



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE GEOLOGIA AMBIENTAL, HIDROGEOLOGIA
E RECURSOS HÍDRICOS**

TESE DE DOUTORADO

**DIAGNÓSTICO HIDROGEOLÓGICO, HIDROQUÍMICO E DA QUALIDADE
DA ÁGUA DO AQUÍFERO FREÁTICO DO ALTO CRISTALINO
DE SALVADOR - BAHIA**

SÉRGIO AUGUSTO DE MORAIS NASCIMENTO

**SALVADOR – BAHIA
ABRIL/2008**

**DIAGNÓSTICO HIDROGEOLÓGICO, HIDROQUÍMICO E DA QUALIDADE
DA ÁGUA DO AQUÍFERO FREÁTICO DO ALTO CRISTALINO DE
SALVADOR - BAHIA**

por

SÉRGIO AUGUSTO DE MORAIS NASCIMENTO
Geólogo (Universidade Federal da Bahia - 1969)

TESE DE DOUTORADO

Submetida em satisfação parcial dos requisitos ao grau de

DOUTOR EM CIÊNCIAS

– GEOLOGIA –

à

Câmara de Ensino de Pesquisa e Pós-Graduação
da
Universidade Federal da Bahia

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Johildo Salomão Figueiredo Barbosa – UFBA (Orientador)

Prof. Dr. Almany Costa Santos – UFPE

Prof. Dr. Germano Melo Júnior – UFRN

Prof. Dr. Luiz Rogério Bastos Leal – UFBA

Prof. Dr. Olivar Antônio Lima de Lima – UFBA

Data da Defesa Pública: 03/ 04 /2008

Grau conferido em ____/____/____

“A educação é a caminhada do homem da ignorância excessivamente confiante para a incerteza refletida”

Don Clark

”Seria difícil de imaginar, antes de ver no panorama, algo tão magnífico (...). A cidade fica bem aninhada em uma floresta luxuriosa e situada em uma margem íngreme, observa as águas calmas da grande Baía de Todos os Santos.”

Charles Darwin

(Ao chegar à Salvador em 28 de fevereiro de 1832)

RESUMO

O Alto Cristalino de Salvador é constituído por um aquífero de natureza misto formado predominantemente por granulitos tonalíticos, charnoenderbíticos e monzodioríticos. Essas rochas estão intensamente fraturadas e encobertas por um espesso manto de alteração intempérica, sedimentos Terciários da Formação Barreiras e Quaternários costeiros, esses últimos representados pelas dunas, areias litorâneas e aluviões fluviais.

Segundo os dados isotópicos obtidos, o aquífero é recarregado essencialmente por água meteórica oriunda da precipitação pluviométrica, muito abundante nessa região de clima úmido. O fluxo subterrâneo regional se faz através das coberturas e/ou dos sistemas de fraturamentos subverticais que apresentam direções N30-40° e N130-140° interceptados pelas fraturas horizontais que proporcionam um movimento da água subterrânea no sentido nordeste em direção à bacia hidrográfica do rio Ipitanga e leste/sul em direção ao Oceano Atlântico.

Na zona de recarga do planalto costeiro dissecado situado à noroeste da cidade de Salvador, a água subterrânea é predominantemente cloretada-sódica sendo que ao longo do seu trajeto, passa gradativamente para cloretada cálcica-magnésiana, bicarbonatada sódica e bicarbonatada cálcica-magnésiana em direção ao mar. A influência marinha sobre a água subterrânea é notada em vários pontos próximos à orla atlântica, através do aumento da condutividade elétrica e dos teores de cloreto, sódio, magnésio, bicarbonato, e da dureza, porém com valores que não comprometem a sua qualidade ambiental. Entretanto, por se tratar de uma região fortemente antropizada, Salvador e arredores apresentam uma extensa disseminação dos nitratos e coliformes termotolerantes, além de alterações na sua cor e turbidez.

Os metais níquel, manganês e ferro se apresentam com valores acima do limite máximo permitido pela legislação vigente em vários pontos, sendo que os dois últimos podem ser até considerados como naturais devido aos processos pedogenéticos ocorridos a partir de rochas cristalinas ricas em minerais ferromagnesianos. Valores positivos do índice de saturação de ferro, verificados na água subterrânea mostram a possibilidade de precipitação de hematita e goetita a partir da água que circula no espesso manto de alteração, fato este constatado pela sua cor predominantemente amarelo-avermelhada e avermelhada. O manganês está preferencialmente dissolvido sob a forma de Mn^{2+} havendo, entretanto, a possibilidade de precipitação da rodocrosita em alguns poucos pontos da região.

O sistema aquífero misto do Alto Cristalino de Salvador se apresenta mais vulnerável à contaminação ao longo da sua planície litorânea por apresentar, principalmente, o nível hidrostático mais raso e ser constituído quase sempre por areias capeando o regolito ou o embasamento cristalino. Entretanto, foi observado um maior risco de contaminação nas áreas do planalto costeiro rebaixado à montante das principais bacias hidrográficas que cortam o município de Salvador, sobretudo em áreas de alta densidade demográfica e que apresentam serviços precários de saneamento básico.

Do ponto de vista quantitativo, o sistema aquífero do Alto Cristalino de Salvador constitui um reservatório pequeno, com uma reserva renovável (R_r) capaz de abastecer cerca de 20 a 25% da sua população durante o ano. Sendo assim, não tem condições de substituir o sistema oficial de abastecimento e distribuição de água, em caso de colapso total.

ABSTRACT

The Salvador crystalline high includes a mixed aquifer system composed dominantly by tonalitic, chernoenderbitic and monzodioritic granulites. These rocks are highly fractured and covered by a thick alteration layer, by Tertiary sediments of the Barreiras Formation and by coastal Quaternary deposits. The former are represented as dunes, littoral sands and fluvial deposits.

According with obtained isotopic data this aquifer is recharged essentially by rain water, very abundant in this humid climate region. The regional groundwater flow occurs through the covers and/or through the subvertical fracture network oriented along the directions N30-40° and N130-140°, intersected by horizontal fractures, that drives the groundwaters into a northeastern sense, in the direction of the Ipitanga hydrographic basin and to east/south in direction to the Atlantic Ocean.

In the recharge zone of this dissected coastal highplain located at the northwest portion of Salvador city, the groundwater is dominantly sodium-chloride and, along its pathways, changes gradually to calcium-magnesium chloride and to sodium and calcium-magnesium bicarbonated in the sea direction. The marine influence on the groundwater is noted along several points close to the oceanic border, through the increase of the electrical conductivity and of the content of chloride, sodium, magnesium, bicarbonate and hardness, however with values that do not compromise their environmental quality. However because of the human influence, Salvador and its neighbours presents an extensive dissemination of nitrates and coliforms, besides alterations in colour and turbidity.

The metals, nickel, manganese and iron are, at several points, present with values above the maximum limit allowed by the actual regulation. The last two may be considered to be due to the natural pedogenetic processes developed over crystalline rocks rich in iron-magnesium silicates. Positive values of the iron saturation index, verified in the groundwater, show the possibility of hematite and goetite precipitation from the water that flocus in the deeply altered mantle, fact that is reflected in its colour dominantly red-yellow to red. The manganese is preferentially dissolved as Mn^{2+} with the possibility for precipitation of rodocrosite in some points of the region.

The mixed aquifer system of the Salvador crystalline high is very vulnerable to contamination along its coastal plain due to a shallow water table and to the sand covering the saprolyte or the crystalline basement. However, it has been observed a large contamination risk in the coastal highplains, along the main hydrographic drainages that cut Salvador county, mainly in areas of high demographic density and that has low or missing sanitary services.

From a quantitative point of view, the Salvador aquifer system comprises a small underground reservoir, with a renewed annual reserve able to supply around only 20 to 25% of its population. In this way, there is no condition to replace the official supply-distribution system, in case of a total collapse.

AGRADECIMENTOS

- Agradecemos inicialmente à Empresa Baiana de Águas e Saneamento (Embasa) nas pessoas dos Engenheiros Elton Carvalho da Diretoria de Operações e Márcia K. Amoedo (Gerente OPTQ) pelo empenho junto à Presidência dessa Empresa visando o financiamento dessa pesquisa e a realização de todas as análises químicas e bacteriológicas, de fundamental importância para a elaboração e conclusão desse trabalho.
- Os nossos agradecimentos especiais vão para o colega e Professor Johildo Salomão Figueiredo Barbosa – orientador da pesquisa, pela colaboração e transmissão dos seus conhecimentos e da vasta experiência acumulada ao longo da sua vida acadêmica e profissional, além da paciência nas discussões e correções dos textos, desde o início dessa jornada na fase de elaboração do Plano de Pesquisa até a finalização dessa tese;
- Ao Professor Olivar Antônio Lima de Lima – co-orientador da pesquisa, pelos ensinamentos, ajuda e colaboração no capítulo sobre a caracterização hidrogeológica do Alto Cristalino de Salvador;
- Aos colegas e Professores Manoel Jerônimo Moreira Cruz, Maria José Marinho do Rego, Lucedino Paixão Ribeiro (in memoriam), Joana Angélica Guimarães Luz, Harald Klammer (Universidade de Tecnologia da Áustria), Luiz Rogério Bastos Leal, Abílio Carlos da Silva Bittencourt, Dária Maria Cardoso Nascimento, Joaquim Xavier Cerqueira Neto, Roberto Mota (Universidade Federal do Ceará), Antonio Expedito Gomes de Azevedo (Laboratório de Física Nuclear Aplicada da UFBA), Christian Lopes Santos (Laboratório de Física Nuclear Aplicada da UFBA), Luiz César Correa-Gomes, Rita Maria W. Nano (Núcleo de Estudos Ambientais da Universidade Federal da Bahia), Maria de los Remédios Quinteiros Arias, José Haroldo da Silva Sá, José Maria Landim Domingues, Telésforo Martinez Marques, Hailton Melo, José de Castro Melo e Ari Medeiros Guerra. Eles, em sua especialidade e área de conhecimento, colaboraram, ajudaram, apoiaram, facilitaram a consulta de dados, indicaram referências bibliográficas, executaram gentilmente diversas análises de laboratório, discutiram o uso e o manejo das ferramentas de geoprocessamento, noções de cartografia, técnicas estatísticas e geoestatísticas, química dos solos e das águas, etc. muitas vezes em infindáveis conversas informais de corredor.
- Aos geólogos Arnaldo Correa Ribeiro e filhos (Hidrocon) e José Mauro Amâncio (Aguageo) pela gentil colaboração e fornecimento de informações técnicas sobre diversos poços tubulares perfurados em Salvador por suas respectivas empresas;

- À Eng. Rosa Alencar (Embasa), Alexandre Cerqueira de Jesus (laboratório de geotecnia da EPUFBA), os técnicos Sales, Edinéia e Edgard (laboratórios de química analítica e difratometria de raios-X do IGEO/UFBA respectivamente), Vilberto L. M. Nascimento (laboratório de raios-X do Instituto de Química) e Joaquim Lago (mestre da informática), pelo apreço e pela colaboração espontânea;
- Aos colegas da pós-graduação Rambranht Aquino, Cristovaldo Bispo, Foster, Lacerda, Fernando Esteves e Godofredo, entre outros pelo companheirismo e discussão dos conteúdos das aulas e tarefas discentes;
- Às graduandas em geologia Cristiane Maciel de Lima e Jailma Souza pela colaboração e execução de diversas tarefas de escritório, notadamente na elaboração de algumas figuras e dos mapas que compõem este trabalho;
- A bibliotecária Joceane C. H. Santos que muito gentilmente revisou as referências bibliográficas aqui apresentadas, aos funcionários da Pós-Graduação em Geologia, Nilton, Maria e Gil (Gilzélío) pela eficiência no acompanhamento das nossas atividades discentes;

A TODOS, O MEU FRATERNAL AGRADECIMENTO.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

AGRADECIMENTOS

SUMÁRIO	I
LISTA DE FIGURAS	Iv
LISTA DE FOTOS	Vii
LISTA DE TABELAS	Viii
LISTA DE QUADROS	Ix
1 INTRODUÇÃO	10
1.1 HISTÓRICO SOBRE O ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM SALVADOR	10
1.2 PROBLEMÁTICA	14
1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA	16
1.4 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	17
2 METODOLOGIA DA PESQUISA	19
2.1 CONSULTA BIBLIOGRÁFICA	19
2.2 AMOSTRAGEM DA ÁGUA SUBTERRÂNEA E ANÁLISES DE LABORATÓRIO	22
2.3 SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	29
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E O MEIO FÍSICO NATURAL	31
3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA E AS BACIAS DE DRENAGEM	31
3.2 GEOLOGIA LOCAL	34
3.2.1 O Alto Cristalino de Salvador	35
3.2.2 A Bacia Sedimentar do Recôncavo	39
3.2.3 As Coberturas de Regolíticas	40
3.2.4 A Formação Barreiras	45
3.2.5 As Dunas e as Areias Litorâneas	47
3.2.6 Os Depósitos Flúviomarinhas	49
3.3 ORGANIZAÇÃO DO MODELADO	50
3.3.1 Planalto Costeiro Dissecado	50
3.3.2 Zonas de Mares de Morros ou Lombadas	50

3.3.3	A Planície Litorânea Atlântica	52
3.4	ASPECTOS CLIMÁTICOS	53
3.4.1	Balço Hídrico Atmosférico ou Climatológico	54
3.4.2	Tipo de Clima em Salvador	56
3.5	COBERTURA VEGETAL E A QUALIDADE AMBIENTAL	56
3.6	RESUMO DO CAPÍTULO.....	58
4	CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA	61
4.1	POTENCIOMETRIA	63
4.2	A VARIAÇÃO DO NÍVEL HIDROSTÁTICO E A RECARGA DO AQÜÍFERO	70
4.3	ORIGEM DA ÁGUA SUBTERRÂNEA E O CICLO HIDROLÓGICO	74
4.4	CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS	79
4.5	CARACTERIZAÇÃO DO AQÜÍFERO DO ALTO CRISTALINO DE SALVADOR	85
4.5.1	As Litologias Armazenadoras	93
4.6	RESERVA E POTENCIALIDADE HIDROGEOQUÍMICA	95
4.6.1	Reserva Permanente (Rp)	96
4.6.2	Reserva Reguladora ou Renovável (Rr)	96
4.6.3	Potencialidade (Po)	97
4.6.4	Disponibilidade Efetiva Instalada (DEI)	98
4.7	RESUMO DO CAPÍTULO.....	98
5	CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO HIDROQUÍMICA	101
5.1	BALANÇO IÔNICO E CÁLCULO DO ERRO ANALÍTICO	101
5.2	CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	103
5.3	ÍNDICES HIDROGEOQUÍMICOS OU RAZÕES IÔNICAS	107
5.4	A GEOQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	109
5.4.1	Especiação dos Elementos Químicos a partir da Água Subterrânea	109
5.4.1.1	A fase do ferro na água subterrânea	109
5.4.1.2	A fase do manganês na água subterrânea	111
5.4.1.3	A fase da aragonita, calcita e dolomita na água subterrânea	117
5.4.1.4	A fase dos argilominerais e gibsita na água subterrânea	119
5.4.2	Processo de intemperização das rochas cristalinas do Alto de Salvador	123
5.5	RESUMO DO CAPÍTULO.....	130

6	FATORES CARACTERÍSTICOS E A QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	132
6.1	FATORES CARACTERÍSTICOS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	132
6.1.1.	Fator 1 – Associado às Rochas Metamórficas Paraderivadas Cálcio-Magnesianas	134
6.1.2	Fator 2 – Associado às Partículas Sólidas Produzidas pelos Poços Tubulares	139
6.1.3	Fator 3 – Associado à Variação do Bicarbonato e do pH	140
6.1.4	Fator 4 – Associado à Influência Marinha	144
6.1.5	Fator 5 – Associado à Alteração de Rochas com Minerais Ferromagnesianos	150
6.2	QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA CONSUMO HUMANO	154
6.3	QUALIDADE BACTERIOLÓGICA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	160
6.4	QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA IRRIGAÇÃO	163
6.5	RESUMO DO CAPÍTULO	166
7	VULNERABILIDADE DO AQÛÍFERO DO ALTO CRISTALINO DE SALVADOR	168
7.1	INTRODUÇÃO	168
7.2	CONCEITUAÇÃO SOBRE A VULNERABILIDADE E O RISCO	171
7.3	AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE PELO MÉTODO DRASTIC	173
7.4	APLICAÇÃO DO MÉTODO DRÁSTIC PARA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO AQÛÍFERO FREÁTICO DO ALTO CRISTALINO DE SALVADOR	175
7.5	RESULTADOS OBTIDOS	178
7.6	RESUMO DO CAPÍTULO	181
8	CONCLUSÕES FINAIS	184
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	187
	ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

2.1	Localização dos poços tubulares no alto cristalino de Salvador	20
2.2	Localização dos pontos de amostragem de água subterrânea no alto cristalino de Salvador-BA	26
2.3	Fluxograma das etapas de laboratório	27
3.1	Localização da área de trabalho	31
3.2	Limites do município de Salvador e áreas adjacentes	32
3.3	Bacias hidrográficas do município de Salvador	34
3.4	Geologia da cidade de Salvador – Bahia	38
3.5	Seção geológica esquemática da Bacia do Recôncavo	39
3.6	Relação entre as rochas cristalinas do Alto de Salvador e suas coberturas	45
3.7	Domínios geomorfológicos da cidade do Salvador – BA	51
3.8	Balanço hídrico climatológico / 1961-1990	54
4.1	Distribuição da espessura das coberturas sobre o embasamento cristalino de Salvador – BA	62
4.2	Potenciometria e fluxo da água subterrânea no alto cristalino de Salvador – BA ..	64
4.3	Situação estrutural do topo do embasamento cristalino em relação ao nível do mar, Salvador – BA	65
4.4	Potenciometria associada ao alto cristalino de Salvador	66
4.5	Modelo estrutural proposto para o embasamento cristalino de Salvador	67
4.6	Perfis esquemáticos mostrando o topo embasamento cristalino em relação ao nível do mar (NM)	69
4.7	Variação do nível hidrostático em relação ao nível do mar	72
4.8	Correlação entre o nível estático médio e a pluviometria – Instituto de Biologia / UFBA	73
4.9	Correlação entre o nível estático médio e a pluviometria – CPD / UFBA.....	73
4.10	Correlação entre o nível estático médio e a pluviometria – Escola de Medicina Veterinária / UFBA	74
4.11	Equação de ajuste dos pontos amostrados em relação a linha meteórica de Craig (1961)	76
4.12	A – Águas meteóricas	77
4.12	B – Distribuição do δ Deutérico e do Oxigênio 18	77
4.13	Relação entre o δ O ¹⁸ e o cloreto, incluindo o poço do Correio da Bahia	79
4.14	Relação entre o δ O ¹⁸ e o cloreto, excluindo o poço do Correio da Bahia	79
4.15	Perfil litológico do poço tubular do Parque de Exposição Agropecuária (PT-48) ..	82

4.16	Recuperação piezométrica do poço do Parque de Exposição Agropecuária (PT-48)	83
4.17	Histograma de frequência da profundidade dos poços tubulares no Alto Cristalino de Salvador	86
4.18	Distribuição do nível estático da água subterrânea em Salvador	88
4.19	Vazão dos poços tubulares no Alto Cristalino de Salvador	89
4.20	Distribuição da vazão dos poços tubulares no Alto Cristalino de Salvador-BA	90
4.21	Distribuição da vazão específica dos poços tubulares no Alto Cristalino de Salvador-BA	92
4.22	Análise de agrupamento através da distância euclidiana dos dados hidrológicos	95
5.1	Diagrama triangular de Piper (1944) para as águas subterrâneas do Alto Cristalino de Salvador	104
5.2	Tipos de águas subterrâneas baseado no diagrama de Stiff	105
5.3	Diagrama pH – Eh para o ferro	113
5.4	Distribuição dos índices de saturação da hematita na água subterrânea de Salvador – BA.	115
5.5	Distribuição dos índices de saturação da goetita na água subterrânea de Salvador – BA.	116
5.6	Diagrama pH – Eh para o manganês	117
5.7	Distribuição dos índices de saturação da rodocrosita no Alto Cristalino de Salvador – BA.	118
5.8	Difratometria de raios-X do aglomerado de quartzo com cimento de manganês ...	119
5.9	Distribuição dos índices de saturação da dolomita na água subterrânea de Salvador – BA.	121
5.10	Difratometria de raios-X dos sedimentos em suspensão na água subterrânea mostrando os picos de calcita – Loteamento Veredas Piatã	122
5.11	Difratometria de raios-X dos sedimentos em suspensão na água subterrânea mostrando os picos de calcita e dolomita – Correio da Bahia	122
5.12	Distribuição dos índices de saturação da esmectita na água subterrânea de Salvador – BA.	124
5.13	Distribuição dos índices de saturação da caolinita na água subterrânea de Salvador – BA.	125
5.14	Distribuição dos índices de saturação da gibsitita na água subterrânea de Salvador – BA.	126
5.15	Alteração da biotita em esmectita, caolinita e oxi-hidróxido de ferro	129
5.16	Alteração do piroxênio em esmectita	129

6.1	Distribuição geoquímica da dureza da água subterrânea de Salvador – BA.	135
6.2	Distribuição geoquímica do magnésio na água subterrânea de Salvador – BA.	136
6.3	Distribuição geoquímica do pH no Alto Cristalino de Salvador – BA.	141
6.4	Distribuição geoquímica do bicarbonato na água subterrânea de Salvador – BA. .	142
6.5	Distribuição geoquímica do alumínio na água subterrânea de Salvador – BA.	145
6.6	Distribuição geoquímica do sódio na água subterrânea de Salvador – BA.	146
6.7	Distribuição geoquímica do cloreto na água subterrânea de Salvador – BA.	148
6.8	Distribuição da condutividade elétrica – Alto Cristalino de Salvador – BA.	149
6.9	Monitoramento da condutividade elétrica (1999/2002 e 2005)	150
6.10	Distribuição geoquímica do ferro total na água subterrânea de Salvador – BA.	151
6.11	Distribuição geoquímica do manganês total na água subterrânea de Salvador – BA.	153
6.12	Distribuição geoquímica do nitrato na água subterrânea de Salvador – BA.	156
6.13	Distribuição geoquímica do níquel na água subterrânea de Salvador – BA.	158
6.14	Diagrama de Lemoine (U.S.S.L., 1954)	163
6.15	Relação entre a condutividade elétrica e a razão de absorção de sódio – RAS	164
7.1	Esquema conceitual do risco de contaminação de água subterrânea	173
7.2	Distribuição do índice de vulnerabilidade DRÁSTIC no Alto Cristalino de Salvador – BA.	180

LISTA DE FOTOS

1.1	Fonte do Largo 2 de Julho	11
1.2	Aguadeiros obtendo água no centro da cidade	12
1.3	Companhia do Queimado	13
2.1	Fluxo ininterrupto de água na Fonte do Candéal (ponto AM-6)	23
3.1	Vista panorâmica da escarpa da falha de Salvador que separa a Bacia Sedimentar do Recôncavo do Alto Cristalino	35
3.2	A – Cobertura de regolito mostrando o saprolito embaixo e uma pequena cobertura de solo residual – Avenida Anita Garibaldi	41
3.2	B – Perfil mostrando de cima para baixo o solo residual o saprolito e a rocha não alterada – Pedreira de Quartel de Amaralina	41
3.2	C – Contato entre a rocha alterada e a rocha sã fraturada na Pedreira do Quartel de Amaralina	42
3.2	D – Contato entre a rocha alterada e a rocha sã pouco fraturada na Pedreira do Quartel de Amaralina	42
3.3	Rochas cristalinas alteradas (saprolito) – Praia da Paciência – Rio Vermelho	44
3.4	Estratificação cruzada na Formação Barreiras Estrada CIA – Aeroporto	46
3.5	Afloramento da Formação Barreiras Estrada de Sussuarana entre os bairros de Tancredo Neves e Mata Escura	47
3.6	Vista em detalhe dos estratos arenosos cruzados apresentando matriz argilosa – Formação Barreiras na Estrada de Sussuarana entre os bairros de Tancredo Neves e Mata Escura	47
3.7	Campo de dunas do Parque do Abaeté – Stella Mares	48
3.8	Areias de praia e dunas litorâneas – Praia de Placafor (Piatã)	49
4.1	Zona de falha normal inclinada do Jardim de Allah – N30-40°/75° NW	68
4.2	Zona de falha normal inclinada do Jardim de Allah – N30-40°/75° NW	68
4.3	Campus Universitário de Ondina – UFBA	70
6.1	Amostragem de água no ponto AM-5 (Corona)	162
7.1	Ocupação desordenada na Baixa de Santa Rita no bairro do Pau da Lima	182

LISTA DE TABELAS

2.1	Localização dos poços tubulares consultados na literatura	21
2.2	Localização dos pontos de amostragem de água subterrânea	25
3.1	Dados climáticos do município de Salvador (período 1961-1990)	55
3.2	Parâmetros climáticos de Salvador (período 1961-1990)	55
4.1	Cálculo da recarga por variação mensal do nível estático (NE)	72
4.2	Dados isotópicos das águas subterrâneas do Alto Cristalino de Salvador	76
4.3	Medidas isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ ‰ e δD^2 ‰ das águas de chuva na estação meteorológica de Ondina	78
4.4	Sumário estatístico dos parâmetros hidráulicos	84
4.5	Sumário estatístico – parâmetros hidrogeológicos básicos	87
4.6	Matriz de correlação linear (K. Pearson) entre as variáveis hidrogeológicas	93
4.7	Valores hidrológicos médios por sistema aquífero (valor da mediana)	94
5.1	Resultados do balanço iônico	102
5.2	Relações iônicas características	104
5.3	Valores médios (mediana) por fácies de água subterrânea	106
5.4	Razões iônicas e os facies hidroquímicos (valor da mediana)	108
5.5	Valores dos índices de saturação (IS)	112
5.6	Matriz de correlação linear entre o pH, Eh e os índices de saturação (SI)	114
5.7	Razão molar entre os elementos na rocha	128
5.8	Razão molar entre os elementos na água subterrânea	128
6.1	Análise de fatores (Varimax normalizada) – Método dos componentes principais (valores considerados > 0,70)	133
6.2	A variância total explicada: Componentes Parciais	134
6.3	Sumário estatístico das variáveis analisadas	137
6.4	Matriz de correlação de Pearson	143
6.5	Distribuição dos coliformes termotolerantes na água subterrânea no Alto Cristalino de Salvador – BA.	161
6.6	Definição das categorias de sódio e salinidade	165
7.1	Intervalo e valores das variáveis a partir de ALLER <i>et al.</i> , (1987)	176
7.2	Índice de ponderação (w) do método DRÁSTIC (Aller, 1987)	177
7.3	Valor do índice DRÁSTIC em cada ponto de captação de água subterrânea no Alto Cristalino de Salvador	177
7.4	Matriz de correlação linear (Pearson)	181

LISTA DE QUADROS

2.1	Formulário de campo	24
2.2	Técnicas e métodos analíticos utilizados	28
3.1	Áreas territoriais de Salvador	32
3.2	Os horizontes pedológicos desenvolvidos no regolito	41

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRICO SOBRE O ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM SALVADOR

A água subterrânea do Alto Cristalino de Salvador tem sido muito utilizada desde os primórdios da fundação da cidade em 1549, quando toda a população se abastecia através das fontes naturais e minadouros existentes no seu núcleo central e nos arredores.

Ao norte da cidade de Salvador, rios e mananciais abasteciam navios europeus engajados na exploração de madeiras nobres, já no início do século XVI. Ainda que não fossem tantas, as nascentes d'água foram um dos fatores determinantes do local onde o fidalgo Thomé de Souza decidiu fundar uma povoação em 1549. Ele recebeu uma clara recomendação de El Rei D. João III, de Portugal: “...espero que esta seja e deve ser em sítio sadio e de bons ares, e que tenha abundância de águas, e porto em que bem possam amarrar os navios (...), porque todas essas qualidades ou as mais delas que puderem ser, cumpre que tenha a dita fortaleza povoação”. (Bochicchio, 2003). Privilegiada pela natureza com lagoas e rios, Salvador do século XVI oferecia fontes de boa qualidade a seus habitantes, inclusive para seus nativos - os índios Tupinambás que habitavam Salvador e todo o Recôncavo Baiano. Já no século XVIII, apesar da existência de um pouco mais de trinta fontes, muitas delas particulares, a cidade necessitava de mais água, a ponto da Câmara provincial impor regras para que os mananciais não fossem contaminados, embora muitas delas já estivessem poluídas naquela época. Até a primeira metade do século XIX foram construídos chafarizes e cisternas por toda a Cidade, havendo cerca de 20 fontes de água, entre públicas e privadas (**Foto 1.1**). Essas águas eram transportadas em barris de madeira, carretes e potes de barro pelos aguadeiros e botadoras de água que eram escravos negros e brancos pobres que carregavam pesados barris de madeira cheios d'água. Eram os aguadeiros, homens e mulheres, sobretudo negros, que vendiam o produto por conta própria ou o carregavam para seus senhores (**Foto 1.2**).

Nas casas, a água era armazenada em tanques, talhas, potes e moringas. Os chafarizes e as fontes públicas na primeira metade do século XIX não mais atendiam a demanda da comunidade. Em 1850 a cidade atingiu 60 mil habitantes e já carecia de um sistema de abastecimento, entretanto ainda conservava o modelo colonial de abastecimento insuficiente para acompanhar o crescimento da população. Foi nessa época que se decidiu pela implantação de redes de abastecimento na cidade. Para isso, foi criada a Companhia do Queimado por João Maurício Wanderley, o Barão de Cotegipe, que começou a funcionar a partir de 1857, objetivando solucionar o grave problema de abastecimento de água em Salvador. Em 1852 foram destinados 150 contos de réis para os primeiros estudos de implantação de um serviço de canalização de água na capital (Embasa, 2003).

Seu manancial era a represa no rio Queimado, uma das nascentes do rio Camarujipe, que produzia em torno de mil metros cúbicos por dia, distribuído por 21 chafarizes e casas de vendagens (Embasa, 2003).



Foto 1.1 Fonte do Largo 2 de Julho (Fonte: Embasa, 2003) – foto sem data

Mas as velhas fontes municipais e particulares faziam concorrência à nova rede e a complementavam no abastecimento da cidade (Bochicchio, 2003). Uma delas, na mesma região, era a fonte do Queimado construída pelos jesuítas em 1801 e famosa por sua água de boa qualidade. A água era captada diretamente dos minadouros em barris de até 80 litros, transportada em animais até as residências e, então, vendida. O preço variava de acordo com os períodos das estações climáticas e a distribuição de água à população era feita através dos chafarizes. Uma peça móvel (pena d'água) controlava a quantidade do produto liberado para cada residência. Em 1859, a novidade motivou a visita da família imperial (D. Pedro II) e ilustres personalidades da época à sede da empresa situada no atual bairro da Caixa D'água.



Foto 1.2 Aguadeiros obtendo água no centro da cidade (Fonte: Embasa, 2003) – foto sem data..

A Companhia do Queimado foi, então, a primeira concessionária de abastecimento de água do país (**Foto 1.3**). Em 1880, essa empresa iniciou as obras de ampliação com a construção da barragem de Mata Escura situada no curso do médio rio Camarujipe. Pouco tempo depois a barragem de Mata Escura foi reconstruída e reforçada com a nova barragem, a do rio da Prata, para atender a uma população que já era de 170.000 habitantes. No ano de 1900 a capacidade de atendimento à demanda era ainda de 7000 m³/dia para uma população de 200.000 habitantes, portanto ainda insuficiente, necessitando complementação. Assim, no começo do século XX, Salvador produzia apenas 20% da água de que necessitava. Somente em 1904 o serviço de água de Salvador passa a ser administrado pela Intendência Municipal que assina contrato com o engenheiro Teodoro Sampaio através de Concorrência Pública, no valor de 2.700 contos de réis para a reforma, ampliação e exploração do abastecimento. O relatório ficou concluído em 1906 e os serviços em 1910, com a construção dos mananciais do Saboeiro, Cascão, Cachoeirinha, Pituaçu, rio Jaguaribe e Trobogi. Foi o engenheiro Teodoro Sampaio quem planejou e implantou o novo sistema de abastecimento de água, que passou a ser de responsabilidade da Intendência Municipal (como era chamada a Prefeitura). Pela primeira vez na história de Salvador, a água chegou diretamente às casas dos cidadãos, sem intermediários. Cada vez menos gente dependia das velhas e tradicionais fontes. Elas viraram histórias, conforme assinala Regina Bochicchio em matéria publicada no jornal ATARDE, edição de 3/8/2003. Em 1907, com a inauguração dos novos dispositivos e melhorias no Sistema de Mata Escura/Prata, abandonou-se a

represa do Queimado que já estava naquela ocasião bastante poluída. Entre 1915 e 1917, a carência de água volta a preocupar os governantes e incomodar a população. O engenheiro Lourenço Baeta Neves sugeriu intervenções urgentes para melhorar a qualidade e o volume de água.

Em 1924, o médico Genésio Pacheco do Instituto Osvaldo Cruz apresentou um diagnóstico ambiental sobre as represas que abasteciam Salvador cujo relatório apontava a represa do Queimado, que já estava abandonada naquela ocasião, como um reservatório de águas poluídas, o que provocava surto de febre tifóide e desintéria na população (Embasa, 2003).



Foto 1.3 Companhia do Queimado (Fonte: Embasa, 2003) – foto sem data.

Preocupado com a situação de saneamento e abastecimento de Salvador, o governador Góes Calmon que governou a Bahia entre 1924 e 1928 transferiu para o Estado a execução das obras de saneamento da cidade através do Decreto lei 1114 de 30/12/24. A gestão ficou com o Departamento de Engenharia da Subsecretaria de Saúde e Assistência Pública. Em 1925, o governo contratou no Rio de Janeiro o escritório do engenheiro Francisco Rodrigues Saturnino de Brito, para buscar alternativa de abastecimento de água. Em 1926, Saturnino de Brito apresentou um relatório propondo alternativas para implantação de um sistema destinado a atender uma população futura de 400 mil pessoas. Os novos estudos tiveram como orientação o aproveitamento do rio do Cobre para atendimento da Cidade Baixa e mais duas barragens, Ipitanga e Jaguaribe, de modo a elevar a disponibilidade de água para 133.400 m³/dia. A barragem do Cobre foi construída em 1932 e Ipitanga em 1935, juntamente com o Parque da Bolandeira onde se localiza a estação de tratamento de água Saturnino de Brito (Embasa, 2003). Em 1962, o governo estadual instituiu a Superintendência de Águas e Esgotos do Recôncavo – SAER para planejar, programar e administrar o abastecimento de água em todo o Recôncavo da Bahia

(Embasa, 2003). Com a criação do plano Nacional de Saneamento – Planasa no início da década de 70, surge a Embasa – Empresa Baiana de Água e Saneamento S.A. incorporando em 1975 os serviços das extintas Companhias Metropolitanas de Água e Esgoto (COMAE) e Companhia de Saneamento do Estado da Bahia (COSEB).

1.2 PROBLEMÁTICA.

A partir de meados do século XIX o abastecimento da população com água subterrânea das fontes naturais foi sendo paulatinamente abandonado e substituído progressivamente pelos mananciais de superfície situados dentro do município, isto porque a vazão das fontes era insuficiente para abastecer toda a população, principalmente no período do verão por causa do aumento do consumo. Entretanto, alguns desses mananciais de superfície também foram sendo paulatinamente desativados a partir da segunda metade do século XX devido ao crescimento da população com a sua conseqüente ocupação do espaço urbano o que contribuiu para poluição de alguns desses mananciais. Já a partir da década de 1930 o abastecimento passou a ser feito através de mananciais existentes nos subúrbios e fora do município, através das barragens do rio do Cobre, Ipitanga, Joanes, Santa Helena e mais recentemente de Pedra do Cavalo, situada a mais de 100 km de Salvador.

Segundo informações da Embasa, atualmente cerca de 98% da população de Salvador é abastecida com água tratada das barragens situadas fora da cidade, notadamente Pedra do Cavalo e Joanes. Porém, uma pequena parcela da população soteropolitana, cujo percentual é desconhecido (estima-se um valor de aproximadamente 5%), também faz uso sistemático das águas subterrâneas das fontes e cacimbas na periferia mais pobre e, também, através de poços tubulares em muitos condomínios residenciais de classe média, situada em bairros mais nobres da cidade sem qualquer controle por parte dos órgãos públicos competentes. A utilização desse expediente representa para os usuários uma economia direta e prejuízo para o sistema de distribuição, quando parte da população foge do pagamento da conta de água e esgoto. Na verdade, esse meio alternativo de obter água subterrânea, representa também a possibilidade de uma fonte segura e adicional no seu suprimento, principalmente em áreas onde muitas vezes o fornecimento não é regular. Isto se verifica mais acentuadamente em loteamentos irregulares e clandestinos, bem como em invasões de áreas públicas e privadas, quase sempre ocupada por uma população de baixa renda que não tem acesso ao mercado imobiliário, em conseqüência muitas vezes da pouca efetividade das políticas habitacionais de interesse social.

Pelo fato desse aquífero situar-se sob uma região densamente povoada com múltiplas fontes de contaminação, as águas superficiais e subterrâneas apresentam em alguns locais, contaminação por metais pesados, hidrocarbonatos de petróleo (BTEX: benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos e

hidrocarbonetos poliaromáticos), além de uma contaminação disseminada de coliformes e bactérias heterotróficas. No caso das águas subterrâneas, este fato foi constatado nas bacias hidrográficas dos rios Camarujipe por Guerra & Nascimento, 1999 e Lucaia por Nascimento 2002. Alguns valores de amônia, nitrito, nitrato e fosfato acima do recomendado, estão associados principalmente aos efluentes domésticos, constituindo nutrientes muito comuns em áreas urbanas que apresentam índices de saneamento e padrões higiênicos não satisfatórios em alguns locais. Os altos valores de ferro e manganês são de origem natural, devido à cobertura regolítica desenvolvida a partir dos processos pedogenéticos. Alguns valores pontuais acima do recomendado pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde são verificados na água subterrânea para chumbo, mercúrio, cádmio e arsênio, entre outros metais quase sempre devido aos processos de absorção e adsorção nos colóides em geral, nos argilominerais e matéria orgânica, oxí-hidróxidos de ferro e manganês. Isto é mais freqüente nas águas de poços e cacimbas inativos e paralisados. Nesses casos, apresentam quase sempre altos valores de cor aparente, turbidez e sólidos em suspensão. Quando a água é filtrada com remoção das partículas em suspensão, normalmente os teores anormais desses metais tendem a diminuir ou mesmo desaparecer.

A contaminação biológica das águas subterrâneas, detectada através dos coliformes termotolerantes, coliformes totais e bactérias heterotróficas é sem dúvida a mais comum e mais bem difundida por toda a cidade nas águas superficiais (Moraes, 1995) e nas águas subterrâneas segundo Guerra & Nascimento (1999) e Nascimento (2002). A freqüência de contaminação biológica é maior em locais onde não existe um perímetro de proteção higiênico-sanitária adequada e onde os pontos de captação de água subterrânea encontram-se vulneráveis devido às instalações malfeitas nos poços tubulares e principalmente nas cacimbas. Além do mais a maioria dos grandes rios que drenam Salvador não possuem condições nem vazão suficiente para que haja a sua autodepuração.

A presença de compostos orgânicos do tipo benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (BTEX) foram verificados principalmente em algumas áreas e perímetro de influência de postos de combustíveis, garagens de ônibus e caminhões que, em alguns casos, apresentam vazamentos nos seus tanques de armazenamento, principalmente aqueles mais antigos com mais de 20 anos de utilização. A contaminação do freático de Salvador também acontece devido às manobras inadequadas dos frentistas quando do abastecimento dos veículos. Em áreas onde se concentram oficinas mecânicas, retífica de motores, borracharias e revendedoras de veículos também foi observada a presença de BTEX e hidrocarbonetos pesados de petróleo (óleos e graxas) imiscíveis nas águas de escoamento superficial em dias de chuva podem se infiltrar para o lençol freático.

No Alto Cristalino de Salvador, a salinidade das águas aferidas através da condutividade elétrica, pode ser considerada baixa devido a grande renovação do aquífero, situando-se em torno de 400-500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Existem indicações (Lima, 1999) de que a salinidade da água no cristalino tende a aumentar a partir da orla oceânica, em direção ao miolo de Salvador, região situada entre a BR-324 e a Avenida Luiz Viana Filho. Sob condições naturais, a interface água doce-água salgada na zona costeira da Região Metropolitana de Salvador, aflora sob o mar (Lima, 1999). Sendo assim, é muito provável que, uma exploração intensiva dos poços poderá promover o deslocamento dessa interface para o interior da cidade e a água produzida começará a ser progressivamente salinizada no tempo (Lima, 1999). Existe uma forte evidencia de que a salinização da água subterrânea em alguns poços situados no domínio da orla Atlântica é consequência principalmente do “afogamento” dos rios que desembocam no mar e que apresentam nível de base com cotas inferiores aos da maré alta. Além do mais, a cunha salina que se projeta algumas dezenas ou centenas de metros por sob a cidade de Salvador, também provoca a salinização em alguns pontos de captação de água subterrânea, como por exemplo, na velha fonte do “Chega-Nêgo” em Ondina, situada próxima ao mar.

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo principal deste trabalho foi conhecer e dimensionar a quantidade e a qualidade das águas subterrâneas no Alto Cristalino de Salvador visando a sua utilização como alternativa complementar de abastecimento e distribuição de água para a sua população.

Para atingir tal objetivo, utilizaram-se as seguintes linhas de investigação: (i) o estudo do modelo de funcionamento hidrogeológico do sistema aquífero; (ii) a origem da água e o ciclo hidrológico; (iii) definição das reservas e potencialidades do sistema aquífero; (iv) classificação e definição dos tipos de água subterrânea; (v) caracterização geoquímica da água e sua relação com o fluxo subterrâneo; (vii) caracterização da vulnerabilidade intrínseca do aquífero subterrâneo.

Nos objetivos específicos levou-se em conta a origem da água, recarga, armazenamento, reservas, fluxo e circulação subterrânea além da descarga ou exudação do sistema aquífero. Na caracterização hidroquímica procurou-se definir os tipos, as relações iônicas características e sua relação com as rochas armazenadoras além da qualidade física, química e biológica. A determinação dos isótopos naturais de oxigênio 18 e hidrogênio (Deutério) serviu para definir a origem da água de recarga do aquífero. Por se tratar de um aquífero raso e freático, situado numa região extremamente populosa, estabeleceu-se através do método DRASTIC (Aller et al, 1987), o zoneamento de áreas com maior vulnerabilidade e, conseqüentemente, com maior possibilidade de sofrerem contaminação.

1.4 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.

A água subterrânea da região do Alto Cristalino de Salvador é muito utilizada por diversos órgãos públicos e por parte da população, como meio suplementar de abastecimento. O setor terciário da economia como o comércio em geral, as centenas de postos de serviço, além das empresas de ônibus e caminhões, da construção civil, de refrigeração, limpeza em habitações, entre outras, tem-se servido desses recursos hídricos subterrâneos.

Apesar desse sistema aquífero se constituir numa reservas estratégica para a cidade, a sua potencialidade e disponibilidade efetivamente instalada, os tipos e a qualidade de suas águas são relativamente desconhecidos na sua totalidade. Dispõe-se apenas de alguns dados básicos pontuais incompletos de algumas centenas de poços tubulares, cacimbas e fontes naturais públicas e privadas espalhadas pela cidade. Ao mesmo tempo não se tem uma noção conjunta e integralizada das recargas, do volume armazenado, produção, consumo, além da qualidade dessas águas visando suplementar o abastecimento da população, inclusive no que diz respeito ao consumo e uso doméstico, quando for necessário, em caso de colapso do sistema oficial de abastecimento da cidade.

Apesar do continuado uso ao longo de muitos anos desde os tempos coloniais, o sistema aquífero de Salvador tem sido pouco estudado. O mesmo não vem acontecendo com os outros sistemas no Estado da Bahia como é o caso do sistema cárstico de Irecê e do vale do rio Salitre, entre outros. O sistema São Sebastião localizado na Bacia Sedimentar do Recôncavo tem sido também muito estudado em função da grandeza das suas reservas hídricas, da qualidade das suas águas e da sua importância econômica. A sua importância econômica somente foi reconhecida após a implantação da Petrobrás em 1953, do Centro Industrial de Aratu em 1967, do Pólo Petroquímico de Camaçari em 1975 e, muito mais recentemente, com a implantação da montadora de veículos da Ford em 2001.

A importância econômica do aquífero do Alto Cristalino de Salvador é relativamente menor do que o São Sebastião, porém sua importância como reserva estratégica pode ser atestada e reconhecida em função do volume de água atualmente utilizado na irrigação de parques e jardins, limpeza de ruas e logradouros, em projetos de paisagismo, postos de combustíveis na lavagem de veículos, empresas de ônibus e caminhões, de refrigeração, da construção civil, combate a incêndios, limpeza em habitações, escolas, escritórios, oficinas, centros comerciais, estabelecimentos públicos e nos condomínios residenciais, sem falar das dezenas de fontes históricas de Salvador que apesar de sujas e mal cuidadas, algumas delas ainda oferecem a beleza paisagística dos tempos coloniais. O papel do poder público é fundamental na recuperação das funções urbanas e sociais desse patrimônio artístico e cultural, em colaboração com as comunidades que ainda as utilizam. No mínimo, elas poderiam motivar projetos paisagísticos no seu entorno, pois constituem acervo urbanístico valioso. Conforme

assinala Bochicchio (2003), alguma coisa deve ser feita para evitar o desaparecimento das fontes históricas de Salvador.

A possibilidade de utilização dos recursos hídricos subterrâneos "in natura" é muito importante porque se evita o consumo de água tratada pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. - Embasa que deve ter um destino mais nobre no abastecimento e uso doméstico. A importância dessa reserva hídrica para gerações futuras pode ser associada a uma possível necessidade de suplementação de água para a população cada vez maior, aliado às perspectivas de escassez e contaminação desse produto nos mananciais de superfície situados cada vez mais distantes dos limites urbano.

O sistema aquífero do Alto Cristalino de Salvador tem uma reserva hídrica com uma potencialidade da ordem de $1,7 \times 10^7$ m³/ano, suficiente para atender ao consumo de uma população de 250.000 habitantes (Lima, 1999). Entretanto, essas reservas podem atingir, um volume bem maior, o que aumenta a sua importância econômica e sua reserva estratégica.

Segundo Lima (1999), a eventual conexão lateral com o sistema aquífero do Recôncavo, através das zonas de fraturamentos transversais à falha de Salvador, poderia ampliar essa reserva. Entretanto, a existência dos fanglomerados bem cimentados da Formação Salvador, impede o acoplamento hidráulico entre os dois sistemas na região limítrofe da falha geológica que separa a cidade baixa da cidade alta. Além do mais, as Formações sedimentares da Bacia do Recôncavo que ocorrem na parte baixa do município de Salvador são de natureza predominantemente pelítica, sabidamente consideradas como fracas armazenadoras e produtoras de água subterrânea. São constituídas por folhelhos, calcilitos e arenitos turbidíticos da Formação Candeias e uma seqüência pelítica-carbonática das Formações Pojuca/Marfim. A Formação São Sebastião que constitui um excelente aquífero só faz contato direto com o Alto Cristalino nos municípios de Simões Filho e Camaçari situados ao norte de Salvador.

CAPÍTULO 2

METODOLOGIA DA PESQUISA

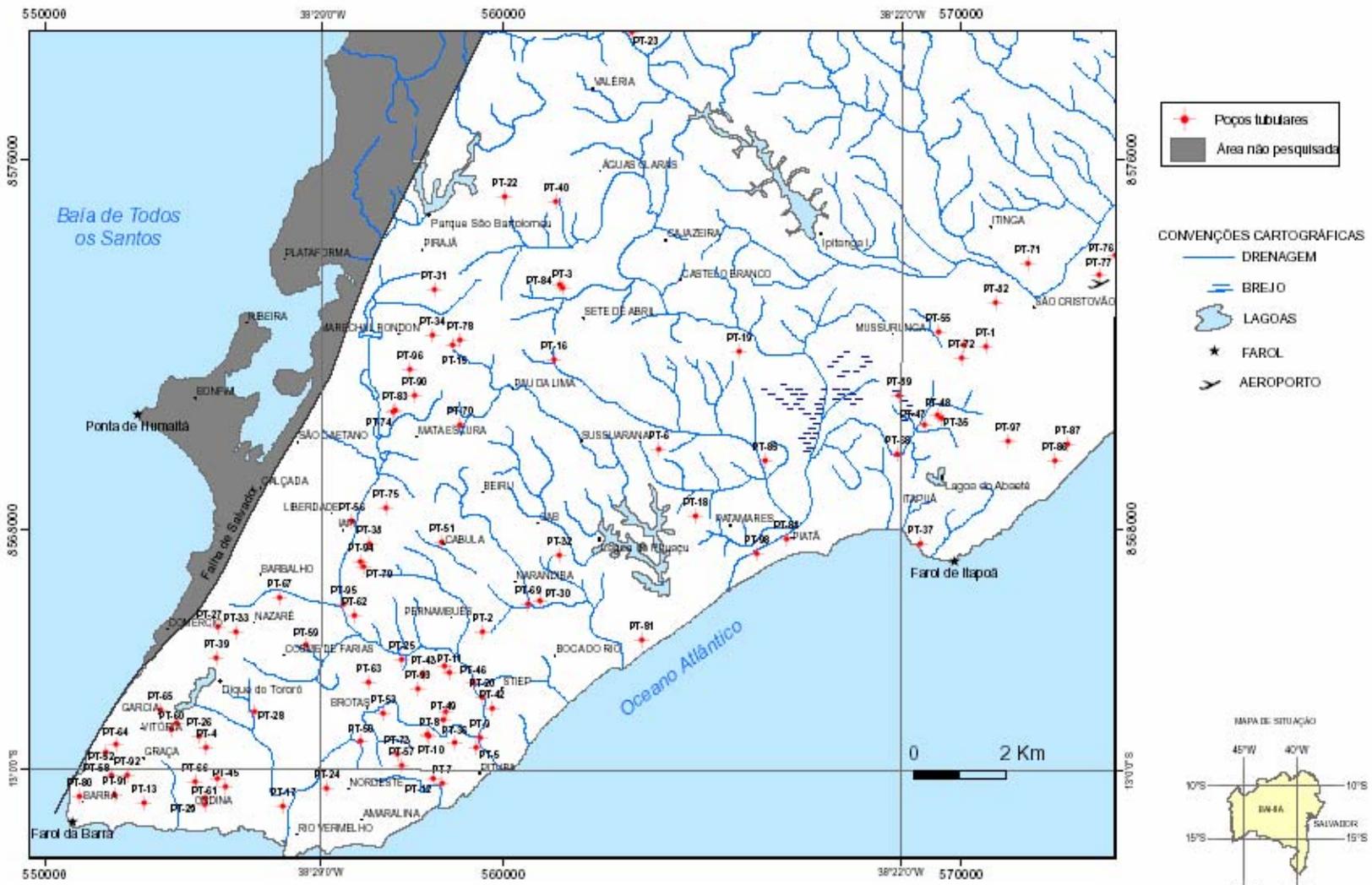
2 METODOLOGIA DA PESQUISA

Considerando-se os objetivos propostos deste trabalho e, tratando-se de um levantamento à nível de diagnóstico em escala regional, desenvolveu-se uma metodologia seqüenciada em três fases distintas: (i) consulta bibliográfica; (ii) estudos hidrogeológicos; (iii) amostragem de água subterrânea e análise de laboratório e, (iv) sistematização dos dados e interpretação dos resultados

2.1 CONSULTA BIBLIOGRÁFICA

Inicialmente foi realizado um amplo levantamento e análise do material bibliográfico, começando pelos diversos relatórios do PDDU (Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Salvador) elaborado em 2002 e aprovado pela Câmara Municipal em agosto de 2004. Também foram consultados diversos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, Empresa Baiana de Água e Saneamento - Embasa, Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia - SEI, Companhia de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Salvador – CONDER, Companhia de Engenharia Rural da Bahia - CERB, Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais - CPRM, Prefeitura Municipal de Salvador - PMS, Universidade Federal da Bahia - UFBA, Resoluções e Portarias do Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama e do Ministério da Saúde, entre muitas dezenas de livros, artigos e documentos obtidos nas bibliotecas e em consultas pela Internet. Foram adquiridas e utilizadas fotografias aéreas nas escalas 1/2.000, 1/8.000 e 1/40.000 do Projeto Sicar/Conder (1992 e 1998), imagens de satélites obtidas pela Internet (Google Earth, 2005), base cartográfica de Salvador 1/100.000 do IBGE (1977) e cartas em meio digital do Modelo do Terreno na escala 1/2000 e com intervalo de contorno de 1,0 metro. Foram pesquisadas 136 fichas e perfis de poços tubulares nos relatórios e arquivos da Companhia de Engenharia Rural da Bahia,, Hidrocon, Aquageo, Embasa, Água Viva, Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais, entre outras. Com as informações fornecidas por um conjunto de 98 fichas de poços tubulares, foram selecionados dados hidrogeológicos básicos (profundidade, nível estático, nível dinâmico, rebaixamento, recuperação, vazão e vazão específica), a espessura das coberturas sotopostas ao embasamento cristalino de Salvador, além da altitude do topo do embasamento cristalino em relação ao nível do mar.

Com as informações reunidas a partir de 98 poços tubulares escolhidos a partir das 136 fichas, e distribuídas aleatoriamente na parte alta no município de Salvador identificados na Figura 2.1 e na **Tabela 2.1**, foi elaborado o primeiro arquivo de dados em planilha Excel. Com esses dados catalogados e uniformizados, foram realizados cálculos estatísticos básicos, univariantes e multivariante, com duas ou mais variáveis utilizando programas estatísticos (Excel, Statistica e S-Plus), visando fornecer informações sobre a média aritmética, mediana, desvio padrão, variância,



Temática: Dados obtidos a partir de informações de poços tubulares fornecidos pela CERB, HIDROCON, AQUAGEO, ÁGUA VIVA, COHISO e CPRM.

FIGURA 2.1 - LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS TUBULARES NO ALTO CRISTALINO DE SALVADOR-BA

Tabela 2.1 Localização dos poços tubulares consultados na literatura.

POÇO TUBULAR	LOCAL	POÇO TUBULAR	LOCAL
PT-1	ACRECE (*)	PT- 26	PRAÇA LORD CROCHANE (*)
PT-2	AV. LUIZ EDUARDO MAGALHÃES	PT- 27	VALE DE NAZARÉ
PT-3	BARRADÃO III (*)	PT- 28	VALE DO OGUNJÁ PII
PT- 4	CENTRO MÉDICO GARIBALDI	PT- 29	AV. GARIBALDI (*)
PT- 5	COLÉGIO ÁGUIA	PT- 30	CARREIO DA BAHIA
PT- 6	COLÉGIO DOM BOSCO (*)	PT- 31	COELBA (CAMPINAS)
PT- 7	COLÉGIO NOSSA SENHORA DA LUZ	PT- 32	COELBA (PARALELA) (*)
PT- 8	CONDOMINIO DAS PRAIAS	PT- 33	COLÉGIO SALESIANO
PT- 9	COND. EDF. CASA VERDE, BONITA	PT- 34	CRESAL
PT -10	COND. PEDRAS DO ITAIGARA	PT- 35	EBDA-EMATERBA (*)
PT -11	COND. SOLAR CAMINHO DAS ÁRVORES (*)	PT- 36	ESAEX - COLÉGIO MILITAR (*)
PT -12	EDFÍCIO FAUSTO	PT- 37	ESTRADA DO FAROL – 21
PT -13	EDIFÍCIO MEDITERRANEE	PT- 38	FÁBRICA REFRIGERANTE FREVO
PT -14	EDIFÍCIO MÉXICO	PT- 39	ESTÁDIO DA FONTE NOVA (*)
PT -15	ENGEX	PT- 40	GARAGEM ESPRESSO SÃO MATHEUS
PT -16	ESTRADA BARRADÃO CLUBE VITÓRIA	PT- 41	GARIBALDI
PT -17	HP. RETIFICA DE MOTORES LTDA.	PT- 42	HONDA IMPERIAL
PT -18	LOTEAMENTO JARDIM JAGUARIPE	PT- 43	SHOPPING CENTER IGUATEMI
PT -19	MANSÃO DOS MAGISTRADOS (*)	PT- 44	INST MED LEGAL NINA RODRIGUES (*)
PT -20	MORENA VEÍCULO	PT- 45	MEGAPOSTO BERIMBAU
PT -21	NORBERTO ODEBRECHT	PT- 46	NOSSA TERRA VEICULOS
PT -22	NORDESTE TRANSPORTE	PT- 47	PQ. EXPOSIÇÃO AGROPECUARIA II (*)
PT -23	POSTO ATLANTIC (VALERIA)	PT- 48	PQ. EXPOSIÇÃO AGROPECUARIA III (*)
PT -24	POSTO DE SERVICOS ITAGUAI LTDA	PT- 49	TRATCAR-PITUBA
PT -25	POSTO MATARIPE RODOVIÁRIA	PT- 50	PRAÇA BAIA AZUL (*)
PT-51	SADIA	PT- 75	BAHEMA
PT -52	VALE DO CANELA	PT- 76	BASE AEREA DE SALVADOR III
PT -53	AV. ANTONIO CARLOS MAGALHÃES (*)	PT- 77	BASE AEREA DE SALVADOR I
PT -54	PQ. EXPOSIÇÃO AGROPECUARIA I (*)	PT- 78	CAMPBEL - PIRAJÁ –PII
PT -55	PQ. EXPOSIÇÃO AGROPECUARIA I	PT- 79	CONCRETA – CIMPOL (*)
PT -56	L.M. TRANSPORTE	PT- 80	MARAZUL HOTEL
PT -57	CENTRAL PARK	PT- 81	MAXIN'S MOTEL
PT -58	CLUBE BAHIANO DE TENIS	PT- 82	RÓTULA DO AEROPORTO
PT -59	CONJUNTO LAURA CATARINA	PT- 83	VIAÇÃO ITAPEMIRIM
PT -60	INSTITUTO CRIM. AFRÂNIO PEIXOTO (*)	PT- 84	BARRADÃO II
PT -61	JARDIM ZOOLOGICO	PT- 85	ADELBA (*)
PT -62	METROSAL 02	PT- 86	JD. STELLA MARES I (*)
PT -63	PARQUE SANTIAGO DO GALICIA	PT- 87	JD. STELLA MARIS II (*)
PT -64	VALE DO CANELA I	PT- 88	SESC-PIATÃ
PT -65	VALE DOS BARRIS	PT- 89	SUPERMERCADO UNIMAR – ITAPOAN
PT -66	INSTITUTO DE LETRAS – UFBA	PT- 90	UNIDADE INDUSTRIAL FIORELI (*)
PT -67	BIGRAF	PT- 91	EDIFÍCIO CASA GRANDE (*)
PT -68	COLINA DA FONTE	PT- 92	EDIFÍCIO CRISTIANA
PT -69	CONDOMINIO AMAZONIA	PT- 93	HIPERMERCADO PAES MENDONCA
PT -70	EMBRATEL	PT- 94	VIAÇÃO SANTA MARIA
PT -71	IPITANGA HOTEIS TURISMO (VIP'S)	PT- 95	VIAZUL (BAIXA DO CABULA)
PT -72	LE BRIZE MOTEIS (LE POINT)	PT- 96	CONDOMINIO. EDF. MAXIMO
PT -73	PETROBRÁS – PITUBA	PT- 97	CONDOMINIO ANGRA DOS REIS (*)
PT -74	POSTO JAQUEIRA - BR-324	PT- 98	BARRACA DO CORSÁRIO

(*) Poços tubulares com amostragem de água subterrânea

coeficiente de variação, amplitude, assimetria, curtose, correlação linear (Pearson, 1901), e análise de agrupamento das variáveis hidrológicas pesquisadas nas fichas dos poços pesquisados. As variáveis utilizadas foram: profundidade dos poços, vazão, vazão específica, nível estático e nível dinâmico. Nos cálculos estatísticos utilizou-se o valor do intervalo de confiança ao nível de 95% para inferir a faixa de variação da média da população alvo. Utilizou-se também análise de agrupamento (*Cluster Analysis*) para verificar o grau de similaridade entre a profundidade dos poços, vazão, vazão específica, nível estático e nível dinâmico. Com os dados da cota topográfica de cada poço e a profundidade do nível estático foi possível executar o modelamento cartográfico da superfície potenciométrica do aquífero. Com os dados da profundidade do embasamento cristalino, obtidos a partir dos perfis dos poços tubulares e com o valor da sua cota topográfica obtida através do Modelo Digital do Terreno na escala de 1/2000, foi possível estabelecer a altitude do topo do embasamento cristalino em relação ao nível do mar e a espessura das suas coberturas sedimentares e do regolito sobre o cristalino. Essas cotas foram “checadas” através de consultas aos mapas topográficos na escala 1/2.000 do Projeto Sicar-Conder – 1992.

Procedeu-se o monitoramento da variação do nível estático em três poços tubulares inativos localizados no Campus Universitário de Ondina situados próximo a estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia. O objetivo desse monitoramento foi verificar a taxa de infiltração da água de chuva em relação aos índices de precipitação mensal medido ao longo de 54 semanas, no período de abril de 2005 a março de 2006.

Os parâmetros intrínsecos do aquífero, necessários para o cálculo do índice de vulnerabilidade DRASTIC, foram obtidos nas fichas de 98 poços tubulares e outros documentos. Os parâmetros levantados foram: (i) profundidade do nível estático, (ii) taxa de recarga do aquífero, (iii) tipo de aquífero, (iv) tipo de solo, (v) inclinação do terreno, (vi) impacto na zona saturada e (vii) condutividade hidráulica.

2.2 AMOSTRAGEM DA ÁGUA SUBTERRÂNEA E ANÁLISES DE LABORATÓRIO.

Inicialmente foram selecionados e amostrados 40 pontos de captação de água subterrânea, sendo que oito deles foram posteriormente descartados por se tratarem de cacimbas e poços tubulares inativos, evitando-se assim aqueles poços desativados e paralisados.. Os trinta e dois pontos de captação restante foram necessários e suficientes para a execução da pesquisa hidroquímica, estando distribuídos aleatoriamente em toda a área (**Figura 2.2**). Esses foram previamente cadastrados, identificados nas cartas topográficas na escala 1/2000, georreferenciados no terreno com GPS (Global Position System) e cuja localização encontra-se na **tabela 2.2**. A coleta de informações de 25 desses poços foi feita a partir dos arquivos das empresas perfuradoras de poços tubulares, enquanto que o

restante (7) foi incluído no planejamento da amostragem por serem pontos de captação de vital importância para a avaliação das águas subterrâneas contidas nas coberturas de regolito, sedimentos da Formação Barreiras e nos sedimentos litorâneos que capeiam o embasamento cristalino, pois se trataram de fontes naturais e cacimbas.

Ao longo do mês de novembro de 2005, foi realizada a coleta da água subterrânea nos 32 pontos de captação previamente selecionados, utilizando-se em alguns casos (cacimba) o amostrador de polietileno do tipo “Bailers”. Nos poços tubulares, a água foi coletada depois de expurgada e bombeada por cerca de 10 a 20 minutos, suficiente para renovar a água do poço e, no caso das fontes naturais, foram escolhidas aquelas que estavam em atividade constante e, portanto, apresentando fluxo contínuo e ininterrupto (**Foto 2.1**).



Foto 2.1 Fluxo ininterrupto de água na Fonte do Candeal (ponto AM-6).

Durante a amostragem de campo foram feitas anotações em fichas padronizadas (**Quadro 2.1**) e efetuadas medidas “in situ” de pH, Eh, temperatura, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido absoluto e relativo, além da salinidade, utilizando-se um medidor portátil multi parâmetros 340 i /SET da WTW. Os sólidos totais dissolvidos foram obtidos multiplicando-se o valor da condutividade elétrica pelo fator 0,50. À medida que a coleta de água subterrânea se desenvolvia, as amostras eram acondicionadas em caixas de isopor com gelo e remetidas no mesmo dia para os laboratórios da Embasa, bairro da Boca do Rio em Salvador, onde foram efetuadas as análises de metais, coliformes termotolerantes e físico-químicas. A amostragem foi realizada diretamente pelo pessoal técnico da Embasa, com supervisão do autor desse trabalho. Nos laboratórios de análise de metais e físico-química, as amostras foram filtradas em membrana de 0,45 micra, utilizando-se de *manifold* à vácuo e posteriormente preservadas com ácido nítrico à pH < 2,0. Como é natural, as amostras utilizadas para a determinação de turbidez não foram filtradas. Nesta fase de laboratório utilizou-se técnicas e metodologias apropriadas para cada tipo de análise, de acordo com os manuais do *Standard Methods of Water and Wasterwater 19th e 20th Editions* de 1992 e 1998 e da Varian Indústria e Comércio Ltda.

Tabela 2.2 Localização dos pontos de amostragem de água subterrânea.

PONTOS	LOCAL	PONTOS	LOCAL
PT-26	PRAÇA LORD CROCRANE *	AM- 17	FONTE DO QUEIMADO
PT-29	AV. GARIBALDI *	AM- 18	FONTE DA PEDREIRA
PT-50	PRAÇA BAIA AZUL *	PT-85	ADELBA *
PT-53	AV. ANTONIO CARLOS MAGALHÃES *	PT-1	ACRESCE *
AM -5	CORONA	PT-35	EBDA-EMATERBA *
AM -6	FONTE DO CANDEAL	PT-79	CIMPOL-CONCRETA *
AM -7	CHACARA CELESTE	PT-90	UNIDADE INDUSTRIAL FIORELLI *
AM -8	FONTE DO TORORÓ	PT-3	ESTÁDIO BARRADÃO *
PT-60	INSTITUTO AFRÂNIO PEIXOTO *	PT-19	MANSÃO DOS MAGISTRADOS *
PT-44	INSTITUTO NINA RODRIGUES *	PT-6	COLÉGIO DOM BOSCO *
PT-91	EDIFÍCIO CASA GRANDE *	PT-32	COELBA-PARALELA *
PT-39	ESTÁDIO DA FONTE NOVA *	PT-97	CONDOMÍNIO ANGRA DOS REIS *
PT-11	SOLAR CAMINHO DAS ÁRVORES *	PT-47	PARQUE DE EXPOSIÇÃO II *
AM -14	PITUBA PLAZA HOTEL *	PT-54	PARQUE DE EXPOSIÇÃO I *
PT-36	ESAEX-COLÉGIO MILITAR *	PT-86	COND. PARQUE STELLA MARIS I *
AM -16	FONTE CONJUNTO BAHIA	PT-87	COND. PARQUE STELLA MARIS II *

PT = Poços tubulares AM = Fontes naturais e Cacimba.

(*) Poços tubulares que fazem parte do arquivo da tabela 2.1

fabricante dos aparelhos de Espectrometria de Absorção Atômica *SpectrAA 220 Z* com forno de grafite e *SpectrAA 220* com chama, utilizados pela Embasa (**Quadro 2.2**).

Foram analisadas as variáveis: cor real, turbidez, sólidos em suspensão, dureza, bicarbonato, cálcio, magnésio, sódio, potássio, sulfatos, cloretos, amônia, nitritos, nitratos, ortofosfato solúvel, alumínio, arsênio, bário, cádmio, cobalto, cobre, ferro, fluoreto, manganês, mercúrio, níquel, sílica (SiO₂), vanádio, zinco, chumbo estanho e selênio, além de coliformes termotolerantes, seguindo-se o fluxograma da **Figura 2.3**. Nesse trabalho não foram analisados os compostos orgânicos normalmente presentes em zona urbana o que completaria o diagnóstico sobre a qualidade das águas subterrâneas em Salvador mostrada no **capítulo 6** deste documento. Entretanto, devido à problemas técnicos nos laboratórios da Embasa por ocasião das análises químicas e, também, devido à ênfase dada aos processos hidroquímicos de natureza inorgânicos, já previsto no Plano de Tese, achou-se por bem não incluir nesses estudos os compostos orgânicos. Os coliformes termotolerantes foram analisados pelo método da membrana filtrante com limite de detecção mínimo (LDM) de 1,0 UFC/100ml

Em fevereiro e julho de 2006, foram coletadas dez amostras de água subterrânea para análises isotópicas, com determinação in situ dos valores da condutividade elétrica através do kit multiparâmetros de campo já referido anteriormente

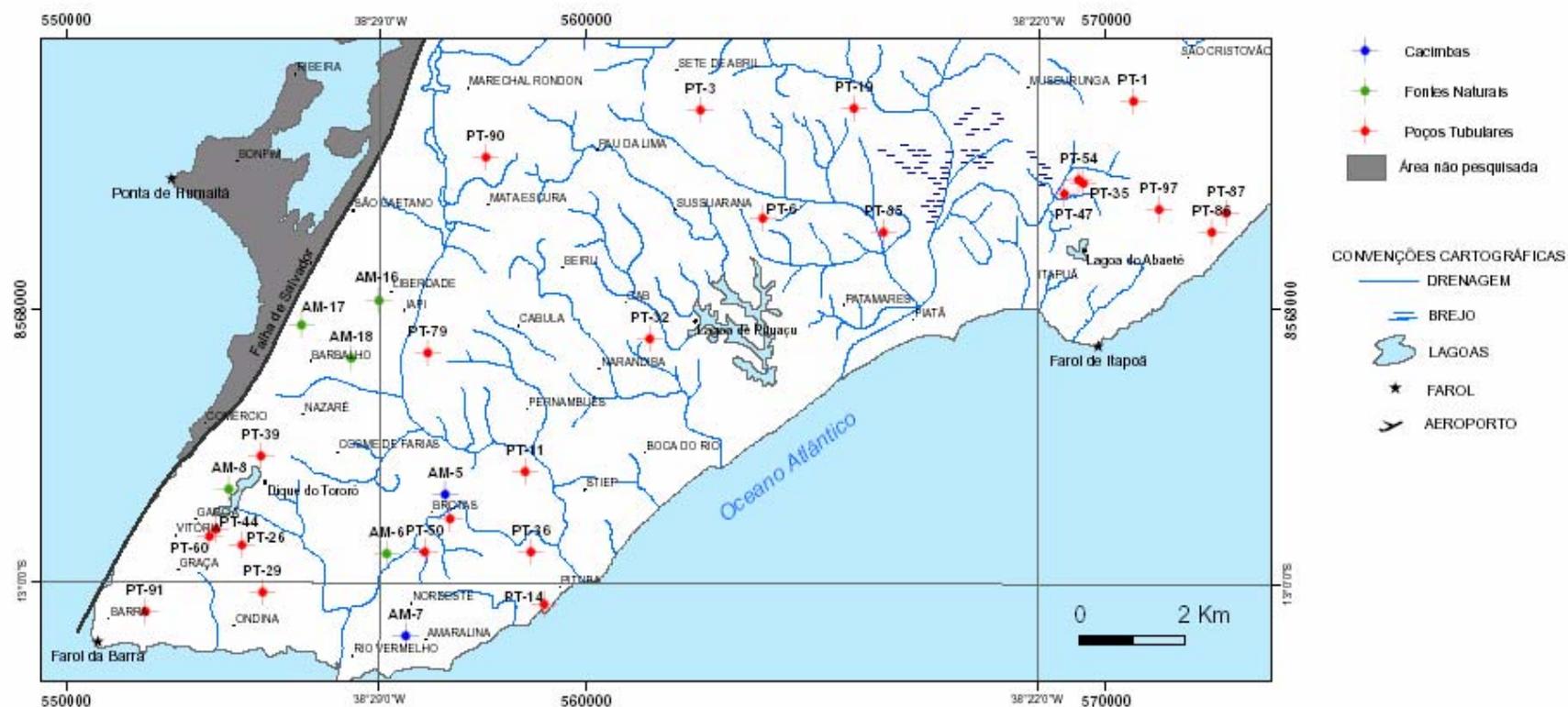


FIGURA 2.2 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO ALTO CRISTALINO DE SALVADOR-BA



Depois de coletada, a água foi filtrada em membrana de 0,45 micras no laboratório de química analítica do Instituto de Geociências/UFBA. A fração sólida retida pelos filtros ou membranas de celulose suficiente para a confecção de somente três

lâminas para a determinação da composição mineralógica através da difratometria de raios-X no Instituto de Química da Universidade Federal da Bahia.

Nas dez amostras, uma parte da água foi utilizada para a determinação do teor de cloreto e a outra foi encaminhada para o Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA) da Universidade Federal da Bahia, para análise de isótopos naturais de δO^{18} e δH^2 (deutério). Na determinação dos valores isotópicos foi utilizado o espectrômetro de massa *DELTA PLUS ThermoFinnigan*. O método usado para a análise de δO^{18} foi o do equilíbrio da água com CO_2 à temperatura de $25,0 \pm 0,1^\circ C$ durante oito horas reportada como um desvio em relação a um padrão denominado VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water).

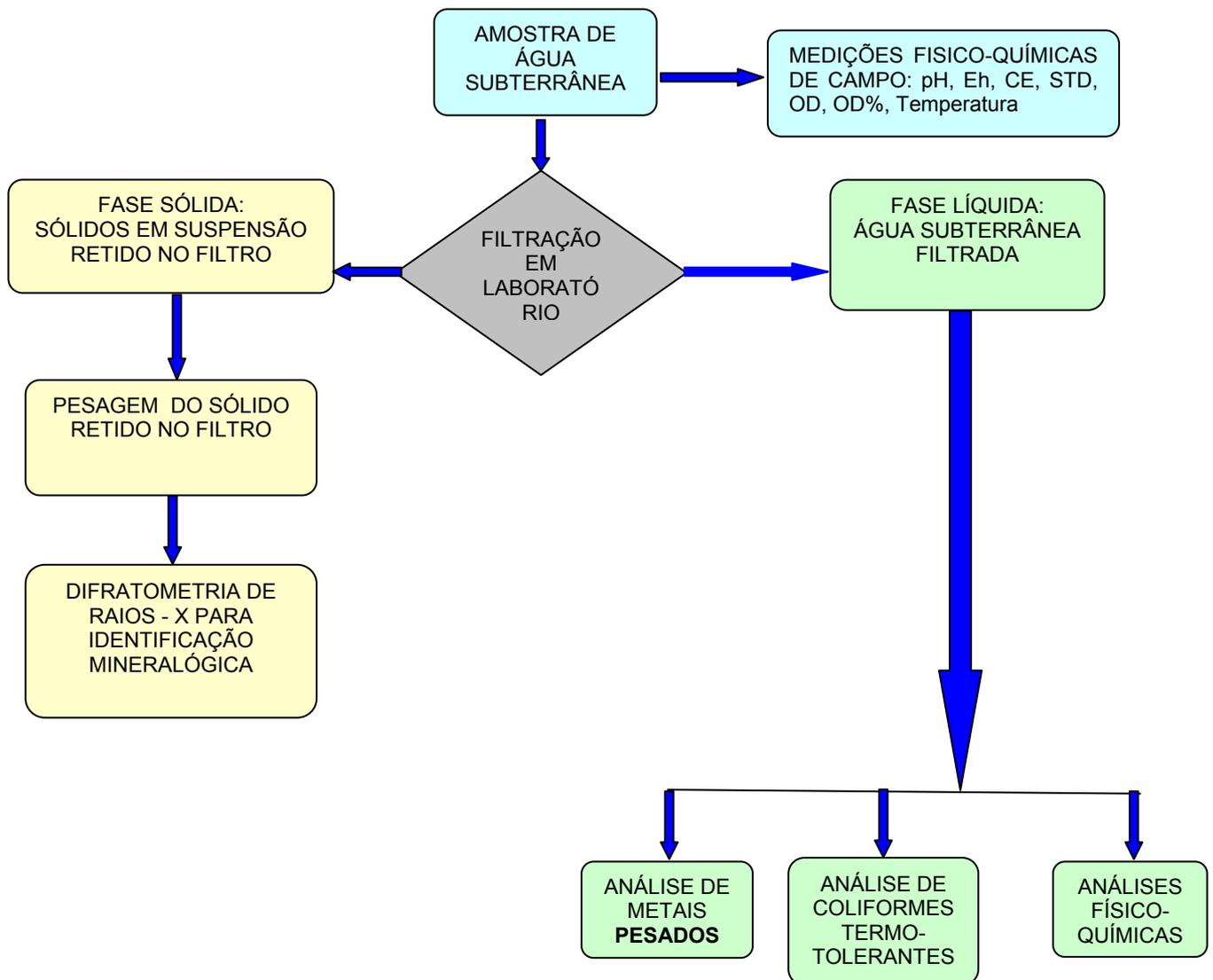


Figura 2.3 Fluxograma das etapas de laboratório

Quadro 2.2 Técnicas e métodos analíticos utilizados

<i>PARAMETROS</i>	<i>UNIDADE</i>	<i>L M D</i>	<i>TÉCNICA ANALÍTICA</i>	<i>MÉTODO</i>	<i>EQUIPAMENTO</i>	<i>REFERÊNCIA DO MÉTODO</i>
Cor Real	UH	1	Espectrofotométrico	8025	Hach Dr 2000	
Turbidez	UNT	0,001	Nefelométrico		Turbidímetro Hach 2100 N	
Sólidos em suspensão	mg/L	10	Gravimétrico	2540 D	Balança Dhaus	Standart Methods 19 th Ed.
Cálcio	mg/L	0,1	FAAS	311 – D	Spectr 220	Standart Methods 20 th Ed.
Magnésio	mg/L	0,8	FAAS	311 – D	- Spectr 220	Método do Manual Varian
Sódio	mg/L	0,03	FAAS	3500 – Na	- Spectr 220	Método do Manual Varian
Potássio	mg/L	0,002	FAAS	3500 – K	- Spectr 220	Método do Manual Varian
Bicarbonato	mg/L	0	Titulométrico	2320 B		Standart Methods 19 th Ed.
Sulfatos	mg/L	5	Turbidimetria	4500 SO4 – 2E	Turbidímetro Hach 2100 N	Standart Methods 20 th Ed.
Cloretos	mg/L	1,5	Potenciometria com íon seletivo específico	4500 Cl B		Standart Methods 19 th Ed.
Amônia	mg/L	0,1	Potenciometria com íon seletivo específico	4500 NH3 D	Íon seletivo Orion 720 A	Standart Methods 20 th Ed.
Nitrito	mg/L	0,005	Espectrofotometria de absorção molecular UV visível	4500 NO2 – B	Hach Dr 2500	Standart Methods 19 th Ed.
Nitrato	mg/L	0,5	Test N tubes		Hach Dr 2500	Standart Methods 19 th Ed.
Ortofosfato	mg/L	0,003	Espectrofotometria de absorção molecular UV visível	4500 P D	Hach Dr 2500	Standart Methods 20 th Ed.
Alumínio	µg/L	4	GFAAS	3113 – B	SpectrAA 220 Z	Método do Manual Varian
Arsênio	µg/L	2	GFAAS	3113 – B	SpectrAA 220 Z	Método do Manual Varian
Bário	µg/L	38	GFAAS	3113 – B	SpectrAA 220 Z	Método do Manual Varian
Cádmio	µg/L	0,06	GFAAS	3113 – B	SpectrAA 220 Z	Método do Manual Varian
Cobalto	mg/L	0,03	FAAS	3111 – B	Spectr AA 220	Método do Manual Varian
Cobre	mg/L	0,004	FAAS	3111 – B	Spectr AA 220	Método do Manual Varian
Cromo	µg/L	0,08	GFAAS	3113	SpectrAA 220 Z	Método do Manual Varian
Ferro	µg/L	8	FAAS	3111 – B	Spectr AA 220	Método do Manual Varian
Fluoreto	mg/L	0,1	Potenciometria com íon seletivo específico	4500 Cl B	Íon seletivo Orion 720 A	Standart Methods 19 th Ed.
Manganês	µg/L	20L	FAAS	3500 Mn	Spectr AA 220	Standart Methods 20 th Ed.
Mercúrio	µg/L	0,05	FAAS	3112 – B	Spectr AA 220 com gerador de vapor à frio	Standart Methods 20 th Ed.
Níquel	mg/L	0,02	FAAS	3111 – B	Spectr AA 220	Standart Methods 20 th Ed.
Sílica	mg/L	1	Espectrofotometria de absorção molecular - UV visível	4500 Si – B	Hach Dr 2000	Standart Methods 19 th Ed.
Vanádio	µg/L	0,3	GFAAS	3113	SpectrAA 220 Z	Standart Methods 20 th Ed.
Zinco	µg/L	3	FAAS	3111 – B	Spectr AA 220	Standart Methods 20 th Ed.
Chumbo	µg/L	5	GFAAS	3113	Spectr 220 Z	Standart Methods 20 th Ed.
Estanho	Mg/L	0,9	GFAAS	3113	Spectr 220 Z	Standart Methods 20 th Ed.
Selênio	µg/L	4	GFAAS	3113	Spectr 220 Z	Standart Methods 20 th Ed.

OBS. Os limites de detecção mínimo (LDM) varia para cada método utilizado e o erro analítico ficou sempre abaixo de 1%.

FAAS – Espectrometria de absorção atômica com chama;
L D M - Limite de detecção do método;
UH – Unidade Hazen (mg pt-co/l);
µg/L – Micrograma por litro.

GFAAS – Espectrometria de absorção atômica com forno de grafite;
UNT – Unidade nefelométrica turbidez;
mg/L – Miligrama por litro;

2.3 SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Com os resultados das 1088 determinações analíticas (34 variáveis x 32 amostras) de água subterrânea no laboratório, confeccionou-se um segundo arquivo de dados em planilha Excel para serem efetuados os cálculos estatísticos, univariantes e multivariantes, seguindo-se as mesmas técnicas e procedimentos já citados anteriormente no **item 2.1**. Para a compreensão da distribuição regional das informações obtidas nas análises de laboratório, foram confeccionados com o software *Arc Gis 9.2*, os mapas de distribuição do pH, condutividade elétrica, dureza total, bicarbonato, sódio, cloreto, nitrato, alumínio, ferro total, manganês total e níquel. Além desses, foram confeccionados também, os mapas com os valores do índice de saturação (IS) da solução química em meio aquoso.

Para a obtenção dos valores dos índices de saturação, necessário para a formação de alguns minerais em cada ponto de amostragem, utilizou-se os valores da densidade da água, cálcio, magnésio, sódio, potássio, sulfato, cloreto, bicarbonato, nitrato, manganês total, ferro total, sílica (SiO_2), alcalinidade, pH, Eh, zinco, bário e alumínio determinados na água subterrânea. Para o processamento dos dados utilizou-se o programa *on line WEB PHREEQC 2.0* (Parkhurst, 2004), disponível na internet.

Para o entendimento sobre o processo de intemperização das rochas cristalinas da parte alta de Salvador procedeu-se a avaliação do comportamento da sílica em relação aos elementos alcalinos e alcalinos terrosos segundo a metodologia proposta por Pedro (1964, 1966) in Menegotto (1987). Para tanto, foram estabelecidas comparações entre as razões molares da sílica com os óxidos de magnésio, cálcio, sódio, potássio e alumínio, verificando-se a possibilidade de formação de montmorilonita Ca (bissialitização), caolinita (monossialitização) e gibsitita (alitização).

Ainda nesta fase foi digitalizado o mapa geológico a partir das informações cedidas por Barbosa et al. (2005), dos domínios geomorfológicos a partir do Modelo Digital do Terreno, do topo do embasamento cristalino, da espessura das coberturas existentes sobre o embasamento cristalino, do fluxo subterrâneo (potenciometria), do nível estático, da vazão, da vazão específica e dos índices de vulnerabilidade DRASTIC, a partir dos dados obtidos na fase de consulta bibliográfica. Para a confecção dos cartogramas com os valores dos índices de saturação e da distribuição geoquímica dos elementos, utilizou-se interpolações por krigagem simples, ordinária, universal e, em alguns casos, pelo inverso do quadrado da distancia e pelo método do *Radial Basis Functions*, utilizando-se o software *ArcGis 9.2*. A escolha do método de interpolação por krigagem foi precedida pela análise do semi-variograma experimental, gerado a partir dos dados de cada variável analisada. Os dados de cada variável não foram transformados logaritmicamente, entretanto, evitou-se a

utilização de valores espúrios (*outliers*) para que a distribuição numérica não apresentasse assimetria acentuada e a regionalização das variáveis não sofresse distorções. A escala dos mapas ou cartogramas variou entre 1/100.000 e 1/120.000 tratando-se, portanto, de um levantamento regional.

Para a interpretação dos dados foram confeccionados dezenas de figuras, tabelas e quadros a partir dos resultados do processamento estatístico univariantes e multivariantes com os dados da primeira fase (dados bibliográficos) e da segunda fase (amostragem) da pesquisa o que serviu para a sistematização das informações e facilitar a interpretação dos resultados. A partir daí elaborou-se todos os capítulos, itens e subitens que compõe o texto deste documento.

CAPÍTULO 3

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E O MEIO FÍSICO NATURAL

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E O MEIO FÍSICO NATURAL

3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA E AS BACIAS DE DRENAGEM.

O município de Salvador está situado no Estado da Bahia – Brasil, entre as coordenadas geográficas $12^{\circ}53'54''$ e $13^{\circ}00'59''$ de latitude sul e $38^{\circ}18'31''$ e $38^{\circ}32'20''$ de longitude oeste (**Figura 3.1**). Ele é formado por uma parte continental e uma parte insular com três ilhas situadas na Baía de Todos os Santos e subordinadas a sua jurisdição administrativa. A Baía de Todos os Santos, que abriga cerca de 30 ilhotas, é de rara beleza e forte apelo ambiental, situa-se no Recôncavo Baiano, sendo circundada por 15 municípios. É a maior baía do litoral brasileiro, com aproximadamente 1.100 km² de superfície e 200 km de perímetro.

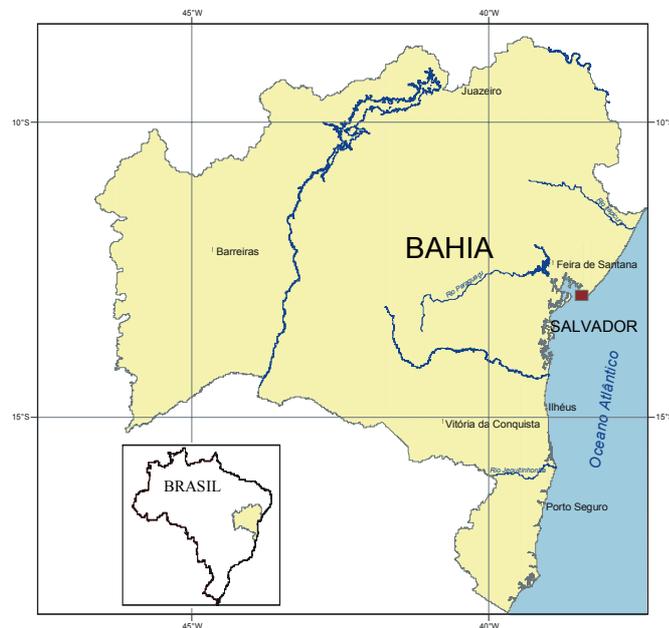


Figura 3.1 Localização da área de trabalho.

A área do município de Salvador mede 308,15 km², sendo formada por 17 regiões administrativas, enquanto a parte que compõe o Alto Cristalino de Salvador apresenta uma área de 244 km² segundo a base Sicar da Conder, 1992 (**Quadro 3.1**). O município de Salvador limita-se ao sul e leste com o Oceano Atlântico, a oeste com a Baía de Todos os Santos e ao norte com os municípios de Lauro de Freitas, Simões Filho, Candeias e São Francisco do Conde (**Figura 3.2**).

Quadro 3.1 Áreas territoriais de Salvador.

Porção Territorial	Áreas (Km ²) Segundo Vários Critérios		
	1991 ⁽¹⁾	1997 ⁽²⁾	Base Sicar ⁽³⁾
Continental	-	-	278,00
Insular	-	-	30,15
Total	313,00	709,50	308,15

(1) Fonte: IBGE, CONDER – Recenseamento Geral de 1991 – IBGE.

(2) Fonte: IBGE, CONDER – Resolução nº 24/97.

(3) Fonte: PMS/SEPLAM – Parâmetros extraídos através de processos computacionais sobre a base vetorial CONDER – SICAR 1992.



Figura 3.2 – Mapa topográfico da cidade de Salvador (Fonte: Conder, 1989)

A população estimada em julho de 2005 foi de 2.673.560 habitantes (IBGE, 2005) com uma projeção para o ano de 2030 de 3.251.938 habitantes. Dentro da região metropolitana o município de Salvador é o que detém a maior população residente e a maior densidade demográfica. Em 2003, Salvador contava com 3.616,91 habitantes/km². Cerca de 63% da população ganha mensalmente menos de três salários mínimos e, deste total, aproximadamente 13% não conta com qualquer tipo de renda, 19% recebem até um salário mínimo e 31% ganham de um a três, o que reflete diretamente na baixa vitalidade da economia municipal. Somente 5% da população economicamente ativa ganham mais de 20 salários mínimos (PDDU, 2002). A cidade de Salvador é a terceira mais populosa do país e comanda a sexta região metropolitana em termos demográficos. Por ser a cidade de maior dinâmica econômica do Estado, atrai migrantes do interior, concentrando essa população em determinados

bairros da cidade. Nesses espaços onde se estabelecem os novos moradores, muitas vezes configuram áreas com as condições mais precárias de moradia, que não tem acesso às habitações de elevado custo, mais próximo à orla e aos locais turísticos.

A taxa média de crescimento da população de Salvador foi de 1,85% ao ano no período de 1991-2000, sendo superior ao do Estado da Bahia que cresceu 1,1% ao ano no mesmo período. De acordo com o censo demográfico de 2000 (IBGE), cerca de 53% da população é constituída por mulheres e 47% por homens. A população residente é essencialmente urbana com 2.442.102 habitantes, enquanto a população rural representa apenas 1005 habitantes.

Dentre as atividades econômicas desenvolvidas na cidade de Salvador, o setor serviços sempre foi predominante, desde o período colonial. Aqui se localizava o poder central e o principal porto, por onde era exportado o açúcar produzido nos engenhos do Recôncavo, o pau-brasil, couros e peles silvestres, bem como eram importados os escravos e as mercadorias demandadas pelos colonizadores lusitanos. De lá para cá, a cidade manteve seu caráter de prestadora de serviços, concentrando toda atividade bancária, comercial atacadista, além da importação e exportação dos produtos regionais, tais como cacau e fumo. Nos últimos anos, a vocação terciária de Salvador confirmou-se, sendo que a atividade receptora de fluxos turísticos assume papel preponderante.

As maiores e principais bacias hidrográficas da porção continental são: Camarujipe com 52km², Cobre 17km², Ipitanga 59km², Jaguaribe 58km², Lucaia 18km² e rio das Pedras/Pituaçu com 28km² (**Figura 3.3**). O rio Camarujipe nasce em Pirajá e deságua na praia do Costa Azul e seus principais afluentes são os rios das Tripas e o rio Campinas (Moraes et al, 1995). A bacia do rio do Cobre ocupa uma área na parte oeste do município de Salvador, sendo o principal recurso hídrico do subúrbio ferroviário. A bacia do rio Ipitanga se estende pela parte central da Região Metropolitana abrangendo áreas dos municípios de Salvador, Simões Filho e Lauro de Freitas. A bacia do rio Jaguaribe é formada pelas confluências dos rios Águas Claras e Cabo Verde, ambos com nascentes próximas a Pirajá, possuindo foz localizada na praia do Pita (terceira ponte) no bairro de Patamares. O rio Lucaia nasce no vale dos Barris, próximo a Estação da Lapa, passando pelo Dique do Tororó, percorre a Avenida Vasco da Gama e em seguida deságua na praia da Mariquita no Rio Vermelho. A bacia do rio Pituaçu atravessa os bairros de Pau da Lima e Sussuarana e desemboca na praia da Boca do Rio, tendo como principais afluentes os rios Cascão, Saboeiro e Cachoeirinha (Moraes et al, 1995). A maioria desses rios já se apresentava deteriorado em 1986, devido ao lançamento de esgotos sanitários em suas bacias “que não possuem condições nem vazão suficientes para que haja uma autodepuração desses sem prejuízo para a qualidade das águas” (CRA, 1986; in Moraes 1995).

Em escala regional o sistema de drenagem é dendrítico, tendo as suas nascentes situadas no planalto costeiro dissecado com fluxo de água em direção ao Oceano Atlântico, com exceção das águas da bacia do Cobre que correm em direção a Baía de Todos os Santos.

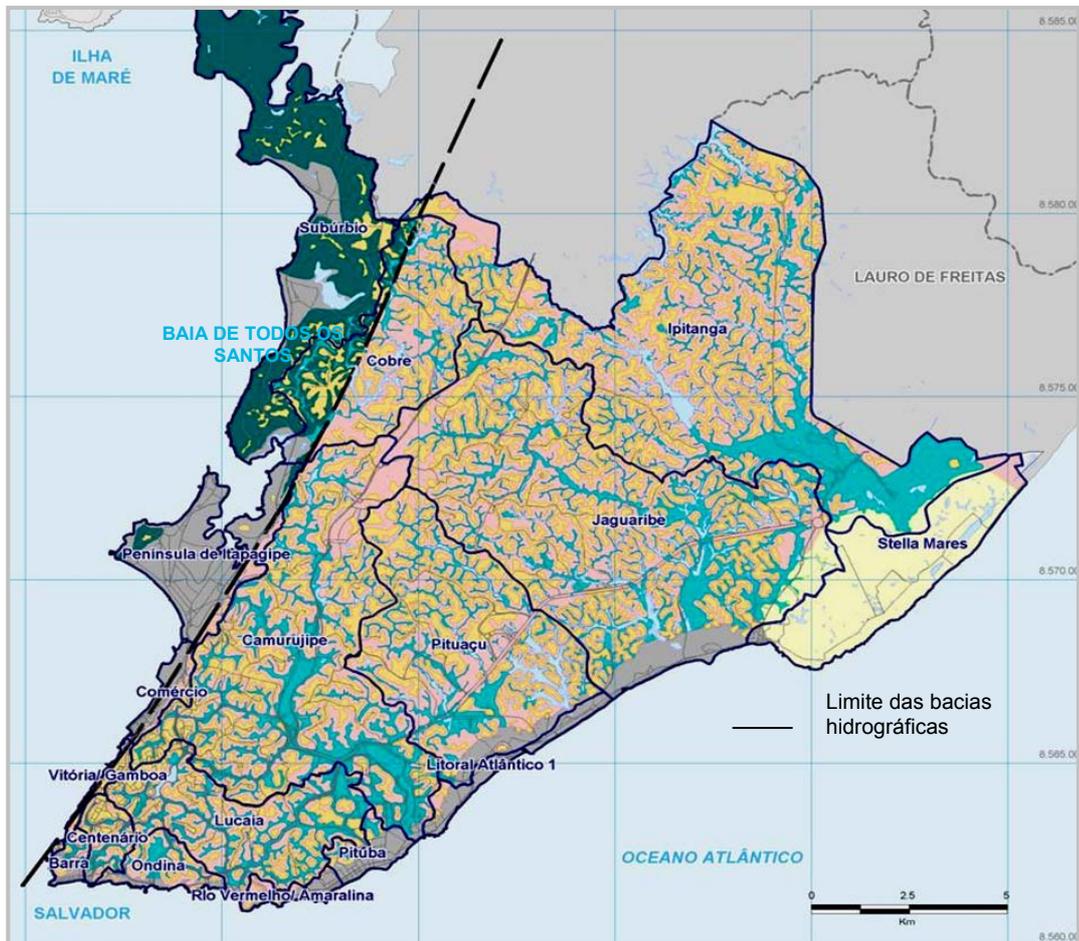


Figura 3.3 Bacias hidrográficas do município de Salvador (Fonte: PDDU, 2002)

3.2 GEOLOGIA LOCAL

A cidade de Salvador está localizada sobre dois domínios geotectônicos distintos: (i) o Alto Cristalino datado do Arqueano – Proterozóico e, (ii) a Bacia Sedimentar do Recôncavo de idade Mesozóica. Recobrendo esses dois domínios ocorrem coberturas regolíticas, a Formação Barreiras do Terciário, além das Dunas, Areias Litorâneas e depósitos Flúviomarinhas de idade Quaternária.

3.2.1 O Alto Cristalino de Salvador

O Alto Cristalino está separado da Bacia Sedimentar do Recôncavo pela falha de Salvador (**Foto 3.1**). Na parte oeste do Alto Cristalino, Barbosa et al. (2005) identificaram e descreveram: (i) rochas metamórficas paraderivadas alumino-magnesianas, granulitos básicos e quartzitos e (ii) rochas metamórficas ortoderivadas compostas de granulitos tonalíticos e charnoenderbíticos que contêm enclaves ultramáficos de metapiroxenitos e máficos de metagabros, essas rochas cortadas por sienogranitos e diques máficos. Vale ressaltar que a leste da falha do Iguatemi (**Figura 3.4**), onde as elevações são menores, esses autores identificaram rochas monzoníticas-monzodioríticas e um conjunto de rochas gnáissicas, graníticas, anfibolíticas e migmatíticas com predominância do fácies anfibolítico sobre o fácies granulítico. Em razão das suas pequenas dimensões e da sua pouca expressão do ponto de vista hidrogeológico, os enclaves e os diques não foram representados cartograficamente e nem descritos nessa tese.



Foto: Nyemer Pivetta Costa (2007).

Foto 3.1 Vista panorâmica da escarpa da falha de Salvador que separa a Bacia Sedimentar do Recôncavo do Alto Cristalino.

Entre as rochas paraderivadas, os granulitos alumino-magnesianos possuem cor cinza escura, formando bandas com larguras que variam de 5cm a 2m, estando deformados e metamorfisados como suas encaixantes. Possuem granulação fina a média, textura granoblástica, mostrando as vezes porfiroblastos de granada vermelha inclusos em uma matriz cinza mais fina. São formados por mesopertita (30%), quartzos (10-20%), granada (10%), silimanita (7%), cordierita (5%) plagioclásio (5%), ortopiroxênio (4%), e biotita vermelha (2%) como mineral principais. Com grãos variando entre 1 e 3 mm, a mesopertita juntamente com o quartzo, perfazem às vezes cerca de 50% da rocha (Barbosa et al, 2005). Possuem granulação média a grossa, formando faixas de coloração clara, com

espessuras variando de 5 cm até 2m e com foliação ressaltada pela concentração de quartzo e granada. São constituídos por estes dois últimos minerais, além de ortoclásio e plagioclásio, tendo os opacos e a biotita como fases acessórias, todos eles representando 40 a 50% da rocha. A granada, representando entre 10 e 30% da rocha, exibe cor avermelhada, contornos irregulares com inclusões de quartzo e feldspato (Barbosa et al, 2005).

Os granulitos básicos estão intercalados com as outras supracrustais granulitizadas, apresentam cor preta esverdeada e estão fortemente foliados. Os principais minerais metamórficos encontrados nessas rochas são, o plagioclásio (25-35%), o ortopiroxênio (20-30%), o clinopiroxênio (15-20%) e a hornblenda (10-15%). Opacos e apatita são as fases acessórias. Biotita e hornblenda verde as vezes aparecem, sendo consideradas como fases acessórias.

Os quartzitos formam bandas com cerca de 0,5 a 1 metro de largura associada aos granulitos aluminomagnesianos e granitos com granada. Quando não está alterado apresentam cor cinza clara e granulação fina a média sendo difícil observar a foliação.

Entre as rochas metamórficas ortoderivadas, os granulitos tonalíticos apresentam foliação/bandamento com orientação geral de N30°-N40° são leucocráticos a mesocráticos, exibem predominantemente textura xenoblástica a granoblástica, ocorrendo, às vezes, a textura poligonal. Estas rochas apresentam como minerais principais o plagioclásio (30-48%), o quartzo (20-30%), o ortopiroxênio (8-18%) e o clinopiroxênio (6-17%). O feldspato potássico, sob a forma de mesopertita é em geral ausente, mas pode chegar a cerca de 5%. Os minerais acessórios completam esta composição, sendo os mais constantes a apatita e o zircão. A biotita, em geral produto de retrogressão metamórfica, está quase sempre presente com proporção variando entre 5 a 10% da composição modal, ocorrendo principalmente sob a forma de palhetas, mas eventualmente, sob a forma de cristais anedrais e sempre bordejando os piroxênios e opacos (Barbosa et al, 2005). Estas rochas são consideradas intermediárias, visto que possuem teores de SiO₂ variando de aproximadamente 54 a 69 %. São caracterizadas por teores de Al₂O₃ situados entre 15 e 17%, FeO (t) entre 4,5 e 11%, CaO entre 3,5 e 7%, MgO entre 1,5 e 5%, Na₂O entre 2,5 e 3,5%, K₂O entre 1,30 e 2,0%, TiO₂ varia entre 0,4 e 0,8%.

Os granulitos charnoenderbíticos são leucocráticos a mesocráticos, com textura granoblástica fina a média e, com o tamanho dos grãos variando entre 0,5 e 3 mm. Estão deformadas como os granulitos tonalíticos, formando uma faixa que se estende na direção N40°, a qual verga para W-E na parte norte da cidade (**Figura 3.4**). Esses granulitos apresentam uma mineralogia composta de plagioclásio antiperitítico (35-48%), quartzo (20-30%), mesopertita ou microclina peritítica (8-15%), ortopiroxênio (8-15%) e clinopiroxênios (1-8%). Os ortopiroxênios (hiperstênio) exibem, às vezes, planos de clivagem que são alterados para clorita e para óxido de ferro. O clinopiroxênio raramente aparece nos

granulitos charnoenderbíticos, mas quando ocorre está sempre associado ao hiperstênio. São de composição intermediária, visto que possuem teores de SiO₂ variando entre cerca de 61% a 64%.

Os granulitos monzoníticos/monzodioríticos são formados por plagioclásio, às vezes antiperítico (30-35%), quartzo (15%), microclina (25-30%), ortopiroxênio (10%) e clinopiroxênio (6%), restando os opacos, apatita, biotita e hornblenda como fases acessórias.

Os migmatitos, granitos e anfibolitos apresentam granulação grosseira bem orientada, não leucocráticos e ocorrem a leste da falha do Iguatemi, na região de Piatã e próximos ao Farol de Itapoã.

Os sienogranitos exibem textura média a grosseira, às vezes pegmatóides com quartzo (30-40%), microclina (40-50%) e biotita (5-10%) formando a mineralogia principal da rocha. O plagioclásio, a apatita, os opacos e o zircão aparecem como minerais acessórios. Estes monzo-sienogranitos aparecem preenchendo fraturas, principalmente aquelas orientadas nas direções N40°-N70° (Barbosa et al, 2005).

Barbosa et al. (2005), descreveu três fases deformacionais dúcteis no Alto de Salvador. Uma primeira fase deformou uma foliação/bandamento pré-existente indo constituir dobras recumbentes. Uma segunda fase dobrou os planos anteriores gerando dobras apertadas de orientação geral N30° a N90°, com planos axiais subverticais. Uma terceira fase também é notada apesar de apresentar um caráter de penetrabilidade mais fraco que as anteriores. Esta última é marcada pela presença de zonas de cisalhamento transcorrentes subverticais, e subparalelas aos planos axiais da segunda fase. Segundo os citados autores, no que diz respeito às deformações rúpteis, o primeiro conjunto de fraturas (N60°-N90°) foi ativado durante a penetração dos diques máficos e dos corpos sienogranitos deformando-os e metamorfizando-os sintectonicamente. Ainda segundo Barbosa et al (2005), magmas contrastantes máficos e félsicos, com composição que se aproximam daquelas dos líquidos, podem ter sido injetados mais ou menos simultaneamente dentro das fraturas. No segundo (N40°-70°) e terceiro (N120°-N160°) conjuntos de fraturas, os diques máficos e sienogranitos não estão deformados. A falha de Salvador, de idade Mesozóica, está relacionada ao conjunto de fraturas (N30° e N40°) e, como a falha do Iguatemi e do Jardim de Allah (**Figura 3.4**) são subparalelas a ela, devem ter idades próximas. Finalmente o último conjunto de fraturas (N130° – N140°) é paralelo às falhas transferentes da Bacia do Recôncavo. Nesse último conjunto podem-se inserir as prováveis falhas da Rodoviária, da Avenida Jorge Amado, de Itapoã e do rio Ipitanga (**Figura 3.4**), visualizadas através das imagens de satélites do Google Earth e do modelamento estrutural do topo do embasamento cristalino efetuado com informações oriundas de 98 poços tubulares e apresentadas mais adiante. Esses dois últimos conjuntos de fraturamento, juntamente com as fraturas subhorizontais originadas por alívio de carga formam uma rede intercomunicada entre si, que constituem os condutos hidráulicos ou porosidade secundária das rochas cristalinas de Salvador.

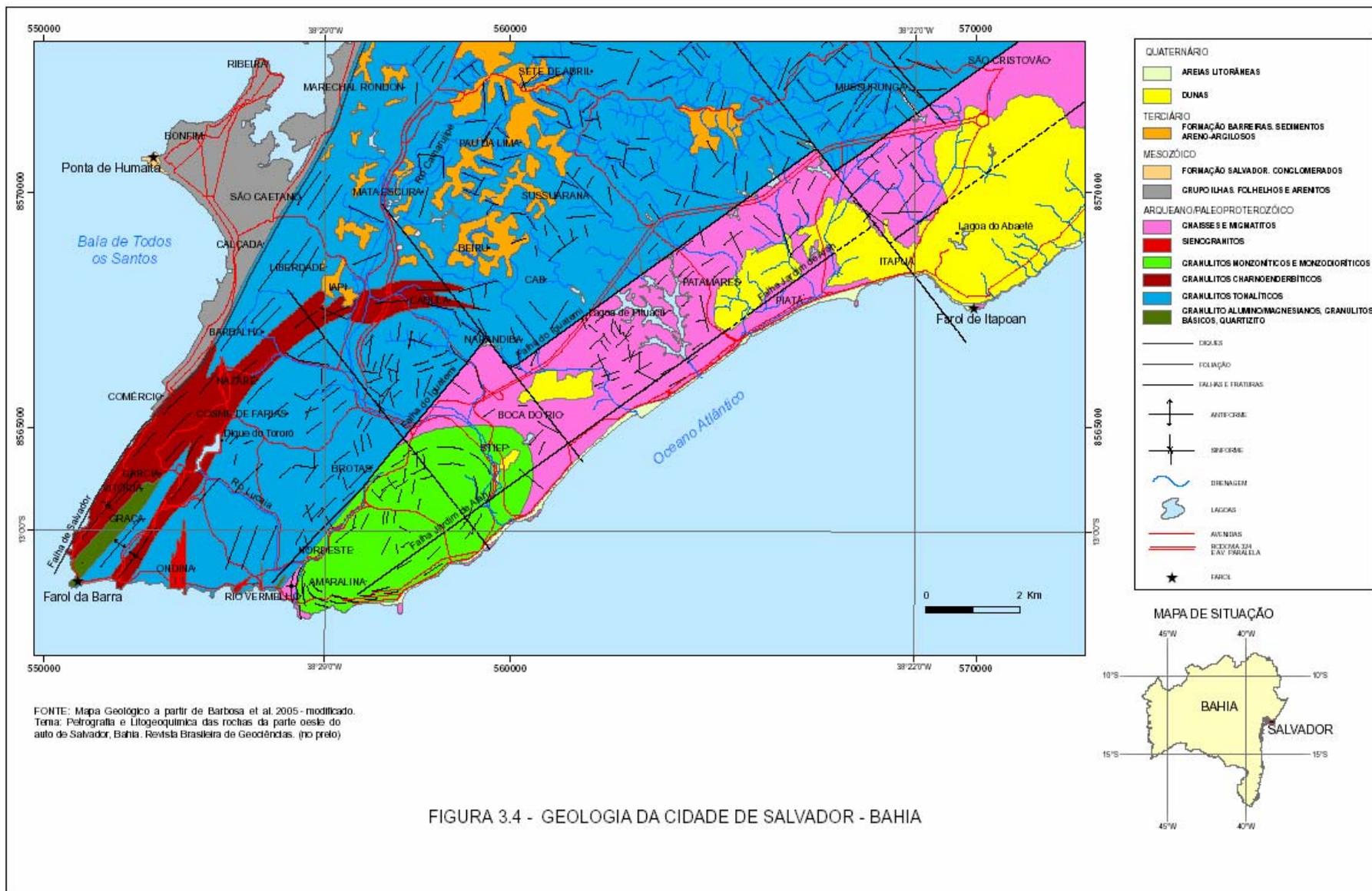


FIGURA 3.4 - GEOLOGIA DA CIDADE DE SALVADOR - BAHIA

3.2.2 A Bacia Sedimentar do Recôncavo

A Bacia Sedimentar do Recôncavo se formou em função de intenso processo tectônico distensivo que reativou a Plataforma Sul-Americana durante o Jurássico. É caracterizada por apresentar rochas sedimentares de idade mesozóica, sendo formadas em três episódios que constituíram três importantes seqüências deposicionais.

A primeira seqüência é caracterizada pelas rochas das Formações Aliança e Sergi, formadas em ambientes eólico, flúvio-deltáico e lacustre durante a fase *pré-rift* de evolução da bacia e que só afloram na sua borda oeste (**Figura 3.5**).

A segunda seqüência é caracterizada pelas rochas do Grupo Brotas, geradas em ambientes lacustrinos e flúvio-deltáicos durante a fase *sin-rift* da formação da bacia. Alguns folhelhos, siltitos, argilitos e arenitos das Formações Pojuca/Marfim (Grupo Brotas) (**Figura 3.5**) afloram na cidade baixa de Salvador, juntamente com os fanglomerados da Formação Salvador. As constantes variações faciológicas laterais e verticais dessas formações determinam possibilidades variáveis de local a local, sendo os melhores aquíferos dessas unidades restritas praticamente à presença de litologias arenosas (IBGE, 1999). Na seqüência *sin-rift* ressalta-se a importância da Formação São Sebastião que se caracteriza como um dos principais sistemas aquífero do país e que afloram por todo o Recôncavo central, inclusive nas proximidades de Salvador, nos municípios de Simões Filho, Camaçari e Dias D'Ávila.

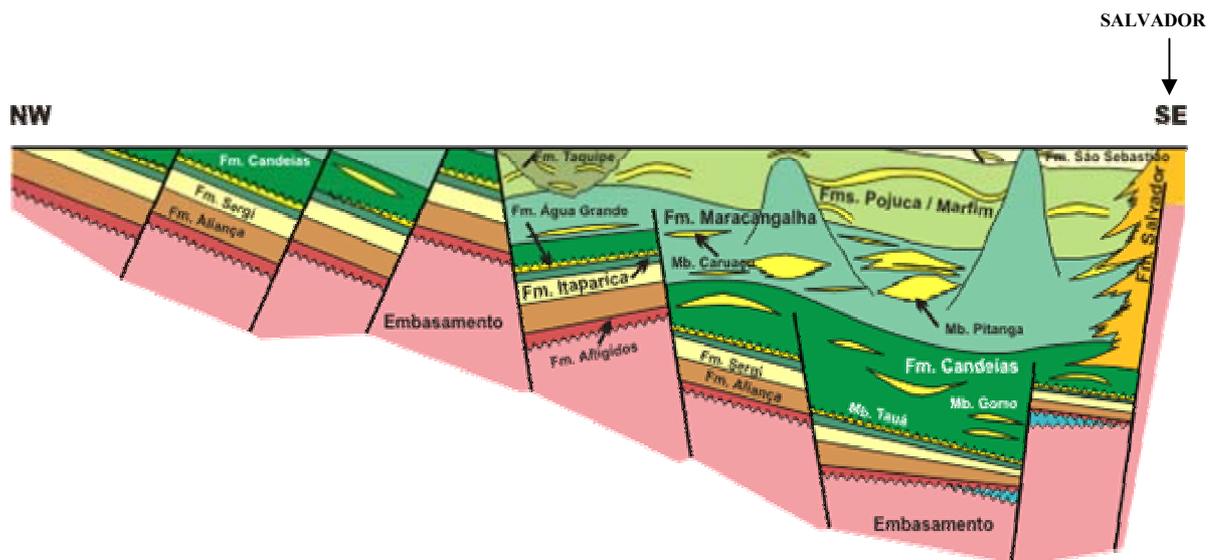


Figura 3.5 Seção geológica esquemática da Bacia do Recôncavo.

(Fonte: Milhomem et al., 2003)

A terceira e última seqüência é caracterizada pelas rochas da Formação Marizal, formada em ambiente de águas rasas durante a fase evolutiva pós-rift da bacia e que se distribui por toda ela, apresentando boas exposições no município de Camaçari e Dias D'Ávila.

A falha de Salvador apresenta uma direção N15-N20° e acumula um rejeito total superior a 4.000 metros. O trecho emerso da falha inicia-se no Porto da Barra e se estende linearmente por mais de 20 km até a altura de Água Comprida. Daí, o traçado do contato com o cristalino se encurva de oeste para leste, reassumindo novamente a orientação NE da falha, já próximo à costa, na altura de Arembepe no município de Camaçari.

Segundo Lima (1999), uma questão hidrogeológica importante se relaciona com o papel hidráulico exercido pela falha de Salvador. Com efeito, o fanglomerado da Formação Salvador constitui excelente material selante, enquanto a rocha cristalina que constitui o alto da cidade de Salvador, excluídas as zonas densamente fraturadas, tem comportamento impermeável. Ao longo das zonas fraturadas transversais é possível haver transferência de muita água do sistema clástico da bacia sedimentar do Recôncavo para o sistema cristalino (Lima, 1999). Isto pode estar ocorrendo ao longo da zona de fendas mestras transferentes onde corre o rio Joanes situado ao norte de Salvador. Nesse caso, a transferência local pode se desenvolver porque os fanglomerados da Formação Salvador tendem a se restringir ou a se tornar praticamente ausentes no nível correspondente ao da Formação São Sebastião no extremo norte do município. No trecho de Salvador esse fanglomerado exerce um papel selante o que impede o fluxo de água subterrânea em direção ao cristalino (Lima, 1999).

3.2.3 As Coberturas Regolíticas

A estrutura em blocos compartimentados e o clima tropical úmido com altas temperaturas e precipitações pluviométricas favoreceram uma profunda alteração das rochas cristalinas de Salvador cujo processo de evolução pedogenética levou ao desenvolvimento de diversos horizontes pedológicos (**Quadro 3.2**). As fraturas constituem vias efetivas de percolação e possibilitam o ataque químico dos minerais formadores de rochas e acessórios. Hoje, muitas fendas mestras transversais e várias zonas densamente fraturadas correspondem aos profundos vales da complexa rede de drenagem dendrítica que caracteriza a região alta de Salvador (Lima, 1999).

O solo residual e a rocha alterada (saprolito) que constituem o regolito (**Foto 3.2; Figura 3.6A**) são geralmente de cor avermelhada, predominantemente argilosa, contendo teores de argila superiores a 35%, ressaltando aqueles desenvolvidos sobre alguns tipos de estratos da Formação Barreiras (**item 3.2.4**)

que podem apresentar textura arenosa (Ribeiro, 1991). A alteração produzida pelo intemperismo no embasamento cristalino é penetrante, principalmente através das fendas e fraturas (**Fotos 3.2B, C e D**) e, em muitos locais, atinge a mais de 25 metros de profundidade nos poços tubulares.

Quadro 3.2 Os horizontes pedológicos desenvolvidos no regolito.

Regolito	horizonte A	Solo residual
	horizonte B	
	horizonte C	Rocha alterada (Saprolito)
Rocha matriz		Rocha não alterada (Rocha sã)

Obs: terminologias utilizadas pela literatura específica de solos

As argilas são produtos de alteração química dos plagioclásios, microclina e outros minerais aluminosos das rochas que compõem o embasamento cristalino, quando em contato com as águas subterrâneas. Os minerais ferromagnesianos (biotita, hornblenda, granadas, ortopiroxênios) também dão origem aos minerais argilosos em maior ou menor quantidade e proporcionam a formação dos diversos óxidos de ferro responsáveis pela coloração vermelha dos solos (Fugimori, 1996).



Foto 3.2A Cobertura de regolito mostrando o saprolito embaixo e uma pequena cobertura de solo residual – Avenida Anita Garibaldi.



Foto 3.2B Perfil mostrando de cima para baixo o solo residual, o saprolito e a rocha não alterada - Pedreira do Quartel de Amaralina



Foto 3.2C Contato entre a rocha alterada e a rocha sã fraturada na Pedreira do Quartel de Amaralina.

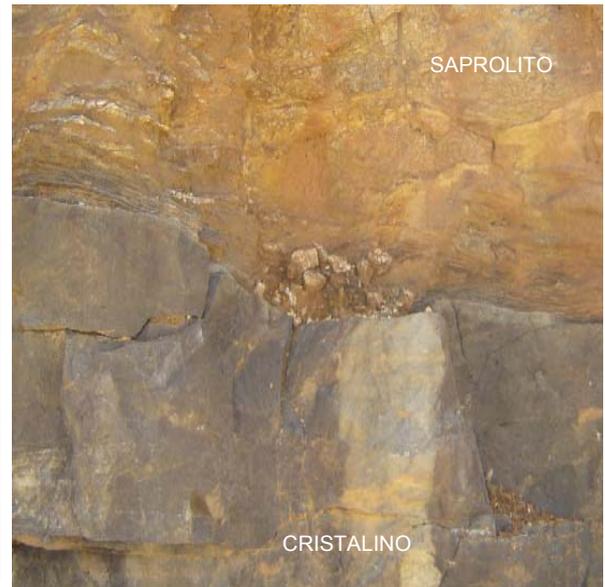


Foto 3.2D Contato entre a rocha alterada e a rocha sã pouco fraturada na Pedreira do Quartel de Amaralina.

Fotos: Sérgio Nascimento

Alguns minerais acessórios de ferro presentes nas rochas cristalinas, tais como pirita, magnetita e ilmenita quando alterados, também ajudam a imprimir essa coloração no solo, devido à formação da hematita e goetita, depois que os seus produtos amorfos sofrem desidratação. Quando predomina a hematita, os solos são mais avermelhados, enquanto a goetita imprime neles uma cor vermelho-amarelada.

Sampaio Filho (1974) descreveu perfis de regolitos principalmente ao nível da rocha alterada (saproilito) sobre granulitos básico, ácido e pegmatítico. Definiu a composição mineralógica de três crostas de alteração existentes no saproilito a partir da rocha não alterada. Nas suas observações feitas com microscópio petrográfico e difratometria de raios-X, este autor verificou no perfil desenvolvido sobre o granulito básico na BR-324, que o plagioclásio (andesina) presente na rocha não alterada desaparece facilmente desde a primeira crosta de alteração, alterando-se para gibsita, magnetita e hematita, enquanto o piroxênio evolui para goetita. Por sua vez, o anfibólio mantém-se inalterado até a terceira crosta de alteração. O quartzo fica inalterado em todo o perfil enquanto a biotita forma interestratificados de clorita-illita e óxidos de ferro, desaparecendo em seguida nos horizontes superiores. O feldspato potássico que ocorre em menor quantidade no granulito básico mostra-se mais resistente do que o plagioclásio, até a segunda crosta, quando então começa o seu processo de alteração nos horizontes superiores do saproilito. Nesses horizontes superiores ocorre um enriquecimento de caolinita, goetita e gibsita. No perfil desenvolvido sobre granulito ácido (Pedreira Santa Eulália), o referido autor verificou que a presença do feldspato potássico na rocha é maior

porque se trata de um material mais ácido tendo a sua presença sido constatada até a primeira crosta de alteração dentro do saprolito. A biotita evolui para um interestratificado de vermiculita-biotita e biotita-illita e altera-se também para hematita. A participação da gibsita, caolinita e goetita aumentam em direção aos horizontes do solo residual **A** e **B** (**Quadro 3.2**) enquanto os ferromagnesianos remanescentes alteram-se para hematita e goetita. O quartzo está presente em todo o perfil, o mesmo acontecendo no terceiro perfil estudado, desenvolvido sobre pegmatito, onde o feldspato potássico é encontrado até a segunda crosta de alteração dentro da rocha alterada. Nos horizontes do solo residual (**A** e **B**) ocorrem gibsita, hematita e caolinita.

Viveiros de Sá (1974) descreveu dois perfis de solos desenvolvidos sobre diabásio, situados respectivamente na Pedreira Fabriciano ao norte de Salvador e na Avenida Luiz Viana Filho (Paralela). Esse autor observou a resistência do anfibólio à alteração até o horizonte C do saprolito na Pedreira Fabriciano, enquanto os plagioclásios foram observados até a segunda crosta de alteração, tanto na referida pedreira quanto na Avenida Paralela. O quartzo, goetita, gibsita e caolinita foram notados em todo o perfil nos dois locais estudados.

Silva (1979) descreveu perfis de solos nas pedreiras Aratu e Limoeiro, também situadas ao norte do município de Salvador. Observou também a maior resistência do feldspato potássico (microclina) quando comparada com o plagioclásio, até a segunda crosta de alteração no saprolito, desaparecendo em seguida nos horizontes superiores de alteração do solo residual. A biotita e magnetita alteram-se para óxido de ferro (goetita), enquanto uma parte da magnetita altera-se para hematita e goetita. Nos horizontes residuais do solo verifica-se o incremento de caolinita, gibsita, goetita, hematita e mica. O quartzo se distribui por todo o perfil nos dois pontos estudados. Os argilominerais do grupo da esmectita, notadamente a montmorilonita e a nontronita não foram observados pelos autores acima referidos, mesmo nas primeiras crostas de alteração das rochas cristalinas.

Cálculos efetuados com o aplicativo *WEB-PHREEQC* (Parkhurst, 1996) para obtenção do valor do índice de saturação dos elementos químicos principais dissolvidos na água subterrânea do Alto de Salvador, mostraram a possibilidade de formação de inúmeros minerais secundários, inclusive dos argilominerais do grupo da esmectita (**Capítulo 5**). Isto provavelmente aconteceria no estágio inicial de alteração das rochas cristalinas, principalmente a partir da destruição dos clinopiroxênios, ortopiroxênio e biotita. A existência de esmectita a partir da alteração da biotita foi encontrada por Rego & Carvalho (1997) nos granulitos da zona cacauzeira no sul da Bahia, região muito semelhante a Salvador do ponto de vista morfoclimático.

No Alto Cristalino de Salvador a espessura média da cobertura de regolito sobre o embasamento cristalino está em torno dos 18 metros, segundo informações obtidas nas fichas e nos perfis dos poços tubulares perfurados para a obtenção de água subterrânea. Essa cobertura de regolito apresenta-se formada pelos horizontes A e B do solo residual (**Quadro 3.2**). Abaixo dessa zona homogênea, encontra-se a rocha decomposta (**Foto 3.3**). Este apresenta minerais micáceos e feições estruturais das rochas originais ainda preservadas, tais como, foliações, veios de quartzo e bandamentos mineralógicos dobrados (Fugimori, 1996). Esses horizontes apresentam-se diferenciados, conforme a natureza da rocha original, do relevo, da declividade, entre outros fatores morfológicos.

Segundo Ribeiro (1991), os latossolos vermelho-escuro estão relacionados às ocorrências de rochas do tipo diabásio e alguns granulitos básicos. Os latossolos vermelho-amarelo guardam uma maior associação com os granulitos tonalíticos e charnoenderbíticos, enquanto os latossolos amarelos estão mais relacionados aos sedimentos da Formação Barreiras. Alguns podzólicos vermelho-amarelo (argilossolos) podem ser encontrados na cidade alta sobre granulitos tonalíticos e charnoenderbíticos, além de sedimentos da Formação Barreiras.



Foto: Sérgio Nascimento

Foto 3.3 Rochas cristalinas alteradas (saprolito) - Praia da Paciência - Rio Vermelho.

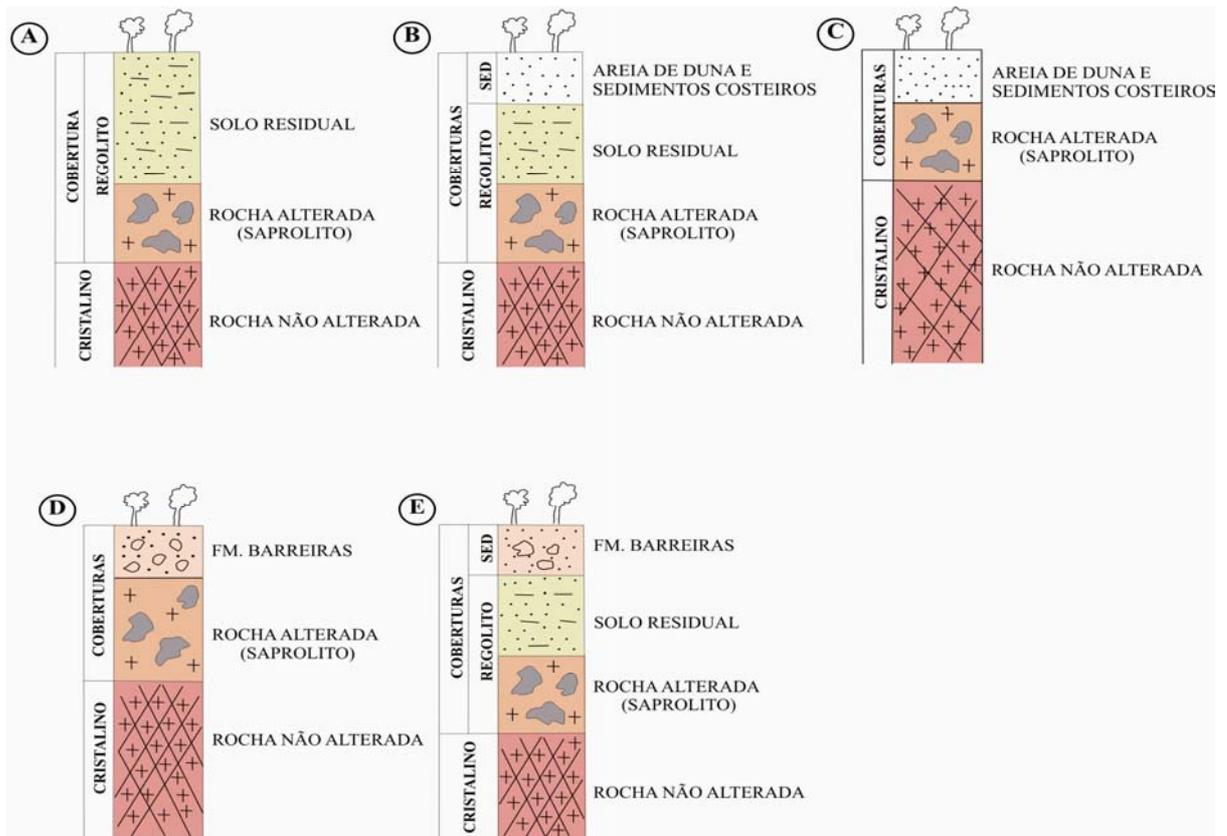


Figura 3.6 Relação entre as rochas cristalinas do Alto de Salvador e suas coberturas.

3.2.4 A Formação Barreiras.

Esta Formação é constituída de arenitos argilosos de coloração vermelha, violeta, branca e amarela, com estratificações plano-paralelas e cruzadas (**Foto 3.4**). São frequentes intercalações de siltitos e argilas coloridas, bem como lentes conglomeráticas e caulínicas (**Fotos 3.5 e 3.6**). Os conglomerados são compostos comumente de fenoclastos de quartzo leitoso, subarredondados, em meio a seixos de granulitos, arenitos e lamitos, distribuídos numa matriz arenosa mal selecionada, igualmente complexa em composição (Martin, L. et al, 1980; in IBGE, 1999). São em geral friáveis, sendo comum a presença de concreções ferruginosas, formando massas compactas no seio de uma matriz areno-argilosa castanho avermelhada.

Os sedimentos da Formação Barreiras são correlacionados a duas fases de pediplanação, bem marcadas que ocorreram durante o Cenozóico (Andrade, 1955; Bigarella & Andrade, 1964; apud Barbosa & Dominguez 1996). Estas fases de pediplanação estão relacionadas a períodos glaciais (Klammer, 1980, apud Barbosa & Dominguez 1996), durante as quais os níveis oceânicos estiveram muito abaixo do atual. Este fato é evidenciado pela existência das seqüências inferiores dos

sedimentos dessa Formação abaixo do nível atual do mar. Estas oscilações do nível de base deram lugar a variações climáticas, onde predominavam climas áridos durante os níveis mais baixos e climas úmidos durante os níveis mais altos. Dessa maneira o regolito que se desenvolvia durante as fases úmidas era posteriormente removido durante as fases áridas, para depressões do terreno na forma de fluxos de detritos e lamas. A sedimentação Barreiras não está somente relacionada aos episódios de variações climáticas, mais também a um concomitante soerguimento epirogenético, que remonta ao Terciário Inferior, e que criou condições para a acumulação dos sedimentos produzidos pelos processos erosivos atuantes no interior (Andrade & Lins, 1963; Bigarella & Andrade, 1964; Bigarella, 1975; Ghignone, 1979; Barbosa & Dominguez, 1996 in Araújo 2005).

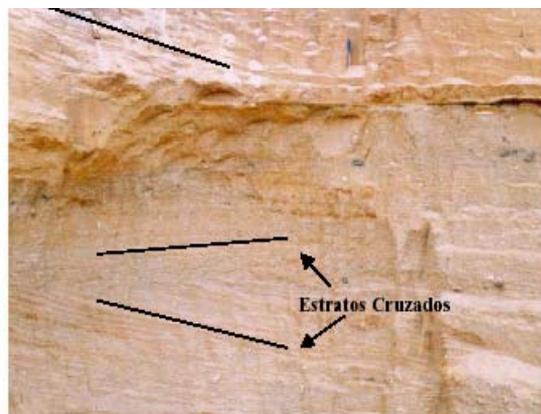


Foto 3.4 Estratificação cruzada na Formação Barreiras Estrada CIA – AEROPORTO.

(Fonte: Araújo, 2005).

Na Formação Barreiras as águas subterrâneas acham-se armazenadas nos horizontes arenosos, encerradas entre camadas menos permeáveis, comportando-se como um sistema de aquífero livre. A descontinuidade e a reduzida área de ocorrência desses níveis arenosos impedem a formação de bons aquíferos. Nos terrenos cristalinos que servem de substrato a este pacote sedimentar, como é o caso de Salvador, as possibilidades hidrogeológicas estão ligadas às zonas fraturadas e muito intemperizadas, quando existe uma ativa comunicação entre os sedimentos Barreiras, o regolito e o cristalino fraturado (**Figura 3.6D e E**). Os exutórios das águas subterrâneas desse aquífero livre são constituídos pelos rios, fontes e surgências difusas que aparecem quase sempre, no contato sedimento/rocha alterada/cristalino (Martin et al.,1980 in IBGE, 1999). Através da Formação Barreiras existem infiltrações verticais profundas em direção ao embasamento cristalino, num processo contínuo de recarga do aquífero freático de Salvador.



Foto 3.5 Afloramento da Formação Barreiras Estrada de Sussuarana entre os bairros de Tancredo Neves e Mata Escura.



Foto 3.6 Vista em detalhe dos estratos arenosos cruzados com matriz argilosa – Formação Barreiras na Estrada de Sussuarana entre os bairros de Tancredo Neves e Mata Escura.

Fotos: Sérgio Nascimento

3.2.5 As Dunas e as Areias Litorâneas

As dunas de Salvador são depósitos sedimentares Quaternários de natureza eólica que constituem as feições mais conspícuas da faixa litorânea e que se estendem desde o bairro da Pituba até Stella Mares (**Foto 3.7**). Apresentam morfologia ondulada e se distribuem paralela ou semi-paralelamente segundo a linha do litoral Atlântico, capeando diretamente o solo residual ou a rocha alterada que se desenvolveu sobre o cristalino de Salvador (**Figura 3.6B e C**). São reconhecidas nesta faixa sedimentar, três gerações de dunas, baseando-se principalmente nas características morfológicas de suas areias, bem como na relação de contato com outros depósitos Quaternários que ocorrem na região: dunas internas, externas e atuais. De uma maneira geral são constituídas de areias finas, bem selecionadas, predominantemente quartzosas e com graus de arredondamento dependendo estreitamente da fonte.

As dunas internas e externas apresentam coloração ocre e branca enquanto que as atuais são amareladas (Martin et al, 1980). Nas dunas internas, as suas areias são caracterizadas pela alta percentagem de grão anguloso (até 80 %) o que a diferencia das areias dos terraços Quaternários e das praias atuais que ocorrem no litoral do Estado da Bahia (Guimarães, 1978). As dunas externas são caracterizadas pela diminuição da percentagem de grãos angulosos e aumento dos grãos arredondados e podem ter sido formadas a partir do retrabalhamento das areias dos terraços marinhos Pleitocênicos

(Guimarães, 1978). As dunas litorâneas atuais apresentam os grãos de areia com características de arredondamento muito próximas daquelas das areias das praias, sendo, portanto as praias atuais a fonte dessas dunas (Guimarães, 1978) (**foto 3.8**).



Fotos: Sérgio Nascimento

Foto 3.7 Campo de dunas do Parque de Abaeté –Stella Mares

As dunas constituem a porção mais superior do sistema aquífero livre e representam um meio de elevada poropermeabilidade, com alta capacidade de infiltração a partir das chuvas – sua principal fonte de recarga (IBGE, 1999). Embora possuindo uma reduzida espessura saturada (3 a 6 metros), elas são do ponto de vista hidrogeológico, o elemento mais diretamente responsável pela relativa abundância de água subterrânea na região costeira de Salvador, principalmente a partir de Itapoã até Stella Mares. Porém, devido à reduzida e irregular espessura desses depósitos, a intensa evapotranspiração além do seu rápido mecanismo de circulação em direção aos níveis de base, só uma parcela é realmente passível de exploração para água subterrânea (IBGE, 1999).

O escoamento das águas subterrâneas das dunas faz-se em parte, diretamente para o mar e em parte para os rios e lagoas, dominantes nesta parte da área de estudo. Se levar em conta que o nível piezométrico nas dunas é pouco profundo e o fato de que as várias lagoas existentes representam afloramentos da superfície das águas subterrâneas, pode-se deduzir que o exutório principal das águas de recarga é a evapotranspiração (IBGE, 1999).

Esses depósitos apresentam um alto potencial hidrogeológico, sobretudo se levar em conta sua excelente poropermeabilidade e sua recarga assegurada por precipitações elevadas e regulares. Essas precipitações atingiram uma média de 1816 mm/ano (período 1996/2005) registrada na estação pluviométrica de Itapoã onde se localizam os maiores campos de dunas do município.



Foto: Sérgio Nascimento

Foto 3.8 Areias de praia e dunas litorâneas – Praia de Placafor (Piatã).

3.2.6 Os Depósitos Flúviomarinhos.

São constituídos principalmente por areias litorâneas, depósitos arenosos e argilo-arenosos fluviais, pântanos e mangues atuais, além de arenitos de praias, depósitos fluviolagunares e depósitos de leques aluviais coalescentes. São encontrados na costa, em zonas baixas que margeiam os rios, ocorrendo principalmente entre as Avenidas Luiz Viana Filho (Paralela) e Otávio Mangabeira, na orla atlântica (Fig. 3.4). Constitui as planícies costeiras, resultantes da combinação de processos de acumulação fluvial e marinha, sujeitas ou não a acumulações sedimentares periódicas, sendo formadas basicamente por areia fina à média e siltes argilosos ricos em matéria orgânica (Guimarães, 1978). Esses sedimentos representam um sistema aquífero livre de nível estático bastante próximo da superfície, com permeabilidade variável em função da maior ou menor presença de argilas e matéria orgânica. Do ponto de vista hidrogeológico, a possibilidade de exploração em zonas próximas ao mar normalmente suscita precaução quanto à invasão da água salgada (desequilíbrio da interface), como foram verificadas nos poços tubulares do Sesc-Piatã e no Loteamento Veredas Piatã, além de outros condomínios situados na região de Patamares e no baixo Jaguaripe. Mesmo em zonas um pouco afastadas, estas invasões podem ainda se manifestar, proveniente das marés que remontam ao longo dos rios até alguns poucos quilômetros para o interior, fato este observado nos rios Lucaia, Camarujipe, Pedras, Jaguaripe, entre outros, provocando muitas vezes o aumento da salinidade das águas do aquífero litorâneo.

3.3 ORGANIZAÇÃO DO MODELADO

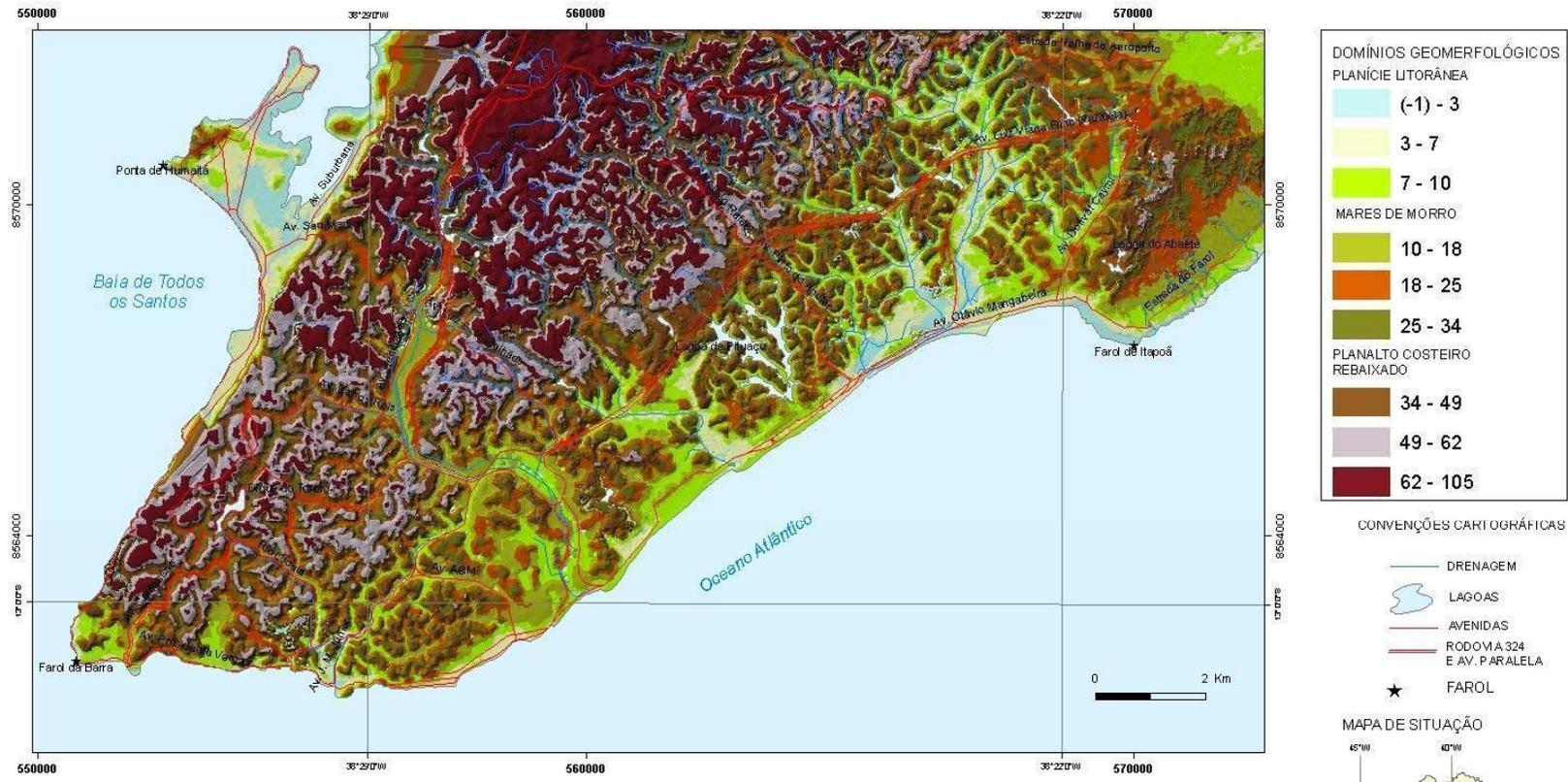
O município de Salvador apresenta dois domínios geotectônicos distintos separados pela falha de Salvador. O primeiro está representado pela bacia sedimentar do Recôncavo situada na parte baixa da cidade e o segundo pelo Alto do Embasamento Cristalino (**Figura 3.4 e Foto 3.1**). Este último, objeto deste trabalho, está associado à determinadas características litológicas, estruturais e topográficas que permitem compartimentar o seu relevo em três unidades geomorfológicas distintas que se escalonam do interior para o litoral atlântico: (i) planalto costeiro dissecado, (ii) zonas de mares-de-morros ou de lombadas e (iii) planície litorânea (**Figura 3.7**).

3.3.1 Planalto Costeiro Dissecado.

Esta feição foi desenvolvida principalmente nas áreas dos granulitos tonalíticos e charnoenderbíticos situadas a oeste da falha do Iguatemi (**Figura 3.4**). Ocupa uma faixa aproximadamente NE-SW onde se situam, entre outros, os bairros do Cabula, Brotas, Federação, Barris, Nazaré, Barbalho, Liberdade, Valéria, Cajazeiras, Castelo Branco, Pau da Lima e Mata Escura. Apresenta altitudes que variam de 34 a pouco mais de 100 metros (**Figura 3.7**), com bordas caindo sobre vales entalhados com profundidade superior a 40 metros e encostas que variam de 9 a 45° de inclinação, predominando, entretanto, vertentes que variam de 16 a 27°. Apresenta-se inclinado em direção à costa leste com intensa dissecação uniforme, escoamento difuso e concentrado, dando origem à ravinamentos intensos. Os topos, em geral, estão em altitude superior a 60 metros, denotando vestígios de uma antiga pediplanação (Sacramento, 1975).

3.3.2 Zonas de Mares de Morros ou Lombadas

Essas zonas localizam-se em uma zona intermediária formada predominantemente por rochas gnáissicas, graníticas e migmatíticas situados a leste da Falha do Iguatemi (**Figuras 3.4 e 3.7**). Trata-se de uma zona mais dissecada de morros e colinas que se estende paralelamente ao bordo do planalto costeiro até quase o litoral Atlântico (Sacramento, 1975). Apresenta uma topografia com formas mamelonadas, intensamente alterada e dissecada em morros com topos em forma de “meia laranja”, em baixas colinas, com as encostas apresentando um padrão convexo com ângulos de inclinação que variam de 6 a 45° predominando, entretanto, vertentes que variam de 16 a 34° (Sacramento, 1975). Nesta faixa as altitudes situam-se entre 10 e 34 metros a partir do litoral até a parte mais interna a oeste, onde os morros mais altos perlongam o planalto costeiro (Sacramento, 1975). Esses se tornam mais baixos e mais isolados a leste, perto do litoral, passando de um morro para o outro por um



Fonte: Base CONDER, Projeto SICAR, 1986.

FIGURA 3.7 - DOMÍNIOS GEOMORFOLÓGICOS DA CIDADE DE SALVADOR-BA

rebaixamento ou lombada. Entre os morros, os vales em alguns locais se alargam, com o fundo achatado formando baixadas e alvéolos nas confluências (Sacramento, 1975). Esta feição morfológica associa três elementos diferentes: (i) morros com formato de meia laranja do embasamento cristalino alterado situado mais perto do planalto; (ii) colinas mais baixas do embasamento alterado capeado por areia branca e, (iii) dunas de areia branca já referida anteriormente.

3.3.3 A Planície Litorânea Atlântica

Essa feição morfológica se estende de Amaralina ao extremo nordeste do município na região de Stella Mares e Praias do Flamengo, iniciando-se ao pé das colinas mamelonadas, descendo suavemente de uma altitude média de 10 metros até o cordão litorâneo atual, com largura bastante variável. A planície tende a penetrar nos vales mais largos e formar baixadas alagadiças, muitas das quais já colmatadas e aterradas devido à expansão urbana verificada a partir do início dos anos setenta do século passado.

O material dos vales é formado por areias brancas muito lavadas, enriquecidas por pequenos cascalhos e seixos de quartzo. Esta areia tem origem fluvio-marinha, trazidas pelos rios e rejeitadas na costa durante a última transgressão marinha (Cardoso da Silva & Monteiro 1970, in Sacramento 1975). Durante a regressão marinha que se seguiu, as areias foram descobertas e expostas ao vento o que provocou o seu espreado e deposição nas encostas das baixas colinas do domínio intermediário mamelonado, formando as dunas do Parque Júlio César e do loteamento Vela Branca na Pituba, do Centro de Convenções no bairro da Boca do Rio, entre outras. Muitos desses vales e as zonas baixas erodidas foram “afogados” e inundados com formação de algumas lagoas costeiras entre a Boca do Rio e Itapoã. Isso se deu devido a subida do nível do mar no Quaternário, principalmente durante o último período transgressivo ocorrido em 2400 anos BP. Muitas lagunas existentes foram preenchidas em parte por depósitos marinhos ricos em conchas, permitindo datar a fase final da antepenúltima transgressão marinha Quaternária entre 6500 e 5000 BP (Guimarães, 1978).

Os aluviões fluviais encontrados ao longo dos vales dos principais rios que drenam Salvador são constituídas por partículas areno-argilosas, além de seixos em determinados locais. Esses foram originados, erodidos e retrabalhados a partir alteração do embasamento cristalino e da Formação Barreiras, pelas águas das chuvas e por movimentos de massas nas encostas que se deslocam devido à gravidade. Por se tratar de uma região urbana, é importante ressaltar que a dinâmica morfogenética atual foi profundamente influenciada pela ação antrópica e, conseqüentemente, muitas das formas encontradas são resultantes de terraplanagem, cortes de taludes, aterros e outras obras de engenharia.

3.4 ASPECTOS CLIMÁTICOS

Os estudos climatológicos são de importância fundamental na gestão e planejamento dos recursos hídricos que estão intimamente relacionados com o regime pluvial e conseqüentemente com os rios e as águas subterrâneas.

A região costeira do Estado da Bahia sofre influência da circulação local típica das áreas litorâneas representadas pelas brisas marinha e terrestre. Esta circulação local, além de influir nos índices pluviométricos ameniza as altas temperaturas diárias e leva a umidade para o interior do Estado. A zona costeira de Salvador encontra-se sob o domínio da ação reguladora do Oceano Atlântico e da Baía de Todos os Santos, que interferem, não apenas nas características térmicas, mas também no regime e na intensidade das chuvas, sendo marítimos os ventos que trazem os sistemas meteorológicos portadores de chuvas para a região.

As baixas altitudes encontradas (sempre inferiores a 100 metros) não alteram o caráter megatérmico do clima. As temperaturas médias compensadas, médias das máximas e das mínimas, denotam caráter megatérmico para o clima local, sempre superior a 18°C, limite de mesotermia segundo Koppen (1931). Em Salvador são registradas médias de temperatura compensadas anuais de 25,3°C, com mínimas em julho e agosto de 23,6°C e máxima em março de 26,7°C, influenciadas pelas baixas altitudes encontradas na região (**Tabela 3.1**). O efeito regulador das brisas é evidente nas médias das máximas e das mínimas, assim como nos valores térmicos absolutos, elevando a amplitude térmica para 5,5°C.

A precipitação pluviométrica média registrada no período de 1961/1990 foi de 2098,9 mm/ano, com média de 214 dias de chuva anuais. O período mais chuvoso registrado se estende de abril a julho (**Figura 3.8**), sendo maio o mês com maior precipitação pluviométrica, como decorrência da passagem de frentes frias pelo litoral baiano, mais freqüente nesta época do ano. As passagens das frentes frias podem ocorrer em qualquer época do ano, embora sejam mais freqüentes nesse período. A convergência noturna entre os ventos alísios e a brisa terrestre é responsável também pelos altos índices de pluviosidade observados no inverno. Os totais mensais de chuva geralmente não são bem distribuídos durante o mês. Habitualmente as chuvas se concentram em poucos dias, ou mesmo em poucas horas, ocorrendo períodos secos dentro de períodos chuvosos.

No litoral, os ventos alísios soprando sobre o continente dá origem às brisas marítimas e terrestres que conferem o conforto térmico na planície costeira, amenizando as altas temperaturas diárias.

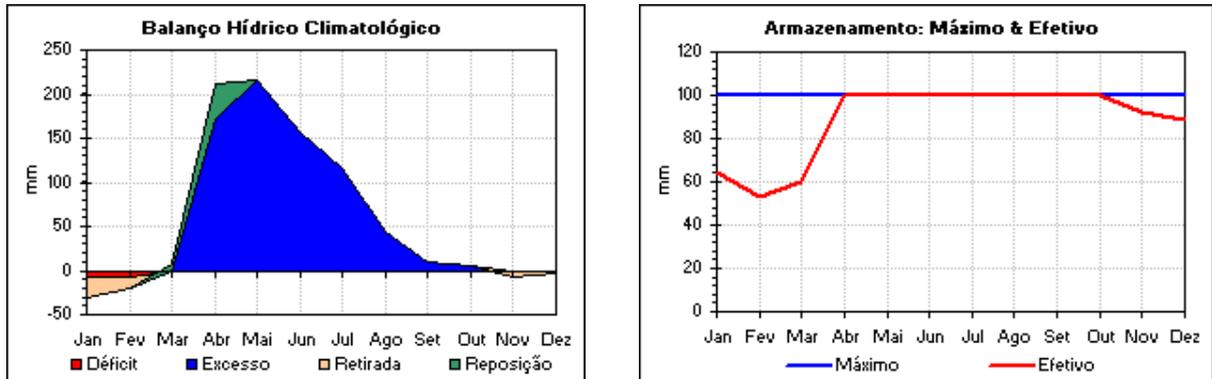


Figura 3.8 Balanço Hídrico Climatológico / 1961 – 1990 (Fonte: Inmet, 2006)

3.4.1 Balanço Hídrico Atmosférico ou Climatológico

Nos cálculos do balanço hídrico a precipitação pluviométrica representa o abastecimento de água (entrada); os sedimentos Barreiras, a cobertura de solos e as rochas do embasamento cristalino constituem o reservatório; a evapotranspiração potencial representa o consumo (saída) do sistema. Parte-se do princípio de que o excedente hídrico da precipitação se infiltra e que só haverá escoamento superficial depois que a capacidade máxima de armazenamento de água no subsolo seja excedida. Para fins de cálculo estabeleceu-se o valor de 100 mm para a capacidade máxima de armazenamento de água, considerando-se invariável para qualquer tipo de solo. Para o balanço hídrico atmosférico utilizou-se o método de Thornthwaite & Mather (1955) com os dados de precipitação (P) e temperatura (T) do período 1961-1990, obtendo-se os seguintes parâmetros (**Tabela 3.1**):

EP	evapotranspiração de referência	ARM	armazenamento de água pelo solo
P-EP	variação do armazenamento	ER	estimativa de evapotranspiração real
EXC	excedente hídrico estimado (mm)	DEF	deficiência hídrica estimada

Tabela 3.1 Dados climáticos do município de Salvador (período 1961-1990).

Meses	Temp. (°C)	EP (mm)	P (mm)	P-EP (mm)	Neg. Acum.	ARM (mm)	ER (mm)	DEF. (mm)	EXC. (mm)
Jan.	26,5	147,5	110,9	-36,6	51,6	82,7	139,0	8,5	0,0
Fev.	26,6	131,9	121,2	-10,7	62,3	75,9	128,0	3,9	0,0
Mar.	26,7	143,8	144,6	0,8	61,1	76,7	143,8	0,0	0,0
Abr.	26,1	125,1	321,6	196,5	0,0	125,0	125,1	0,0	148,2
Mai	25,1	110,6	324,8	214,2	0,0	125,0	110,6	0,0	214,2
Jun.	24,3	97,9	251,4	153,5	0,0	125,0	97,9	0,0	153,5
Jul.	23,6	86,5	203,6	117,1	0,0	125,0	86,5	0,0	117,1
Ago.	23,6	91,4	135,9	44,5	0,0	125,0	91,4	0,0	44,5
Set.	24,3	100,3	112,2	11,9	0,0	125,0	100,3	0,0	11,9
Out.	25,0	117,5	122,2	4,7	0,0	125,0	117,5	0,0	4,7
Nov.	25,6	126,3	118,5	-7,8	7,8	117,4	126,1	0,2	0,0
Dez.	26,0	139,3	132,0	-7,3	15,0	110,8	138,6	0,6	0,0
Atual	25,3	1.417,9	2.098,9	-	-	-	1.404,7	13,3	694,2

Fonte: INMET (1991) apud SEI (1998).

A precipitação média (P) no período foi de 2098,9 mm/ano, com excedente hídrico (EXC) de 694,2 mm/ano, verificado entre abril e outubro. A evapotranspiração potencial (EP) foi da ordem de 1417,9 mm/ano, o que representa 67,6% do total da precipitação pluviométrica. O excedente hídrico de 694,2 mm/ano corresponde a 33,1% do total da precipitação, sendo o responsável pelo escoamento superficial e a recarga do aquífero freático de Salvador. Desses 33,1% de excedente hídrico, cerca de 7,20 % corresponde a infiltração calculada numa área-piloto localizada no Campus Universitário de Ondina, cuja metodologia será abordada com mais detalhe no **Capítulo 4 (Caracterização Hidrogeológica)**. Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o município de Salvador apresenta médias anuais de umidade relativa do ar igual a 80,8%, enquanto a pressão atmosférica é de 1008,2 mb. A direção predominante dos ventos é SE (alísios), com variação para E entre novembro e janeiro. A velocidade é baixa, com médias entre 2,0 e 2,5 m/s, mantendo-se relativamente estável durante o ano (**Tabela 3.2**).

Tabela 3.2 Parâmetros climáticos ou atmosféricos de Salvador – (Período 1961-1990).

	Pressão	T max	T min	T med	Umidade	Direção dos ventos	Velocidade dos ventos
	mb	° C	° C	° C	%		m/s
Jan	1006,3	30,0	23,8	26,5	79,3	E	2,0
Fev	1006,3	30,0	23,9	26,6	79,1	SE	2,0
Mar	1005,8	29,9	24,0	26,7	79,8	SE	2,0
Abr	1006,6	28,6	22,9	26,1	82,1	SE	2,3
Mai	1008,4	27,7	22,9	25,1	83,2	SE	2,3
Jun	1010,5	26,4	22,1	24,2	82,3	SE	2,3
Jul	1011,6	26,1	21,4	23,6	81,3	SE	2,5
Ago	1011,4	26,4	21,3	23,6	79,9	SE	2,3
Set	1010,4	27,2	21,8	24,2	79,5	SE	2,3
Out	1008,0	28,2	22,5	25,0	80,8	SE	2,2
Nov	1006,6	28,9	22,9	25,6	81,6	E/NE	2,2
Dez	1006,1	29,0	23,3	26,0	81,2	E	2,1
média	1008,2	28,2	22,7	25,3	80,9		

Fonte: INMET, 2006

3.4.2 Tipo de Clima em Salvador

Para a classificação do clima de Salvador utilizaram-se os dados do balanço hídrico atmosférico (período 1961-1990) foi possível calcular o índice hídrico (IH) segundo a equação 3.1 de Thornthwaite & Matther, 1955 (SEI, 1998):

$$\text{Índice Hídrico} = 100 \text{ EXC} - 60 \text{ DEF} / \text{EP} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde: EXC = excedente hídrico; DEF = deficiência hídrica e EP = evapotranspiração potencial.

Sendo assim:

$$\text{Índice Hídrico} = 100 \times 694,2 \text{ mm/ano} - 60 \times 13,3 \text{ mm/ano} / 1417,9 \text{ mm/ano}$$

$$\text{Índice Hídrico} = 48,4$$

Este índice hídrico de 48,4 define um clima úmido (B_{2r}Áá) segundo a classificação de Thornthwaite & Matther, 1955 (SEI, 1998). Se for utilizada a classificação Koppen (1931) o clima de Salvador é Tropical Chuvoso de Floresta, do tipo Af. O clima Af de Koppen é caracterizado como um clima de floresta tropical, quente, com temperatura média anual superior a 18°C e precipitações superiores a 100 mm durante o ano inteiro, sem estação seca definida.

3.5 COBERTURA VEGETAL E A QUALIDADE AMBIENTAL.

A vegetação da região é um dos fatores físicos naturais mais importantes na retenção da água de chuva aumentando, conseqüentemente, a recarga do aquífero em função principalmente das suas raízes anastomosadas. Os conjuntos vegetais, nos seus diferentes estágios de regeneração, bem como a vegetação antropizada, contribuem para a qualidade urbano-ambiental, na medida em que aumentam a permeabilidade do solo com reflexos para a recarga de aquíferos e para a redução das inundações. Propiciam a contenção das encostas, amenizam as condições mesoclimáticas, filtram o ar, reduzindo o monóxido de carbono e proporcionam conforto visual em áreas ocupadas. A vegetação modifica as características dos ventos, intercepta a radiação solar, reduz a incidência da precipitação sobre o solo e altera a concentração da umidade na atmosfera e nas superfícies adjacentes (PDDU, 2002).

Segundo o relatório do Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Salvador - PDDU (2002), a Cobertura Vegetal Total (CVT) da área continental do município de Salvador abrange 9.382,30 há (33,19%), incluindo a vegetação do domínio de Mata Atlântica nos diversos estágios de regeneração (92,7%) e a vegetação antropizada (7,3%). Na porção insular do município destaca-se as ilhas de Maré e dos Frades, onde a CVT atinge 76,49%, sendo que a vegetação de Mata Atlântica nos diversos estágios de regeneração ocupa 41,71% do território. Observa-se ainda em Salvador algumas áreas de conservação da vegetação de representação pontual pouco significativa, porém de relevante importância no contexto urbano, tais como: parques da natureza, de recreação, urbanos e áreas de proteção de recursos naturais.

As florestas ombrófilas densas controlam o processo de infiltração das chuvas no solo, sobre os sedimentos da Formação Barreiras, regulando a entrada de água no sistema de recarga. A densa cobertura proporcionada pelas copas funciona como um anteparo natural contra o impacto das chuvas, atenua os processos de impermeabilização e escoamento superficial sobre os solos evitando o progressivo assoreamento dos reservatórios d'água e, assim, a perda de qualidade dos mananciais hídricos. Esses conjuntos vegetais apresentam relativa diversidade biológica e estreita relação com os ecossistemas litorâneos de restinga e de manguezais.

A vegetação de restinga arbórea, arbustiva e herbácea é responsável pela estabilização das dunas da planície litorânea e contribui para a manutenção da drenagem natural em ambientes considerados frágeis pelas difíceis condições de sobrevivência da vegetação (PDDU, 2002).

Os manguezais, que se interligam pelos mares e protegem os continentes da erosão, formam um ecossistema favorável ao desenvolvimento de várias espécies marinhas, especialmente na fase de reprodução, constituindo-se num ambiente propício à atividade extrativa.

A distribuição contínua da vegetação aumenta potencialmente a sua qualidade, por propiciar corredores de vegetação e fauna, necessários para a interligação de fragmentos vegetais, contribuindo para a sua conservação e recuperação, e funciona como barreira natural de proteção das diversas bacias hidrográficas no município de Salvador.

3.6 RESUMO DO CAPÍTULO

A região apresenta dois domínios geotectônicos distintos separados pela falha de Salvador. O primeiro é constituído pelo Alto Cristalino de Salvador formado por rochas metamórficas ortoderivadas compostas de granulitos charnoenderbíticos, tonalíticos que contêm enclaves ultramáficos de metapiroxenitos e máficos de metagabros, sendo cortadas por monzo-sienogranitos e diques máficos. Ocorre também, um grupo de rochas metamórficas paraderivadas alumino-magnesianas, granulitos básicos e quartzitos. A leste da falha do Iguatemi, onde as elevações são menores, ocorrem rochas monzoníticas-monzodioríticas e um conjunto de rochas gnáissicas, graníticas, anfíbolíticas e migmatíticas com predominância do fácies anfíbolítico sobre o fácies granulítico. O Alto Cristalino de Salvador está associado à determinadas características litológicas, estruturais e topográficas que permitiu compartimentar o seu relevo em três unidades geomorfológicas distintas que se escalonam do interior para o litoral atlântico da seguinte forma: (i) planalto costeiro dissecado, (ii) zonas de mares-de-morros ou lombadas e (iii) planície litorânea.

O segundo domínio geotectônico encontrado na região é constituído pela Bacia Sedimentar do Recôncavo que se formou em função de intenso processo tectônico distensivo que reativou a Plataforma Sul-Americana durante o Jurássico. É caracterizada por apresentar rochas sedimentares de idade mesozóica, sendo formadas em três episódios: antes, durante e após um processo de rifteamento que constituíram importantes seqüências deposicionais.

Uma questão hidrogeológica importante na região está relacionada com o papel hidráulico exercido pela falha de Salvador. Com efeito, o fanglomerado da Formação Salvador constitui excelente material selante, enquanto a rocha cristalina que constitui o alto da cidade de Salvador, excluídas as zonas densamente fraturadas, tem comportamento impermeável. Ao longo das zonas fraturadas transversais é possível haver transferência de água do sistema siliciclástico da bacia sedimentar do Recôncavo para o sistema cristalino. Nesse caso, a transferência local pode se desenvolver porque os fanglomerados tendem a se restringir ou a se tornar praticamente ausentes no nível correspondente ao da Formação São Sebastião no extremo norte do município.

A estrutura em blocos compartimentados em dois sistemas de fraturamento e o clima tropical úmido com altas temperaturas e precipitações pluviométricas favoreceram uma profunda alteração das rochas cristalinas de Salvador. As fraturas constituem vias efetivas de percolação e possibilitam o ataque químico dos minerais formadores de rochas e acessórios. O solo residual e a rocha alterada que constituem o regolito são geralmente de cor avermelhada, predominantemente argilosa, contendo teores de argila superiores a 35%, ressaltando aqueles desenvolvidos sobre alguns tipos de estratos da Formação Barreiras, que podem apresentar textura arenosa. As argilas são produtos de alteração

química dos plagioclásios, microclina e outros minerais aluminosos das rochas que compõem o embasamento cristalino, quando em contato com as águas subterrâneas. Os minerais ferromagnesianos (biotita, hornblenda, granadas, ortopiroxênios) também dão origem aos minerais argilosos em maior ou menor quantidade e proporcionam a formação dos diversos óxidos e hidróxidos de ferro responsáveis pela coloração vermelha dos solos. Alguns minerais acessórios de ferro presentes nas rochas cristalinas, tais como pirita, magnetita e ilmenita quando alterados, também ajudam a imprimir essa coloração no solo, devido a formação da hematita e goetita, depois que os seus produtos amorfos sofrem desidratação. Quando predomina a hematita, os solos são mais avermelhados, enquanto a goetita imprime neles uma cor vermelho-amarelada. Predominam na região os latossolos vermelho-escuro que estão relacionados às ocorrências de rochas máficas e alguns granulitos básicos. Os latossolos vermelho-amarelo guardam uma maior associação com os granulitos tonalíticos e charnoenderbíticos, enquanto os latossolos amarelos estão mais relacionados aos sedimentos da Formação Barreiras. Alguns podzólicos vermelho-amarelo (argilossolos) podem ser encontrados na cidade alta sobre granulitos tonalíticos e charnoenderbíticos, além de sedimentos da Formação Barreiras.

A Formação Barreiras sotoposta ao regolito é constituída de arenitos argilosos de coloração vermelha, violeta, branca e amarela, com estratificações plano-paralelas e cruzadas. São frequentes as intercalações de siltitos e argilas coloridas caulínicas, bem como, lentes de conglomerado.

Os Depósitos Flúviomarinhos Quaternários são constituídos principalmente por areias litorâneas, depósitos arenosos e argilo-arenosos fluviais, pântanos e mangues atuais, arenitos de praias, depósitos fluviolagunares e depósitos de leques aluviais coalescentes São encontrados na costa, em zonas baixas que margeiam os rios, ocorrendo principalmente entre as Avenidas Luiz Viana Filho (Paralela) e Otávio Mangabeira na orla atlântica.

As dunas são depósitos sedimentares quaternários de natureza eólica que constituem as feições mais conspícuas da faixa litorânea e que se estendem desde o bairro da Pituba até Stella Mares. Apresentam morfologia ondulada e se distribuem paralela ou semi-paralelamente segundo a linha do litoral Atlântico

O clima da região é úmido com índice hídrico acusando um valor de 48,4. Segundo a classificação Koppen (1931) o clima de Salvador é Tropical Chuvoso de Floresta, do tipo Af. O clima Af de Koppen é caracterizado como um clima de floresta tropical, quente, com temperatura média anual superior a 18°C e precipitações superiores a 2000 mm / ano, sem estação seca definida.

A Cobertura Vegetal Total (CVT) da área continental do município de Salvador abrange 9.382,30 hectares (33,19%), incluindo a vegetação do domínio de Mata Atlântica nos diversos estágios de regeneração (92,7%) e a vegetação antropizada (7,3%). Observam-se ainda em Salvador algumas áreas de conservação da vegetação de representação pontual pouco significativa, porém de relevante importância no contexto urbano, tais como: parques da natureza, de recreação, urbanos e áreas de proteção de recursos naturais.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

4 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

Os dados hidrogeológicos básicos utilizados para avaliação do comportamento do sistema aquífero fissural e suas coberturas provêm de informações oriundas de quase uma centena de poços tubulares, obtidas nos arquivos de diversas empresas públicas e privadas já mencionadas no **Capítulo 2 (Metodologia da Pesquisa)**. A partir desses dados foi possível estabelecer o sumário estatístico e análise da vazão, vazão específica, nível estático, nível dinâmico, rebaixamento, potenciometria, recuperação do nível estático, além do modelamento estrutural do topo do embasamento cristalino.

As características mais importantes do sistema aquífero cristalino são a densidade e os tipos de fraturamentos, a espessura e a natureza da cobertura sobre o embasamento que irão condicionar a recarga, além do armazenamento e circulação da água subterrânea.

Do ponto de vista hidrogeológico, as águas subterrâneas são armazenadas em dois domínios hidrogeológicos distintos, intercomunicáveis entre si, de natureza livre e, em alguns casos, confinados, formando um sistema aquífero heterogêneo e anisotrópico.

O primeiro é representado pelas coberturas do regolito, sedimentos arenosos litorâneos e areno-argilosos da Formação Barreiras, enquanto o segundo domínio é formado pelo embasamento cristalino de natureza francamente fissural. As coberturas podem atingir em algumas áreas espessuras de até 48 metros (**Figura 4.1**), porém o valor mediano atinge cerca de $19,0 \pm 2,5$ metros. Em decorrência de um caráter textural predominantemente areno-argiloso e, sobretudo, devido a sua pouca espessura, formam aquíferos limitados do ponto de vista do armazenamento e da capacidade de produção de seus poços (Guerra & Nascimento, 1999). Por se tratar de uma região de elevada pluviosidade, por ter elevada contribuição dos despejos domésticos e vazamentos eventuais na rede de distribuição de água da cidade, o aquífero de Salvador recebe uma taxa de recarga contínua o ano todo, possibilitando seu uso constante sem grandes rebaixamentos.

O segundo domínio é representado pelo embasamento cristalino que por sua vez forma um aquífero com capacidade de armazenamento ainda mais limitado e restrito as zonas mais fraturadas do corpo rochoso. Estas zonas apresentam cinco direções preferenciais: $N30^\circ - N40^\circ$; $N130^\circ - N140^\circ$; $N40^\circ - N70^\circ$; $N60^\circ - N90^\circ$ e $N120^\circ - N160^\circ$ conforme foi descrito no Capítulo 3, sendo que as três últimas direções estão normalmente preenchidas pelos sienitos, diques máficos metamorfisados, meta-sienitos e diques máficos não metamorfisados, respectivamente (Barbosa & Correia-Gomes, 2005). Os dois primeiros sistemas se apresentam abertos e, juntamente com as fraturas subhorizontais, são as responsáveis pela recarga, fluxo e armazenamento das águas subterrâneas no Alto Cristalino de Salvador.

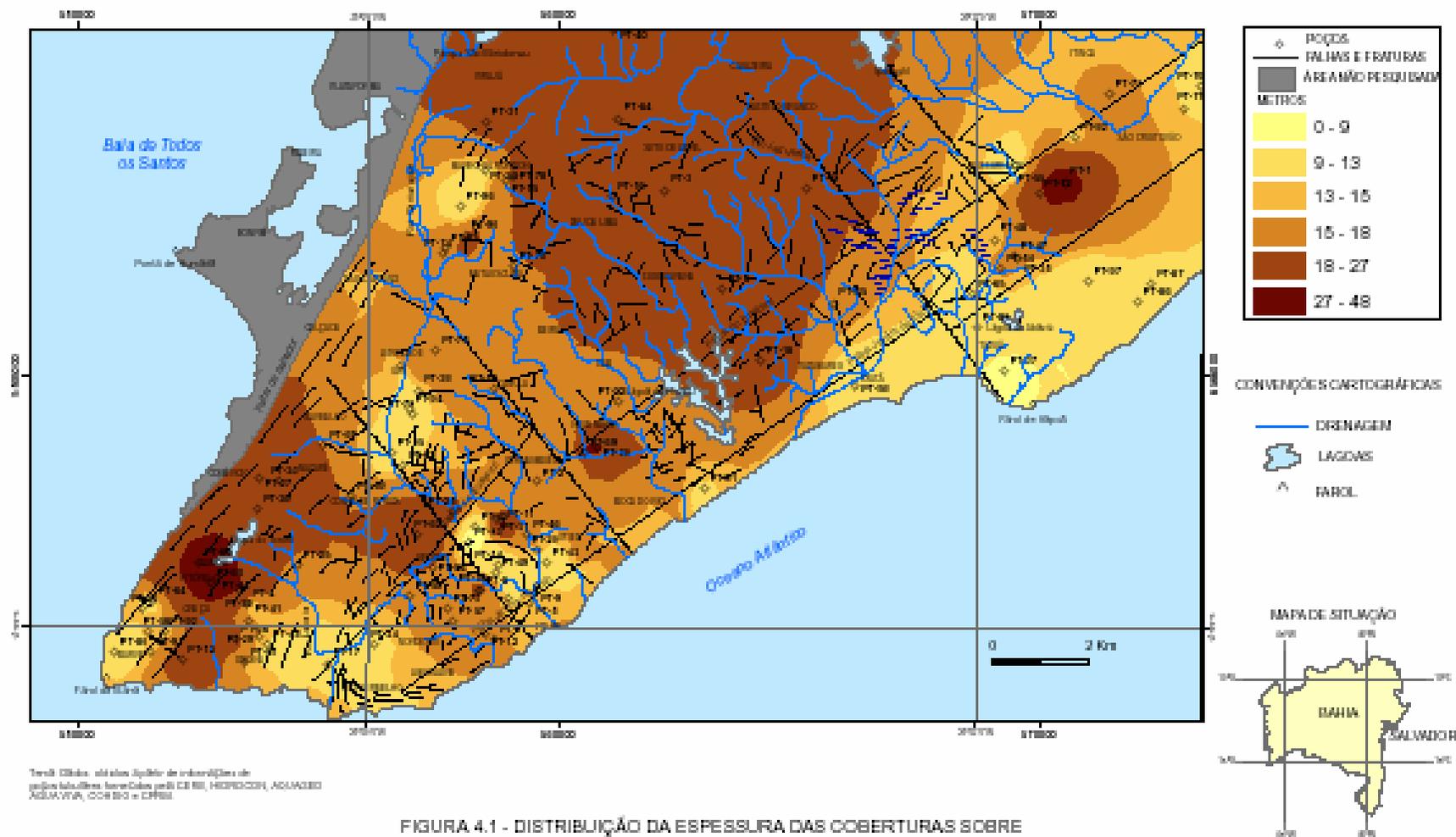


FIGURA 4.1 - DISTRIBUIÇÃO DA ESPESURA DAS COBERTURAS SOBRE O EMBASAMENTO CRISTALINO DE SALVADOR-BA

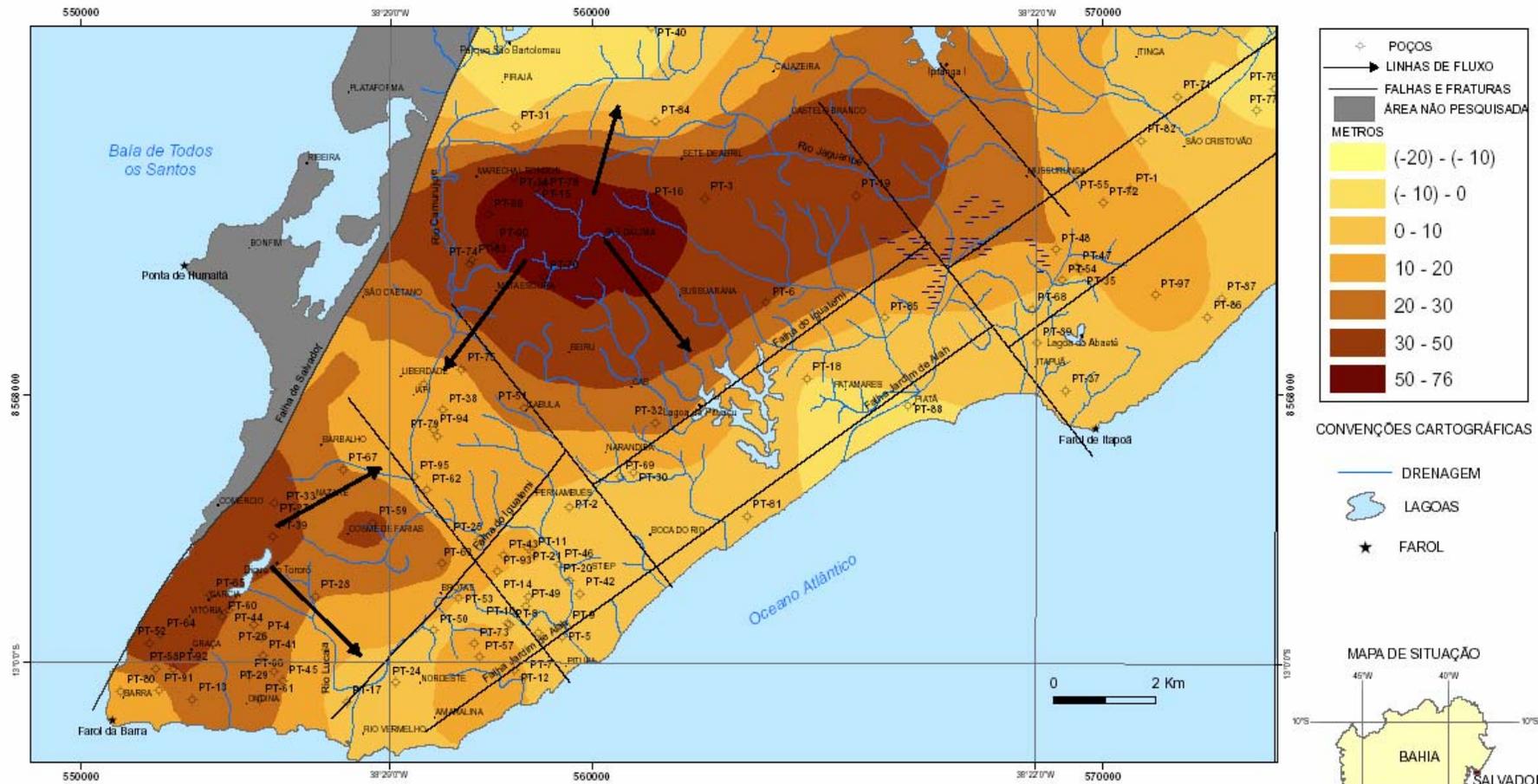
Os poços tubulares convencionais, de maior profundidade, são por vezes de natureza mista. Produzem água do embasamento fissural quando este se apresenta bem desenvolvido, e das coberturas ao mesmo tempo. Alguns poços tubulares da região são rasos (8 a 10 m de profundidade) e foram perfurados com trado manual, captando água apenas das coberturas de regolito, principalmente no contato entre a rocha decomposta e a rocha sã, que se constitui num conduto hidráulico muito importante. As coberturas apresentam diferentes níveis de acoplamento hidráulico com o embasamento cristalino. Onde o cristalino está capeado pelos arenitos da Formação Barreiras e/ou pelas dunas e areias litorâneas, o acoplamento hidráulico aumenta substancialmente a produtividade dos poços (Lima, 1999). Poços criteriosamente locados na orla de Salvador, no sistema areia-cristalino, produzem em média, uma vazão maior do que os poços situados na parte interna do município, no sistema regolito-cristalino (Lima, 1999).

4.1. POTENCIOMETRIA

O modelamento das linhas equipotenciais ou potenciométricas foi realizado utilizando-se os valores do topo da zona saturada com interpolação feita por krigagem ordinária através do software Arc Gis 9.0. As informações sobre o nível estático foram obtidas a partir dos dados de 92 poços tubulares e as cotas topográficas desses poços foram determinadas a partir de informações do Modelo Digital do Terreno, em mapas na escala 1/2000, com intervalo de contorno de 1 metro.

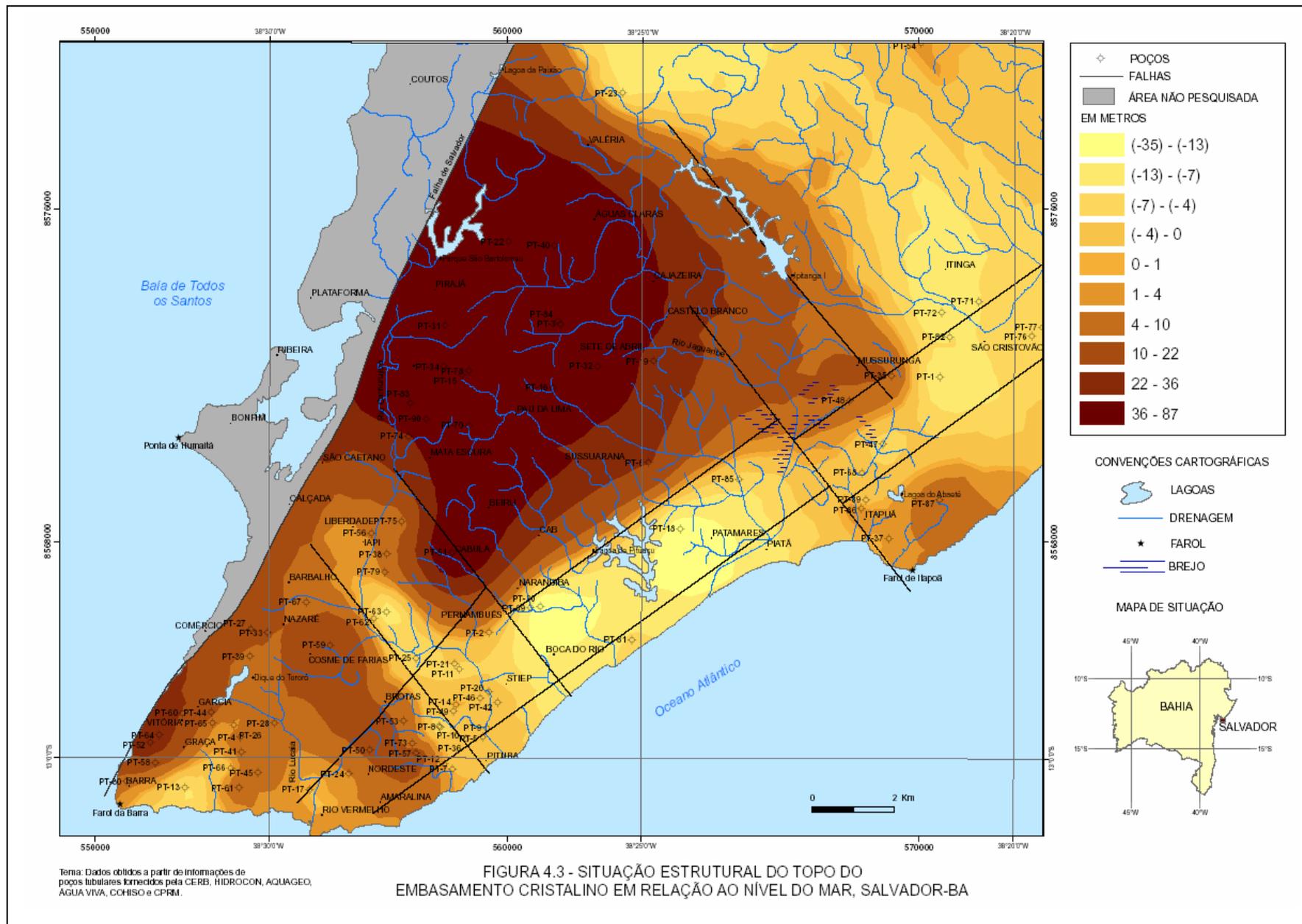
O modelamento mostrou um alto potenciométrico situado à oeste da Falha do Iguatemi, onde se localizam os bairros do Pau da Lima, Mata Escura e Marechal Rondon (**Figura 4.2**). Esse alto piezométrico está provavelmente associado a um alto do embasamento cristalino e funciona como um grande divisor de águas superficiais e subterrâneas. A partir desse alto, a drenagem superficial e subterrânea regional flui em direção ao Oceano Atlântico para sul e leste, e para norte e nordeste em direção ao vale do rio Ipitanga (**Figura 4.3**). Para oeste não se verifica grande fluxos subterrâneos em direção à Baía de Todos os Santos, apenas a existência de pequenas fontes ou minadouros naturais existentes ao longo da escarpa da Falha de Salvador como resultado da intersecção do nível hidrostático com a referida escarpa.

Outro alto do embasamento cristalino com menor magnitude é verificado no trecho que vai do bairro da Graça ao Centro Histórico da cidade (**Figuras 4.2 e 4.3**). Nesse alto, nascem alguns rios de pequeno porte, destacando-se entre eles o Lucaia, cuja nascente está localizada na região do vale dos Barris próximo à Estação da Lapa. Alguns afluentes da margem direita do rio Camarujipe, como é o caso dos riachos Campinas e das Tripas também nascem a partir desse alto do embasamento cristalino. No bloco diagrama em 3 -D pode-se observar a relação entre a potenciometria do aquífero subterrâneo (**Figura 4.4**) e o alto do embasamento cristalino (**Figura 4.5**).



Tema: Dados de vulnerabilidade obtidos a partir de informações de poços tubulares tomados pela CERB, HIDROCON, AQUAGEO, ÁGUA VIVA, COHISO e CPRM.

FIGURA 4.2 - POTENCIOMETRIA E FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO ALTO CRISTALINO DE SALVADOR-BA



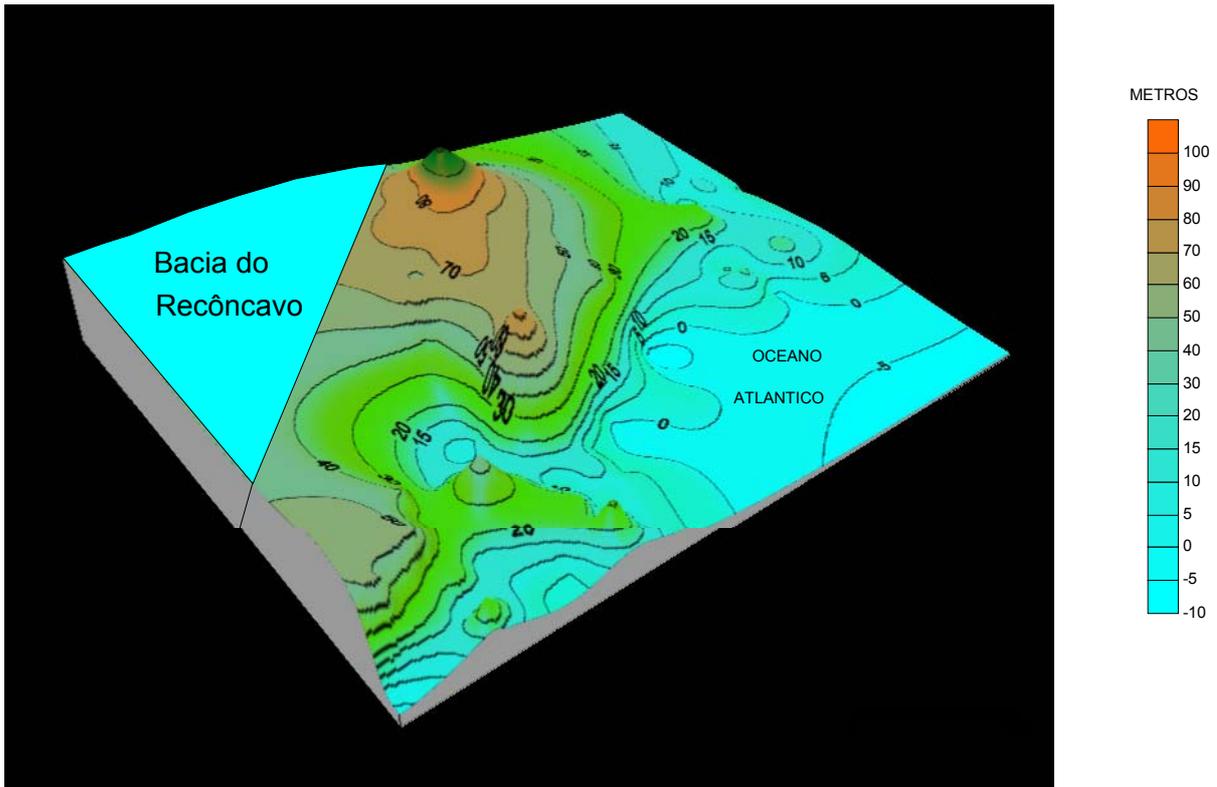
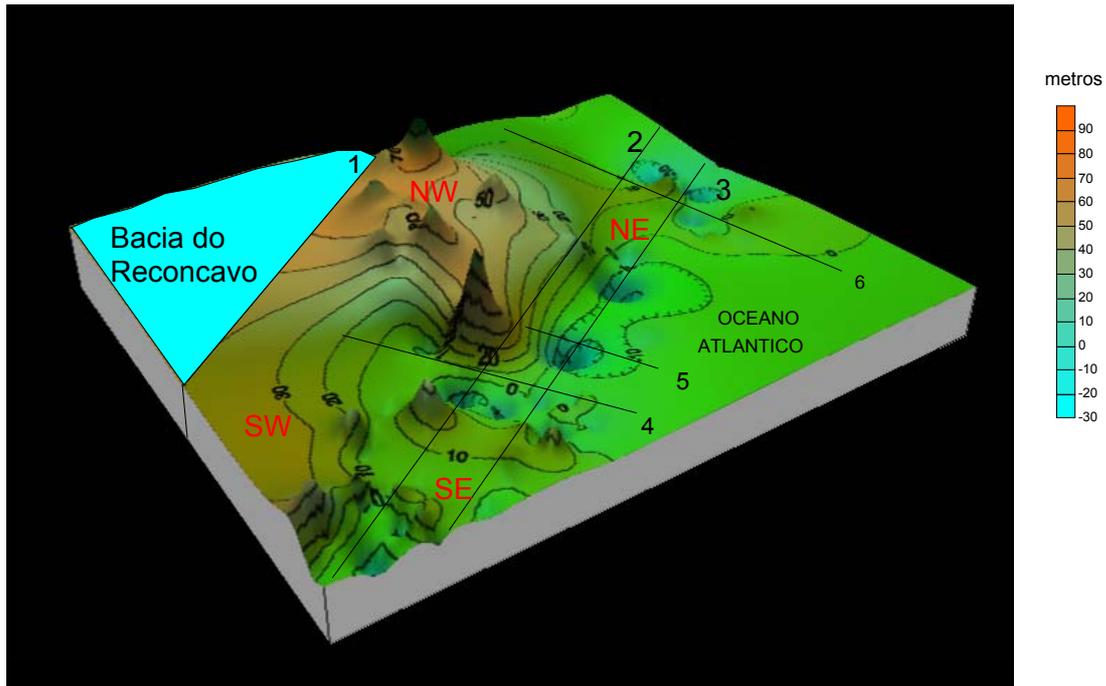


Figura 4.4 Potenciometria associada ao Alto Cristalino de Salvador.

Na região da baixa do Cabula, observa-se a convergência do fluxo subterrâneo em direção ao médio curso do rio Camarujipe. Uma outra zona de convergência subterrânea pode ser observada nas Avenidas Juracy Magalhães Júnior e Antônio Carlos Magalhães, já no baixo Camarujipe, entre os altos de Brotas, Itagira e da Santa Cruz no Nordeste de Amaralina. O rio Camarujipe desaguava inicialmente na praia da Mariquita no bairro do Rio Vermelho, tendo o seu leito sido desviado através de um canal para o bairro do Costa Azul, em virtude das obras de urbanização (Ceped, 1976). A parte que desaguava no Rio Vermelho continua perene ainda hoje devido a pequenos tributários e minadouros ali existentes, vindo a receber mais a jusante as águas do rio Lucaia já próximo da sua foz.

O modelamento do topo do embasamento cristalino foi obtido através de informações de 90 poços tubulares e a cota de cada um desses poços foi obtido através do Modelo Digital do Terreno. O modelamento mostrou que o embasamento cristalino de Salvador não é uniforme e, portanto, apresenta altitudes diferenciadas em relação ao nível do mar (**Figuras 4.3**). Para efeito de descrição, o mesmo foi dividido em quatro setores aqui denominados de noroeste (NW), sudoeste (SW), sudeste (SE) e nordeste (NE) que estão separados entre si pelas falhas do Iguatemi e uma provável falha situada na região da Estação Rodoviária (**Figura 4.5**).



1 -Falha de Salvador, 2 - Falha do Iguatemi, 3 - Falha do Jardim de Allah

Figura 4.5 Modelo estrutural proposto para o embasamento cristalino de Salvador.

No setor noroeste (NW), o embasamento cristalino apresenta-se mais alto topograficamente, com cotas que podem ultrapassar os 80 metros de altitude, onde estão situados total ou parcialmente os bairros de Águas Claras, Cajazeiras, Castelo Branco, Pau da Lima, Pirajá, Marechal Rondon, Mata Escura, Cabula, Beiru e Sussuarana.

Constitui a zona de nascente de todos os grandes rios que drenam a cidade de Salvador, destacando -se o Jaguaripe, Camarujipe, Pituaçu e alguns afluentes da margem direita do rio Ipitanga. No setor sudoeste (SW), o embasamento cristalino apresenta-se mais rebaixado quando comparado com o anterior, estando separado morfologicamente por um extenso vale que passa nas proximidades da Estação Rodoviária, constituindo um provável sistema transversal de fraturamento extensional, com direção aproximada N130-140° (**Figura 4.5**) semelhante às falhas transferentes da Bacia do Recôncavo.

Uma série de fraturamentos com esta direção foi observada através de imagens de satélite, destacando -se o da Avenida Jorge Amado, Itapoã, do rio Ipitanga, entre outros. Poderia haver a possibilidade de uma permuta de água subterrânea entre o sistema aquífero São Sebastião e o Cristalino de Salvador através de fraturamentos extensionais ao norte de Salvador, já próximo aos municípios de Camaçari e Simões Filho, onde o São Sebastião está em contato direto com o embasamento cristalino. No setor

sudoeste (SW) estão localizados os bairros de Brotas, Cosme de Farias, Federação, Centro, Vitória, Graça, Barra, Nazaré e Barbalho cujo embasamento apresenta cotas que podem atingir altitudes de 30 a 40 metros acima do nível do mar. No setor sudeste (SE) o alto cristalino do Itaigara e da Santa Cruz no Nordeste de Amaralina apresenta cotas que podem atingir altitudes de 20 a 25 metros acima do nível do mar. No setor nordeste (NE) o embasamento cristalino apresenta-se rebaixado e afundado em alguns locais, apresentando inclusive cotas negativas em relação ao nível do mar, na zona de influência da falha da Avenida Jorge Amado na região do Aeroclube e do Parque de Pituvaçu. Estas depressões no embasamento cristalino estão balizadas no lado oeste pela falha do Iguatemi e a leste pela falha normal inclinada do Jardim de Allah (**Figura 4.5**) que apresenta direção N30-40° com mergulho de 75° NW, sendo aproximadamente paralela a falha do Iguatemi (**Fotos 4.1 e 4.2**).



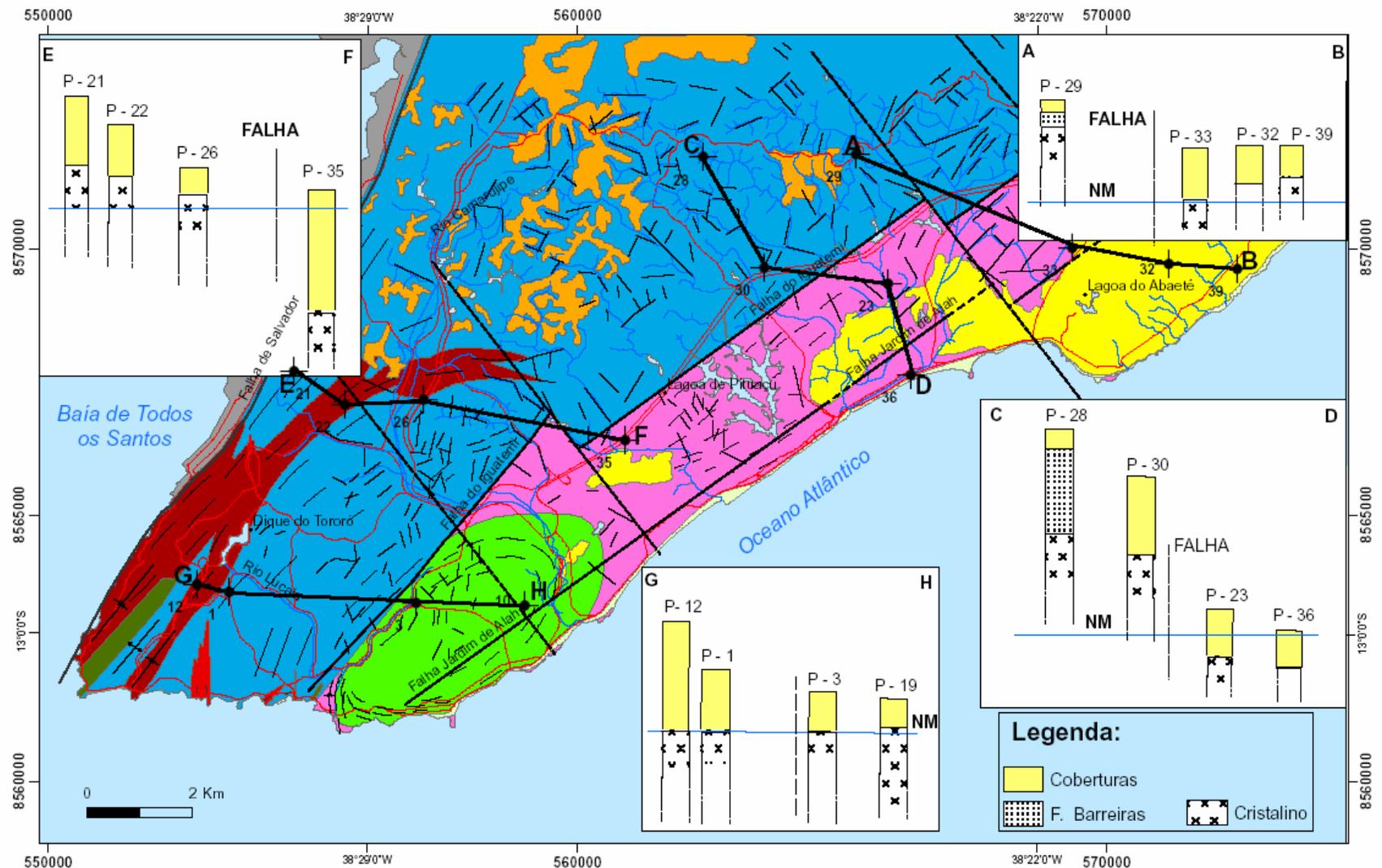
Foto 4.1 Zona de falha normal inclinada do Jardim de Allah – N30-40°/75° NW.

Fotos: Sérgio Nascimento



Foto 4.2 Zona de falha normal inclinada do Jardim de Allah - N30-40°/75° NW.

Através dos dados dos poços tubulares observou-se entre os setores NW e NE um desnível no topo do embasamento cristalino que pode atingir 20 a 40 metros, indicando provável deslocamento no plano da falha do Iguatemi ou simplesmente um processo de erosão diferencial ao longo da referida falha. Entre os setores SW e SE praticamente não existe desnível vertical entre esses blocos através da referida falha (**Figura 4.6**).



Tema: Dados de vulnerabilidade obtidos a partir de informações de poços tubulares fornecidos pela CERB, HIDROCON, AQUAGEO, ÁGUA VIVA, COHISO e CPRM.

FIGURA - 4.6 - PERFIS ESQUEMÁTICOS MOSTRANDO O TOPO EMBASAMENTO CRISTALINO EM RELAÇÃO AO NÍVEL DO MAR (NM)

4.2 A VARIAÇÃO DO NÍVEL HIDROSTÁTICO E A RECARGA DO AQUÍFERO.

O monitoramento da variação sazonal do nível hidrostático foi realizado numa área piloto, utilizando-se três poços tubulares previamente selecionados que estavam inativos e sem funcionamento há alguns anos, perfurados no cristalino e cobertos por regolito. A área onde estão localizados estes poços esta delimitada pelas coordenadas UTM 8562370 e 8562800 km Norte e 553230 e 553490 km Leste (datum Córrego Alegre/MG) e fica próxima à estação meteorológica de Ondina.

Os poços localizam-se no Centro de Processamento de Dados (CPD), na Escola de Medicina Veterinária e no Instituto de Biologia da UFBA. Todos ficam fora do alcance do raio de influência de outros poços produtores de água existentes na área, num local recoberto em sua maior partes por vegetação e com baixo índice de ocupação (**Foto 4.3**). Portanto, estão livres de qualquer obstáculo que pudesse dificultar a infiltração das águas de chuva, como, aliás, é muito comum em regiões urbanas.



Foto: Sérgio Nascimento

Foto 4.3 Campus Universitário de Ondina – UFBA.

No meio urbano, as mudanças impostas, como a impermeabilização da superfície, a existência de sistemas de drenagem artificial e a recarga localizada em parques e áreas não cobertas, aumentam bastante a complexidade dos processos de recarga (Wahnfried & Hirata, 2004). O volume de água trazido de outras bacias hidrográficas e usado nas cidades para abastecimento pode ser igual ou até maior do que a recarga natural através das precipitações pluviométricas. Com essa quantidade de água importada existem muitas possibilidades de ocorrerem recargas extras (Lerner 2002, in Wahnfried & Hirata, 2004). Vazamentos eventuais na rede de distribuição de água na cidade de Salvador podem contribuir e somar com as recargas naturais através das chuvas ao longo do ano.

A recarga natural direta é aquela que ocorre no ponto onde a água de chuva cai diretamente no solo, sem escoamento superficial, enquanto a localizada ocorre pontualmente em locais preferenciais. As recargas não naturais estão associadas aos sistemas de coleta de águas pluviais, de vazamentos de

sistemas de esgotos e de fornecimento de água à população (Wahnfried & Hirata, 2004). No meio urbano normalmente são relevantes a irrigação de parques e jardins com águas trazidas de outras bacias hidrográficas.

No estudo piloto desenvolvido na área do Campus Universitário de Ondina ao longo de 54 semanas de monitoramento utilizou-se o método da variação mensal do nível estático. Esse estudo mostrou que a oscilação do nível estático do CPD (270 mm), Escola de Medicina Veterinária (280 mm) e do Instituto de Biologia (60 mm), representa uma taxa de infiltração da ordem de 12,18% quando comparada com o total de precipitação do período de um ano (**Tabela 4.1**). A diferença de oscilação do nível estático (NE) entre os três pontos não se deve às cotas diferenciadas dos poços, mas, sobretudo ao fato do poço de Biologia situar-se próximo a zona de nascente do riacho que drena o Campus Universitário. Em outubro de 2005 foi construída uma pequena barragem de pedra nesse riacho, à montante do poço da Escola de Veterinária, provocando, a partir dessa data, uma alteração na oscilação do nível estático (NE) desse poço. Na **Figura 4.7** pode ser observada a oscilação sincrônica do nível estático nos três poços em função das variações das precipitações pluviométricas, indicando infiltrações rápidas. A sincronia do nível estático entre os poços monitorados perdurou até o mês de março de 2006 (**Figuras 4.8, 4.9 e 4.10**).

No período de monitoramento dos três poços a precipitação pluviométrica na área foi atípica, tendo chovido apenas 1670 mm/ano, segundo registros da estação meteorológica de Ondina. Esta estação detectou registros mensais inferiores a 100 mm entre setembro/2005 e março/2006. A estação climatológica automática de Itapoã operada pela Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia – SRH registrou, nesse mesmo período, um total de 1812,3 mm de precipitação anual, portanto inferior à média histórica (1961 -1990). O cálculo do balanço hídrico atmosférico pelo método de Thornthwaite e Mather (1955) no período monitorado, mostrou uma estimativa de evapotranspiração real (ER) da ordem de 982 mm e um excedente hídrico (EXC) de 688 mm, caracterizando um clima subúmido com acentuada deficiência hídrica no verão.

A evapotranspiração real representou cerca de 58,8% do total precipitado, enquanto o excedente hídrico estimado foi de 41,2% do total da precipitação no período monitorado. Desse excedente hídrico de 688 mm, cerca de 203 mm correspondeu a parcela infiltrada (12,18% da precipitação), enquanto 485 mm (29,0% da precipitação) representou a parcela correspondente ao escoamento superficial ou descarga da microbacia hidrográfica ali existente.

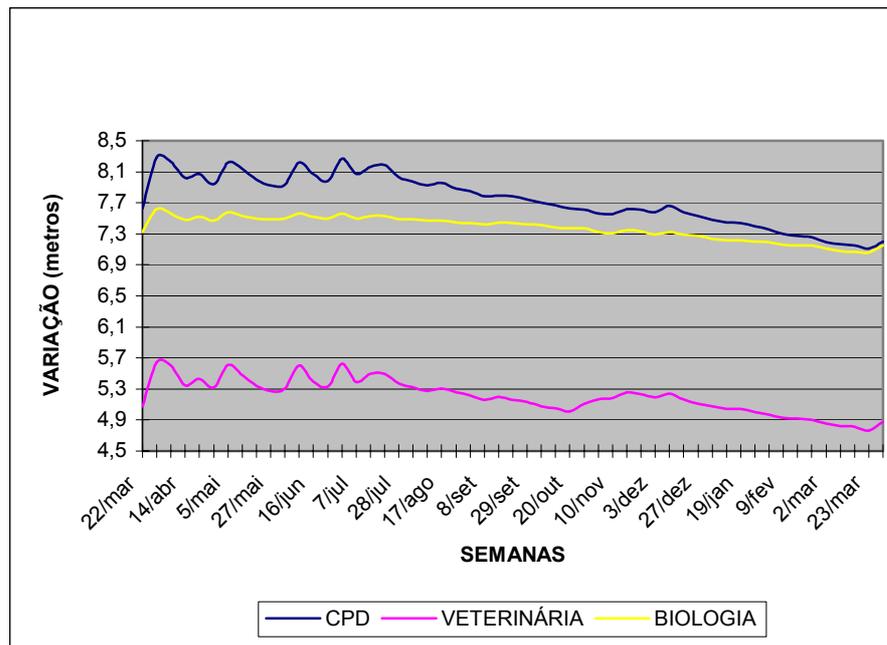
Tabela 4.1 Cálculo da recarga por variação mensal do nível estático (NE)

Mês/ano	Centro de Processamento de Dados		Escola de Veterinária		Instituto de Biologia	
	P (mm)	VARIAÇÃO NE (mm)	VARIAÇÃO NE (mm)	VARIAÇÃO NE (mm)	VARIAÇÃO NE (mm)	
Abril/2005	415,0	290,0	280,0	90,0		
Maio	198,2	300,0	340,0	90,0		
Junho	421,1	340,0	320,0	60,0		
Julho	204,1	160,0	130,0	40,0		
Agosto	117,1	90,0	60,0	40,0		
Setembro	50,6	110,0	90,0	30,0		
Outubro	32,9	90,0	100,0	40,0		
Novembro	72,8	70,0	90,0	40,0		
Dezembro	75,5	130,0	130,0	50,0		
Janeiro/2006	40,1	80,0	80,0	30,0		
Fevereiro	7,1	100,0	70,0	40,0		
Março	35,0	90,0	120,0	90,0		
TOTAL	1669,5	-----	-----	-----		
Variação	-----	270,0	280	60,0		

P = Precipitação pluviométrica

NE = Nível Estático

mm = milímetros

**Figura 4.7.** Variação do nível hidrostático (metros) em relação ao nível do mar.

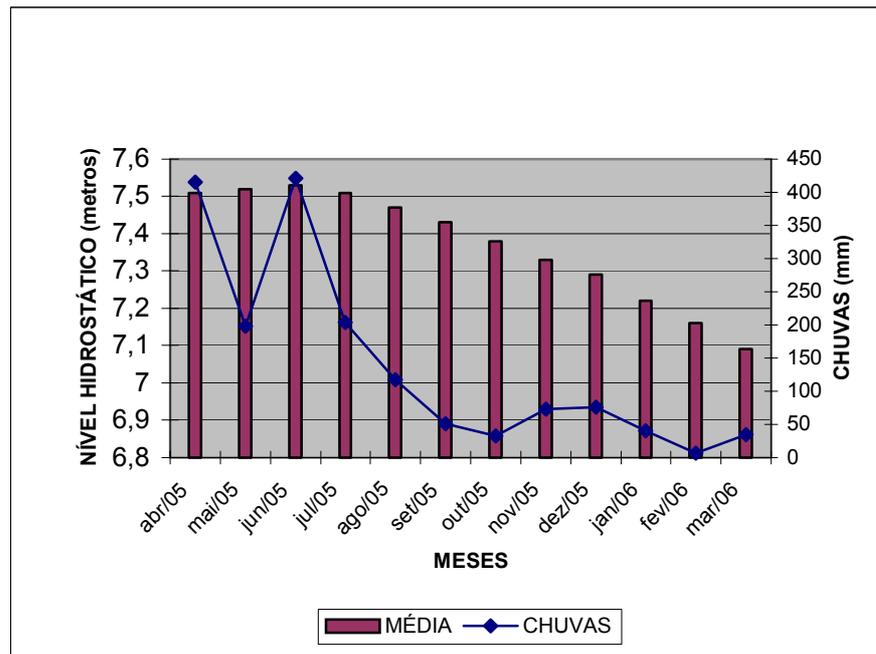


Figura 4.8. Correlação entre o nível estático médio e a pluviosidade – Instituto de Biologia/UFBA.

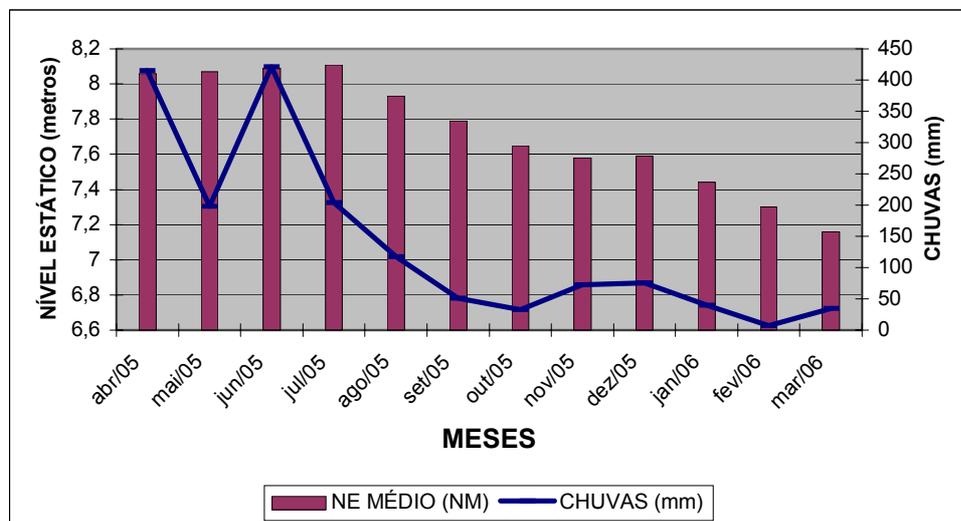


Figura 4.9. Correlação entre o nível estático médio e a pluviosidade – CPD/UFBA.

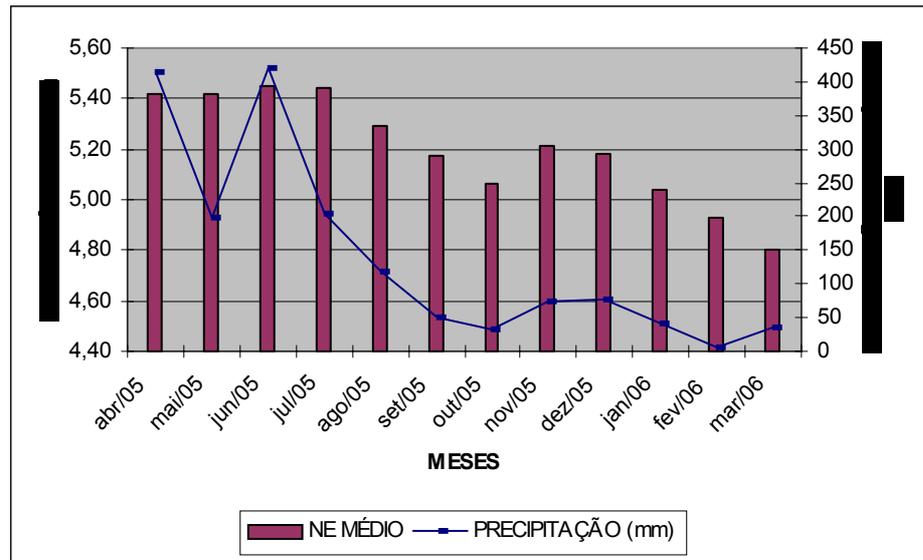


Figura 4.10. Correlação entre o nível estático médio e a pluviometria – Escola de Medicina Veterinária/UFBA.

Apesar das precipitações pluviométricas mensais serem inferiores a 100 mm a partir de setembro/2005, elas provocaram, mesmo assim, variações expressivas no nível estático (NE), mostrando que a infiltração não é desprezível, mesmo sob baixas precipitações pluviométricas. A exceção ficou por conta do poço do Instituto de Biologia, pelo fato de situar-se próximo à zona de nascente do riacho da área.

Esta resposta do sistema aquífero, mesmo quando submetido a pequenas precipitações pluviométricas mostra a importância da intensidade das precipitações pluviométricas na recarga natural da região, juntamente com a permeabilidade e porosidade do sistema aquífero, tanto em superfície quanto em subsuperfície. Com as informações sobre a recarga foi possível estabelecer a reserva reguladora do sistema aquífero da região, como veremos mais adiante no **item 4.7**.

4.3 ORIGEM DA ÁGUA SUBTERRÂNEA E O CICLO HIDROLÓGICO

A zona costeira de Salvador encontra-se sob o domínio da ação reguladora do Oceano Atlântico e da Baía de Todos os Santos, que interferem não apenas nas características térmicas, como no regime e na intensidade das chuvas, sendo marítimos os ventos que trazem os sistemas meteorológicos portadores de chuvas para a região. Uma parcela dessa precipitação retorna para a atmosfera por evapotranspiração e evaporação e a outra se infiltra no subsolo, contribuindo para o reabastecimento do aquífero. A parte que escoar na superfície (*run-off*) forma a rede de drenagem fluvial e as lagoas, muito comum na região da planície costeira.

O estudo da origem das águas subterrâneas foi feito através dos isótopos naturais de deutério δH^2 e oxigênio δO^{18} , em dez amostras coletadas independentemente daquelas obtidas para os estudos hidroquímicos, sendo quatro na estação seca (fevereiro de 2006) e seis na estação chuvosa (julho de 2006). As medidas da composição isotópicas de deutério δH^2 e oxigênio δO^{18} foram realizados no Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA) da Universidade Federal da Bahia. Estas medidas foram feitas em relação ao padrão internacional VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) segundo a equação 4.1 mostrada abaixo, estando expressas em delta por mil ($\delta\%$) e ajustada em relação a linha meteórica de Craig (1961).

$$\delta(\text{‰}) = \frac{\text{R amostra} - \text{R padrão}}{\text{R padrão}} \times 1000 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

R = a razão isotópica entre os isótopos pesados ($\delta^{18}O$ ou δH^2) e os mais abundantes (O^{16} e H^1) dada por O^{18} / O^{16} para O^{18} e H^2/H^1 para δ deutério (Craig, 1961 in Pereira et al, 2004).

A reta isotópica encontrada para a área está definida pela equação $\delta D = 6,3 * \delta O^{18} + 6,2$ apresentando um desvio em relação a reta padrão (LMG) $\delta D = 8 * \delta O^{18} + 10$ (**Figura 4.11**). Tal desvio indica que houve um processo de evaporação com perda de δO^{18} e δD^2 em relação ao valor padrão VSMOW.

Os valores isotópicos de δ deutério e oxigênio 18 encontrado nas águas subterrâneas no período chuvoso são muito próximos, variando de $-4,9$ a 0% e de $-1,8$ a $-1,1\%$ respectivamente (**Tabela 4.2**), sendo muito semelhantes aos valores de referencia VSMOW e situados dentro da faixa das águas meteóricas (**Figura 4.12a**). Na estação seca (fevereiro/2006) os valores de δ deutério variaram de $-4,0$ a $-6,0\%$ e o δO^{18} oscilou entre $-1,7$ a $-1,8\%$ (**Figura 4.12b**). Os desvios padrões das medidas encontrados pelo LFNA/UFBA são iguais a $\delta 1\%$ para o δ Deutério e $\delta 0,1\%$ para o oxigênio 18.

Os valores médios de $\delta O^{18} \%$ encontrado nas dez amostras coletadas, tanto na estação chuvosa quanto na estação seca, são semelhantes ao valor médio das médias isotópicas anuais obtidas na água de chuva, no período compreendido entre 1965 e 1986 pela estação meteorológica de Ondina (Salvador) para a Agencia Internacional de Energia Atômica – AIEA (**Tabela 4.3**). Entretanto, no caso do deutério, os valores encontrados tanto na estação seca ($-5,0\%$) quanto na chuvosa ($-2,5\%$) diferem daqueles monitorados em Ondina para a AIEA, muito embora todos se encontrem próximos do valor padrão (VSMOW).

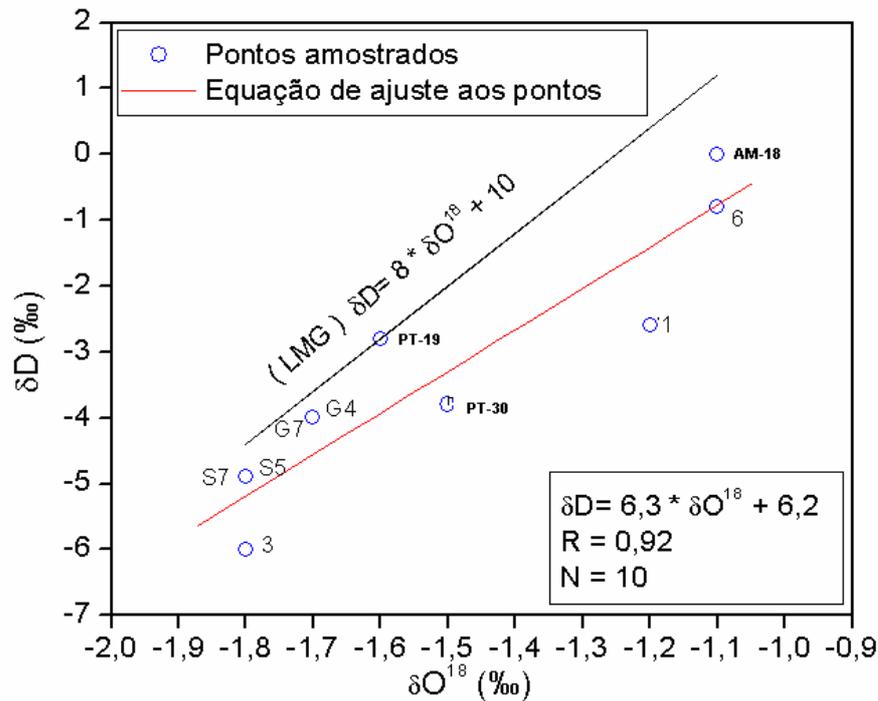


Figura 4.11 Equação de ajuste dos pontos amostrados em relação a linha meteórica de Craig (1961).

Tabela 4.2 Dados isotópicos das águas subterrâneas do Alto Cristalino de Salvador.

Amostra	Período	Pontos de Amostragem	X	Y	δD (vs _{mow}) (‰)	δ ¹⁸ O (vs _{mow}) (‰)	d (*)	Litologia
01	Estação chuvosa	Loteamento Veredas Piatã	566485	8568166	-2,6	-1,2	7,0	Sedimentos litorâneos
PT-30	Estação chuvosa	Jornal Correio da Bahia	560805	8566478	-3,8	-1,5	8,2	Cristalino
03	Estação chuvosa	Av. Luiz Eduardo Magalhães	557924	8567396	-4,9	-1,8	9,5	Solo residual
AM-18	Estação chuvosa	Fonte da Pedreira	555482	8567084	0	-1,1	8,8	Solo residual
PT-19	Estação chuvosa	Mansão dos Magistrados	565159	8571858	-2,8	-1,6	10,0	Formação Barreiras
06	Estação chuvosa	Av. Jorge Amado	562580	8566206	-0,8	-1,1	8,0	Sedimentos litorâneos
MÉDIA (JULHO / 2006)					-2,5	-1,4	8,6	
S 5	Estação seca	Avenida Paralela	566602	8571325	-4,0	-1,7	9,6	Solo residual
S 7	Estação seca	Avenida Paralela	566576	8571399	-4,0	-1,7	9,6	Solo residual
G 4	Estação seca	Avenida O. Gomes	565547	8568637	-6,0	-1,8	8,4	Solo residual
G 7	Estação seca	Avenida O. Gomes	565475	8568647	-6,0	-1,8	8,4	Solo residual
MÉDIA (FEVEREIRO / 2006)					-5,0	-1,75	9,0	

(*) Excesso de deutério calculado conforme $d = \delta H^2 - 8 \delta^{18}O$ ‰ segundo Dansgaard (1964), in Beraldo, 2005.

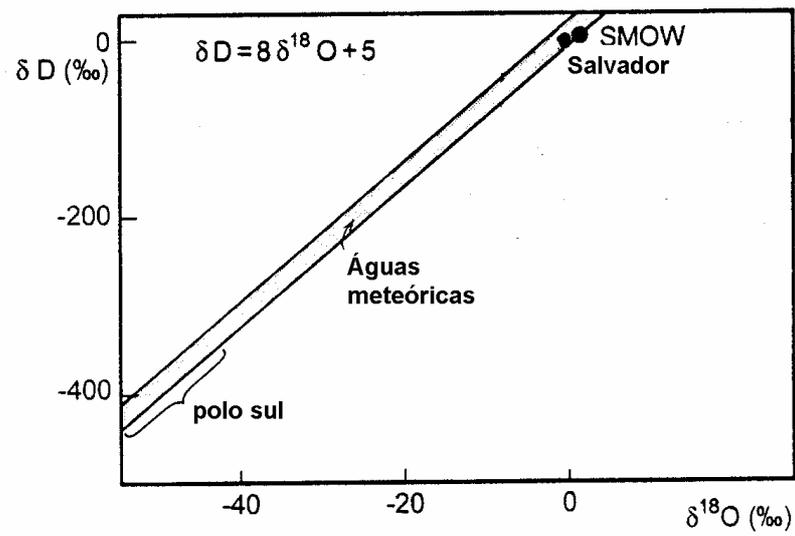


Figura 4.12a Águas meteóricas. Fonte: Taylor (1974) in Vital, P. (1994) – modificado.

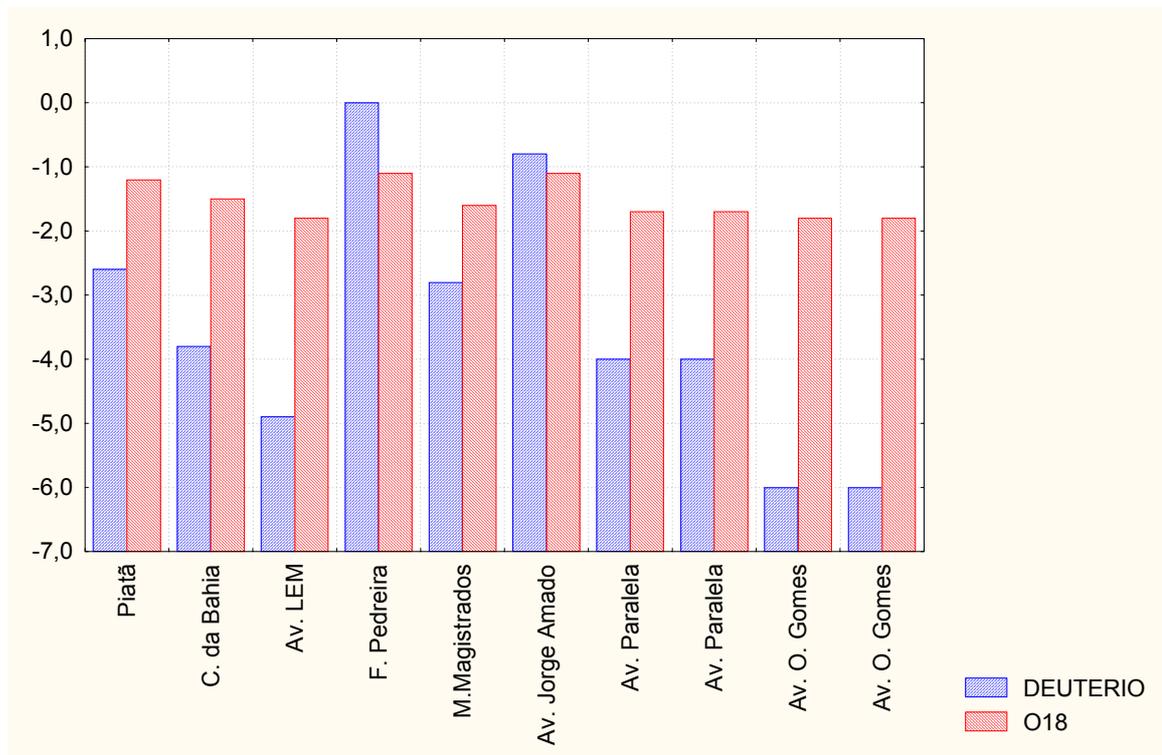


Figura 4.12b Distribuição do δ Deutério e do Oxigênio 18.

Tabela 4.3 Medidas isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ ‰ e δD^2 ‰ das águas de chuva na estação meteorológica de Ondina.

Ano	Média O18	Média H2	Média - excesso de deutério	Precipitação total
1965	-1,45	0,4	12,2	1843
1966	-1,79	-6,1	8,2	2209
1967	-0,92	-0,1	6,1	1936
1968	-1,78	-2,2	11,8	2508
1969	-1,9	-5,5	9,8	2475
1970	-1,45	---	---	1914
1971	-1,13	---	---	2807
1972	-1,45	---	---	1743
1973	-1,19	2,7	12,2	2620
1974	-1,76	-2,3	11,8	2035
1975	-1,38	0,8	11,5	2258
1976	-1,28	1,4	11,6	1430
1983	-1,16	4,8	14	1023
1984	-1,14	-0,3	9,3	2407
1985	-1,16	---	---	2536
1986	-1,26	---	---	2083

Fonte: Agencia Internacional de Energia Atômica (2007).

Segundo Pereira et al (2004) o excesso de deutério (d) definido por Dansgaard (1964) como o desvio na reta meteórica ($d = \delta D - 8 O^{18}$) fornece informações adicionais sobre o ciclo da água. “O seu valor reflete o fracionamento cinético que acontece durante processos de não equilíbrio tais como evaporação sobre a superfície do oceano (Merlivat & Jouzel, 1979) que é o principal, e evaporação (Stewart, 1975) e formação (Jouzel & Merlivat, 1984) da chuva abaixo da base das nuvens”. Embora sejam muito próximos, no caso de Salvador os menores valores de (d) estão situados na planície costeira (Loteamento Jardim Piatã e Av. Jorge Amado) podendo ter como causa principal a proximidade da fonte evaporativa formadora das chuvas (Oceano Atlântico) e como causa secundária, a reevaporação durante a precipitação pluviométrica ou mesmo, o aumento no teor da umidade no local da precipitação por se tratar do período chuvoso (mês de julho).

A presença de águas subterrâneas isotopicamente semelhantes em todos os pontos de captação amostrados (**Tabela 4.2**) evidencia uma interconexão entre as coberturas e o embasamento cristalino, com recarga efetuada através das águas meteóricas. Quando se correlaciona os valores de δO^{18} com os valores de cloreto nas seis amostras coletadas na estação chuvosa, observa-se um coeficiente de correlação linear negativo e com baixo coeficiente de determinação R^2 (**Figura 4.13**). Assim, o

incremento do cloreto não está associado com o aumento isotópico de δO^{18} oriundo das precipitações pluviométricas. O valor alto de cloreto obtido no poço tubular do Jornal Correio da Bahia, sugere tratar-se de contaminação por resíduos sólidos e esgotos domésticos existentes nos conjuntos habitacionais nas suas proximidades.

Quando se retira da correlação linear o valor do cloreto obtido na água do poço do Correio da Bahia, a associação passa a ser positiva sugerindo que o cloreto está associado aos aerossóis marinhos encontrado nas precipitações pluviométricas. Em ambos os casos tal afirmativa devem ser tomados com cautela, devido a razão entre a variação explicada pela reta de regressão e a variação total (R^2) ser muito baixa tanto no primeiro (3,1%) quanto no segundo caso (16,0%) (**Figuras 4.13 e 4.14**).

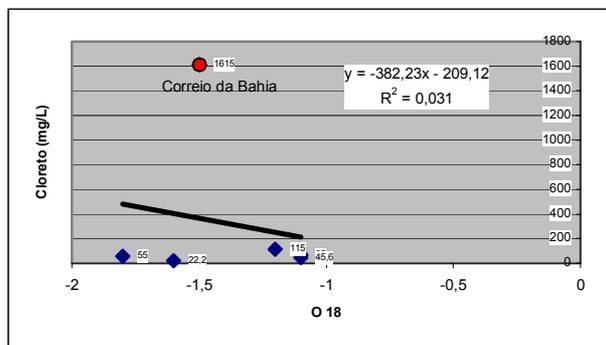


Figura 4.13 Relação entre o δO^{18} e o cloreto, incluindo o poço do Correio da Bahia.

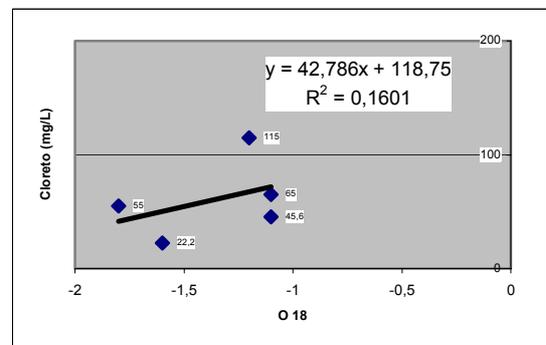


Figura 4.14 Relação entre δO^{18} e o cloreto, excluindo o poço do Correio da Bahia.

4.4 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

A avaliação hidrológica do sistema misto cristalino e suas coberturas foi feita com base em ensaios de bombeamento de 19 poços tubulares, efetuados ao longo de 12 ou 24 horas e executados pelas empresas de hidrogeologia por ocasião do término da perfuração dos poços.

A permeabilidade macroscópica média de um aquífero pode ser estimada a partir de dados de recuperação do nível piezométrico em testes de bombeamentos. Esta técnica desenvolvida por Theis em 1935 (Hautush, 1964; Ferri et al, 1962; in Lima 1999), aplica-se tanto para aquíferos livres quanto para aquíferos confinados. Para aplicar essa técnica é necessário admitir as seguintes premissas: (i) o aquífero deve ser homogêneo, isotrópico, lateralmente extenso e de espessura uniforme; (ii) o poço de diâmetro infinitesimal, deve penetrar totalmente no aquífero e produzir ou receber água através de

toda a sua área de penetração; (iii) a transmissividade do aquífero deve ser constante no espaço e no tempo sendo a água extraída ou injetada instantaneamente com a variação do nível piezométrico (Lima, 1999).

A maneira mais prática de calcular a transmissividade a partir da fórmula de Theis consiste em plotar em um gráfico a variação do rebaixamento residual (s') num eixo linear, contra o aumento de (t') num eixo logarítmico. Quando o valor de (t') for suficientemente grande, os dados observados passam a descrever uma linha reta cuja inclinação fornece aproximadamente $\Delta s' / \ln(t'_2 - t'_1) = Q / 4\pi K b$ (Eq. 4.2). Por conveniência, tomando t'_2 / t'_1 como um ciclo da escala logarítmica, tem-se a equação $T = 0,1832 Q / \Delta s'$ (Eg. 4.3) onde $\Delta s'$ é o rebaixamento residual por ciclo logarítmico de tempo, sendo $T = K b$ a transmissibilidade (m^2/min) do aquífero e Q a vazão em $m^3 / minuto$ (Lima, 1999).

Os 19 poços tubulares escolhidos e utilizados para os cálculos, dispõem de ensaios de bombeamento e recuperação. Alguns penetraram somente nas coberturas enquanto que outros penetraram nas coberturas e no embasamento cristalino. Os resultados indicam que a permeabilidade macroscópica (K) do sistema cobertura/cristalino cobre um intervalo que vai de $0,82 \times 10^{-5}$ (14,2 milidarcy) a $31,60 \times 10^{-5} m/min$ (548 milidarcy), com um valor médio de $6,36 \times 10^{-5} m/min$ (110 milidarcy). A média populacional (μ) varia probabilisticamente de $2,8 \times 10^{-5}$ (48,5 milidarcy) a $9,9 \times 10^{-5} m/min$ (171,6 milidarcy), considerando um intervalo de confiança de 95% e $n = 19$ observações (**Tabela 4.4**). Tendo em vista que o valor da assimetria calculado foi relativamente alto ($A_3 = 2,62$) para $n = 19$ e I.C. = 95%, torna-se mais prudente considerar o valor mediano de $3,82 \times 10^{-5} m/min$ para representar a condutividade hidráulica do sistema coberturas/embasamento. Em termos de permeabilidade intrínseca, o valor da mediana é equivalente a 66,2 milidarcy.

Para os cálculos dos coeficientes de transmissividade (T) e permeabilidade (K) tomamos como exemplo os resultados do teste de bombeamento do poço do Parque de Exposição Agropecuária (PT-48) que foi aquele que apresentou o maior valor de coeficiente de permeabilidade. Utilizou-se nos cálculos um procedimento gráfico prático, plotando-se a variação do rebaixamento residual (S') num eixo linear Y, contra o aumento T' num eixo X. Quando o valor de T' é suficientemente grande, os dados observados passam a descrever uma linha reta cuja inclinação fornece, aproximadamente $\Delta S' / \ln(T'_2 / T'_1) = Q / 4 \pi K b$ (Lima, 1999). Por conveniência, tomando T'_2 / T'_1 como um ciclo da escala logarítmica, temos: $T = 0,1832 Q / \Delta S'$ (**Eq. 4.3**).

Onde T = transmissividade do aquífero (m^2 / min)
 Q = vazão (m^3/h)
 $\Delta S'$ = variação do rebaixamento residual (m)

$$\begin{aligned}
 B &= \text{Profundidade} - \text{Nível estático} = 51,0 - 1,08 = 49,92 \text{ m} \\
 Q &= 11,98 \text{ m}^3/\text{h} = 0,19966 \text{ m}^3/\text{min} \\
 \Delta S' &= 2,32 \text{ (obtido no gráfico da figura 4.16)}
 \end{aligned}$$

$$T = \frac{0,1832 \times 0,19966 \text{ m}^3/\text{min}}{2,32 \text{ m}} = 0,01577 \text{ m}^2/\text{min}$$

$$K = \frac{T}{B} = \frac{0,01577 \text{ m}^2/\text{min}}{49,92 \text{ m}} = 0,000316 \text{ m/min}$$

$$K = 52,6 \times 10^{-5} \text{ cm/seg ou } 548 \text{ milidarcy}$$

O limite superior da variação de K na região (548 milidarcy) obtida no Parque de Exposição Agropecuária (PT -48) indica a existência de valores macroscópicos mais altos, devido à presença de uma componente de permeabilidade relacionada com sistemas de fraturamentos do embasamento cristalino (**Figura 4.15 e 4.16**).

O acoplamento hidráulico entre as coberturas areno-argilosas com o embasamento cristalino fissurado é também o responsável por valores relativamente altos de condutividade hidráulica encontrado entre os 19 poços investigados, destacando-se o da Empresa Baiana de Desenvolvimento Agrário – EBDA (PT-35) (300 milidarcy) e Parque de Exposição Agropecuário (PT-47) (142 milidarcy) o que reflete nos valores altos da vazão obtidos nesses locais, ou seja, 6,58 e 12,9 m³/h, respectivamente.

O acoplamento hidráulico entre os níveis arenosos existentes eventualmente no contato do regolito com o embasamento cristalino também contribui para o aumento da condutividade hidráulica, como foi verificado no poço tubular da Praça Lord Cockrane (PT-26) situado na Avenida Anita Garibaldi, cuja vazão é de 4,37 m³/h e condutividade hidráulica (K) de 8,10 x 10⁻⁵ m/min (140 milidarcy). Níveis arenosos da Formação Barreiras sobrepostos às rochas alteradas também podem gerar valores macroscópicos de permeabilidade (K) relativamente altos para a região como foi o caso daqueles encontrados no poço tubular da Mansão dos Magistrados (PT-19) na Estrada Velha do Aeroporto (148 milidarcy).

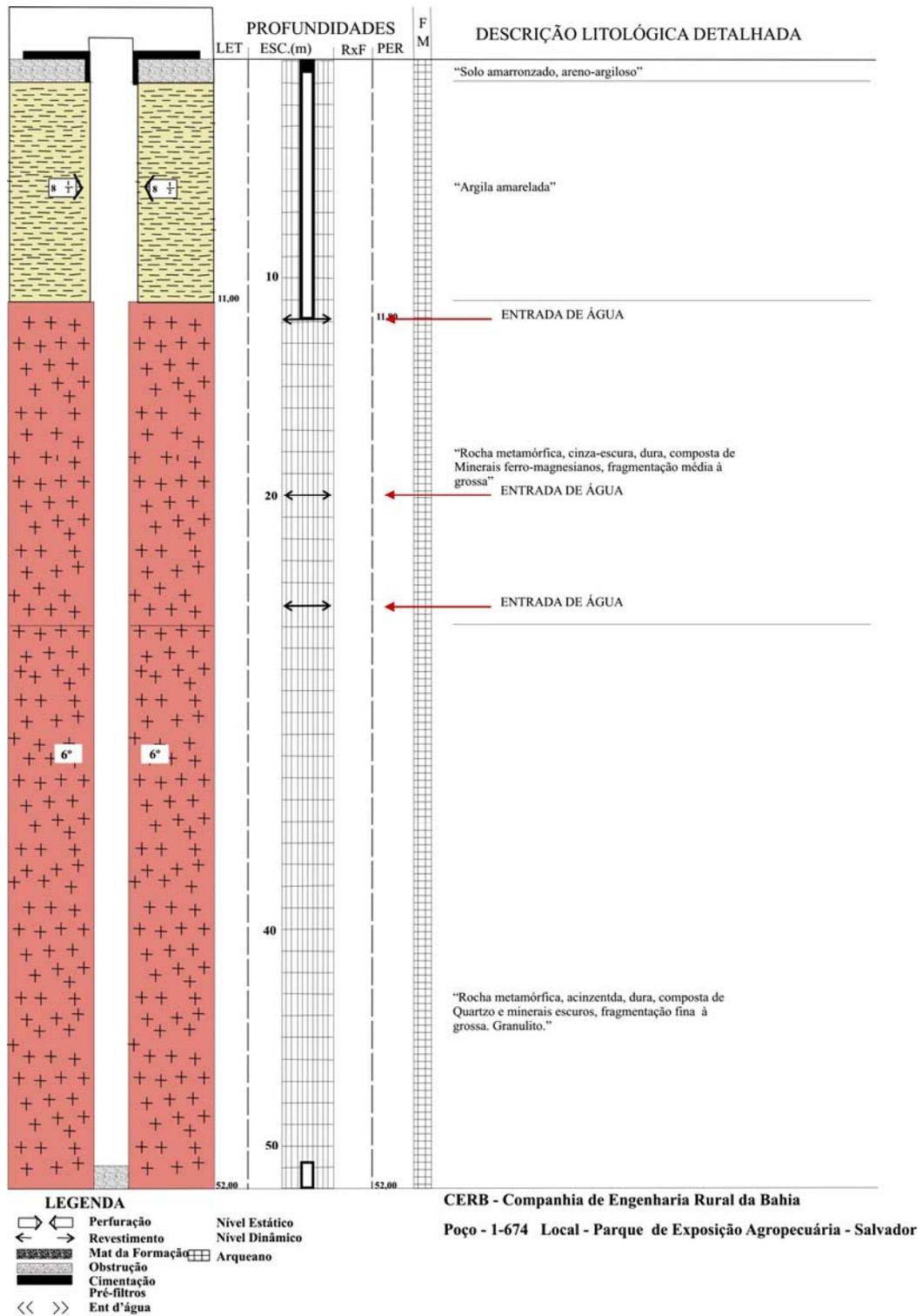


Figura 4.15 Perfil litológico do poço tubular do Parque de Exposição Agropecuária (PT-48).
(Fonte: CERB, 1980).

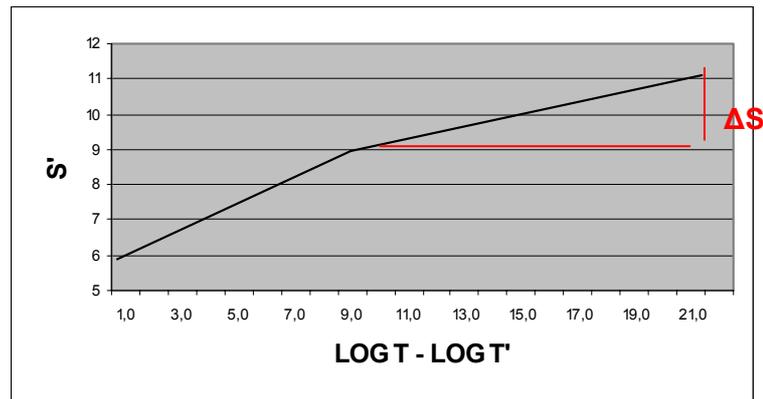


Figura 4.16 Recuperação piezométrica do poço do Parque de Exposição Agropecuária (PT-48).

Cerqueira Neto & Barreto (1972) realizaram uma série de medidas de condutividade hidráulica no regolito desenvolvido sobre as rochas cristalinas situadas no Campus Universitário de Ondina e arredores, encontrando valores oscilando de $0,28 \times 10^{-5}$ a $41,7 \times 10^{-5}$ m/min. Esses valores apresentam uma média da ordem $10,2 \times 10^{-5}$ m/min, típico de um material com granulometria siltica-arenosa. Na região das dunas do Parque de Abaeté entre Itapoã e Stella Mares a condutividade hidráulica da cobertura sedimentar arenosa é bem maior, da ordem de $5,6 \times 10^{-1}$ m/min (SRH, 2005) ou $6,0 \times 10^{-3}$ m/min, segundo o IBGE (1999). Já os sedimentos areno-argilosos da Formação Barreiras, apresentam uma condutividade hidráulica média da ordem de $15,0 \times 10^{-3}$ m/min (IBGE, 1999). Medidas de permeabilidade foram obtidas no campo através da injeção de ar (permeabilidade ao ar) por um permeâmetro portátil PPP- 250 da CORELAB INSTRUMENTS. O permeâmetro portátil PPP – 250 mede a queda de pressão em um material poroso numa dada janela de tempo, através do fluxo de ar injetado por um orifício. O cálculo da permeabilidade é feito através do registro da queda de pressão por um computador (*laptop*) e processado através de um software específico do equipamento.

Os resultados mostraram que os valores de (K) para a cobertura de regolito variam de $9,6$ a $78,3 \times 10^{-5}$ m/min o que não difere substancialmente daqueles obtidos por Cerqueira Neto & Barreto (1972). As areias de dunas apresentaram uma permeabilidade (K) variando de $2,05$ a $2,95 \times 10^{-3}$ m/min, enquanto que nas areias litorâneas os valores oscilaram de $7,83 \times 10^{-4}$ e $5,84 \times 10^{-3}$ m/min. Nos níveis argilosos da Formação Barreiras os valores de (K) variaram de $1,14$ a $3,73 \times 10^{-4}$ m/min, enquanto nos níveis arenosos foram encontrados valores oscilando entre $1,08$ a $1,92 \times 10^{-3}$ m/min.

O gradiente hidráulico ($\Delta h/\Delta L$) da área, obtido com dados do mapa potenciométrico da **Figura 4.2** oscila entre $0,0056$ e $0,040$ com valor médio de $0,018$, sendo o Δh a diferença de altitude entre as curvas equipotenciais e ΔL , a distância horizontal entre as mesmas. Considerando-se o coeficiente de

permeabilidade médio do sistema misto cobertura/embasamento igual a $3,82 \times 10^{-5}$ metros/min, o fluxo subterrâneo teria então uma velocidade de escoamento médio da ordem de $0,060 \times 10^{-5}$ metros/dia ou 31 metros/ano. A média populacional (μ) pode variar podendo oscilar probabilisticamente de $30,24 \times 10^{-5}$ m/dia (11 metros/ano) a $230,4 \times 10^{-5}$ m/dia (84 metros/ano), desde que se considere para o teste um intervalo de confiança de 95% e $n =$ numero de poços =19.

Os valores da transmissividade (T) do sistema cobertura/embasamento variam de $0,25 \times 10^{-3}$ a $15,77 \times 10^{-3}$ m²/min. A média populacional (μ) pode variar na área de $1,10$ a $5,10 \times 10^{-3}$ m²/min, considerando um intervalo de confiança de 95% e $n = 19$ observações. Da mesma forma que na condutividade hidráulica (K), o valor da assimetria calculado foi também relativamente alto ($A_3 = 2,34$), razão pela qual é mais prudente considerar o valor mediano de $1,39 \times 10^{-3}$ m²/min, para a transmissividade (T) da área (**Tabela 4. 4**).

Tabela 4.4 Sumário estatístico dos parâmetros hidráulicos.

	T (m ² / min) x 10 ⁻³	K (m/ min) X 10 ⁻⁵	Ri (metros)
Média	3,08	6,36	191,95
Erro padrão	0,95	1,68	27,56
Mediana	1,39	3,82	151,00
Desvio padrão	4,12	7,33	120,14
Variância	16,99	53,69	14432,83
Coefficiente de Variação	1,34	1,15	0,63
Curtose	5,21	7,85	1,99
Assimetria	2,34	2,62	1,51
Intervalo	15,52	30,78	444,00
Valor Mínimo	0,25	0,82	64,00
Valor Máximo	15,77	31,60	508,00
Soma	58,57	120,89	3647,00
Número de poços	19	19	19
Intervalo de Conf. (95%)	1,09 – 5,07	2,8 – 9,9	134,0 – 249,0

Q = vazão; Q esp = vazão específica; T = transmissividade;
 K = condutividade hidráulica; Ri = raio do cone de depressão;
 IC. = Intervalo de confiança.

O raio do cone de depressão (R_i) dos 19 poços tubulares estudados foi calculado segundo a fórmula de Hantush (1964); ou seja: $R_i = 1,5 \sqrt{\gamma T}$

$$\gamma = K.b / \Sigma$$

T = tempo de bombeamento do poço = 525600 minutos (1 ano).

K = condutividade hidráulica do poço

b = espessura do aquífero

Σ = porosidade efetiva = 7,2% (taxa de infiltração obtida no Campus Universitário de Ondina)
(Ver **item 4.3**)

Os resultados mostraram que os raios do cone de depressão variam de 64 a 508 metros, apresentando uma média aritmética de 192 metros, podendo a média populacional (μ) situar-se probabilisticamente entre 134 a 249 metros, considerando para o teste um intervalo de confiança de 95% e $n=19$ observações. A relação direta com a alta transmissividade e condutividade hidráulica fazem com que os maiores raios do cone de depressão calculados ocorram nos poços (PT-35) da EBDA (444 metros) e (PT-48) do Parque de Exposição Agropecuária (508 metros) respectivamente (**Tabela 2.1**). Como esses dois poços ficam muito próximos é bastante provável que um pode interferir no outro em caso de bombeamento simultâneo.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DO AQUIFERO DO ALTO CRISTALINO DE SALVADOR

A forma de captação principal de água subterrânea no Alto Cristalino de Salvador é feita através dos poços tubulares rasos ou profundo, utilizados em pequenos abastecimentos. Entretanto existem outras formas de captação através de fontes naturais e cisternas, de uso comum em toda a cidade. No centro da cidade se encontram dezenas de fontes históricas, algumas das quais ainda do período colonial, enquanto que na periferia, onde reside grande parte da população de baixa renda, as cisternas são mais frequentes.

Para definir as características hidrogeológicas básicas do sistema aquífero, foram utilizadas as informações oriundas de uma base de dados com 98 poços tubulares (**Tabela 2.1**) perfurados e desenvolvidos em diferentes épocas por diversas empresas do ramo de perfuração, distribuídos aleatoriamente por toda área de trabalho (**Figura 2.1**). Estes poços apresentam profundidades que variam de 6,5 a 150 metros, com uma média de 53,0 metros (**Tabela 4.5**), sendo que a maioria dos poços apresenta uma profundidade situada entre 60 e 80 metros (**Figura 4.17**).

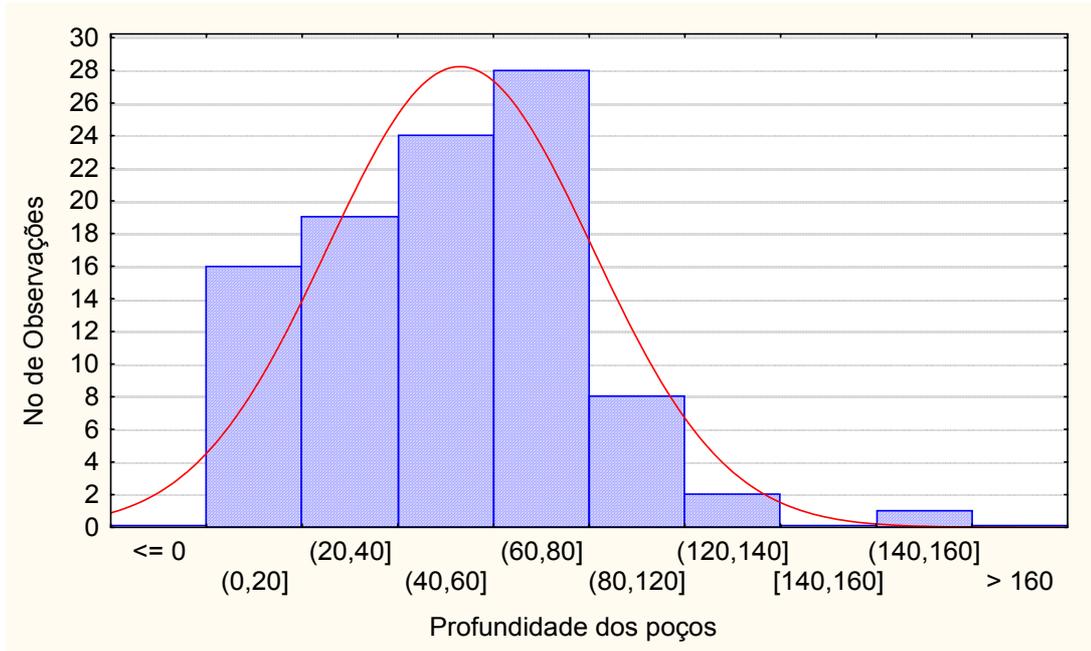


Figura 4.17 Histograma de frequência da profundidade dos poços tubulares no Alto Cristalino de Salvador.

As coberturas do embasamento cristalino apresentam uma espessura média de $19,5 \pm 2,5$ metros, com um valor mediano de 17,0 metros. O valor da mediana é muito importante e será referenciada várias vezes neste item, porque os dados numéricos das variáveis hidrogeológicas utilizadas evidenciam quase sempre uma distribuição estatística assimétrica, com valores extremos espúrios (*outliers*), o que contribuiu muitas vezes para distorcer a média aritmética.

As coberturas e a rocha cristalina quando está fraturada formam de um modo geral um sistema aquífero livre e, em alguns locais confinados, com o nível estático situando-se sempre ao nível das coberturas. Esse nível estático (NE) é pouco profundo na região, apresentando um valor médio de 5,4 metros, podendo variar estatisticamente de 4,0 a 7,0 metros, considerando um intervalo de confiança probabilístico de 95 % e $n = 98$ observações (**Tabela 4.5**). Dados de correlação linear (K. Pearson, 1901) mostraram que o nível estático apresenta uma associação relativamente alta com a espessura das coberturas ($r = 0,63$), indicando que a variação do NE pode estar condicionada à variação da espessura das coberturas. Este fato pode ser constatado quando se compara o modelamento cartográfico feito com os valores do nível estático (**Figura 4.18**) com o modelamento cartográfico utilizando-se os valores das espessuras das coberturas na região (**Figura 4.1**).

Tabela 4.5 Sumário estatístico – parâmetros hidrogeológicos básicos.

Parâmetros	P (m)	NE (m)	ND (m)	Q (m ³ /h)	ND-NE (m)	Q esp. (m ³ /h/m)
Média	53,00	5,40	29,70	4,00	24,30	1,41
Mediana	60,00	4,00	28,00	2,51	21,08	0,11
Média geométrica	44,20	3,88	23,00	2,54	15,17	0,17
Valor mínimo	6,50	0,30	3,40	0,20	0,03	0,01
Valor máximo	150,00	41,57	80,00	22,00	77,00	80,00
Amplitude	143,50	41,27	76,60	21,80	76,97	79,99
Primeiro quartil (25%)	30,00	2,54	12,00	1,50	7,50	0,05
Terceiro quartil (75%)	70,00	6,12	42,57	5,06	35,15	0,41
Desvio padrão	27,70	5,54	19,21	3,98	18,34	8,11
Variância	767,19	30,66	368,99	15,87	336,49	65,80
Assimetria	0,38	3,59	0,65	2,05	0,77	9,57
Curtose	0,40	18,64	-0,18	4,92	0,19	93,55
Intervalo de confiança (95%).	47,0-59,0	4,0-7,0	26,0-34,0	3,2-4,8	20,6-28,0	0,1-3,0

P = profundidade Q = vazão NE = nível estático Q esp. =vazão específica
 ND = nível dinâmico N = **número de poços tubulares = 98**

Além da espessura das coberturas e da magnitude da recarga, a oscilação do NE depende também, não somente da natureza textural e mineralógica das coberturas mas, da mesma forma, do tempo de permanência do excedente hídrico. Esse tempo, por sua vez, depende da declividade da encosta, da cobertura vegetal e, também, no caso de Salvador, da taxa de pavimentação urbana.

A vazão média dos poços tubulares é da ordem de 4,0 m³/h, podendo a média populacional (μ) oscilar estatisticamente entre 3,2 e 4,8 m³/h, considerando o intervalo de confiança de 95 % e n = 98, com um valor da mediana de 2,51 m³/h. A vazão mínima encontrada foi de 0,2 m³/h no poço PT -9 (Edifício Casa Verde e Casa Bonita) e a máxima de 22,0 m³/h no poço PT-27 (Vale de Nazaré), predominando, entretanto poços com vazões situadas entre 1,5 e 4,0 m³/h (**Figura 4.19**). Tanto no primeiro quanto no segundo local, os perfis dos poços assinalam entradas de água localizada no contato entre a rocha alterada com a rocha sã. Uma síntese estatística com dados oriundos de 79 poços tubulares catalogados pela CERB (CERB, 1980; in Lima, 1999) e perfurados no sistema cobertura/cristalino na Região Metropolitana de Salvador, mostra uma maior frequência de poços com vazões situadas entre 3,0 e 7,0 m³/h.

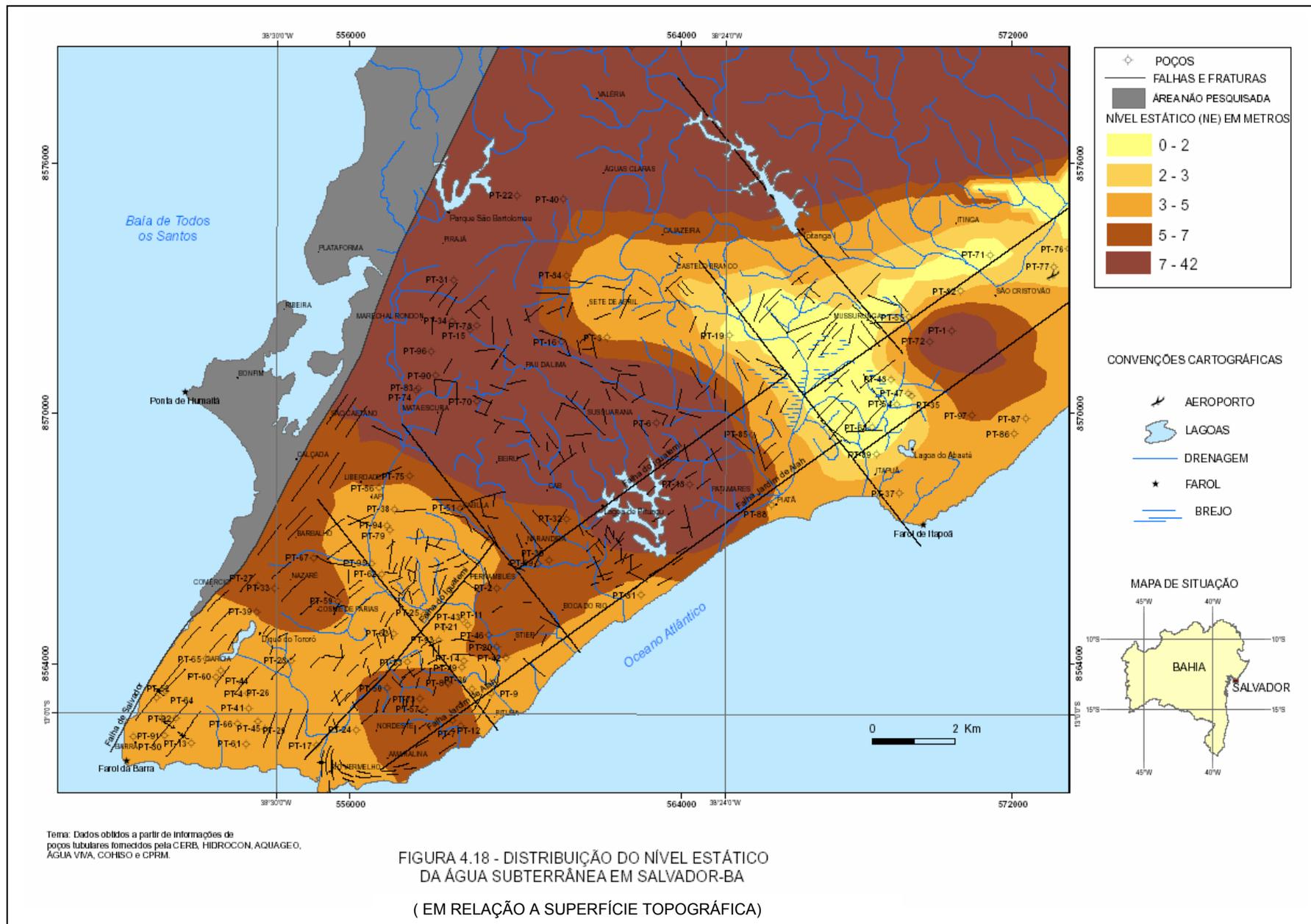


FIGURA 4.18 - DISTRIBUIÇÃO DO NÍVEL ESTÁTICO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA EM SALVADOR-BA (EM RELAÇÃO A SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA)

Algumas características hidrogeológicas adversas do Alto Cristalino de Salvador, tais como, a pequena espessura das coberturas e a baixa densidade de fraturamento do cristalino, em alguns locais, mostraram que apenas 10,3% dos poços tubulares pesquisados apresentam vazões consideradas altas ($> 8,0 \text{ m}^3/\text{h}$) e, 6,2% muito altas ($>12,0 \text{ m}^3/\text{h}$) (**Figura 4.19**). Esses poços com maiores vazões produzem água do contato entre a rocha alterada e o cristalino principalmente se esse nível alterado contiver material granulometricamente arenoso com pouca matriz argilosa, remanescente da erosão laminar subterrânea. Cerca de 63% dos poços que apresentam as maiores vazões têm a rocha alterada com ou sem material arenoso como um dos níveis produtores de água. Cerca da metade dos poços com boas vazões, têm influência das areias de dunas, da planície arenosa litorânea e da Formação Barreiras que são excelentes produtores de água subterrânea. Quando o cristalino encontra-se densamente fraturado, com essas coberturas produtoras de água sobrepostas e o poço situado dentro de vales, estabelece-se um cenário ideal para a produção de boas vazões.

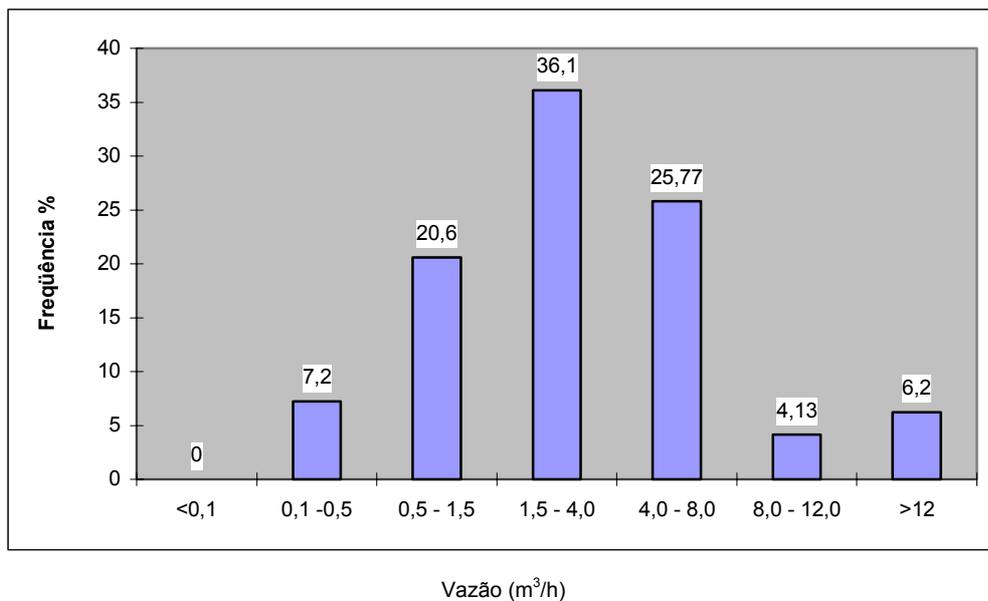


Figura 4.19 Vazão dos poços tubulares no Alto Cristalino de Salvador.

Feitosa e Manoel Filho (1997) mostraram que a vazão média dos poços tubulares perfurados em terrenos cristalinos situados no semi-árido nordestino é de $3,0 \text{ m}^3/\text{h}$, com um valor mediano de $2,0 \text{ m}^3/\text{h}$. O mesmo valor de $3,0 \text{ m}^3/\text{h}$ foi encontrado por Guerra & Negrão (1996) para a região semi-árida do Estado da Bahia. Entretanto, para o domínio do cristalino em áreas com pluviosidade acima de 800 mm/ano , como é o caso de Salvador, Guerra & Negrão encontraram vazões médias de $4,5 \text{ m}^3/\text{h}$ para todo o Estado da Bahia. Porém, a frequência de poços com vazões situadas entre $0,5$ e $4,0 \text{ m}^3/\text{h}$ foi maior. Guerra & Negrão consideraram nos seus estudos estatísticos uma amostra estatística de 272 poços tubulares.

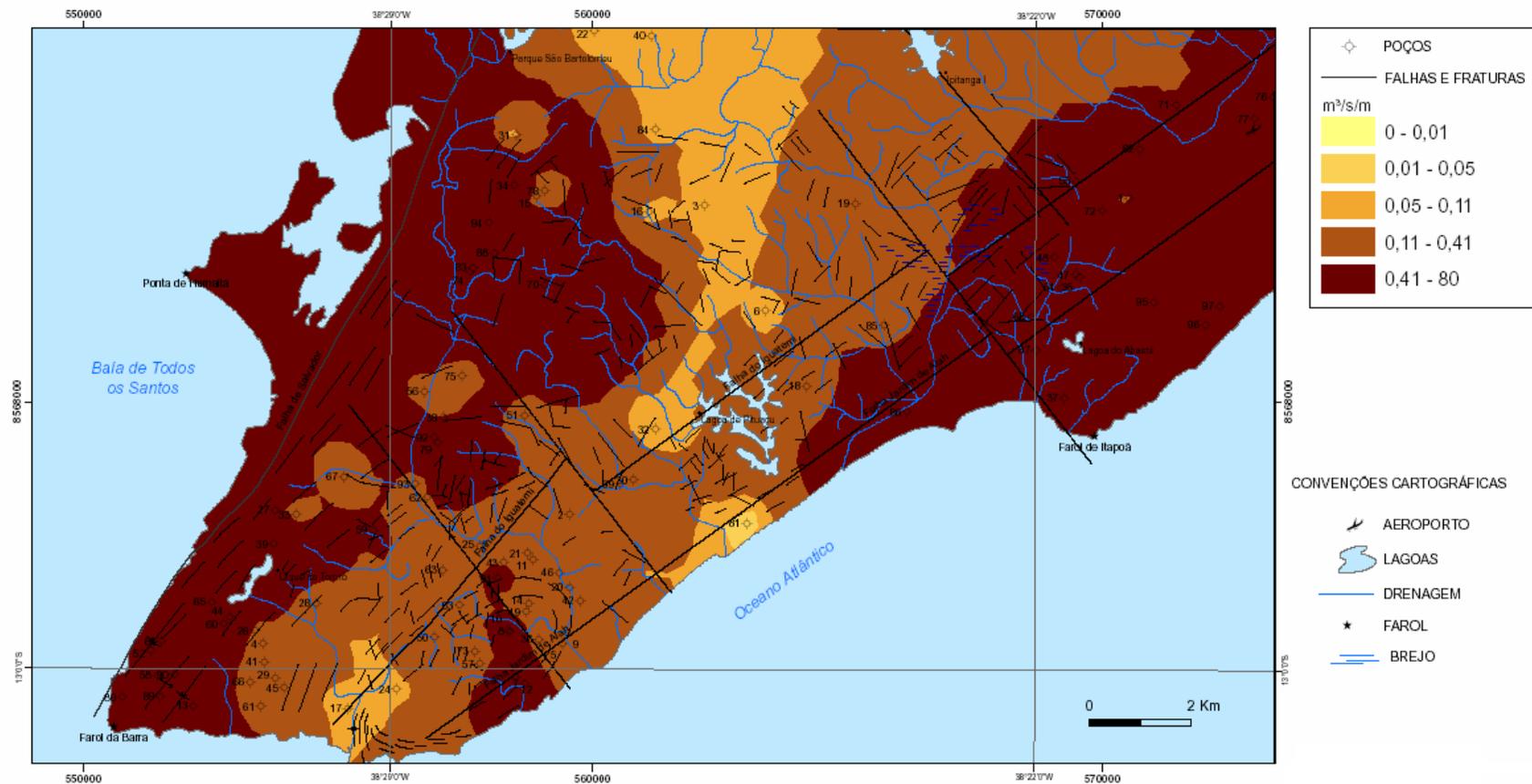
O modelamento matemático efetuado com os valores das vazões dos poços tubulares mostra na região do Alto Cristalino de Salvador, duas faixas com melhores condições de vazões. A primeira situa-se no lado oeste da cidade, se estendendo do bairro da Graça até o Centro, Nazaré, parte de Brotas, Cosme de Farias, São Caetano e Mata Escura (**Figura 4.20 e Tabela 2.1**). São poços tubulares que apresentam vazões oriundas de entradas d'água situadas no contato da rocha alterada com o embasamento cristalino, com alguma contribuição das areias situadas no fundo dos vales.

Uma segunda faixa foi observada a leste da cidade, mais precisamente na Empresa Baiana de Pesquisa Agropecuária – EBDA (PT-35), Parque de Exposição Agropecuária (PT-47, PT-48 e PT-54), rótula do Aeroporto (PT-82), e Condomínio Angra dos Reis (PT-97) (**Tabela 2.1**). Nesta segunda faixa, o acoplamento hidráulico mais comum é entre as areias de dunas, rocha alterada e o embasamento cristalino.

O nível dinâmico (ND) médio foi de 29,7 metros, podendo variar de 26,0 a 34,0 metros, considerando o Intervalo de Confiança de 95% e $n = 98$. O nível dinâmico mínimo encontrado na região foi de 3,4 no Edifício Cristiana (PT-92) e o máximo de 80,0 metros na fábrica de refrigerante Frevo (PT-38). A profundidade do poço no Edifício Cristiana é de 8,3 metros, enquanto o segundo tem 120,0 metros. Os valores de NE e ND foram medidos em épocas diferentes durante os testes de bombeamento executados pelas empresas de perfuração quando da conclusão desses poços. A matriz de correlação linear (Pearson, 1901) obtida com dados de 90 poços tubulares mostrou que o nível dinâmico e o próprio rebaixamento do lençol freático estão muito associados à profundidade do poço. Apresentaram coeficientes de correlação linear de $r = 0,73$ e $r = 0,69$ respectivamente, sendo que o coeficiente de correlação populacional (ρ) situa-se entre 0,61 e 0,79 no primeiro caso e, 0,58 a 0,78 no segundo, levando-se em conta um NC de 95% e $n = 90$.

A vazão específica média do aquífero é da ordem de $1,41 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, podendo variar de 0,01 a $8,4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, sendo este último valor obtido no Clube Baiano de Tênis (PT-58), (**Tabela 2.1 e Figura 4.21**) com o valor da mediana de $0,110 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. No referido Clube o horizonte produtor de água localiza-se numa seqüência arenosa situado entre 6 e 9 metros de profundidade intercalado entre uma camada de solo argiloso e a rocha alterada o que lhe confere um caráter semi-confinado.

Com relação a Salvador, a localização dos poços tubulares com melhores desempenhos em termos de vazão específica, começa em Patamares, passando por Itapoã e Avenida Dorival Caymmi se estendendo em direção às dunas do Parque do Abaeté, Stella Mares e Praias do Flamengo, em uma faixa situada na convergência entre as Falhas do Iguatemi, Jardim de Allah e Itapoã (**Figura 4.21**).



Tema: Dados obtidos a partir de informações de poços tubulares fornecidos pela CERB, HIDROCON, AQUAGED, ÁGUA VIVA, COHISO e CPRM.

FIGURA 4.21 - DISTRIBUIÇÃO DA VAZÃO ESPECÍFICA DOS POÇOS TUBULARES NO ALTO CRISTALINO DE SALVADOR-BA



Uma segunda faixa pode ser identificada no lado oeste da cidade se estendendo do bairro da Graça onde se localiza o clube Baiano de Tênis até Pirajá atingindo também os bairros de Mata Escura, Tancredo Neves e Cabula, em áreas de influência da Formação Barreiras e do sistema de fraturamento associado à falha de Salvador (**Figura 4.21**).

A matriz de correlação linear (Pearson, 1901) mostra uma boa associação entre os valores da profundidade dos poços tubulares com os valores do ND ($r = 0,78$) e, conseqüentemente, o rebaixamento do aquífero ($r = 0,75$). Já o NE apresenta uma boa correlação com a espessura das coberturas ($r = 0,61$), como já foi mencionado anteriormente (**Tabela 4.6**).

Tabela 4.6 Matriz de correlação linear (Pearson) entre as variáveis hidrogeológicas.

	Prof.	NE	ND	Q	ND - NE	Q esp.	Cobertura
Profundidade	1,00						
Nível Estático	0,23	1,00					
Nível Dinâm.	0,78	0,29	1,00				
Q (Vazão)	0,00	-0,16	-0,27	1,00			
Rebaixamento	0,75	0,00	0,96	-0,24	1,00		
Q especifica	-0,19	0,01	-0,19	0,04	-0,21	1,00	
Cobertura	0,16	0,61	0,19	-0,07	0,02	0,08	1,00

NE = Nível estático ND = Nível dinâmico Q = Vazão ND - NE = Rebaixamento

Q esp. = Vazão específica **O nível de significância para $\alpha = 0,05$ e $n = 98$ é 0,205.**

4.5.1 As Litologias Armazenadoras

As informações hidrogeológicas obtidas de uma base de dados com 98 poços tubulares, revelam que os poços com profundidades maiores (valor da mediana) situam-se nos sistemas regolito/cristalino (**Figura 3.6A**) e em áreas de cobertura onde as areias de dunas estão sobrepostas ao regolito (**Figura 3.6B**), enquanto os mais rasos estão localizados nas areias litorâneas (**Tabela 4.7**).

A profundidade do nível estático (NE) pode variar de 2,5 metros no sistema areia/cristalino a 4,50 metros no sistema areia/regolito (**Figura 3.6B**), enquanto o nível dinâmico (ND) nesses dois sistemas apresenta uma profundidade mediana de 32,0 metros. Estes dados devem ser admitidos com cautela tendo em vista o pequeno número de observações envolvido nas comparações.

As melhores vazões medianas estão também nesses dois sistemas areia/regolito (**Figura 3.6B**) e areia-cristalino com 4,00 e 5,20 m³/h respectivamente, enquanto as menores vazões foram encontradas em poços tubulares perfurados na cobertura de regolito (**Figura 3.6A**), com 1,60 m³/h (valor da mediana). Assim, no sistema areia-cristalino, os poços produzem vazões medianas duas vezes maiores do que no sistema solo/cristalino, comprovando que “poços locados criteriosamente nas areias do domínio litorâneo de Salvador apresentam um acoplamento hidráulico maior com o embasamento cristalino do que os poços localizados no interior do município no sistema aquífero regolito/cristalino” (Lima, 1999). O mesmo acontece quando se comparam as vazões do sistema areia sobreposta ao embasamento cristalino com a do sistema constituído pelos sedimentos da Formação Barreiras. O primeiro apresenta vazão média 1,6 vezes maior do que o segundo.

Os poços tubulares que apresentam as melhores vazões específicas estão situados nas areias de dunas e litorâneas que se distribuem de Itapoã até Stella Mares com 2,00 m³/h/m (valor da mediana) enquanto nos outros sistemas representados pelos sedimentos da Formação Barreiras/regolito (**Figura 3.6D e E**), regolito sobreposto ao cristalino, regolito (**Figura 3.6A**), areias de dunas ou litorâneas sobreposta ao regolito (**Figuras 3.6B e C**) e areias de dunas ou litorâneas sobrepostas ao cristalino, os valores são inexpressivos, variando de 0,08 a 0,20 m³/h/m (valores medianos), conforme pode ser visto na **Tabela 4.7**.

Tabela 4.7 Valores hidrogeológicos médios por sistema aquífero (valor da mediana).

Parâmetros	Unidade	Areia	Formação Barreiras	Regolito / Cristalino	Regolito	Areia / Regolito	Areia / Cristalino
Profundidade	metro	17,3	55,0	68,6	29,0	61,0	50,0
Nível Estático	metro	3,7	3,8	4,4	4,3	4,5	2,5
Nível Dinâmico	metro	7,0	29,8	29,6	15,7	31,7	31,8
Vazão	m ³ /h	3,5	3,2	2,5	1,6	4,0	5,2
ND-NE	metro	3,3	21,3	26,3	12,8	26,7	30,4
Vazão Específica	m ³ /h/m	2,0	0,1	0,1	0,1	0,15	0,2

ND = nível dinâmico

NE = nível estático. N=98

No sistema areia de dunas ou litorâneas sobrepostas ao cristalino, os dados apresentados pela matriz de correlação linear (Pearson) revelam que a vazão específica diminui com o aumento da profundidade dos poços tubulares, do nível dinâmico e do rebaixamento, o mesmo acontecendo nos poços existentes no sistema aquífero constituído pelos sedimentos da Formação Barreiras/regolito.

No sistema regolito/cristalino, a vazão específica diminui quando aumenta o nível dinâmico (ND) e o rebaixamento do aquífero, o mesmo acontecendo no sistema areia/regolito. Uma excelente correlação linear foi verificada entre a vazão específica e a vazão dos poços nos sistemas Formação Barreiras/regolito ($r = 0,94$) e areia-regolito ($r = 0,93$). O dendograma da análise de agrupamento (*Cluster Analysis*) calculado pelo método da distancia (1-Pearson r), mostra uma estreita similaridade entre a profundidade do poço, o rebaixamento (ND-NE) e o nível dinâmico (**Figura 4.22**). A Análise de Agrupamento consistiu na formação de grupos de indivíduos tomando como base medidas de similaridade ou distancia entre casos, que, por sua vez, foram calculadas com base em uma lista de variáveis hidrológicas fornecidas.

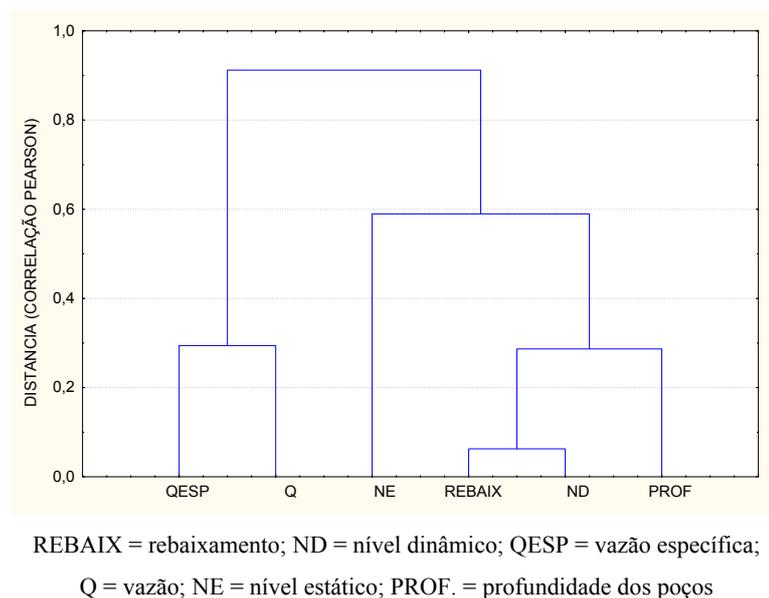


Figura 4.22 Análise de agrupamento através da distancia (1 – Pearson r) dos dados hidrológicos.

4.6 RESERVA E POTENCIALIDADE HIDROGEOLÓGICA

Neste trabalho adotou-se para os cálculos de reservas, potencialidade e disponibilidade da água subterrânea a metodologia proposta por Costa (1998), que prevê alternativas de avaliação diferenciadas de acordo com o nível de conhecimento de cada unidade aquífero e da qualidade dos dados disponíveis. Essa metodologia foi desenvolvida pelo referido autor a partir de dados que refletem a situação existente na região semi-árida do nordeste do Brasil. Com isto, houve a necessidade de conciliar este método com algumas características típicas de clima úmido próprias do Alto Cristalino de Salvador, principalmente no que diz respeito à taxa de recarga de 7,2% que diferencia daquela proposta para o nordeste brasileiro que é de 0,15%, referida pelo citado autor e considerada para a efetuação do cálculo da reserva renovável em aquíferos fissurais.

No Alto Cristalino de Salvador, as coberturas de regolito, sedimentos da Formação Barreiras, areias de dunas e litorâneas apresentam características intergranulares e funcionam como componentes intermediários essenciais no aumento da taxa de infiltração do aquífero cristalino fissural subjacente, o que não acontece no nordeste semi-árido onde o regolito é pouco desenvolvido. Apesar da existência dessas coberturas, nos cálculos da reserva e potencialidade considerou-se a metodologia proposta por Costa (1998).

4.6.1. Reserva Permanente (Rp)

Reserva Permanente é o volume hídrico acumulado no sistema aquífero em decorrência da porosidade efetiva e do coeficiente de armazenamento, não variável em função da variação sazonal da superfície potenciométrica. Para o seu cálculo utiliza-se a equação:

$$R_p = 10 \times \text{Reserva reguladora (Rr)} \text{ ou } R_p = 10 \times A \times P \times I \text{ (Eq. 4.4)}$$

$$A = \text{área} = 244 \text{ km}^2$$

$$P = \text{precipitação pluviométrica} = 2,089 \text{ metros}$$

$$I = \text{taxa de infiltração} = 0,1218$$

Assim, $R_p = 10 \times 244.000.000 \times 2,089 \times 0,1218$ metros cúbicos

$R_p = 620.000.000$ metros cúbicos
--

4.6.2 - Reserva Reguladora ou Renovável (Rr)

Reserva reguladora ou renovável é o volume hídrico acumulado no aquífero em decorrência da porosidade efetiva e do coeficiente de armazenamento, que varia anualmente em decorrência de aportes sazonais de chuvas. Trata-se na realidade do volume de água subterrânea existente na faixa de flutuação sazonal do nível hidrostático do aquífero, e que corresponde ao volume das recargas anuais. Em aquíferos livres e pouco profundos, o conhecimento das reservas reguladoras é de extrema importância, pois dela vai depender o rendimento do mesmo, sendo tão mais significativa quanto mais segura for a recarga (Guerra, 1986).

Para o seu cálculo, utiliza-se a equação:

$$Rr = A \times P \times I \text{ (Eq. 4.5)}$$

onde:

A = área = 244 km²

P = precipitação média anual (período 1961 -1990) = 2089,9 mm ou 2,089 metros

I = taxa de infiltração média medida na área -piloto do Campus Universitário de Ondina = 12,18% ou 0,1218

Assim: $Rr = 244.000.000 \text{ m}^2 \times 2,089 \text{ m} \times 0,1218$

Rr = 62.083.000 metros cúbicos

Deve-se salientar que a taxa de infiltração de 12,18% foi obtida com os dados de variação do nível estático (NE) nos poços do CPD (270 mm), Escola de Medicina Veterinária (280 mm) e Instituto de Biologia (60 mm) na área -piloto do Campus Universitário de Ondina, apresentado na **Tabela 4.1**. Com isto, adotou-se uma média de 203,33 mm para a taxa de infiltração (recarga) no período de 54 semanas ou 12 meses. Esse valor de 203,33 mm foi dividido pela precipitação média total do período de monitoramento (1669,9 mm), obtendo-se então o percentual de 12,18%.

4.6.3 Potencialidade (Po)

Representa a reserva reguladora (Rr), multiplicada por um fator de 1,15

$$Po = Rr \times 1,15 \text{ (Eq. 4.6)}$$

onde:

Po = potencialidade

Rr = reserva reguladora ou renovável

1,15 = fator de multiplicação proposto por Costa (1998)

Assim, $Po = 36.700.000 \times 1,15 = 42.205.000 \text{ m}^3/\text{ano}$

$$Po = 71.396.000 \text{ de metros cúbicos/ano ou } 292.600,00 \text{ m}^3/\text{ano/km}^2$$

4.6.4 Disponibilidade Efetiva Instalada (DEI)

Corresponde ao volume máximo anual passível de exploração a partir das obras de captação já existentes com base na vazão máxima de exploração de 4 / 24 horas, recomendado por Costa (1998) para aquífero fissural, em todos os dias do ano, desde que não venham a comprometer as reservas permanentes. Considerando os 1.220 poços tubulares inventariados (valor aproximado) no município de Salvador pela Embasa com uma vazão média de 4,00 m³/h e admitindo um regime de bombeamento de 4 horas por dia tem-se uma vazão de exploração anual de $71,25 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{ano}$.

Para o seu cálculo, utilizou-se a equação:

$$DEI = N \times Q \times 4 / 24 \text{ horas} \times 365 \text{ dias. (Eq. 4.6)}$$

N = 1220 poços (dado aproximado da Embasa)

Q = 4,00 m³/h

DEI = 1.220 poços x 4,00 m³/h x 1.460 horas = $75,25 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{ano}$

$$DEI = 7.125.000 \text{ metros cúbicos/ano}$$

Esse valor é muito pequeno quando comparado com a reserva reguladora (11,5%) e com a potencialidade do aquífero (10,0%). Considerando que o consumo per capita recomendado pela Organização Mundial da Saúde é de 54.750 litros/habitante/ano, a disponibilidade efetivamente instalada no município de Salvador estaria suprindo cerca de 130.137 habitantes/ano, ou seja, aproximadamente 5,0% da população.

4.7 RESUMO DO CAPÍTULO

A importância do sistema aquífero cristalino de Salvador está diretamente associada a densidade e às diversas direções de fraturamento, além da espessura e da natureza das coberturas sobre o embasamento que irão condicionar a recarga, o armazenamento e a circulação da água subterrânea.

As águas subterrâneas são armazenadas em dois domínios hidrogeológicos distintos, intercomunicáveis entre si, de natureza livre e, em alguns casos, confinados, formando um sistema aquífero heterogêneo e anisotrópico.

O primeiro é representado pelas coberturas do regolito, sedimentos arenosos litorâneos e areno-argilosos da Formação Barreiras. Nas coberturas, em decorrência do seu caráter textural ser predominantemente areno-argiloso e, sobretudo, devido a sua pouca espessura, formam aquíferos limitados do ponto de vista do armazenamento e da capacidade de produção de seus poços. Entretanto, por se tratar de uma região de elevada pluviosidade e contribuição dos despejos domésticos nas áreas com deficiência de redes de esgoto, vazamentos eventuais na rede de distribuição de água da cidade, o aquífero de Salvador recebe uma taxa de recarga contínua o ano todo, possibilitando seu uso constante sem grandes rebaixamentos.

O segundo domínio é representado pelo embasamento cristalino que por sua vez forma um aquífero com capacidade de armazenamento ainda mais limitado e restrito às zonas mais fraturadas do corpo rochoso nas suas diversas direções preferenciais.

Verifica-se na região um alto potenciométrico situado à oeste da Falha do Iguatemi, onde se localizam os bairros do Pau da Lima, Mata Escura e Marechal Rondon, associado a uma elevação do embasamento cristalino que funciona com o um grande divisor de águas superficiais e subterrâneas. A partir desse alto, a drenagem superficial e subterrânea regional flui no sentido semi-radial, em direção ao Oceano Atlântico para sul e leste, e para norte e nordeste em direção ao vale do rio Ipitanga. Para oeste não se verificam grandes fluxos subterrâneos em direção à Baía de Todos os Santos, a não ser o rio do Cobre e pequenas fontes ou minadouros naturais existentes ao longo da escarpa da Falha de Salvador como resultado da interseção do nível hidrostático com a referida escarpa.

O gradiente hidráulico ($\Delta h/\Delta L$) da área oscila entre 0,0056 e 0,040 com valor médio de 0,018. Considerando-se o coeficiente de permeabilidade médio do sistema misto cobertura/embasamento igual a $3,82 \times 10^{-5}$ metros/min, o fluxo subterrâneo teria então uma velocidade de escoamento médio da ordem de $0,060 \times 10^{-5}$ metros/dia ou 31 metros/ano.

O balanço hídrico atmosférico da região aponta para uma evapotranspiração real (ER) da ordem de 982 mm e um excedente hídrico (EXC) de 688 mm. A evapotranspiração real representou cerca de 58,8% do total precipitado, enquanto o excedente hídrico estimado foi de 41,2%. Desse excedente hídrico de 688 mm, cerca de 119,4 mm correspondeu a parcela infiltrada (7,2% da precipitação), enquanto 568,6 mm (34,0% da precipitação) representou a parcela correspondente ao escoamento superficial ou descarga da microbacia hidrográfica existente no Campus Universitário de Ondina.

Os valores isotópicos de δ deutério e oxigênio 18 encontrado nas águas subterrâneas no período chuvoso e na estação seca são muito próximos dos valores de referência VSMOW e situam-se dentro da faixa das águas meteóricas. A presença de águas subterrâneas isotopicamente semelhantes em todos os pontos amostrados evidencia uma interconexão entre as coberturas e o embasamento cristalino, com recarga efetuada através das águas meteóricas.

Os ensaios de bombeamento e recuperação indicaram que a permeabilidade macroscópica (K) do sistema cobertura/cristalino cobre um intervalo que vai de $0,82 \times 10^{-5}$ (14,2 milidarcy) a $31,60 \times 10^{-5}$ m/min (548 milidarcy), com um valor médio de $6,36 \times 10^{-5}$ m/min (110 milidarcy). Os raios do cone de depressão variam de 64 a 508 metros, apresentam na região uma média de 192 metros, podendo a média populacional (μ) situar-se probabilisticamente entre 134 a 249 metros, considerando para o teste um intervalo de confiança de 95% e $n = 19$ observações. A relação direta com a alta transmissividade e condutividade hidráulica fazem com que os maiores raios do cone de depressão calculados ocorram nos poços (PT-35) da EBDA (444 metros) e (PT-48) do Parque de Exposição Agropecuária (509 metros) respectivamente. As melhores vazões estão situadas nos sistemas areia/regolito e areia-cristalino com 4,00 e 5,20 m³/h respectivamente (valor da mediana), enquanto as menores vazões foram encontradas em poços tubulares perfurados na cobertura de regolito, com 1,60 m³/h (valor da mediana). Assim, no sistema areia -cristalino, os poços produzem vazões médias duas vezes maiores do que no sistema solo/cristalino.

A reserva permanente (Rp) foi estimada em 620.000.000 metros cúbicos, enquanto a reserva reguladora (Rr) é da ordem de 62.083.000 metros cúbicos. A potencialidade das reserva hídricas subterrâneas para o Alto Cristalino de Salvador foram estimadas em 71.396.000 de metros cúbicos/ano, enquanto que a disponibilidade efetivamente instalada é de 7.125.000 metros cúbicos. Considerando que a Organização Mundial de Saúde (OMS) recomenda um consumo médio diário para cada habitante de 150 litros de água (44,75 m³/ano/percapita) a Disponibilidade Efetiva Instalada calculada para o sistema aquífero do Alto Cristalino de Salvador é de 7.125.000 m³/ano. Este volume possibilita o fornecimento de água subterrânea para cerca de 130.137 habitantes/ano, o que representaria apenas 5% da população

CAPÍTULO 5

CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO HIDROQUÍMICA

5 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO HIDROQUÍMICA

A caracterização hidroquímica das águas subterrâneas no seu estado natural, sem a interferência de fatores antrópicos, está diretamente subordinada às condições geológicas, principalmente à litologia do aquífero, do fluxo subterrâneo, da recarga, da profundidade e do tempo de permanência da água no sistema aquífero, além evidentemente do clima da região.

Para a avaliação hidroquímica foram utilizados os valores dos componentes maiores, tais como, Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^{-2} , SO_4^{-2} , e NO_3^{-2} os quais foram processados eletronicamente através dos programas Aquachem versão 3.7 (1997) da Waterloo Hydrogeologic Inc. e o Qualigraf (1999).

5.1 BALANÇO IÔNICO E CÁLCULO DO ERRO ANALÍTICO

Em trabalhos de hidroquímica, os resultados das análises químicas são os únicos meios para caracterizar a água subterrânea, sendo de vital importância para avaliar a qualidade dos resultados fornecidos pelos laboratórios especializados. Existem diversos métodos para a avaliação dos resultados químicos sendo que os mais utilizados são os de Schoeller (1962), Logan (1965) e Custódio & Llamas (1983).

Nesse estudo, o critério de avaliação da qualidade das análises obtidas nas amostras de água subterrânea no Alto Cristalino de Salvador foi baseado na percentagem do erro analítico segundo o método de Schoeller (1962). Este, como qualquer um dos métodos que visa o cálculo do erro numa análise química de água é usado a seguinte regra: “a soma dos anions e dos cátions, expressos em miliequivalentes por litro, deve ser mais ou menos igual”. Assim, para que a análise seja aceita como correta, o erro relativo admitido deve ser no máximo de 5%, como é o caso de Schoeller, embora outros autores admitam um erro de 10 e até 20%, sendo esse último adotado nesse trabalho.

Para a efetivação do balanço iônico, os valores expressos em miligrama/litro (mg/L) foram transformados para unidade miliequivalente por litro (meq/L), que expressa a equivalência química relacionada ao peso atômico do elemento. O erro analítico foi calculado através da fórmula de Schoeller (1962):

$$e (\%) = [r \sum p - r \sum n / r \sum p + r \sum n] \times 100 \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Onde: $r \sum p$ = concentração total de cátions em meq/L

$r \sum n$ = concentração total de anions em meq/L

Os cálculos efetuados pelo programa Aquachem 3.7 mostraram que das análises executadas em 32 amostras, cerca de 31 (97%) podem ser consideradas de boa qualidade, utilizando-se como critério um coeficiente do erro (ϵ) inferior a 20% para mais ou para menos (**Tabela 5.1**). Em uma amostra ocorreu um erro acima do recomendado, o que pode estar relacionado, ou à amostragem, ou a análise de laboratório, ou aos cálculos efetuados, ou ao acondicionamento das amostras após a coleta no campo, ou ao fato de algum íon com concentração apreciável na água não ter sido analisado, o que poderia ter desequilibrado o balanço iônico para o lado dos cátions nessas dez amostras.

Não se acredita que tenha havido erro de amostragem porque os critérios e procedimentos adotados foram os mesmos para todos os pontos de coleta, sendo difícil haver qualquer divergência de um ponto para o outro. Além do mais, todas as amostras foram filtradas e bem acondicionadas antes das análises físico-químicas. Erro de cálculo poderia ser uma possibilidade, entretanto, é remota a possibilidade dele ter ocorrido, visto que foram realizados através do programa Aquachem 3.7.e recalculados no programa Qualigraf. Ao nosso ver o mais provável é que tenha acontecido algum problema nos procedimentos de laboratório.

Tabela 5.1 Resultados do balanço iônico.

Pontos	Σ Anions	Σ Cátions	Balanço Iônico (%)	Pontos	Σ Anions	Σ Cátions	Balanço Iônico (%)
PT-26	3,7430	6,2752	25,28	AM-17	3,7326	4,6804	11,27
PT-29	5,3741	4,8898	-4,72	AM-18	3,3107	4,1566	11,33
PT-50	4,8013	5,6691	8,29	PT-85	6,4489	7,1126	4,89
PT-53	3,4727	3,9536	6,48	PT-1	2,6257	2,8397	3,92
AM-5	4,3268	5,1417	8,61	PT-35	1,8047	2,0114	5,42
AM-6	2,6575	3,4313	12,71	PT-79	2,5052	2,4106	-1,93
AM-7	4,5677	6,0659	14,09	PT-90	1,4167	1,1925	-8,59
AM-8	2,9546	3,7749	12,19	PT-3	1,0988	1,0080	-4,31
PT-60	4,2819	5,2495	10,15	PT-19	0,9364	0,9934	2,95
PT-44	2,5619	2,7520	3,58	PT-6	1,8724	1,9858	2,94
PT-91	4,0257	4,9995	10,79	PT-32	1,1683	1,3939	8,81
PT-39	5,0591	6,0032	8,53	PT-97	1,4336	1,5623	4,30
PT-11	2,2896	2,4066	2,49	PT-47	5,5815	5,8530	2,37
AM-14	3,8355	4,8390	11,57	PT-54	4,0275	1,1062	11,81
PT-36	6,0038	7,2601	9,47	PT-86	2,7797	3,2356	7,58
AM-16	2,7204	3,7211	15,54	PT-87	1,7463	2,3647	15,04

5.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.

As águas subterrâneas do Alto Cristalino de Salvador são predominantemente sódicas (65,6%) e mistas (31,2%) e, secundariamente, de natureza cálcicas (3,1%), conforme pode ser observado no diagrama triangular de Piper (1944) (**Figura 5.1**). As águas com predominância relativa de sódio localizam-se principalmente no solo residual por influência direta das chuvas. As águas mistas (Mg-Ca-Na e Ca-Mg-Na) já sofrem influência da rocha alterada e do cristalino fissural devido a decomposição dos anfibólios, clino e ortopiroxênios, biotita e dos plagioclásios cálcicos presentes nos granulitos tonalíticos, charnoenderbitos e nos corpos máficos e ultramáficos associados. As águas de natureza cálcica foram encontradas nas dunas do Parque do Abaeté e Stella Mares como foi observado no poço PT-97.

Quanto aos ânions presentes, as águas podem ser consideradas predominantemente cloretadas (65,6%) e, secundariamente, bicarbonatadas (18,8%) e mistas (15,6%). As águas cloretadas estão diretamente associadas às zonas de recarga imediata por influência direta das chuvas, enquanto as mistas localizam-se nas rochas alteradas e no cristalino fissural devido a alteração dos silicatos presentes em alguns fácies do cristalino. As águas predominantemente bicarbonatadas sofrem a influência da alteração dos silicatos ao fluir pela rocha alterada.

Levando-se em conta a composição dos percentuais acima, as águas subterrâneas do Alto Cristalino de Salvador podem ser classificadas como cloretadas sódicas (53,1%), cloretadas cálcicas ou magnésiana (28,1%), bicarbonatadas sódicas (12,5%) e bicarbonatadas cálcicas ou magnésiana (6,2%). As águas cloretadas sódicas e cloretadas cálcica-magnésianas foram encontrados em 81,3% dos pontos estudados, enquanto águas bicarbonatadas sódica e bicarbonatada cálcica-magnésianas foram observados em 18,7% dos locais de coleta de água subterrânea (**Tabela 5.2**).

As águas cloretadas sódicas são dominantes no Alto Cristalino de Salvador, sendo frequentemente encontradas nas zonas de recarga do planalto costeiro dissecado, nos aquíferos formados pelas coberturas de regolito e em alguns locais que apresentam coberturas de sedimentos da Formação Barreiras. A **figura 5.2** mostra essa distribuição através dos Diagramas de Stiff (1951), elaborado em cada ponto de amostragem de água subterrânea. Em alguns locais foram identificadas águas cloretadas-sulfatadas, notadamente em fontes naturais, cacimbas e poços tubulares rasos, todos situados em áreas que apresentam forte influência antrópica e baixas condições higiênico-sanitárias.

As relações iônicas observadas entre os cátions nas águas cloretadas sódicas são predominantemente $rNa > rMg > rCa$ (50,0%), vindo em seguida $rNa > rCa > rMg$ (12,5%) e $rCa > rNa > rMg$ (3,2%).

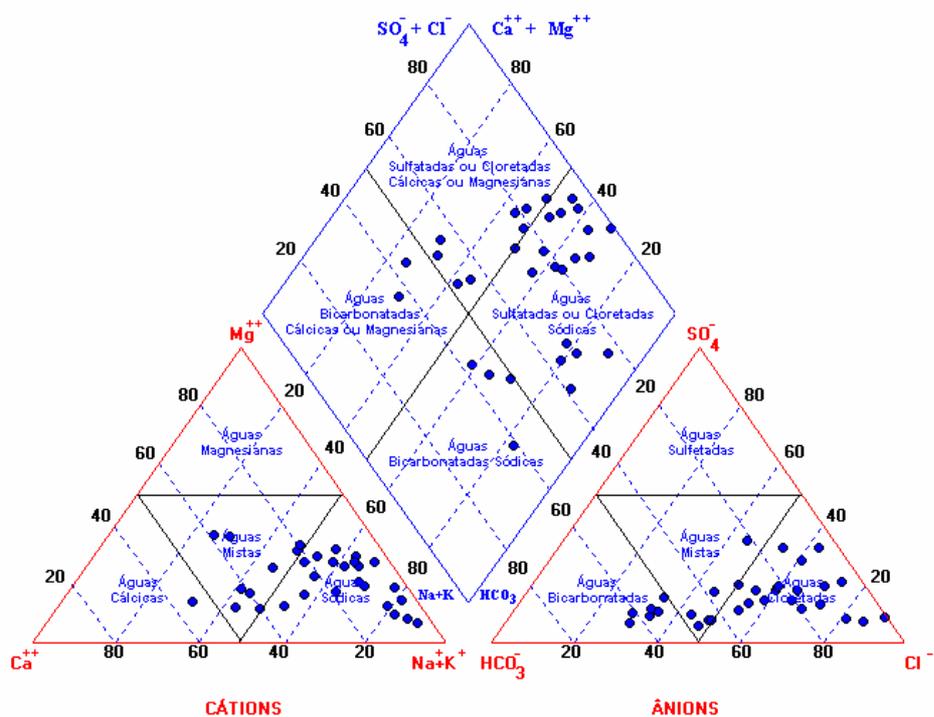


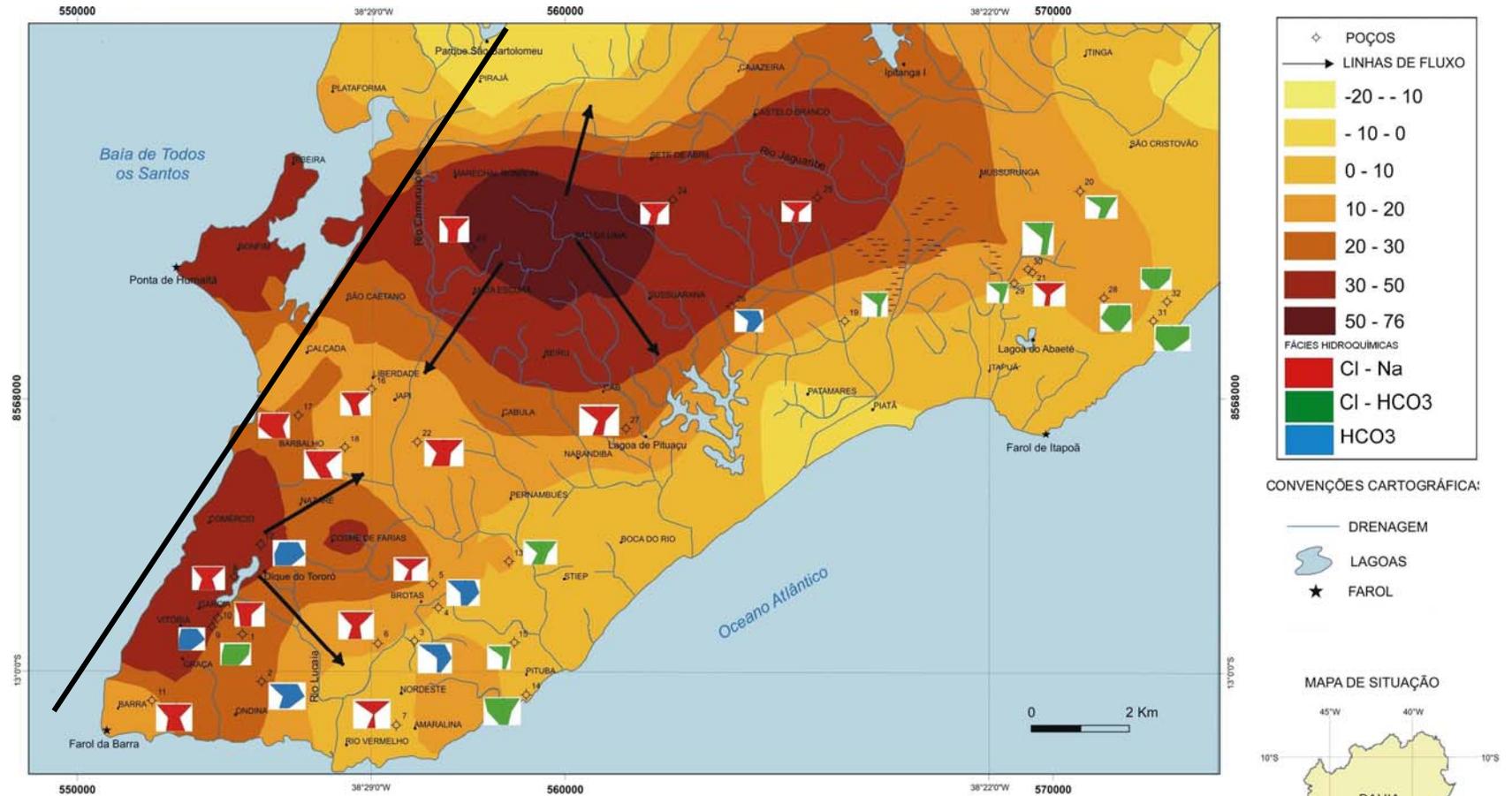
Figura 5.1 – Diagrama Triangular de Piper (1944) para as águas subterrâneas do Alto Cristalino de Salvador.

Enquanto isso, as relações aniônicas principais são: $rCl > rHCO_3 > rSO_4$ (46,9 %); $rCl > rSO_4 > rHCO_3$ (18,8%), (**Tabela 5.2**). Os valores médios (mediana) mais altos encontrados nessas águas subterrâneas foram os de sódio, cloretos, amônia, ferro e manganês (**Tabela 5.3**).

Tabela 5.2 Relações iônicas características.

Fácies Hidroquímica	Cátions	%	Anions	%	
Cloretada Sódica	$rNa > rMg > rCa$	50,0	$rCl > rHCO_3 > rSO_4$	46,9	81,3
	$rCa > rNa > rMg$	3,2	$rCl > rSO_4 > rHCO_3$	18,8	
	$rNa > rCa > rMg$	12,5			
Cloretada Cálcica Magnesiânica	$rCa > rNa > rMg$	9,4	$rCl, rHCO_3 > rSO_4$	12,5	
	$rNa > rMg > rCa$	3,1	$rCl > rSO_4 > rHCO_3$	3,1	
	$rMg > rCa > rNa$	3,1			
Bicarbonatada Sódica	$rNa > rMg > rCa$	9,4	$rHCO_3 > rCl > rSO_4$	9,4	18,7
	$rNa > rCa > rMg$	3,1	$rHCO_3 > rCl > rSO_4$	3,1	
Bicarbonatada Cálcica Magnesiânica	$rCa > rMg > rNa$	3,1	$rHCO_3 > rCl > rSO_4$	6,2	
	$rMg > rCa > rNa$	3,1			
TOTAL		100		100	100

r = valores em miliequivalente por litro (meq/L)



Tema: Dados de vulnerabilidade obtidos a partir de informações de poços tubulares fornecidos pela CERB, HIDROCON, AQUAGEO, ÁGUA VIVA, COHISO e CPRM.

FIGURA 5.2 - TIPOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA BASEADOS NO DIAGRAMA DE STIFF (1951)

Tabela 5.3 Valores médios (mediana) por fácies de água subterrânea.

		Cloretadas – Sódica			Cloretadas Cálcica- Magnesiana			Bicarbonatadas Sódica – Cálcicas- Magnesianas		
Parâmetros	Unid.	Vmin	Vmax	M	Vmin	Vmax	M	Vmin	Vmax	M
pH	--	4,20	6,60	5,40	5,3	7,5	6,10	6,0	7,3	6,75
Eh	mV	-59,0	312,0	210,0	120,0	442,0	236,0	48,0	247,0	177,0
CE	$\mu\text{S/cm}$	120,0	700,0	429,0	192,0	618,0	374,0	209,0	594,0	495,5
S.S	mg/L	0	320,0	0,40	0	5,0	0,80	0	5,6	3,40
Dureza	mg/L	15,8	113,4	39,3	52,1	217,0	88,6	25,5	221,2	80,0
Cálcio	mg/L	1,0	27,0	4,50	8,9	43,0	18,00	3,6	46,0	13,5
Magnésio	mg/L	2,5	18,2	5,48	2,3	26,6	6,30	4,0	25,8	11,3
Sódio	mg/L	12,1	139,0	45,3	9,9	49,5	26,50	26,3	103,0	43,5
Potássio	mg/L	1,0	11,0	3,5	1,4	11,0	5,40	3,4	8,0	5,7
Bicarbonato	mg/L	0	138,0	13,7	16,5	92,3	40,20	58,0	181,0	161,5
Sulfatos	mg/L	5,0	55,1	15,0	5,0	51,4	16,10	9,6	23,3	16,0
Cloretos	mg/L	23,5	137,0	57,8	20,1	67,6	50,90	22,5	60,8	46,3
Amônia	mg/L	0,10	3,5	0,18	0,10	2,5	0,14	0,10	0,34	0,12
Nitratos	mg/L	0,50	33,0	3,30	0,50	18,0	9,70	0,50	11,0	2,70
Alumínio	$\mu\text{g/L}$	7,7	1170,0	25,0	9,4	123,0	32,60	8,6	97,3	20,5
Bário	$\mu\text{g/L}$	38,0	455,0	94,2	38,0	308,0	86,60	38,0	404,0	125,5
Ferro	$\mu\text{g/L}$	22,1	22570,0	70,0	13,8	88,4	56,30	44,7	3280,0	56,10
Manganês	$\mu\text{g/L}$	20,0	1550,0	206,0	20,0	271,0	20,00	20,0	468,0	63,1
Níquel	$\mu\text{g/L}$	20,0	60,0	20,0	20,0	40,0	30,00	20,0	60,0	40,0
SiO ₂	mg/L	1,0	44,0	13,0	3,6	35,0	10,00	20,0	64,0	37,5

C.E. = Condutividade elétrica; S.S. = Sólidos em suspensão; OD = Oxigênio dissolvido;
M = Mediana; Vmax = valor máximo; Vmin = valor mínimo.

As águas do tipo cloretada cálcica-magnesiana representam água subterrânea de transição, encontrado frequentemente em áreas constituídas pelo regolito, cristalino fraturado e áreas de dunas na planície litorânea. As relações iônicas características observadas nesse fácies hidroquímico são: $r\text{Ca} > r\text{Na} > r\text{Mg}$ (9,4 %); $r\text{Na} > r\text{Mg} > r\text{Ca}$ (3,1 %); $r\text{Mg} > r\text{Ca} > r\text{Na}$ (3,1%). Entre os anions as relações iônicas mais características são: $r\text{Cl} > r\text{HCO}_3 > r\text{SO}_4$ (12,5 %); -- $r\text{Cl} > r\text{SO}_4 > r\text{HCO}_3$ (3,1%). Essas águas apresentam os maiores valores médios (mediana) de Eh, dureza, cálcio, sulfatos, nitratos e alumínio quando comparado aos demais tipos de água subterrânea estudada.

As águas bicarbonatadas são freqüentemente encontradas em áreas com cobertura de solos residuais sobrepostos ao embasamento cristalino fraturado. As relações iônicas características observadas nesse fácies são: $rNa > rMg > rCa$ (9,4%); $rNa > rCa > rMg$ (3,1%); $rCa > rMg > rNa$ (3,1%); $rMg > rCa > rNa$ (3,1%), sendo que duas últimas relações são mais encontradas nas águas subterrâneas que circulam no embasamento cristalino fraturado, conforme mostram os diversos perfis de poços tubulares existentes na área. Entre os anions, a única relação aniônica encontrada no fácies bicarbonatado foi $rHCO_3 > rCl > rSO_4$ (18,7 %). De um modo geral essas águas bicarbonatadas apresentam os maiores valores médios (mediana) de pH, condutividade elétrica, magnésio, potássio, bicarbonato, bário, níquel e sílica (**Tabela 5.3**). Essas informações devem ser tomadas com reserva devido ao pequeno número de pontos avaliados ($n = 6$).

5.3 ÍNDICES HIDROGEOQUÍMICOS OU RAZÕES IÔNICAS

Durante o intemperismo químico, a natureza e a quantidade dos elementos que vão sendo adicionados à água dependem da mineralogia da rocha, que em muitos casos, pode ser deduzida através da composição da água (Mestrinho, 2006). Os índices hidrogeoquímicos são obtidos através dos constituintes químicos principais dissolvidos na água subterrânea. Estes podem indicar certo relacionamento com a rocha armazenadora (aquífero), indicar eventuais ações de fenômenos modificadores da sua composição natural ou mesmo indicar uma característica específica da água (Santos, 1997). Foram obtidos nesse trabalho através das seguintes razões iônicas: $rCl/rHCO_3$; $rSO_4/rHCO_3$; rK/rNa ; rMg/rCa ; rNa/rCa ; rMg/rNa .

A razão $rCl/rHCO_3$ é muito utilizada para seguir o processo de concentração de sais no sentido do fluxo subterrâneo e, em muitos casos, funciona muito bem como rastreador e indicador do movimento da água em subsuperfície. Essa razão pode também, em alguns casos, caracterizar intrusão marinha, quando os seus valores atingem 20 a 50 (Santos, 1997). Em alguns locais do Alto Cristalino de Salvador chegaram a atingir valores superiores a 5,0 sem alcançar, entretanto, níveis que possam sugerir influência marinha nos pontos de captação estudados. Na área estudada verifica-se uma diminuição dos valores da razão iônica a partir das águas do fácies cloretada sódica em direção das águas do fácies bicarbonatada cálcica-magnésiana (**Tabela 5.4**). Essa diminuição pode indicar um fluxo ou movimento de água a partir do planalto dissecado em direção a planície litorânea, estando de acordo com o modelamento potenciométrico da região já referido no Capítulo anterior.

A razão $rSO_4/rHCO_3$ mostra uma diminuição dessa razão iônica a partir das águas cloretadas sódicas em direção às bicarbonatadas cálcica-magnésiana que se encontram possivelmente num nível piezométrico inferior dentro do aquífero freático do Alto Cristalino de Salvador (**Tabela 5.4**). Os

valores mais altos dessa razão coincidem com os locais onde a captação de água é feita através de fontes naturais e cacimbas e, a sua diminuição mostra que a contaminação pode arrefecer à jusante. Valores maiores do que 1,0 foram observados nas águas existentes no regolito, captadas nas Fontes do Candéal (AM-6), do Tororó (AM-8), do Conjunto Bahia (AM-16), do Queimado (AM-17), na cisterna da Chácara Celeste (AM-7), além do poço tubular localizado no edifício Casa Grande (PT-91), locais onde existem fortes indícios de contaminação antrópica (**Figura 2.2**).

Tabela 5.4 Razões iônicas e os facies hidroquímicos (valor da mediana).

	rCl/rHCO ₃	rSO ₄ /rHCO ₃	rK/rNa	rMg/rCa	rNa/rCa	rMg/rNa	N
Cloretada Sódica	5,88	145,77	0,05	1,78	10,88	0,33	17
Cloretada Cálcica Magnesiana	2,07	0,61	0,10	0,42	0,94	0,56	9
Bicarbonatada Sódica	0,61	0,15	0,04	1,44	5,29	0,27	4
Bicarbonatada Cálcica- Magnesiana	0,53	0,13	0,14	0,97	0,67	1,47	2

N = número de amostras.

Os valores encontrados para a razão rK/rNa situam-se entre 0,001 e 1,0 que são muito comum nas águas doces (Santos, 1997). A diminuição dos valores desta razão nos níveis das águas cloretadas e bicarbonatadas sódicas deve-se provavelmente ao aumento do conteúdo de sódio, e diminuição do potássio devido a sua fixação pelas argilas e matéria orgânica existentes nos solos. Alguns pontos que apresentaram baixa razão rK/rNa, apresentaram valores altos da razão de troca de sódio, destacando-se os poços da Praça Baía Azul (SCR =5,59) (PT-50), Esaex (SCR=8,05) (PT-36), Adelba (SCR=11,21) (PT-85), Parque de Exposição Agropecuária II (SCR=4,39) (PT-47) e III (SCR=5,37) (PT-48) (**Figura 2.2**). Por outro lado, o aumento relativo da razão rK/rNa nos fácies de águas cloretada cálcica-magnesiana e bicarbonatada-cálcica-magnesiana mostram que os níveis de sódio diminuem em consequência da sua fixação nas argilas trocadoras ou mesmo devido ao aumento do potássio na água como consequência do intemperismo de litotipos ricos em feldspato potássico como é o caso dos granulitos charnoenderbíticos.

A diminuição da razão rMg/rCa nas águas sugerem uma provável influência de litotipos ricos em silicatos do tipo plagioclásio cálcico ou mesmo trocas de base onde o Mg é fixado pelas argilas trocadoras, enquanto o cálcio é liberado para as águas subterrâneas. Em dois pontos amostrados, esta relação ultrapassou o valor de 5,0 (Chácara Celeste, AM-7 e Acresce, PT-1) sugerindo a influência de corpos máficos metamorfisados muito comuns dentro do embasamento cristalino.

A diminuição dos valores da razão rNa/rCa indicam possíveis processos de troca de bases, consequência da liberação do cálcio ou mesmo devido ao intemperismo de litologias com plagioclásio cálcico e clinopiroxênio presentes nos granulitos tonalíticos do embasamento cristalino. Já nas águas cloretada sódica e bicarbonatada sódica podem haver influencia de rochas com plagioclásio sódico. A razão iônica rMg/rNa indica um aumento do magnésio nas águas dos fácies cálcico-magnesianos e uma diminuição nos níveis hidroquímicos mais sódicos pelas mesmas razões expostas anteriormente.

5.4 A GEOQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A concentração dos elementos químicos dissolvidos na água subterrânea pode gerar a possibilidade de formação de determinados minerais secundários no meio supergênico quando o seu índice de saturação atinge valores positivos em condições normais de temperatura e pressão e dentro de determinadas condições de oxi-redução e densidade da água. A água subterrânea em contato com os minerais primários da rocha forma um sistema geoquímico que consiste de uma fase sólida (soluto) e uma fase líquida (solvente). Se a solução inicial não contiver algum componente químico resultante da dissolução do mineral da rocha, considera-se que existe um desequilíbrio entre as fases. Com o passar do tempo de residência da água subterrânea, inicia-se no mineral um processo de decomposição química o qual fornece os elementos (cátions e ânions) para a solução aquosa. Este processo se prolonga até ser atingido o equilíbrio entre a fase sólida e a líquida. Quando a solução alcança um ponto de saturação acima do equilíbrio químico ocorre a precipitação do sólido, através de reações químicas inversas.

5.4.1 Especificação dos Elementos Químicos a partir da Água Subterrânea

Para a verificação sobre a formação dos minerais secundários a partir da água subterrânea no Alto Cristalino de Salvador, foi necessário proceder a cálculos da concentração molar, atividade iônica e coeficiente de atividade da solução, necessários para a definição do Índice de Saturação (IS) das fases

sólidas em equilíbrio na solução aquosa. O valor do Índice de Saturação (SI) é obtido pela relação entre o produto da atividade iônica (IAP) dos elementos pela constante de equilíbrio termodinâmica (K) a temperatura (T) da reação considerada, ou seja:

$$\text{SI} = \text{IAP} / \text{KT} \text{ (Eq. 5.2)}$$

Para facilitar a interpretação dos resultados costuma-se transformar os parâmetros dessa equação em valores logarítmicos, ou seja:

$$\log \text{SI} = \log \text{IAP} - \log \text{KT} \text{ (Eq. 5.3)}$$

Os valores positivos obtidos representam uma supersaturação com formação da fase sólida, enquanto os negativos representam uma solução subsaturada. Quando o SI é igual a zero a solução está em equilíbrio químico.

O produto da atividade iônica (IAP) representa a atividade do componente dissolvido A, multiplicado pela atividade do componente dissolvido B, ou seja, $\text{IAP} = (A_A) \cdot (A_B)$. A atividade de cada um dos componentes dissolvido é calculada pela fórmula:

$$A_A = Y_A \cdot C_A \text{ ou } \log A_A = \log Y_A + \log C_A \text{ (Eq. 5.4)}$$

Onde: A_A é a atividade ou força iônica do componente A;
 Y_A é o coeficiente de atividade do constituinte A;
 C_A é a concentração molar total dissolvida do componente A (em mol/L).

$$A_B = Y_B \cdot C_B \text{ ou } \log A_B = \log Y_B + \log C_B \text{ (Eq. 5.5)}$$

Onde: A_B é a atividade ou força iônica do componente B
 Y_B é o coeficiente de atividade do constituinte B
 C_B é a concentração molar total dissolvida do constituinte B (em mol/L).

A constante de equilíbrio termodinâmico (K) à temperatura (T) para a reação de decomposição pode ser determinada em termos de atividade dos componentes dissolvidos a partir do mineral da rocha numa equação do tipo $A + B \rightarrow C + D$

$$K_{\text{eq.}} = K1 / K2 = [C]^c [D]^d / [A]^a [B]^b \text{ (Eq. 5.6)}$$

K_{eq}	=	constante de equilíbrio expressa em termos das concentrações em mol/L
[C] e [D]	=	concentração em mol/L dos componentes C e D
c e d	=	coeficiente de atividade dos produtos C e D na equação
[A] e [B]	=	concentração em mol/L dos reagentes A e B
a e b	=	coeficientes de atividade dos reagentes A e B na equação

Para a realização desses cálculos foi utilizado o aplicativo “*on line*” WEB-PHREEQC 2.0, desenvolvido por Parkhurst & Appelo (1980) para o USGS. Para tanto, utilizou-se os valores de pH, Eh, temperatura, densidade da água, alcalinidade, cálcio, magnésio, sódio, potássio, cloreto, ferro total, bicarbonato, nitrato, sulfato, sílica (SiO₂), alumínio total, bário, manganês total e zinco. Com isso, obtiveram-se os valores do Índice de Saturação (SI), do ferro, manganês, os carbonatos de cálcio e magnésio, além de uma seqüência de argilominerais e óxidos de alumínio.

Segundo Deutsch (1997), devido as incertezas inerentes ao cálculo do índice de saturação (SI), em função da exatidão muitas vezes duvidosas das análises químicas e do cálculo do valor da constante de equilíbrio do mineral em processo de dissolução, deve-se considerar por motivo de segurança, os valores do SI fora da faixa que varia de 0 (zero) a $\pm 0,5$. Esses valores em torno de zero, está dentro da zona de equilíbrio químico de um mineral em processo de decomposição química. Em função disso foram considerados os valores positivos que estão fora da referida faixa de segurança para definir os tipos de minerais secundários formados e precipitados a partir da supersaturação da solução (**Tabela 5.5**). Por outro lado, os outros valores que apresentam SI negativo (-) representam o soluto em condições de subsaturação na água e, portanto, sem condições de precipitação.

5.4.1.1 A fase do ferro na água subterrânea.

O ferro dissolvido nas águas subterrâneas está presente em toda a área sendo observado em vários pontos de amostragem devido ao seu forte odor de ferrugem quando a água entra em contato com o ar, durante o processo de bombeamento do poço. Neste caso o ferro ferroso oxida-se rapidamente em contato com o ar e precipita-se sob a forma de ferro férrico.

Basicamente, o ferro pode se apresentar nas águas nos estados de oxidação Fe⁺² e Fe⁺³. O íon ferroso (Fe⁺²) é mais solúvel do que o férrico (Fe⁺³). Portanto, os inconvenientes que o ferro traz às águas devem ser atribuídos principalmente ao ferro “ferroso”, que, por ser mais solúvel, é mais freqüente (Piveli, 1997).

Tabela 5.5 Valores dos índices de saturação (IS)

Local	Aragonita	Calcita	Dolomita	Mont.-Ca	Caolinita	Gibsitita	Hematita	Goetita	Hausmanita	Manganita	Rodocrosita	Pirolusita	Siderita
P. Lorde Crocrane	0,83	0,97	2,12	1,23	2,02	-0,07	16,5	7,24	-2,16	-1,5	-0,37	-3,93	-5,32
Av. Garibaldi	0,82	0,96	2,42	-0,87	0,56	-0,49	16	6,99	2,49	-0,11	1,12	-2,34	-5,57
Pr. Bahia Azul	0,56	0,7	1,63	0,12	0,87	-0,85	16,33	7,15	-3,47	-2,54	0,06	-5,95	-4,06
Av. ACM	0,84	0,98	2,1	-0,41	0,87	-0,37	15,95	6,96	-3,51	-2,97	0,57	-7,82	-3,28
Corona	-1,28	-1,14	-1,5	3,54	4,11	0,83	16,88	7,43	-3,31	-1,93	-0,59	-4,97	-4,85
Fonte Candeal	-0,51	-0,37	-0,34	-2,47	-0,4	-0,69	16,44	7,21	0,5	-0,68	-0,2	-3,25	-6,01
Chácara Celeste				-2,57	0,87	-0,07	1,57	-0,23	-33,69	-13,59		-20,21	
Fonte do Tororó	-0,41	-0,27	-0,21	0,05	1,32	-0,23	16,61	7,3	-8,17	-3,53	-2,78	-6,24	-5,61
I. Afrânio Peixoto	1,18	1,32	2,83	-0,07	0,65	-0,93	16,08	7,03	-3,51	-2,21	-0,27	-5,49	-4,71
I. Nina Rodrigues	0,19	0,33	0,76	-2,55	-0,31	-0,41	14,92	6,45	0,39	0,17	-2,44	1,18	-10
Ed. Casa Grande	0,1	0,24	0,76	-2,4	-0,47	-0,78	18,78	8,38	-1,48	-2,05	0,57	-6,23	-2,78
Fonte Nova	1,33	1,47	3,1	-0,79	0,27	-0,89	16,19	7,08	-4,03	-2,59	-2,26	-6,11	-4,32
S. C. das Árvores	-0,17	-0,03	0,59	-2,34	-0,48	-0,87	16,88	7,43	-2,07	-2,46	0,77	-7,42	-3,09
Pituba Plaza Hotel	0,87	1,01	1,6	-1,82	0,02	-0,45	16,17	7,07	-1,4	-1,46	-0,33	-4,28	-5,53
ESAEX	0,53	0,67	1,66	-1,11	0	-1,09	16,27	7,12	-8,37	-5,13	0,11	-11,55	-1,43
Conjunto Bahia	-1,75	-1,61	-3,3	2,76	4,18	1,43	16,06	7,02	-7,15	-3,48	-1,35	-6,92	-4,53
F. do Queimado	0,68	0,82	1,16	-0,94	0,83	-0,03	16,3	7,14	0,08	-0,92	-0,01	-3,52	-5,69
Fonte da Pedreira	-2,25	-2,11	-4,53	0,62	3,75	2,3	15,35	6,66	-13,16	-6,09	-1,71	-10,91	-2,71
ADELBA	0,15	0,29	0,94	-2,53	-0,59	-0,88	19,33	8,66	-10,39	-5,95	-0,19	-13,27	0,7
ACRESCE	-2,1	-1,96	-2,93	2,04	3,67	1,12	21,39	9,68	-8,32	-4,72	0,67		1,34
EBDA	-1,25	-1,11	-1,78	0,57	2,04	0,29	16,81	7,39	-3,38	-2,51	-0,6	-5,86	-4,51
CIMPOL	-0,11	0,04	0,47	-3,32	-1,11	-1,05	16,58	7,28	-0,14	-1,46	0,67	-5,49	-4,33
FIORELLI	-1,82	-1,68	-3,18	-0,25	1,78	0,35	20,31	9,14	-7,93	-4,49	-0,03	-9,82	-0,13
Estádio Barradão	-1,55	-1,41	-2,25	0,65	2,13	0,32	16,58	7,26	2,74	-0,65	0,72	-2,31	-5,49
M. Magistrados	-1,58	-1,43	-2,21	-3,3	-0,82	-0,75	16,35	7,17	-0,87	-1,03	-0,91	-3,5	-6,38
C. Dom Bosco	-0,34	-0,2	0,04	-0,8	0,36	-0,95	20,03	9	-7,13	-4,4	0,23	-10,35	-0,09
COELBA/Paralela	-1,2	-1,06	-1,45	-1,13	0,75	-0,2	16,46	7,22	2,22	0,14	-0,15	-1,53	-6,79
C. Angra dos Reis	0,45	0,59	0,69	-2,55	-0,64	-0,87	16,27	7,13	-0,71	-0,95	-0,36	-3,8	-5,89
Pq. Exposições II	0,53	0,67	1,68	-0,67	0,52	-0,7	16,11	7,05	-2,25	-2,29	0,74	-6,88	-3,63
Pq. Exposições III	-0,37	-0,23	0,34	-0,99	0,57	-0,54	20,47	9,2	-1,84	-2,23	1,12	-6,74	-1,2
C. Parque Stella I	1	1,14	2,09	-6,52	-3,49	-1,74	16,34	7,16	-4,06	-2,82	-0,27	-7,12	-4,01
C. Parque Stella II	0,5	0,64	1,09	-2,19	-0,42	-0,79	15,26	6,61	-2,88	-2,6	-0,34	-5,98	-5,05

Observação: Os valores do índice de saturação em preto expressam condições de saturação, enquanto os vermelhos de subsaturação.

O alto teor de ferro é uma consequência da alteração intempérica dos minerais ferromagnesianos das rochas granulíticas durante os processos pedogenéticos, principalmente o ortopiroxênio, anfibólios e biotita. É comum e natural a existência de elevados teores desse metal dissolvido na água sob a forma de Fe^{2+} quando as condições de pH da água situam-se de 2,0 a 5,5 em ambiente oxidante (**Figura 5.3**). No Alto Cristalino de Salvador foram observados valores de pH numa faixa de 4 a 8.

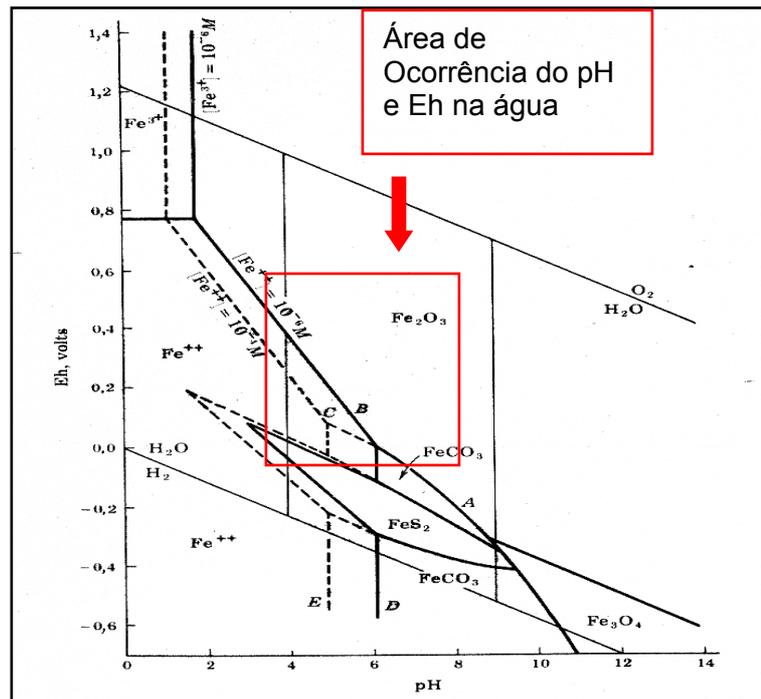


Figura 5.3 Diagrama pH – Eh para o ferro (Fonte: Mason, 1971).

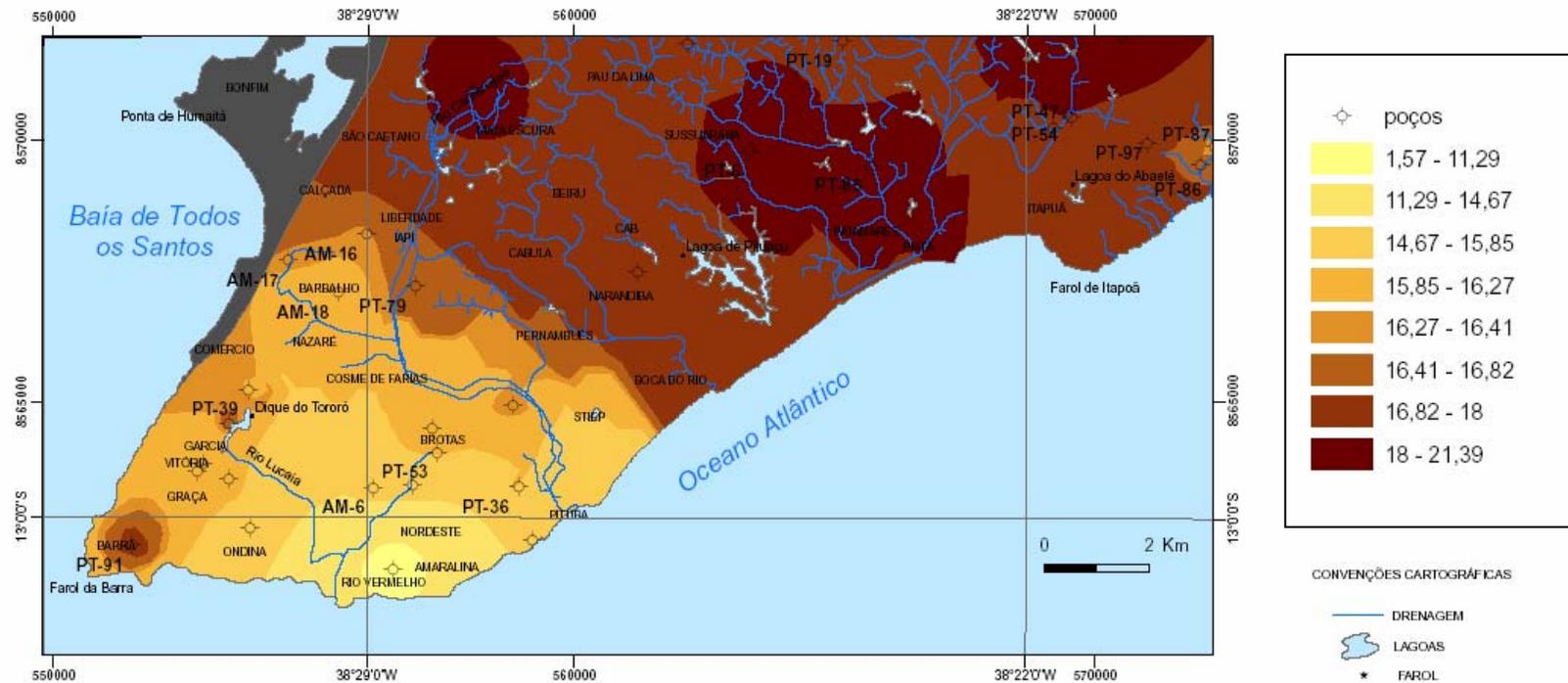
Com base nos resultados apresentados pela matriz de correlação linear (Pearson) obtida com os valores do índice de saturação (**Tabela 5.6**) pode-se constatar o seguinte: (i) Os altos valores do coeficiente de correlação linear obtidos entre os índices de saturação da goetita (FeOOH), $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e hematita (Fe_2O_3) mostram que as condições para as suas formações são semelhantes, precipitando-se conjuntamente quando as condições redox são favoráveis; (ii) quando os valores de Eh diminuem (condições redutoras) aumentam a possibilidade de formação da siderita (FeCO_3), conforme mostra o alto valor negativo do coeficiente de correlação linear obtido entre os valores do índice de saturação da siderita e os de Eh ($r = -0,82$) (**Tabela 5.6**); (iii) quando existem condições de supersaturação desse elemento, pode haver precipitação de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, - hematita (Fe_2O_3) e goetita (FeOOH) em quase toda a área estudada (**Figuras 5.4 e 5.5**).

Tabela 5.6 Matriz de correlação linear entre o pH, Eh e os índices de saturação (IS).

	pH	Eh	Aragonita	Calcita	Dolomita	Mont.-Ca	Caolinita	Gibbsita	Hematita	Goetita	Hausmanita	Manganita	Rodocrosita	Pirolusita	Siderita
pH	1,00														
Eh	-0,30	1,00													
Aragonita	0,79	-0,22	1,00												
Calcita	0,79	-0,22	1,00	1,00											
Dolomita	0,77	-0,25	0,98	0,98	1,00										
Mont.-Ca	-0,14	0,18	-0,43	-0,43	-0,40	1,00									
Caolinita	-0,35	0,27	-0,61	-0,61	-0,61	0,94	1,00								
Gibbsita	-0,49	0,36	-0,73	-0,73	-0,77	0,73	0,90	1,00							
Hematita	0,23	-0,38	-0,34	-0,34	-0,27	0,19	0,06	-0,01	1,00						
Goetita	0,23	-0,38	-0,34	-0,34	-0,27	0,19	0,06	-0,01	1,00	1,00					
Hausmanita	0,39	0,14	0,28	0,28	0,32	-0,03	-0,21	-0,26	0,61	0,61	1,00				
Manganita	0,35	0,29	0,24	0,24	0,26	-0,02	-0,18	-0,21	0,52	0,52	0,98	1,00			
Rodocrosita	0,16	-0,47	0,09	0,09	0,16	-0,09	-0,15	-0,24	0,40	0,40	0,31	0,09	1,00		
Pirolusita	0,23	0,53	0,08	0,08	0,09	0,06	-0,06	-0,07	0,40	0,40	0,90	0,96	-0,10	1,00	
Siderita	-0,04	-0,82	-0,21	-0,21	-0,17	0,15	0,16	0,09	0,79	0,79	-0,67	-0,81	0,42	-0,91	1,00

Observação: Os valores em negrito (positivo ou negativo) expressam os fortes coeficientes de correlação linear, entre os pares de minerais.

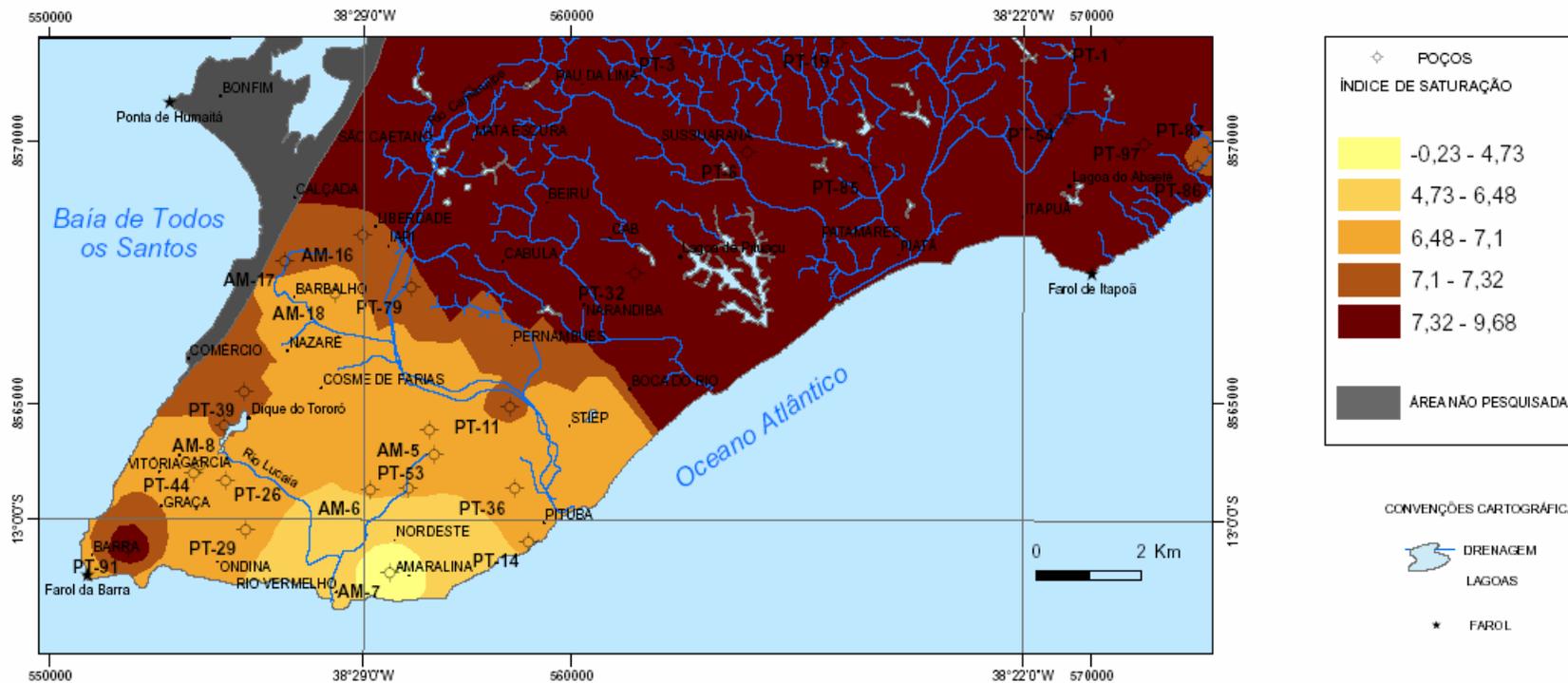
O nível de significância para $\alpha = 0,05$ e $n = 32$ é $0,35$



FONTE: Base Cartográfica modificada de : Barbosa, et al.2004
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005

FIGURA 5.4 - DISTRIBUIÇÃO DOS ÍNDICES DE SATURAÇÃO DA HEMATITA NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE SALVADOR-BA





FONTE: Base Cartográfica modificada de : Barbosa, et al.2004
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005

FIGURA 5.5 - DISTRIBUIÇÃO DOS ÍNDICES DE SATURAÇÃO DA GOETITA NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE SALVADOR-BA

5.4.1.2 A fase do manganês na água subterrânea.

A pirolusita (MnO_2), manganita (MnOOH) e hausmanita (Mn_3O_4) precipitam-se a partir da água subterrânea e encontram-se associadas na área estudada conforme mostram os seus altos valores de coeficientes de correlação linear (r), obtidos com os seus valores do índice de saturação (**Tabela 5.6**). As condições ambientais oxidantes que levam à precipitação dos óxidos e hidróxidos de manganês não são as mesmas que conduzem à formação da siderita (FeCO_3) e, portanto, não se encontram associados na área conforme mostram os valores negativos do coeficiente de correlação linear obtidos entre os valores dos seus índices de saturação (**Tabela 5.6**). Devido às condições de pH e Eh da água subterrânea, o manganês pode ocorrer também dissolvido sob a forma de Mn^{2+} (**Figura 5.6**).

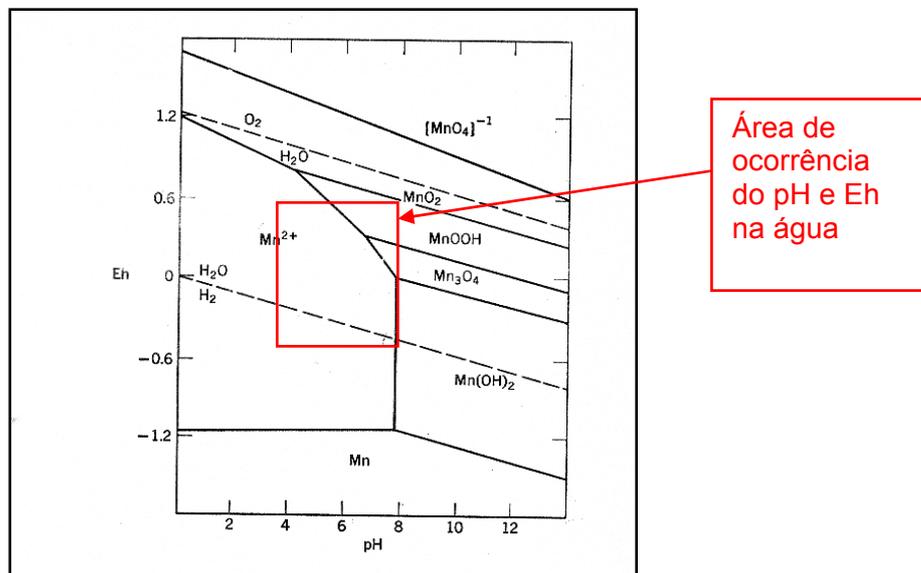
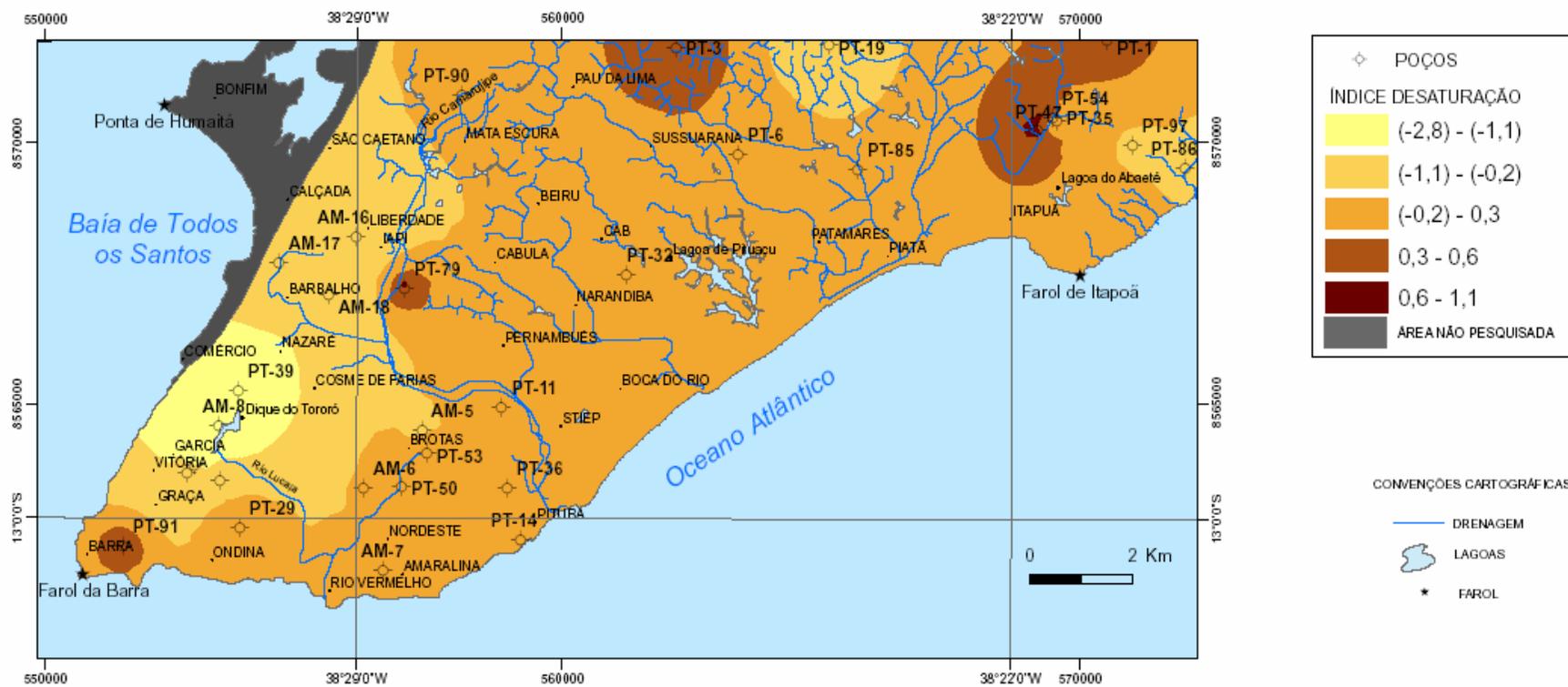


Figura 5.6 Diagrama pH – Eh para o manganês (Fonte: Mason, 1971).

Em poucos pontos precipita-se sob a forma de pirolusita (MnO_2) devido às condições oxidantes existentes na região. As condições de pH e Eh favoreceu em alguns poucos pontos a precipitação da hausmanita (Mn_3O_4), manganita (MnOOH) e rodocrosita (MnCO_3). Este último foi encontrado em pontos situados na Avenida Garibaldi (Campus Universitário de Ondina), no bairro da Pituba (Solar Caminho das Árvores, PT- 11), região da Av. Dorival Caymmi (Parque de Exposição Agropecuária, PT-47 e PT-48 e Acresce, PT-1) e em áreas de Influência de sedimentos da Formação Barreiras (**Figura 5.7**). No regolito desenvolvido sobre o embasamento cristalino de Salvador é comum a existência de manganês precipitados na zona de contato entre a rocha alterada e o embasamento cristalino. Sua origem primária está associada aos minerais ferromagnesianos (ortopiroxênios,



FONTE: Base Cartográfica modificada de: Barbosa, et al.2004
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005

FIGURA 5.7 - DISTRIBUIÇÃO DOS ÍNDICES DE SATURAÇÃO DA RODOCROSITA NO ALTO CRISTALINO DE SALVADOR-BA



anfíbios e biotita) existente nas rochas granulíticas do cristalino. O exame desses precipitados com lupa binocular mostrou que se trata de óxido de manganês formando filmes ou películas sobre a superfície dos grãos de quartzo e minerais de argila. Esses precipitados efervescem quando se coloca o peróxido de hidrogênio (água oxigenada 10%), porém a análise desses aglomerados por difratometria de raios-X mostrou a presença de quartzo e de minerais de argila não evidenciando a presença de minerais de manganês em virtude provavelmente do seu estado amorfo (**Figura 5.8**).

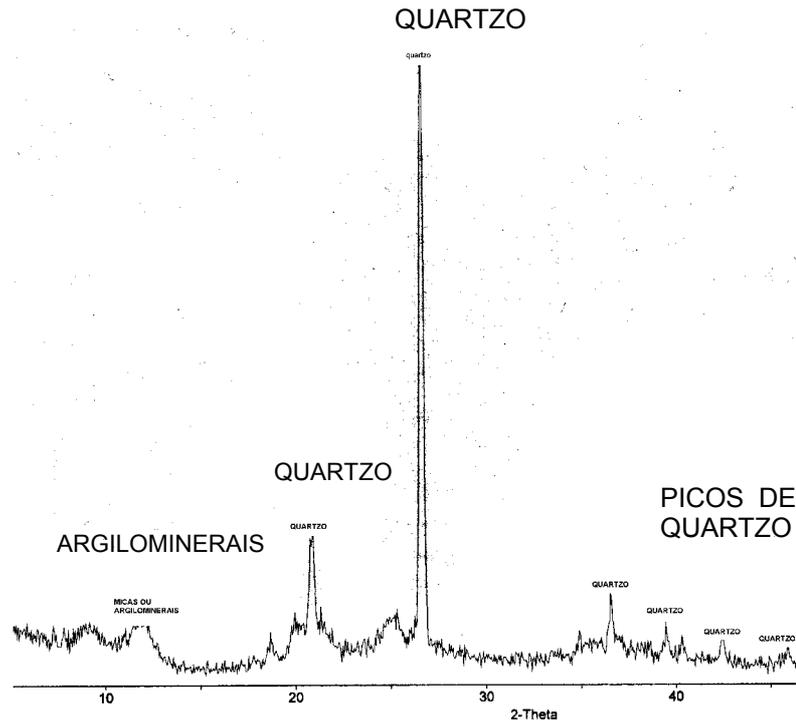


Figura 5.8 Difratometria de raios X do aglomerado de quartzo com cimento de manganês (fração silte).

Finalmente, foi observada uma estreita associação entre a clorita e a hausmanita (Mn_3O_4), manganita ($MnOOH$) e pirolusita (MnO_2), formados em condições de pH acima de 6,0 e condições redox oxidante (**Tabela 5.6**).

5.4.1.3 A fase da aragonita, calcita e dolomita na água subterrânea

Os valores de pH apresentaram excelente coeficiente de correlações linear (r) com os valores dos índices de saturação da aragonita, calcita e dolomita, indicando que com o aumento do bicarbonato e, conseqüentemente, do pH na água cria-se as condições para a precipitação desses minerais;

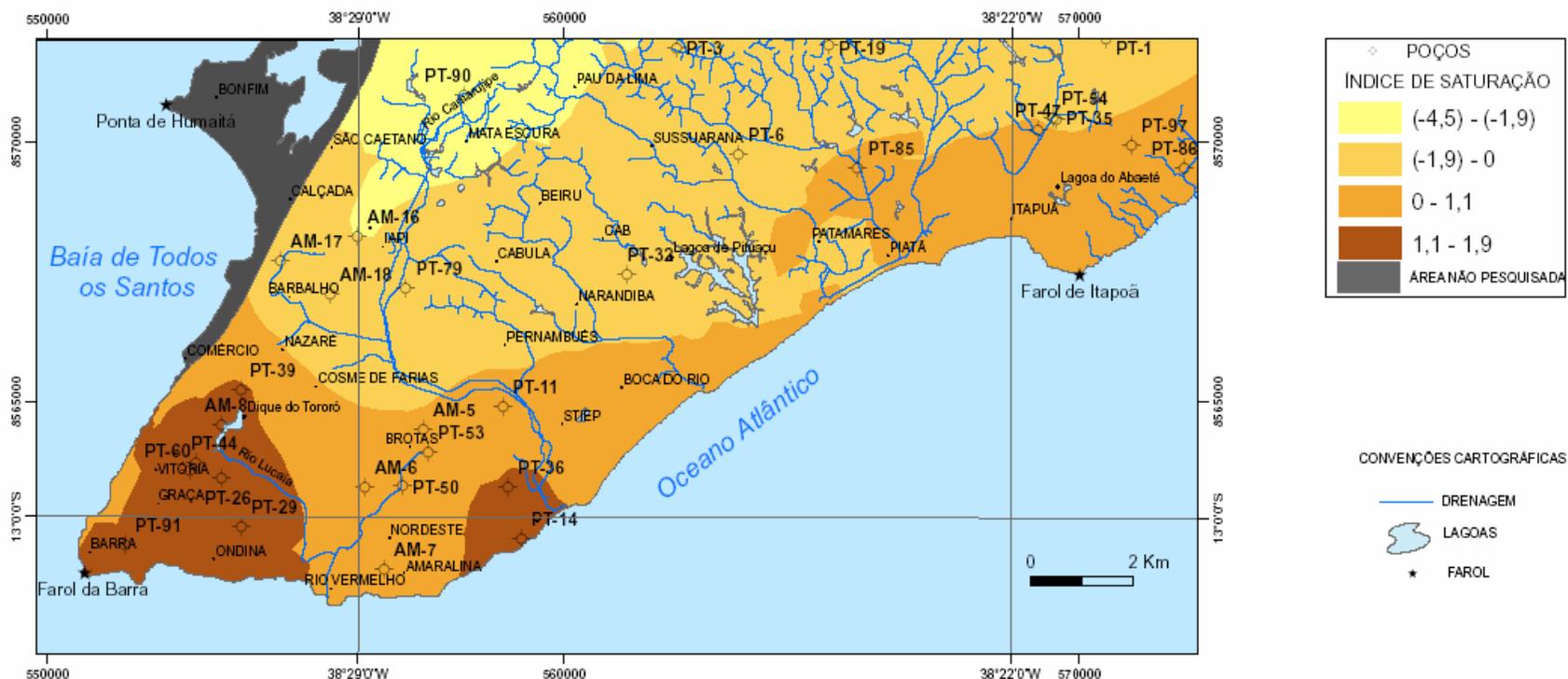
A aragonita (CaCO_3) e a calcita (CaCO_3) foram detectadas em quase 50% dos pontos investigados, independentemente do facie hidroquímico. A aragonita ocorre numa faixa que vai da Barra até a Pituba, com destaque para os pontos de captação situados no Pituba Plaza Hotel (PT-14), além do Condomínios Stella Mares (PT-86 e PT-87) e Angra dos Reis (PT-97) em áreas de influência de areias litorâneas e dunas. A fase dolomita se distribui preferencialmente nos bairros da Barra, Graça, Ondina e Pituba, além de uma faixa que se estende do bairro da Boca do Rio até Stella Mares em área de influência das areias litorâneas e das dunas (**Figura 5.9**).

Análises mineralógicas por difratometria de raios-X efetuadas nos sólidos em suspensão da água subterrânea coletadas no Correio da Bahia e Loteamento Veredas de Piatã, separadas através de filtração com milipore e filtros de 0,45 micras revelaram a presença de calcita e dolomita (**Figuras 5.10 e 5.11**). Posteriormente as lâminas de raios-X com os mesmos sólidos em suspensão foram tratadas com HCl à 10%, ocasionando o seu efervescimento. As lâminas foram analisadas novamente no aparelho de raios-X não se verificando mais a presença de calcita e dolomita.

A presença desses dois minerais em suspensão pode ser atribuída à influência marinha no cordão arenoso litorâneo através da maré alta que “afoga” as águas dos rios que desembocam no oceano Atlântico. Esses rios possuem um nível de base com cotas inferiores à cota da maré alta e, portanto, as águas salgadas do mar penetram pelo continente principalmente na orla oceânica, infiltrando-se no sistema aquífero e misturando-se com as águas doces, muitas vezes ocasionando a sua salinização.

Os altos valores negativos do coeficiente de correlações lineares (r) mostram que os carbonatos de cálcio e /ou magnésio (aragonita-calcita-dolomita) e os silicatos de magnésio (clorita) não se formam quando as condições físico-químicas são favoráveis à formação dos filossilicatos (montmorilonita Ca – caolinita) e dos óxidos de alumínio (gibbsita) e vice-versa.

Existem incompatibilidades entre a formação da gibbsita e caolinita com a aragonita, calcita e dolomita. A formação da clorita foi verificada em uma grande extensão da área sempre correlacionados com a aragonita, calcita e dolomita na extremidade sul da cidade de Salvador em uma faixa que apresenta forte influência marinha.



FONTE: Base Cartográfica modificada de: Barbosa, et al. 2004
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005

FIGURA 5.9 - DISTRIBUIÇÃO DOS ÍNDICES DE SATURAÇÃO DA DOLOMITA NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE SALVADOR-BA



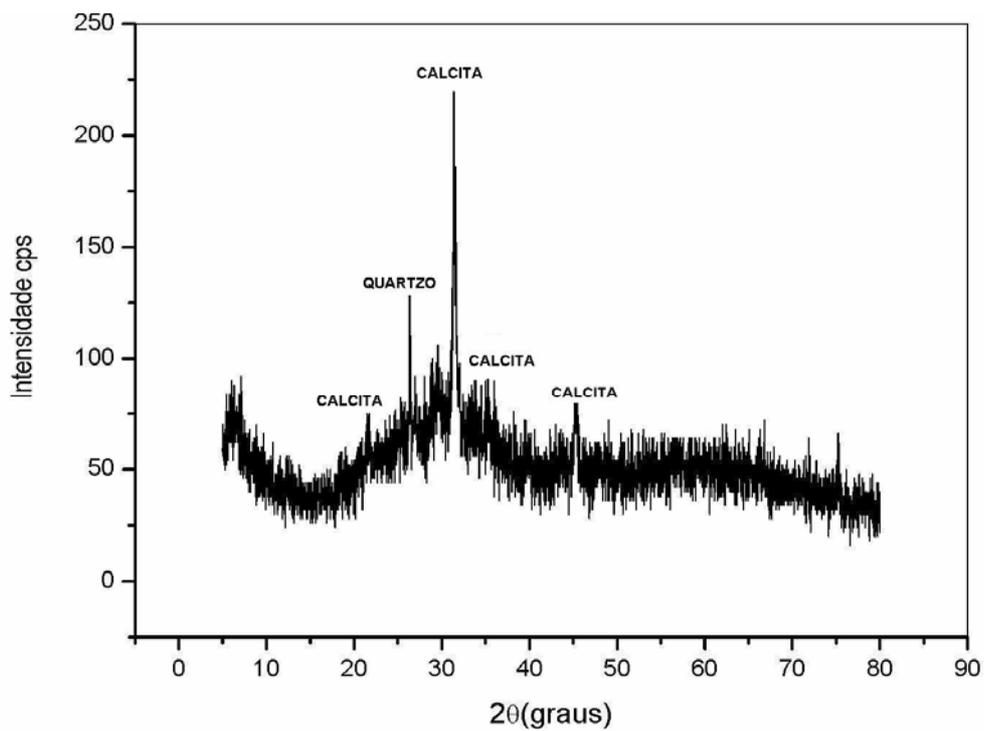


Figura 5.10 Difratometria de raios-X dos sedimentos em suspensão na água subterrânea mostrando os picos de calcita – Loteamento Veredas Piatã.

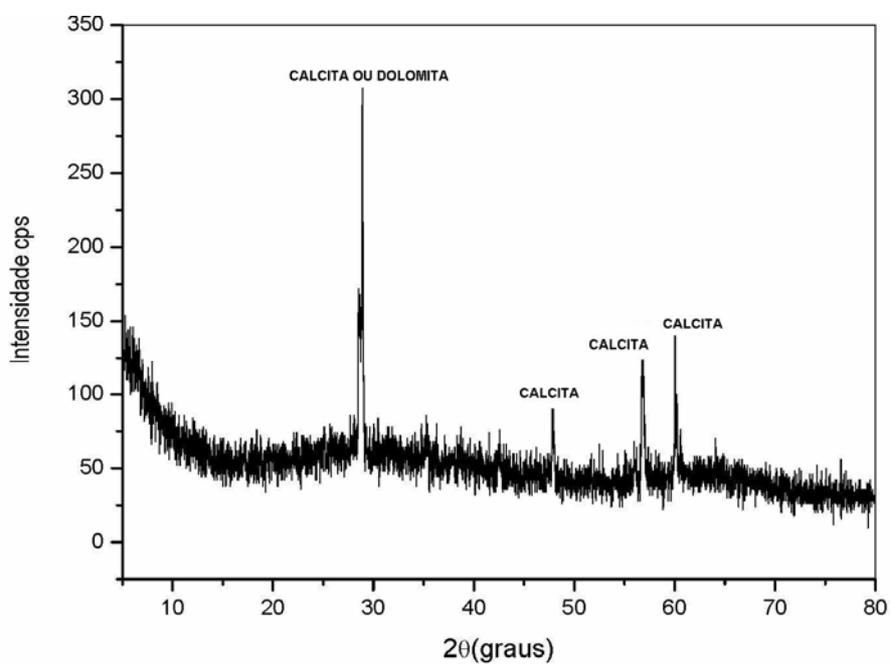


Figura 5.11 Difratometria de raios-x dos sedimentos em suspensão na água subterrânea mostrando os picos de calcita e dolomita - Correio da Bahia

5.4.1.4 A fase dos argilominerais e gibsita na água subterrânea

Os valores do Índice de Saturação mostraram que os processos de bissialitização com formação da montmorilonita cálcica – $\text{Ca Al}_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, da monossilitização com a formação da caolinita – $\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$ da alitização com a formação da gibsita – $\text{Al} (\text{OH})_3$ ocorrem preferencialmente na cobertura de regolito. Os processos de bissialitização podem ocorrer na fase inicial da alteração da rocha cristalina, evoluindo rapidamente para a monossilitização. Os altos valores de correlação linear (r) obtidos entre os índices de saturação da caolinita, montmorilonita cálcica e gibsita indicam que as condições para formação desses três minerais são semelhantes (**Tabela 5.6**) e, portanto, pode coexistir no mesmo ambiente geoquímico.

As fases montmorilonita e gibsita foram detectadas em poucos locais amostrados enquanto a fase caolinita foi observada em uma quantidade maior de pontos estudados, sendo, portanto mais comum e mais disseminada devido ao clima úmido e chuvoso da região. O modelamento cartográfico realizado com interpolação dos dados de índice de saturação (IS) mostra de um modo geral, uma distribuição desses argilominerais e da gibsita na região do planalto costeiro dissecado (**Figuras 5.12, 5.13, 5.14**). Os valores do IS da clorita crescem regionalmente em direção aos bairros da Barra e Graça, onde os valores de magnésio também aumentam como veremos no próximo Capítulo.

Trabalhos pedológicos realizados na parte alta de Salvador não têm detectado a presença direta da esmectita (montmorilonita) nas coberturas de regolito, porém a sua formação pode ser uma realidade mineralógica na fase inicial da alteração intemperica do ortopiroxênio e da biotita, apesar do clima desfavorável com intensa umidade do ar, alta pluviosidade e lixiviação intensa.

5.4.2 Processo de intemperização das rochas cristalinas do Alto de Salvador

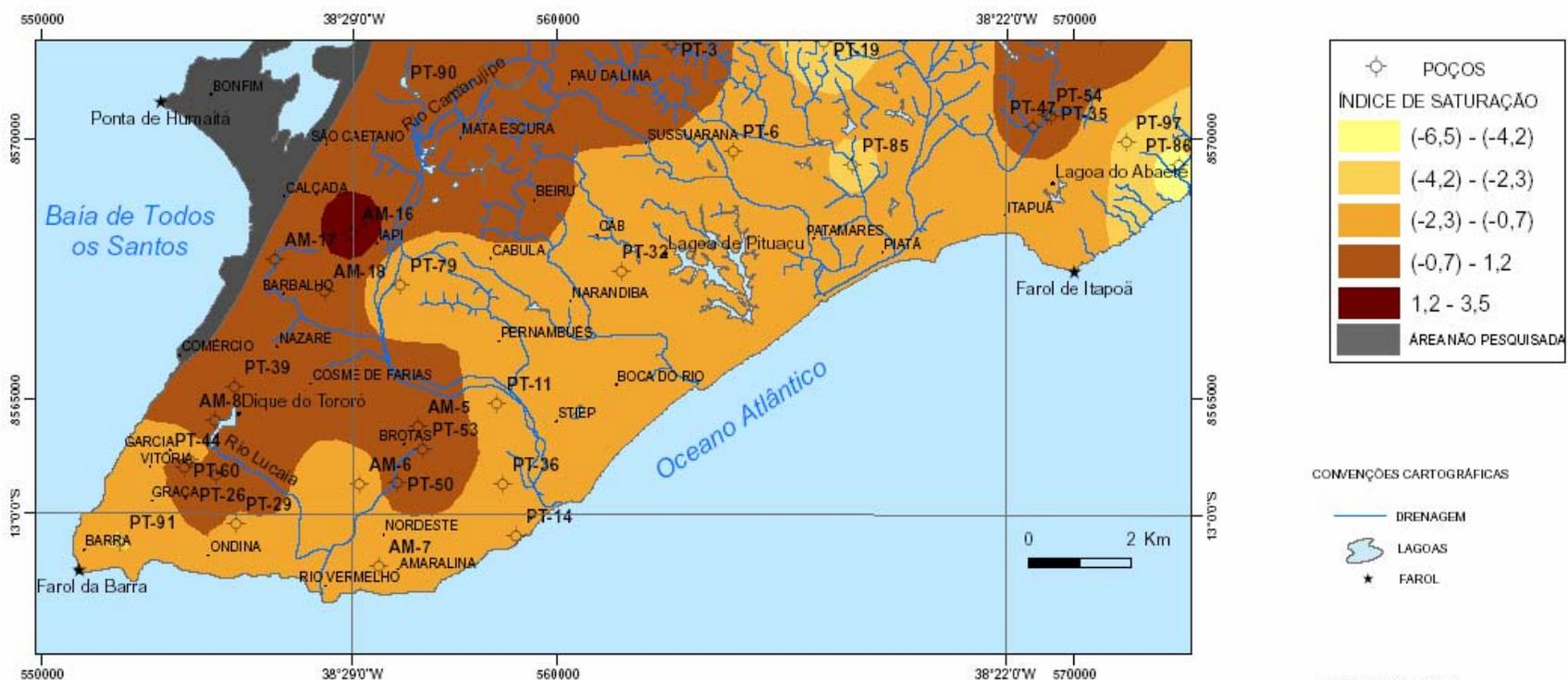
Para verificar o comportamento da sílica nessa região e, assim, poder determinar o processo de intemperização, adotou-se a metodologia preconizada por Pedro (1964, 1966) apud Menegotto (1987). Esta metodologia se fundamenta na premissa de que o alumínio é um elemento fixo durante o intemperismo das rochas, entrando na constituição de diferentes fases mineralógicas do regolito em função da maior ou menor lixiviação da sílica pela água subterrânea. Esse método preconizado por Pedro (1964, 1966) se baseia no comportamento ou mobilidade da sílica na água subterrânea dentro do regolito através de comparações entre as seguintes razões molares (Menegotto, 1987).

$$L = \text{SiO}_2 / \text{MgO} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \text{ (na fase solúvel)}$$

$$R = \text{SiO}_2 / \text{MgO} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \text{ (nas rochas)}$$

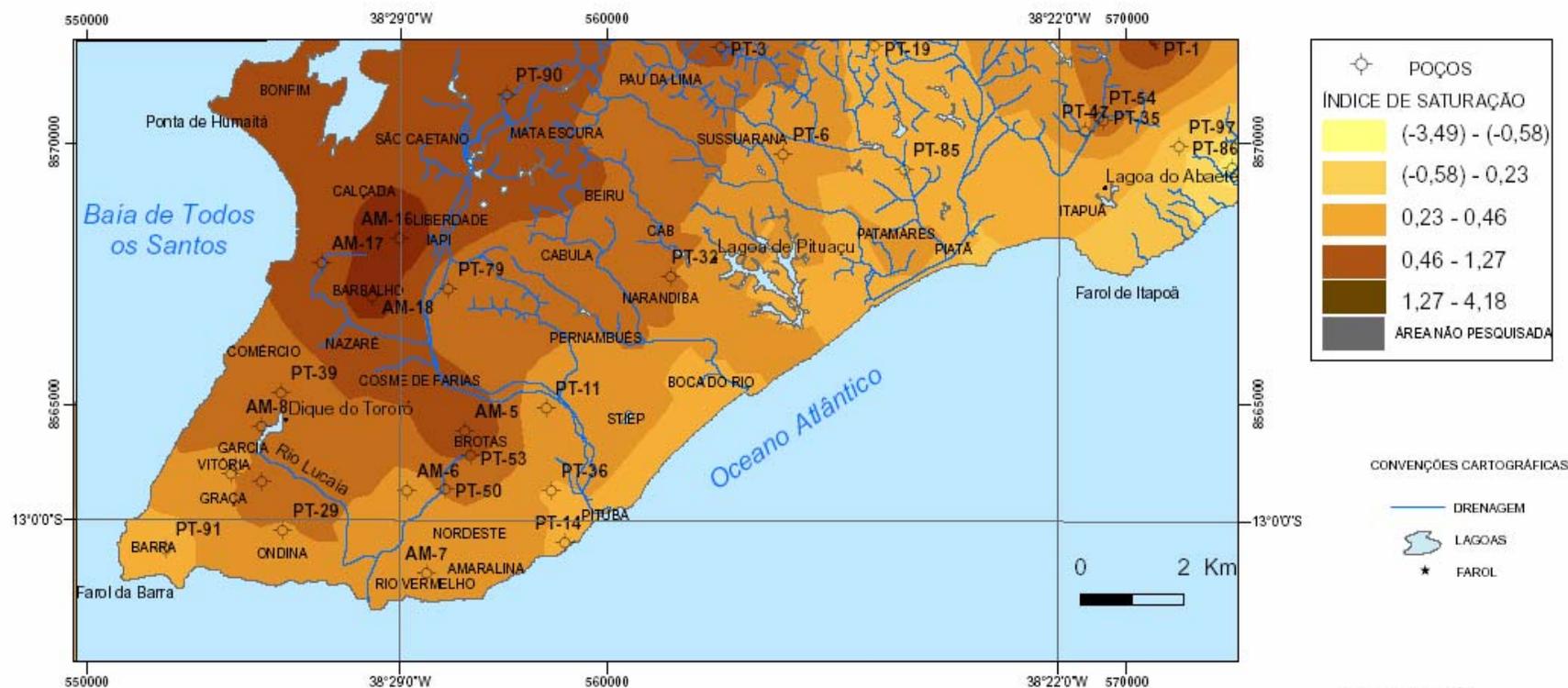
$$R_k = \text{SiO}_2 - 2 \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{MgO} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \text{ (nas rochas)}$$

$$R'_k = \text{SiO}_2 - 2(\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{MgO} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \text{ (nas rochas)}$$



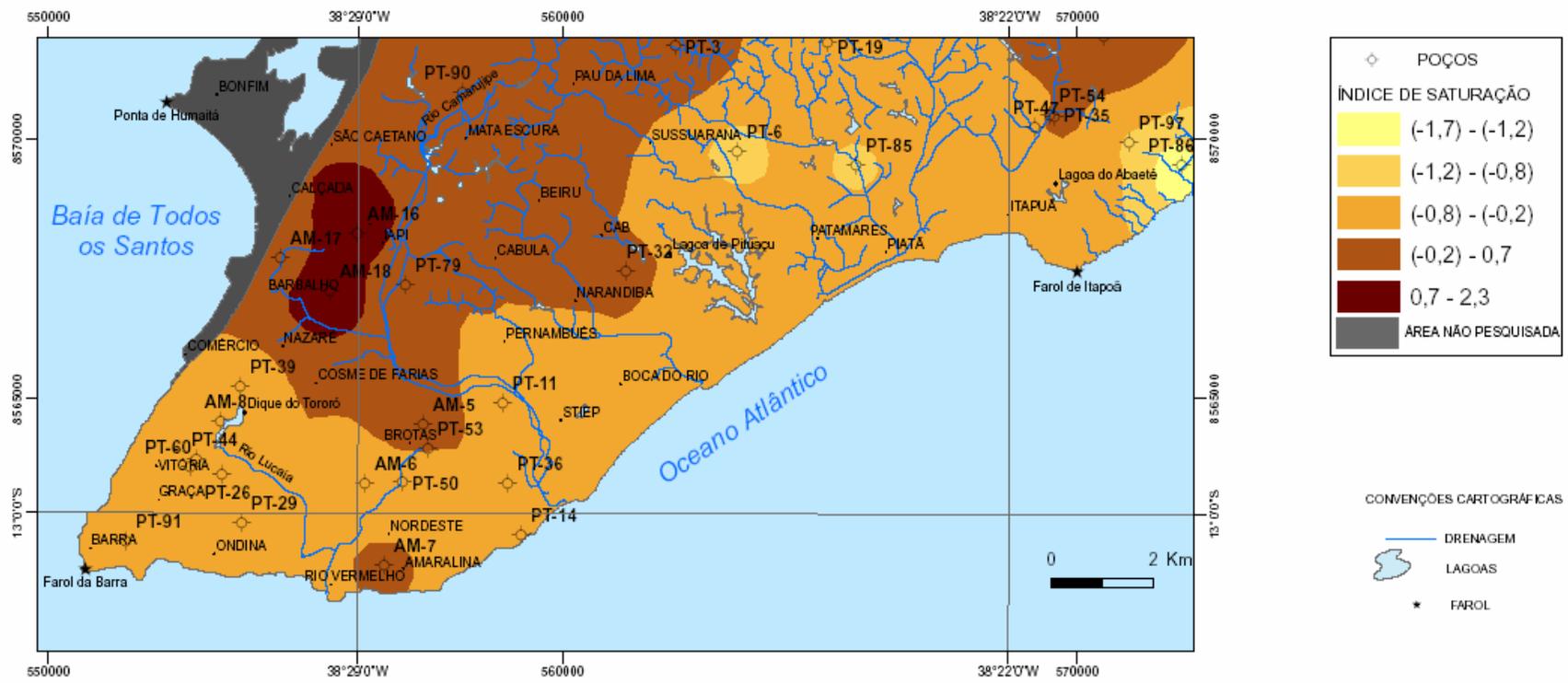
FONTE: Base Cartográfica modificada de : Barbosa, et al.2004
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005

FIGURA 5.12 - DISTRIBUIÇÃO DOS ÍNDICES DE SATURAÇÃO DA ESMECTITA NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE SALVADOR-BA



FONTE: Base Cartográfica modificada de : Barbosa, et al.2004
Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005

FIGURA 5.13 - DISTRIBUIÇÃO DOS ÍNDICES DE SATURAÇÃO DA CAOLINITA NA ÁGUA SUBTERRÂNEA EM SALVADOR-BA



FONTE: Base Cartográfica modificada de : Barbosa, et al.2004.
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005

FIGURA 5.14 - DISTRIBUIÇÃO DOS ÍNDICES DESATURAZÃO DA GIBSITA NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE SALVADOR-BA



Esse autor preconiza que os valores médios de R e R_k permanecem constantes em determinadas rochas. A razão molar L , pelo contrário, pode variar em um mesmo local em função das concentrações relativas dos elementos solúveis na água subterrânea, influenciada particularmente pelo clima (Menegotto, 1987). Como os cátions que constam no denominador são todos muito solúveis e fortemente lixiviados, as diferenças dos valores de L relacionam-se, principalmente, ao comportamento da sílica (Menegotto, 1987). Para estudar o processo de intemperização baseado nesta metodologia e para verificar o tipo de argilo-mineral formado no regolito da região, foram escolhidos dez pontos de captação de água em fontes naturais e cacimbas próximas das áreas de influência granulitos tonalíticos e charnoenderbíticos (Barbosa et al, 2005). Nas amostras de água subterrânea foram analisados os elementos Si, Mg, Ca, Na, K, Fe total e Al, cujos valores foram transformados em seus respectivos óxidos através da multiplicação por seus fatores de conversão. Os valores dos óxidos nas rochas tonalíticas e charnoenderbíticas situadas nas proximidades dos pontos de coleta de água subterrânea foram obtidos do mapa geológico da cidade de Salvador (Barbosa et.al.,2005).

Quando se compara o valor das razões molares L , R , R_k e R'_k chega-se aos processos de intemperização das rochas cristalinas granulitizadas. Os resultados dos cálculos encontram-se nas **Tabelas 5.7 e 5.8** e eles mostram que em todos os pontos estudados o valor de $L \ll R_k$ indica que a sílica foi lixiviada em pequena quantidade, restando nos solos proporções molares de $\text{SiO}_2 > 2 \text{Al}_2\text{O}_3$ ou $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 > 2$, o que pode levar à formação de argilominerais do tipo 2:1 (montmorilonita), característica da bissialitização. Ao mesmo tempo verificou-se que a razão molar $L \ll R'_k$ indica a possibilidade de formação de nontronita, argilo-mineral de ferro e magnésio pertencente ao grupo da esmectita, a qual é originária da alteração de rochas básicas e/ou intermediárias (Menegotto, 1987), como é o caso dos granulitos tonalíticos e charnoenderbíticos de Salvador (Barbosa et al, 2005). Nesse caso, o ferro desempenha um papel importante no intemperismo dessas rochas e forma nontronita quando a sílica é retida nos solos em proporções elevadas. Por esse motivo, no cálculo da razão molar R'_k deve ser adicionado ao Al_2O_3 o teor de ferro total (Menegotto, 1987). A fórmula R'_k permite enquadrar, no esquema proposto por Pedro (1964), a sílica em relação ao ferro (apud Menegotto, 1987). Quando $L < R'_k$ a possibilidade de formação da nontronita é grande. A única exceção foi verificada na região da Fonte do Queimado onde o valor de R (57,8) $> R_k$ (56,1) indica que a sílica foi eliminada em menor proporção que Mg, Ca, Na e K, ficando retida uma quantidade correspondente a razão molar $\text{SiO}_2 \sim \text{Al}_2\text{O}_3$ ou $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,0$ originando a caolinita e caracterizando um processo de monossialitização naquele local. Os valores de L foram muito baixos (**Tabela 5.8**) e, nesses casos, os processos pedogenéticos podem ser definidos como sialferritização segundo a classificação proposta por Melfi et al (1979) apud Menegotto (1987).

Tabela 5.7 Razão molar entre os elementos na rocha.

Rocha	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	R	Rk	R'k
Tonalalito	57,5	0,69	16,4	3,1	6,1	0,15	5,7	4,5	3,1	2,6	3,62	55,5	65,2
Tonalalito	60,0	0,67	16,3	5,2	3,3	0,09	3,6	6,2	3,0	1,8	4,11	57,8	63,9
Tonalalito	68,0	0,47	14,8	2,2	3,3	0,06	1,4	2,6	2,7	3,9	6,42	65,2	72,2
Tonalalito	60,6	1,8	15	2,5	5	0,09	1,9	5	2,8	3,6	4,56	58,4	68,3
Tonalalito	49,1	1,2	13,8	1,5	11,3	0,2	7,1	10,1	1,8	3,6	2,17	47,9	63,5
Tonalalito	63,7	0,45	15,4	0,13	6,3	0,11	3	5	2,9	2,6	4,72	61,4	74,0
Tonalalito	58,5	0,62	14,6	2,5	7,5	0,15	5,3	4,9	3,2	1,4	3,95	56,5	65,7
Tonalalito	67,1	0,59	14,9	0,07	5,3	0,1	1,9	3,7	2,5	3,6	5,74	64,6	76,8
Tonalalito	54,6	0,67	15,8	4,3	5,8	0,17	4,6	7,5	2,4	2,6	3,19	52,8	63,9
Tonalalito	49,4	0,83	15	5,1	8,1	0,2	7,6	9,1	2	0	2,64	47,8	57,1
Média	58,9	0,8	15,2	2,66	6,2	0,13	4,21	5,86	2,64	2,6	4,11	56,79	67,07
ched	64,9	0,56	13,0	2,8	2,6	0,18	3,4	4,6	2,0	2,7	3,85	56,9	67,3
ched	65,5	1,2	14,7	5,6	0,1	0,05	1,3	2,7	2,2	5,4	5,11	62,9	71,8
ched	61,4	0,62	15,7	4,3	3,6	0,14	3,3	4,7	3,2	2,8	5,65	63,0	60,6
ched	65,6	0,75	16,3	3,6	1,4	0,08	2,2	4,0	2,2	3,9	4,39	59,2	68,2
ched	58,5	0,62	15,6	4,2	4,7	0,1	3,5	6,0	2,4	2,6	5,33	63,0	70,2
Media	63,2	0,75	15,1	4,1	2,48	0,11	2,74	4,4	2,4	3,5	4,73	60,22	67,03

ched = charnoenderbito

Tabela 5.8 Razão molar entre os elementos na água subterrânea.

Local	CaO	MgO	Na2O	K2O	Al2O3	Fe2O3	SiO2	L
Fontinha	16,79	21,88	44,88	5,42	0,72	0,15	7,60	0,085
Corona	9,37	28,52	98,12	3,25	0,24	0,08	44,00	0,316
Fonte do Candeal	15,39	19,07	53,38	5,90	0,03	0,07	9,00	0,096
Chácara Celeste	5,18	30,17	120,90	4,58	2,21	0,24	8,60	0,053
Terreiro da Casa Branca	23,79	17,24	48,12	4,34	0,04	0,03	7,20	0,077
Fonte do Tororó	20,99	22,71	50,95	7,83	0,06	0,08	22,00	0,215
Fonte Conjunto Bahia	26,58	11,12	61,73	6,02	0,27	0,03	12,00	0,114
Fonte do Queimado	58,77	9,62	53,65	13,25	0,23	0,08	8,80	0,065
Fonte da Pedreira	37,78	9,05	61,06	13,25	0,53	0,07	1,00	0,008
Fonte de Biologia-UFBA	10,91	32,49	34,10	2,89	0,03	0,01	17,00	0,211

L = razão molar obtida com os óxidos determinados na água subterrânea.

Rego e Carvalho (1997) encontraram nos solos da região cacauera do sul da Bahia, no princípio da alteração do granulito a presença de esmectita esverdeada em microfraturas de biotita (**Figura 5.15**). Nas fissuras do piroxênio que vão se alargando num padrão linear irregular foi observada relíquia desse mineral imersa na pseudomorfose esmectítica (**Figura 5.16**) refletindo condições particulares nos microsistemas de contato.

Como a região cacauera apresenta uma grande semelhança morfoclimática e geológica com Salvador, existe a possibilidade de o mesmo processo acontecer nessa região. Devido ao fato deste mineral ter vida efêmera, evolui rapidamente para caolinita e/ou oxi-hidróxidos de ferro e alumínio que são muito comuns nas coberturas regolíticas de Salvador. A intensa lixiviação provocada pelos fortes índices pluviométricos nessa região provoca a rápida evolução, sendo muito difícil a sua detecção em regiões de clima tropical úmido, a não ser em condições especialíssimas verificadas no início da alteração intempérica da rocha.

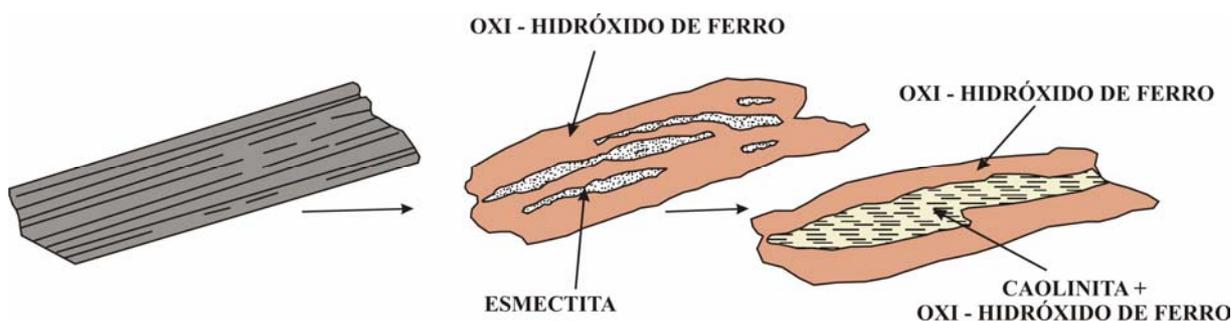


Figura 5.15 Alteração da biotita em esmectita, caolinita e oxi-hidróxido de ferro.

Fonte: Rego & Carvalho (1997).

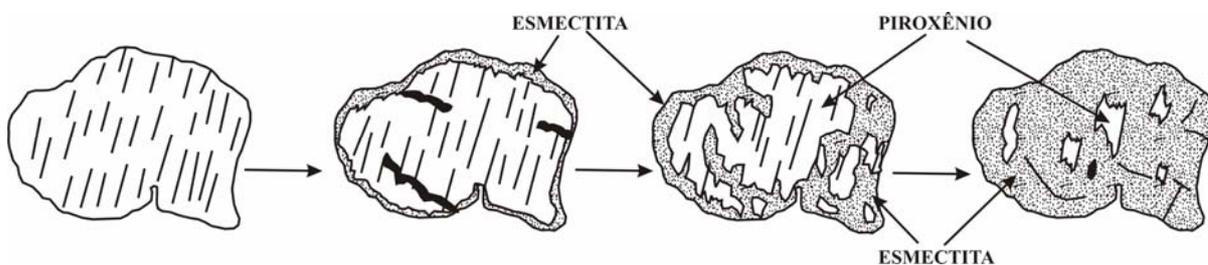


Figura 5.16 Alteração do piroxênio em esmectita.

Fonte: Rego & Carvalho (1997).

5.5 RESUMO DO CAPÍTULO

As águas subterrâneas do Alto Cristalino de Salvador são predominantemente sódicas (65,6%) e mistas (31,2%) e, secundariamente, de natureza cálcicas (3,1%). As águas mistas sofrem influência da rocha alterada e do cristalino fissural devido a decomposição dos anfibólios, clino e ortopiroxênios, biotita e dos plagioclásios cálcicos presentes nos granulitos tonalíticos, charnoenderbíticos e nos corpos máficos e ultramáficos associados. As águas de natureza cálcica foram encontradas nas dunas do Parque do Abaeté e Stella Mares.

Levando-se em conta a composição dos percentuais acima, as águas podem ser classificadas como cloretadas sódicas (53,1%), cloretadas cálcicas ou magnésiana (28,1%), bicarbonatadas sódicas (12,5%) e bicarbonatadas cálcicas ou magnésiana (6,2%). Os fácies hidroquímicos cloretado sódico e cloretado cálcico-magnésiano representam 81,3% dos pontos estudados, enquanto os fácies bicarbonatado sódico e bicarbonatado cálcico-magnésiano foram observados em 18,7% dos locais de coleta de água subterrânea.

A razão $rCl / rHCO_3$ funcionou muito bem como rastreador e indicador do movimento da água em subsuperfície. Verifica-se uma diminuição dos valores da razão iônica a partir das águas do fácies cloretada sódica em direção das águas do fácies bicarbonatada cálcica-magnésiana. Essa diminuição pode indicar um fluxo de água a partir do planalto dissecado em direção a planície litorânea, estando de acordo com o modelamento potenciométrico da região.

Existe uma relação direta entre os índices de saturação da goetita ($FeOOH$)₃ e hematita (Fe_2O_3) mostrando que as condições para formações de ambos são semelhantes, com precipitação conjunta quando as condições de pH e Eh são favoráveis;

Quando os valores de Eh diminuem (condições redutoras) aumentam a possibilidade de formação da siderita ($FeCO_3$) a partir da água subterrânea, conforme mostra o alto valor negativo do coeficiente de correlação linear obtido entre os valores do índice de saturação da siderita e os de Eh.

As condições de pH e Eh existente nas águas subterrâneas favorecem a ocorrência de Fe^{2+} dissolvido e, quando existem condições de supersaturação desse elemento, pode haver precipitação de hematita (Fe_2O_3) e goetita ($FeOOH$) em quase toda a área estudada, principalmente ao norte do município.

A pirolusita (MnO_2), manganita ($MnOOH$) e hausmanita (Mn_3O_4) precipitam-se a partir da água subterrânea e encontram-se associadas na área estudada. As condições ambientais oxidantes que levam

à precipitação dos óxidos e hidróxidos de manganês não são as mesmas que conduzem à formação da siderita (Fe CO_3) e, portanto, não se encontram associados na área conforme mostram os valores negativos do coeficiente de correlação linear entre os seus índices de saturação..

Os pH controla a precipitação da aragonita, calcita e dolomita, quando os seus respectivos índices de saturação atingem determinados valores limites

Os altos valores negativos do coeficiente de correlações lineares (r) mostram que os carbonatos de cálcio e magnésio (aragonita-calcita-dolomita) e os silicatos de magnésio (clorita) não se formam quando as condições físico-químicas são favoráveis à formação dos filossilicatos (montmorilonita Ca – caolinita) e dos óxidos de alumínio (gibbsite) e vice-versa.

Existem incompatibilidades entre a formação da gibbsite com a aragonita – calcita – dolomita e da caolinita com a aragonita – calcita - dolomita. A formação da clorita foi verificada em uma grande extensão da área sempre correlacionada com a aragonita, calcita e dolomita, devido as condições físico-químicas semelhantes exigidas para a precipitação desses minerais.

Os dados mostram que na região a sílica está sendo lixiviada em pequena quantidade, restando nos solos proporções molares de $\text{SiO}_2 > 2 \text{ Al}_2\text{O}_3$ ou $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2 \text{O}_3 > 2$, o que pode levar à formação de argilominerais do tipo 2:1 (esmectita), característica da bissialitização, inclusive a nontronita, argilomineral de ferro e magnésio pertencente ao grupo da esmectita.

Em alguns locais a sílica foi eliminada em menor proporção que Mg, Ca, Na e K, ficando retida uma quantidade correspondente a razão molar $\text{SiO}_2 \sim \text{Al}_2 \text{O}_3$ ou $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,0$ originando a caolinita e caracterizando um processo de monossilitização.

CAPÍTULO 6

FATORES CARACTERÍSTICOS E A QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

6 FATORES CARACTERÍSTICOS E A QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

6.1 FATORES CARACTERÍSTICOS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Para caracterizar a água subterrânea no Alto Cristalino de Salvador, foi necessário explicar a correlação ou covariância entre um conjunto de variáveis originais através da análise fatorial. Um pequeno número de fatores foi calculado pela combinação linear dessas variáveis originais, extraídos na ordem do mais explicativo para o menos explicativo, sendo responsáveis por uma grande parte da variabilidade total explicada.

Por definição, a análise fatorial constitui um método multivariável que reduz um conjunto de N variáveis em poucos fatores sem perder a capacidade explicativa das abundantes informações numéricas disponíveis. Este método foi desenvolvido por Hotelling (1933) a partir do trabalho de Spearman (1904). Os fatores são entidades hipotéticas não diretamente observáveis em uma pesquisa que se infere a partir do agrupamento das variáveis originais. O método explica as correlações entre as variáveis observadas utilizando-se o menor número possível de fatores que se apresentam significativos no contexto estudado, guardando entre si uma coerência lógica. Na análise fatorial exploratória buscam-se dimensões subjacentes para saber o que é mais importante ou mais significativo em um conjunto de variáveis originais.

O produto final da análise fatorial é uma matriz de cargas em forma de número decimais, positivos ou negativos, geralmente menores do que 1 que expressam o quanto uma variável observada está carregada ou saturada em um determinado fator. Em outras palavras, quanto maior for a carga em cima de um fator, mais a variável se identifica com o que representa este fator.

A composição química da água subterrânea no Alto Cristalino de Salvador é o resultado do intemperismo químico das litologias da região, da atmosfera e das contribuições antrópicas. A análise fatorial foi aplicada para distinguir, através de cinco fatores, as contribuições parciais de 17 variáveis escolhidas previamente (**Tabela 6.1**), através de uma matriz de correlação linear (Pearson) (**Tabela 6.4**).

As 17 variáveis utilizadas e obtidas na água subterrânea coletada em 32 pontos de amostragem foram: pH, condutividade elétrica, turbidez, sólidos em suspensão, dureza, magnésio, sódio, bicarbonato, cloreto, amônia, alumínio, bário, cobre cromo, ferro, manganês e sílica. Para a realização dos cálculos

foi utilizado o software STATISTICA 5.0 a partir de uma matriz de dados Excel com 17 x 32 informações. O método utilizado foi dos componentes principais, desenvolvido por Thurstone (1947), com rotação ortogonal varimax, normalizado para extrair os 5 fatores. Os resultados (**Tabela 6.1**) explicam 84,345% do total da variância amostral (**Tabela 6.2**).

A variância explicada pelo fator 1 representa 28,56 % do total; enquanto que no fator 2 a variância explicada contribui com 16,68% da variância total. Para os demais fatores a variância explicada contribui com 15,51%, 13,38% e 10,20% respectivamente, da variância total.

Tabela 6.1 Análise de fatores (Varimax normalizada) – Método dos componentes principais (valores considerados > 0,70).

Variáveis	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5
pH	,041355	,059289	,803651	,094910	,303806
C. Elétrica	,426218	-,091297	,091873	,822221	,221400
Turbidez	-,112604	,901542	,039962	,001157	-,368309
S. Suspensão	-,034809	,989955	-,006898	-,055821	,002975
Dureza	,830940	-,081705	,166213	,041336	,289931
Magnésio	,914722	,021537	,045625	,193145	,119698
Sódio	-,141929	-,040985	,162908	,959145	,003045
Bicarbonatos	,202578	,014121	,760304	,391424	,068347
Cloretos	,152978	-,022333	-,174573	,889036	-,021023
Amônia	,048664	,250120	-,662633	,206877	,139037
Alumínio	,186703	-,025256	-,765635	,401951	,065910
Bário	,896628	-,120962	-,210564	,144446	-,100087
Cobre	-,015574	,974078	-,135280	-,067761	,067584
Cromo	,913282	,002530	,141064	-,043225	,073855
Ferro	-,102669	,044235	,034337	-,002487	-,929987
Manganês	-,130227	,111354	-,106210	-,098187	-,876025
Sílica	,397912	-,018276	,622994	,306242	-,035936
Var. Expl.	3,670354	2,855512	2,829125	2,925860	2,057789
Prop. do total	,215903	,167971	,166419	,172109	,121046

Observação: os valores em vermelho representam as variáveis que melhor explicam os fatores.

Tabela 6.2 A variância total explicada : Componentes Principais.

Fator	Eigenvalor	% total Variância	Eigenvalor Acumulada	% Acumulada
1	4,855476	28,56163	4,85548	28,56163
2	2,836057	16,68269	7,69153	45,24431
3	2,637057	15,51210	10,32859	60,75642
4	2,275906	13,38768	12,60450	74,14410
5	1,734143	10,20084	14,33864	84,34494

6.1.1 Fator 1 – Associado às rochas cálcio-magnesianas e máficas.

O fator 1 está representado por uma associação linear positiva entre as variáveis: dureza, magnésio, bário e cromo nas águas subterrâneas, evidenciando uma provável influência das rochas paraderivadas constituída por minerais cálcio-magnesianos associada aos tipo máficos metamorfisados. São águas classificadas no capítulo anterior como mistas do ponto de vista catiônico e que apresentam uma relação iônica do tipo $rMg > rCa > rNa$.

A dureza é uma das variáveis que melhor representa esse fator nas águas subterrâneas do Alto Cristalino de Salvador, tendo sido definida em função do teor de cálcio e magnésio. Apresentou um valor médio de 74,4 mg/L (**Tabela 6.3**), podendo variar probabilisticamente entre 55,0 e 93,7 mg/L, estando, portanto, bem abaixo do valor máximo permitido pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde. Como o valor da assimetria estatística é alto ($A_3=1,4$), aconselha-se adotar a mediana (64,1 mg/L) como o valor para a área (**Tabela 6.3**). O valor mínimo encontrado foi de 15,8 mg/L e o máximo de 221,1 mg/L caracterizando uma dureza tipo branda até muito dura, segundo a classificação de Custódio & Llamas (1983), in Feitosa & Manoel Filho (1997). Apresenta fortes correlações lineares com o cálcio ($r=0,90$) e magnésio ($r=0,85$) (**Tabela 6.4**) e sua distribuição geoquímica apresenta valores crescentes em direção aos bairros da Barra e Graça em áreas onde ocorrem as rochas paraderivadas alumino-magnesianas, diminuindo em direção norte da cidade (**Figura 6.1**).

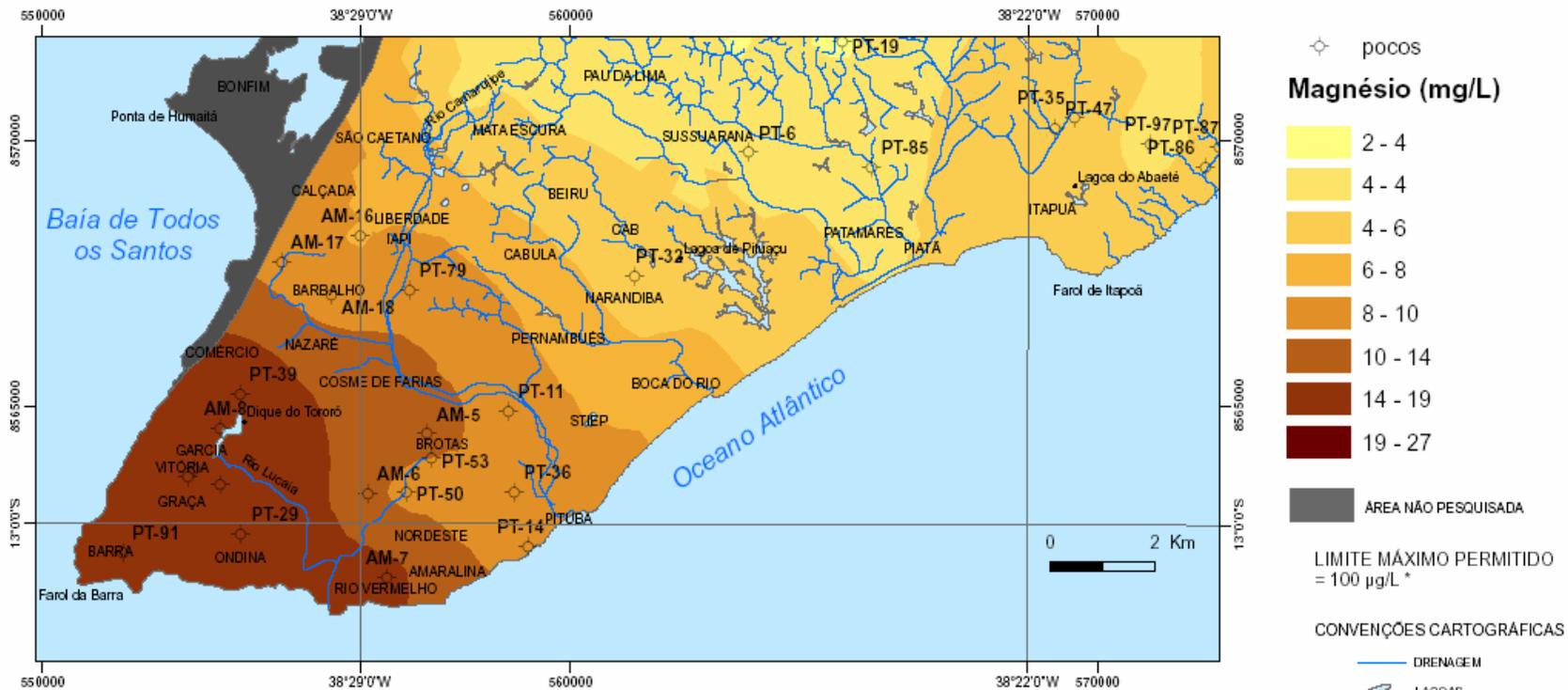
O magnésio é a segunda variável mais importante que define o fator 1, apresentando um valor mínimo de 2,33 e um máximo de 26,60 mg/L, com uma média de 9,09 mg/L (**Tabela 6.3**), situando-se bem abaixo do limite máximo permitido pela Organização Mundial de Saúde (1981) que é de 50 mg/L. Seu alto valor de assimetria ($A_3 = 1,37$) sugere, também, a adoção do valor da mediana (6,53 mg/L) para a média da área. Apresenta excelente correlação linear com os valores da dureza ($r=0,85$), do bário ($r=0,78$) e do cromo ($r = 0,77$) (**Tabela 6.4**), compondo assim com essas duas últimas variáveis o fator 1 (**Tabela 6.1**). A sua distribuição geoquímica apresenta valores crescentes em direção aos bairros da Barra e Graça e diminuindo em direção ao norte do município (**Figura 6.2**). A crescente concentração



FONTE: Base Cartográfica modificada de : Barbosa, et al.2004
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005
 * Resolução 518/2004 Ministério da Saúde (MS)

FIGURA 6.1 - DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA DA DUREZA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE SALVADOR-BA





FONTE: Base Cartográfica modificada de : Barbosa, et al. 2004
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005
 * Portaria 518/2004 Ministério da Saúde.

FIGURA 6.2 - DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA DO MAGNÉSIO NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE SALVADOR-BA

Tabela 6.3 Sumário Estatístico das variáveis analisadas.

Variável	pH	Eh	T	CE	STD	OD	OD	SAL	COR	TURB
Unidade	---	mV	°C	µS/cm	mg/L	Mg/L	%	mg/L	UH	UNT
Média	6,00	189,81	28,28	407,03	219,09	2,35	30,47	0,01	16,00	13,87
Erro padrão	0,15	17,81	0,28	31,08	16,32	0,20	2,57	0,01	5,57	6,92
Mediana	6,00	206,50	28,10	426,50	210,80	2,25	29,00	0,00	1,50	0,43
Desvio padrão	0,83	100,74	1,58	175,83	92,31	1,11	14,54	0,03	31,53	39,17
Coef. de Variação (%)	13,87	0,53	5,58	43,20	42,13	47,16	47,73	315,89	197,05	282,43
Variância da amostra	0,69	10149,32	2,49	30917,64	8521,28	1,23	211,43	0,00	994,00	1534,49
Curtose	-0,04	0,89	12,51	-1,03	-0,91	-0,53	0,15	7,00	6,16	16,71
Assimetria	0,29	-0,28	2,81	-0,11	0,17	0,56	0,74	2,93	2,49	3,92
Intervalo	3,80	501,00	9,50	580,00	336,00	4,29	60,90	0,10	132,00	197,86
Valor Mínimo	4,20	-59,00	25,80	120,00	65,70	0,61	8,40	0,00	1,00	0,14
Valor Máximo	8,00	442,00	35,30	700,00	401,70	4,90	69,30	0,10	133,00	198,00
Soma	191,90	6074,00	905,00	13025,00	7011,00	75,25	974,90	0,30	512,00	443,83
Número de amostras	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
Nível de confiança (95%)	0,30	36,32	0,57	63,39	33,28	0,40	5,24	0,01	11,37	14,12

µg/L = micrograma / litro mg/L = miligrama / Litro

Variável	SS	Alcalinidade	Dureza	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl
Unidade	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	Mg/L	Mg/L	Mg/L	mg/L	mg/L
Média	12,79	48,39	74,39	14,80	9,09	48,39	4,78	59,03	19,96	57,28
Erro padrão	9,95	8,02	9,48	2,37	1,19	6,14	0,47	9,79	2,63	5,05
Mediana	0,80	31,75	64,12	9,95	6,53	38,70	4,95	38,70	15,55	53,35
Desvio padrão	56,31	45,38	53,62	13,43	6,74	34,75	2,64	55,37	14,90	28,55
Coef. de Variação (%)	440,34	93,77	72,07	90,73	74,20	71,82	55,24	93,79	74,64	49,85
Variância da amostra	3170,62	2059,38	2874,72	180,32	45,46	1207,81	6,97	3065,39	222,04	815,17
Curtose	31,38	-0,09	1,88	0,16	1,03	1,20	0,24	-0,09	0,26	1,23
Assimetria	5,58	1,03	1,41	1,11	1,37	1,35	0,70	1,03	1,13	1,12
Intervalo	320,00	148,40	205,37	45,00	24,27	129,12	10,00	181,00	50,10	116,90
Valor Mínimo	0,00	0,00	15,81	1,00	2,33	9,88	1,00	0,00	5,00	20,10
Valor Máximo	320,00	148,40	221,17	46,00	26,60	139,00	11,00	181,00	55,10	137,00
Soma	409,20	1548,60	2380,50	473,60	290,75	1548,48	152,90	1889,03	638,85	1832,90
Número de amostras	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00
Nível de confiança(95%)	20,30	16,36	19,33	4,84	2,43	12,53	0,95	19,96	5,37	10,29

µg/L = micrograma / litro mg/L = miligrama / Litro

Tabela 6.3 Sumário Estatístico das variáveis analisadas – Continuação.

Variável	NH3	NO2	NO3	PO4	Al	As	Ba	Cd	Co	Cu
Unidade	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	(µg/L)	µg/L	(µg/L)	(µg/L)	µg/L
Média	0,42	0,01	8,24	0,16	87,67	3,33	136,38	0,07	31,56	4,66
Erro padrão	0,13	0,00	1,50	0,07	36,36	1,00	20,74	0,00	0,79	0,50
Mediana	0,14	0,01	4,60	0,05	28,65	2,00	96,55	0,06	30,00	4,00
Desvio padrão	0,73	0,03	8,49	0,39	205,67	5,64	117,30	0,02	4,48	2,85
Coef. de Variação (%)	172,65	201,89	102,93	247,25	234,60	169,21	86,01	32,53	14,19	61,14
Variância da amostra	0,53	0,00	72,00	0,15	42299,09	31,78	13760,24	0,00	20,06	8,10
Curtose	10,78	16,78	1,00	13,31	26,76	27,21	0,94	13,24	9,43	29,74
Assimetria	3,22	3,97	1,14	3,79	5,02	5,11	1,32	3,44	3,05	5,38
Intervalo	3,35	0,14	32,50	1,65	1162,30	31,10	417,00	0,11	20,00	16,00
Valor Mínimo	0,10	0,01	0,50	0,05	7,70	2,00	38,00	0,06	30,00	4,00
Valor Máximo	3,45	0,14	33,00	1,70	1170,00	33,10	455,00	0,17	50,00	20,00
Soma	13,52	0,43	263,80	5,00	2805,40	106,60	4364,10	2,22	1010,00	149,00
Número de amostras	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00
Nível de confiança (95%)	0,26	0,01	3,06	0,14	74,15	2,03	42,29	0,01	1,61	1,03

µg/L = micrograma / litro mg/L = miligrama / Litro

Variável	Cr	Fe	F	Mn	Hg	Ni	SiO2	V	Zn
Unidade	µg/L	(µg/L)	mg/L	µg/L	µg/L	µg/L	Mg/L	µg/L	µg/L
Média	0,34	1252,10	0,21	213,15	0,25	31,56	20,08	0,85	19,29
Erro padrão	0,06	724,61	0,04	60,34	0,03	2,34	2,77	0,28	9,05
Mediana	0,24	57,55	0,10	75,85	0,20	30,00	14,00	0,30	3,70
Desvio padrão	0,37	4099,02	0,21	341,36	0,19	13,22	15,69	1,61	51,17
Coef. de Variação (%)	107,52	327,37	100,00	160,15	75,63	41,90	78,15	189,49	265,22
Variância da amostra	0,13	16801945,79	0,04	116525,45	0,04	174,90	246,12	2,59	2618,52
Curtose	4,30	25,39	8,09	8,06	5,39	-0,15	1,15	9,59	13,91
Assimetria	2,17	4,87	2,76	2,74	2,25	0,94	1,34	3,18	3,82
Intervalo	1,49	22556,20	0,90	1530,00	0,79	40,00	63,00	7,00	233,00
Valor Mínimo	0,08	13,80	0,10	20,00	0,08	20,00	1,00	0,30	3,00
Valor Máximo	1,57	22570,00	1,00	1550,00	0,87	60,00	64,00	7,30	236,00
Soma	10,93	40067,11	6,60	6820,80	8,10	1010,00	642,40	27,20	617,40
Número de amostras	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00
Nível de confiança (95%)	0,13	1477,85	0,07	123,07	0,07	4,77	5,66	0,58	18,45

µg/L = micrograma / litro mg/L = miligrama / Litro

de magnésio na região do bairro da Barra, Graça e Ondina elevam o índice de saturação, possibilitando a formação da clorita. No corpo humano o magnésio tem a função de converter o açúcar em energia, além de ser necessário para o bom funcionamento dos nervos e músculos. A deficiência desse elemento causa nervosismo e tremores e seu excesso é maléfico para a saúde humana provocando distúrbios intestinais (Santos, 1997 in Feitosa & Manoel Filho, 1997).

6.1.2 Fator 2 – Associado às partículas sólidas produzidas pelos poços tubulares

A turbidez juntamente com os sólidos em suspensão e o cobre compõem as variáveis que melhor definem o fator 2 (**Tabela 6.1**). Por se tratar de aquíferos constituídos pelas coberturas formadas por materiais friáveis muitas vezes sílticos-argilosos, sobrepostas embasamento cristalino fissural, é de se esperar uma maior quantidade de sólidos em suspensão e uma maior turbidez na água, principalmente em poços tubulares e cacimbas mal construídas e com problemas de manutenção. O maior escore fatorial foi obtido no poço tubular do Condomínio Solar Caminho das Árvores (PT-11) que já apresentava valores de turbidez acima do permitido pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde na época da coleta de água. O cobre está provavelmente associado por adsorção ou absorção às partículas finas, representando na realidade uma contaminação antrópica.

A turbidez média no Alto Cristalino de Salvador é de 13,9 UNT podendo variar probabilisticamente de 0 a 28,0 UNT, considerando-se um intervalo de confiança de 95% e $n = 32$ (**Tabela 6.2**). Como o valor da assimetria é muito alto ($A_3 = 3,92$) preferiu-se considerar o valor da mediana de 0,4 UNT (**Tabela 6.3**) como o valor médio da turbidez para toda a área. Todavia, em cerca de 22,5% dos pontos amostrados os valores estão acima do limite máximo recomendado pela Portaria 518/2004. Os maiores responsáveis pelos altos valores da turbidez são os sólidos em suspensão, conforme está refletida no alto coeficiente de correlação linear ($r = 0,90$) (**Tabela 6.4**). A alta turbidez está associada também a problemas de manutenção dos poços tubulares PT-11 (Condomínio Solar Caminho das Árvores), PT-85 (Adelba), PT-1 (Acrece), PT-6 (Colégio Dom Bosco), PT-97 (Condomínio Angra dos Reis) e PT-54 (Parque de Exposição Agropecuária).

Os sólidos em suspensão são formados principalmente por silte e argila determinadas em laboratório, depois de seca e pesada em mg/L. Não é muito comum na água subterrânea, sobretudo quando os poços tubulares são bem construídos, com um bom acabamento e pleno funcionamento. Apenas dois pontos (Solar Caminho das Árvores, PT-11 e Acrece, PT-1) apresentaram valores acima do

recomendado pelo padrão de qualidade utilizado pelo Instituto Nacional de Águas de Portugal (INAG) que é de 25,0 mg/L, devido a possíveis problemas com o pré-filtro, filtros ou com a soleira em torno da boca do poço.

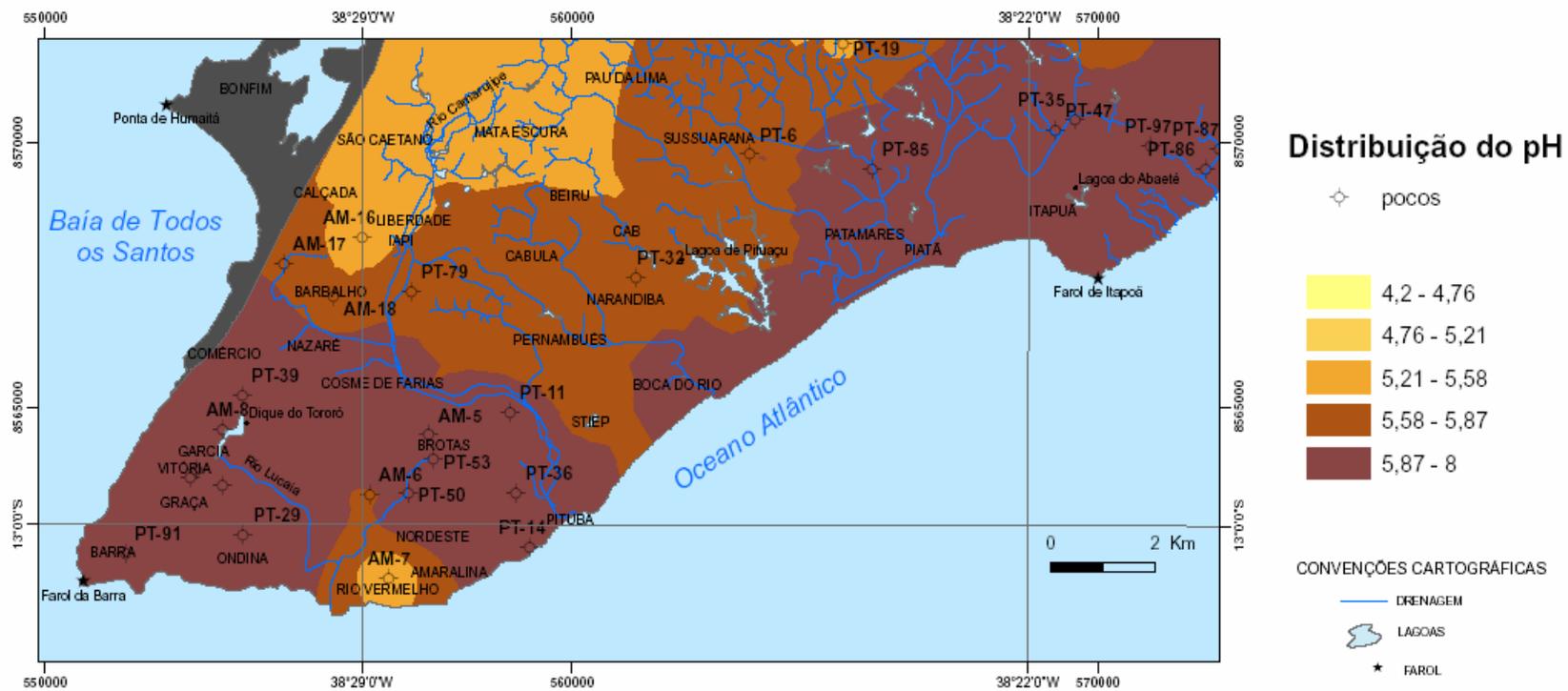
6.1.3 Fator 3 – Associado à variação do bicarbonato e do pH

O fator 3 foi definido pelas variáveis pH, bicarbonato e o alumínio (**Tabela 6.1**), devido a influência direta do pH sobre o bicarbonato e inversa sobre o alumínio, controlando a mobilidade e a dispersão dessas duas variáveis. Em condições alcalinas e oxidantes a água apresenta maior quantidade de bicarbonatos dissolvidos e menor de alumínio devido a precipitação desse último nessas condições redox. O alumínio solubiliza-se em condições extremas de acidez e basicidade.

Na região os valores de pH estão de um modo geral dentro da faixa recomendada pelos padrões de potabilidade usualmente utilizados, oscilando na região entre 4,2 e 8,0, com uma média de 6,0 (**Tabela 6.3**). Essa média pode variar probabilisticamente entre 5,7 e 6,3 considerando-se um intervalo de confiança (IC) de 95% e $n = 32$ amostras. O pH apresenta uma forte correlação linear com o bicarbonato, com um coeficiente (r) superior a 0,70 (**Tabela 6.4**). Segundo a literatura específica, valores de pH fora da faixa recomendada podem alterar o sabor da água e contribuir para a corrosão dos sistemas de distribuição, ocorrendo com isso, uma possível extração de ferro, cobre, chumbo, zinco e cádmio dificultando a descontaminação da água (Ambienteonline, 2003). O modelamento geoquímico do pH mostrou um crescimento dos seus valores em direção a orla atlântica leste e sul e, também, em direção à Baía de Todos os Santos (**Figura 6.3**).

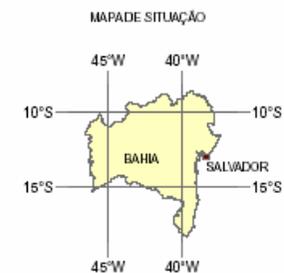
O bicarbonato apresenta uma média de 59,03 mg/L (**Tabela 6.3**), podendo variar probabilisticamente de 39,07 a 79,0 mg/L. Com isto, está dentro dos padrões normais de potabilidade segundo o padrão de qualidade das águas adotado pela Organização Mundial da Saúde (1981), cujo valor máximo permitido é de 500 mg/L. O modelamento geoquímico do bicarbonato mostrou valores crescentes do seu teor em direção à orla atlântica, especialmente na ponta sul entre os bairros da Barra, Graça e a Pituba (**Figura 6.4**).

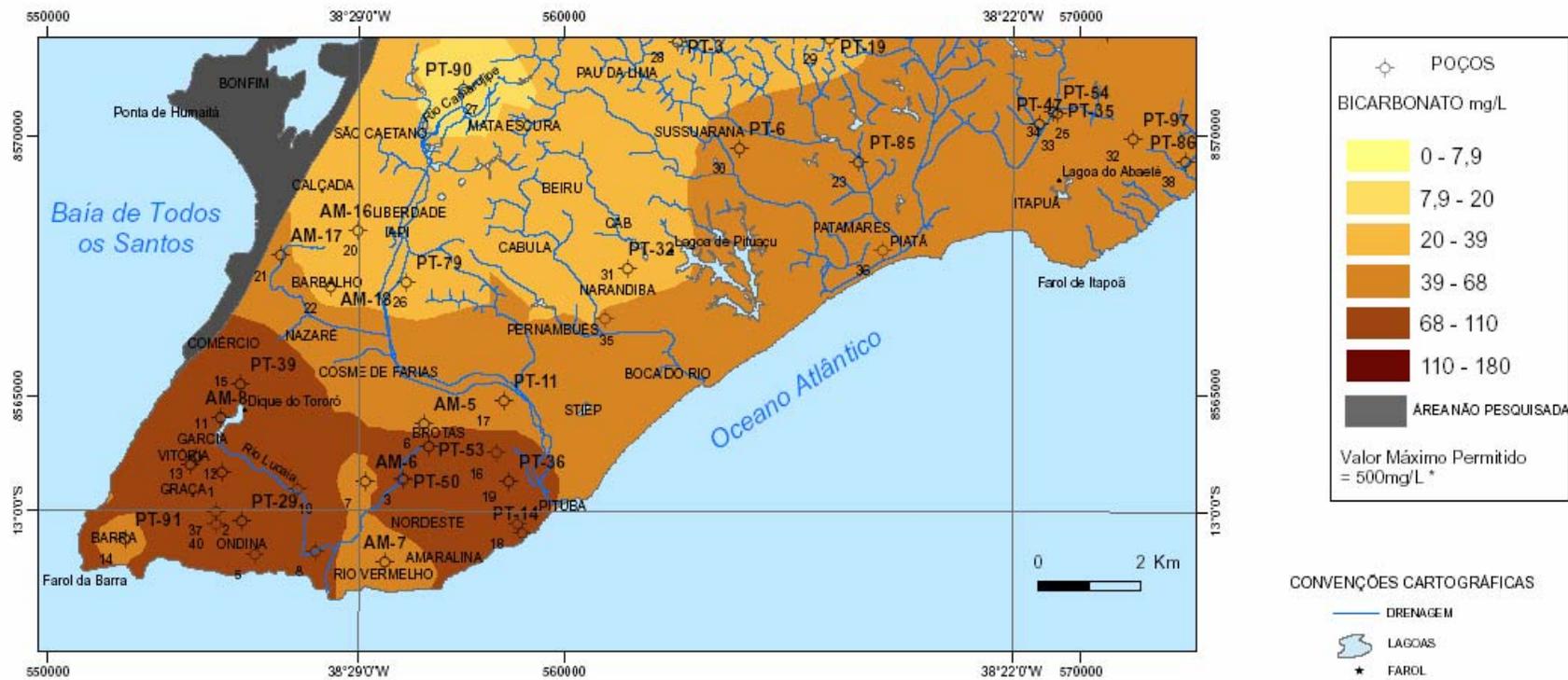
O alumínio apresenta dois pontos com valores acima do recomendado pela Portaria 518/2004, ou seja, 200 µg/L. Isto foi identificado nos locais denominados de Chácara Celeste (AM-7), no Vale das Pedrinhas e Fonte da Pedreira (AM- 21) no bairro da Cidade Nova, justamente onde a população utiliza freqüentemente baldes de metal, alguns deles de alumínio. Existem registros de moderados valores de coeficientes de correlação linear com o nitrato ($r = 0,59$) e amônia ($r = 0,69$) (**Tabela 6.4**),



FONTE: Base Cartográfica modificada de : Barbosa, et al. 2004
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005
 * Portaria 518/2004 Ministério da Saúde.

FIGURA 6.3 - DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA DO PH NO ALTO CRISTALINO DE SALVADOR-BA





FONTE: Base Cartográfica modificada de : Barbosa, et al.2004
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005
 * Organização Mundial da Saúde - (OMS)

FIGURA 6.4 - DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA DO BICARBONATO NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE SALVADOR-BA

Tabela 6.4 Matriz de Correlação de Pearson.

	pH	CE	Turb.	SS	Dureza	Ca	Mg	Na	K	HCO3	SO4	Cl	NH3	NO3	Al	Ba	Cd	Cr	Fe	F	Mn	Ni	SiO2	
pH	1,00																							
CE	0,25	1,00																						
Turb.	-0,05	-0,19	1,00																					
SS	0,01	-0,14	0,90	1,00																				
Dureza	0,36	0,56	-0,25	-0,11	1,00																			
Ca	0,41	0,43	-0,29	-0,16	0,90	1,00																		
Mg	0,20	0,57	-0,13	-0,03	0,85	0,52	1,00																	
Na	0,14	0,74	-0,01	-0,08	-0,08	-0,18	0,06	1,00																
K	0,11	0,55	-0,20	-0,17	0,53	0,67	0,22	0,19	1,00															
HCO3	0,72	0,46	-0,04	-0,05	0,37	0,31	0,34	0,42	0,21	1,00														
SO4	-0,01	0,57	-0,02	-0,07	0,15	0,22	0,01	0,55	0,63	0,11	1,00													
Cl	-0,10	0,79	-0,01	-0,05	0,13	-0,05	0,30	0,82	0,20	0,12	0,51	1,00												
NH3	-0,27	0,10	0,10	0,17	-0,02	-0,11	0,09	0,00	-0,08	-0,19	-0,23	0,15	1,00											
NO3	-0,39	0,39	-0,24	-0,17	0,31	0,19	0,38	0,18	0,27	-0,23	0,16	0,41	0,26	1,00										
Al	-0,44	0,32	-0,12	-0,07	0,06	-0,08	0,22	0,20	0,03	-0,27	-0,04	0,38	0,69	0,59	1,00									
Ba	-0,17	0,44	-0,18	-0,14	0,61	0,32	0,78	0,00	0,18	0,02	-0,07	0,32	0,10	0,45	0,37	1,00								
Cd	-0,23	0,10	-0,07	-0,08	-0,09	-0,18	0,06	0,23	-0,04	-0,08	-0,03	0,26	0,34	0,64	0,36	-0,01	1,00							
Cr	0,14	0,36	-0,12	-0,03	0,72	0,52	0,77	-0,12	0,20	0,21	-0,13	0,15	-0,08	0,21	-0,02	0,79	-0,09	1,00						
Fe	-0,18	-0,22	0,43	0,03	-0,28	-0,28	-0,20	-0,02	-0,14	-0,04	0,01	-0,02	-0,07	-0,23	-0,11	-0,04	-0,08	-0,19	1,00					
F	0,27	0,38	-0,06	-0,09	-0,06	0,09	-0,22	0,52	0,32	0,32	0,48	0,24	-0,07	-0,09	-0,11	-0,29	0,04	-0,22	-0,06	1,00				
Mn	-0,27	-0,35	0,37	0,10	-0,35	-0,39	-0,21	-0,12	-0,30	-0,12	-0,08	-0,12	0,04	-0,10	0,02	-0,09	0,07	-0,22	0,76	-0,16	1,00			
Ni	0,19	0,43	-0,20	-0,16	0,34	0,18	0,44	0,31	0,29	0,44	0,17	0,27	0,24	0,28	0,20	0,26	0,49	0,22	-0,16	-0,07	-0,15	1,00		
SiO2	0,44	0,38	-0,05	-0,06	0,25	0,08	0,38	0,37	0,11	0,67	-0,06	0,13	-0,29	-0,11	-0,18	0,35	-0,04	0,48	-0,07	0,23	-0,15	0,25	1,00	

CE = Condutividade elétrica; Turb.= Turbidez; SS = Sólidos em Suspensão. **O nível de significância para $\alpha = 0,05$ e $n = 32$ é 0,349**

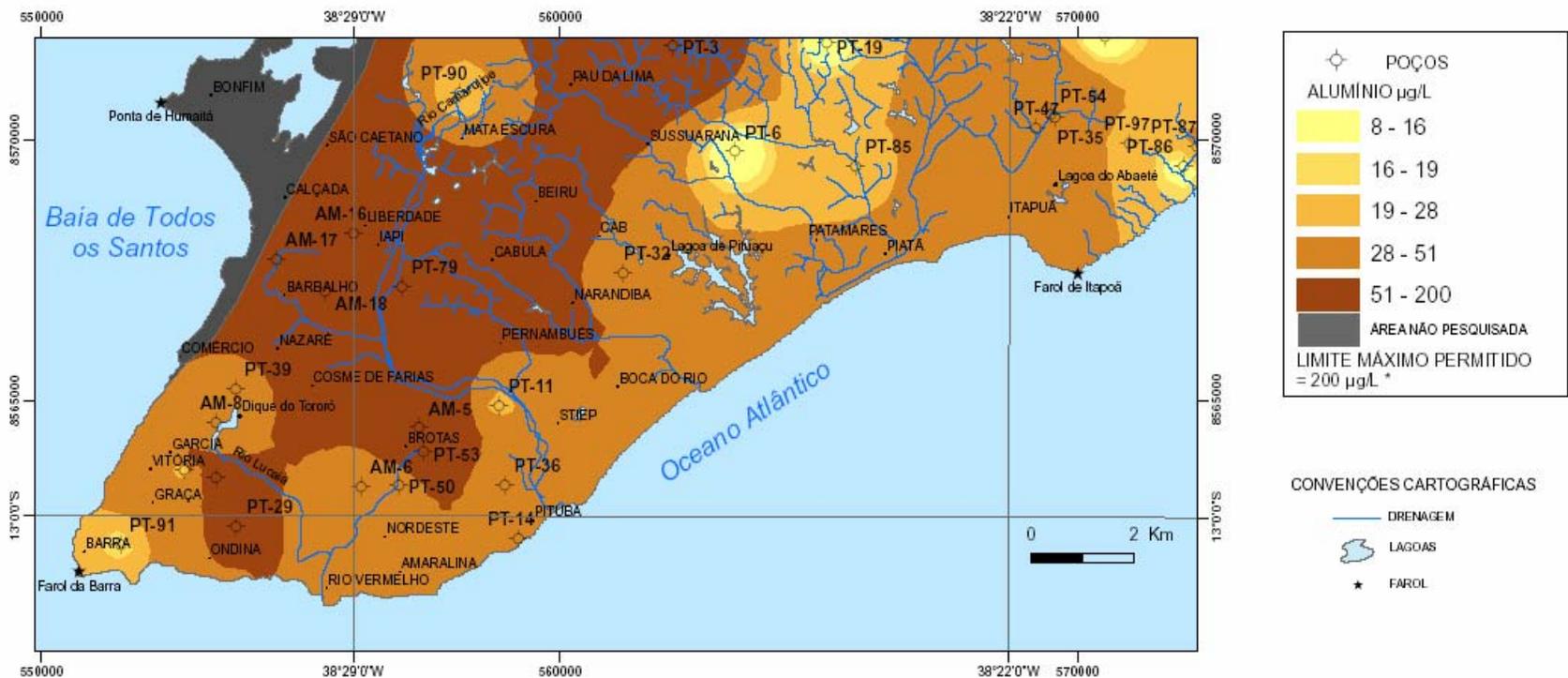
possivelmente devido às condições sanitárias existentes nas fontes e cacimbas, ou mesmo devido ao caráter álico (presença de alumínio trocável) na cobertura de regolito. A sua distribuição geoquímica na região assemelha-se ao nitrato, dispersando-se preferencialmente ao longo do planalto costeiro rebaixado (**Figura 6.5**). O alumínio é abundante nas rochas e minerais, sendo considerado um elemento fundamental na sua constituição. Nas águas naturais doces e marinhas, entretanto, não se encontra concentrações elevadas de alumínio, sendo esse fato decorrente da sua baixa solubilidade, precipitando-se ou sendo absorvido como hidróxido ou carbonato. Aparece nas frutas e em outros vegetais em concentrações superiores a 3,7 mg/kg e em alguns cereais, em quantidades maiores que 15 mg/kg. O total de alumínio na dieta normal é estimado de 10 a 100mg/dia. Pequenas quantidades de alumínio do total ingerido são absorvidas pelo aparelho digestivo e quase todo o excesso é evacuado nas fezes. O total de alumínio presente no organismo adulto é da ordem de 50 a 150 mg. Não é considerado tóxico ou prejudicial à saúde, tanto que não está incluído em determinados padrões de qualidade de águas para abastecimento público.

6.1.4 Fator 4 – Associado à influência marinha

O fator 4 está representado por uma relação direta e positiva entre as variáveis condutividade elétrica, sódio e cloretos (**Tabela 6.1**). A sua relação com as águas cloretadas sódicas, muito abundantes na região, é bastante evidente. A planície costeira que recebe influência direta do mar nas áreas de desembocadura de rios, principalmente nos períodos de maré alta, apresentam os maiores valores de cloreto, sódio e condutividade elétrica. Este fator pode expressar também uma influência da contaminação antrópica, já que os pontos que apresentaram os maiores escores são aqueles com forte impacto ambiental (Praça Baía Azul PT-50, Chácara Celeste AM-7, Esaex PT-36 e Adelba PT-85).

O sódio é a variável que apresenta o maior escore neste fator (**Tabela 6.1**). Os seus valores variam de 9,88 a 139,0 mg/L e apresenta uma média de 48,4 mg/L (**Tabela 6.3**), estando dentro dos padrões normais de potabilidade segundo a Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde (200,0 mg/L). Seu alto valor de assimetria ($A_3 = 1,35$) sugere a adoção do valor da mediana (38,7 mg/L) (**Tabela 6.3**) como valor médio para a área. Seu teor pode variar probabilisticamente de 35,8 a 60,9 mg/L, considerando um IC=95% e n=32 amostras. Apresenta excelentes coeficientes de correlação linear com a condutividade elétrica ($r = 0,74$) e com o cloreto ($r = 0,82$), conforme pode ser visto na **tabela 6.4**.

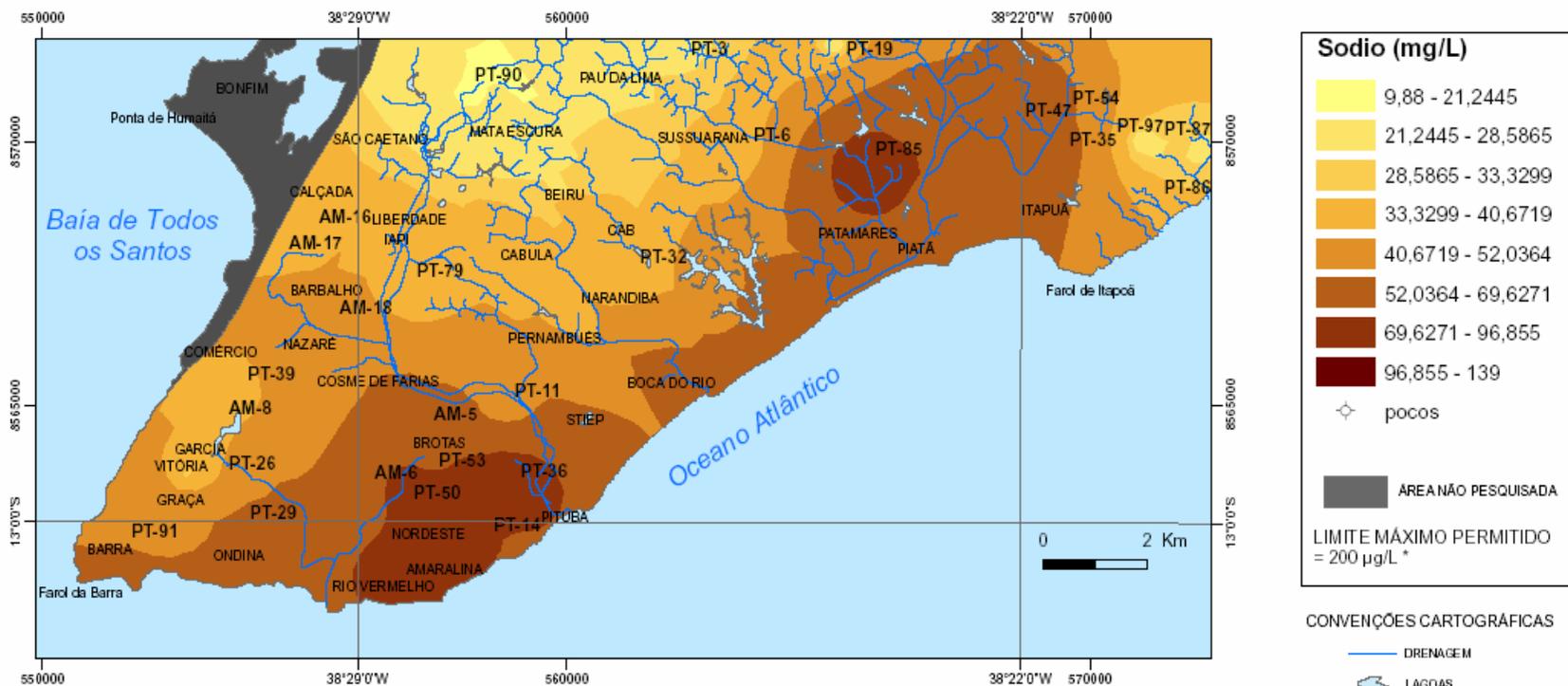
O modelamento cartográfico sódio mostra um aumento dos seus valores em direção à orla marítima entre os bairros do Rio Vermelho e a Boca do Rio e na área de influência do rio Jaguaribe próximo a sua foz (**Figura 6.6**). Além da forte influência do mar, o aumento gradativo do sódio nas águas subterrâneas pode ocorrer a partir da zona de recarga do aquífero seguindo o fluxo subterrâneo.



FONTE: Base Cartográfica modificada de : Barbosa, et al.2004
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005
 * Portaria 518/2004 Ministério da Saúde.

FIGURA 6.5 - DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA DO ALUMÍNIO NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE SALVADOR-BA



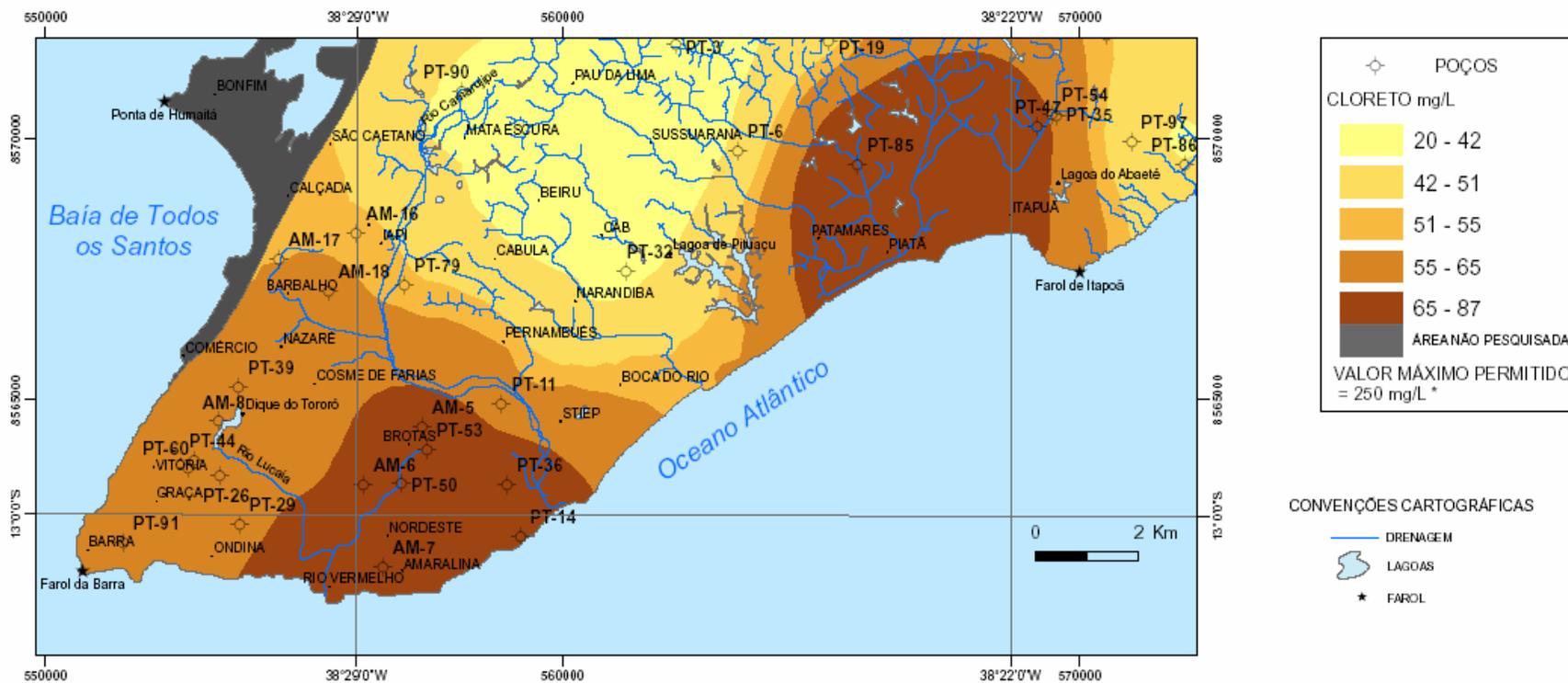


FONTE: Base Cartográfica modificada de : Barbosa, et al.2004
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005
 * Portaria 518/2004 Ministério da Saúde.

FIGURA 6.6 - DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA DO SÓDIO NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE SALVADOR-BA

O cloreto varia de 20,1 a 137,0 mg/L com uma média de 57,28 mg/L (**Tabela 6.3**), estando dentro dos padrões normais de potabilidade segundo a Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde, cujo limite máximo permitido é de 250 mg/L. Por apresentar uma assimetria estatística alta ($A_3 = 1,12$) aconselha-se a adoção do valor da mediana (53,35 mg/L) como o valor médio para a área. O cloreto apresenta forte coeficiente de correlação linear com a condutividade elétrica ($r=0,79$) e o sódio ($r=0,82$), conforme mostra a **Tabela 6.4**. O modelamento geoquímico do cloreto exibe uma grande semelhança com o sódio, embora existam valores maiores situados entre os bairros do Rio Vermelho e Boca do Rio, além da região próxima à foz do rio Jaguaribe (**Figura 6.7**).

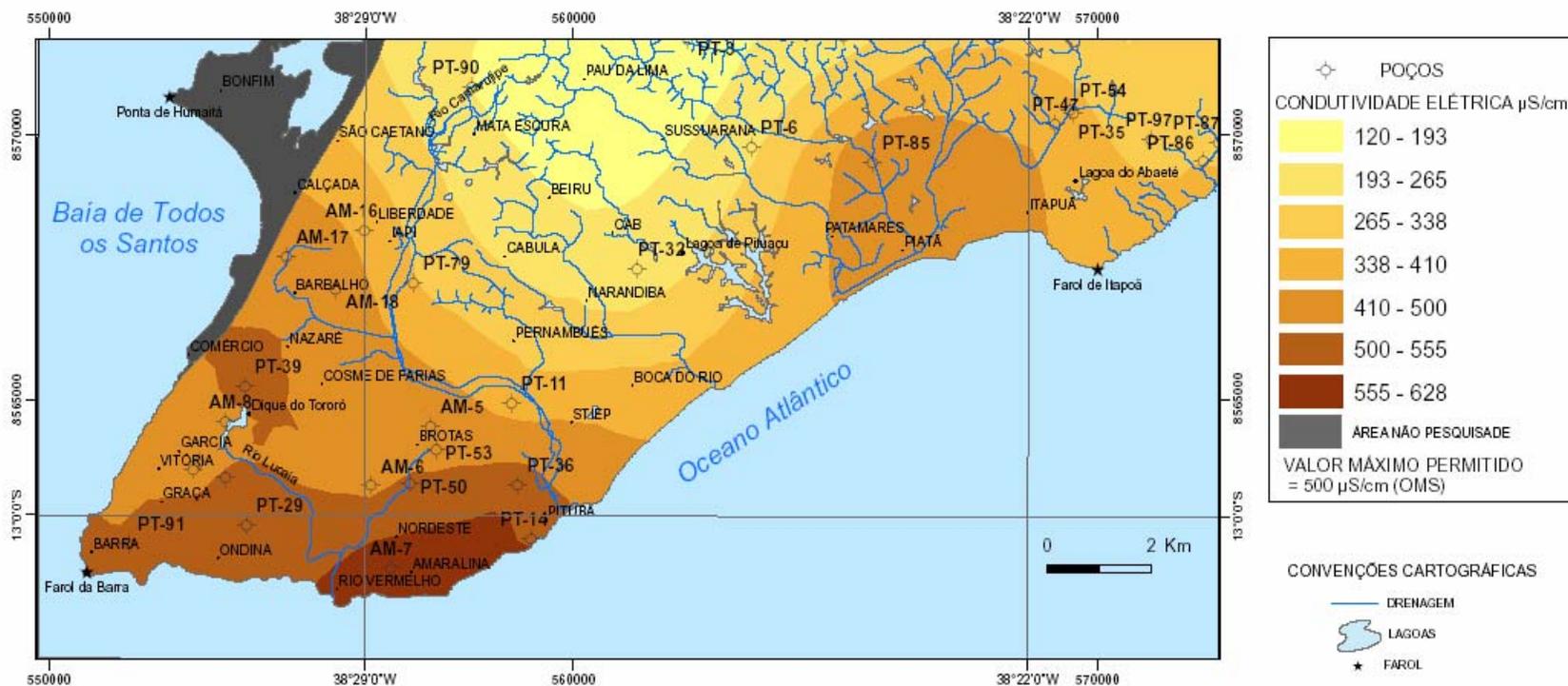
O valor médio da condutividade elétrica (CE) é de 407,03 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (**Tabela 6.3**) podendo oscilar para o conjunto da população entre 344 a 470 $\mu\text{S}/\text{cm}$. O sódio e o cloreto são os elementos que mais contribuem para a condutividade elétrica da água subterrânea, conforme mostram os altos valores do coeficiente de correlação linear. O modelamento cartográfico da condutividade elétrica indica uma tendência para o aumento dos seus valores na parte sul da cidade de Salvador não só entre os bairros da Barra e Boca do Rio, mas também próximo a desembocadura do rio Jaguaribe (**Figura 6.8**). Os baixos valores da condutividade elétrica mostram que de um modo geral, as águas subterrâneas não estão salinizadas na região, salvo em alguns poucos locais próximos ao mar. Estudos comparativos entre os valores da condutividade elétrica obtidos em janeiro/1999 – abril/2002 e novembro/2005 mostram uma variação inexpressiva na condutividade elétrica nessas águas subterrâneas, devido principalmente a sua grande renovação através de recarga pluviométrica que ocorre praticamente o ano inteiro (**Figura 6.9**).



FONTE: Base Cartográfica modificada de : Barbosa, et al.2004
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005
 * Portaria 518/2004 (MS)

FIGURA 6.7 - DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA DO CLORETO NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE SALVADOR-BA





FONTE: Base Cartográfica modificada de : Barbosa, et al.2004
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005
 * (Organização Mundial da Saúde - OMS)

FIGURA 6.8 - DISTRIBUIÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA ALTO CRISTALINO DE SALVADOR-BA



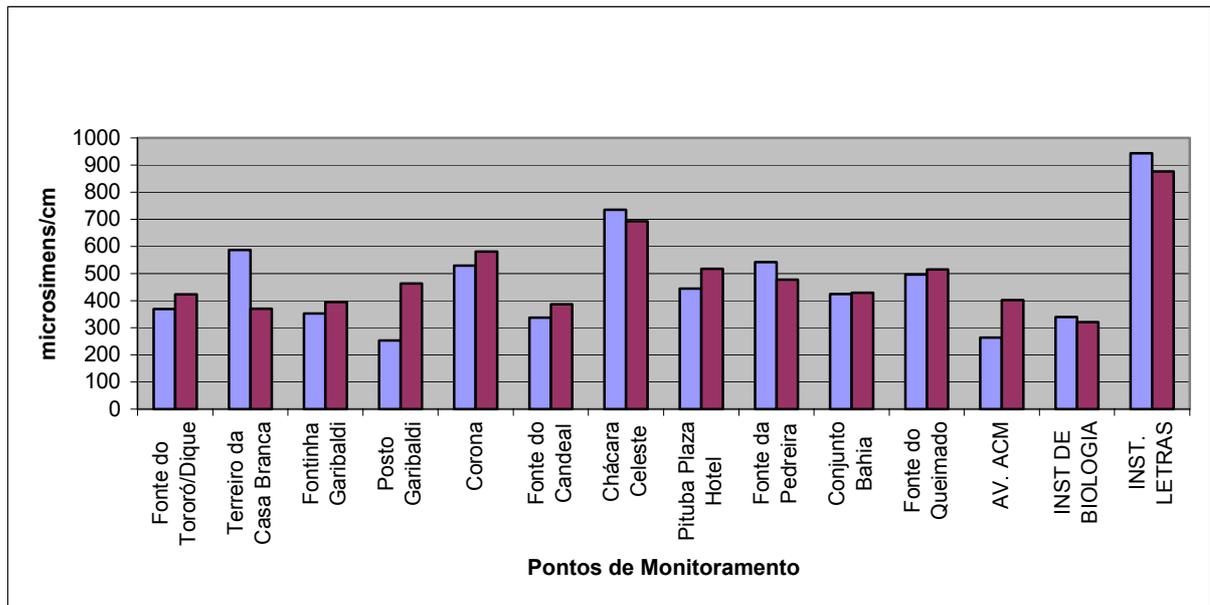


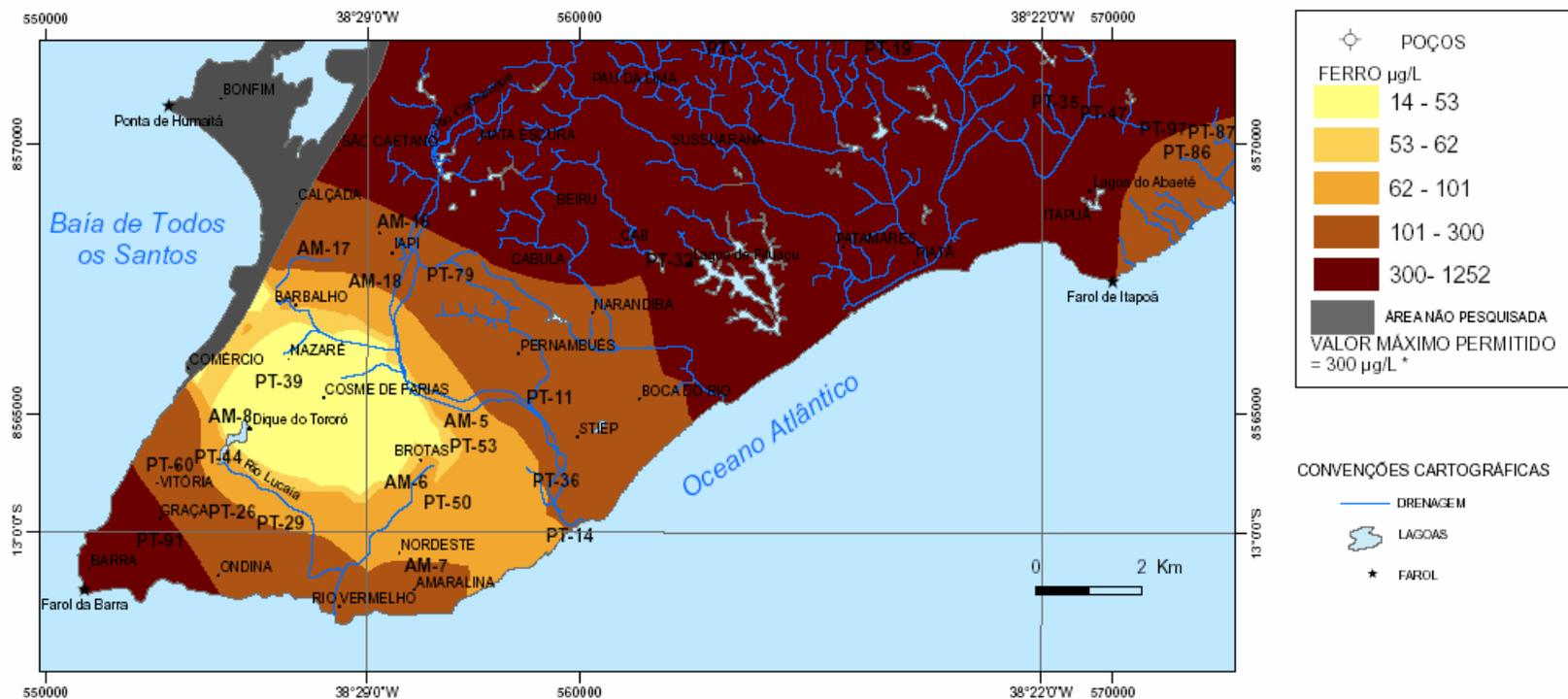
Figura .6.9 Monitoramento da Condutividade Elétrica (1999/2002 e 2005).

6.1.5 Fator 5 – Associado à alteração de rochas com minerais ferromagnesianos

O fator 5 é formado pela associação entre o ferro e o manganês, ambos presentes com frequência nas águas subterrâneas da região. Trata-se de um importante fator que expressa uma forte influência geogênica das litologias portadores de minerais ferromagnesianos, tais como, ortopiroxênio, anfibólio e biotita, entre outros, quando submetidos aos processos de intemperismo químico por hidrólise, hidratação e oxi-redução.

O ferro apresenta na água subterrânea em foco, um teor médio de 1.252,10 µg/L (**Tabela 6.3**), podendo variar de 13,80 a 22.570,0. Esse último pode ser considerado um valor espúrio (*outlie*), conseqüência de problemas com o poço tubular PT-1 (Acresce) que apresentou, no ato da coleta, muito sólido em suspensão, alta turbidez e cor avermelhada. Como conseqüência disso, o valor da assimetria encontrado foi muito alto ($A_3 = 4,87$) (**Tabela 6.3**), sendo, portanto, mais prudente considerar o valor da mediana (58 µg/L) como o valor médio para toda a área, isto porque ela não é influenciada pelo valor excepcionalmente alto do ponto PT-1. Em vários pontos da área estudada (PT-1, PT-6, PT-54, PT-85, PT-90 e PT-91) o ferro apresentou valores acima do recomendado pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde que é de 300 µg/L.

O ferro apresenta significativos valores de coeficientes de correlação linear com o manganês ($r=0,76$) e com o zinco ($r=0,72$) (**Tabela 6.4**). É comum e natural a existência de elevados teores desse metal dissolvido na água sob a forma de Fe^{2+} , principalmente em regiões de clima tropical úmido e quando as condições de pH e Eh são favoráveis. O modelamento geoquímico indica uma tendência de maior



FONTE: Base Cartográfica modificada de : Barbosa, et al. 2004
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005
 * Portaria 518/2004 Ministério da Saúde.

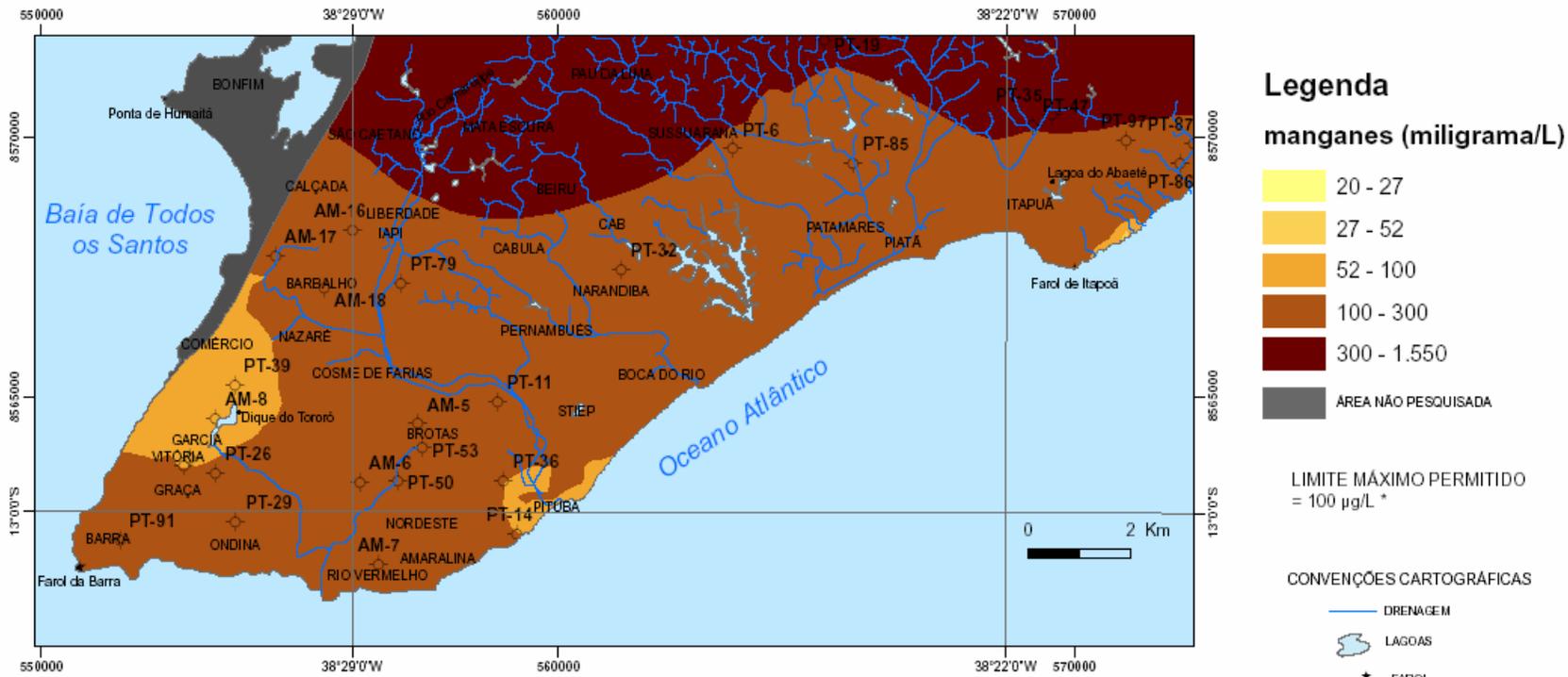
FIGURA 6.10 - DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA DO FERRO TOTAL NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE SALVADOR-BA



concentração de ferro dissolvido na água em direção a parte norte de Salvador e na ponta do Farol, no bairro da Barra (**Figura 6.10**). Segundo a literatura específica, quando este elemento apresenta concentrações acima de 300 µg/litro, podem manchar as louças sanitárias e roupas durante a sua lavagem. Apesar de o organismo humano necessitar de 19 mg/Kg/dia, os estudos toxicológicos e epidemiológicos sugerem que uma água de abastecimento público para consumo humano, não ultrapasse 300 µg/litro de ferro, que é o valor máximo recomendado pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde. Este limite foi estabelecido também em função de problemas estéticos relacionados á presença desse metal na água e do sabor de ferrugem, fazendo o consumidor recusá-la. O teor alto de ferro no organismo humano pode ser responsável pela formação de radicais livres, muitos dos quais carcinogênicos. Também a sua presença na água favorece o aparecimento de microorganismos patogênicos que necessitam de ferro para se desenvolver, notadamente com o crescimento de ferrobactérias as quais podem causar problemas para a saúde. É sabido que a sua presença influencia a absorção de cobre e chumbo no homem, podendo desencadear a chamada doença de Wilson e o nanismo, respectivamente.

O manganês apresenta uma variação de 20,0 a 1550,0 µg/L (Acrece, PT-01), com uma média de 213,15 µg/L (**Tabela 6.3**). Como o valor da assimetria é muito alto ($A_3 = 2,74$) é mais prudente, também, se considerar o valor da mediana (75,85 µg/L) como o valor médio para a área. Probabilisticamente o valor do manganês pode variar de 90,0 a 336,0 µg/L considerando um intervalo de confiança (IC) de 95% e $n = 32$ amostras.

O manganês apresentou em 45,0% dos pontos amostrados, valores acima do limite máximo permitido pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde, que é de 100 µg/L. Vale destacar que esse elemento se mostra na área com um forte coeficiente de correlação com o ferro ($r = 0,76$) (**Tabela 6.4**). Sua distribuição geoquímica na água subterrânea se faz por quase todo o Alto Cristalino, principalmente na sua extremidade norte. Isto é devido aos processos pedogenéticos envolvendo minerais com manganês na sua constituição química e que estão presentes nas rochas do embasamento cristalino e, muito provavelmente, nos sedimentos da Formação Barreiras (**Figura 6.11**). O manganês normalmente apresenta-se dissolvido na água subterrânea de Salvador sob a forma de Mn^{2+} mas, quando atingem índices de saturação elevados, precipitam-se sob a forma de pirolusita (MnO_2), manganita ($MnOOH$) e hausmanita (Mn_3O_4), como já foi mencionado no **Capítulo anterior**. Pode-se notar que o comportamento do manganês nas águas é muito semelhante ao do ferro e sua ocorrência é também bastante disseminada na região. Ele desenvolve coloração negra na água, podendo se apresentar nos estados de oxidação Mn^{+2} (forma mais solúvel) e Mn^{+4} (forma menos solúvel). A concentração de manganês menor que 0,05 mg/L geralmente é aceitável em mananciais, devido ao fato de não ocorrerem, nesta faixa de concentração, manifestações de manchas negras ou depósito de seu óxido



FONTE: Base Cartográfica modificada de : Barbosa, et al.2004
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005
 * Portaria 518/2004 Ministério da Saúde.

FIGURA 6.11 - DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA DO MANGANÊS TOTAL NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE SALVADOR-BA



nos sistemas de abastecimento de água. O manganês também altera a cor e o sabor das águas quando atinge concentrações acima de 100 µg/litro. Também, assim como o ferro, se precipita sobre louças sanitárias, azulejos e roupas, manchando-as com uma tonalidade escura. O excesso de manganês na dieta alimentar impede a atuação do ferro na produção da hemoglobina do sangue. Em altas doses, causam apatia, irritabilidade, dores de cabeça, insônia e fraqueza nas pernas. Sintomas de distúrbios psicológicos podem aparecer, tais como a prática de atos compulsivos, ausência de memória, alucinações, agressividade e euforia desmedida. Em alguns casos, pode ocasionar o aparecimento de doença similar ao mal de Parkisson.

6.2 QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA CONSUMO HUMANO

As águas geralmente são consideradas potáveis quando podem ser consumidas pelo ser humano, sem ocasionar prejuízos à sua saúde. Os órgãos responsáveis pela saúde pública e o meio ambiente em todo o mundo vêm aperfeiçoando cada vez mais os padrões de potabilidade da água para consumo humano, em função do desenvolvimento das pesquisas, principalmente na área da toxicologia e da epidemiologia. Além disso, o avanço tecnológico dos equipamentos de análise laboratorial, cada vez mais precisos e rápidos na obtenção dos resultados, tem contribuído para o aperfeiçoamento do controle profilático das doenças que tem veiculação hídrica.

Para a avaliação da qualidade ambiental das águas subterrâneas coletadas e analisadas em Salvador em novembro de 2005, foram utilizados os valores estabelecidos pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde. No caso de omissão de alguns parâmetros na referida Portaria, utilizou-se a Resolução 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), da Organização Mundial da Saúde (in Chapman, 1997), U.S. Environmental Protection Agency (2005).

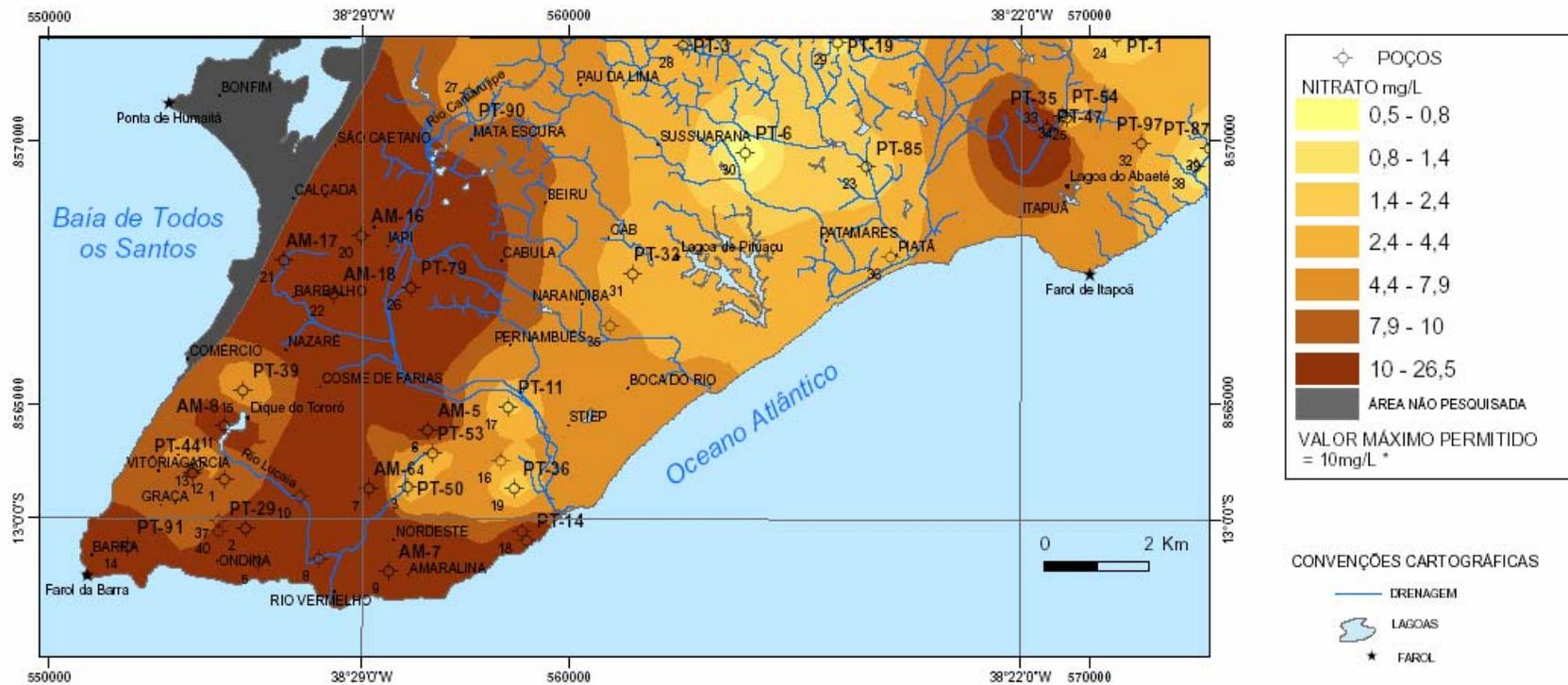
De um modo geral, das 42 variáveis analisadas (incluindo aquelas medidas no campo) e já mencionadas no **Capítulo 2** (Metodologia da Pesquisa), apenas o chumbo, estanho e o selênio não foram detectados em qualquer dos pontos amostrados, isto porque os seus valores situaram-se abaixo do limite inferior de detecção do método analítico utilizado (Quadro 2.2). O nível de detecção do nitrito foi de 25%, amônia 67,5%, nitrato 77,5%, ortofosfato 22,5%, arsênio 10%, cádmio 30%, cobalto 22,5%, cobre 12,5%, cromo 80%, flúor 40%, mercúrio 97,5%, níquel 62,5%, vanádio 20% e zinco em 62,5%. As demais variáveis analisadas foram identificadas em todos os 32 pontos de coleta de água subterrânea, portanto, tiveram um nível de detecção de 100%.

As variáveis que contribuem para a contaminação das águas subterrâneas no Alto Cristalino de Salvador e que apresentam, portanto, a maior incidência de valores acima do limite máximo permitido (LMP) segundo as normas e padrões de qualidade utilizados são: a **cor real** em 27,5% dos pontos amostrados, a **turbidez** (22,5%); os **sólidos em suspensão** (5,0%); o **potássio** (10,0%); a **amônia** (3,1%) além do **ortofosfato** (6,3%), **nitratos** (32,5%), e os **metais alumínio** (7,5%), **ferro** (15,0%), **manganês** (45,0%) e **níquel** (17,5%). Todas as outras variáveis analisadas na água subterrânea apresentaram valores normais de potabilidade segundo os padrões de qualidade utilizados, não contribuindo para a contaminação da água. A turbidez, os sólidos em suspensão, o alumínio, o ferro total e o manganês total já foram mencionadas e descritos anteriormente, enquanto que as demais estão descritas abaixo:

- A **cor real** é o resultado das substâncias dissolvidas na água subterrânea proveniente principalmente da lixiviação da matéria orgânica. Ela apresenta uma média de 16,0 Pt/L, podendo variar de 1 a 133Pt/L (**Tabela 6.3**). Todavia, deve-se ter em conta que 27,5% dos pontos amostrados apresentaram valores acima do tolerado pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde que é de 5,0 Pt/L, sendo, portanto, um dos mais fortes indicadores de poluição na área, muito provavelmente devido à problemas operacionais associados aos pontos de captação.
- Os valores de **potássio** variam de 1,0 a 11,0 mg/L com uma média de 4,78 mg/L (**Tabela 6.3**), estando abaixo do limite máximo permitido pela OMS (1981) que é de 10 mg/L, com exceção das águas da fonte do Queimado e da Pedreira. Nesses dois últimos casos os altos valores encontrados devem estar ligados à contaminação antrópica, já que se trata de área densamente ocupada pela população. O potássio apresenta um moderado coeficiente de correlação com o cálcio ($r=0,67$), conforme pode ser verificado na **Tabela 6.4**.
- Alguns valores pontuais acima do permitido para **amônia** e **ortofosfato** foram encontrados em poços perfurados nas dunas do Parque do Abaeté na região de Stella Mares (PT-86 e PT-87). Isso se dá provavelmente, em função dos sabões e saponáceos utilizados nos condomínios da região e pelas lavanderias de roupas situadas próximas às lagoas do Parque do Abaeté, numa região sem saneamento básico.
- Os **nitratos** se apresentam em níveis acima do recomendado pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde (10 mg/L-NO₃) em 13 pontos amostrados (32,5%). Apresentam uma média de 8,24 mg/L (**Tabela 6.3**) podendo variar de 5,2 a 11,3 mg/L considerando um intervalo de confiança (IC) probabilístico de 95% e n = 32 amostras. O valor mínimo encontrado foi de 0,5 mg/L e o máximo foi de 33,0 mg/L, este último numa cacimba localizada na Chácara Celeste (AM-7), no Vale das Pedrinhas, região do alto de Santa Cruz no Nordeste de Amaralina. A matriz de correlação linear (Pearson, 1901) registra um fraco valor negativo do nitrato com o pH ($r = - 0,41$)

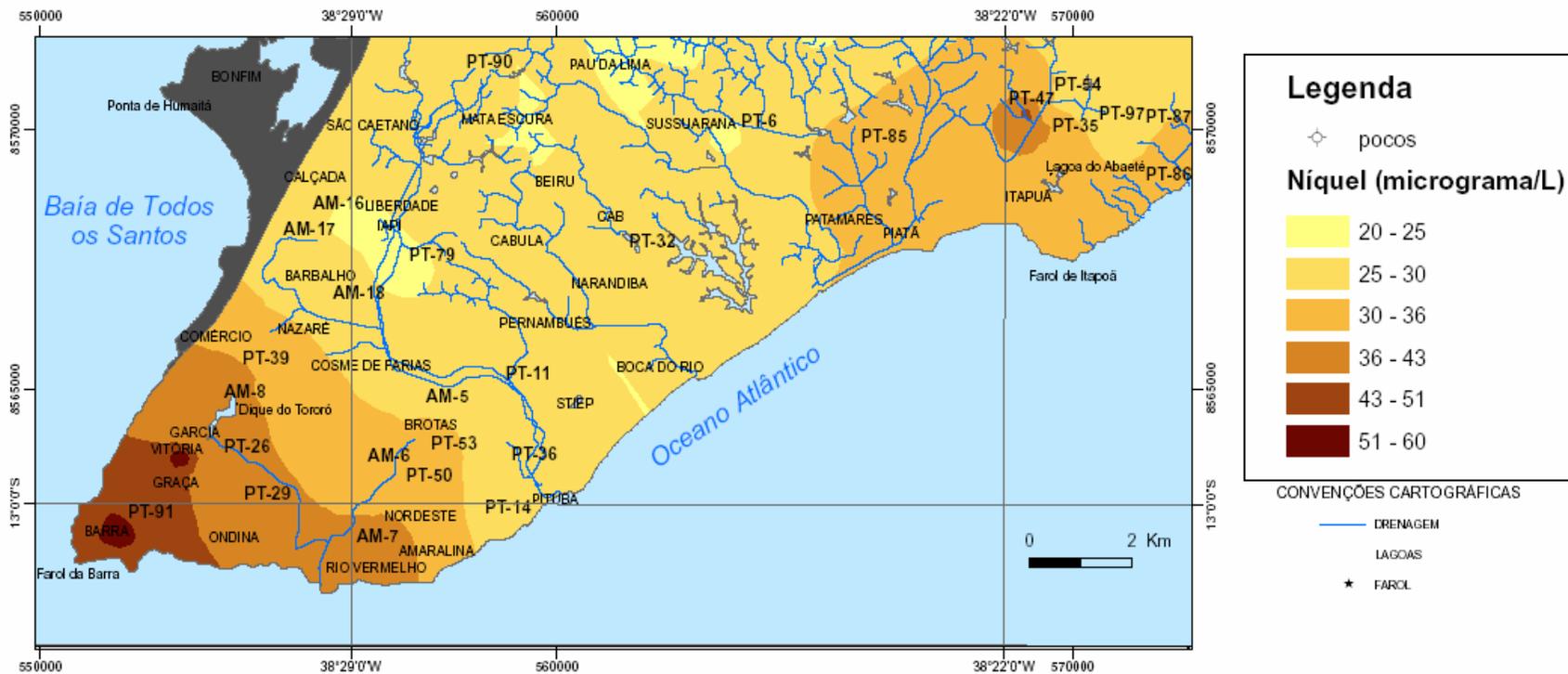
(**Tabela 6.4**), sugerindo que os locais com alto pH, podem apresentar baixos valores de nitrato ou vice-versa. Segundo a literatura específica, é normalmente o contaminante de ocorrência mais comum nos grandes centros urbanos devido principalmente às fossas domésticas, as latrinas e a rede de esgotos. A presença de compostos de nitrogênio nos seus diferentes estados de oxidação (amônia, nitrito e nitrato) é indicativa de contaminação do aquífero e de possíveis condições higiênico-sanitárias insatisfatórias. Essa falta de condições sanitárias foi observada principalmente em algumas fontes naturais e cacimbas (AM-5, 6, 7, 8, 16, 17 e 18), onde as condições higiênicas apresentam-se precárias. O modelamento geoquímico do nitrato mostra uma tendência para o aumento de teores nos bairros da Barra, Rio Vermelho e Pituba e, em direção ao centro da cidade (Nazaré, Barbalho, Liberdade, entre outros) onde certamente as redes de esgotos domésticos e urbanos são mais antigas, provavelmente encontrando-se mais deterioradas (**Figura 6.12**). Entretanto, ao analisarmos os pontos de captação que exibiram nitrato com valores acima do permitido pela Portaria 518/2004, verifica-se que os mesmos encontram-se espalhados por toda a cidade, principalmente em locais de fontes e cacimbas. O nitrito e o nitrato estão associados a dois efeitos adversos à saúde, quais sejam a indução à metemoglobinemia, especialmente em crianças, e a formação potencial de nitrosaminas e nitrosamidas carcinogênicas (Alaburda & Nishihara, 1998). A amônia está presente nas águas subterrâneas, sendo que usualmente sua concentração é bastante baixa devido à fácil adsorção pelas argilas do solo ou à oxidação para nitrito e nitrato. Entretanto, a ocorrência de concentrações elevadas pode ser resultante de fontes de poluição próximas, bem como da redução de nitritos por bactérias ou por íons ferrosos presentes nos solos.

- O **níquel** apresenta teores que variam de 20,0 a 60,0 $\mu\text{g/L}$ com uma média de 31,56 $\mu\text{g/L}$, podendo-se adotar, como nos demais casos, o valor da mediana de 30,0 $\mu\text{g/L}$ (**Tabela 6.3**), devido ao número relativamente alto da assimetria ($A_3 = 0,94$). Em cerca de 16% dos locais amostrados, a água subterrânea exibe valores iguais ou superiores a 50 $\mu\text{g/L}$ que é o máximo recomendado pelo padrão de qualidade adotado pela União Européia (Chapman & Kimstach, 1997). Esse níquel pode ser de origem geogênica ligado aos corpos máficos metamorfisados ou não encontrados no embasamento cristalino no Alto de Salvador. No ser humano, altas doses de níquel levam à intoxicação, afetando nervos, coração e sistema respiratório. Pode causar dermatites em pessoas sensíveis. Para a Organização Mundial da Saúde, o teor máximo permitido em águas de abastecimento é 20,0 $\mu\text{g/L}$ (Chapman & Kimstach, 1997) e para o Conama é de 25 $\mu\text{g/L}$. O modelamento geoquímico do níquel mostra um aumento das concentrações nos bairros da Barra e Graça com alguns valores superiores a 50,0 $\mu\text{g/L}$ (**Figura 6.13**). Este último valor é considerado pela CETESB como limite para uma intervenção no sistema de captação de água subterrânea.



FONTE: Base Cartográfica modificada de : Barbosa, et al.2004
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005
 * Resolução 518/2004 Ministério da Saúde (MS)

FIGURA 6.12 - DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA DO NITRATO NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE SALVADOR-BA



FONTE: Base Cartográfica modificada de : Barbosa, et al.2004
 Tema: Coleta de água subterrânea realizada em novembro/2005
 * CONAMA 357/2005

FIGURA 6.13 - DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA DO NÍQUEL NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DESALVADOR-BA



Outras variáveis que apresentaram valores normais e inferiores aos recomendados pelos padrões de qualidade utilizados nesse trabalho e que não caracterizaram fatorialmente qualquer influência nas águas subterrâneas do Alto Cristalino de Salvador, foram as seguintes:

- O **Eh** apresentou um valor médio de 189,8 mV (**Tabela 6.3**) podendo variar probabilisticamente de 153,5 a 226,1 mV, considerando-se um IC=95% e n=32 amostras. Em alguns locais o Eh da água foi negativo caracterizando um ambiente redutor encontrado normalmente em regiões de influência de zonas alagadiças ou de brejo. O Eh apresenta uma correlação linear positiva ($r = 0,55$) (**Tabela 6.4**) com os valores de oxigênio dissolvido, mostrando que em águas mais arejadas e oxigenadas o ambiente torna-se mais oxidante.
- O **oxigênio dissolvido** médio da área é de 2,35 mg/L (**Tabela 6.3**), considerado muito baixo, porém muito comum entre as águas subterrâneas, quase sempre inferiores a 5,0 mg/L. Através da medição do teor de oxigênio dissolvido podem ser avaliados os efeitos da influencia na água subterrânea da rede de esgotos domésticos e urbanos. O oxigênio dissolvido nas águas naturais de superfície provém da atmosfera, devido à diferença de pressão parcial entre ambas. Segundo Piveli (1997), este mecanismo é regido pela Lei de Henry, que define a concentração de saturação de um gás na água, em função da temperatura. Considerando-se que o oxigênio constitui 21% da atmosfera, pela lei de Dalton, ele exerce uma pressão de 0,21 atm. Para uma temperatura de 20°C, a concentração de saturação de oxigênio em águas superficiais é igual a 9,2 mg/L (Piveli, 1997). Nas águas subterrâneas do Alto Cristalino de Salvador o oxigênio dissolvido não ultrapassa o valor de 4,9 mg/L ou 69% de oxigênio relativo.
- O **cálcio** apresenta um teor médio de 14,8 mg/L (**Tabela 6.3**), com um valor mínimo de 1,00 e máximo de 46,0 mg/L, estando dentro dos padrões normais de potabilidade segundo a Organização Mundial da Saúde, cujo valor máximo permitido é de 200 mg/L. No corpo humano o cálcio tem a função de manter os ossos saudáveis, além de atuar no mecanismo de coagulação do sangue, controlar os impulsos nervosos e as contrações musculares (Santos, 1997 in Feitosa & Manoel Filho, 1997). Sua carência provoca raquitismo e osteoporose e seu excesso pode produzir dores musculares, fraqueza, sede, desidratação, enjôo e pedras nos rins. Na região apresenta-se associado com o potássio com um moderado coeficiente de correção linear ($r = 0,67$) (**Tabela 6.4**).
- O **sulfato** varia de 5,0 a 55,0 mg/L com uma média de 19,9 mg/L (**Tabela 6.3**). Devido a sua forte assimetria estatística, torna-se aconselhável a adoção do valor da mediana (15,5 mg/L) para a área (**Tabela 6.3**). Todos os números encontrados na região do Alto Cristalino

de Salvador, estão abaixo do limite máximo permitido pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde (250,0 mg/L). Apresenta correlações moderadas com o sódio ($r=0,55$) e potássio ($r=0,63$) (**Tabela 6.4**).

- O **flúor** apresenta-se com valores normais na região segundo a Portaria 518/2004, que estabelece o valor máximo de 1,5 mg/L. Ele varia numa faixa de 0,10 a 1,0 mg/L, com uma média de 0,21 mg/L (**Tabela 6.3**). Da mesma forma que nos casos anteriores, como o valor da assimetria é muito alto ($A3 = 2,76$), recomenda-se a utilização do valor da mediana (0,10 mg/L) (**Tabela 6.3**) como valor médio de referência para a região. Segundo a literatura específica, o flúor em pequenas quantidades é benéfico à saúde humana, principalmente em crianças, promovendo o endurecimento do esqueleto e da matriz mineral dos dentes. Nesse último caso, ele tem se mostrado como o agente químico mais eficiente na prevenção da cárie dentária, daí sua adição nos sistemas de abastecimentos públicos de água ser uma prática muito difundida. Contudo, acima de certos teores, passa a ser prejudicial, causando fluorose dental e esquelética, tanto em seres humanos como em animais. A fluorose se caracteriza pelo escurecimento dos dentes e a perda de resistência desses e dos ossos. Os teores máximos permitidos são estabelecidos em função da idade do consumidor e da quantidade de água ingerida diariamente. Nos países tropicais, onde a ingestão diária de água é maior o controle de flúor nas águas de abastecimento público deve ser mais rigoroso. Segundo a Organização Mundial da Saúde o teor de flúor estabelecido como ótimo na água potável varia entre 0,7 a 1,2 mg/L, mas grande parte das empresas de saneamento e abastecimento de água corrige o teor de flúor para 0,8 mg/L. A Organização Mundial de Saúde considera 1,5 mg/L o valor máximo permissível.

6.3 QUALIDADE BACTERIOLÓGICA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Apesar de ser um bem natural fundamental para a vida humana a água pode ser também, um veículo importante para a transmissão de numerosas doenças epidêmicas. Este perigo é grande e constante nos países tropicais e subdesenvolvidos, porém nos países industrializados também existem exemplos de epidemias, devido a uma distribuição ou um tratamento inadequado das águas destinadas ao consumo humano (Fenzl, 1988). Além das bactérias e dos vírus, a água pode conter inúmeros protozoários e vermes que podem provocar efeitos patológicos no ser humano e nos animais.

O indicador microbiológico mais aceito ainda hoje, são as bactérias do grupo coliforme, pois procurar seres patogênicos individualmente na água é, probabilisticamente, mais difícil, e os exames bacteriológicos de laboratório são mais complicados e onerosos (Rocha, 1994). Este grupo compreende todos os bacilos gram-negativos, não formadores de esporos, aeróbicos ou anaeróbicos

facultativos. Do grupo fazem parte os seguintes gêneros e espécies: *Escherichia coli*, *Citrobacter freundii*, *Citrobacter intermedius*, *Enterobacter aerogenes*, *Enterobacter cloacae* e *Klebsiella pneumoniae*, todas indicando principalmente suspeita de poluição por fezes, pois podem ser também provenientes do solo e de determinados vegetais.

Para o estudo bacteriológico no Alto Cristalino de Salvador foram coletadas amostras de água subterrânea em 25 poços tubulares, 02 cacimbas e 05 fontes naturais com fluxo contínuo. Nas duas cacimbas, a coleta foi realizada sem a realização do bombeamento prévio. Os resultados mostraram que em 8 pontos de coleta (25,0%), as águas subterrâneas apresentaram valores acima de 1,0 UFC/100ml de coliformes termotolerantes (**Tabela 6.5**). Desses pontos contaminados 3 foram obtidos em poços tubulares inativos ou paralisados temporariamente, e 5 em cacimbas e fontes naturais (**Fotos 6.1**).

Tabela 6.5 Distribuição dos coliformes termotolerantes na água subterrânea no Alto Cristalino de Salvador (UFC/100ml).

Pontos	Local	Coliforme Termotolerante	Pontos	Local	Coliforme Termotolerante
PT-26	PRAÇA LORD CROCRANE	1,0	AM-17	FONTE DO QUEIMADO	620,0
PT-29	AV. GARIBALDI	1,0	AM-18	FONTE DA PEDREIRA	1,0
3PT-50	PRAÇA BAÍA AZUL	1,0	PT-85	ADELBA	1,0
PT-53	AV. ACM	1,0	PT-1	ACRESCE	112,0
AM-5	CORONA	18,0	PT-35	EBDA-EMATERBA	1,0
AM-6	FONTE DO CANDEAL	22,0	PT-79	CIMPOL – CONCRETA	1,0
AM-7	CHÁCARA CELESTE	2,0	PT-90	FIORELLI	1,0
AM-8	FONTE DO TORORÓ	2,0	PT-3	ESTÁDIO BARRADÃO	1,0
PT-60	INSTITUTO AFRÂNIO PEIXOTO	1,0	PT-19	MANSÃO DOS MAGISTRADOS	1,0
PT-44	INSTITUTO NINA RODRIGUES	1,0	PT-6	COLÉGIO DOM BOSCO	1,0
PT-91	ED. CASA GRANDE	1,0	PT-32	COELBA – PARALELA	1,0
PT-39	FONTE NOVA	1,0	PT-97	CONDOMÍNIO ANGRA DOS REIS	24,0
PT-11	SOLAR CAMINHO DAS ÁRVORES	1,0	PT-47	PARQUE DE EXPOSIÇÃO II	1,0
PT-14	PITUBA PLAZA HOTEL	2,0	PT-54	PARQUE DE EXPOSIÇÃO I	1,0
PT-36	ESAEX – COLÉGIO MILITAR	1,0	PT-86	COND. PARQUE STELLA MARIS I	1,0
AM-16	CONJUNTO BAHIA	1,0	PT-87	COND. PARQUE STELLA MARIS II	1,0



Foto 6.1 Amostragem de água no ponto AM- 5 (Corona).

Nos estudos desenvolvidos na água subterrânea da bacia do rio Camarujipe por Guerra & Nascimento (1999), de um total de 72 pontos em cerca de 32 deles (44,4%) foi verificado a presença de coliformes termotolerantes numa quantidade acima de 1,0 UFC/100ml. Enquanto isto, na bacia do rio Lucaia, estudos realizados mostraram que de uma total de 40 pontos estudados, em 22 deles (55,0%) apresentaram coliformes termotolerantes numa quantidade acima de 1,0 UFC/100ml (Nascimento, 2000 e Nascimento & Barbosa, 2004) o que é, sem dúvida, um número expressivo de contaminação biológica.

Embora a contaminação biológica seja a mais difundida e disseminada no Alto Cristalino de Salvador, este estudo comparativo indica que a bacia do rio Camarujipe, cuja amostragem foi realizada em janeiro de 1999, encontrava-se na ocasião, um pouco menos contaminada do que a bacia do rio Lucaia, cuja amostragem foi realizada em abril de 2002.

6.4 QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA IRRIGAÇÃO

A classificação das águas subterrâneas para irrigação em termos de sodicidade e salinidade é muito importante para o município de Salvador, tendo em vista que a mesma é muito utilizada na irrigação de praças e jardins pela Prefeitura Municipal, na irrigação de grande número de hortas ainda existentes em alguns bairros da periferia da cidade, entre outras múltiplas aplicações.

Os parâmetros utilizados para estabelecer a qualidade da água subterrânea para irrigação foram a razão de adsorção de sódio (RAS) e a condutividade elétrica, nesse caso através do Diagrama de Lemoine (1954), utilizado pelo U.S.S.L – United States Salinity Laboratory (**Figura 6.14**).

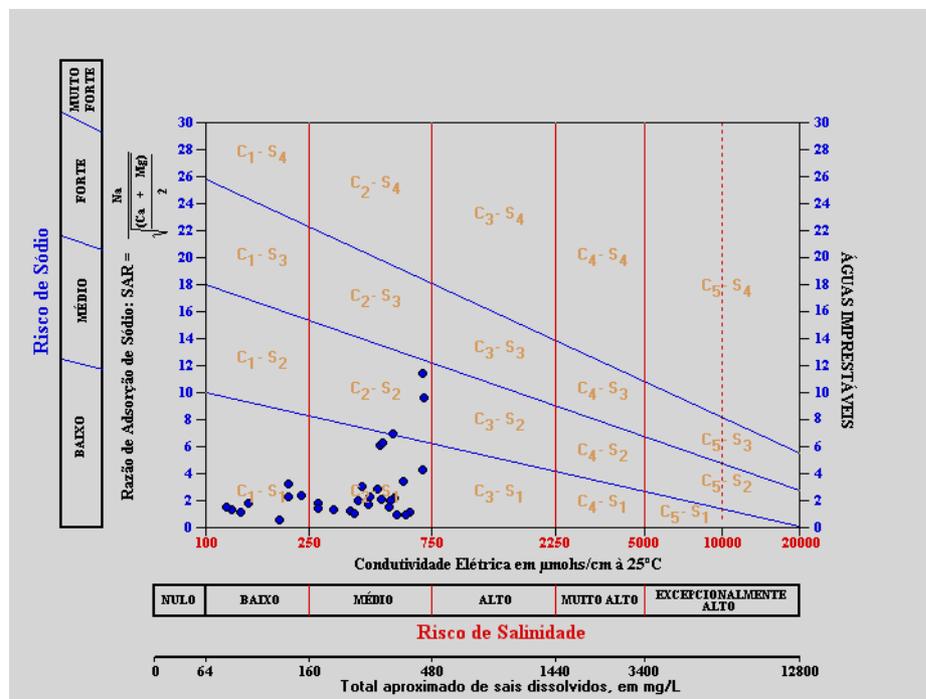


Figura 6.14 Diagrama de Lemoine (U.S.S.L., 1954).

Esta classificação é feita através de um gráfico semilogarítmico, onde são plotados na abscissa os valores da condutividade elétrica e na ordenada, a Razão de Absorção de Sódio (RAS). Esta foi calculada pelo programa Qualigraf elaborado pela Fundação Cearense de Meteorologia (Funceme), utilizado-se os teores em meq/L de rNa, rCa e rMg (r = valor em miliequivalente) mediante a utilização da equação 6.1

$$RAS = \frac{rNa}{\sqrt{\frac{(rCa + rMg)}{2}}} \quad (\text{Eq. 6.1})$$

Os valores da condutividade elétrica foram obtidos no campo, no ato da coleta das amostras com o equipamento multiparâmetros já referidos no **Capítulo 2** (Metodologia da Pesquisa). Os valores obtidos foram em $\mu S/cm$ que é equivalente ao ohm/cm . A classificação da água para irrigação congrega várias categorias quanto a salinidade e ao risco de sódio e são confrontadas com os tipos de solos e as culturas que possam resistir aos processos de salinização.

Os níveis de sodicidade, ou seja, os riscos de salinização do solo por sódio é predominantemente baixo em 29 locais de amostragem (90,6%) e médio em 3 (9,4%) dos pontos amostrados. Quando se trata dos riscos de salinidade baseados na condutividade elétrica específica (CE), observa-se uma variação que vai desde baixo em 8 (25,0%) a médio em 24 (75,0%) dos pontos amostrados. Na composição final entre o risco de salinização por sódio através dos dados da razão de absorção de sódio (RAS) com os valores da condutividade elétrica, observa-se que na grande maioria dos pontos (68,7%), a água pode ser classificada como S1 – C2 (**Tabela 6.6**). Nesse caso, a água tem baixo teor de sódio e média salinidade podendo ser usada para irrigar solos moderadamente permeáveis. Por outro lado, as águas subterrâneas da região do Alto Cristalino de Salvador podem ser classificadas como S1 – C1, em 25,0% dos poços amostrados. Sendo assim, tendo um baixo teor de sódio, elas podem ser utilizadas para irrigar a maioria das culturas, plantas e solos devido ao baixo risco de salinização. Em 6,3% dos poços tubulares foram encontradas águas classificadas como S2 – C2 com um conteúdo de sódio e salinidade considerada como média, podendo ser utilizada em solos com moderada a boa permeabilidade.

Na região quando existe um aumento da condutividade elétrica a razão de absorção de sódio também aumenta, sendo que o primeiro pode se constituir num bom indicador de sódio na água (**Figura 6.15**). Como foi visto no Capítulo anterior, o sódio apresenta um alto valor do coeficiente de correlação linear com a condutividade elétrica.

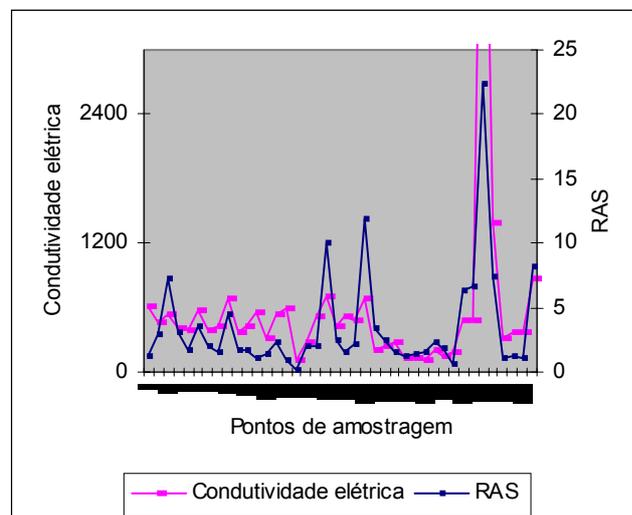


Figura 6.15 Relação entre a condutividade elétrica e a razão de absorção de sódio (N=40).

Tabela 6.6 Definição das categorias de sódio e salinidade.

Pontos	Local	RAS	Risco de salinização por sódio	CE	Risco de salinização em função do CE	Composição Final
PT-26	PRAÇA LORD CROCRANE	1,22	Baixo – S1	618,00	Médio –C2	S1 –C2
PT-29	AV. GARIBALDI	2,94	Baixo – S1	463,00	Médio –C2	S1 – C2
PT-50	PRAÇA BAIA AZUL	7,24	Médio – S2	528,00	Médio –C2	S2 –C2
PT-53	AV. ACM	3,14	Baixo – S1	402,00	Médio –C2	S1 –C2
AM-5	CORONA	3,54	Baixo – S1	581,00	Médio –C2	S1 –C2
AM-6	FONTE DO CANDEAL	2,08	Baixo – S1	387,00	Médio –C2	S1 –C2
AM-7	CHACARA CELESTE	4,45	Baixo – S1	693,00	Médio –C2	S1 –C2
AM-8	FONTE DO TORORÓ	1,77	Baixo – S1	424,00	Médio –C2	S1 –C2
PT-60	INST. AFRÂNIO PEIXOTO	1,03	Baixo – S1	548,00	Médio –C2	S1 –C2
PT-44	INSTITUTO NINA RODRIGUES	1,41	Baixo – S1	311,00	Médio –C2	S1 –C2
PT-91	EDIFÍCIO CASA GRANDE	2,29	Baixo – S1	537,00	Médio –C2	S1 –C2
PT-39	FONTE NOVA	0,95	Baixo – S1	594,00	Médio –C2	S1 –C2
PT-11	SOLAR CAMINHO DAS ÁRVORES	1,93	Baixo – S1	272,00	Médio –C2	S1 – C2
PT-14	PITUBA PLAZA HOTEL	2,07	Baixo – S1	518,00	Médio –C2	S1 – C2
P-36	ESAEX-COLÉGIO MILITAR	10,08	Médio – S2	700,00	Médio –C2	S2 – C2
AM-16	CONJUNTO BAHIA	2,4	Baixo – S1	429,00	Médio –C2	S1 – C2
AM-17	FONTE DO QUEIMADO	1,59	Baixo – S1	515,00	Médio –C2	S1 – C2
AM-18	FONTE DA PEDREIRA	2,17	Baixo – S1	478,00	Médio –C2	S1 – C2
PT-85	ADELBA	11,9	Médio –S2	690,00	Médio –C2	S2 – C2
PT-1	ACRESCE	3,39	Baixo – S1	208,00	Baixo – C1	S1 –C1
PT-35	EBDA-EMATERBA	2,45	Baixo – S1	233,00	Baixo – C1	S1 – C1
PT-79	CIMPOL-CONCRETA	1,49	Baixo – S1	272,00	Médio –C2	S1 – C2
PT-90	FIGLIOLI	1,22	Baixo – S1	137,00	Baixo – C1	S1 – C1
PT-3	ESTÁDIO BARRADÃO	1,35	Baixo – S1	126,00	Baixo – C1	S1 – C1
PT-19	MANSÃO DOS MAGISTRADOS	1,61	Baixo – S1	120,00	Baixo – C1	S1 – C1
PT-6	COLÉGIO DOM BOSCO	2,37	Baixo – S1	209,00	Baixo – C1	S1 – C1
PT-32	COELBA-PARALELA	1,84	Baixo – S1	147,00	Baixo – C1	S1 – C1
PT-97	COND. ANGRA DOS REIS	0,62	Baixo – S1	192,00	Baixo – C1	S1 – C1
PT-47	PARQUE DE EXPOSIÇÃO II	6,38	Baixo – S1	475,00	Médio –C2	S1 – C2
PT-54	PARQUE DE EXPOSIÇÃO III	6,6	Baixo – S1	482,00	Médio – C2	S1 – C2
PT-86	COND. PARQUE STELLA MARIS I	1,26	Baixo – S1	362,00	Médio – C2	S1 – C2
PT-87	COND. PARQUE STELLA MARIS II	1,12	Baixo – S1	374,00	Médio – C2	S1 – C2

RAS = Razão de Absorção de Sódio CE =Condutividade elétrica

6.5 RESUMO DO CAPÍTULO

A composição química da água subterrânea no Alto Cristalino de Salvador reflete o intemperismo químico das suas litologias, da atmosfera e das contribuições antrópicas. A análise fatorial foi aplicada para distinguir através de cinco fatores, as contribuições parciais de 17 variáveis escolhidas previamente, através de uma matriz de correlação linear de Pearson.

O fator 1 está representado por uma associação linear positiva entre as variáveis, dureza, magnésio, bário e cromo nas águas subterrâneas, evidenciando uma provável influência das rochas as quais são constituídas por minerais ferromagnesianos do tipo máficas metamorfisadas associadas aos granulitos tonalíticos e charnoenderbíticos.

A turbidez juntamente com os sólidos em suspensão e o cobre, compõem as variáveis que melhor definem o fator 2. Por se tratar de aquíferos constituídos pelas coberturas formadas por materiais friáveis, muitas vezes sílticos-argilosos, sobrepostas ao embasamento cristalino fissural, é de se esperar uma maior quantidade de sólidos em suspensão e uma maior turbidez na água, principalmente em poços tubulares e cacimbas mal construídas e com problemas de manutenção.

O fator 3 foi definido pelas variáveis pH, bicarbonato e o alumínio, ou seja, existe uma influência direta do pH sobre o bicarbonato e inversa sobre o alumínio, controlando a mobilidade e a dispersão dessas duas variáveis. Em condições alcalinas e oxidantes a água apresenta maior quantidade de bicarbonatos dissolvidos e menor de alumínio devido a precipitação desse último nessas condições redox. O alumínio solubiliza-se em condições extremas de acidez e basicidade.

A relação direta e positiva entre as variáveis, condutividade elétrica, sódio e cloretos caracteriza o fator 4. A sua relação com as águas cloretadas sódicas, muito abundantes na região, é bastante evidente. A planície costeira que recebe influência direta do mar nas áreas de desembocadura de rios, principalmente nos períodos de maré alta, apresentam os maiores valores de cloreto, sódio e condutividade elétrica. Este fator pode expressar também uma influência da contaminação antrópica, já que os pontos que apresentaram os maiores números são aqueles com forte impacto ambiental

O fator 5 é caracterizado pela associação entre o ferro e o manganês que estão presentes frequentemente nas águas subterrâneas da região em foco. Trata-se de um importante fator que expressa uma forte influência geogênica das litologias portadores de minerais ferromagnesianos, tais como, ortopiroxênio, anfíbólio e biotita, entre outros, quando submetidos aos processos de intemperismo químico por hidrólise, hidratação e oxi-redução.

As variáveis que contribuem para a contaminação das águas subterrâneas no Alto Cristalino de Salvador e que apresentam, portanto, a maior incidência de valores acima do limite máximo permitido (LMP), segundo as normas e padrões de qualidade utilizados são: a cor real em 27,5% dos pontos amostrados, **turbidez** (22,5%), **sólidos em suspensão** (5,0%), **potássio** (10,0%), **amônia** (3,1%), **ortofosfato** (6,3%), **nitratos** (32,5%), e os metais **alumínio** (7,5%), **ferro total** (15,0%), **manganês total** (45,0%) e **níquel** (17,5%). Todas as outras variáveis analisadas na água subterrânea apresentaram valores normais de potabilidade segundo os padrões de qualidade utilizados, não contribuindo para a contaminação da água.

Os níveis de sodicidade, ou seja, os riscos de salinização do solo por sódio é predominantemente baixo em 29 locais de amostragem (90,6%) e médio em 3 (9,4%) dos pontos amostrados. Quando se trata dos riscos de salinidade baseados na condutividade elétrica específica (CE), observa-se uma variação que vai desde baixo em 8 (25,0%) a médio em 24 (75,0%) dos pontos amostrados. Na composição final entre o risco de salinização por sódio através dos dados da razão de absorção de sódio (RAS) com os valores da condutividade elétrica, observa-se que na grande maioria dos pontos (68,7%), a água pode ser classificada como S1 – C2. Nesse caso, a água tem baixo teor de sódio e média salinidade podendo ser usada para irrigar solos moderadamente permeáveis. Por outro lado, as águas subterrâneas da região do Alto Cristalino de Salvador podem ser classificadas como S1 – C1, em 25,0% dos poços amostrados. Sendo assim, tendo um baixo teor de sódio, elas podem ser utilizadas para irrigar a maioria das culturas, plantas e solos devido ao baixo risco de salinização. Em 6,3% dos poços tubulares foram encontradas águas classificadas como S2 – C2 com um conteúdo de sódio e salinidade considerada como média, podendo ser utilizada em solos com moderada a boa permeabilidade.

Na região quando existe um aumento da condutividade elétrica a razão de absorção de sódio também aumenta, sendo que o primeiro pode se constituir num bom indicador de sódio na água. Como foi visto no Capítulo anterior, o sódio apresenta um alto valor do coeficiente de correlação linear com a condutividade elétrica.

CAPÍTULO 7

VULNERABILIDADE DO AQÜÍFERO DO ALTO CRISTALINO DE SALVADOR

7 VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO DO ALTO CRISTALINO DE SALVADOR

7.1 INTRODUÇÃO

Desde a década de sessenta quando Le Grand (1964) e Margat (1968) relacionaram o termo vulnerabilidade da água subterrânea à contaminação, surgiram diversas definições, qualificações e metodologias para estabelecer os índices de vulnerabilidade de um aquífero.

A atenção dos pesquisadores, principalmente nos últimos 30 anos, tem sido uma conseqüência da crescente preocupação da sociedade com a degradação dos recursos hídricos subterrâneos, tanto no meio urbano quanto rural. É cada vez mais clara a consciência dos responsáveis pela gestão das águas subterrâneas, das limitações técnicas, econômicas e de disponibilidade de mão de obra especializada para remediar a contaminação existente, sobretudo em países em desenvolvimento (Hirata 2001). Conseqüentemente tem-se verificado um crescente desenvolvimento de modelos e técnicas de mapeamento de vulnerabilidade à poluição de aquífero, como uma ferramenta para sua proteção. A cartografia de vulnerabilidade tem servido à racionalização de ações de proteção de aquíferos, na medida em que tenta compatibilizar as atividades antrópicas com a capacidade do terreno em suportar, sem prejuízo, a qualidade das águas subterrâneas (Hirata 2001).

Para se assegurar a sustentabilidade do recurso hídrico subterrâneo é necessária uma adequada proteção, conhecendo-se as zonas de maior vulnerabilidade à contaminação e estabelecendo programas específicos de inspeção e monitoramento sobre possíveis fontes de contaminação (Valverde & Mesalles 2002). Os diferentes modelos propostos para a determinação da vulnerabilidade à contaminação de um aquífero são modelos matemáticos que fazem uso dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), para gerar mapas de vulnerabilidade e, desta forma, estimar o perigo de contaminação (Valverde & Mesalles 2002). Os mapas temáticos com base em isolinhas são utilizados pelo SIG e as fontes principais e potenciais de contaminação podem ser utilizados na análise do ordenamento territorial, levando-se em conta a tendência de vulnerabilidade do aquífero, em casos, por exemplo, de expansão urbana (Rodriguez & Ramos 1997). Até o final de década de 80, ainda existia em algumas partes do mundo, uma atitude generalizada de subestimação dos riscos de poluição das águas subterrâneas, trazidos pela falta de políticas e de ações voltadas para a proteção dos aquíferos (Foster *et al.* 1987).

O termo vulnerabilidade está associado exclusivamente ao meio, ou seja, ao tipo de aquífero, à cobertura formada pela zona insaturada, à permeabilidade, à profundidade do nível freático e à recarga, sem levar em conta as substâncias contaminantes.

Vrba & Zaporozec (1994) incluem o sistema subterrâneo juntamente com os contaminantes artificiais e naturais, dentro de um contexto geral de vulnerabilidade, definindo-as como vulnerabilidade intrínseca e específica, respectivamente. Desta forma, o conceito de risco à contaminação está diretamente associado à vulnerabilidade intrínseca do aquífero e à vulnerabilidade específica dos contaminantes ou família de contaminantes com características e comportamento semelhantes (ex. nitratos, hidrocarbonetos leves e pesados, praguicidas, matéria orgânica, metais, etc.) e as atividades e fontes de contaminação. Associado a isto se leva em conta à intensidade da contaminação, o modo de disposição em subsuperfície e o tempo de aplicação da carga contaminante. A interação entre estas características tem sido considerada como uma limitação prática pela dificuldade em combiná-las dentro de um só índice (Hirata 2001).

Entretanto, a caracterização mais aproximada da idéia de risco de poluição de água subterrânea consiste na associação e interação entre a vulnerabilidade natural do aquífero e a carga contaminante aplicada no solo ou em subsuperfície (Foster *et al.* 1987). Muitas vezes um aquífero pode configurar uma situação de alta vulnerabilidade, porém sem risco de poluição, pela ausência de carga poluidora significativa, ou vice-versa.

Em longo prazo, todos os aquíferos são vulneráveis a contaminantes que apresentam características persistentes e móveis, gerados por uma atividade amplamente distribuída na região. A carga poluidora pode ser controlada ou modificada, fato que não ocorre com a vulnerabilidade natural, que é uma propriedade intrínseca do aquífero (Foster *et al.* 1987). Estes autores reconhecem também que as águas subterrâneas constituem uma reserva estratégica e vital para o abastecimento público, o que remete a uma especial preocupação com a proteção dos aquíferos.

A expansão urbana e os corredores industriais tornam os aquíferos vulneráveis, visto que se constituem como fontes potenciais de contaminação, devido aos lixões, cemitérios, postos de combustíveis, manipulação industrial dos dutos, micro-indústria, produtos agro-químicos residuais e o uso dos produtos na agricultura (Rodriguez & Ramos 1997).

No caso específico das zonas urbanas, a vulnerabilidade dos sistemas aquíferos é muito grande considerando a forte aglomeração humana. Os aquíferos que não apresentam nenhuma forma de proteção natural contra a poluição se encontram altamente expostos à contaminação através da infiltração de microorganismos ou de substâncias perigosas (Silva 2004).

O manejo dos solos em zonas urbanas dificilmente considera o subsolo e, também, não leva em conta que a qualidade da água subterrânea pode ser afetada por fontes potenciais de contaminação superficial. Os planos de ordenamento urbano e ecológico, normalmente não incorporam elementos da geologia de subsuperfície, a distribuição e as características do sistema aquífero (Rodriguez & Rodriguez 2004). Isto se converte num problema, quando parte do abastecimento de água provém dos aquíferos localizados sob aglomerações urbanas, o que cria dificuldades de dimensões desconhecidas já que muitas vezes não se conta com recursos para realizar monitoramentos periódicos e análises laboratoriais para verificar a qualidade da água que abastece a população (Rodriguez & Rodriguez 2004).

Muitos centros urbanos crescem anarquicamente comprometendo zonas de alta vulnerabilidade, invadindo ou alterando zonas preferenciais de recarga do aquífero. A principal preocupação é com a carga de contaminantes em zonas residenciais sem esgotamento sanitário quando estão presentes em tanques e fossas negras que inclui nutriente e sais (nitrato a cloro), bactéria e vírus, além de compostos orgânicos solúveis (Foster *et al.* 1987). Em algumas áreas de expansão urbana, encontram-se freqüentemente terrenos agrícolas e pequenas indústrias, catalogadas como poluentes que manejam matérias primas e resíduos líquidos e sólidos que, quando não manipulados adequadamente, podem gerar lixiviados com solutos perigosos para a saúde humana (Rodriguez & Rodriguez 2004).

Os núcleos urbanos apresentam diferentes fontes de contaminação potenciais ou ativos. O que importa, sobretudo é identificar e prestar especial atenção aos constituintes que apresentam maior ameaça à saúde pública (Foster *et al.* 1987). Os nitratos são os de ocorrência mais generalizada e problemática, devido a sua alta mobilidade e estabilidade em sistemas anaeróbicos, enquanto os metais pesados perigosos (cádmio, chumbo, mercúrio, etc.) tendem a ser imobilizados por precipitação e só migram em condições de pH e Eh baixos. Em cidades com vocação turística ou de serviços, o seu centro comercial apresenta-se quase sempre como fonte de contaminação. O sistema de drenagem de águas residuais apresenta normalmente fugas, devido a qualidade dos materiais, à pouca manutenção e os esforços que recebem devido a subsidência, tremores e falhas geológicas em regiões tectonicamente ativas, fazendo com que a tubulação de água potável se deteriore. Em muitas cidades, a disposição final de resíduos, tanto sólidos quanto líquidos, as águas residuais urbanas são conduzidas por canais não protegidos até corpos receptores (Rodriguez & Rodriguez 2005).

Os cemitérios têm sido considerados como fontes contaminantes, devido aos corpos em decomposição que produzem cadaverina e putrecina além dos elementos bacteriológicos patogênicos (Rodriguez & Ramos 1997). Os postos de serviços de combustíveis representam outro problema ambiental

recorrente nos núcleos urbanos. As fugas de hidrocarbonetos têm afetado a qualidade da água de numerosos centros urbanos, inclusive de polidutos que cruzam as cidades. As metalúrgicas e fundições também podem afetar indiretamente as águas subterrâneas, através da lixiviação de ácidos arseniosos que são jogados no solo e que se infiltram posteriormente (Rodríguez & Rodríguez 2004).

A estruturação dos mapas de risco urbano com base nos mapas de vulnerabilidade elaborada por um dos métodos disponíveis, requer a incorporação das fontes de contaminação, inclusive devendo ser tomados como elemento de planejamento urbano (Rodríguez & Ramos 1997). Assim, os programas de crescimento urbano e a localização de corredores industriais, aterros sanitários e atividades com risco, como postos de gasolina ou empresas que manipulam grandes volumes de materiais perigosos, devem levar em conta o zoneamento da vulnerabilidade do aquífero (Rodríguez & Ramos 1997). O exame conjunto através de mapas, das áreas mais vulneráveis, em associação com fontes de contaminação potencialmente perigosas, ressaltará áreas críticas que serão objetos de estudos de detalhe, com programa de monitorização e de medidas especiais de proteção (Foster *et al.* 1987)

7.2 CONCEITUAÇÃO SOBRE A VULNERABILIDADE E O RISCO.

O conceito de vulnerabilidade de um aquífero foi baseado primeiramente, na suposição de que o ambiente físico pode promover algum grau de proteção da água subterrânea contra o impacto humano e natural. Ao longo das últimas décadas este conceito tem sido discutido por vários autores, embora, até o momento, não exista uma definição efetivamente reconhecida e que agrade a toda comunidade internacional.

Segundo Auge (2004), a vulnerabilidade é considerada como uma propriedade intrínseca ao meio, sendo empregada de forma abrangente, tanto em trabalhos de planejamento de uso do território, quanto àqueles que enfocam as águas. A vulnerabilidade específica inclui a concepção de risco, sobretudo quando ela estiver relacionada ao perigo de deteriorização a partir da presença de substância contaminantes.

A caracterização da vulnerabilidade de um aquífero, segundo Foster *et al.* (1987), pode ser mais bem expressa por meio dos fatores: (i) acessibilidade da zona saturada à penetração de poluentes e, (ii) capacidade de atenuação resultante da retenção físico-química ou reação dos poluentes. Esses dois fatores naturais caracterizam uma vulnerabilidade intrínseca do aquífero e são passíveis de interação com os elementos característicos da carga poluidora, ligada a uma vulnerabilidade específica, tais como, o modo de disposição no solo ou em subsuperfície e, à mobilidade físico-química e à persistência do poluente.

Vrba & Zaporozec (1994) definem a vulnerabilidade como uma propriedade intrínseca do sistema água subterrânea, que dependem da sensibilidade do mesmo e dos impactos humanos e naturais. Estes autores incluem na definição, tanto o sistema subterrâneo quanto os contaminantes e, dentro destes, os artificiais e os naturais (Auge 2004). A vulnerabilidade intrínseca ou natural está associada aos fatores hidrogeológicos tais como, características do aquífero, solo e material geológico, enquanto que a específica esta associada às atividades humanas e aos contaminantes.

Egler (1996) distingue o conceito de risco, relacionando-o “à incerteza e ao desconhecimento das dimensões do problema ambiental”. Foster (1987) define o risco como o perigo de deteriorização na qualidade de um aquífero, devido a existência real ou potencial de substâncias contaminantes em seu entorno. Vrba & Zaporozec (1994) referem à vulnerabilidade específica, como o perigo de contaminação da água subterrânea por um contaminante ou família de contaminantes, ambos com características e comportamentos similares (nitratos, hidrocarbonetos leves e pesados, praguicidas, matéria orgânica, metais, etc.). A vulnerabilidade específica inclui parcialmente o conceito de risco, toda vez que se refere ao perigo de deteriorização do aquífero com relação a substâncias contaminantes específicas (Auge 2004).

A caracterização mais aproximada da idéia de risco de poluição de água subterrânea consiste na associação e interação entre a vulnerabilidade natural do aquífero e a carga contaminante (vulnerabilidade específica), aplicada no solo ou em subsuperfície, sem estar necessariamente associada a desastres naturais. Muitas vezes uma situação de alta vulnerabilidade pode não apresentar qualquer risco de poluição pela ausência de carga poluidora significativa ou vice-versa (**Figura 7.1**). A carga poluidora pode ser controlada ou modificada, o mesmo não ocorrendo com a vulnerabilidade natural que é uma propriedade intrínseca do aquífero (Foster *et al.* 1987).

Auge (2004) estabelece uma comparação entre risco e vulnerabilidade, ao tomar como exemplo, um depósito com portas sem chaves e cadeados localizados na zona rural e remota, considerado muito vulnerável devido ao fácil acesso, entretanto o risco de furto ou roubo dos objetos que estão no seu interior é baixo, porque na região não existem vândalos. Entretanto, outro depósito localizado em zona urbana com fortes fechaduras e cadeados, apresentam uma vulnerabilidade e um risco alto, devido à presença de delinqüentes na área.

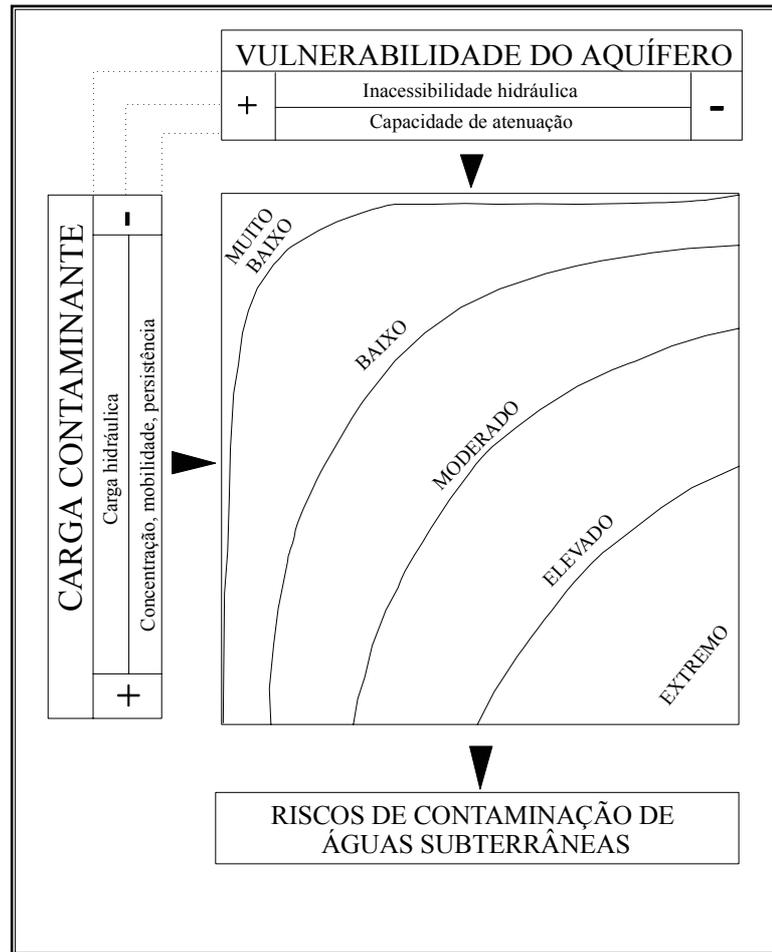


Figura 7.1 Esquema conceitual do risco de contaminação de água subterrânea. (Modificado de Foster, 1987). Fonte: Foster e Hirata (1993).

7.3 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE PELO MÉTODO DRASTIC

O método DRASTIC tem uso muito difundido para a avaliação qualitativa e para o mapeamento da vulnerabilidade de uma região. Baseia-se no estabelecimento de índices que vão de 1 a 10, de acordo com as características e o comportamento das variáveis consideradas (Auge 2004). O índice 1 e 10 indicam a mínima e a máxima vulnerabilidade, respectivamente. O DRASTIC foi desenvolvido para avaliar áreas maiores do que 0,4 km² (Leite & Mobus 1998), buscando sistematizar o potencial dos contaminantes e visando alcançar a zona saturada (Valverde & Mesalles 2002). Foi desenvolvido por Aller *et al.* (1987) do National Groundwater Association para a USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos, independentemente da carga poluente. O valor mínimo definido pela literatura é 23 e o

valor máximo 226, porém, segundo alguns autores, verificam-se na prática, índices que variam de 50 a 200. Para obtenção do índice de vulnerabilidade e classificação dos parâmetros e suas ponderações, o método DRASTIC propõe a aplicação das seguintes variáveis:

- **D – Depth to Groundwater (profundidade do nível estático)** – define a distancia vertical que um contaminante tem que atravessar para chegar até a zona saturada do aquífero. Quanto maior for a profundidade, menor será a probabilidade e maior será o tempo do contaminante chegar à zona saturada.
- **R – Recharge (recarga do aquífero)** – representa principalmente a quantidade de água que atinge anualmente a zona saturada, sendo muito importante porque condiciona o transporte de eventuais poluentes. De uma forma geral quanto maior for a recarga maior será o potencial de poluição. Considerou-se neste trabalho uma taxa de infiltração de 203 mm/ano, obtido na área do Campus Universitário de Ondina/UFBA, conforme descrito no Capítulo 4 (Caracterização Hidrogeológica).
- **A – Aquifer media (material do aquífero)** – determina a mobilidade do contaminante e está associado à capacidade de atenuação do aquífero que é função do material que o constitui. Quanto maior for o tempo de residência do contaminante no aquífero, mais atenuado será o seu efeito.
- **S – Soil media (tipo de solo)** – corresponde à zona vadosa do solo onde ocorrem as raízes das plantas. Para a caracterização dessa zona na área, utilizou-se a as informações dos perfis de poços tubulares obtidos no levantamento bibliográfico da primeira fase da pesquisa.
- **T – Topography (topografia)** – define os declives do terreno e condiciona a velocidade de escoamento superficial do poluente e, também, o gradiente hidráulico, além das direções de fluxo preferenciais, em especial nos aquíferos freáticos. Quanto maior for a declividade maior será a taxa de escoamento superficial da água de chuva, evitando a sua infiltração e lixiviação dos contaminantes para dentro do aquífero. O mapa de declives foi elaborado com base no Modelo Digital de Terreno (MDT) construído em SIG, com malha de 500 metros de lado.
- **I – Impact of the vadose zone (impacto da zona não saturada)** – o tipo de material da zona acima do nível freático (zona vadosa) determina o tempo de percurso do poluente, permitindo a ocorrência de diversos processos de atenuação. Essa informação foi também obtida dos perfis de poços tubulares selecionados no levantamento bibliográfico da primeira fase da pesquisa.

- **C – Conductivity hydraulic (condutividade hidráulica)** – refere-se à capacidade do aquífero para transmitir água por unidade de tempo. Os valores da condutividade hidráulica (K) para os diversos materiais que compõem as coberturas do embasamento cristalino de Salvador, foram obtidos através de consulta bibliográfica em diversos trabalhos e relatórios técnicos do IBGE, SRH, UFBA, Laboratório de Geotecnia da UFBA e, também, os dados calculados no capítulo 4.

7.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DRÁSTIC PARA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO FREÁTICO DO ALTO CRISTALINO DE SALVADOR.

A aplicação deste método em Salvador foi devido a existência de uma reserva hídrica subterrânea utilizada sistematicamente por uma parcela da sua população localizada na periferia e nos condomínios da orla Atlântica. A obtenção de informações para o cálculo do índice de vulnerabilidade foi extraída de fichas e relatórios de 98 poços tubulares obtidos nos arquivos das empresas perfuradoras. O procedimento utilizado na aplicação dos fatores citados acima seguiu as seguintes etapas:

- (i) Atribuíram-se valores de 1 a 10 a cada parâmetro hidrogeológico, em função das condições locais de cada poço tubular utilizado. Valores elevados correspondem a uma maior vulnerabilidade sendo obtidos através de tabelas especiais fornecidas pelo método segundo Aller, 1987 (**Tabela 7.1**)
- (ii) Os valores foram multiplicados pelo peso relativo (w) de cada parâmetro. Cada parâmetro tem um peso específico que reflete a sua importância relativa na quantificação do índice de vulnerabilidade. Os parâmetros mais importantes têm um peso 5 enquanto os menos importantes tem um peso 1 (**Tabela 7.2**).
- (iii) Estes fatores foram relacionados entre si através de uma equação simples, aplicado em cada um dos 98 poços tubulares selecionados, através da Equação 7.1 abaixo.

$$\text{ÍNDICE DRÁSTIC} = \text{Dr.Dw} + \text{Rr.Rw} + \text{Ar.Aw} + \text{Sr.Sw} + \text{Tr.Tw} + \text{Ir.Iw} + \text{Cr.Cw} \quad (\text{Eq.7.1})$$

r = valores das variáveis nos seus respectivos intervalos de ocorrência.

w = pesos dos fatores Drastic

Tabela 7.1 Intervalo e valores das variáveis a partir de ALLER *et al.*, (1987).

(D) Profundidade do nível piezométrico			(R) Recarga bruta	
Intervalo (m)	Valor		Intervalo (mm)	Valor
<1,5	10		0-50	1
1,5-5	9		50-100	3
5-10	7		100-180	6
10-20	5		180-255	8
20-30	2		>255	9
>30	1			
(A) Material do aquífero			(S) Tipo de solo	
Descrição	Intervalo	Valor	Tipo de solo	Valor
- Argilas, margas, calcários	1-3	2	- Argila não expansiva e agregada	1
- Ígneas/ metamórficas	2-5	3	- Solo orgânico	2
- gneas/ metamórficas alteradas	3-5	4	- Marga argilosa	3
- alternância			- Marga limosa	4
Arenítica, argilítica e calcário	5-9	6	- Marga	5
- Arenito puro	4-9	6	- Marga arenosa	6
- Calcário puro	4-9	6	- Argila expansiva e/ou agragada	7
- Areia, gravilhão e conglomerado	4-9	8	- Turva	8
- Vulcânicas	2-10	9	- Areia	9
- Calcário cárstico	9-10	10	- Gravilhão	10
(T) Topografia			(C) Condutividade hidráulica	
Intervalo %	Valor		Intervalo (m/dia)	Valor
0-2	10		<4	1
2-6	9		4-12	2
6-12	5		12-28	4
12-18	3		28-40	6
>18	1		40-80	8
			>80	10
(I) Impacto sobre a zona não saturada				
Descrição	Intervalo		Valor	
-Argila, calcário, margas	1-2		1	
-Folhelhos e Xistos	2-5		3	
-Calcários	2-7		6	
-Arenitos	4-8		6	
-Alternâncias Arenito, argilito, calcário	4-8		6	
-Areia, gravilhão argilítico	4-8		6	
-Metamórfica, ígnea	2-8		4	
-Areia e gravilhão	6-9		8	
-Vulcânicas	2-10		9	
-Calcário cárstico	8-10		10	

Tabela 7.2 Índice de ponderação (w) do método DRASTIC (Aller, 1987).

Parâmetros	DRASTIC (Pesos)
Dw - Profundidade do nível estático	5
Rw - Recarga do aquífero.	4
Aw - Material do aquífero	3
Sw -Tipo de solo	2
Tw – Topografia	1
Iw – Impacto da zona não-saturada.	5
Cw - Condutividade hidráulica.	3

- (iv) Com os valores do Índice Drastic calculado em cada ponto (**Tabela 7.3**), procedeu-se ao modelamento matemático com os valores desses índices de vulnerabilidade através do software Arc Gis 9.2 (**Figura 7.2**). As interpolações entre os pontos foram feitas através da krigagem universal previamente testada pelo modelo de variograma experimental esférico.

Tabela 7.3 Valor do Índice DRÁSTIC em cada ponto de captação de água subterrânea no Alto Cristalino de Salvador (98 poços tubulares).

POÇO	D	R	A	S	T	I	C	INDICE
PT-1	15,0	24,0	12,0	12,0	5,0	15,0	3,0	86,0
PT-2	35,0	24,0	15,0	6,0	10,0	20,0	6,0	116,0
PT-3	45,0	24,0	12,0	6,0	1,0	15,0	3,0	106,0
PT-4	35,0	24,0	12,0	6,0	9,0	15,0	3,0	104,0
PT-5	50,0	36,0	15,0	12,0	10,0	15,0	6,0	144,0
PT-6	15,0	24,0	12,0	6,0	10,0	15,0	3,0	85,0
PT-7	45,0	36,0	15,0	18,0	10,0	30,0	6,0	160,0
PT-8	35,0	24,0	12,0	6,0	10,0	15,0	3,0	105,0
PT-9	45,0	24,0	12,0	12,0	9,0	15,0	3,0	120,0
PT-10	35,0	24,0	12,0	6,0	10,0	15,0	3,0	105,0
PT-11	45,0	24,0	15,0	12,0	10,0	15,0	6,0	127,0
PT-12	35,0	36,0	15,0	18,0	3,0	45,0	9,0	161,0
PT-13	35,0	24,0	12,0	5,0	1,0	15,0	3,0	95,0
PT-14	35,0	24,0	12,0	6,0	10,0	15,0	3,0	105,0
PT-15	45,0	24,0	12,0	12,0	9,0	30,0	3,0	135,0
PT-16	35,0	24,0	12,0	12,0	10,0	15,0	3,0	111,0
PT-17	50,0	24,0	12,0	12,0	10,0	15,0	3,0	126,0
PT-18	15,0	36,0	18,0	12,0	10,0	30,0	9,0	130,0
PT-19	50,0	24,0	18,0	12,0	10,0	15,0	6,0	135,0
PT-20	35,0	36,0	18,0	6,0	10,0	30,0	9,0	144,0
PT-50	35,0	24,0	9,0	6,0	10,0	15,0	6,0	105,0
PT-51	35,0	24,0	15,0	18,0	9,0	30,0	9,0	140,0
PT-52	45,0	36,0	15,0	18,0	10,0	30,0	9,0	163,0
PT-53	45,0	24,0	9,0	12,0	10,0	30,0	12,0	142,0
PT-54	45,0	32,0	9,0	12,0	10,0	15,0	12,0	135,0
PT-55	50,0	32,0	9,0	12,0	10,0	30,0	12,0	155,0
PT-56	35,0	24,0	12,0	6,0	10,0	15,0	3,0	105,0
PT-57	25,0	24,0	15,0	6,0	1,0	25,0	9,0	105,0
PT-58	45,0	24,0	18,0	6,0	10,0	15,0	9,0	127,0
PT-59	35,0	24,0	12,0	12,0	9,0	30,0	3,0	125,0
PT-60	35,0	24,0	15,0	6,0	5,0	30,0	9,0	124,0
PT-61	45,0	32,0	18,0	12,0	1,0	30,0	9,0	147,0
PT-62	45,0	36,0	15,0	18,0	10,0	30,0	9,0	163,0
PT-63	45,0	24,0	15,0	18,0	3,0	30,0	9,0	144,0
PT-64	50,0	36,0	15,0	12,0	5,0	30,0	6,0	154,0
PT-65	45,0	36,0	18,0	6,0	10,0	15,0	9,0	139,0
PT-66	50,0	24,0	9,0	12,0	10,0	15,0	6,0	126,0
PT-67	45,0	24,0	12,0	6,0	10,0	15,0	3,0	115,0
PT-68	45,0	24,0	12,0	12,0	10,0	30,0	3,0	136,0
PT-69	35,0	24,0	12,0	6,0	10,0	15,0	3,0	105,0

PT -21	35,0	24,0	15,0	12,0	1,0	15,0	3,0	105,0	PT -70	15,0	24,0	12,0	6,0	10,0	30,0	3,0	100,0
PT -22	25,0	24,0	15,0	6,0	3,0	30,0	3,0	106,0	PT -71	50,0	36,0	12,0	18,0	5,0	30,0	9,0	160,0
PT -23	5,0	24,0	18,0	6,0	5,0	15,0	6,0	79,0	PT -72	25,0	24,0	12,0	6,0	10,0	15,0	3,0	95,0
PT -24	45,0	24,0	12,0	12,0	10,0	15,0	3,0	121,0	PT -73	45,0	24,0	12,0	12,0	10,0	30,0	3,0	136,0
PT -25	35,0	24,0	18,0	6,0	10,0	15,0	9,0	117,0	PT -74	35,0	24,0	12,0	12,0	1,0	15,0	3,0	102,0
PT -26	45,0	24,0	15,0	6,0	10,0	15,0	3,0	118,0	PT -75	45,0	24,0	12,0	6,0	10,0	15,0	3,0	115,0
PT -27	45,0	24,0	12,0	12,0	9,0	15,0	3,0	120,0	PT -76	50,0	36,0	15,0	18,0	10,0	30,0	9,0	168,0
PT -28	45,0	24,0	15,0	6,0	10,0	15,0	9,0	124,0	PT -77	45,0	36,0	15,0	18,0	10,0	30,0	9,0	163,0
PT -29	45,0	24,0	9,0	6,0	10,0	15,0	9,0	118,0	PT -78	35,0	24,0	15,0	6,0	9,0	15,0	3,0	107,0
PT -30	35,0	24,0	9,0	12,0	9,0	30,0	9,0	128,0	PT -79	45,0	36,0	15,0	6,0	10,0	15,0	3,0	130,0
PT -31	15,0	24,0	18,0	18,0	3,0	30,0	9,0	117,0	PT -80	45,0	36,0	15,0	12,0	9,0	30,0	9,0	156,0
PT -32	45,0	24,0	9,0	6,0	1,0	15,0	9,0	109,0	PT -81	45,0	36,0	15,0	18,0	10,0	30,0	9,0	163,0
PT -33	15,0	24,0	9,0	6,0	3,0	15,0	9,0	81,0	PT -82	50,0	36,0	15,0	12,0	10,0	30,0	9,0	162,0
PT -34	25,0	24,0	9,0	18,0	10,0	30,0	9,0	125,0	PT -83	25,0	24,0	15,0	12,0	9,0	30,0	6,0	121,0
PT -35	50,0	24,0	9,0	6,0	9,0	15,0	9,0	122,0	PT -84	45,0	24,0	18,0	18,0	10,0	15,0	6,0	136,0
PT -36	45,0	24,0	9,0	6,0	10,0	15,0	9,0	118,0	PT -85	45,0	24,0	18,0	12,0	5,0	15,0	9,0	128,0
PT -37	35,0	36,0	9,0	18,0	9,0	30,0	12,0	149,0	PT -86	45,0	36,0	18,0	18,0	10,0	30,0	9,0	166,0
PT -38	45,0	24,0	9,0	6,0	10,0	15,0	12,0	121,0	PT -87	45,0	36,0	18,0	18,0	10,0	30,0	9,0	166,0
PT -39	45,0	24,0	9,0	6,0	10,0	15,0	12,0	121,0	PT -88	45,0	36,0	18,0	18,0	10,0	30,0	9,0	166,0
PT -40	45,0	24,0	9,0	6,0	10,0	15,0	3,0	112,0	PT -89	50,0	36,0	18,0	12,0	10,0	30,0	9,0	165,0
PT -41	35,0	24,0	9,0	6,0	9,0	30,0	9,0	122,0	PT -90	45,0	24,0	18,0	12,0	10,0	30,0	9,0	148,0
PT -42	45,0	36,0	15,0	6,0	10,0	30,0	3,0	145,0	PT -91	35,0	24,0	12,0	12,0	1,0	15,0	3,0	102,0
PT -43	35,0	24,0	12,0	6,0	9,0	15,0	9,0	110,0	PT -92	45,0	24,0	12,0	6,0	1,0	15,0	3,0	106,0
PT -44	35,0	24,0	12,0	6,0	9,0	15,0	9,0	110,0	PT -93	45,0	24,0	12,0	12,0	5,0	15,0	3,0	116,0
PT -45	35,0	24,0	9,0	6,0	9,0	30,0	3,0	116,0	PT -94	45,0	32,0	12,0	6,0	10,0	15,0	3,0	123,0
PT -46	35,0	36,0	9,0	12,0	9,0	30,0	12,0	143,0	PT -95	45,0	32,0	12,0	6,0	10,0	15,0	3,0	123,0
PT -47	50,0	32,0	15,0	12,0	10,0	15,0	12,0	146,0	PT -96	35,0	24,0	12,0	6,0	10,0	15,0	3,0	105,0
PT -48	50,0	32,0	15,0	12,0	10,0	12,0	12,0	143,0	PT -97	35,0	36,0	18,0	18,0	10,0	30,0	9,0	156,0
PT -49	45,0	24,0	9,0	6,0	10,0	15,0	9,0	118,0	PT -98	35,0	36,0	18,0	20,0	10,0	40,0	9,0	168,0

D = profundidade do nível estático;
T = topografia (pendente);

R = recarga;
I = impacto na zona de aeração;

A = material que compõe o aquífero;
C = condutividade hidráulica.

S = tipo de solo;

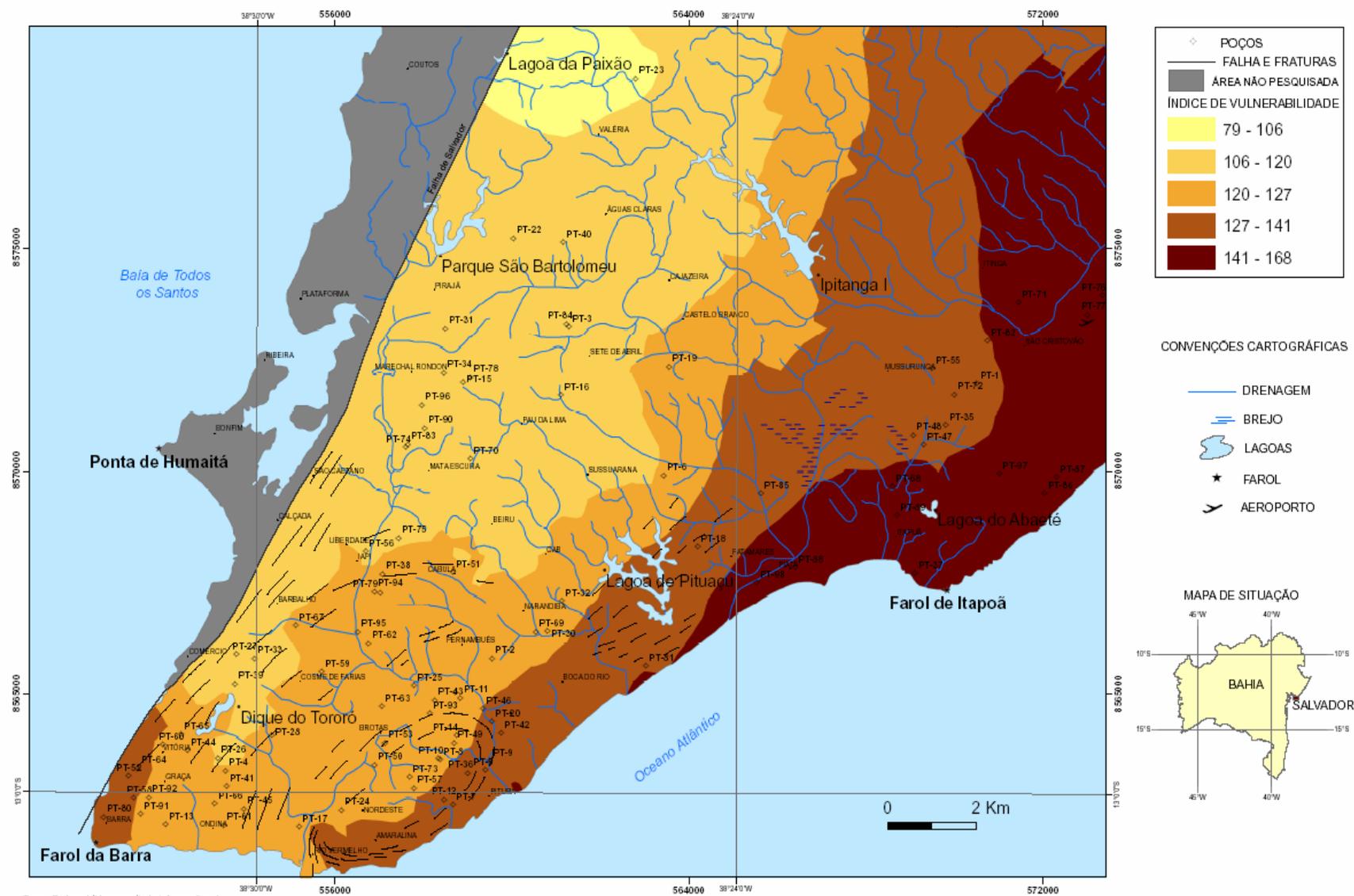
7.5 – RESULTADOS OBTIDOS

O índice de vulnerabilidade DRASTIC para a área de estudo variou entre 79 e 168 sendo considerados para a região de Salvador, as seguintes classes: 79 a 106 (insignificante); 106 a 120 (muito baixo); 120 a 127 (baixo); 127 a 141 (moderado); 141 a 168 (alto).

A distribuição espacial do índice de vulnerabilidade intrínseca, obtida com o modelamento matemático, aumenta a partir do planalto rebaixado em direção a planície litorânea, esta última constituída por sedimentos arenosos Quaternários, conforme pode ser visto na **figura 7.2**.

Os valores insignificantes e muito baixos de vulnerabilidade devem-se basicamente à presença de solos argilosos e argilo-arenosos (parâmetro S) que recobrem o aquífero, além dos valores muito baixos da condutividade hidráulica (K), situados sempre na faixa de $4,6 \times 10^{-6}$ e $4,7 \times 10^{-4}$ cm/seg que é a faixa de condutividade da areia argilosa. Nos locais que apresentam vulnerabilidade alta com valores superiores a 160 (**Tabela 7.3**) observa-se uma convergência de fatores ligados ao nível hidrostático relativamente raso, com um material arenoso constituindo a zona de aeração ou subsaturada. Essa cobertura arenosa facilita a recarga do aquífero por apresentar alta condutividade hidráulica, como é o caso da região constituída pelo campo de dunas que formam o Parque do Abaeté. Essa condutividade hidráulica está em torno de $9,3 \times 10^{-1}$ cm/seg e 28% de porosidade eficaz (SRH, 2005), fazendo com que a planície litorânea arenosa seja a área mais vulnerável de Salvador, já a partir do bairro da Pituba, Os pontos situados no Colégio Nossa Senhora da Luz (PT-7) e no Edifício Fausto (PT-12) em área de influência das dunas do Parque Júlio César apresentaram índice superior a 160.

A matriz de correlação linear de Pearson (1901) obtida com os índices de vulnerabilidade DRASTIC e os valores das análises químicas de algumas variáveis apresentam moderados coeficientes de correlação linear com a amônia ($r = 0,62$) e o ortofosfato ($r = 0,64$) conforme mostra a **tabela 7.4**. Essas moderadas correlações entre as zonas mais susceptíveis de ocorrer contaminação com a amônia e o ortofosfato, podem evidenciar um processo inicial de poluição através desses nutrientes, principalmente ao longo da planície litorânea, com destaque para a região do Parque do Abaeté em Stella Mares. A amônia encontra-se muito associada ao ortofosfato ($r = 0,77$). A associação da amônia com o ortofosfato nas águas subterrâneas está associada à contaminações recentes por esgotos, detergentes, saponáceos oriundos de efluentes domésticos.



Tema: Dados obtidos a partir de informações de poços tubulares fornecidos pela CERB, HIDROCON, AQUAGEO, ÁGUA VMA, COHISA e CPRM.

FIGURA 7.2 - DISTRIBUIÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DRASTIC NO ALTO CRISTALINO DE SALVADOR-BA

Tabela 7.4 Matriz de correlação linear (Pearson).

	I. DRASTIC
I. DRASTIC	1,00
CE	0,19
HCO ₃	0,17
SO ₄	0,13
Cl	0,15
NH ₃	0,62
NO ₂	-0,35
NO ₃	-0,07
PO ₄	0,64
Co	0,17
Mn	-0,31
Hg	0,27
Ni	0,05
V	-0,04

CE = condutividade elétrica; HCO₃ = bicarbonato; SO₄ = sulfato; Cl = cloreto; NH₃ = amônia; NO₂ = nitrito; NO₃ = nitrato; PO₄ = ortofosfato; Co = cobalto; Mn = manganês; Hg = mercúrio; Ni = níquel; V = vanádio.

Obs. O nível de significância para $\alpha = 0,05$ e $n = 25$ é igual a 0,381

Alguns poços tubulares e cacimbas existentes na região da planície costeira apresentam-se com teor de cloreto e valor de condutividade elétrica muito alta devido a influencia marinha. As águas salgadas penetram e afogam os rios na fase da maré alta, contaminando muitas vezes o lençol freático, como foi verificado no Sesc-Piatã (PT-88) e provavelmente no Correio da Bahia (PT-30) na Avenida Paralela.

7.6 RESUMO DO CAPÍTULO

Os resultados mostraram que o método DRASTIC deu bons resultados no estudo da vulnerabilidade do aquífero do Alto Cristalino de Salvador, sobretudo porque foi aplicado em uma zona urbana com grande ocupação populacional, baixa profundidade do nível freático e recarga contínua o ano inteiro.

Os resultados obtidos permitem também concluir que a distribuição espacial dos índices de vulnerabilidade aumenta a partir do compartimento morfológico situado a oeste da Falha do Iguatemi, em direção à planície litorânea (**Figura 7.2**). Esse aumento da vulnerabilidade é devido principalmente a menor profundidade do nível hidrostático e a presença dos sedimentos quaternários, notadamente as dunas e depósitos arenosos que fazem parte dos sedimentos inconsolidados costeiros.

Embora não sejam as mais vulneráveis, as áreas com grandes aglomerados urbanos e, portanto, com maior risco ambiental localizam-se principalmente nas regiões mais interiores do município, nas

porções altas (planalto costeiro dissecado) à montante das bacias hidrográficas, particularmente nas bacias hidrográficas do Camarujipe e do Jaguaripe. Observa-se uma progressiva degradação ambiental na bacia de Pituaçu, nos bairros de Tancredo Neves, Pau da Lima (**Foto 7.1**) e Sussuarana, com a densificação da população, aumentando os impactos urbanos sobre os recursos hídricos superficiais.

A faixa de remanescentes da Mata Atlântica, em diferentes estágios de regeneração, que interliga as bacias de Jaguaribe/Pituaçu à bacia de Ipitanga/Joanes detém expressivo percentual de áreas vazias, passíveis de ocupação. Entretanto, essa faixa exerce função relevante na manutenção da qualidade urbano-ambiental, devendo, portanto, ser ocupada mediante cuidados especiais. As manchas descontínuas ao longo das vertentes dos vales, cercadas por ocupações espontâneas, com padrões precários de urbanização, constituem áreas de progressivo risco, passíveis de recuperação e de contenção de novas invasões (PDDU, 2002).

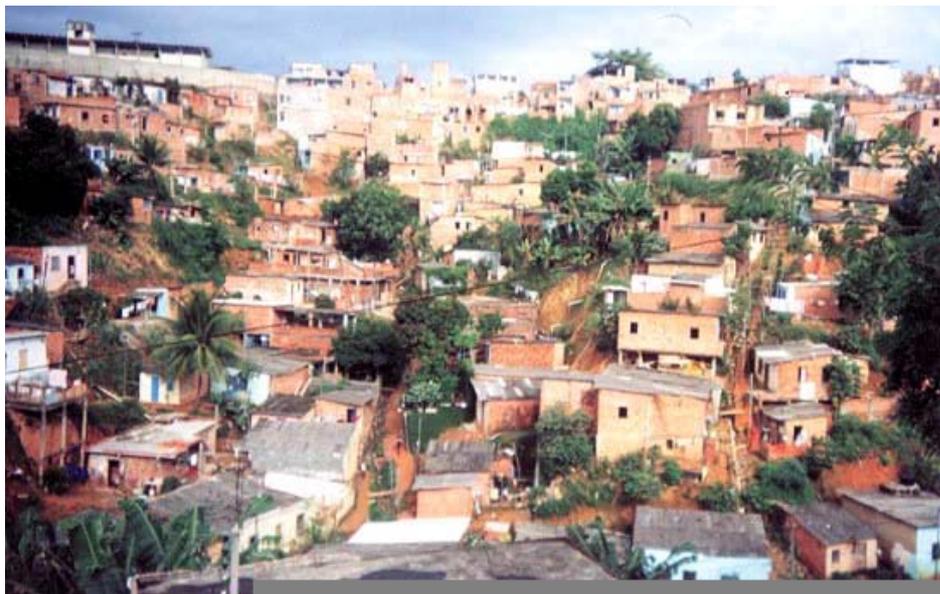


Foto 7.1 Ocupação desordenada na Baixa de Santa Rita no bairro do Pau da Lima. (Fonte: PDDU, 2002).

A extração mineral não chega a representar uma fonte importante de poluição e contaminação das águas superficiais e subterrâneas no município de Salvador, porque as principais minerações no Alto Cristalino são de argila, areia, arenoso e pedras para construção (granulito, gnaisse e granito) (**Foto 7.2**). As minerações de areia, argilas e arenoso ocorrem principalmente nos limites da bacia hidrográfica do rio do Cobre, enquanto que as de pedras para construção concentram-se na bacia do rio Ipitanga, nas localidades de Valéria e Águas Claras. Na nascente do rio do Cobre, a ação de diversas mineradoras de areia aumenta a turbidez com o intenso movimento de terra e assoreamento de drenagens de primeira ordem que alimentam a Lagoa da Paixão. Esta localizada em área de intensa

ocupação humana fez com que a Empresa Baiana de Água e Saneamento – Embasa, restringisse a sua utilização para abastecimento da população do subúrbio ferroviário.

Na periferia de Salvador e, com maior gravidade, nas dunas que constituem o Parque do Abaeté, o desmatamento e supressão da camada arável do solo, provocado pela ação das lavras clandestinas de areias, provocam o desencadeamento de processos erosivos, escorregamentos e desfiguração do ambiente natural (PDDU, 2002).

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES FINAIS

8. CONCLUSÕES FINAIS

As águas subterrâneas do Alto Cristalino de Salvador são armazenadas em dois domínios hidrogeológicos distintos, intercomunicáveis entre si, em geral de natureza livre e, em alguns casos, confinados, formando um sistema aquífero heterogêneo e anisotrópico. O primeiro é representado pelas coberturas do regolito, sedimentos arenosos litorâneos e areno-argilosos da Formação Barreiras. Nessas coberturas, em decorrência do seu caráter textural ser predominantemente areno-argiloso e, sobretudo, devido a sua pouca espessura, formam aquíferos limitados do ponto de vista do armazenamento e da capacidade de produção de seus poços. O segundo é constituído pelo embasamento cristalino com direções de fraturamento N30-40° e N130-140° constituindo um reservatório com capacidade de armazenamento ainda mais limitado e restrito à essas zonas fraturadas.

Entretanto, por se tratar de uma região com elevada pluviosidade, contribuição dos despejos domésticos nas áreas com deficiência de redes de esgoto e vazamentos eventuais na rede de distribuição de água da cidade, o aquífero de Salvador recebe uma taxa de recarga contínua o ano todo, possibilitando seu uso constante sem grandes rebaixamentos.

O alto potenciométrico onde se localizam os bairros do Pau da Lima, Mata Escura e Marechal Rondon entre outros, está associado a uma elevação do embasamento cristalino e funciona como um grande divisor de águas superficiais e subterrâneas. A partir desse alto, a drenagem superficial e subterrânea regional flui em direção ao Oceano Atlântico e ao vale do rio Ipitanga. Para oeste não se verificam grandes fluxos superficiais e subterrâneos em direção à Baía de Todos os Santos, a não ser o rio do Cobre e pequenas fontes ou minadouros naturais existentes ao longo da escarpa da Falha de Salvador.

A razão iônica $rCl/rHCO_3$ funcionou muito bem como rastreador e indicador do movimento da água em subsuperfície, verificando-se uma diminuição dos seus valores sempre na direção do fluxo subterrâneo, ou seja, do planalto costeiro dissecado em direção a planície litorânea.

Os valores isotópicos de δ deutério e oxigênio 18 são muito próximos dos valores de referência padrão (VSMOW) situando-se dentro da faixa das águas meteóricas que são na realidade a grande fonte de recarga do aquífero do Alto Cristalino de Salvador. A presença de águas subterrâneas isotopicamente semelhantes em todos os pontos amostrados sobre as coberturas e o embasamento cristalino, evidencia uma interconexão entre esses dois sistemas aquíferos.

A permeabilidade macroscópica (K) do sistema cobertura/cristalino varia de $0,82 \times 10^{-5}$ (14,2 milidarcy) a $31,60 \times 10^{-5}$ m/min (548 milidarcy), enquanto os raios do cone de depressão variam de 64 a 508 metros. As melhores vazões estão situadas nos sistemas areia/regolito e areia-cristalino com

4,00 e 5,20 m³/h respectivamente enquanto que as menores foram encontradas em poços tubulares perfurados na cobertura de regolito, com 1,60 m³/h (valor da mediana). Assim, no sistema areia-cristalino, os poços podem produzir vazões médias duas vezes maiores do que no sistema solo/cristalino.

A reserva reguladora (Rr) de água subterrânea do Alto Cristalino de Salvador pode suprir 25 - 30% da população local durante um ano, enquanto que a disponibilidade de poços atualmente instalada possibilita o fornecimento de água subterrânea para cerca de 130.137 habitantes/ano, o que representaria apenas 5% da população soteropolitana. Essa disponibilidade atualmente instalada representa somente 11,5% da reserva reguladora e cerca de 10% da potencialidade do aquífero.

As águas subterrâneas do Alto Cristalino de Salvador apresentaram-se predominantemente sódicas (65,6%) e mistas (31,2%) e, secundariamente, de natureza cálcicas (3,1%). Podem ser classificadas como cloretadas sódicas (65,7%), cloretadas cálcicas ou magnesianas (15,6%), bicarbonatadas sódicas (12,5%) e bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (6,2%).

O Fe²⁺ dissolvido pode precipitar sob a forma de goetita (FeOOH)₃ e hematita (Fe₂O₃) porque as condições de pH e Eh da água da região são favoráveis, enquanto a siderita (FeCO₃) só precipita quando as condições são redutoras e estão sob influência de zonas de brejo ou pantanos.

Verificou-se a pouca presença da pirolusita (MnO₂), manganita (MnOOH) e hausmanita (Mn₃O₄) nos pontos estudados em virtude das condições físico-químicas desfavoráveis para sua precipitação, ou seja, pH levemente ácido.

A precipitação da aragonita, calcita e dolomita ficam condicionadas ao aumento dos valores de bicarbonato e, conseqüentemente, do pH. Aragonita, calcita e dolomita não se formam quando as condições físico-químicas são favoráveis à formação dos filossilicatos (montmorilonita Ca – caolinita) e óxidos de alumínio (gibsita), caracterizando assim dois ambientes geoquímicos distintos. Os carbonatos formam-se próximos à orla Atlântica na região da planície litorânea enquanto os filossilicatos e a gibsitita se formam preferencialmente na região do planalto costeiro dissecado.

A análise fatorial revelou que algumas variáveis podem caracterizar aspectos interessantes associados às águas subterrâneas do Alto Cristalino de Salvador. A associação do magnésio e cromo evidencia uma provável influencia das rochas máficas metamorfisadas ou não que estão associadas aos granulitos tonalíticos e charnoenderbíticos, enquanto a turbidez e os sólidos em suspensão poderá estar associado aos poços tubulares e cacimbas mal construídas e com problemas de manutenção.

Outro aspecto interessante mostrado pela análise fatorial foi a associação do bicarbonato e do pH no domínio da planície litorânea, enquanto a condutividade elétrica, sódio e cloreto mostram a influência direta do mar nas áreas próximas às desembocaduras de maiores rios de Salvador, principalmente nos períodos de maré alta, afetando, porém não comprometendo em alguns casos, a qualidade das águas subterrâneas na zona da planície litorânea.

A associação entre o ferro e o manganês dissolvido é muito comum nas águas subterrâneas do Alto Cristalino de Salvador, sendo consequência do intemperismo químico das litologias portadoras de minerais ferromagnesianos, tais como, ortopiroxênio, anfibólio e biotita.

As variáveis que mais contribuem para a contaminação das águas subterrâneas no Alto Cristalino de Salvador são a **cor real**, **turbidez**, **sólidos em suspensão**, **potássio**, **amônia**, **ortofosfatos**, **nitratos**, **ferro**, **manganês** e **níquel**. Todas as outras variáveis analisadas na água subterrânea apresentaram valores normais de potabilidade segundo os padrões de qualidade utilizados, não contribuindo para a contaminação da água.

Os índices de vulnerabilidade aumentam a partir do compartimento do planalto costeiro dissecado em direção à planície litorânea. Esse aumento é devido principalmente à menor profundidade do nível hidrostático e à presença dos sedimentos quaternários porosos e permeáveis, notadamente as dunas e depósitos arenosos que fazem parte dos sedimentos inconsolidados.

A associação da amônia e os ortofosfatos com os altos índices de vulnerabilidade podem indicar a existência de um processo inicial de contaminação na região devido a utilização pela população de detergentes, saponáceos, inseticidas e pesticidas, além da participação dos esgotos domésticos em áreas sem saneamento básico.

Embora não sejam as mais vulneráveis, as áreas com maior risco ambiental localizam-se principalmente nas regiões mais interiores do município, nas porções altas (planalto costeiro dissecado) à montante das bacias hidrográficas, particularmente das bacias hidrográficas do Camarujipe e do Jaguaripe. Entretanto, identifica-se uma tendência de progressiva degradação ambiental de outras áreas, a exemplo da bacia de Pituaçu, onde bairros como Tancredo Neves, Pau da Lima e Sussuarana têm-se densificado, aumentando os impactos urbanos sobre os recursos hídricos superficiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALABURDA, J.; NISHIHARA, L. Presença de compostos de nitrogênio em águas de poços. *Revista de Saúde Pública*, São Paulo, São Paulo, vol. 32, n^o 2, p. 160-165, abril 1998.

ALBINET, M.; MARGAT, J. Cartographie de la vulnerabilite a la pollution des nappes d'eau souterraine. **Bull BRGM 2me Series**, v. 3, n. 4, p. 13-22, 1970.

ALLER, L. et al. **DRASTIC**: a standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrological settings. Ada, USA: National Water Well Association, 1987.

ARAÚJO, F. M. de **Caracterização dos elementos do meio físico e do uso do solo da bacia do rio Itinga**: instrumento para monitoramento ambiental do aterro metropolitano centro – Salvador, Bahia. 2005. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 18 th ed. Washington: APHA/AWWA, 1992.

_____. _____. 20 th ed. Washington: APHA/AWWA, 1998.

AUGE, M. Vulnerabilidade de aquíferos: conceptos y metodos. Buenos Aires: Universidade de Buenos Aires, 2003. Disponível em: <<http://www.tierra.rediris.es/hidrored/ebvulnerabilidad.html>>. Acesso em: 04 jan. 2005.

AUGE, M. Vulnerabilidade de aquíferos. **Revista Latino-Americana de Hidrogeologia**, Curitiba, n. 4, p. 85-103, 2004.

BARBOSA, J. S. F.; DOMINGUEZ, J. M. L. (Coords.). *Geologia da Bahia: texto explicativo*. Salvador: Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração, 1996. 382 p.

BARBOSA, et al. Petrografia e litogeoquímica das rochas da parte oeste do Alto de Salvador, Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 35, n. 4, p. 09-22, dez. 2005.

BOCHICCHIO, R. Salvador das mil fontes. **A Tarde**, Salvador, 03 ago. 2003. Caderno 2, p. 2-3.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA** nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1.cfm?codlegitipo=3&ano=2005>>. Acesso em: 08 ago. 2006.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 518**, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Disponível em: <http://dtr2004.saude.gov.br/dab//saudebucal/legislacao/portaria518_25_03_04.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2005.

CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO (Bahia). Proposta de enquadramento das bacias hidrográficas dos rios Camarujipe, Pedras e Jaguaripe: relatório técnico. Salvador, 1976. 62 p.

CERQUEIRA NETO, J. X.; BARRETO, W. **Estabilidade de encostas no Campus Universitário de Ondina**: relatório interno. Salvador: UFBA, Instituto de Geociências, 1972. 34 p.

CHAPMAN, D. (Ed.). Water quality assessment. London: E & FN IPSON, 1997. p. 59-126.

_____.; KINSTACH, V. Selection of water quality variables. In: CHAPMAN, D. (Ed.). **Water quality assessment**. London: E&FN IPSON, 1997, p. 59-126.

COMPANHIA DE ENGENHARIA RURAL DA BAHIA. Cadastro de poços tubulares do estado da Bahia. Salvador, 1980. 10 v.

COSTA, W. D. **Avaliação de reserva, potencialidade e disponibilidade de aquíferos**. Disponível em: <<http://www.perfuradores.com>>. Acesso em: 08 ago. 2006.

CRAIG, H.; LAL, D. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. **Science**, Washington, v. 133, n. 3456, p. 1833-1834, 1961.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia subterrânea**. 2. ed. Barcelona: OMEGA. 1983. 2 v.

DANSGAARD, W. Stable Isotopes in Precipitation. **Tellus**, Stockholm, v. 16, p. 436-468, 1964.

DEUTSCH, W. J. **Groundwater geochemistry**: fundamentals and applications to contamination. Boca Raton, Fla.: Lewis Publishers, 1977. 220 p.

EGLER, C. A. G. Risco ambiental como critério de gestão do território: uma aplicação à zona costeira brasileira. **Território**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 31-41, 1996.

EMBASA (Bahia). **Livro das águas**. 2. ed. Salvador, 2003. 28 p.

FEITOSA, A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997. 412 p.

FENZL, N. **Introdução a hidrogeoquímica**. Belém: Universidade Federal do Pará, 1988. 189 p.

FÖSTER, S. S. D. **Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy**. The Hague: TNO Committee on Hydrological Research Information, 1987. p. 69-86.

_____.; HIRATA, R. C. A. **Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas**: um método baseado em dados existentes. São Paulo: Instituto Geológico, 1993. 92 p.

_____. **Determinación del riesgo da contaminación de águas subterrâneas**: uma metodologia baseada em dados existentes. Lima: CEPIS, 1991. 81 p.

_____.; ROCHA, G. A. **Riscos de poluição de água subterrânea**: uma proposta de avaliação regional. São Paulo: CEPIS/OPS, 1988.

FOSTER, S. S. D.; VENTURA, M.; HIRATA, R. C. **Contaminação de las águas subterranas**. Lima: Organização Mundial de la Salud, 1987.

FUGIMORI, S. O ambiente das encostas da cidade do Salvador. **Cadernos do Expogeo**, Salvador, n. 7, p. 19-28, 1996.

GUERRA, A. M. **Processos de carstificação e hidrogeologia do Grupo Bambuí na região de Irecê – Bahia**. 1986. 132 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

GUERRA, A. M.; NEGRÃO, F. I. Domínios hidrogeológicos do Estado da Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 9., 1996, Salvador. **Anais...** São Paulo: ABAS, 1996. p. 208-212.

GUERRA, A. M.; NASCIMENTO, S. A. de M. **Diagnóstico do grau de comprometimento das águas do aquífero freático de Salvador causado por vazamentos em postos de gasolina: área piloto da bacia do rio Camarujipe: relatório final.** Salvador: UFBA; EMBASA, 1999.

_____. Diagnóstico sobre a qualidade da água subterrânea na bacia hidrográfica do Rio Camarujipe: Salvador - Bahia. **Tecbahia**, Revista Baiana de Tecnologia, Camaçari, v. 15, n. 2, p. 128-141, maio/ago. 2000.

GUIMARÃES, M. M. M. **Evolução quaternária da costa atlântica de Salvador, Bahia.** 1978. 97 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1978.

HANTUSH, M. S. Hydraulics of wells. In: Te Chow, V. (Ed.). **Advance in hydrosiences.** New York: Academic Press, vol. 1, 1964. p. 281-432.

HIRATA, R. C. A. Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a vulnerabilidade à poluição de aquíferos. In: SEMINÁRIO TALLER, 1., 2001, São Paulo. **Protección de Acuíferos frente a la contaminación: metodología.** Toluca, México, 2001. Disponível em: <<http://tierra.rediris.es/hidrored/RVA.html>>. Acesso em: 4 jan. 2005.

HOTELLING, H. 1933. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology* 24 417 441, 498 520. Z .

IBGE. **Consulta populacional.** Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 20 nov. 2006.

_____. **Folha SD-24 Salvador:** potencial dos recursos hídricos. Rio de Janeiro: IBGE, 1999. 236 p. (Levantamento de Recursos Naturais; 24).

_____. **Indicadores sociais municipais:** 2000. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 20 nov. 2006.

_____. **Sinopse preliminar do censo demográfico 2000.** Rio de Janeiro, 2000. v. 7.

JOUZEL, J.; MERLIVAT, L. Deuterium and oxygen 18 in precipitation: modeling of the isotopic effects during snow formation. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 89, p. 11749–11757, 1984.

KOEPPEN, W. **Climatologia**: con un estudio de los climas de la tierra. México: Fondo de Cultura Económica, 1931. 478 p.

LAMOINE B. Essai de Classification et de cartographie de la qualité chimique des eaux souterraines. Bulletin du Bureau de Recherches Geologiques et Mineres. Supplement, 1974 77 pages.

LIMA, O. A. L. de. **Caracterização hidráulica e padrões de poluição no aquífero do recôncavo na região de Camaçari – Dias D’Avila, Bahia**. 1999. 123 f. Tese (professor titular) - Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1999.

_____. Condições geohidrológicas e geotécnicas na região metropolitana de Salvador. In: SALVADOR. Prefeitura Municipal. **Planejamento ambiental para Salvador**: documentos preliminares. Salvador, 1995, p. 89–138.

LEITE, C. E. S.; MOBUS, G. Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da região de rochas sedimentares da bacia do rio Mundaú/Ceará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGUA SUBTERRÂNEA, 10., 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABAS, 1998.

LE GRAND, H. System for evaluating contamination potential for some waste sites. **Journal of the American Water Work Association**, Baltimore, v. 56, n. 8, p. 959-974, 1964.

_____. **A standardized system for evaluating waste disposal sites**. Worthington, Ohio: NWWA, 1983.

LOGAN, J. **Interpretação de análises químicas de água**. Recife: [U.S. Agency for International Development], 1965. 67 p.

MASON, B. H. **Princípios de geoquímica**. São Paulo: EDUSP, 1971. 381p.

MARGAT, J. **Vulnérabilité des nappes d’eau souterraines à la pollution**: bases de la cartographie. Orléans: BRGM, 1968.

MARTIN, I. et al. **Mapa geológico do quaternário costeiro do estado da Bahia**: escala 1:250.000: texto explicativo. Salvador: Secretaria das Minas e Energia, 1980. 57 p.

MENEGOTTO, E. Estudo da intemperização de rochas ultrabásicas através da composição da água do subsolo. **Geochimica Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 2, p. 261–271, 1987.

MERLIVAT, L.; JOUZEL, J. Global climatic interpretation of the Deuterium-Oxygen 18 relationship for precipitation. **Journal Geophysical Research**, Washington, v. 84, p. 5029–5033, 1979.

MILHOMEM, P. da S. et al. Bacia do Recôncavo. Phoenix, Aracaju, ano 5, n. 51, p. X-X, mar. 2003.

MORAES, L. R. S. et al. Aproveitamento de antiga represa como unidade recuperadora de qualidade de águas (URQA): o exemplo de Mata Escura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 18., 1995, Salvador. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 1995.

_____. Recursos hídricos, saneamento e saúde. In: SALVADOR. Prefeitura Municipal. **Planejamento ambiental para Salvador**: documentos preliminares. Salvador, 1995, p. 139-226.

NASCIMENTO, S. A. de M. Estudo da qualidade da água do aquífero freático nas bacias dos rios Lucaia e Baixo Camarujipe: relatório técnico. Salvador: UFBA, Instituto de Geociências, 2002. 52 p.

_____.; BARBOSA, J. S. F. Qualidade da água do aquífero freático no alto cristalino de Salvador, Bacia do Rio Lucaia, Salvador, Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 35, n. 4, p. 543-550, dez. 2005.

PARKHURST D.L., THORENSTON D.C. & PLUMMER N.L. PHREEQE - A computer program for geochemical calculations. U.S. Geological Survey Water Resource Investigations, 1980, 80-96, 210 pp.

PARKHURST D.L., User's guide to PHREEQC - A computer program for speciation, reaction path, advective transport, and inverse geochemical calculation. U.S. Geological Survey Water Resource Investigations, 1996, 95-4227. <http://gwrp.cciw.ca/gwrp/software/software.html>.

PEDRO, G. **Contribution à l'étude expérimentale de l'altération chimique des roches cristallines**. 1964. 344 f. Thèse - Faculté de Science, Paris, 1964.

PEDRO, G. Essai sur la caracterisation géochimique dès différentes processus zonaux resultant de l'alteration dès roches superficielles (cycle alumino-silicique) comte. **Rendu Acad. Sci.**, Paris, v. 262, p. 1825-1831, 1966.

PEREIRA, L. et al. Medidas hidroquímicas e isotópicas em água subterrânea que abastecem a município de São Luis – Maranhão. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, n. 18, p. , jan. 2004.

PIPER, A. M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water anallysis. **Transactions American Geophysical Union**, Washington, v. 25, p. 911-923, 1944.

PIVELI, R. P. **Qualidade das águas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 1997. 218 p. Material de aula.

REGO, M. J. M.; CARVALHO, A. Evolução mineralógica em alteritas provenientes de granulitos da zona cacaeira da Bahia: uma abordagem micromorfológica. **Geochimica Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 1, p. 73-85, 1977.

RIBEIRO, L. P. Alguns aspectos dos solos da cidade do Salvador e suas relações com processos de degradação. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 3, n. 5/ 6, p. 59-73, dez. 1991.

ROCHA, A. A. A problemática da água. In: LEITE, J. L. (Org.). **Problemas chave do meio ambiente**. Salvador: UFBA, Instituto de Geociências; EXPOGEO, 1994. p. 91-114.

RODRÍGUEZ, H. **Impacto del desarrollo urbano sobre la recarga de los acuíferos Colima**. San José, Costa Rica: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, 1993.

RODRIGUEZ, R.; RAMOS, G. Inventario de sítios contaminados en la Zona Metropolitana de la Cuenca de México: critérios de selección de áreas piloto. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE RESTAURACION DE SÍTIOS CONTAMINADOS, 1997, México. **Anais...** Mexico: CENICA, 1997. p. 101-106.

_____.; RODRIGUEZ, I. V. Los mapas de riesgo de contaminacion acuífera em zonas urbanas. Hidrred. In: SEMINÁRIO TALLER, 4., 2004, Lima. **Proteccion de acuíferos frente a la contaminación**: proteccion de la calidad del água. Lima, Peru, 2004. Disponível em: <<http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/lima/08rodriguez.html>>. Acesso em: 17 jan. 2005.

SACRAMENTO, M. da G. P. **Estudo de encostas sobre rochas cristalinas**: arredores de Salvador, Bahia. 1975. 119 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal Bahia, Salvador, 1975.

SALVADOR. Prefeitura Municipal. **Plano diretor de desenvolvimento urbano do município de Salvador**: (PDDU). Salvador: Secretaria Municipal de Planejamento, Urbanismo e Meio Ambiente, 2002. 134 p.

SAMPAIO FILHO, H. de A. **Estudo geoquímico e mineralógico da alteração dos granulitos dos arredores de Salvador-Bahia**. 1974. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal Bahia, Salvador, 1974.

SANTOS, A. C. Noções de hidroquímica. In: Feitosa A. C.; Manoel Filho, J. (Eds.). **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997. p. 81–108.

SCHOELLER, H. **Lês eaux souterraines**. Paris: Mason, 1962. cap 7.

SILVA, A. B. da. **Água subterrânea para ampliação do sistema de abastecimento de Belo Horizonte**. Belo Horizonte: UFMG, IGEO. Disponível em: <<http://www.unesco.gov.uy/phi/Libros/estrategias/art04.html>>. Acesso em: 02 dez. 2004.

SILVA, J. C. E. **Comportamento geoquímico e mineralógico dos minerais resistentes ao intemperismo das rochas granulíticas em clima tropical úmido**. 1979. 47 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1979.

SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. **Análise dos atributos climáticos do estado da Bahia**. Salvador, 1998. 85 p.

SUPERINTENDENCIA DE RECURSOS HÍDRICOS (Bahia), **Comportamento do nível da água da Lagoa do Abaeté**, Salvador: Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Bahia, 2005. 14 p. Disponível em: <<http://www.srh.gov.br/publicacoes/arquivos/superficial/abaete.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2006.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.

VALVERDE, A. J. **Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica.** [S. l.: s. n.], 2000. Proyecto de Graduación.

_____.; MESALLES, R. P. **Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos Del Valle Central de Costa Rica.** 2002. Disponível em:<http://gis.esri.com/library/userconf/latinproc00/costa_rica/analisis_vulnerabilidad/vulnerabilidad.html>. Acesso em: 06 jan. 2005.

VIDAL, P. **Geochimie.** Dunod, Paris: [s. n.], 1994. 37 p.

VIVEIROS de SÁ, P. V. **Estudo geoquímico e mineralógico dos estágios iniciais de alteração dos diabásios.** 1994. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1974

VRBA, J.; ZAPOROZEC, A. **Guidebook on mapping groundwater vulnerability.** Hannover: International Association of Hydrogeologists, 1994. 131 p.

WAHNFRIED, I.; HIRATA, R. A recarga do aquífero sedimentary na Cidade Universitária da USP (São Paulo). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., 2004, Cuiabá. **Anais eletrônicos...** São Paulo: ABAS, 2004. 1 CD-ROM.

ANEXOS

- Artigos publicado e aceito pela Revista Brasileira de Geociências
Durante o período de elaboração desta Tese