em áreas costeiras, as interpretações dos estudos hidroquímicos com outros estudos hidrogeoquímicos devem ser integrados com a finalidade de estabelecer a natureza das águas subterrâneas salinas. Essa integração de informações se deve às diversas origens que podem ter as águas subterrâneas salinas, e se destaca pela importância do reconhecimento de tais condições para a gestão do aquífero. Na maioria das vezes também é necessário integrar as interpretações hidroquímicas com a geologia, a geofísica e a hidráulica (LLOID e TELLAN, 1988).

Considerando as dificuldades inerentes às diversas metodologias de investigação hidrogeológica, será dada ênfase neste trabalho aos estudos com íons majoritários e índices hidrogeoquímicos, que podem fornecer resultados confiáveis com menores custos.

Os íons majoritários são entendidos como aqueles cátions e ânions que sempre estão presentes em grande quantidade, tanto na água doce como salina. São eles os ânions cloreto, sulfato, bicarbonato e nitrato e os cátions sódio, cálcio, magnésio e potássio.

As águas salinas, resultantes da mistura da água doce com a água do mar, em qualquer proporção, terão estes íons em maior abundância relativa. O conteúdo de cada um não só depende das concentrações na fácies originais, salina e doce, sendo também, e às vezes decisivamente, das intervenções de diversos processos físico-químicos que tenham lugar na interação água-rocha, na busca do equilíbrio iônico. Por conseguinte, para utilizar qualquer destes íons na caracterização da intrusão salina será necessário conhecer, pelo menos

qualitativamente, em que grau estes íons estão envolvidos nos diversos processos físico-químicos (PEREZ e EVANGELISTA, 1988).

Considerando que o íon cloreto é o que apresenta maior estabilidade química, não estando sujeito a processos de dissolução, precipitação, etc. e ainda que é o íon mais abundante na água salina, torna-se o íon mais viável para estudo por ser o que pode oferecer melhor informação. A facilidade de sua determinação analítica é mais um fator a seu uso.

O íon sulfato é o terceiro ânion em abundância na água do mar e, portanto, na mistura desta com a água doce, porém sua geoquímica é mais complexa, sobretudo porque não necessariamente a água do mar é sua principal origem.

Com relação aos cátions majoritários, o sódio é o que predomina nos aquíferos costeiros salinizados. O principal processo físico-químico em que está envolvido é o intercâmbio iônico com o cálcio. Inicialmente os íons em dissolução estão em equilíbrio, o processo ocorre devido ao desequilíbrio iônico causado pela mistura das águas doce e salina. A busca de um novo equilíbrio iônico provoca a perda de sódio para o meio enquanto o cálcio permanece dissolvido aumentando sua concentração. Outro interferente importante e que deve ser considerado são os processos físico-químicos de precipitação-dissolução de carbonatos.

Outros íons majoritários podem ser utilizados, como cálcio, magnésio, nitrato, porém como citado, os seus envolvimento nos processos físico-químicos como os intercâmbios em função dos constituintes do meio trazem como consequência alterações em sua constituição. Estas alterações podem ser minimizadas com a utilização conjunta de íons majoritários associados a índices hidrogeoquímicos.

Outros fatores que influenciam na estabilidade desses íons são: as condições hidrodinâmicas do aquífero, a existência ou não de águas congênicas salinas ou de evaporitos, as condições de recarga ou a sobreposição de outros fenômenos contaminantes.

Quando a água do mar invade um aquífero, existe o contato de líquidos de diferentes composições. A água do mar é rica em cloretos e alcalinos, ao mesmo tempo em que nas águas doces, predominam os bicarbonatos e alcalino-terrosos. O estudo das relações entre estes elementos fornece, portanto uma excelente informação acerca dos processos de intrusão.

Os índices hidrogeoquímicos não são simples relações iônicas, pois devem possuir algum sentido geoquímico, portanto as características litológicas e hidrogeológicas do aquífero e o objetivo pretendido no estudo, definirão quais deles serão utilizados de modo que se possam obter melhores informações.

São numerosos os índices ou razões iônicas⁴ que podem ser de interesse para estudos, dentre eles temos: rMg^{+2}/rCa^{+2} , rSO_4^-/rCl^- , $rCl^-/rHCO_3^-$, rBr^-/rCl^- , etc. Para evidenciar um processo de intrusão salina, pode se usar por exemplo a razão rMg^{+2}/rCa^{+2} cujo rápido aumento de valor associado ao acréscimo de cloreto fornece de imediato uma indicação do fenômeno. Este índice possui um valor compreendido entre 0,3 e 1,5 em águas doces e da ordem de 5 em água do mar, segundo Custódio e Llamas (1983) apud Feitosa e Manoel Filho (1997). Entretanto, essa razão pode ser afetada fundamentalmente pelas variações que podem sofrer o íon cálcio no ambiente, portanto é preciso verificar se há ocorrência de precipitação de $CaCO_3$, pois desse modo haverá um aumento da razão rMg^{+2}/rCa^{+2} , sem que seja indicação de salinização. No caso inverso, de dissolução do calcário, ocorre então uma diminuição desta razão.

Outra razão iônica bastante útil e utilizada para caracterizar a intrusão marinha é a $rCl^-/rHCO_3^-$, já que as águas continentais têm normalmente valores entre 0,1 e 5 e na água do mar estes valores variam entre 20 e 50, segundo Custódio e Llamas (1983) apud Feitosa e Manoel Filho (1997). Essa razão também é utilizada para seguir o processo de concentração

⁴ Os íons para determinação das razões iônicas deverão ter valores expressos em meq/L.

de sais no sentido do fluxo subterrâneo, pois o conteúdo de HCO_3^- , é relativamente constante nas águas subterrâneas. Deve-se, no entanto ter alguns cuidados como o da ocorrência de fenômenos de redução de sulfatos ou de aportes externos de CO_2 , pois assim pode haver um aumento do conteúdo de HCO_3^- , e neste caso o uso desta razão deve ser utilizado com as devidas ressalvas. A ocorrência de precipitação de CaCO_3 também pode influir nesta razão (FEITOSA E MANOEL FILHO,1997).

3.3 O PROBLEMA DA INTRUSÃO SALINA.

A intrusão salina constitui atualmente um problema de âmbito mundial e que vem sendo largamente estudado, principalmente a partir da década de 50. Produzido, prioritariamente, pela super exploração de poços localizados nas proximidades da linha de costa, este fenômeno tem se agravado sobremaneira nos últimos anos, devido ao aumento da população mundial e ao adensamento nas regiões costeiras exigindo maiores demandas de água para uso doméstico (público e particular), irrigação e industrial.

Em diversos Congressos, Seminários e Encontros Internacionais o tema da intrusão salina vem sendo bastante debatido, motivando estudos com metodologias diversas. Em março de 2003 na cidade de Alicante-Espanha, foi realizado o TIAC 03, “Tecnologia de la Intrusión de Mar em Acuíferos Costeros” onde foram apresentados e discutidos temas variados com enfoque em hidrogeologia de aquíferos costeiros; técnicas geofísicas; modelagem matemática; hidrogeoquímica e isótopos; captação, gestão e controle; e recuperação de aquíferos salinizados. Diversos estudos apresentados tratavam do problema da intrusão salina em aquíferos costeiros de diversos países como: Espanha, Portugal, Itália, França, México (Vale Caplina-Tacna e Sonora), Estados Unidos (Flórida), Algéria, Marrocos, Palestina, Austrália, Costa Rica (Península Nicoya) e Brasil.

Outros estudos registram também esse problema em países como: China, Tailândia, Japão, Peru, Chile, Argentina (Comodoro Rivadavia), Nicarágua, Cuba (Guira-Quivican), Irã (Zahedan City) entre outros, de modo que a questão é colocada em nível mundial, muito embora os fatores intervenientes tenham características regionais e algumas vezes pontuais.

3.3.1 A intrusão salina em aquíferos no Brasil.

No Brasil, a região mais afetada pela intrusão salina é a Região Nordeste em virtude principalmente do adensamento populacional na região costeira, demandando uma grande quantidade de água para abastecimento público e particular, industrial e agrícola, que na maioria das vezes é fornecida através de poços tubulares, favorecendo a uma super exploração dos mesmos pelo uso intensivo.

Os principais aquíferos envolvidos na região Nordeste são:

a) Bacia Costeira SE/AL/PE/PB/RN, constituindo uma faixa costeira com largura variando entre 20 e 40 km, estendendo-se entre o sul de Sergipe e a cidade de Natal no Rio Grande do Norte;

b) Grupo Barreiras, que ocorre em toda a faixa costeira, desde o extremo norte do Maranhão até o sul da Bahia.

Os problemas mais graves ocorrem nas regiões Metropolitanas que englobam as capitais dos Estados. Na Região Metropolitana de Maceió (RMM), o sistema atual de extração de água subterrânea, tem causado perturbações significativas no regime de fluxo do sistema Barreiras/Marituba, tendo se verificado processo de intrusão marinha, inclusive em poços de bairros afastados da orla marítima (NOBRE e NOBRE, 2000).

Um estudo realizado por Costa *e al.* (1998) na Região Metropolitana de Recife (RMR), diagnosticou que o sistema de abastecimento de água da região estava colocando em

risco as reservas hídricas subterrâneas do litoral do Estado. Os mais de três mil poços em funcionamento na época, já apresentavam vazão 80% maior do que a indicada para exploração, que seria de 3,6 m³/s, de modo a garantir a reposição natural da bacia sedimentar (reserva subterrânea de água). Deste modo, os poços da RMR estavam retirando quantidade de água maior, estimada em 5,85 m³/s, do que a reposição periódica das chuvas. Enquanto a exploração não fosse controlada, conclui o estudo, os riscos de poluição da bacia sedimentar seriam cada vez maiores.

A problemática da intrusão marinha nos aquíferos costeiros do leste fluminense é atualmente motivo de estudos no projeto denominado ACOST, financiado pelo FINEP, que estuda a Região Oceânica de Niterói com a finalidade criar subsídios para um gerenciamento adequado dos seus recursos hídricos (SILVA JUNIOR *et al.*, 2000).

3.3.2 Síntese dos estudos realizados na ilha de São Luís e na área Itaqui-Bacanga.

Os trabalhos publicados de conteúdo técnico-científico relativo às águas subterrâneas na ilha de São Luís são poucos em face da importância que essas águas representam no contexto do sistema de abastecimento público local, cerca de 23% do total. São na grande maioria voltados para a caracterização hidrogeológica, quantificação e recarga, em estudos pontuais dos aquíferos no domínio da ilha, desenvolvidos ou contratados por empresas como CAEMA, SUDENE, CVRD, CPRM dentre outras. A comunidade científica se recente, portanto de maiores contribuições em vista da seriedade que o assunto merece.

Em 1998 foi elaborado, com a coordenação da então Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA), com participação de órgãos municipais, UFMA, UEMA, Secretaria de Agricultura e Abastecimento (SAGRIMA), o Programa de Gerenciamento Costeiro – GERCO. O documento gerado contemplou diversos relatórios multidisciplinares acerca da região que compõe o Golfão Maranhense. No relatório referente à

hidrogeologia, Maranhão (1998b) cita estudos realizados pela empresa Acqua-Plan em 1970 e 1971, contratada pela CAEMA para estudar alternativas futuras para o abastecimento de água da ilha de São Luís.

Este documento:

- Assinala o aquífero Barreiras no domínio da ilha, como de potencial significativo e sendo um aquífero livre e subaflorante tem a alta pluviosidade regional como fator de reposição das suas reservas hídricas;

- Cita o problema de contaminação salina na área do Itaqui, associando o problema ao aquífero Itapecuru, aflorante na área;

- Assinala que o aproveitamento de lençóis profundos na ilha de São Luís tem sido mal avaliado pelos seguintes fatores:

- a) conhecimento insuficiente das formações aquíferas;

- b) falta de estudos hidrogeológicos;

- c) falta de levantamentos e ensaios de poços existentes;

- d) uso de técnica inadequada na execução de poços.

Em 1972, a Sudene atendendo a solicitação do Governo do Estado do Maranhão, realizou investigações técnico-científicas em cooperação com a CAEMA, para conhecimento das condições hidrogeológicas da área do Itaqui, onde pretendiam implantar um complexo sócio-econômico equivalente a uma população de 200.000 habitantes e cogitava-se na utilização de água subterrânea para atender a essa demanda. Os trabalhos foram coordenados pelo Departamento de Recursos Naturais – Divisão de Hidrogeologia.

Este estudo acrescentou importantes informações ao conhecimento geológico e hidrogeológico dos aquíferos da área Itaqui-Bacanga. Foram perfurados na época, dois poços profundos, sendo um com 430 metros de profundidade e outro com 141 metros. Para o estudo, foram efetuadas também doze sondagens elétricas.

Com o poço de 430 metros e uma sondagem elétrica nas proximidades, puderam constatar um horizonte eletricamente mais resistente, correspondendo a uma camada com boas características hidrodinâmicas, enquanto que o horizonte infinitamente condutor representava uma espessa camada argilosa que era seguida de uma sequência arenosa com água salgada. Deste modo recomendaram que as perfurações de poços na área, não deveriam ultrapassar esta importante camada argilosa de cerca de 80 metros de espessura. Assim poços tecnicamente bem feitos e explorados segundo regimes adequados de bombeamento não deverão correr o risco de serem salinizados.

Os estudos efetuados no poço de 430 metros, onde foram captados dois aquíferos apresentou mecanismo de salinização. A relação de Ghyben-Herzberg calculada foi de 220 metros de profundidade para a interface, o que caracterizou a captação no aquífero inferior, de água salgada.

Esse trabalho, pioneiro na área Itaquí-Bacanga na caracterização química das águas subterrâneas e identificação da fragilidade do sistema aquífero quanto a problemática da intrusão salina, foi de extrema importância no norteamento dos estudos que se sucederam.

Em 1981 foram iniciados os estudos para a implantação do sistema de captação de água subterrânea para atendimento das demandas do Terminal de Minérios de Ferro da Ponta da Madeira nas proximidades do porto do Itaquí. Os estudos foram desenvolvidos pela empresa PROMON Engenharia S.A., que para essa finalidade efetuou trabalhos de campo, análise e interpretação de dados existentes sobre a área, bem como dos poços perfurados na ilha de São Luís e mais especificamente na área do porto do Itaquí.

Vários relatórios técnicos foram elaborados, como o “Relatório Final” produzido em março de 1983, apresentando um estudo hidrogeológico da área e definindo o número de poços a serem explorados.

Os estudos iniciais ressaltavam a necessidade da perfuração de 10 poços que seriam locados em área central e afastados da costa (distância maior que 2 km), como sugerido por Sudene (1972), e localizados ao longo da estrada de apoio à ferrovia na direção NE-SW, obedecendo a uma distância entre eles de 1,0 km.

Após a perfuração dos primeiros dois poços, e realizados testes no aquífero, houve um redimensionamento da bateria de captação que agora passaria a ser de oito. O aquífero captado na área foi representado pelas camadas arenosas do cretáceo, com espessura variando de 30 a 40 metros e granulometria variando de fina a muito fina, ocorrendo uma diminuição da espessura e granulometria das camadas arenosas no sentido NE – SW.

Com relação à qualidade das águas ocorreu uma acentuada diminuição dos teores de cloreto, sólidos totais e dureza total da água do poço mais distante em relação ao mais próximo da costa o que justifica os resultados.

Foi apresentado por Sousa (2000) um estudo sobre o sistema aquífero da ilha de São Luís, com enfoque principalmente na qualidade das águas, que na extremidade noroeste, particularmente na área do Itaquí, apresentou uma tendência de salinização no sentido do fluxo subterrâneo. Neste local, segundo o autor, o superbombeamento em alguns poços situados em uma faixa litorânea de 2 km, estaria rompendo o equilíbrio hidrostático água doce/água salgada e provocando a migração lateral desta última para os aquíferos costeiros. Esta evolução hidroquímica setorial era comandada pela maior permeabilidade, no sentido paralelo à estratificação de camadas horizontais e subhorizontais, o que favorecia o fluxo da água salina, agilizado pela variação de carga a que ficava submetido o aquífero por ocasião do superbombeamento.

Com relação à recarga na ilha de São Luís, Pereira *et al.* (2002) efetuaram um estudo com uso de isótopos e analisaram um total de 49 poços em toda a ilha, em duas campanhas, uma no período chuvoso e outra na estiagem.

Os resultados apresentados nesse estudo caracterizaram o aquífero Barreiras como receptor de rápidas recargas pelas águas das chuvas. Já os poços que exploravam o aquífero Itapecuru possuíam valores mais elevados de Condutividade Elétrica (CE), tendo se encontrado o maior valor em um poço na área do Itaquí que apresentou 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A diferença da CE encontrada neste poço e a dos demais poderia indicar mistura com água do mar provocada por bombeamento excessivo, porém os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ encontrados foram bem diferentes do da água do mar, que é de zero por mil.

A empresa TEMPO PROSPECÇÃO GEOFÍSICA foi contratada em 2002 pela CAEMA para executar, na área do porto do Itaquí, um levantamento geofísico por eletroresistividade e um estudo hidroquímico, visando determinar a interface água doce/água salgada, para locação de poços tubulares profundos.

Para o desenvolvimento dos estudos foram executadas sondagens elétricas verticais (SEVs) e efetuadas coletas d'água para análise da condutividade elétrica e dos teores dos íons cloreto, bicarbonato, cálcio e magnésio. As SEVs foram empregadas com o objetivo de distinguir áreas não salinizadas. Para verificar a ocorrência de mistura de águas (marinha e continental) foram utilizadas as razões iônicas $r\text{Mg}^{+2}/r\text{Ca}^{+2}$ e $r\text{Cl}^-/r\text{HCO}_3^-$.

O estudo sugeriu duas áreas principais para locação de poços com baixo risco de salinização, sendo uma delas a que apresentou características de resistividade similar à dos poços na área do Terminal de Ferry Boat, que apresentavam água de boa qualidade, e a outra onde ocorre a Formação Barreiras em pequenas elevações, com maior espessura.

Concluiu ainda que:

- A razão iônica magnésio/cálcio neste estudo não forneceu indicativos de contaminação marinha;

- Como controle para a perfuração, sugere a conclusão do furo do poço sem interceptar a camada de calcário que ocorre na área, e a execução de uma perfilagem geofísica para revestir o poço.

Um estudo sobre a gestão das águas subterrâneas na região oeste da ilha de São Luís foi efetuado por Costa (2003). Com relação à área Itaquí-Bacanga, enfatizou a proposta já referida em Sudene (1972), como a construção de pequenas barragens de contenção de água de chuva, aproveitando os grotões existentes formados nas reentrâncias, desde que não interfiram no afogamento dos igarapés pelas marés, o que permitiria a infiltração lateral de água doce, contribuindo com a recarga do sistema aquífero da área.

Com relação às interações das águas subterrâneas com as superficiais na área Itaquí-Bacanga, relata que a grande urbanização restringiu drasticamente as evidências de afloramento das águas subterrâneas, salvo pela presença de algumas fontes na base das encostas, e remanescentes de vegetação típica de área de descarga. As fontes estão associadas ao contato de arenitos com substrato argiloso, nos baixos topográficos.

Para o controle e uso da água subterrânea na área, recomenda principalmente que:

- A profundidade máxima de perfuração fique em torno dos 150 metros, com a construção dos poços acontecendo paralelamente ao monitoramento da salinidade do fluido de perfuração.

- A vazão seja estabelecida para exploração com base nos testes de bombeamento e de recuperação, com ênfase à obrigação do construtor em elaborar a curva de rebaixamento.

Outro trabalho importante foi apresentado por Raimundo Júnior *et al.* (2003) no Encontro de “Tecnologia da Intrusão de Água do Mar em Aquíferos Costeiros” ocorrido em Madri-Espanha com o título “Aquífero Detrítico Costeiro de Ponta da Madeira (Maranhão, Brasil). Modelação Hidrogeológica Preliminar”.

O estudo efetuou uma modelagem numérica na área Itaquí-Bacanga, com ênfase à Ponta da Madeira e entorno, onde se localiza o porto de exportação de minérios, utilizando para tanto dados de 15 poços de propriedade da CVRD e o uso do software MODFLOW.

Os poços de captação, conforme os autores, aproveitam o aquífero definido pela Formação Itapecuru, representado por lentes arenosas, com espessura de 30 a 40 metros, cuja granulometria varia de fina a muito fina, com diminuição de espessura de Noroeste a Sudeste.

O resultado do modelo foi apresentado em um mapa mostrando a evolução piezométrica de equilíbrio do sistema, considerando: a geologia da área, as vazões de bombeamento indicadas e as condições de contorno definidas (infiltração, evapotranspiração e nível constante em rios e mar).

Analisado a direção dos vetores de velocidade de fluxo da água subterrânea, com as reservas lógicas derivadas das incertezas existentes, estabeleceram que a principal alimentação do bombeamento era feita a partir do prolongamento sudeste do aquífero Itapecuru e do armazenamento desse aquífero e provavelmente da drenança procedente da Formação Barreiras, ocorrente no trecho.

Com base no balanço hídrico local, e a vazão média extraída do bombeamento, observaram que a recarga do sistema era ligeiramente superior, o que eliminaria o risco do avanço da intrusão marinha. Porém, alertaram que na realidade devido ao regime de bombeamento dos poços serem muito irregulares, com grandes vazões pontuais sendo extraídas durante algumas horas por dia, estaria sendo provocado um efeito de avanço e retrocesso da zona de mistura, com alterações importantes na qualidade da água subterrânea extraída.

Recomendaram ao final do estudo que seja:

- Elaborado um planejamento do bombeamento, mantendo estrito controle da operação e da qualidade físico-química das águas captadas;

- Repartida a vazão necessária para o abastecimento entre o maior número de poços, prioritariamente entre os mais afastados da linha da linha da costa;
- Mantido os bombeamentos de forma constante no tempo, eliminando o programa de paradas diárias que atualmente são realizadas, planejando unicamente paradas de manutenção;
- Instalado uma série de piezômetros de controle, entre os poços e a linha de costa;
- Analisada a possibilidade da criação de uma barreira negativa de fluxo de freio ao avanço da intrusão utilizando os poços mais próximos da costa.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 PLANEJAMENTO E COLETA DE DADOS BÁSICOS

Considerando que a ilha de São Luís é bastante extensa e que um estudo nas proporções aqui proposto sendo realizado em toda a ilha envolveria um custo muito alto, além de consumir um tempo bastante significativo, os estudos se desenvolveram em uma área piloto - Itaquí-Bacanga - cujos problemas de salinização nos aquíferos costeiros tinham sido identificados.

O estudo envolveu o conhecimento do modelo hidrogeológico da área. Assim, efetuou-se um levantamento bibliográfico de documentos disponíveis em bibliotecas, empresas, entidades governamentais e privadas, e Internet. Com isto pôde ser criado um banco de dados com: mapas digitais das áreas de interesse; fotos aéreas e imagens de satélite; dados químicos e fichas cadastrais de poços já perfurados.

O tamanho da amostra para o estudo foi limitado pelas restrições de campo, principalmente pela pequena quantidade de poços que se encontravam ativos na época das coletas constituindo-se deste modo, numa importante limitação ao desenvolvimento dos trabalhos, o que valorizou significativamente o uso de dados históricos, notadamente naqueles poços já desativados, mas que possuíam informações relevantes.

Foram analisados e interpretados os relatórios existentes de perfuração de 24 poços operados e mantidos pela CAEMA para conhecimento da litologia, estratigrafia e estrutura geológica da área além de parâmetros hidrogeológicos. Foram também interpretadas as análises químicas históricas disponíveis em arquivo, a fim de avaliar a evolução na qualidade da água subterrânea ao longo do tempo. Outras informações importantes foram

obtidas e cadastradas acerca dos poços desativados, inclusive aqueles cuja desativação foi motivada por problemas de salinização no aquífero.

A inexistência de um cadastro de poços perfurados na ilha de São Luís levou-nos a efetuar um levantamento minucioso na área de estudo a fim de identificar os poços explorados por particulares, organizações comunitárias e pela Prefeitura Municipal de São Luís. Então, aos 24 poços da CAEMA somaram-se mais 27 poços diversos totalizando 51. A estes ainda se somam os 15 poços da CVRD, cujas informações (dados de perfuração, perfis, testes de vazão e análises químicas históricas) foram obtidas de trabalhos publicados, e através da Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Deste modo o estudo envolveu um total de 66 poços.

A representação espacial da área de estudo baseou-se em imagem LANDSAT ETM 7+, bandas 3, 4 e cinco, ano 2002, que proporcionou a confecção de mapas temáticos sobre o qual foram plotados os poços tubulares, elaboradas as isolinhas e identificadas as categorias de uso e da cobertura vegetal, além de outras informações.

4.2 TRABALHOS DE CAMPO

Para a efetivação do estudo foi realizado durante o cadastramento, o georeferenciamento dos poços profundos e de um poço raso (cacimba), obtendo-se a latitude, longitude e cota. Foi também documentada no campo, em fotografia, a paisagem onde pode ser identificado corte de encostas sem vegetação, mostrando as feições geológicas locais. Foram trabalhados no total 51 poços obtendo-se os seguintes dados: localização, profundidade, nível estático, nível dinâmico, vazão e perfil litológico, quando disponível. Além desses poços o cadastramento incluiu também todos os poços que puderam ser identificados, inclusive aqueles já desativados e os que não se encontravam em operação por

qualquer outro motivo. O interesse nos poços desativados é o caráter histórico que representam. A determinação da altitude foi efetuada com Altímetro Digital, marca Suunto, modelo Escape 203, sendo referido ao datum do nível do mar na barragem do Bacanga, considerado constante para uso no estudo. Para determinação das coordenadas geográficas foi utilizado o GPS marca Garmin, modelo Plus III.

Os poços foram identificados inicialmente, com um número sequencial na ordem em que iam sendo cadastrados. Posteriormente, foram codificados apenas os poços selecionados para análises físico-químicas, tendo recebido a letra “C” seguida de um número de ordem, àqueles pertencentes à CAEMA e a letra “P” seguida de um número de ordem, quando de particulares ou de outras organizações (exemplos: C-01 e P-01).

Também receberam codificação os poços que mesmo estando desativados, foram utilizados durante o estudo como os do bairro Sá Viana (SV-01), da Vila Mauro Fecury I (MF-01) e poços históricos diversos (H-01). Todos estão apresentados em tabelas com as letras iniciais indicadas, seguidos de um número de ordem. Os poços da CVRD foram codificados com a letra inicial “V”, seguida do número código da própria empresa (P-10B da CVRD, V-10B, código neste estudo).

Dos 51 poços cadastrados (24 da CAEMA e 27 de particulares), apenas em 29 foi possível coletar amostras para análises químicas. Nos demais poços as coletas não puderam ser realizadas, pois alguns foram desativados na época, enquanto outros não possuíram condições técnicas, o que prejudicou a análise e um melhor entendimento da dinâmica da operação dos mesmos. As coletas eram sempre acompanhadas de um operador de poços da CAEMA, que efetuava as manobras necessárias à obtenção das amostras.

As amostras foram coletadas nos dias 16, 20, 21, 23, 24, 27 e 31 do mês de janeiro de 2004, correspondendo ao período chuvoso, implicando assim em uma condição favorável à recarga direta e conseqüentemente beneficiando os estudos visto que a condição crítica seria

obtida se a época de coleta fosse a de estiagem. Durante as coletas foram analisados alguns parâmetros em campo como: temperatura da água, pH, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica. Para essas determinações foi utilizado o equipamento portátil medidor multiparâmetro Horiba U-100. Foram coletadas em campo duas amostras em cada poço, cada uma com 500 ml acondicionados em recipientes de polietileno. As amostras foram conservadas durante o transporte em depósito de isopor com gelo e posteriormente encaminhado aos Laboratórios para análises físico-químicas.

As determinações dos íons cloreto e bicarbonato foram efetuados no Laboratório de Hidrobiologia – Labohidro, da Universidade Federal do Maranhão. O cloreto foi determinado utilizando-se o método volumétrico, com AgNO_3 e K_2CrO_4 , segundo Morh (APHA, 1985). Para a determinação da alcalinidade e bicarbonato foi utilizado o potenciômetro HANNA HI 9025 e bureta digital seguindo metodologia descrita por Golterman e Clymo (1978). Por sua vez, as análises dos cátions cálcio e magnésio, foram efetuadas no Laboratório de Solos da Universidade Estadual do Maranhão mediante leitura direta em Espectrofotômetro de Absorção Atômica marca VARIAN SPECTR AA-200. Os demais íons maiores não foram determinados, pois a investigação se limitou ao estudo de razões iônicas, utilizando somente os íons analisados, tendo como finalidade efetuar uma avaliação preliminar da intrusão salina na área.

Com os resultados das análises foram calculadas as razões iônicas: $r\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$ e $\text{Mg}^{+2} / \text{Ca}^{+2}$. Para o cálculo das razões, os valores das concentrações dos íons, Cl^- , HCO_3^- , Mg^{+2} e Ca^{+2} , expressas em mg/L foram transformadas para miliequivalente por litro (meq/L). Esses índices hidroquímicos apresentam os seguintes valores para análise, segundo Custódio e Llamas (1983) apud Feitosa e Manoel Filho (1997):

a) Razão $r\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$: em águas continentais esta razão varia entre 0,1 e 5, enquanto que na água do mar, a razão varia entre 20 e 50.

b) Razão Mg^{+2}/Ca^{+2} : em águas continentais esta razão varia frequentemente entre 0,3 e 1,5, enquanto que na água do mar, esse valor situa-se em torno de 5.

Segundo Feitosa e Manoel Filho (1997), essas razões representam relações entre os íons dissolvidos na água, que podem indicar um certo relacionamento com o litotipo do qual a água se origina, bem como a ação de fenômenos modificadores, ou indicar uma característica específica da água considerada.

4.3 ANÁLISE DOS DADOS

Os dados do cadastramento e os resultados das análises físico-químicas foram plotados em planilhas Excel 2000. Os resultados foram identificados por poços e associados aos dados de altitude, coordenadas geográficas, para fins de mapeamento.

Para facilidade no desenvolvimento dos estudos litológicos, com base nos perfis disponíveis, a área em estudo foi subdividida em 4 setores assim denominados:

a) Setor leste (Residencial Paraíso e Resende, Jambeiro, Sá Viana e Corpo de Bombeiros);

b) Setor norte (Tamancão, Alto da Esperança, Ponta do Bonfim, Vila Nova e Vila Mauro Fecury);

c) Setor oeste (Porto do Itaquí e Ponta de Espera – Ferryboat);

d) Setor centro-sul (Alto da Vitória, Anjo da Guarda, CVRD, Vila Embratel e Argola e Tambor).

A partir dos resultados das análises físico-químicas foram gerados mapas de isovalores para os parâmetros condutividade elétrica, íon cloreto e razões iônicas. Esses mapas permitiram a visualização espacial dos resultados, facilitando a identificação de áreas críticas.

Os mapas vetoriais e interpretação da imagem de satélite foram desenvolvidas no sistema MAPPING OFFICE, que é um software cad que agrupa módulos de manipulação vetorial e raster. Os trabalhos de geoestatística para a interpolação das curvas de níveis foram desenvolvidos pelo sistema TOPOGRAPH, que é um software utilizado para cálculos topográficos. Todo o trabalho de mapeamento foi desenvolvido com base no sistema geográfico brasileiro, ou seja, Datum Geodésio: SAD 69, Elipsóide: SAD 69 e Sistema Universal Transverse de Mercátor –UTM zona 23.

Foram então gerados quatro mapas de isovalores:

- de condutividade adotando-se uma equidistância de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- de íon cloreto com uma equidistância de 0,500 mg/L;
- da razão iônica magnésio/cálcio com uma equidistância de 0,500;
- da razão iônica cloreto/bicarbonato com uma equidistância de 0,500;

A determinação do grau de homogeneidade das razões iônicas foi feita utilizando-se a análise hierárquica de agrupamentos, com o uso do software MINITAB 14, que objetiva exibir os dados em um espaço bidimensional, de maneira a enfatizar os seus agrupamentos. Assume-se que a distância entre os pontos (objetos ou variáveis) reflete a similaridade de suas propriedades, portanto, quanto mais próximos estiverem os pontos no espaço amostral, mais similares eles serão.

As variáveis utilizadas para a análise dos agrupamentos foram os valores das razões iônicas ($r\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ e $\text{Mg}^{+2}/\text{Ca}^{+2}$), da condutividade elétrica e do íon cloreto. O grau de similaridade foi determinado pelo coeficiente de distância euclidiana, usualmente utilizado quando se deseja estabelecer o grau de semelhança entre objetos (MOURA,1985 *apud* VIDAL e KIANG, 2002).

Foram determinadas também duas seções geotopográficas, como identificadas no mapa 03. Estas seções foram construídas utilizando-se o mapa de locação dos poços

referenciados, sendo uma na direção W-E/SE (paralela à Avenida dos Portugueses) incluindo os poços C-01, C-02, C-10, C-03, P-09 e C-13 e outra na direção SW-NE/NW (paralela ao rio Bacanga) com os poços P-15, P-14, C-08, C-07, C-13, P-09, P-08, P-02 e P-13.

As seções foram obtidas com os dados de construção dos poços como: profundidade, nível estático, nível dinâmico e cota topográfica. Foi ainda possível, a partir da utilização dos perfis dos poços estudados e de informações sobre as características gerais das formações geológicas levantados por Rodrigues (1994), determinar a cota aproximada do contato estratigráfico entre o cretáceo (**Ki**) e o terciário (**Tb**).

As seções foram representadas em gráficos geotopográficos, associados aos gráficos das variações iônicas e razões hidroquímicas. Deste modo, em uma mesma página os dois gráficos podem ser analisados simultaneamente visto estarem relacionados com o código dos poços. Assim, podemos inferir resultados hidrogeológicos com a associação das informações observadas. Foram então construídos quatro gráficos associados:

- um com os valores dos íons cálcio, magnésio e razão iônica magnésio/cálcio associado a uma seção com os poços da direção W-E/SE;
- um com os valores dos íons cloreto, bicarbonato e a razão iônica cloreto/bicarbonato, associado a uma seção com os poços da direção W-E/SE;
- um com os valores dos íons cálcio, magnésio e razão iônica magnésio/cálcio associado a uma seção com os poços da direção SW-NE/NW.
- um com os valores dos íons cloreto, bicarbonato e a razão iônica cloreto/bicarbonato, associado a uma seção com os poços da direção SW-NE/NW.

A análise dos mapas de isovalores e seções geotopográficas associadas aos gráficos hidroquímicos dos poços estudados, juntamente com a análise das informações bibliográficas e as observações de campo, constituíram-se nas atividades finais deste estudo possibilitando a identificação de parâmetros que pudessem ser usados para a geração de um

mapa de vulnerabilidade da área Itaquí-Bacanga. Cada parâmetro evidenciou uma condição crítica, de maior ou menor influência no processo de intrusão marinha.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CADASTRAMENTO DOS POÇOS

O uso de água subterrânea como manancial para abastecimento público na área Itaquí – Bacanga vem sofrendo nos últimos anos, por parte da CAEMA, um processo gradativo de substituição pelo uso de águas superficiais aduzidas pelo Sistema Italuís.

Desde o início da ocupação da área na década de 1970, já foram desativados mais de 50 poços, por vários motivos, principalmente os de qualidade das águas associadas à salinização em determinados bairros. O rápido crescimento populacional da área aliado à baixa produção dos poços foi um fator importante que motivou esse processo de desativação.

O resultado do levantamento dos poços perfurados na área Itaquí – Bacanga encontram-se no Apêndice A. Nesse levantamento, foram cadastrados e georeferenciados, indiferentemente, todos os poços encontrados, estando ou não ativos, totalizando 51 poços.

A distribuição dos poços por proprietário encontra-se no gráfico 1.

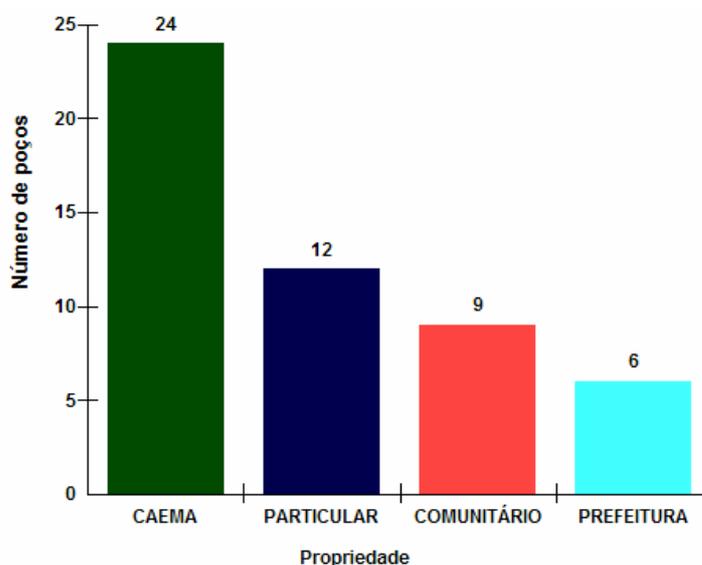


Gráfico 1 - Distribuição de Poços

Os poços ativos e que tiveram condições de coleta, em um total de 29, encontram-se codificados (C= CAEMA e P= Particulares e outros) e apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Cadastro dos 29 poços ativos da área Itaqui – Bacanga

Código	Localização	Coordenadas		Cota (m)	Profundidade (m)	Propriedade	Observações
		Lat. 02°	Long. 44°				
C-01	Porto do Itaqui I	34' 05,2"	21' 38,1"	24	80	CAEMA	Código P-5 CAEMA.
C-02	Porto do Itaqui II	33' 55,8"	21' 40,0"	6	69	CAEMA	Código P-4 CAEMA.
P-01	Ponta de Espera II	32' 06,1"	21' 01,1"	32	110	Particular	Área do ferryboat.
C-03	Alto da Vitória	33' 44,8"	19' 28,8"	35	150	CAEMA	
C-04	Alto da Esperança I	32' 50,3"	18' 50,6"	18	110	CAEMA	Trav. Dom Henrique.
P-02	Res. Ana Jansen	32' 44,2"	18' 38,2"	13	103	Comunitário	União dos Moradores.
C-05	Gancharia	33' 11,2"	19' 10,5"	14	112	CAEMA	Unid. Escolar Rua 4.
P-03	Colônia do Bonfim	31' 48,9"	19' 36,8"	24	75	Particular	Área do Hospital.
C-06	Vila Embratel I	34' 12,4"	18' 32,1"	20	118	CAEMA	Praça do Viva.
C-07	Vila Embratel II	34' 25,7"	18' 21,4"	16	90	CAEMA	Rua 27 com Rua 28.
C-08	Vila Embratel III	34' 37,1"	18' 23,3"	19	112	CAEMA	Rua São Benedito.
C-09	Vila Embratel IV	34' 01,1"	18' 43,4"	19	100	CAEMA	Rua 51 com Rua 06.
C-10	Anjo da Guarda	33' 53,7"	19' 58,4"	40	100	CAEMA	Posto de Saúde.
C-11	Vila São Luís	32' 55,4"	20' 03,5"	27	122	CAEMA	Rua Sol com R. Buriti.
P-04	Vila Ariri	32' 52,0"	19' 46,3"	24	160	Prefeitura	U.I. Escolar.
C-12	Residencial Resende I	34' 31,0"	18' 08,7"	18	100	CAEMA	Av. das Orquídeas.
C-13	Residencial Paraíso I	34' 08,8"	17' 56,2"	25	96	CAEMA	Av. Principal.
P-05	Quartel de Bombeiros	32' 56,1"	18' 20,0"	16	100	Particular	
P-06	Av. Portugueses I	33' 48,8"	19' 23,9"	15	(*)	Particular	Garagem M. Ribeiro.
P-07	UFMA I	33' 14,1"	18' 22,8"	20	121	Particular	Biblioteca Central.
P-08	UFMA III	33' 03,6"	18' 21,0"	10	70	Particular	Antiga FESM.
P-09	Sá Viana / Jambeiro I	33' 49,0"	18' 25,2"	2	79	Comunitário	Av. do Contorno.
P-10	Sá Viana / Jambeiro	33' 47,2"	18' 26,5"	-1	-2	Comunitário	Av. Contorno/cacimba.
C-14	Alto da Esperança II	32' 54,3"	18' 53,2"	17	(*)	Comunitário	R. Rainha Elizabeth.
P-11	Res. Ana Jansen II	32' 45,7"	18' 38,0"	13	26	Particular	Av. Principal.
P-12	Tamancão II	32' 26,4"	18' 49,5"	15	(*)	Comunitário	Rua da Mangueira.
P-13	Tamancão III	32' 26,8"	18' 42,5"	4	70	Particular	Estaleiro Escola.
P-14	Argola e Tambor 1	32' 05,9"	18' 40,5"	23	100	Comunitário	Estrada do Gapara
P-15	Argola e Tambor 2	32' 22,4"	18' 43,2"	22	108	Comunitário	Estrada do Gapara

(*) Sem informação.

Fonte: do autor.

Os 22 poços restantes e que embora cadastrados, não puderam ter amostras coletadas foram divididos em dois grupos. Um com 13 poços que possuíam dados históricos e, portanto interessavam ao estudo e outro grupo com 9 poços que não dispunham de informações e que por isso foram descartados. Os dados dos 13 poços encontram-se codificados (SV= Sá Viana, MF= Mauro Fecury e H= Históricos) e apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Cadastro dos 13 poços desativados da área Itaqui – Bacanga, com dados históricos

Código	Localização	Coordenadas		Cota (m)	Profundidade (m)	Propriedade	Observações
		Lat. 02°	Long. 44°				
SV-01	Sá Viana I (P-3)	33' 22,0"	18' 03,3"	35	130	CAEMA	P-3 Av. C. Carvalho.
SV-02	Sá Viana II (P-04)	33' 25,8"	18' 02,7"	29	96	CAEMA	P-4 R. Militana.
SV-03	Sá Viana III (P-5)	33' 32,2"	17' 54,4"	28	140	CAEMA	P-5.
SV-04	Sá Viana IV (P-6)	33' 41,3"	18' 14,8"	19	96	CAEMA	P-6.
MF-01	V. Mauro Fecury 1 - II	32' 45,9"	19' 57,0"	7	154	Prefeitura	Av. Dom Luís.
MF-02	V. Mauro Fecury 1 - III	32' 30,2"	19' 51,6"	28	180	Prefeitura	Rua Silvio Tavares.
MF-03	V. Mauro Fecury 1 - IV	32' 31,5"	20' 01,7"	15	(*)	Prefeitura	Rua Sarney Filho.
MF-04	V. Mauro Fecury 1 - V	32' 21,1"	19' 57,0"	18	(*)	Prefeitura	Ilha da Paz.
MF-05	V. Mauro Fecury 1 - VI	32' 18,7"	19' 47,2"	11	168	Prefeitura	Rua da Cerâmica.
H-01	Porto do Itaqui IV	33' 51,3"	21' 42,6"	5	78	CAEMA	CAEMA P-03.
H-02	Porto do Itaqui III	34' 10,5"	21' 49,6"	24	80	CAEMA	CAEMA P-06.
H-03	Vila Bacanga	33' 24,4"	18' 44,4"	36	121	CAEMA	Av. dos Portugueses..
H-04	Vila Isabel	33' 54,3"	19' 21,6"	26	114	CAEMA	Av. dos Portugueses

(*) Sem informação.

Fonte: do autor.

Os poços cadastrados encontravam-se normalmente abrigados em caixas de concreto com laje de cobertura, sendo que, a instalação elétrica e quadro de comando localizavam-se em pequenas casas protegidos com portões de ferro. Em outros casos, os poços ficavam a céu aberto, e apenas a instalação elétrica era protegida (Fotografia 10). Quando os poços se localizavam em áreas de reservatórios, eram mais bem protegidos pela presença de vigilância no local. Verificou-se, de modo generalizado, a ação de vândalos em atos de depredação das instalações, tanto para os poços localizados na zona urbana quanto rural (Fotografia 11). Essas ações normalmente colocam em risco a continuidade na operação dos poços, bem como a qualidade da água distribuída à população, constituindo-se assim em um problema de saúde pública.

Um outro aspecto que chama a atenção é a maneira com que os poços são abandonados após serem desativados. Na grande maioria dos casos são simplesmente deixados a céu aberto, sem nenhuma proteção na parte superior do tubo de revestimento, transformando-se deste modo em importantes meios de contaminação pontual das águas subterrâneas na área.



Fotografia 10 - Poço comunitário no bairro Jambeiro na área Itaquí-Bacanga



Fotografia 11 - Poço em área pública na área Itaquí - Bacanga, depredado por vandalismo

Além dos poços cadastrados, a Companhia Vale do Rio Doce – CVRD possui na área uma bateria de 15 poços cujos perfis litológicos foram utilizados no estudo. Esse levantamento encontra-se na Tabela 4.

Todos os poços cadastrados, ativos e inativos, georeferenciados, podem ser observados no Mapa 4, que apresenta também a direção das duas seções estudadas, W-E/SE e SW-NE/NW.

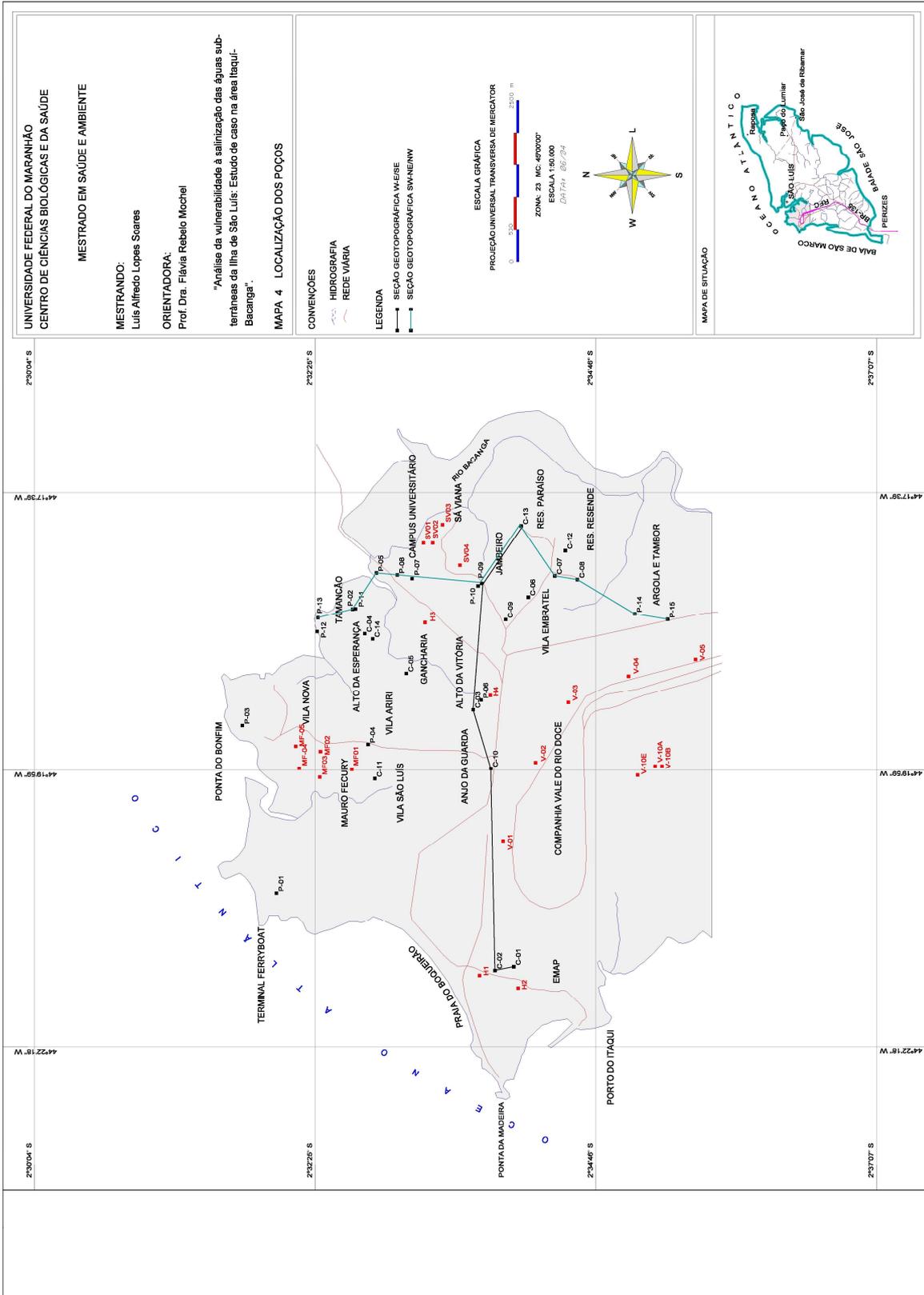
Uma primeira análise do Mapa 4 mostra que, em virtude da desativação de uma série de poços, a distribuição espacial dos mesmos apresenta-se de maneira não uniforme, ocorrendo uma quantidade maior de poços no lado leste, o que representa uma primeira limitação do estudo. Observa-se também que três poços da CVRD (V-6, V-7 e V-8) não aparecem no Mapa, pois se encontram fora da área definida para o estudo.

Tabela 4 - Poços de propriedade da CVRD, na área Itaqui-Bacanga

Código	Coordenadas		Cota (m)	Profundidade (m)	Vazão (m³/h)
	Lat. 02°	Long. 44°			
V-01	34' 03,3"	20' 39,5"	24	170	7,90
V-02	34' 20,0"	19' 54,7"	22	146	6,60
V-03	34' 35,9"	19' 24,3"	21	140	17,00
V-04	35' 06,5"	19' 10,6"	10	128	7,90
V-05	35' 39,8"	19' 04,0"	14	122	7,20
V-06	36' 14,1"	18' 51,8"	19	126	5,65
V-07	36' 40,0"	18' 31,0"	11	134	8,80
V-08	37' 07,1"	18' 38,1"	19	162	7,20
V-10A	35' 18,6"	19' 55,2"	(*)	146	7,60
V-10B	35' 19,8"	19' 58,2"	(*)	126	7,60
V-10E	35' 10,4"	20' 01,2"	(*)	140	23,25

(*) Sem informação

Fonte: Secretaria de Estado do Meio Ambiente.



Mapa 4 - Localização dos Poços

5.2 ANÁLISE DOS PERFIS LITOLÓGICOS.

Foram analisados 24 perfis litológicos e construtivos relativos aos poços cadastrados, 19 perfis relativos aos poços pesquisados com dados históricos, e 11 perfis da CVRD. A análise desses perfis é muito importante na identificação mais precisa das características peculiares da geologia e hidrogeologia local, assim como, para permitir da natureza e da recarga dos aquíferos que ocorrem na área.

O estudo realizado por Sudene (1972) elaborou um Mapa Geológico do Distrito Industrial do Itaquí com imagens da PROSPEC, em escala 1:20000 (Anexo A), em que estão representados os elementos estudados, como os poços perfurados, pontos de sondagens dentre outros. O mapa apresenta, para a quase totalidade da área, a predominância de sedimentos do Terciário e identifica uma pequena área próxima ao porto do Itaquí, onde mostra em superfície um afloramento do Cretáceo representado pela Formação Itapecuru. Mostra ainda a grande área de ocorrência das planícies fluvio-marinhas, representadas pelas reentrâncias, banhadas pelos igarapés, constituindo o Quaternário.

Analisando-se os perfis litológicos dos poços e os sedimentos superficiais da região, verifica-se na área em estudo um predomínio do Terciário antigo (Terciário Paleogeno), que de acordo com Rodrigues et al. (1994), são representados por sedimentos argilo-arenosos, bastante caulinizados, com laterita subordinada, que se encontram sobrepostos discordantemente ao Membro Alcântara da Formação Itapecuru, e discordantemente sotopostos à Formação Barreiras o qual ocupa o topo da sequência terciária. É importante salientar que no presente trabalho é adotada esta sequência estratigráfica.

Observa-se também, que na porção central da área de estudo, em direção ao sul, ocorre a presença de sedimentos da Formação Barreiras que, segundo Costa (2003), vai aumentando de espessura nessa mesma direção. Essa formação também se encontra presente

nos altos topográficos, principalmente nas localidades Residencial Resende, Residencial Paraíso e sul da Vila Embratel.

As análises dos perfis litológicos, efetuadas por setor, apresentaram os seguintes resultados.

5.2.1 Análise dos perfis do setor leste

O bairro Sá Viana fica às margens da Barragem do Bacanga, tendo sido uma das primeiras comunidades a se instalar na área, motivadas pela implantação nas proximidades, do Campus da Universidade Federal do Maranhão. O abastecimento público de água, oferecido pela CAEMA, baseava-se na captação de águas subterrâneas através de quatro poços tubulares profundos. Esses poços foram desativados na segunda metade da década de 1980 em virtude da salinização dos mesmos, e o abastecimento passou a ser efetuado pelo Sistema Italuís.

A análise dos perfis disponíveis dos poços SV-01 (130,0 metros), SV-02 (96,0 metros) e SV-04 (96,0 metros), mostram uma sequência litológica característica (Figura 1), apresentando o contato aproximado Terciário/Cretáceo na profundidade de 63 metros, no nível de calcário. Deste modo pela sequência inicial apresentada, a recarga direta é pouco significativa na área, em virtude do leito argiloso encontrado logo abaixo da camada superficial de arenito, apresentando um relevo com declividades acentuadas, típicas de perfil com sustentação argilosa, contendo níveis lateríticos. Os perfis completos da área mostram a posição dos filtros abaixo dos níveis de calcário, captando portanto, o aquífero confinado da formação Itapecuru. As vazões captadas por poço eram da ordem de 10 m³/h.

Próximo ao bairro Sá Viana, localiza-se a comunidade Jambeiro que é abastecida por um poço tubular profundo comunitário e por uma série de poços rasos tipo cacimba, que aproveitam águas da zona insaturada.

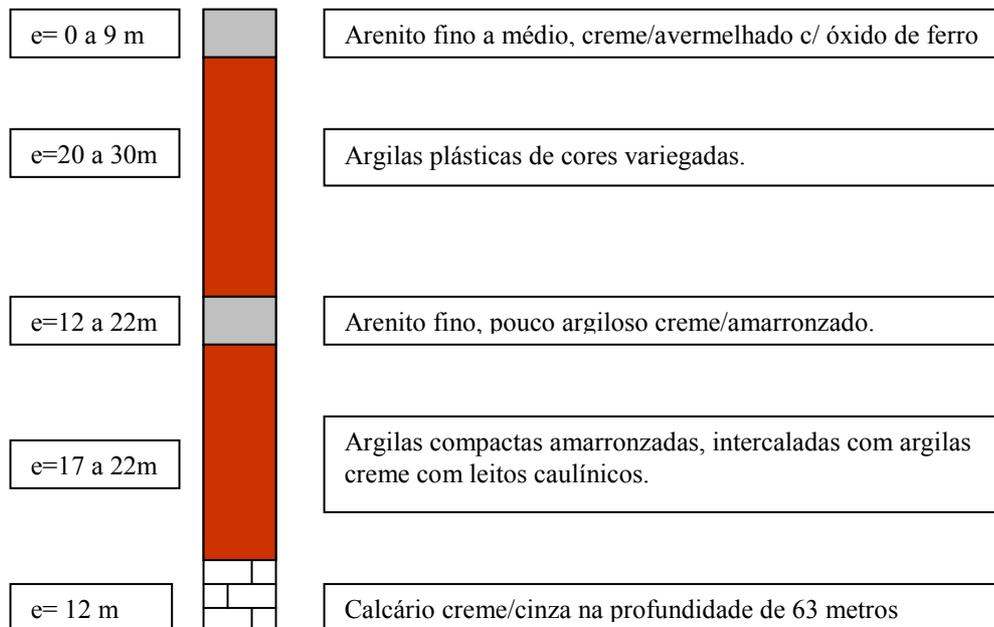


Figura 1 - Perfil litológico característico dos poços do bairro Sá Viana (sem escala)

O poço comunitário do Jambeiro possui uma profundidade de 80,0 metros, apresentando o contato aproximado Terciário/Cretáceo na profundidade de 34,0 metros, quando da ocorrência do nível de calcário. O poço encontra-se na cota topográfica de apenas 2,0 metros acima do nível do mar, situando-se, portanto, no plano flúvio-marinho na reentrância do igarapé existente na área. A recarga direta, como nos poços do bairro Sá Viana, é dificultada pela reduzida espessura da camada superficial de arenito. Os filtros estão localizados abaixo do nível de calcário, onde existe uma camada de arenito avermelhado, captando, portanto, da Formação Itapecuru. O perfil litológico característico do poço do Jambeiro é similar aos do bairro Sá Viana. No Apêndice B, vemos uma encosta mostrando a litologia característica do topo desta área.

Ainda no setor leste, o Comando Geral do Corpo de Bombeiros localiza-se no alto de uma colina logo na saída da barragem do Bacanga, à direita. O poço que abastece esse Comando foi perfurado em 1973, quando ali funcionava a extinta PRODATA⁵. O perfil litológico apresenta uma sequência de 60,0 metros de argilas, sendo que nos 9,0 metros iniciais são caulinizadas, como mostra o corte no aterro as margens da Avenida dos Portugueses (Apêndice C). Essa sequência inicial de argilas confere características de confinamento ao aquífero. Como os filtros estão posicionados abaixo do leito de calcário, deduz-se que a captação de água é proveniente da Formação Itapecuru.

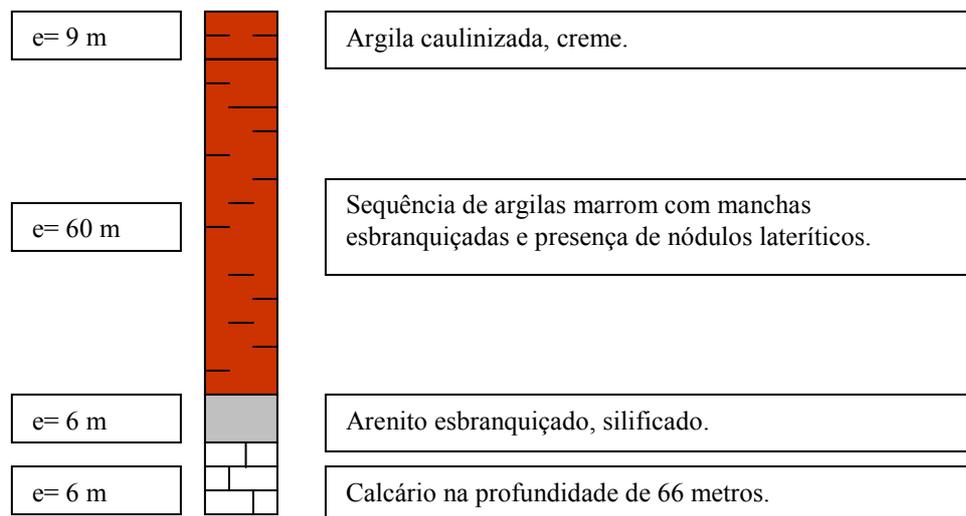


Figura 2 - Perfil litológico do poço do Corpo de Bombeiros (sem escala)

Os bairros do Residencial Paraíso e Resende vêm se transformando em pólo de crescimento urbano, com um aumento significativo no número de invasões, no seu entorno.

Esses bairros localizam-se em um alto topográfico, com superfícies suavemente onduladas, constituídas por uma camada inicial arenosa bastante espessa, o que caracteriza a princípio, uma importante área de recarga.

⁵ PRODATA – Antigo Centro de Processamento de Dados do Estado do Maranhão.

O único perfil litológico disponível para análise no Residencial Paraíso é de um poço da CAEMA, cujo perfil característico está apresentado na Figura 3.

A presença de um pacote inicial representativo de arenito caracteriza a superfície, como importante para a recarga do sistema aquífero livre e confinado que ocorre na área.

Os filtros encontram-se posicionados nos arenitos anteriores e posteriores ao leito de calcário, captado possivelmente das Formações Barreiras e Itapecuru.

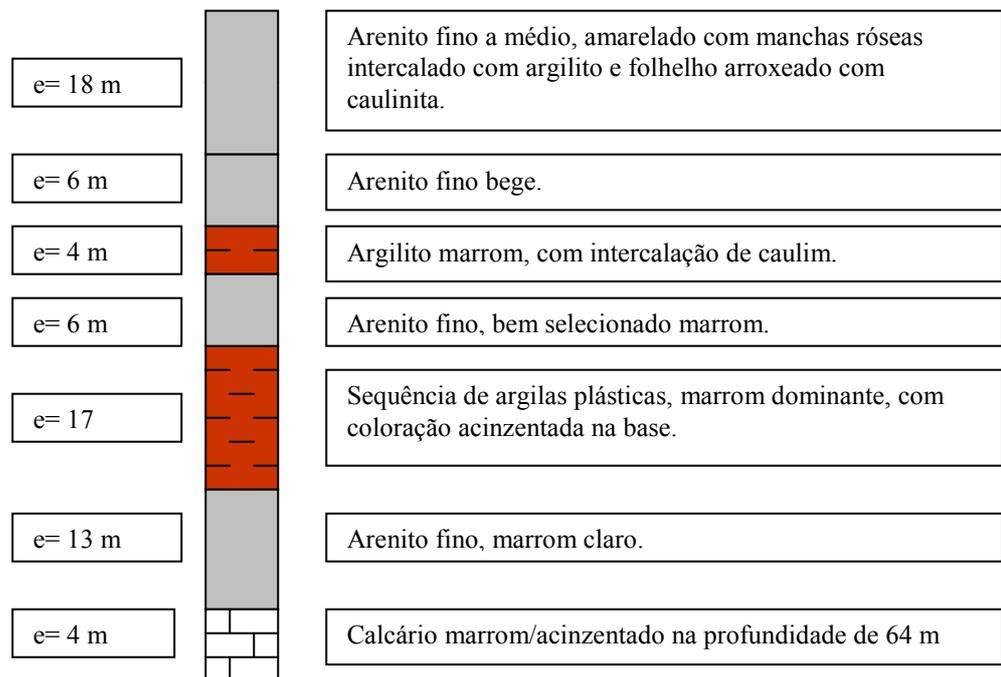


Figura 3 - Perfil litológico característico do poço do Residencial Paraíso (sem escala)

5.2.2 Análise dos perfis do setor norte

A área do Tamancão localiza-se às margens do rio Bacanga, já em seu estuário, e também vem se constituindo em uma importante área de novas invasões, como extensão dos bairros vizinhos: Residencial Ana Jansen e Alto da Esperança. Nessa localidade está sendo implantado um Estaleiro Escola (Apêndice D), cujo prédio encontra-se praticamente com sua

reforma concluída. Nessa área foram cadastrados três poços, sendo um comunitário, outro de uma residência particular e outro do Estaleiro.

Para o estudo foi possível analisar os dados de dois perfis litológicos disponíveis, o poço comunitário, mais antigo, com 21 metros de profundidade, e um outro pertencente ao Estaleiro, perfurado recentemente, com 70 metros de profundidade cujo perfil fornecido pela empresa perfuradora é bastante genérico. O perfil característico possível de ser montado encontra-se apresentado na Figura 4.

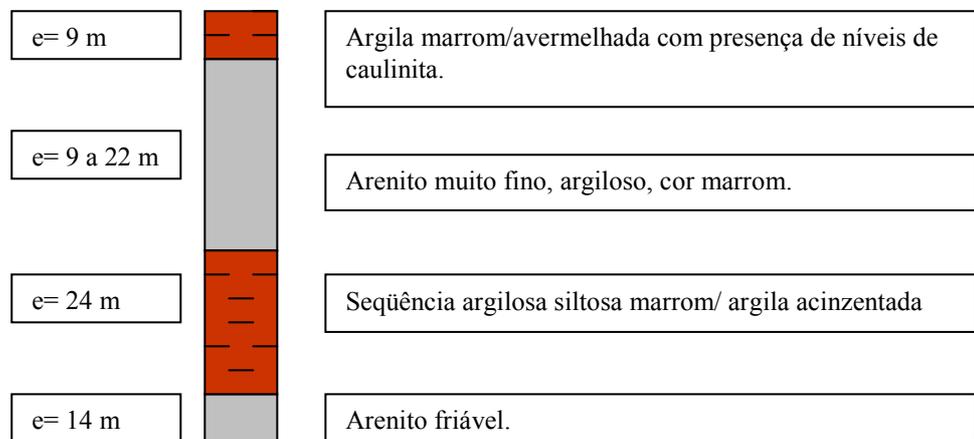


Figura 4 - Perfil litológico característico do poço do Tamancão (sem escala)

Os filtros estão instalados nas camadas arenosas, captando possivelmente da Formação Terciária. Os poços dessa área apresentam água com elevada salinidade, principalmente de cloreto de sódio, sugerindo recarga no aquífero com águas marinhas, caracterizando o fenômeno de intrusão salina. Alguns fatores contribuem para essa situação, como: a baixa cota topográfica do poço (4 metros); a camada inicial argilosa que impede a infiltração de águas pluviais; o nível estático de 2,75 metros e o nível dinâmico de 17,22 metros. Esses fatores combinados sugerem a ocorrência de inversão do fluxo nos níveis de arenito, quando do bombeamento, principalmente levando-se em consideração o estudo de Costa (2003), quando diz que, na área, a permeabilidade horizontal é de pelo menos 1,5 vezes maior do que a vertical.

O trecho compreendido entre o Tamancão e a Ponta do Bonfim caracteriza-se por sedimentos superficiais do Terciário Paleogeno, apresentando também testemunhos de afloramento do Cretáceo, como o da praia da Guia já mostrados na Fotografia 6. O poço existente na Ponta do Bonfim apresenta perfil de acordo com a Figura 5.

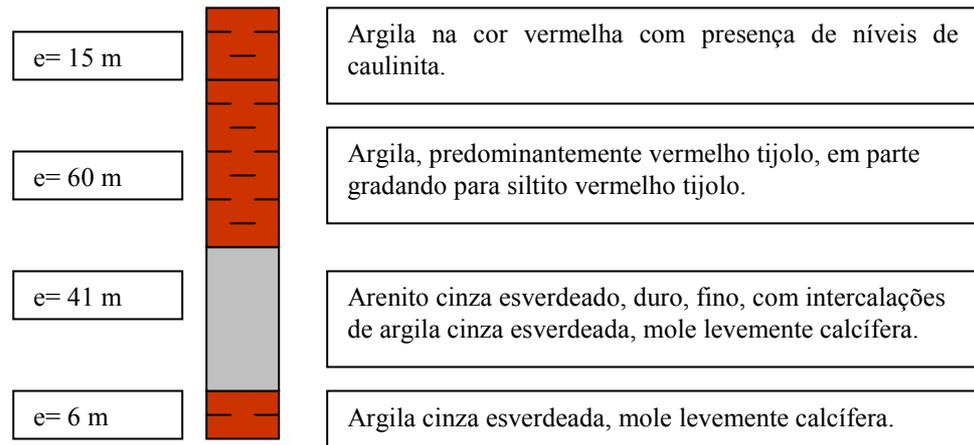


Figura 5 - Perfil litológico característico do poço do Bonfim (sem escala)

O poço do Bonfim, embora em cota topográfica mais elevada (24 metros), pode vir a apresentar o mesmo problema de salinização do poço Tamancão. Esse problema ainda não ocorre, porque, na área, é o único poço em operação, explotando uma vazão relativamente baixa, de aproximadamente 9 m³/h. Os filtros estão posicionados no nível do pacote de arenitos, captando provavelmente da Formação Terciária. Pela espessura das argilas no topo, a recarga na área provem de fluxo regional.

No setor norte, ainda encontramos os poços das localidades Alto da Esperança, Residencial Ana Jansen, e nas Vilas Nova, Ariri, São Luís e Mauro Fecury I e entorno. Esses poços serão analisados em conjunto, pois apresentam uma uniformidade em seus perfis litológicos, com exceção aos poços da Vila Mauro Fecury I, cujo tratamento será diferenciado, pelas suas peculiaridades.

O conjunto dos poços apresenta um perfil característico conforme mostra a Figura

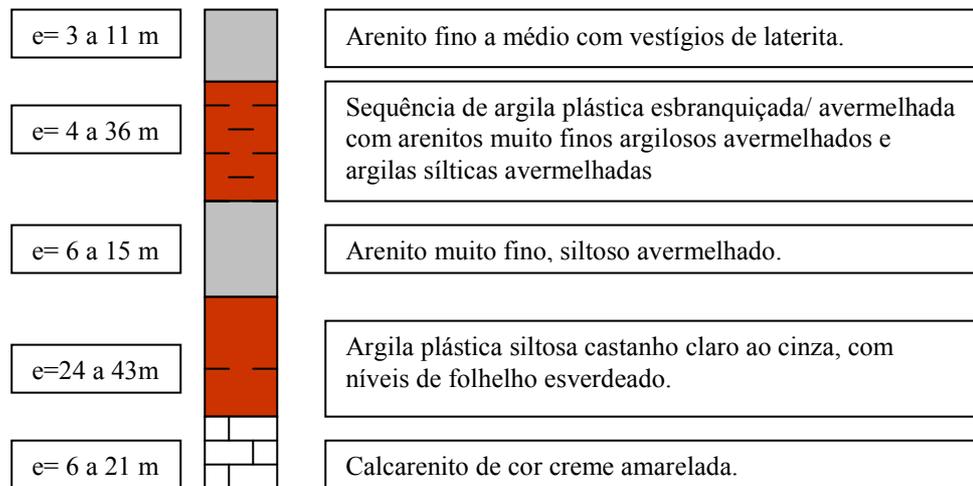


Figura 6 - Perfil litológico característico dos poços do setor Norte (sem escala)

Os contatos aproximados ocorrem nas profundidades de 48,0 a 64,0 metros, e os filtros estão localizados abaixo do nível de calcário, captando água, certamente da Formação Itapecuru. Esses poços apresentam uma pequena capa de arenitos no topo, porém com pouco significado em termos de recarga local. A reposição de água no aquífero confinado deve ser de fluxo regional.

Os poços da expansão da Vila Mauro Fecury I, mais especificamente aqueles construídos no ano de 2000 pela Prefeitura Municipal de São Luís (cinco poços), apresentaram problemas de qualidade de água, associados à salinização, de modo que foram desativados e não incluídos no estudo. Esses poços situam-se em cotas topográficas que variam de 7 a 28 metros e localizam-se em ocupações, na área das reentrâncias do Igarapé Anjo da Guarda. Dos cinco poços perfurados foi obtido apenas um perfil construtivo, porém suficiente para caracterizar a litologia da área (Figura 7).

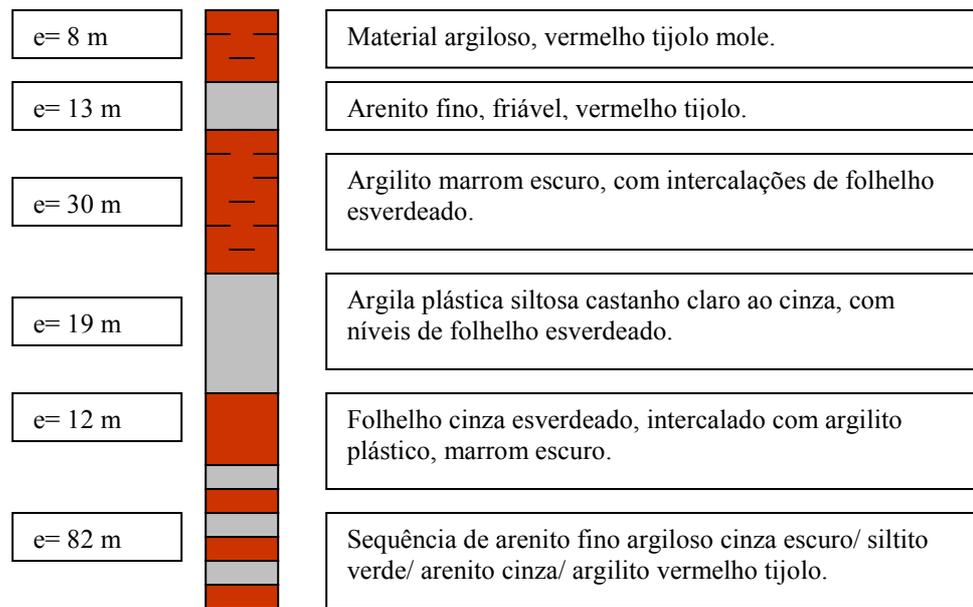


Figura 7 - Perfil litológico característico da expansão da Vila Mauro Fecury I (sem escala)

Analisando a litologia apresentada pelo perfil, observa-se que esse poço atravessa uma sequência de transição entre o Terciário e o Cretáceo. Os filtros foram instalados na sequência de arenitos a partir da profundidade de 96 metros, captando, provavelmente, do aquífero confinado da Formação Itapecuru. Este poço apresenta um nível estático de 22,0 metros estando, por isso, abaixo do nível do mar. Outro fator importante a destacar é a profundidade de perfuração desses poços, cujas informações disponíveis indicam 154,0 metros, 168 metros e 180 metros. Essas profundidades são inadequadas a perfurações nessa área, que segundo recomendações de Sudene (1972), não devem ultrapassar o limite de 80,0 metros. Aliado a todos esses fatores, temos a considerar a vazão explotada pelo poço em questão, que é da ordem de 42,2 m³/h, bastante superior, portanto, à média da área que é de 10 m³/h, o que provoca um rebaixamento de 46,0 metros, ficando o nível dinâmico na profundidade de 68,0 metros.

5.2.3 Análise dos perfis do setor oeste

No setor oeste, a área compreendida pelo porto do Itaquí, já vem sendo estudada há algum tempo, principalmente pelos problemas de salinização das águas, que são atingidas pela intrusão marinha. Exemplos clássicos, como o do Moinho de Trigo e Itaquí I, já desativados há bastante tempo, motivaram estudos por Sudene (1972), que identificou um afloramento da Formação Itapecuru na área como mostra o mapa do Anexo A.

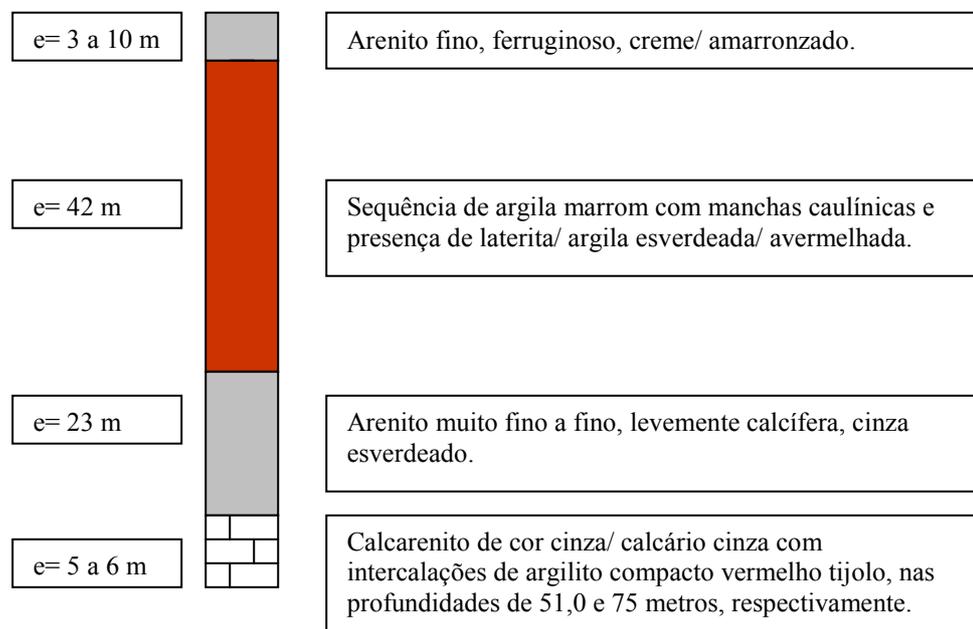


Figura 8 - Perfil litológico característico dos poços C-01 e C-02, do Porto do Itaquí (sem escala)

Recentemente, a CAEMA desativou todos os poços que ainda operavam no porto, substituindo-os pelo Sistema Italuís, que passou a abastecer a área a partir do reservatório R-12, localizado no Anjo da Guarda.

TEMPO PROSPECÇÃO GEOFÍSICA (2002) também estudou a área portuária, a pedido da CAEMA, tendo feito observações importantes quanto à litologia dos poços C-01, C-02 e H-01. Sugerem no estudo, abaixo da Formação Barreiras, a ocorrência das Formações

Camocim e Pirabas, como existem no litoral do Piauí. Porém, do modo como descreveram as sequências dessas formações, elas se assemelham bastante com a descrição do Terciário Paleogeno. Fazem, porém, um alerta interessante quanto ao leito chave de calcário existente no contato Terciário/Cretáceo, afirmando que todas as perfurações efetuadas no litoral do Piauí, que ultrapassaram essa camada, sofreram salinização imediata.

Um paradigma na área são os dois poços que abastecem o Terminal de Ferryboat, e que possuem uma profundidade em torno de 100,0 metros. Eles se encontram a menos de 500 metros da costa e não apresentam sinais de salinização elevada. Infelizmente, não se obteve nenhuma informação quanto aos dados de perfuração desses poços, de modo que são desconhecidos: a litologia, níveis estático e dinâmico, e vazão. Esses dados poderiam elucidar as razões do comportamento diferenciado dos mesmos. Uma suposição seria a baixa vazão explorada, considerando-se o baixo consumo presumido para o local, e a existência nas proximidades de apenas mais um poço, que atende a uma área de uso das Forças Armadas, e que na época das coletas encontrava-se desativado. A explicação para esse caso, de acordo com o estudo de TEMPO PROSPECÇÃO GEOFÍSICA (2002), foi a suposta existência de uma camada impermeável que impediria o avanço das águas do mar.

Uma investigação feita em uma falésia nas proximidades do ponto de atracação das embarcações possibilitou o reconhecimento da litologia do topo da área, como mostram as fotografias no Apêndice E.

5.2.4 Análise dos perfis setor centro-sul

O setor central compreende o bairro tradicional do Anjo da Guarda e o Alto da Vitória, cujos poços ainda continuam em operação. O poço do Anjo da Guarda se localiza na cota mais elevada da área (40,0 metros) e possui um perfil litológico típico do Terciário, com o contato aproximado com o Cretáceo ocorrendo abaixo dos 140,0 metros. Um corte na

Avenida dos Portugueses, lado esquerdo, sentido do Porto, mostra um interessante pacote arenoso (Apêndice F), que aumenta de espessura na direção sul.

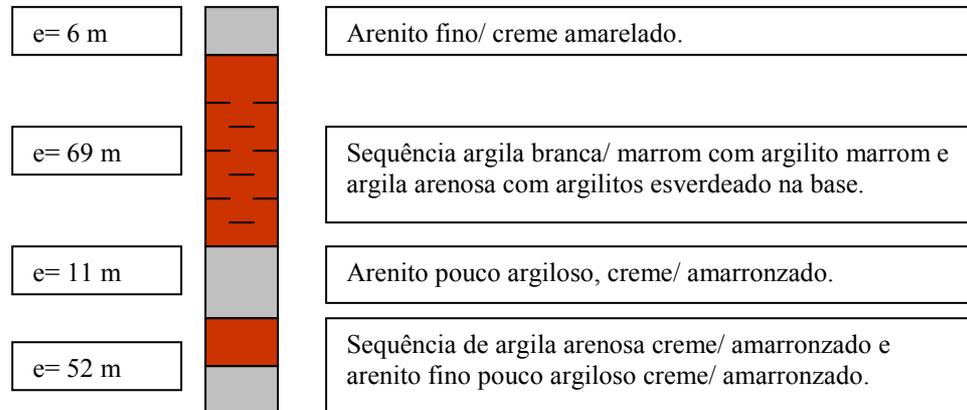


Figura 9 - Perfil Litológico do Poço C-10 do Anjo da Guarda (sem escala)

Os filtros estão posicionados nos arenitos, captando provavelmente do Terciário. A recarga local passa a ser importante, visto que o pacote arenoso aumenta sua espessura, embora o pacote argiloso existente dificulte a recarga para os níveis mais baixos, a qual possui características regionais.

O perfil do poço C-3 do Alto da Vitória possui comportamento similar aos poços já descritos para os altos topográficos, com o contato Terciário/Cretáceo, ocorrendo na profundidade de 40,0 metros, e a captação provável ocorrendo na Formação Itapecuru.

Os poços da CVRD, ocupando o setor Centro-Sul, foram implantados após uma série de estudos hidrogeológicos e hidroquímicos efetuados na pela Empresa PROMON Engenharia, que definiu tecnicamente dados importantes como: número de poços, localização e vazão explotável. Esses estudos acataram recomendações de Sudene (1972), principalmente quanto à locação dos poços ao longo da ferrovia, e obedecendo a um afastamento entre poços mínimo de 500,0 metros, posicionados dentro da área sugerida (ver retângulo em hachura no Anexo A), e vazão máxima de explotação inferior a 18 m³/h. Com isso evitou-se um aumento no rebaixamento do nível dinâmico, que poderia comprometer a operação dos sete poços. É

importante ressaltar que os poços perfurados teriam capacidade para explorar vazões muito maiores do que as sugeridas, porém com prejuízos importantes à qualidade da água. Posteriormente, a CVRD perfurou os poços do Viveiro Florestal e da Estação de Passageiros além de cinco outros em direção oeste ao Pátio de Minérios, V-10 A, V-10B, V-10C, V-10D e V-10E. Estes últimos foram perfurados em área mais próxima da costa, fugindo assim às recomendações já abordadas.

Os poços da CVRD captam água das camadas arenosas do Cretáceo, que na área encontra-se em profundidades que variam de 70,0 metros até 170,0 metros e espessura total variando entre 30,0 e 40,0 metros. De maneira geral, segundo CVRD (1983), pelos perfis litológicos dos poços que constituem o sistema de captação, estas camadas não são contínuas no sentido vertical, encontrando-se intercaladas entre camadas de argilito e separadas do Terciário pelo leito chave de calcário ou através de camadas argilosas.

O bairro da Vila Embratel, mais ao sul, tem grande parte de sua população abastecida através de seis poços operados pela CAEMA.

Os dois poços comunitários de Argola e Tambor apresentam perfis típicos do Terciário, estando o contato aproximado com camadas calcíferas situado em torno de 100,0 metros. Os poços possuem profundidades de 100,0 e 108,0 metros e a posição dos filtros se distribuem ao longo dos arenitos.

A recarga local deverá ser afetada pela rápida ocupação antrópica ocorrente na área, com implicações sobre a qualidade da água fornecida pelos poços tubulares, considerando a brusca interrupção da infiltração direta das águas pluviais, e a proximidade com o ambiente estuarino.

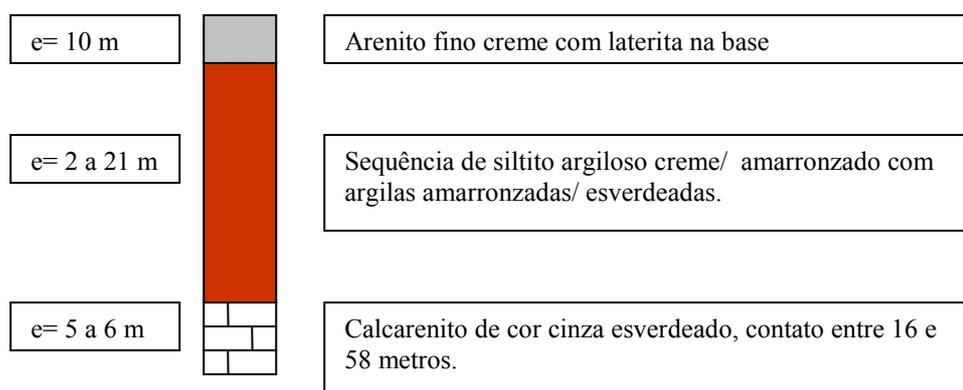


Figura 10 - Perfil litológico característico dos poços da Vila Embratel (sem escala)

5.3 ANÁLISE HIDROQUÍMICA

Os resultados das análises físico-químicas efetuadas no campo e nos Laboratórios encontram-se, respectivamente nos Apêndices G e H.

A análise dos resultados da hidroquímica será desenvolvida da mesma maneira como no item 5.2, com a divisão da área de estudo em quatro setores (leste, norte, oeste e centro-sul).

5.3.1 Análise hidroquímica do setor leste

Observando-se o Mapa 5, de isolinhas de condutividade elétrica, e os Apêndices G e H, tem-se, no setor leste um valor mais elevado no bairro Jambeiro, no poço P-9 (1.010 $\mu\text{S}/\text{cm}$). O poço localizado no Corpo de Bombeiros apresentou um valor de 633 $\mu\text{S}/\text{cm}$, enquanto que nos demais os valores ficaram entre 370 e 461 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esses valores, provavelmente, refletem o contato da água subterrânea com o leito de calcário existente na litologia da área, tanto que os valores do íon cálcio nesse setor, são significativos, como 79,56 mg/L no Jambeiro e variações de 38,28 a 45,29 mg/L nos demais.

A condutividade elétrica está diretamente ligada ao teor de sais dissolvidos na água sob a forma de íons. A partir do valor da condutividade elétrica, é possível obter de maneira prática uma indicação dos Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), utilizando a relação proposta por Freeze e Cherry (1979) expressa em mg/L:

$$\text{SDT} = A \cdot C \quad (1)$$

Sendo que,

A = Fator de conversão que depende da composição iônica da solução, e que se situa entre 0,55 a 0,75;

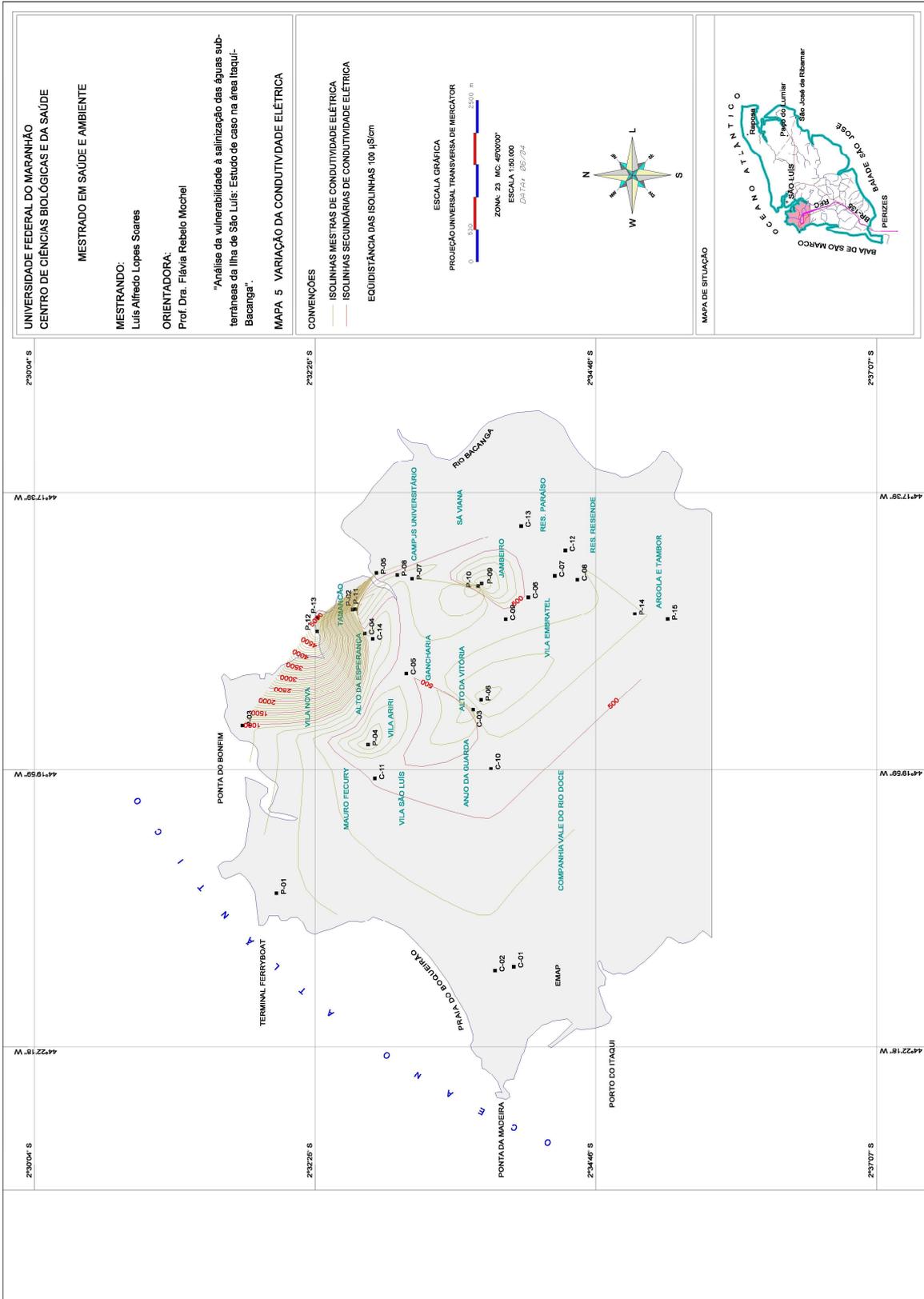
C = Condutividade elétrica, em $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Utilizando-se o valor médio de 0,65, temos para o poço do Jambeiro, um valor de 656,5 mg/L de SDT, que é um valor bastante elevado (o VMP para consumo humano, segundo a Portaria 518/2004, é de 1000 mg/L). Assim, sempre que for apresentado um valor de condutividade elétrica, é importante para o estudo fazer-se a associação com o conteúdo total de sais dissolvidos.

Analisando-se os teores de cloreto (Mapa 6), vê-se que o valor mais elevado é do P-09 do Jambeiro, mesmo assim é um valor pouco significativo (17,5 mg/L).

Quanto às razões iônicas (Mapas 7 e 8), o único valor alterado foi apresentado no poço P-08 da UFMA, cujo valor de 1,60 encontra-se um pouco acima do limite máximo para águas continentais.

No setor leste, no Jambeiro, existe um poço raso (cacimba), o P-10, no qual foram efetuadas análises para comparações. Os valores encontrados registram as características das águas doces locais, armazenadas na zona insaturada, possivelmente com influência do nível freático raso. Por exemplo, íon cálcio de 4,01 mg/L, condutividade com 145,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, íon cloreto com 2,0 mg/L e íon bicarbonato de 4,38 mg/L.



Mapa 5 - Variação da Condutividade Elétrica

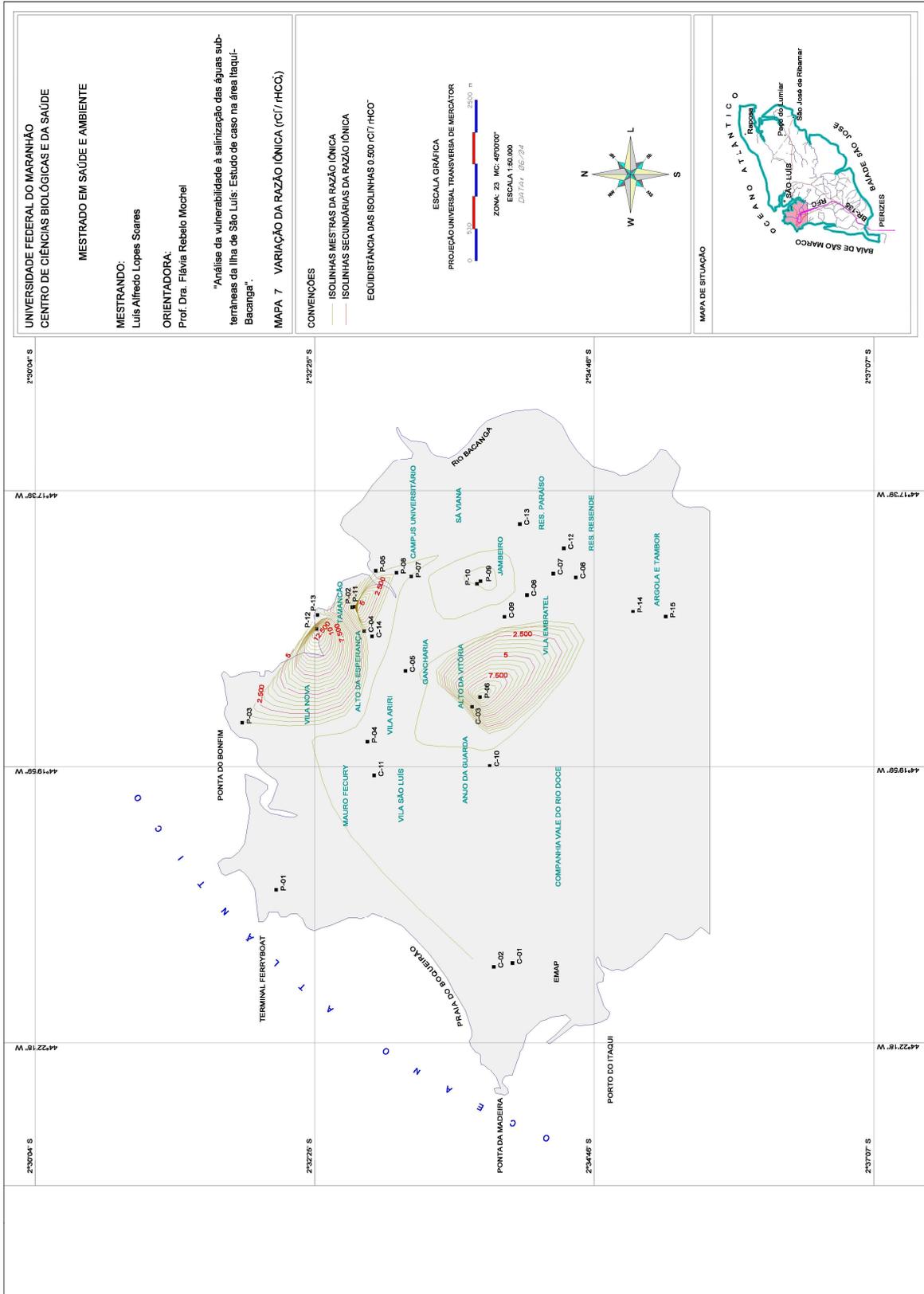
Um aspecto anterior, e que merece destaque nesse setor, foi a ocorrência no bairro do Sá Viana de problemas de intrusão salina nos poços (SV-01, SV-02, SV-03 e SV-04) que abasteciam essa comunidade. Nesses poços a concentração do íon cloreto chegou a valores de 5.650 mg/L, o que obrigou a CAEMA a promover a desativação dos mesmos. As causas prováveis da salinização podem ser:

a) A camada superficial arenosa pouco espessa, seguido de uma sequência argilosa de 20 metros, sobre outra camada de arenito com 12 metros. Com esse perfil a recarga direta é pouco significativo, prevalecendo a recarga regional com águas mais ricas em sais, considerando o tempo de residência destas no meio poroso.

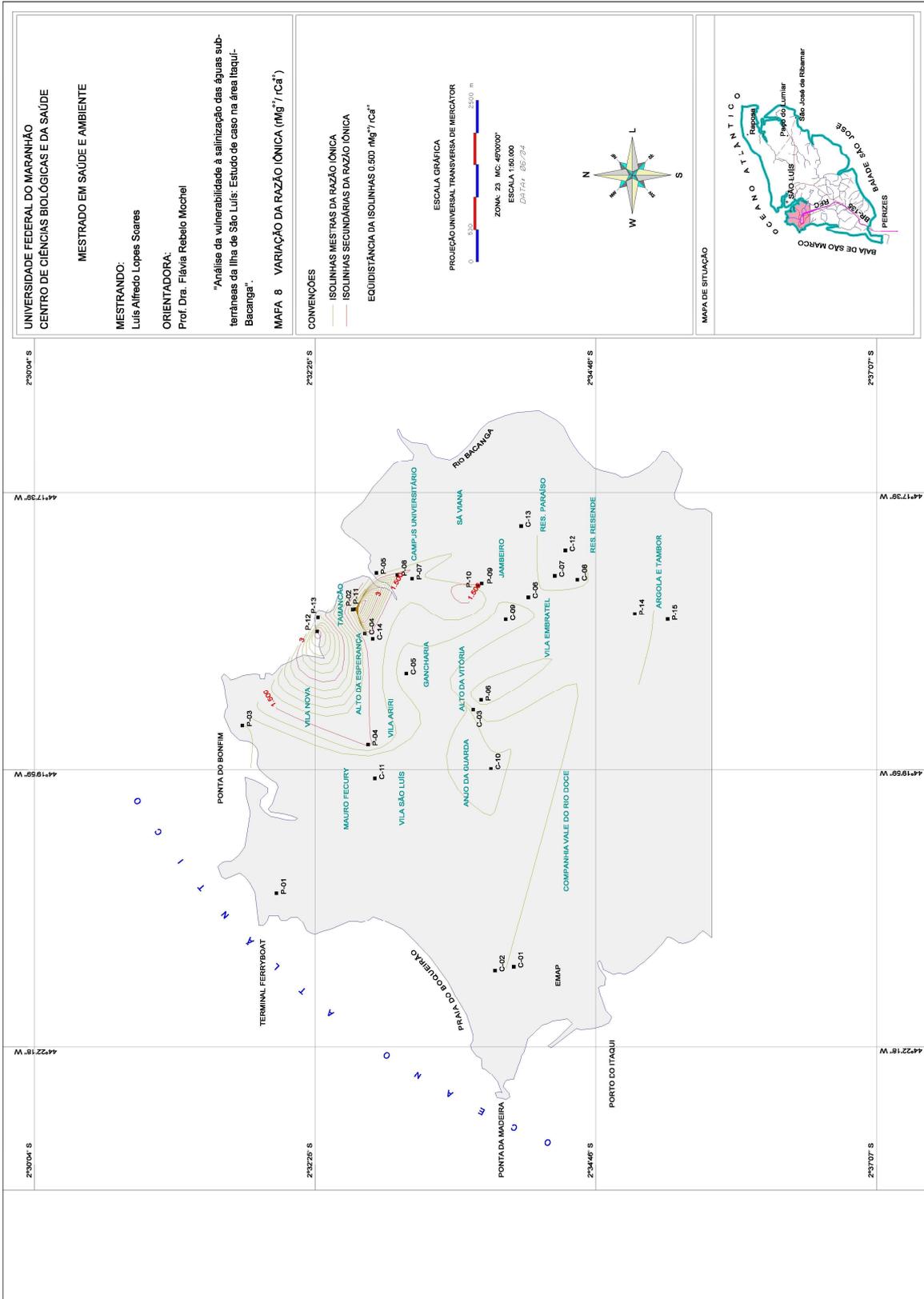
b) O nível estático dos poços sempre se encontra abaixo do nível do mar, o que pode, associado ao bombeamento simultâneo dos quatro poços, provocar uma recarga horizontal das águas da barragem do Bacanga para o aquífero captado, pela redução da carga hidrostática da água doce.

c) A localização dos quatro poços, muito próximos entre si, reforçando a hipótese anterior.

d) A associação de todos esses fatores.



Mapa 7 - Variação da Razão Iônica (rCl⁻/HCO₃⁻)



Mapa 8 - Variação da Razão Iônica ($\text{rMg}^{+2}/\text{rCa}^{+2}$)

5.3.2 Análise hidroquímica do setor norte

Analisando-se os Mapas de isovalores, em todos chama atenção o aumento de concentração dos parâmetros nos poços do Tamancão. Os resultados do íon cloreto nas análises realizadas neste estudo foram de 123,0 e 117,0 mg/L, respectivamente, nos poços P-12 e P-13. O poço do Estaleiro Escola (P-13), perfurado em julho de 2001, quando em bombeamento contínuo, apresentou um resultado de condutividade elétrica de 5.870 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 2.850 mg/L de cloreto. Acreditamos que os baixos valores obtidos nas análises deste trabalho foram influenciados pelo pouco tempo de funcionamento dos poços (15 minutos), que na oportunidade se encontravam fora de operação.

Os fatores que influenciaram na ocorrência de salinização desses poços são similares ao ocorrido com os poços do Sá Viana. Pelos perfis construtivos disponíveis, acredita-se na interconexão do leito de arenito com o estuário do rio Bacanga. Nas proximidades, considerando-se os bairros do Residencial Ana Jansen e Alto da Esperança, já operam, ao todo, sete poços. Vale ressaltar o nível das invasões que vêm ocorrendo no entorno, com forte pressão de demanda pela perfuração de novos poços. Fatos similares vêm ocorrendo no entorno da Ponta do Bonfim, onde funciona um Hospital para pacientes com hanseníase. A litologia desse trecho do setor norte é bastante similar, de modo que os riscos de salinização são previsíveis.

No Residencial Ana Jansen o poço P-11 abastece uma residência, e embora o valor da razão cloreto/bicarbonato tenha sido elevado (6,0), os valores individuais são bastante baixos: 2,0 mg/L para o íon cloreto e 0,67 mg/L para o íon bicarbonato. Como a perfuração desse poço foi efetuada manualmente, segundo informações, a profundidade é de no máximo 20,0 metros. O baixo valor encontrado para a condutividade elétrica, 46,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sugere a captação de águas recentes do lençol mais superficial. Os valores obtidos para os

íons cálcio e magnésio foram, respectivamente, de 0,40 e 1,24 mg/L, ou seja, água pouco mineralizada.

No setor Norte, tem-se ainda as vilas São Luís (C-11), Ariri (P-04) e Mauro Fecury I (MF-01, MF-02, MF-03, MF-04 E MF-05), e entorno. A análise dos mapas de isovalores mostra apenas um valor relativamente alto na razão magnésio/cálcio, no poço P-04 da Vila Ariri (1,55), um pouco acima do limite para águas continentais que é de 1,50, embora os valores individuais sejam baixos, sendo 2,20 mg/L para cálcio e 2,07 mg/L para magnésio. Apenas o íon bicarbonato apresenta um valor estranhamente alto (37,02 mg/L), levando-se em conta os baixos valores dos íons cálcio e magnésio.

Observam-se também nos mapas a baixa densidade de poços na área, o que de certo modo é um fator positivo e preventivo contra a salinização.

Esse fator não foi levado em conta quando da perfuração de cinco poços na Vila Mauro Fecury I e entorno, pela Prefeitura Municipal, com o intuito de resolver os problemas sociais advindos da falta de abastecimento público de água. A proximidade entre os poços e as grandes vazões solicitadas pela demanda, aliada às baixas cotas, litologia adversa e grande profundidade dos poços, culminaram na salinização das águas dos mesmos.

Duas análises físico-químicas realizadas quando da perfuração desses poços apresentaram valores de 36,0 e 45,0 mg/L para cloreto, e baixos valores para cálcio e magnésio, de 3,0 e 4,0 mg/L, respectivamente. Esses valores caracterizam essas águas, provavelmente, como cloretada sódica. Quando em operação, o conjunto de poços explorando vazões individuais de até 45,0 m³/h, pode ter levado o sistema aquífero à perda da pressão hidrostática de água doce, permitindo assim a intrusão de águas marinhas.

5.3.3 Análise hidroquímica do setor oeste

O setor Oeste é representado pelos poços do Porto do Itaquí, C-01 e C-02, e o P-04 no Terminal de Ferryboat, além dos poços históricos H-01 e H-02.

Os resultados dos poços C-01 e C-02 apresentaram baixos valores para: a razão $rCl/rHCO_3^-$, respectivamente 0,49 e 0,46; o íon cloreto, 9,0 e 8,5 mg/L, e a razão rMg^{+2}/rCa^{+2} com 0,94 e 0,81. Os valores de condutividade foram relativamente altos, 692 e 651 $\mu S/cm$, e as concentrações de cálcio e magnésio também foram bastante elevadas, 66,53 e 59,52 mg/L para cálcio e 37,94 e 31,37 mg/L para magnésio. Esses valores sugerem o leito de calcário como enriquecedor dessas águas.

As águas do poço P-04 do Terminal de Ferryboat apresentam valores similares aos dos poços C-01 e C-02, com exceção aos valores mais baixos de 11,42 mg/L para cálcio, e 4,37 mg/L para magnésio, embora tenha apresentado uma condutividade elétrica de 700 $\mu S/cm$.

Dados históricos apresentados por TEMPO PROSPECÇÃO GEOFÍSICA (2002) para os poços C-01 e C-02, mostram resultados próximos aos atuais, com valores mais altos apenas para íon cloreto, que no poço C-01 variou de 185,0 a 272,0 mg/L, e no C-02 de 56,6 a 125 mg/L. O íon bicarbonato, para ambos os poços, apresentou valores na faixa de 200 mg/L. Nesse estudo foram apresentados ainda, dados interessantes de análises relativas ao poço H-01 (P-03, no código da CAEMA), que se encontra atualmente desativado. Os resultados dessas análises são apresentados na Tabela 5.

Observa-se na Tabela 5, que os valores da razão $rCl/rHCO_3^-$ e da condutividade são extremamente elevados, caracterizando sem nenhuma dúvida, a intrusão salina na área.

Tabela 5 - Dados Históricos do poço H-01

Data	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	Cloreto mg/L	HCO ₃ mg/L	Razão rCl/rHCO ₃	Magnésio mg/L	Cálcio mg/L	Razão rMg/rCa
25/9/1991	2000,00	2500,00	266,00	16,21	43,74	83,00	0,29
11/6/1992	3750,00	560,00	233,00	4,14	54,43	65,60	0,50
24/8/2000	1997,00	8500,00	568,00	25,78	(*)	(*)	(*)
5/7/2002	2213,00	572,00	28,57	35,13	49,79	49,79	0,49

(*) Sem informação.

Fonte: TEMPO PROSPECÇÃO GEOFÍSICA (2002).

Uma questão intrigante se relaciona aos poços C-02 e H-01, que estão localizados muito próximos, de tal modo que é provável haver interferência entre os cones de depressão. Ainda assim, somente a água do C-02 é potável, enquanto o poço H-01 foi desativado com água salobra.

É importante destacar os estudos de caracterização química das águas, na área Itaquí-Bacanga, efetuados por Sudene (1972), que analisaram os poços tubulares I-1 e I-2, perfurados para esse propósito. O poço I-1 foi perfurado no antigo trevo rodoviário, hoje acesso ao Terminal de Passageiros da CVRD, com uma profundidade de 430 metros. O poço I-2, com profundidade de 141 metros, foi localizado no bairro do Anjo da Guarda.

Esses estudos, utilizando o diagrama de Piper, classificaram essas águas, com relação aos cátions dissolvidos, em mistas. Notaram, entretanto, que no poço I-1, ocorreu um decréscimo, durante o bombeamento, de 25% para 5% do íon magnésio enquanto houve um acréscimo em sódio-potássio de 75% para 90%. Essas águas passaram então da condição de mistas para sódico-potássica. Ressalte-se, entretanto, que o poço I-1 com sua elevada profundidade (430,0 metros), captava água dos dois aquíferos, ultrapassando o valor da relação de Ghyben-Herzberg, que para esse ponto era de 220 metros. Segundo tal relação o aquífero inferior captado estaria totalmente inserido na zona de água salgada. Quanto ao poço I-2, observaram que durante os quatro dias de bombeamento os teores de sódio-potássio e cálcio permaneceram os mesmos, tendo diminuído apenas o teor de magnésio.

A presença significativa do magnésio no início sugere que as águas percolam sedimentos ricos em carbonatos, tendo um tempo de residência prolongada no meio poroso. Posteriormente, com o avanço do bombeamento, e devido à baixa transmissividade das camadas superiores, as águas dos estratos superiores diminuem sua contribuição e dá-se o fenômeno do “upconing”.

Quanto aos ânions, as águas coletadas do poço I-2 foram classificadas como bicarbonatadas. No poço I-1, no início do bombeamento a água era mista (bicarbonatada cloretada) e no segundo dia de bombeamento, passou a ser cloretada.

Quanto aos sais dissolvidos, Sudene (1972) relata que no poço I-1, durante o bombeamento, houve grande variação destes, cujos valores passaram de 237,0 mg/L para 5812,0 mg/L. Esse aumento de concentração deve-se, principalmente, a elevação dos teores de sódio e cloreto. No poço I-2 a variação foi pequena, passando de 214,0 mg/L para 332,0 mg/L.

O bombeamento prolongado determina o ingresso de águas subterrâneas marinhas nos poços tubulares, principalmente naqueles mais profundos, o que é explicável através da ocorrência de “upconing”.

5.3.4 Análise hidroquímica do setor centro-sul

Os resultados das análises efetuadas nos poços do Anjo da Guarda (C-10) e Alto da Vitória (C-03) apresentaram valores bastante próximos, com exceção da condutividade elétrica, cujos resultados foram de 442,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no C-10, e 763,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no C-03. Essa variação, provavelmente, deve-se ao posicionamento dos filtros nos poços, que captam águas do aquífero Terciário no poço do Anjo da Guarda, enquanto que no Alto da Vitória essa captação ocorre no aquífero da Formação Itapecuru abaixo, portanto, do leito de calcário.

Com relação aos poços da CVRD, foram levantados dados históricos, que constam na Tabela 6, onde se encontram em destaque, os valores mais elevados.

Tabela 6 - Dados Históricos dos poços da CVRD

Data: 1983								
Parâmetros	V-01	V-02	V-03	V-04	V-05	V-10A	V-10B	V-10E
pH	7,28	7,76	7,87	7,86	7,32			
STD (mg/L)								
Cloreto (mg/L)	223,00	12,00	17,00	12,00	12,00			
Cálcio (mg/L)	36,00	36,80	50,40	42,40	16,80			
Magnésio (mg/L)	11,70	13,10	10,20	26,20	8,70			

Data: 13/04/2000								
Parâmetros	V-01	V-02	V-03	V-04	V-05	V-10A	V-10B	V-10E
pH	6,70	8,04	8,41	7,24	8,12	8,32		7,48
STD (mg/L)								
Cloreto (mg/L)	13,80	13,80	12,50	18,30	16,60	173,70		40,90
Cálcio (mg/L)	30,60	180,20	136,00	40,20	88,40	54,40		48,20
Magnésio (mg/L)								

Data: 16/06/2000								
Parâmetros	V-01	V-02	V-03	V-04	V-05	V-10A	V-10B	V-10E
pH	7,51	7,77	8,41	7,24	7,43	8,28	7,81	7,70
STD (mg/L)	226,00	394,00	292,00	254,00	362,00		292,00	222,00
Cloreto (mg/L)	28,10	5,40	12,50	18,30		9,40	32,16	22,70
Cálcio (mg/L)	74,80	3,65	136,00	40,20	10,22	136,00	50,34	47,60
Magnésio (mg/L)	0,08							

Fonte: Secretaria de Estado do Meio Ambiente

Os resultados obtidos para os poços da Vila Embratel apresentaram valores considerados normais, apenas com teores mais elevados do íon cálcio que ficaram na faixa de 45,0 mg/L e os de condutividade em torno de 420,0 μ S/cm. Os resultados dos poços de Argola e Tambor ficaram na mesma faixa de valores da Vila Embratel.

5.4 ANÁLISE DO GRAU DE HOMOGENEIDADE QUÍMICA.

A determinação do grau de homogeneidade química das águas subterrâneas da área Itaquí - Bacanga foi efetuada utilizando-se a análise hierárquica de agrupamentos e os resultados estão apresentados no dendrograma do Gráfico 2.

As variáveis utilizadas para a análise dos agrupamentos foram os valores das razões iônicas (rCl^-/HCO_3^- e Mg^{+2}/Ca^{+2}), da condutividade elétrica e do íon cloreto.

Uma melhor compreensão dos agrupamentos formados pelo dendrograma pode ser obtida pelo Gráfico 3, que mostra os valores das razões rCl^-/HCO_3^- e Mg^{+2}/Ca^{+2} , com indicação dos limites máximos para águas continentais.

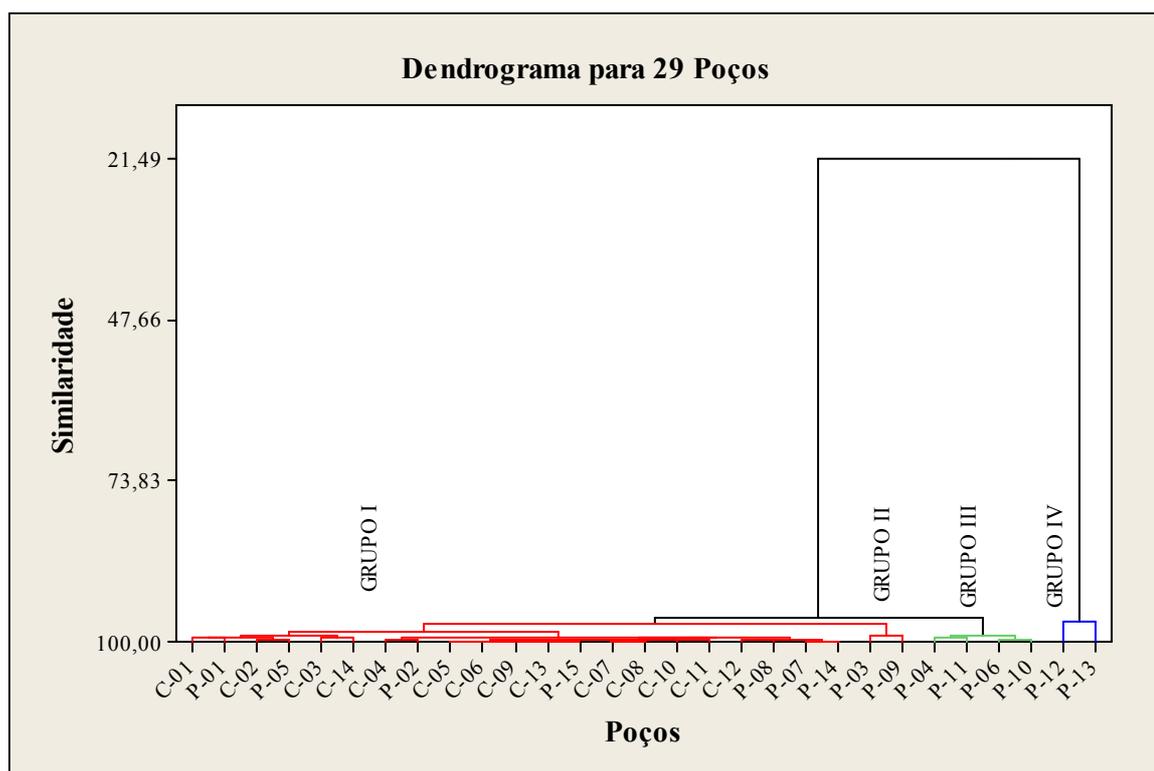


Gráfico 2 - Dendrograma referente às águas da área Itaquí – Bacanga

Pelos resultados apresentados é possível identificar quatro agrupamentos que chamaremos de grupos I, II e III e IV. O grupo I, associam a maioria dos poços, de C-01 até

P-14, o grupo II, os poços P-03 e P-09, o grupo III, os poços P-04, P-11, P-06 e P-10 e o grupo IV com os poços P-12 e P-13 que se apresenta mais diferenciado devido o elevado valor do coeficiente de distância em função às demais águas da área.

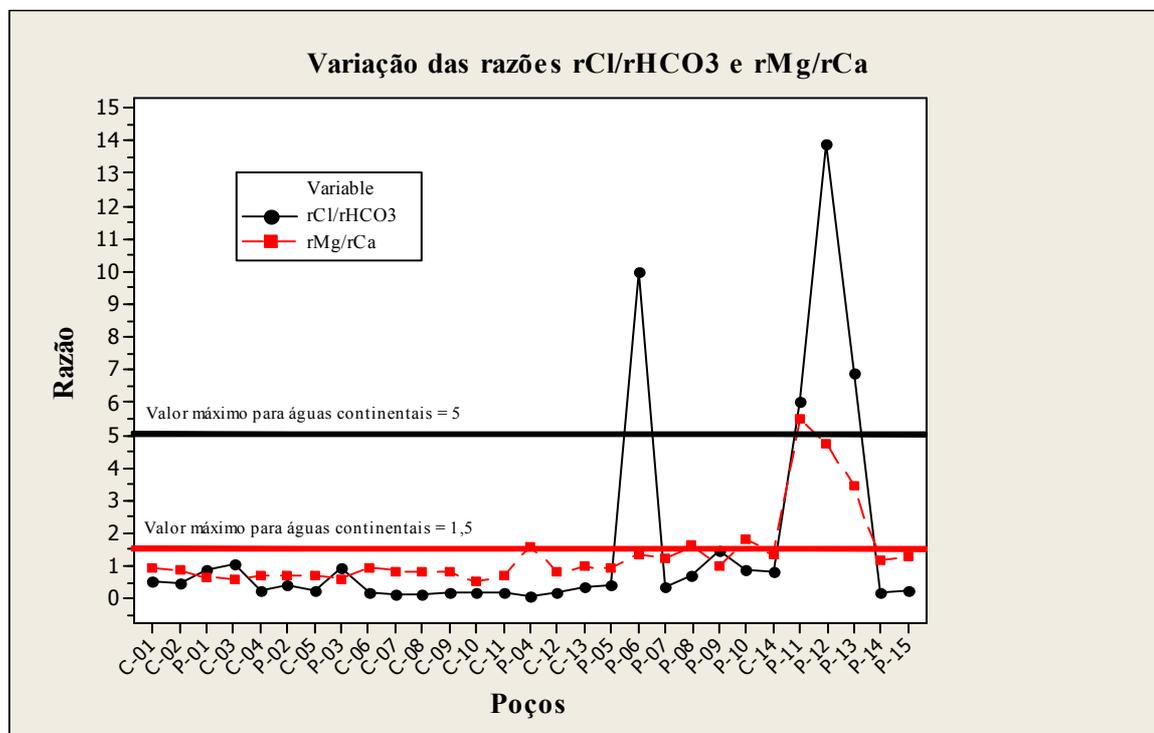


Gráfico 3 - Razões iônicas rCl^-/HCO_3^- e Mg^{+2}/Ca^{+2}

Analisando-se os histogramas de distribuição de frequência apresentados no Gráfico 4, e comparando-se com os agrupamentos observa-se que para todos os parâmetros existe uma maior concentração de valores nas faixas iniciais. Fica inicialmente evidenciada uma alta similaridade entre os três primeiros grupos (I, II e III), em torno de 98%, e juntos, uma baixíssima similaridade com o grupo IV (21,49 %).

Os três primeiros grupos apresentam:

a) Grupo I: Possui uma similaridade de 98,35 % e os mais baixos valores de cloreto, de condutividade e das razões iônicas.

b) Grupo II: Possui apenas dois poços (P-03 e P-9), com comportamento próximo aos do Grupo I, variando apenas nos elevados teores de condutividade (950 e 1010 $\mu\text{S/cm}$), respectivamente.

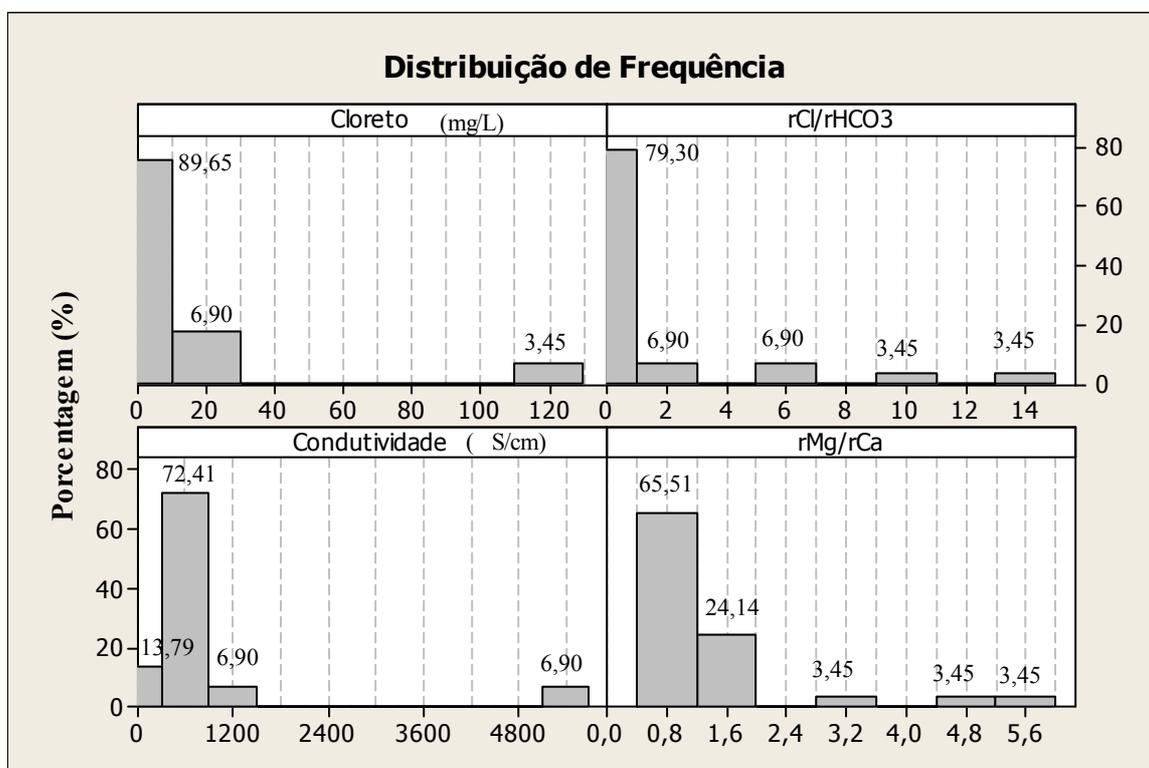


Gráfico 4 - Histogramas de Distribuição de Frequência

c) Grupo III: Apresenta comportamento bastante similar aos dois primeiros, porém com concentrações de cloreto um pouco mais elevadas, entre 13,5 e 17,5 mg/L e razões um pouco maiores.

Quanto ao Grupo IV, que compreende apenas os poços P-12 e P-13, que são os poços do bairro Tamancão, possuem todas as concentrações mais elevadas, diferenciando-se assim dos demais grupos.

Os gráficos da variação do íon cloreto (Gráfico 5), e da condutividades elétrica (Gráfico 6), mostram a uniformidade que normalmente ocorrem entre os valores dessas duas variáveis químicas.

Desse modo, é importante notar que os constituintes químicos das águas subterrâneas na área de estudo apresentam-se bastante homogêneos refletindo assim a uniformidade litológica local.

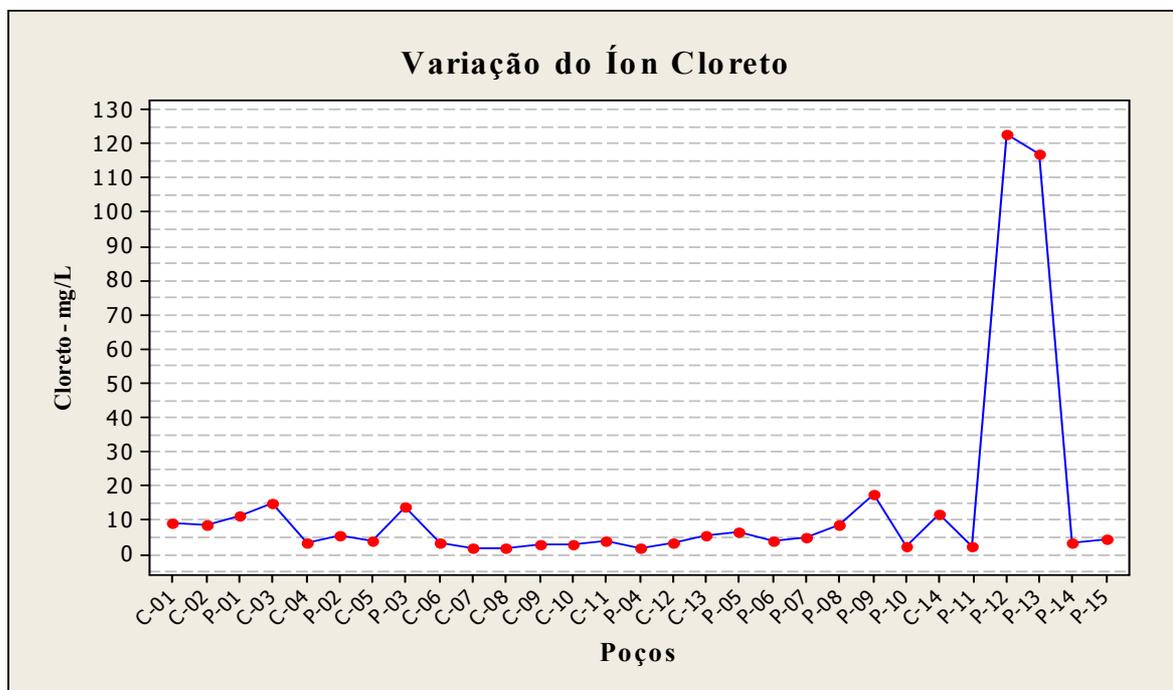


Gráfico 5 - Variação do Íon Cloreto

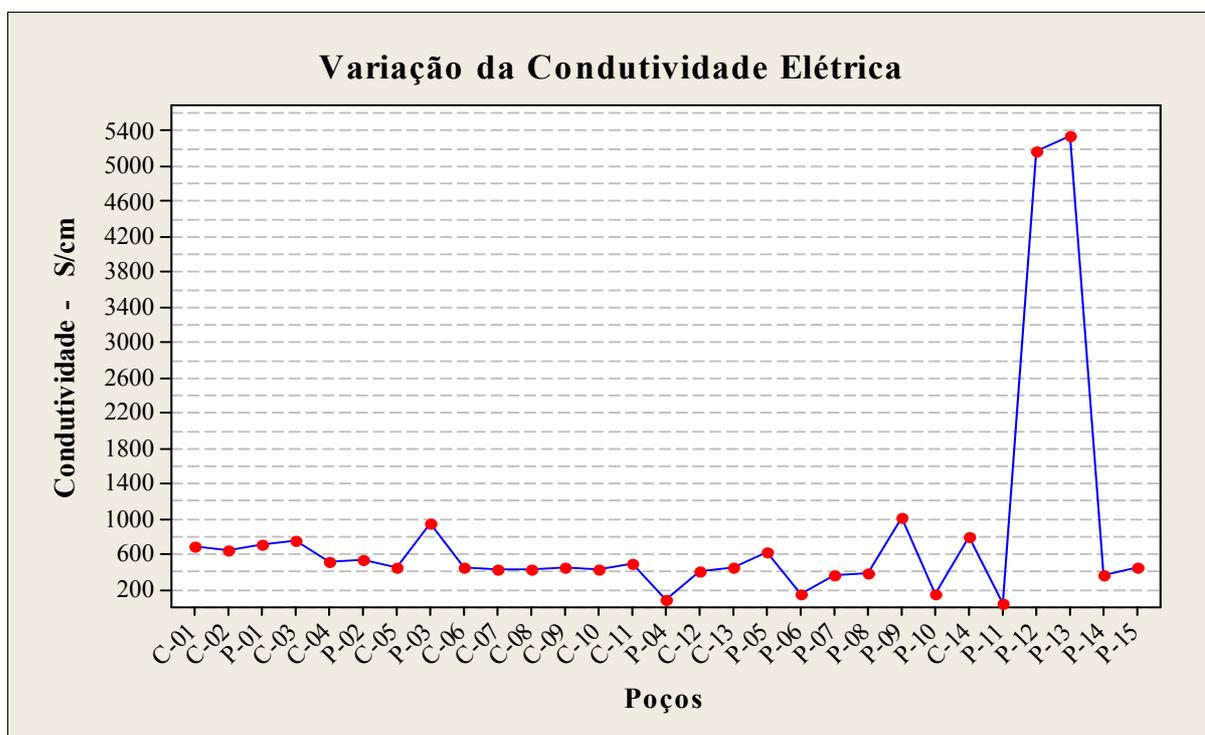


Gráfico 6 - Variação da Condutividade Elétrica

5.5 ANÁLISE HIDROGEOQUÍMICA

Os elementos da geologia e do relevo condicionam as características dos aquíferos, bem como da qualidade de suas águas. Com a finalidade de estudar essas interações, foram elaborados gráficos que apresentam o comportamento geotopográfico da área, associando-os aos resultados das análises físico-químicas.

Para a elaboração destes gráficos foram consideradas duas seções transversais no terreno, sendo uma na direção W-E/SE, paralela a Avenida dos Portugueses, e outra SW-NE/NW, paralela ao rio Bacanga (Mapa 4).

Para uma melhor compreensão, os gráficos encontram-se sobrepostos: um superior correspondente aos dados geotopográficos, e outro inferior com os resultados dos íons e das razões iônicas correspondentes.

Os resultados encontram-se nos Gráficos 7, 8, 9 e 10.

5.5.1 Análise dos gráficos da seção W-E/SE

Na seção W-E/SE se encontram os poços C-01, C-02, C-10, C-03, P-09 e C-13, e os resultados estão apresentados nos Gráficos 7 e 8. Observe-se que os Gráficos 7 e 8 possuem a mesma seção geotopográfica, respectivamente 7a e 8a. Quanto aos gráficos 7b e 8b, cada um apresenta parâmetros químicos diferentes, o primeiro mostra os resultados de cloreto, bicarbonato e da razão $rCl^-/rHCO_3^-$, enquanto que no segundo temos os valores de cálcio, magnésio e da razão Mg^{+2}/Ca^{+2} .

Uma primeira análise dos gráficos 7a e 8a mostra a posição do nível estático dos poços abaixo do nível do mar, com exceção do poço C-10 (Anjo da Guarda). Este fato representa um fator importante na caracterização da vulnerabilidade dos aquíferos na área.

É interessante notar a discordância do contato estratigráfico aproximado, ao longo da seção. No poço C-10, esse contato encontra-se em cota abaixo de 140,0 metros, subindo em direção ao poço C-03 (Alto da Vitória), onde esse contato atinge 46,0 metros. Os resultados físico-químicos acompanham essa variação, onde se observam valores baixos para o íon cloreto no gráfico 7b, e também mais baixos para os íons cálcio e magnésio no gráfico 7b. Este fato sugere a prevalência de águas mais recentes, com menor permanência no meio poroso, ou como sugerido no item 5.3.4.

Entre os poços C-03 (Alto da Vitória) e P-09 (Jambeiro), ocorre um aprofundamento do contato, acompanhado de uma redução de cota topográfica. O poço do Jambeiro, como citado no item 5.2.1, situa-se em um plano fluvio-marinho e com formação litológica inibidora à recarga local. Isso contribui para que essas águas possuam grandes quantidades de sais dissolvidos (CE de 1010 $\mu\text{S}/\text{cm}$), além de valores elevados de cálcio e magnésio, e principalmente da razão $r\text{Cl}/r\text{HCO}_3^-$. Esse enriquecimento mineral, provavelmente, já possua alguma influência pontual de misturas com águas marinhas.

Do Jambeiro para o Residencial Paraíso (C-13), a superfície apresenta-se ondulada favorecendo a recarga natural, devido à existência de camadas de arenitos aflorantes, o que facilita a infiltração e a drenança para os níveis mais baixos. Essa situação certamente influi na redução dos valores de cálcio e magnésio.

5.5.2 Análise dos gráficos da seção SW-NE/NW

Na seção SW-NE/NW se encontram os poços P-15, P-14, C-08, C-07, C-13, P-09, P-08, P-05, P-02 e P-13, e os resultados estão apresentados nos Gráficos 9 e 10. A metodologia de exposição dos gráficos é a mesma utilizada para a seção anterior.

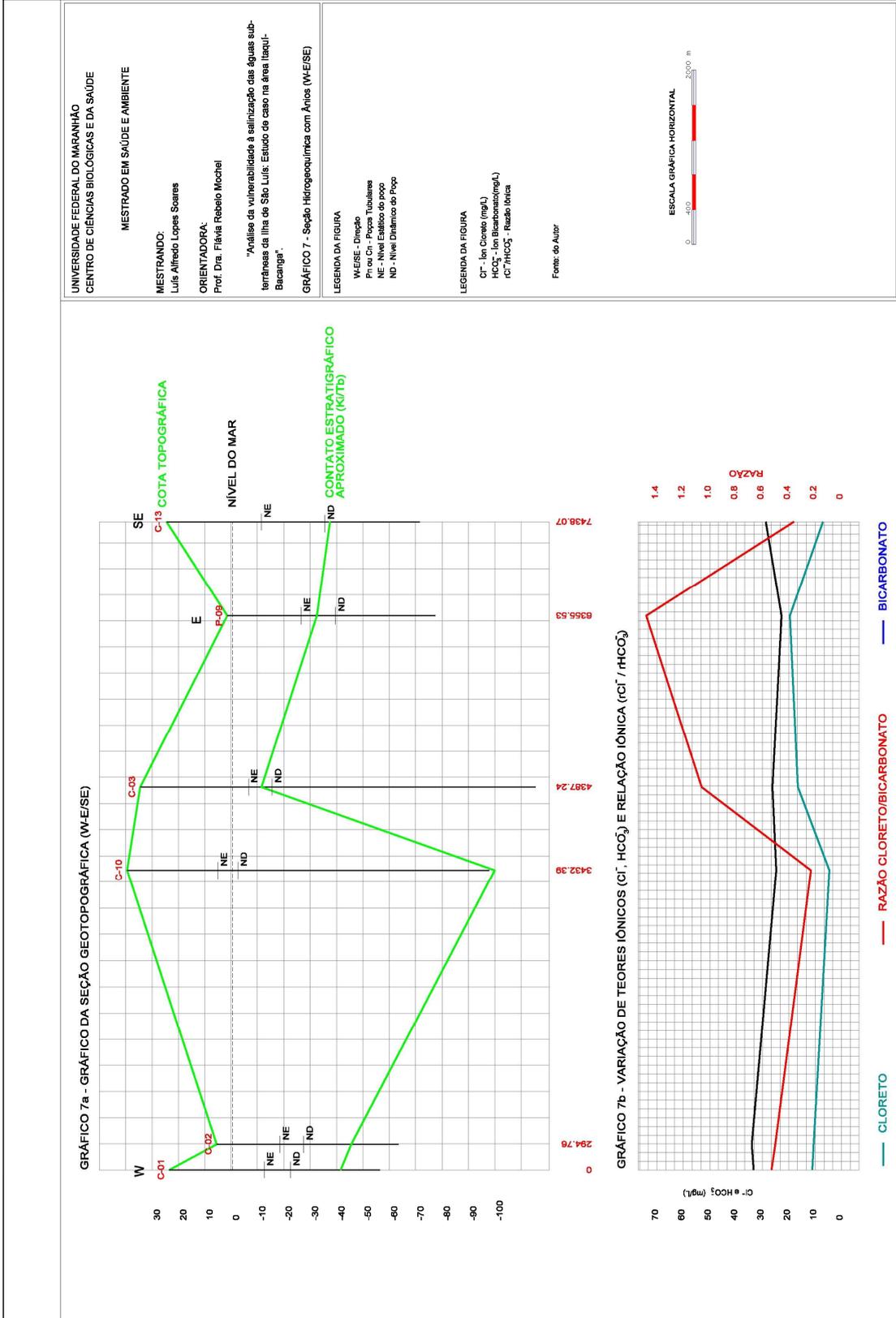


Gráfico 7 - Seção Hidrogeoquímica com Ânions (W-E/SE)

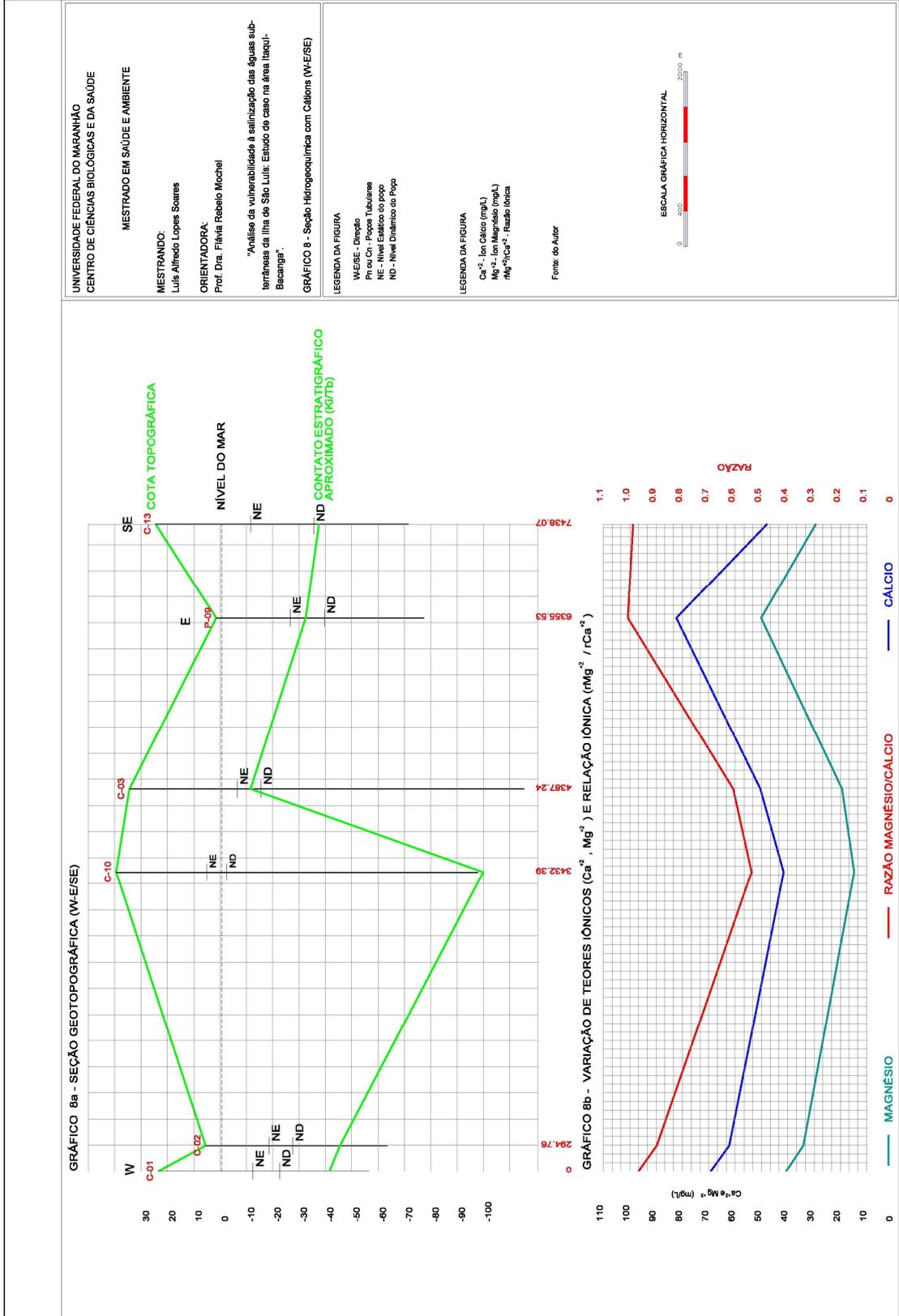


Gráfico 8 - Seção Hidrogeométrica com Cátions (W-E/SE)

Do mesmo modo que nos gráficos da seção anterior, verifica-se que o nível estático dos poços encontra-se abaixo do nível mar, caracterizando deste modo, para toda a área de estudo, um importante fator que favorece a contaminação dos aquíferos por intrusão salina.

No trecho SW-NE/NW, entre os poços P-15 e C-13, podem ser vistos nos gráficos 9b e 10b uma certa homogeneidade entre os valores dos parâmetros químicos estudados. O trecho entre poços C-13 (Residencial Paraíso) e P-09 (Jambeiro) é comum para as duas seções. A partir do poço P-09, acompanhando o desnível topográfico, ocorre uma alternância entre os valores das concentrações dos íons com valores maiores nos baixos topográficos e menores nos altos topográficos, principalmente com relação às concentrações de cálcio.

Quando a seção atinge o Tamancão há um aumento substancial nos níveis de cloreto, magnésio e respectivas razões, e obviamente redução nos teores de cálcio, indicando condição de intrusão marinha.

Observa-se ainda, tanto no gráfico 8b quanto no gráfico 10b, uma homogeneidade nos valores de bicarbonato. O HCO_3^- , na água subterrânea origina-se do CO_2 que existe na zona não saturada e da dissolução de minerais carbonáticos, como a calcita e a dolomita. Como estes minerais têm ocorrência significativa nas bacias sedimentares, e como dissolvem rapidamente em contato com CO_2 , o HCO_3^- é quase sempre o ânion dominante na área de recarga.

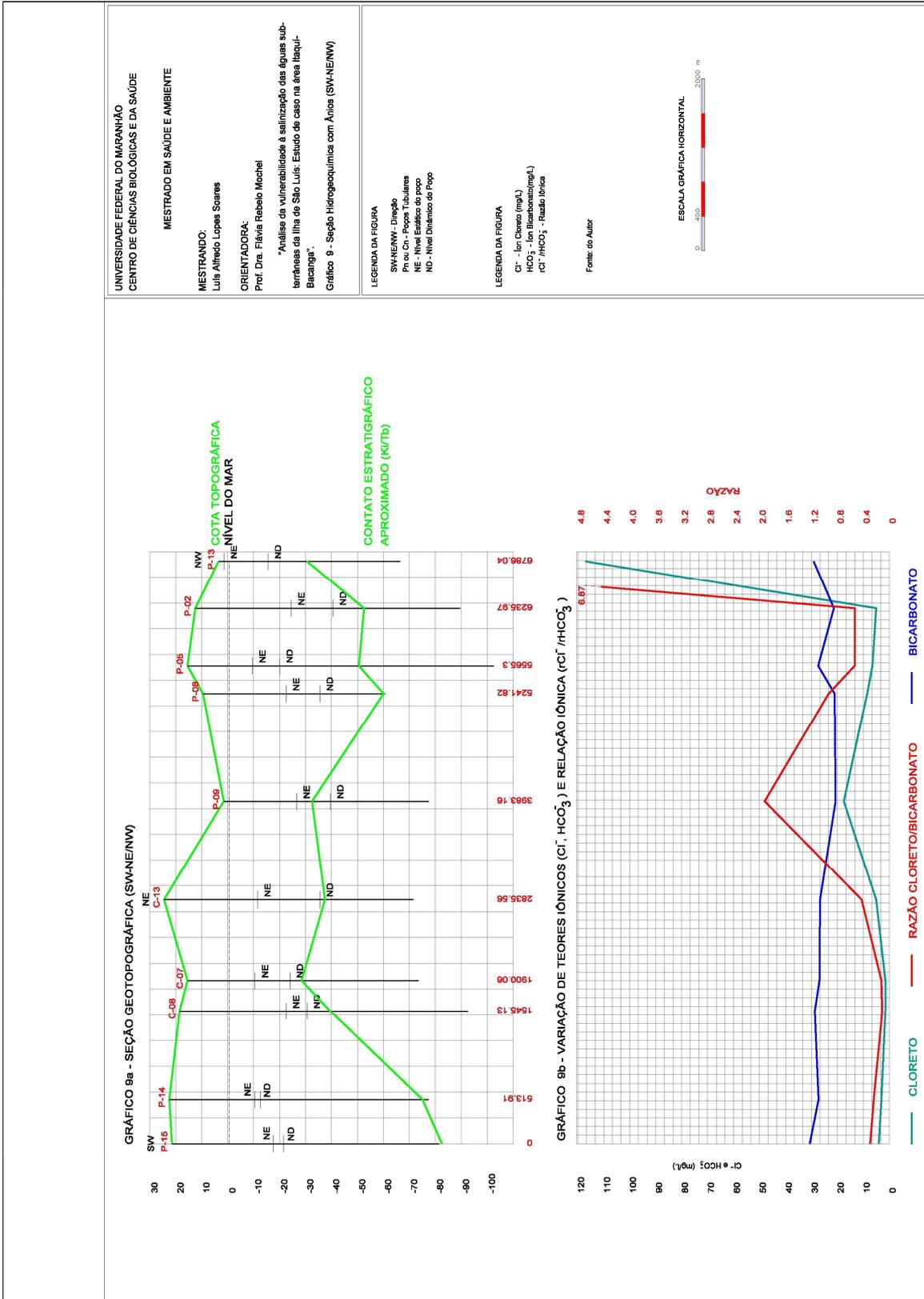


Gráfico 9 - Seção Hidrogeoquímica com Ânions (SW-NE/NW)

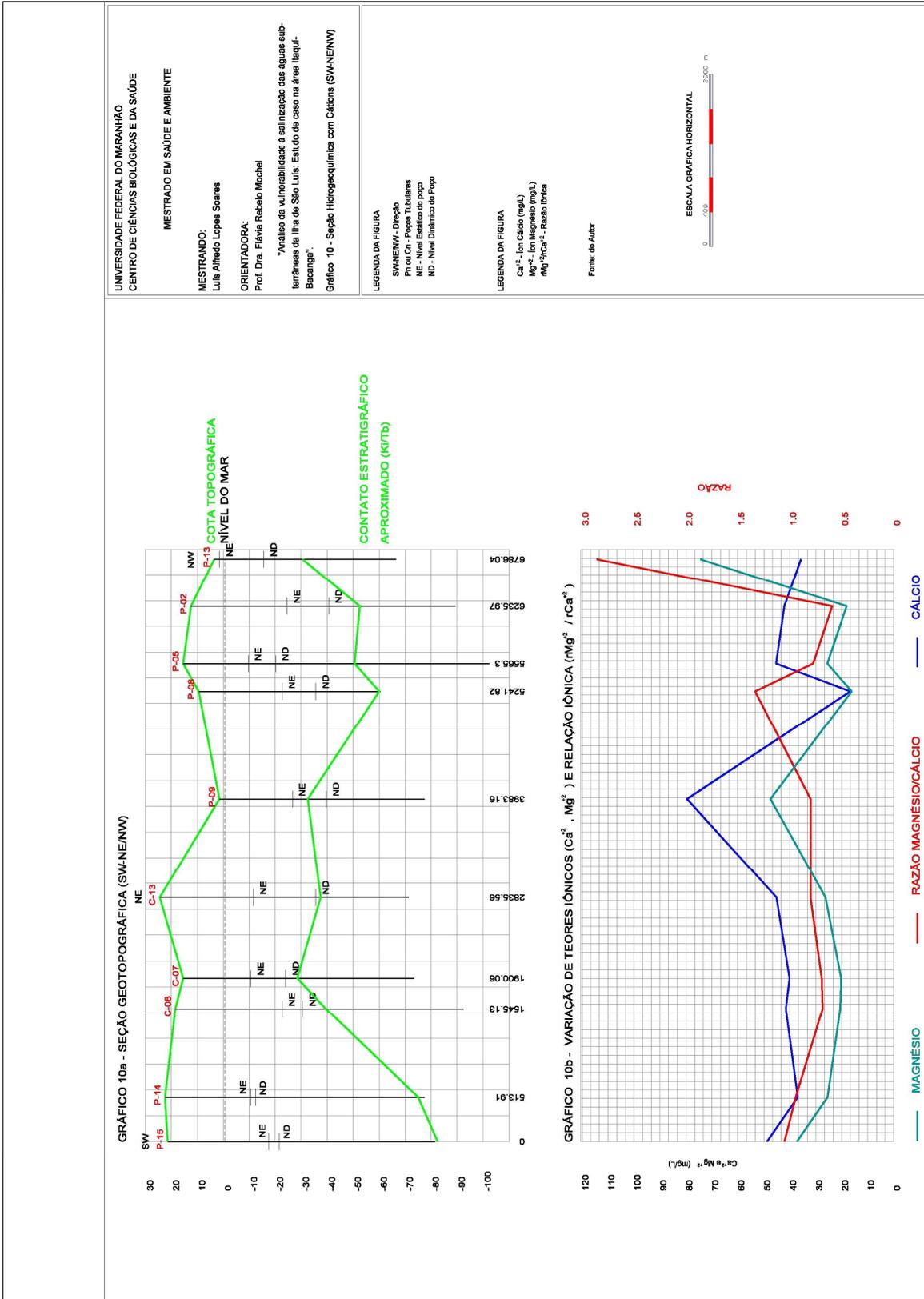


Gráfico 10 - Seção Hidrogeoquímica com Cátions (SW-NE/NW)

5.6 ELABORAÇÃO DO MAPA DE ZONEAMENTO DA VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS

O zoneamento da vulnerabilidade dos aquíferos na área Itaquí-Bacanga fundamentou-se em diversos parâmetros, que ficaram evidentes após as análises hidrogeoquímicas efetuadas. Cada parâmetro evidenciou uma condição crítica, de maior ou menor influência no processo de intrusão marinha.

Os processos de intrusão marinha envolvem fatores isolados simples e alguns complexos, quase sempre interdependentes, de modo que, uma análise casual e pontual, na maioria das vezes, pode levar a conclusões precipitadas e equivocadas.

Assim, o critério adotado para a definição do zoneamento levou em consideração parâmetros que envolvem:

- a) a geologia (litologia e estratigrafia);
- b) a topografia;
- c) as variáveis de exploração, principalmente a profundidade e as vazões;
- d) a proximidade da costa;
- e) a densidade de poços;
- f) a urbanização.

5.6.1 Definição dos parâmetros para o zoneamento

Na área Itaquí-Bacanga, a ocorrência de água subterrânea é controlada pela geologia. Sudene (1972), Acqua-Plan (1971) apud Maranhão (1998), Costa (2003), identificaram a existência de dois sistemas aquíferos principais, sendo um livre e outro confinado. As condições de superfície determinam a água armazenada nestes sistemas. Admite-se a recarga direta pelas precipitações, nos altos topográficos, no domínio dos bairros,

Anjo da Guarda no trecho próximo à Avenida dos Portugueses, Alto da Vitória, Alto da Esperança, Vila Embratel, Residencial Resende, Residencial Paraíso e Argola e Tambor. Essa recarga é possível, considerando-se as camadas arenosas encontradas na superfície. Mesmo com pouca espessura, contribuem para a retenção de águas pluviais que saturam os níveis iniciais até a camada argilosa mais próxima. Esse lençol é aproveitado na área, apenas para consumo individual, através do uso de poços rasos. A partir daí, admite-se que, por drenança, se infiltre realimentando os aquíferos inferiores. Sudene (1972) não considera o aquífero inferior como confinado, diz apenas que a sequência cíclica de camadas de composição variável lhe garante um certo grau de confinamento.

Os sedimentos do Terciário estão sobrepostos discordantemente sobre a sequência da Formação Itapecuru. Essa discordância, evidenciada nos gráficos geotopográficos, pode explicar o semiconfinamento do aquífero inferior, permitindo uma interconexão entre camadas de diferentes profundidades. O perfil do poço C-10 do Anjo da Guarda não mostra o nível de calcário, que nesse local, se encontra a mais de 140 metros de profundidade. Porém, se analisarmos o perfil litológico de um poço já desativado, localizado muito próximo e ao norte do C-10, verifica-se o contato a uma profundidade de apenas 33 metros. As diferentes cotas em que se encontram os níveis de calcário, que se encontram em toda a área de estudo, aconteceram provavelmente em virtude de eventos tectônicos ocorridos em épocas passadas. Outro parâmetro que merece ser avaliado é a cota do nível estático do sistema aquífero, que sempre se localiza abaixo do mar.

A topografia da área é bastante crítica para o estudo da vulnerabilidade. O relevo é formado por pequenas colinas, que não ultrapassam os 40 metros de altitude, acompanhadas de ondulações acentuadas, formando grotões até os níveis dos igarapés, que entrecortam todo o litoral, formando as reentrâncias. Poços perfurados nesses planos flúvio-marinhos possuem grande probabilidade de virem a salinizar, como é o caso do Tamancão e Vila Mauro Fecury.

A proximidade da costa é outro critério adotado, principalmente pelas características geológicas da área, onde ocorrem sequências que antecedem o afloramento do Cretáceo, ou de litologias que indicam a aproximação desse contato, desde a colina do Corpo de Bombeiros até o Porto do Itaquí. A presença de camadas de arenito nessa zona de transição parece favorecer a ocorrência de fluxos horizontais, que dependendo da hidráulica do aquífero, podem permitir a entrada de água do mar. Assim, poços localizados mais próximos da costa apresentam vulnerabilidade maior.

Outro fator limitante na definição de áreas vulneráveis é a vazão possível de ser explorada pelos poços. Estudos já realizados e a prática da CAEMA, que opera na área há mais de trinta anos, indicam uma vazão possível de ser explorada da ordem de 10 m³/h. Vazões superiores, comprovadamente já provocaram problemas de salinização na área. Além da vazão, a profundidade de perfuração do poço é um parâmetro que precisa ser mais bem avaliado. Historicamente, poços construídos com profundidades superiores a 100 metros apresentaram problemas de salinização.

A densidade de poços também é um dado de extrema relevância quando se pretende avaliar os riscos de salinização. A proximidade e a concentração de poços em um determinado setor podem provocar um abaixamento acentuado no cone de depressão dos poços, havendo possibilidade, nesse caso, de ser rompido o equilíbrio hidrostático no aquífero, favorecendo assim, o domínio de fluxos horizontais e/ou verticais no sentido água salgada/ água doce.

O grau de urbanização da área é outro fator que contribui para o aumento da vulnerabilidade, não apenas pela solicitação de demanda por água, mas principalmente pela impermeabilização da superfície do solo, interferindo diretamente na recarga local. O controle do crescimento desordenado na área Itaquí-Bacanga talvez seja o maior desafio a ser enfrentado pelos gestores públicos, principalmente quando se anuncia a implantação, em área

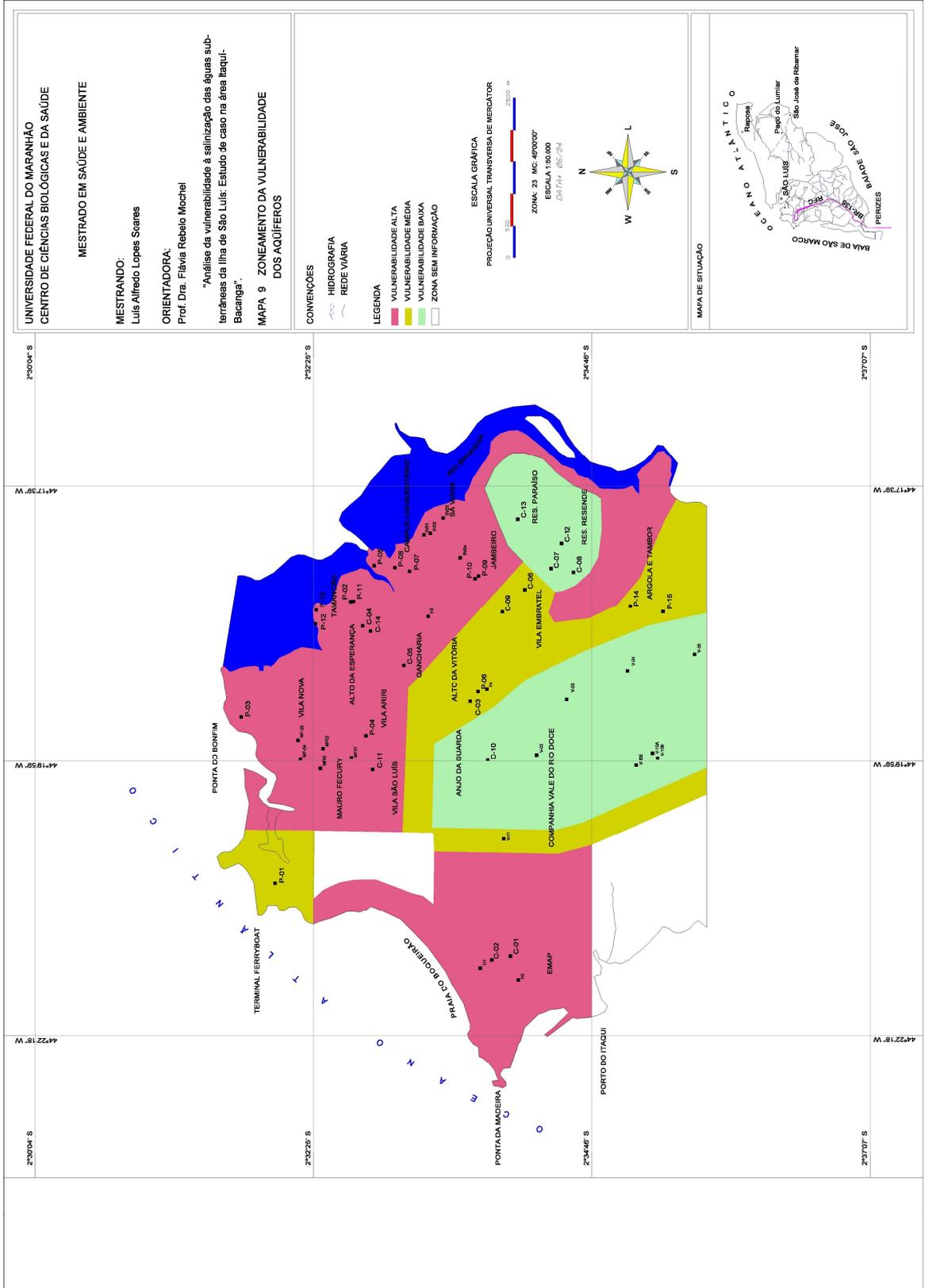
próxima ao Porto do Itaquí, de uma siderúrgica de grande porte, cujo fator de atração para grupos migratórios será extremamente forte.

O Mapa 9 apresenta o zoneamento da vulnerabilidade dos aquíferos. A determinação das zonas baseou-se nos critérios descritos, tendo sido definidas três zonas de vulnerabilidade: baixa, média e alta. Permaneceram áreas em branco, para as quais não se obteve informações suficientes.

As zonas em vermelho simbolizam as áreas de alta vulnerabilidade à salinização, e representam principalmente aquelas, onde esse fenômeno já ocorreu. As áreas de reentrâncias também foram incluídas nessas zonas, pois representam formações recentes, de aluvião, que sofrem afogamento diário das marés. As praias também se localizam nessa zona.

As zonas em amarelo representam áreas de vulnerabilidade média. São áreas de transição entre as zonas de vulnerabilidade alta e baixa. Incluem os altos topográficos que representam áreas um pouco mais afastadas da costa, com alguma reposição de água pelas precipitações locais. O fator transição leva em conta a manutenção de áreas vegetadas e a desaceleração no processo de ocupações da área.

As zonas em verde são aquelas de baixa vulnerabilidade, representando as áreas de cotas mais elevadas, mais planas e arenosas do Residencial Paraíso e Resende, e aquelas mais centrais e mais afastadas da costa, seguindo na direção sul, onde a Formação Barreiras se espessa.



Mapa 9 - Zoneamento da Vulnerabilidade dos Aquíferos

6 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados e resumidos no mapa de zoneamento da vulnerabilidade (Mapa 9), mostram de modo bastante claro a baixa vocação hidrogeológica da área Itaquí-Bacanga como sistema produtor de águas subterrâneas. O problema da salinização ainda não se generalizou na área, em virtude das desativações de poços já ocorridas. Um simples cálculo pode evidenciar o caos que deveria ser nos dias atuais, caso a CAEMA não tivesse substituído grande parte do sistema de abastecimento local, de águas subterrâneas, pelo Sistema Italuís. Na hipótese da área em estudo, ainda ser abastecida por poços, para atender à demanda, a CAEMA seria obrigada a operar atualmente com aproximadamente 108 poços.

Os mapas de isovalores mostraram com clareza a existência de intrusão salina no bairro do Tamancão. Historicamente, esse fenômeno já ocorre há mais tempo, no entorno do Porto do Itaquí, e nos bairros de Sá Viana e Vila Mauro Fecury I.

A ocorrência de águas subterrâneas está subordinada a geologia, que condiciona a existência dos aquíferos e suas características hidrogeológicas. Na área de estudo, a ocorrência dessas águas está condicionada a diversos fatores como: as características do topo da sequência estratigráfica, vinculada à recarga; afloramento da Formação Itapecuru e de sequências sedimentares próximas a esta, que possuem baixos coeficientes de permeabilidade e transmissividade; baixas vazões de exploração; e condições de contorno de risco, pela vizinhança da costa e aquíferos inferiores salinizados.

O estudo hidroquímico apresentou homogeneidade nos resultados de qualidade da água, refletindo a uniformidade litológica local. De um modo geral são águas de dureza elevada, com altos teores de cálcio e magnésio, que emprestam à água um leve sabor salobro.

Foi identificada em todo o eixo Itaquí-Bacanga, a ocorrência de um grande número de ocupações, que se estabelecem em áreas muitas vezes propícias à recarga de aquíferos. Estas invasões inclusive, já começam a ocupar as áreas de encosta. A derrubada de vegetação nativa com o conseqüente processo de erosão das encostas é o maior prejuízo advindo dessas ocupações.

A qualidade da água subterrânea, de acordo com o resultados das análises físico-químicas, não apresentaram valores em desacordo com a Portaria 518/2004, que trata dos Padrões de Potabilidade para consumo humano, podendo-se garantir a potabilidade para os parâmetros estudados. Apenas no poço do Tamancão o teor de sólidos dissolvidos ultrapassa o VMP, que é de 1000 mg/L. Quanto ao teor de cloreto, embora os valores encontrados estejam abaixo do padrão, que é de 250 mg/L, sabemos que com o bombeamento contínuo do poço, ele se eleva a valores muitas vezes superior. Essas águas com excesso de cloreto de sódio podem, segundo alguns estudos, causar aumento de pressão arterial com severos danos a saúde do consumidor.

Pelas limitações existentes, o uso das águas subterrâneas, na área, deveria se limitar ao abastecimento de localidades de difícil acesso, longa distância, ou aquelas que demandassem obras mais onerosas (instalações elevatórias, por exemplo).

Diante do exposto, para uma gestão adequada dos recursos hídricos da área Itaquí-Bacanga, são sugeridas medidas que visem minimizar o avanço no processo de salinização, como:

a) o controle do uso e ocupação do solo de algumas áreas com características propícias para recarga dos aquíferos, principalmente aquelas situadas acima da cota de 20 metros, como no entorno da Vila Embratel, ao sul;

b) a construção de pequenas barragens, nas depressões próximas à costa, para acumular águas pluviais, ou águas doce de nascentes. Estas construções implicariam em estudos de impacto ambiental, de modo a lhes dar sustentabilidade;

c) a obrigatoriedade do georeferenciamento, incluindo cota e dados de construção, de todos os poços perfurados na área, novos e antigos, mantendo-se sempre disponível um cadastro atualizado;

d) os cuidados com a desativação de poços, como o capeamento do tubo de revestimento;

e) criar e/ou integrar um banco de dados contendo informações sobre vazões exploradas e regime de operação;

f) a necessidade de uma articulação entre agentes públicos, privados, e a sociedade de modo a promover a gestão das águas subterrâneas locais;

g) o desenvolvimento de novos estudos na área, abordando a influência da variação do nível das marés no grau de salinização dos aquíferos;

h) o acompanhamento bacteriológico da qualidade da água nos poços tubulares, e principalmente nos poços rasos.

REFERÊNCIAS

APHA. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**, 16 ed., Washington, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de poço para captação de água subterrânea**: NBR 12212. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Construção de poço para captação de água subterrânea**: NBR 12244. Rio de Janeiro, 1992.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n°. 518 de 25 de março de 2004. Estabelece normas e o padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2004.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo 2001 – 2003**, São Paulo: CETESB, 2004.

COMPANHIA VALE DO RIO DOCE. **Relatório Final da Implantação do Sistema de Captação de Água Subterrânea para Abastecimento do Terminal de Minério de Ferro da Ponta da Madeira – Ilha de São Luís – MA**. Recife: CVRD, 1983.

CONAMA. **Resolução n° 20**. Brasília: Conselho Nacional do Meio Ambiente, 1986.

COSTA, H. de O. S. **Análise Hidrogeológica Aplicada à Gestão das Águas – Região Oeste da Ilha de São Luís**. Monografia (Especialização em Recursos Hídricos) – Universidade Estadual do Maranhão. São Luís, 2003.

COSTA, W. D.; MANOEL FILHO, J.; SANTOS A.C.; BRITO, A. M.; SOUZA, F.J. ; LOPES, A.V.; SANTOS A. J. **Estudo Hidrogeológico da Região Metropolitana de Recife – HIDROREC**. Recife, PE: Convênio IRDC - UFPE/ FADE; 1998.

COUTINHO, M. de F. O. **Aspectos higiênico-sanitários de alguns poços localizados nos bairros em torno da bacia do Rio Bacanga**. Monografia (Graduação em Farmácia) – Universidade Federal do Maranhão. São Luís, 2002.

FEITOSA, F. A. C. e MANOEL FILHO, J. (Org.) **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID – UFPE, 1997.

FREEZE, R. A. e CHERRY, J. A. **Groundwater**: Ed. Prentice Hall, New Jersey, USA, 1979.

GOLTERMAN, H. L.; CLYMO, R. S.; OHNSTAD, M. A. M. **Methods for Physical and Chemical Analysis of fresh Waters**, 2 ed., Londres, 1978.

HIRATA, R. **As Águas Subterrâneas em Centros Urbanos**. *Revista da ABAS*, São Paulo, 2003.

LEAL, A. S. **As Águas Subterrâneas no Brasil**: ocorrências, disponibilidades e usos. O Estado das Águas no Brasil. Brasília: ANEEL, 1999. 1 CD-ROM. (Série Estudos e Informações Hidrológicas e Energéticas).

LLAMAS R. & CUSTÓDIO E. **Águas Subterrâneas**. In: *Revista Cidob d'afers Intenacionals*, V.45, 1999.

LLOYD, J. W. e TELLAM, J. H. **Caracterizacion Hidroquímica de las Águas Subterrâneas em Áreas Costeras**. In: *Tecnologia de la Intrusion em Acuíferos Costeros*. TIAC'88, Almuñécar, Granada-Espanha, 1988.

LUZ, D. S. da **Análise Hidrogeológica Aplicada à Gestão das Águas – Região Leste da Ilha de São Luís**. Monografia (Especialização em Recursos Hídricos) - Universidade Estadual do Maranhão – UEMA. São Luís, 2003.

MACEDO, L. A. de **Estudo de Viabilidade de Sistema de Saneamento Básico nas Comunidades dos Bairros Cidade Olímpica e da Área Itaquí – Bacanga**. São Luís: 2002.

MARANHÃO (Estado). Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Turismo/ Programa Estadual de Gerenciamento Costeiro. **Macrozoneamento do Golfão Maranhense: estudo de ocupação espacial/ uso e cobertura da terra**. São Luís, 1998a.

MARANHÃO (Estado). Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Turismo/ Programa Estadual de Gerenciamento Costeiro. **Macrozoneamento do Golfão Maranhense: estudo de hidrogeologia**. São Luís, 1998b.

MIRANDA, G. P. E. **Qualidade físico-química da água de poços e nascentes situados na Bacia do Rio Bacanga**. Monografia (Graduação em Ciências Biológicas) – Universidade Federal do Maranhão - UFMA, São Luís, 2002.

NOBRE, M. M. M. & NOBRE, R. C. M. **Uso Sustentável de Águas Subterrâneas na Região Metropolitana de Maceió**. In: I CONGRESSO MUNDIAL INTEGRADO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: CEARÁ: ABAS, 2000.

PEREIRA, L.; SANTIAGO, M. M. F.; MENDONÇA, L. A. R.; FRISCHKORN, H.; FILHO, J. M. **Caracterização Isotópica das Águas Subterrâneas da Ilha de São Luís – MA**. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. FLORIANÓPOLIS: ABAS, 2002.

PEREZ, E. C. e EVANGELISTA, I. M. **La Hidroquímica em los Estudios de Intrusion Marina em los Acuíferos Españoles**. In: **Tecnologia de la Intrusion em Acuíferos Costeros**. TIAC'88, Almuñécar, Granada-Espanha, 1988.

RAIMUNDO JÚNIOR, F.; RUBIO, R. F.; ÚBEDA, J. C. B.; FERNANDEZ, D. L.; SERRANO, J. V. **Acuífero Detrítico Costero de Ponta da Madeira (Maranhão, Brasil). Modelización Hidrogeológica Preliminar**. In: **TECNOLOGIA DE LA INTRUSION DE ÁGUA DE MAR EM ACUÍFEROS COSTEROS: PAISES MEDITERRÂNEOS**: IGME, Madrid, 2003.

REBOUÇAS, A. C. **Condições de Uso e Proteção das Águas Subterrâneas**. In: **PROBLEMAS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO**, São Paulo, 1992.

REBOUÇAS, A. da C. **Água o Mito da Abundância**. **Revista da ABAS**, São Paulo, 2001.

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA B.; TUNDISI, J. G, (Org.) **Águas Doces no Brasil: Capital Ecológico, Uso e Conservação**, 2ª edição, São Paulo: Escrituras Editora, 2002.

RIBEIRO, L. **Vulnerabilidade de Aquíferos Costeiros e Risco de Contaminação**. In: **ANAIS DO XII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**, Florianópolis – SC, 2002.

RODRIGUES, T. L. N. (Org.) **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Folha SA. 23-Z-A** (São Luís). Brasília: CPRM, 1994.

ROSS, J. L. S. **A Qualidade da Água Subterrânea no Espaço Urbano da Grande São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Universidade de São Paulo - USP. São Paulo, 1981.

SILVA JUNIOR, G. C. da; LOWSBY, M. G.; ALVES M. da G.; FERRUCIO P. L.; MONTEIRO A. C.; ALMEIDA, R. R. de **A Problemática da Intrusão Marinha nos Aquíferos Costeiros do Leste Fluminense: um estudo de caso – A Região Oceânica de Niterói**. In: I CONGRESSO MUNDIAL INTEGRADO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Fortaleza - Ceará: ABAS, 2000.

SOUSA, S. B. **Sistema Aquífero da Ilha do Maranhão**. In: I CONGRESSO MUNDIAL INTEGRADO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Fortaleza - Ceará: ABAS, 2000.

SUDENE Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste. **Estudo Hidrogeológico do Distrito Industrial do Itaqui-Maranhão**. Recife: SUDENE, 1972.

TEMPO PROSPECÇÃO GEOFÍSICA. **Estudo Hidrogeológico da Área do Porto do Itaqui São Luís – MA**. Teresina – PI, 2002.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1ª edição, São Paulo, 2004.

VALE, C. B. P. **Água Subterrânea no Estado do Maranhão: Importância e Uso**. In: PRIMEIRO FÓRUM DE DEBATES, **ÁGUA SUBTERRÂNEA: UM PATRIMÔNIO AMEAÇADO**. São Luís –MA, 1997.

VIDAL, A. C. e KIANG, C. H. **Caracterização Hidroquímica dos Aquíferos da Bacia de Taubaté**. In: REVISTA BRASILEIRA DE GEOCIÊNCIAS. Volume 32, 2002.

GLOSSÁRIO

Águas conatas – Água retida nos poros e fissuras da rocha desde a sua formação sedimentar.

Air spray – Aerossóis marinhos.

Aquíferos confinados – São aquelas em que as camadas acima e abaixo do meio poroso são impermeáveis, sendo que no topo da zona saturada a pressão da água é maior do que a pressão atmosférica.

Aquíferos livres – São aqueles cuja superfície superior da zona saturada encontra-se em equilíbrio com a pressão atmosférica; sinônimo: Freático.

Diagrama de Piper – São gráficos triangulares utilizados na caracterização dos tipos hidroquímicos presentes na água.

Discordância – São discontinuidades estratigráficas ou superfícies que refletem a ocorrência de um intervalo de tempo durante o qual o processo de deposição foi interrompido, ou ainda durante o qual a superfície das rochas existentes foi intemperizada, erodida ou afetada por movimentos tectônicos.

Drenança – Gotejo.

Exploração – O conjunto de operações e trabalhos que permitem o aproveitamento das águas subterrâneas.

Estratigrafia – Descreve as relações geométricas e cronológicas entre vários elementos constituintes do sistema geológico, tais como lentes, camadas e formações de origem sedimentar.

Litologia – Trata da composição mineral, da distribuição de tamanho dos grãos e do grau de compactação dos sedimentos.

Membro Alcântara – Subunidade sedimentar que integra a Formação Itapecuru e sotoposta à Formação Barreiras.

Paleogeno - Período geológico mais antigo da era Cenozóica

Relação de Ghyben-Herzberg – É a relação entre as alturas de água, do nível do mar até o nível de água do aquífero e a altura do nível do mar até a interface com a água salgada. Essa relação é de 1:40.

Rochas evaporíticas – Rocha sedimentar depositada diretamente como minerais salinos, sendo os principais a gipsita, a anidrita e a halita, pela alta concentração salina (salmoura) da água do mar em ambientes especiais, como lagunas e mares interiores em climas tropicais de forte evaporação com afluxo sistemático de água salgada do mar. A precipitação do sal ocorre quando o soluto atinge o ponto de saturação salina daquele componente.

Rochas sedimentares – Rocha constituída pela acumulação de sedimentos clásticos, químicos e/ou biogênicos.

Sistema Italuís – Sistema de abastecimento de água superficial captado do Rio Itapecuru.

Upconing – Cone de depressão invertido.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Levantamentos dos poços na área Itaqui - Bacanga

Código	Localização	Coordenadas		Cota (m)	Propriedade	Status	Observações
		Lat. 02°	Long. 44°				
1	Porto do Itaqui I (P5)	34' 05,2"	21' 38,1"	24	Caema	OK	Código P-5 CAEMA
2	Porto do Itaqui II (P4)	33' 55,8"	21' 40,0"	6	Caema	OK	Código P-4 CAEMA
3	Ponta de Espera I	32' 06,6"	21' 02,2"	31	Particular	OK	Área do ferryboat
4	Ponta de Espera II	32' 06,1"	21' 01,1"	32	Particular	OK	Área do ferryboat
5	Área do Exército	32' 21,8"	21' 04,4"	(*)	Particular	Não	Em manutenção
6	Alto da Vitória	33' 44,8"	19' 28,8"	35	Caema	OK	
7	Alto da Esperança I	32' 50,3"	18' 50,6"	18	Caema	OK	Trav. Dom Henrique
8	Res. Ana Jansen I	32' 44,2"	18' 38,2"	13	Com.	OK	União dos Morad.
9	Tamancão I	32' 27,4"	18' 52,5"	8	Particular	OK	Francês
10	Gancharia	33' 11,2"	19' 10,5"	14	Caema	OK	Unid. Escolar Rua 4
11	Colônia do Bonfim	31' 48,9"	19' 36,8"	24	Particular	OK	
12	Vila Embratel I	34' 12,4"	18' 32,1"	20	Caema	OK	Praça do Viva
13	Vila Embratel II	34' 25,7"	18' 21,4"	16	Caema	OK	Rua 27 com Rua 28
14	Vila Embratel III	34' 37,1"	18' 23,3"	19	Caema	OK	Rua São Benedito
15	Vila Embratel IV	34' 01,1"	18' 43,4"	19	Caema	OK	Rua 51 com Rua 06
16	Vila Embratel V	33' 52,8"	18' 51,4"	35	Caema	OK	Rua Sarney Filho
17	Vila Embratel VI	34' 01,1"	19' 05,8"	26	Caema	OK	R. Boa Esperança
18	Anjo da Guarda	33' 53,7"	19' 58,4"	40	Caema	OK	P.deSaúde Clodomir
19	Vila São Luís	32' 55,4"	20' 03,5"	27	Caema	OK	R. Sol com R. Buriti
20	Mauro Fecury 2 - I	33' 07,1"	20' 03,8"	24	Caema	Não	Rua 8
21	Vila Ariri	33' 53,5"	19' 47,4"	21	Prefeitura	OK	U.I. Escolar
22	Porto do Itaqui III(P6)	34' 10,5"	21' 49,6"	24	Caema	Não	Em perfuração
23	Res. Resende I	34' 31,0"	18' 08,7"	18	Caema	OK	Av. das Orquídeas
24	Res. Resende II	34' 24,3"	18' 06,1"	38	Comunitário	Não	Av. Pau Brasil
25	Res. Paraíso I	34' 08,8"	17' 56,2"	25	Caema	OK	Av. Principal
26	Res. Paraíso II	34' 25,8"	17' 40,8"	38	Comunitário	OK	Av. Principal
27	Quartel de Bombeiros	32' 56,1"	18' 20,0"	16	Particular	OK	
28	Vila Bacanga	33' 24,4"	18' 44,4"	36	Caema	Não	Desativado
29	Av. Portugueses I	33' 48,8"	19' 23,9"	15	Particular	OK	Garagem M. Ribeiro
30	Av. Portugueses II	33' 54,3"	19' 21,6"	26	Caema	Não	Vila Isabel-desativado
31	UFMA I	33' 14,1"	18' 22,8"	29	UFMA	OK	Biblioteca Central
32	UFMA II	33' 22,4"	18' 26,1"	20	UFMA	OK	Castelão/Rest.
33	UFMA III	33' 03,6"	18' 21,0"	10	UFMA	OK	entrada/direita
34	Sá Viana I	33' 22,0"	18' 03,3"	35	Caema	Não	Destivado
35	Sá Viana II	33' 25,8"	18' 02,7"	29	Caema	Não	Destivado
36	Sá Viana III	33' 32,2"	17' 54,4"	28	Caema	Não	Desativado
37	Sá Viana IV	33' 41,3"	18' 14,8"	19	Caema	Não	Desativado
38	Sá Viana/Jambeiro I	33' 49,0"	18' 25,2"	2	Comunitário	OK	Av. Contorno
39	Sá Viana/Jambeiro II	33' 47,2"	18' 26,5"	-1	Comunitário	OK	Av. Contorno/cacimb
40	Alto da Esperança II	32' 54,3"	18' 53,2"	19	Comunitário	OK	R. Rainha Elizabeth
41	Res. Ana Jansen II	32' 45,7"	18' 38,0"	19	Particular	OK	Av. Principal
42	Tamancão II	32' 26,4"	18' 49,5"	15	Comunitário	OK	Rua da Mangueira
43	Tamancão III	32' 26,8"	18' 42,5"	4	Particular	OK	Estaleiro Escola
44	Argola e Tambor I	35' 05,9"	18' 40,5"	23	Comunitário	OK	Estrada do Gapara
45	Argola e Tambor II	35' 22,4"	18' 43,2"	22	Comunitário	OK	Estrada do Gapara
46	Mauro Fecury 1 -II	32' 45,9"	19' 57,0"	7	Prefeitura	Não	Av. Dom Luís
47	Mauro Fecury 1 -III	32' 31,5"	19' 51,6"	28	Prefeitura	Não	Rua Silvio Tavares
48	Mauro Fecury 1 -IV	32' 30,2"	20' 01,7"	15	Prefeitura	OK	Rua Sarney Filho
49	Mauro Fecury 1 -V	32' 20,1"	19' 57,0"	18	Prefeitura	Não	Ilha da Paz
50	Mauro Fecury 1 -VI	32' 18,7"	19' 47,2"	11	Prefeitura	Não	Rua da Cerâmica
51	Porto do Itaqui IV(P3)	33' 51,3"	19' 18,7"	5	Caema	Não	

(*) - Sem informação

Dados do autor

APÊNDICE B - Fotografia de uma barreira na Vila Jambeiro, constituída por argila caulínica, da base ao topo. Estrada Sá Viana/Vila Embratel



APÊNDICE C - Encosta constituída por argila de cores variegadas, da base à parte média. Da parte média ao topo ocorre argila branca-acinzentada (caulinita), capeada por nível laterítico. Avenida dos Portugueses – Quartel do Corpo de Bombeiros



APÊNDICE D - Vista do Estaleiro Escola, no bairro do Tamancão



APÊNDICE E - Em primeiro plano (fotografia inferior), substrato de arenito médio, consolidado, fraturado, de cor rósea variando para esverdeado. Na parte média, blocos rolados de laterita, à frente do topo da camada do arenito anterior. Ao fundo, sob a cobertura vegetal, base de encosta (14 metros), constituída por argila de cores variadas, que serve de matriz para concreções e matacões lateríticos. Ponta de Espera (Ferryboat). No topo (fotografia superior) vemos blocos lateríticos



APÊNDICE F - Corte à margem da Avenida dos Portugueses, próximo ao acesso do Terminal Ferroviário da CVRD, mostrando arenito fino, com estratos variando entre vermelho e cinza claro, bastante caulinizado



APÊNDICE G - Resultados Obtidos no Campo

Código	Localização	Cota (m)	Data da Análise	pH	Temperatura ° C	OD mg/L	Condutividade µS/cm
C-01	Porto do Itaqui I (P5)	24	24/1/2003	6,93	29,2	1,39	692
C-02	Porto do Itaqui II (P4)	6	24/1/2003	7,00	30,0	0,98	651
P-01	Ponta de Espera II	32	23/1/2003	7,20	28,3	5,36	719
C-03	Alto da Vitória	35	23/1/2003	7,02	29,5	2,62	763
C-04	Alto da Esperança I	18	21/1/2003	7,15	28,9	4,45	523
P-02	Res. Ana Jansen I	13	21/1/2003	7,33	29,0	5,06	545
C-05	Gancharia	14	24/1/2003	7,16	28,2	3,47	465
P-03	Colônia do Bonfim	24	21/1/2003	7,74	29,8	1,05	950
C-06	Vila Embratel I	20	31/1/2003	7,17	28,4	1,34	461
C-07	Vila Embratel II	16	24/1/2003	7,00	28,6	3,65	428
C-08	Vila Embratel III	19	24/1/2003	7,00	28,5	3,04	431
C-09	Vila Embratel IV	19	24/1/2003	6,82	28,5	1,95	462
C-10	Anjo da Guarda	40	31/1/2003	7,34	28,8	1,24	442
C-11	Vila São Luís	27	23/1/2003	6,97	28,9	1,97	490
P-04	Vila Ariri	21	21/1/2003	5,65	29,5	1,77	90
C-12	Res. Resende I	18	24/1/2003	7,10	29,5	2,05	402
C-13	Res. Paraíso I	25	24/1/2003	7,00	28,8	6,09	461
P-05	Quartel de Bombeiros	16	20/1/2003	7,08	28,0	0,80	633
P-06	Av. Portugueses I	15	23/1/2003	6,00	27,6	5,43	160
P-07	UFMA I	20	31/1/2003	6,97	28,8	4,30	370
P-08	UFMA III	10	31/1/2003	6,97	28,8	4,30	390
P-09	Sá Viana / Jambeiro I	2	16/1/2003	7,10	30,6	6,04	1010
P-10	Sá Viana / Jambeiro II	-1	16/1/2003	6,10	28,6	4,00	145
C-14	Alto da Esperança II	17	21/1/2003	6,65	28,0	1,50	793
P-11	Res. Ana Jansen II	17	20/1/2003	5,45	27,8	4,98	48
P-12	Tamancão II	15	20/1/2003	6,86	27,8	5,65	5180
P-13	Tamancão III	4	21/1/2003	7,24	29,1	5,43	5360
P-14	Argola e Tambor 1 - I	23	27/1/2003	6,87	27,4	4,21	363
P-15	Argola e Tambor 2 - II	22	27/1/2003	6,94	27,3	3,31	460

APÊNDICE H - Resultados de Laboratório com Cálculos das Razões Iônicas

Código	Localização	Cloreto mg/L	HCO ₃ mg/L	Razão (*) rCl/rHCO ₃	Magnésio mg/L	Cálcio mg/L	Razão (*) rMg/rCa
C-01	Porto do Itaqui I (P5)	9,00	31,27	0,49	37,94	66,53	0,94
C-02	Porto do Itaqui II (P4)	8,50	31,94	0,46	31,37	59,52	0,84
P-01	Ponta de Espera	11,00	21,19	0,89	4,38	11,42	0,63
C-03	Alto da Vitória	14,50	24,09	1,02	16,66	47,70	0,58
C-04	Alto da Esperança I	3,00	25,33	0,20	13,74	31,86	0,71
P-02	Res. Ana Jansen I	5,00	21,31	0,40	18,12	42,08	0,71
C-05	Gancharia	3,50	25,65	0,24	13,98	33,67	0,68
P-03	Colônia do Bonfim	13,50	25,44	0,93	2,31	6,41	0,59
C-06	Vila Embratel I	3,00	29,20	0,17	25,66	44,89	0,94
C-07	Vila Embratel II	1,50	26,86	0,09	20,18	40,08	0,83
C-08	Vila Embratel III	1,50	28,67	0,08	20,55	41,48	0,82
C-09	Vila Embratel IV	2,50	28,96	0,15	21,89	45,29	0,8
C-10	Anjo da Guarda	2,50	22,66	0,19	12,04	38,88	0,51
C-11	Vila São Luís	3,50	33,04	0,18	15,56	36,87	0,7
P-04	Vila Ariri	1,50	37,02	0,06	2,07	2,20	1,55
C-12	Res. Resende I	3,00	26,62	0,18	18,48	38,28	0,8
C-13	Res. Paraíso I	5,00	26,64	0,32	26,26	45,09	0,96
P-05	Quartel de Bombeiros	6,50	27,40	0,40	25,53	45,29	0,93
P-06	Av. dos Portugueses	3,50	0,90	10,00	4,26	5,21	1,35
P-07	UFMA I	4,50	24,14	0,34	22,13	29,66	1,23
P-08	UFMA III	8,50	21,03	0,70	16,17	16,63	1,6
P-09	Sá Viana/Jambeiro I	17,50	20,67	1,44	47,42	79,56	0,98
P-10	Sá Viana/Jambeiro II	2,00	4,51	0,86	4,38	4,01	1,8
C-14	Alto da Esperança II	11,50	25,65	0,78	42,31	52,30	1,33
P-11	Res. Ana Jansen II	2,00	0,67	6,00	1,34	0,40	5,5
P-12	Tamancão II	123,00	15,22	13,88	115,64	40,08	4,75
P-13	Tamancão III	117,00	29,11	6,87	74,42	35,67	3,43
P-14	Argola e Tambor I	3,00	27,20	0,18	25,41	36,87	1,13
P-15	Argola e Tambor II	4,00	30,62	0,22	37,21	48,70	1,26

(*) As razões iônicas foram calculadas convertendo os valores para meq/L.

APÊNDICE I - Seção Geotopográfica e Hidroquímica da área Itaquí-Bacanga - W-E/SE com Ânions

Código	Cota Topográfica (m)	Cota NE (m)	Cota ND (m)	Cota de Fundo (m)	Cota Estratigráfica (m)	Identificação do Poço	Orientação da seção	Cloroeto mg/L	HCO ₃ mg/L	Razão rCl/rHCO ₃
C-01	24,0	-12,0	-22,0	-56,0	-41,0	Porto do Itaquí I-P5	S - N	9,00	31,27	0,49
C-02	6,0		-27,0	-63,0	-45,0	Porto do Itaquí II P4	W - E	8,50	31,94	0,46
C-10	40,0	5,0	-2,0	-98,0	-100,0	Anjo da Guarda	W - E	2,50	22,66	0,19
C-03	35,0	-6,0	-15,0	-115,0	-11,0	Alto da Vitória	W - E	14,50	24,09	1,02
P-09	2,0	-26,0	-39,0	-77,0	-32,0	Jambeiro I	W - E	17,50	20,67	1,44
C-13	25,0	-11,0	-35,0	-71,0	-37,0	Resid. Paraiso I	NW-SE	5,00	26,64	0,32

NE = Nível Estático

ND = Nível Dinâmico

APÊNDICE J - Seção Geotopográfica e Hidroquímica da área Itaquí-Bacanga - W-E/SE com Cátions

Código	Cota Topográfica (m)	Cota NE (m)	Cota ND (m)	Cota de Fundo (m)	Cota Estratigráfica (m)	Identificação do Poço	Orientação da seção	Magnésio mg/L	Cálcio mg/L	Razão rMg/rCa
C-01	24,0	-12,0	-22,0	-56,0	-41,0	Porto do Itaquí I-P5	S - N	37,94	66,53	0,94
C-02	6,0	-18,0	-27,0	-63,0	-45,0	Porto do Itaquí II-P4	W - E	31,37	59,52	0,87
C-10	40,0	5,0	-2,0	-98,0	-100,0	Anjo da Guarda	W - E	12,04	38,88	0,51
C-03	35,0	-6,0	-15,0	-115,0	-11,0	Alto da Vitória	W - E	16,66	47,70	0,58
P-09	2,0	-26,0	-39,0	-77,0	-32,0	Jambeiro I	W - E	47,42	79,56	0,98
C-13	25,0	-11,0	-35,0	-71,0	-37,0	Resid. Paraiso I	NW-SE	26,62	45,09	0,96

NE = Nível Estático

ND = Nível Dinâmico

APÊNDICE K - Seção Geotopográfica e Hidroquímica da área Itaquí-Bacanga – SW-NE/NW com Ânions

Código	Cota Topográfica (m)	Cota NE (m)	Cota ND (m)	Cota de Fundo (m)	Cota Estratigráfica (m)	Identificação do Poço	Orientação da seção	Cloreto mg/L	HCO ₃ mg/L	Razão rCl/rHCO ₃
P-15	22,0	-17,0	-21,0	-81,0	-82,0	Argola e Tambor 2	SW - NE	4,00	30,64	0,22
P-14	23,0	-10,0	-12,0	-77,0	-74,5	Argola e Tambor 1	SW - NE	3,00	27,20	0,18
C-08	19,0	-22,0	-30,0	-92,0	-39,0	Vila Embratel III	SW - NE	1,50	28,67	0,08
C-07	16,0	-10,0	-23,5	-73,0	-28,0	Vila Embratel II	SW - NE	1,50	26,86	0,09
C-13	25,0	-11,0	-35,0	-71,0	-37,0	Res. Paraiso	SW - NE	5,00	26,64	0,32
P-09	2,0	-26,0	-39,0	-77,0	-32,0	Jambeiro	NW	17,50	20,67	1,44
P-08	10,0	-22,0	-35,0	-60,0	-59,5	UFMA III	NW	8,50	21,03	0,70
P-05	16,0	-9,0	-19,5	-102,0	-50,0	C. de Bombeiros	NW	6,50	27,40	0,40
P-02	13,0	-24,0	-40,0	-89,0	-52,0	Res. Ana Jansen I	NW	5,00	21,31	0,40
P-13	4,0	2,0	-15,0	-66,0	-30,0	Estaleiro Escola	NW	117,00	29,11	6,87

NE = Nível Estático

ND = Nível Dinâmico

APÊNDICE L - Seção Geotopográfica e Hidroquímica da área Itaquí-Bacanga - SW-NE/NW com Cátions

Código	Cota Topográfica (m)	Cota NE (m)	Cota ND (m)	Cota de Fundo (m)	Cota Estratigráfica (m)	Identificação do Poço	Orientação da seção	Magnésio mg/L	Cálcio mg/L	Razão rMg/rCa
P-15	22,0	-17,0	-21,0	-81,0	-82,0	Argola e Tambor 2	SW - NE	37,21	48,70	1,26
P-14	23,0	-10,0	-12,0	-77,0	-74,5	Argola e Tambor 1	SW - NE	25,41	36,87	1,13
C-08	19,0	-22,0	-30,0	-92,0	-39,0	Vila Embratel III	SW - NE	20,55	41,48	0,82
C-07	16,0	-10,0	-23,5	-73,0	-28,0	Vila Embratel III	SW - NE	20,18	40,08	0,83
C-13	25,0	-11,0	-35,0	-71,0	-37,0	Res. Paraíso	SW - NE	26,26	45,09	0,96
P-09	2,0	-26,0	-39,0	-77,0	-32,0	Jambeiro	NW	47,42	79,56	0,96
P-08	10,0	-22,0	-35,0	-60,0	-59,5	UFMA	NW	16,17	16,63	1,60
P-05	16,0	-9,0	-19,5	-102,0	-50,0	C. de Bombeiros	NW	25,53	45,29	0,93
P-02	13,0	-24,0	-40,0	-89,0	-52,0	Res. Ana Jansen	NW	18,12	42,08	0,71
P-13	4,0	2,0	-15,0	-66,0	-30,0	Estaleiro Escola	NW	74,42	35,67	3,43

NE = Nível Estático

ND = Nível Dinâmico

ANEXO

Soares, Luis Alfredo Lopes

Análise da vulnerabilidade à salinização das águas subterrâneas da ilha de São Luís: Estudo de caso na área Itaquí - Bacanga. / Luis Alfredo Lopes Soares. – São Luís, 2004.

145 f.:il

Dissertação (Mestrado em Saúde e Ambiente) – Universidade Federal do Maranhão – UFMA, 2004.

1. Água Subterrânea – vulnerabilidade – Itaquí-Bacanga – São Luís/MA. 2. Intrusão salina – geologia – hidroquímica. I. Título.

CDU 556.32:556.114.5 (812.11)