

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

Waldir Duarte Costa Filho

**ESTUDO HIDROQUÍMICO NOS
AQÜÍFEROS DA PLANÍCIE DO RECIFE**

Dissertação de Mestrado
1997

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**ESTUDO HIDROQUÍMICO NOS
AQÜÍFEROS DA PLANÍCIE DO RECIFE**

Waldir Duarte Costa Filho

Orientadores:

Franklin Gomes Pinto - UFPE
Maria Marlúcia Freitas Santiago - UFC

Dissertação de Mestrado
Hidrogeologia

Recife, 1997

WALDIR DUARTE COSTA FILHO
Geólogo, Universidade Federal de Pernambuco, 1992

ESTUDO HIDROQUÍMICO NOS AQÜÍFEROS DA PLANÍCIE DO RECIFE

Dissertação apresentada à Pós-graduação em Geociências do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, orientada pelos professores Dr. Franklin Gomes Pinto e Dra. Maria Marlúcia Freitas Santiago, como preenchimento parcial dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Geociências, área de concentração Hidrogeologia, tendo sido aprovado com distinção.

RECIFE-PE
Fevereiro-1997

ESTUDO HIDROQUÍMICO NOS AÇÜÍFEROS DA PLANÍCIE DO RECIFE

WALDIR DUARTE COSTA FILHO

APROVADO:

Prof. Dr. Franklin Gomes Pinto 24/02/97

Profa. Dra. Maria Marlúcia F. Santiago 24/02/97

Prof. Dr. Manoel Sylvio C. Campelo Neto 24/02/97

Dedico este trabalho ao nosso DEUS, ao meu pai, WALDIR, à minha mãe, CIÇÔNE, à minha esposa, VALÉRIA, às minhas filhas, PRISCYLLA e PATRÍCIA, aos meus irmãos e a todos os meus AMIGOS.

APRESENTAÇÃO

Este trabalho apresenta os resultados do estudo hidroquímico realizado, nos aquíferos da Planície do Recife, através de dados constantes em 303 análises físico-químicas já existentes e em 91 análises físico-químicas efetuadas numa recente campanha.

O presente estudo, surgiu da importância da água subterrânea para o abastecimento público doméstico na Planície do Recife, que vem sendo feito de forma desordenada. Diante da grande quantidade de análises físico-químicas cadastradas na área, resolveu-se fazer um estudo qualitativo e quantitativo destes dados, apresentando resultados obtidos no tratamento estatístico e no tratamento químico.

O trabalho foi concebido como parte integrante de um estudo de caráter mais amplo, iniciado em janeiro de 1995, denominado "Estudo Hidrogeológico na Região Metropolitana do Recife - Projeto HIDROREC", através de um Convênio firmado entre o International Development Resourch Center do Canadá - I.D.R.C. e a Fundação de Apoio ao Desenvolvimento de ensino da Universidade Federal de Pernambuco - FADE.

Desde o início, este trabalho conta com recursos financeiros do I.D.R.C., e com o apoio técnico dos integrantes do Projeto HIDROREC.

Além do cunho acadêmico, este trabalho terá grande importância prática na gestão das águas subterrâneas na Planície do Recife, representando uma grande contribuição sócio-econômica para o estado de Pernambuco que, recentemente aprovou a Lei de uso e controle das águas subterrâneas, necessitando, para sua aplicação, de um embasamento técnico ora apresentado.

RESUMO

As águas subterrâneas na Planície do Recife foram estudadas utilizando análises físico-químicas filtradas de 268 poços, tratando-as através de técnicas estatísticas e de interpretações químicas.

As águas subterrâneas foram consideradas como pertencentes a três aquíferos intersticiais denominados de Beberibe Inferior, Cabo e Boa Viagem, segundo estudos mais recentes. O Aquífero Beberibe Inferior, composto por arenitos quartzosos continentais, é o de maior potencialidade e boas condições hidrodinâmicas, em relação aos aquíferos Cabo e Boa Viagem, compostos por arenitos grosseiros de matriz arcoseana, arcósios, siltitos e argilitos (Aquífero Cabo), e por misturas de areias argilosas, argilas, limos e vasas, de origem continental ou marinha (Aquífero Boa Viagem).

As águas na Planície são de tipos variados, sendo mistas nos aquíferos Boa Viagem e Beberibe Inferior, e cloretadas no Aquífero Cabo. Cationicamente, são essencialmente sódicas, nos aquíferos Beberibe Inferior e Cabo, e essencialmente mistas com a presença de águas cálcicas, no Aquífero Boa Viagem.

Segundo as normas estabelecidas pela Organização Mundial de Saúde, as águas nos três aquíferos são de boa qualidade com 80 a 90% dentro dos limites de potabilidade de cada elemento. Com relação ao pH, apenas as águas do Aquífero Boa Viagem apresentaram-se um pouco alcalinas, com algum risco quanto à corrosão e à incrustação.

Altas concentrações, principalmente, de sódio e de cloreto e altos valores de condutividade elétrica, aparecem nos bairros de Boa Viagem, Pina, Coelhos/São José e Recife antigo, nos respectivos aquíferos, que, com a corroboração da relação iônica $rCl/rHCO_3$, sugerem focos de contaminação por água de origem marinha.

As águas são, em geral, de boa qualidade para a irrigação, com risco de sódio baixo (S1) nos três aquíferos e com o risco de salinidade baixo (C1) no Aquífero Beberibe Inferior, médio (C2) no Aquífero Cabo e médio (C2) a alto (C3) no Aquífero Boa Viagem, prestando-se, para a maioria das culturas em quase todos os tipos de solos.

Apesar dos diferentes tipos de água nos três aquíferos, a análise estatística multivariante demonstrou, a um nível de correlação de 82% entre os poços, tratar-se da mesma água que, com base nas classificações anteriores, é tida como de boa qualidade para o consumo humano e para a irrigação.

PALAVRAS CHAVES: água subterrânea, hidroquímica, parâmetros estatísticos, aquíferos.

ABSTRACT

The ground waters in Recife Plain were studied using physic-chemical analysis of 268 filtered well samples by statistic techniques and chemical interpretation.

The ground waters belongs to three aquifers: Lower Beberibe, Cabo e Boa Viagem. The first is the greatest one and with the best hydrodinamic conditions and composed by continental quartz sandstone. The second one is composed by coarse sandstone, silt and clay and the third one composed by a mixture of clayey sandstone, clay and microrganism of continental and marine origin.

The water of the studied plain are of different types being mixed in Boa Viagem and Lower Beberibe Aquifer and chloride in Cabo Aquifer. The Lower Beberibe and Cabo Aquifers showed the presence of sodium and the Boa Viagem Aquifer presented a mixture of cations.

By Health World Organization rulers, the three aquifers are adequate for human drinking. Only Boa Viagem Aquifer presented alkaline water that can make some corrosion and incrustation.

High concetrations of sodium and chloride and high electric conductivities values were detected in Boa Viagem, Pina, Coelhos / São José and Old Recife District. High Values of $rCl/rHCO_3$ ionic relation suggest marine origin water contamination.

In general, the waters of the three aquifers are goog for irrigation, with low sodium and salinity contamination risk in Beberibe Aquifer, medium in Cabo Aquifer and high in Boa Viagem Aquifer.

Despite of different type of waters, the multivariant statistic analysis demonstrated the water is the same in the three aquifers.

S U M Á R I O

DEDICATÓRIA

APRESENTAÇÃO

RESUMO

ABSTRACT

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	8
2.1. LOCALIZAÇÃO	8
2.2. ASPECTOS CLIMÁTICOS	9
2.3. RELEVO	11
2.4. VEGETAÇÃO	12
2.5. HIDROGRAFIA	12
2.6. GEOLOGIA	13
2.7. HIDROGEOLOGIA	21
CAPÍTULO 3. HIDROQUÍMICA - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	24
3.1. CONSTITUINTES IÔNICOS	24
3.2. PROPRIEDADES IÔNICAS	31
3.3. RELAÇÕES IÔNICAS (ÍNDICES HIDROGEOQUÍMICOS)	31
CAPÍTULO 4. METODOLOGIA	36
4.1. TRABALHO DE CAMPO	36
4.2. TRABALHO DE LABORATÓRIO	37
4.2.1. MÉTODOS DE MEDIDAS	37
4.2.2. CONVERSÃO DE UNIDADE	38
4.3. TRATAMENTO DOS DADOS	39
4.3.1. CONSISTÊNCIA DOS RESULTADOS	39
4.3.2. INFORMATIZAÇÃO DOS DADOS	41
4.3.3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	42

4.3.4. CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS	42
4.3.5. TRATAMENTO ESTATÍSTICO	45
CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	56
5.2. HISTOGRAMAS	76
5.3. SUPERFÍCIES 2D e 3D	79
5.4. DIAGRAMAS DE PIPER	123
5.5. GRÁFICOS CIRCULARES E DE BARRAS	127
5.6. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO	149
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES	163
AGRADECIMENTOS	167
BIBLIOGRAFIA	169
ANEXOS	173

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Médias mensais de normais climatológicas de 1961 a 1990, na Estação Meteorológica de Recife/PE.	9
TABELA 3.1 - Solubilidade de Compostos Dissolvidos na Água.	25
TABELA 4.1 - Fatores de conversão de unidades.	38
TABELA 4.2 - Erros Permissíveis pelas Faixas das Somas Iônicas.	39
TABELA 4.3 - Uso das Águas e Tipo de Análise.	43
TABELA 4.4 - Número de Classes em Função da Quantidade de Observações Disponíveis.	46
TABELA 4.5 - Relação entre a Ordem da Superfície de Tendência com o Número Mínimo de Pontos em que a .tendência deve ser Analisada.	50
TABELA 5.1 - Poços com análise físico-química na Planície do Recife.	174
TABELA 5.2 - Empresas perfuradoras de poços na Região Metropolitana do Recife.	184
TABELA 5.3 - Laboratórios de análises hidroquímicas na Região Metropolitana do Recife.	185
TABELA 5.4 - Concentrações dos Elementos Físico-Químicos dos Poços da Planície do Recife.	186
TABELA 5.5 - Relações Iônicas (Índices Hidrogeoquímicos)	197
TABELA 5.6 - Tabela de Freqüência para o Cálcio.	56
TABELA 5.7 - Tabela de Freqüência para o Sódio.	58
TABELA 5.8 - Tabela de Freqüência para o Cloreto.	58
TABELA 5.9 - Tabela de Freqüência para o Bicarbonato.	61
TABELA 5.10 - Tabela de Freqüência para o Condutividade Elétrica.	63

TABELA 5.11 - Tabela de Freqüência para o pH.	63
TABELA 5.12 - Tabela de Freqüência para a Relação Iônica rMg/rCa.	66
TABELA 5.13 - Tabela de Freqüência para a Relação Iônica rK/rNa.	66
TABELA 5.14 - Tabela de Freqüência para a Relação Iônica rCl/rHCO ₃ .	67
TABELA 5.15 - Tabela de Freqüência para a Relação Iônica ITB.	67
TABELA 5.16 - Tabela de Freqüência para a Relação Iônica SAR.	67
TABELA 5.17 - Tabela de Freqüência para as classificações da água quanto à irrigação, segundo a classificação do U.S.Dept.Agriculture	68
TABELA 5.18 - Tabela de Freqüência para as classes de SAR e de condutividade elétrica, segundo a classificação do U.S.Dept.Agriculture	68
TABELA 5.19 - Parâmetros estatísticos das concentrações dos elementos maiores e do resíduo seco (mg/L), do pH, da condutividade elétrica (µS/cm)	70
TABELA 5.20 - Parâmetros estatísticos das relações iônicas.	70
TABELA 5.21 - Matriz de coeficientes de correlação do momento do produto Pearson, r, para o Aquífero Beberibe Inferior, no 1º grupo de amostras, entre 1966 a 1994.	73
TABELA 5.22 - Matriz de coeficientes de correlação do momento do produto Pearson, r, para o Aquífero Beberibe Inferior, no 2º grupo de amostras, de 1996.	73
TABELA 5.23 - Matriz de coeficientes de correlação do momento do produto Pearson, r, para o Aquífero Boa Viagem, no 1º grupo de amostras, entre 1966 a 1994.	74

TABELA 5.24 - Matriz de coeficientes de correlação do momento do produto Pearson, r , para o Aquífero Boa Viagem, no 2º grupo de amostras, de 1996.	74
TABELA 5.25 - Matriz de coeficientes de correlação do momento do produto Pearson, r , para o Aquífero Cabo, no 1º grupo de amostras, entre 1966 a 1994.	75
TABELA 5.26 - Matriz de coeficientes de correlação do momento do produto Pearson, r , para o Aquífero Cabo, no 2º grupo de amostras, de 1996.	75
TABELA 5.27 - Relação entre os casos agrupados nos dendogramas da Figura 5.61 com os respectivos poços, nos três aquíferos do 1º grupo de amostragem.	151
TABELA 5.28 - Relação entre os casos agrupados nos dendogramas da Figura 5.63 com os respectivos poços, no Aquífero Beberibe Inferior do 2º grupo de amostragem (1996).	153
TABELA 5.29 - Relação entre os casos agrupados nos dendogramas da Figura 5.64 com os respectivos poços, no Aquífero Boa Viagem do 2º grupo de amostragem (1996).	154
TABELA 5.30 - Relação entre os casos agrupados nos dendogramas da Figura 5.65 com os respectivos poços, no Aquífero Cabo do 2º grupo de amostragem (1996).	156
TABELA 5.31 - Relação entre os casos agrupados no dendograma da Figura 5.66 com os respectivos poços, nos três aquíferos do 2º grupo de amostragem.	161

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Localização da área em estudo	8
FIGURA 2.2 - Normais Climatológicas de precipitação e evaporação na Estação Meteorológica de Recife-PE (Fonte dos dados: DNM, 1992)	10
FIGURA 2.3 - Normais Climatológicas de temperatura e umidade na Estação Meteorológica de Recife-PE (Fonte dos dados: DNM, 1992)	10
FIGURA 2.4 - Normais Climatológicas de insolação na Estação Meteorológica de Recife-PE (Fonte dos dados: DNM, 1992)	11
FIGURA 2.5 - Principais rios que banham a Planície do Recife	12
FIGURA 2.6 - Mapa Geológico da Planície do Recife e adjacências	13
FIGURA 2.7 - Mapa do Arcabouço Estrutural da Planície do Recife e adjacências.	14
FIGURA 2.8 - Coluna Lito-estratigráfica da Planície do Recife.	16
FIGURA 2.9 - Mapa Hidrogeológico Simplificado da Planície do Recife e adjacências	23
FIGURA 4.1 - Diagrama do U.S.Salinity Laboratory (U.S.S.L.) para a Classificação de Águas para Irrigação.	45
FIGURA 5.1 - Mapas de Localização dos Poços com Análise Físico-Química na Planície do Recife. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	54
FIGURA 5.2 - Histogramas de Freqüência das Concentrações de Cálcio. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	57
FIGURA 5.3 - Histogramas de Freqüência das Concentrações	

de Sódio. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	59
FIGURA 5.4 - Histogramas de Freqüência das Concentrações de Cloreto. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	60
FIGURA 5.5 - Histogramas de Freqüência das Concentrações de Bicarbonato. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	62
FIGURA 5.6 - Histogramas de Freqüência das Valores de Condutividade Elétrica. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	64
FIGURA 5.7 - Histogramas de Freqüência das Valores de pH. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	65
FIGURA 5.8 - Superfícies 2D e 3D das Concentrações de Cálcio no Aquífero Beberibe Inferior. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	81
FIGURA 5.9 - Superfícies 2D e 3D das Concentrações de Sódio no Aquífero Beberibe Inferior. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	82
FIGURA 5.10 - Superfícies 2D e 3D das Concentrações de Cloreto no Aquífero Beberibe Inferior. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	83
FIGURA 5.11 - Superfícies 2D e 3D das Concentrações de Bicarbonato no Aquífero Beberibe Inferior. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	84
FIGURA 5.12 - Superfícies 2D e 3D das Valores de pH no Aquífero Beberibe Inferior. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	86
FIGURA 5.13 - Superfícies 2D e 3D das Valores de Condutividade Elétrica no Aquífero Beberibe Inferior. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	87
FIGURA 5.14 - Superfícies 2D e 3D da Razão Iônica de rMg/rCa no Aquífero Beberibe Inferior. (a)	

	coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	88
FIGURA 5.15	- Superfícies 2D e 3D da Razão Iônica de rK/rNa no Aquífero Beberibe Inferior. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	89
FIGURA 5.16	- Superfícies 2D e 3D da Razão Iônica de $rCl/rHCO_3$ no Aquífero Beberibe Inferior. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	91
FIGURA 5.17	- Superfícies 2D e 3D da Razão Iônica de itb no Aquífero Beberibe Inferior. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	92
FIGURA 5.18	- Superfícies 2D e 3D da Razão Iônica de SAR no Aquífero Beberibe Inferior. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	93
FIGURA 5.19	- Superfícies 2D e 3D das Concentrações de Cálcio no Aquífero Boa Viagem. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	95
FIGURA 5.20	- Superfícies 2D e 3D das Concentrações de Sódio no Aquífero Boa Viagem. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	96
FIGURA 5.21	- Superfícies 2D e 3D das Concentrações de Cloreto no Aquífero Boa Viagem. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	97
FIGURA 5.22	- Superfícies 2D e 3D das Concentrações de Bicarbonato no Aquífero Boa Viagem. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	99
FIGURA 5.23	- Superfícies 2D e 3D dos Valores de pH no Aquífero Boa Viagem. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	100
FIGURA 5.24	- Superfícies 2D e 3D dos Valores de Condutividade Elétrica no Aquífero Boa Viagem. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	101
FIGURA 5.25	- Superfícies 2D e 3D da Razão Iônica de rMg/rCa no Aquífero Boa Viagem. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	102
FIGURA 5.26	- Superfícies 2D e 3D da Razão Iônica de	

	rK/rNa no Aquífero Boa Viagem. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	104
FIGURA 5.27	- Superfícies 2D e 3D da Razão Iônica de rCl/rHCO ₃ Aquífero Boa Viagem. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	105
FIGURA 5.28	- Superfícies 2D e 3D da Razão Iônica de <i>itb</i> no Aquífero Boa Viagem. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	106
FIGURA 5.29	- Superfícies 2D e 3D da Razão Iônica de SAR no Aquífero Boa Viagem. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	108
FIGURA 5.30	- Superfícies 2D e 3D das Concentrações de Cálcio no Aquífero Cabo. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	109
FIGURA 5.31	- Superfícies 2D e 3D das Concentrações de Sódio no Aquífero Cabo. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	110
FIGURA 5.32	- Superfícies 2D e 3D das Concentrações de Cloreto no Aquífero Cabo. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	111
FIGURA 5.33	- Superfícies 2D e 3D das Valores de Condutividade Elétrica no Aquífero Cabo. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	112
FIGURA 5.34	- Superfícies 2D e 3D das Concentrações de Bicarbonato no Aquífero Cabo. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	114
FIGURA 5.35	- Superfícies 2D e 3D das Valores de pH no Aquífero Cabo. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	115
FIGURA 5.36	- Superfícies 2D e 3D da Razão Iônica de rMg/rCa no Aquífero Cabo. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	116
FIGURA 5.37	- Superfícies 2D e 3D da Razão Iônica de rK/rNa no Aquífero Cabo. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	118
FIGURA 5.38	- Superfícies 2D e 3D da Razão Iônica de	

	rCl/rHCO ₃ Aquífero Cabo. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	119
FIGURA 5.39	- Superfícies 2D e 3D da Razão Iônica de <i>itb</i> no Aquífero Cabo. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	120
FIGURA 5.40	- Superfícies 2D e 3D da Razão Iônica de SAR no Aquífero Cabo. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	122
FIGURA 5.41	- Diagramas de Piper com Amostras do Aquífero Beberibe Inferior. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	124
FIGURA 5.42	- Diagramas de Piper com Amostras do Aquífero Beberibe Inferior. (a) coleta de 1970 a 1979; (b) coleta de 1980 a 1989; (c) coleta de 1990 a 1994.	125
FIGURA 5.43	- Diagramas de Piper com Amostras do Aquífero Boa Viagem. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	126
FIGURA 5.44	- Diagramas de Piper com Amostras do Aquífero Boa Viagem. a) coleta de 1970 a 1979; (b) coleta de 1980 a 1989; (c) coleta de 1990 a 1994.	128
FIGURA 5.45	- Diagramas de Piper com Amostras do Aquífero Cabo. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.	129
FIGURA 5.46	- Diagramas de Piper com Amostras do Aquífero Cabo. a) coleta de 1970 a 1979; (b) coleta de 1980 a 1989; (c) coleta de 1990 a 1994.	130
FIGURA 5.47	- Gráficos de Barras e Circulares de Classificações das Águas dos Aquíferos da Planície do Recife, de 1966 a 1994. (a) classificações das águas nos aquíferos da Planície do Recife; (b) no Aquífero Beberibe Inferior; (c) no Aquífero Boa Viagem; (d) no Aquífero Cabo.	131
FIGURA 5.48	- Gráficos de Barras e Circulares de	

- Classificações Aniônicas das Águas dos Aqüíferos da Planície do Recife, de 1966 a 1994. (a) classificações das águas nos aqüíferos da Planície do Recife; (b) no Aqüífero Beberibe Inferior; (c) no Aqüífero Boa Viagem; (d) no Aqüífero Cabo. 133
- FIGURA 5.49 - Gráficos de Barras e Circulares de Classificações Catiônicas das Águas dos Aqüíferos da Planície do Recife, de 1966 a 1994. (a) classificações das águas nos aqüíferos da Planície do Recife; (b) no Aqüífero Beberibe Inferior; (c) no Aqüífero Boa Viagem; (d) no Aqüífero Cabo. 134
- FIGURA 5.50 - Gráficos de Barras e Circulares de Classificações das Águas dos Aqüíferos da Planície do Recife, em 1996. (a) classificações das águas nos aqüíferos da Planície do Recife; (b) no Aqüífero Beberibe Inferior; (c) no Aqüífero Boa Viagem; (d) no Aqüífero Cabo. 135
- FIGURA 5.51 - Gráficos de Barras e Circulares de Classificações Aniônicas das Águas dos Aqüíferos da Planície do Recife, em 1996. (a) classificações das águas nos aqüíferos da Planície do Recife; (b) no Aqüífero Beberibe Inferior; (c) no Aqüífero Boa Viagem; (d) no Aqüífero Cabo. 136
- FIGURA 5.52 - Gráficos de Barras e Circulares de Classificações Catiônicas das Águas dos Aqüíferos da Planície do Recife, em 1996. (a) classificações das águas nos aqüíferos da Planície do Recife; (b) no Aqüífero Beberibe Inferior; (c) no Aqüífero Boa Viagem; (d) no Aqüífero Cabo. 138
- FIGURA 5.53 - Gráficos referentes à relação iônica entre o magnésio e o cálcio (r_{Mg}/r_{Ca}) nas águas dos

- aquíferos da Planície do Recife. (a) coleta entre 1966 e 1994; (b) coleta em 1996. 139
- FIGURA 5.54 - Gráficos referentes à relação iônica entre o potássio e o sódio (rK/rNa) nas águas dos aquíferos da Planície do Recife. (a) coleta entre 1966 e 1994; (b) coleta em 1996. 140
- FIGURA 5.55 - Gráficos referentes à relação iônica entre o cloreto e o bicarbonato ($rCl/rHCO_3$) nas águas dos aquíferos da Planície do Recife. (a) coleta entre 1966 e 1994; (b) coleta em 1996. 141
- FIGURA 5.56 - Gráficos referentes à relação iônica do índice de troca de bases (itb) nas águas dos aquíferos da Planície do Recife. (a) coleta entre 1966 e 1994; (b) coleta em 1996. 143
- FIGURA 5.57 - Gráficos referentes à relação iônica da razão de adsorção do sódio (SAR) nas águas dos aquíferos da Planície do Recife. (a) coleta entre 1966 e 1994; (b) coleta em 1996. 144
- FIGURA 5.58 - Gráficos referentes aos tipos de água para irrigação no Aquífero Beberibe Inferior. (a) classificação geral; (b) classes de condutividade elétrica; (c) classes do risco de adsorção de sódio. 146
- FIGURA 5.59 - Gráficos referentes aos tipos de água para irrigação no Aquífero Boa Viagem. (a) classificação geral; (b) classes de condutividade elétrica; (c) classes do risco de adsorção de sódio. 147
- FIGURA 5.60 - Gráficos referentes aos tipos de água para irrigação no Aquífero Cabo. (a) classificação geral; (b) classes de condutividade elétrica; (c) classes do risco de adsorção de sódio. 148
- FIGURA 5.61 - Dendogramas Resultantes da Análise de

	Agrupamento das Amostras de 1966 a 1994. (a) Aqüífero Beberibe Inferior; (b) Aqüífero Boa Viagem; (c) Aqüífero Cabo.	150
FIGURA 5.62	- Mapas de Localização dos Poços Agrupados por Similaridade na Análise de Agrupamento das Amostras de 1966 a 1994. (a) Aqüífero Beberibe Inferior; (b) Aqüífero Boa Viagem; (c) Aqüífero Cabo.	152
FIGURA 5.63	- Dendograma Resultante da Análise de Agrupamento das Amostras de 1996, no Aqüífero Beberibe Inferior.	153
FIGURA 5.64	- Dendograma Resultante da Análise de Agrupamento das Amostras de 1996, no Aqüífero Boa Viagem.	154
FIGURA 5.65	- Dendograma Resultante da Análise de Agrupamento das Amostras de 1996, no Aqüífero Cabo.	156
FIGURA 5.66	- Mapa de Localização dos Poços Agrupados por Similaridade na Análise de Agrupamento das Amostras de 1996, no Aqüífero Beberibe Inferior.	157
FIGURA 5.67	- Mapa de Localização dos Poços Agrupados por Similaridade na Análise de Agrupamento das Amostras de 1996, no Aqüífero Boa Viagem.	158
FIGURA 5.68	- Mapa de Localização dos Poços Agrupados por Similaridade na Análise de Agrupamento das Amostras de 1996, no Aqüífero Cabo.	159
FIGURA 5.69	- Dendograma Resultante da Análise de Agrupamento de Todas as Amostras de 1996 dos Três Aqüíferos da Planície do Recife.	160
FIGURA 5.70	- Mapa de Localização dos Poços Agrupados por Similaridade na Análise de Agrupamento das Amostras de 1996, dos Três Aqüíferos da Planície do Recife.	162

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

No Recife, assim como em outras metrópoles do Nordeste brasileiro, a demanda de água supera em muito a oferta devido ao grande crescimento populacional, agravando-se, ainda mais, durante os períodos de seca quando a falta d'água torna o abastecimento público escasso. Por isso, as águas subterrâneas, são utilizadas em caráter emergencial de forma desordenada.

O descontrole e a falta de aplicação de mecanismos legais e normativos, marcados por uma visão imediatista de uso dos recursos hídricos subterrâneos, sujeitam os aquíferos, aos impactos da extração descontrolada e da ocupação indisciplinada do solo, que põem em risco a qualidade das águas subterrâneas.

Além disso, existe uma atitude generalizada de subestimar os riscos de poluição das águas subterrâneas, traduzida pela falta de ações políticas voltadas para a proteção dos aquíferos. Tal fato é agravado pela constatação de que um aquífero seriamente contaminado dificilmente terá a sua qualidade restabelecida.

A experiência tem demonstrado que uma melhoria na qualidade da água servida para abastecimento público é seguida por melhoria na saúde da população, protegendo tanto a saúde como o patrimônio público.

Pela importância da água subterrânea como fonte de abastecimento, muitos estudos são desenvolvidos voltados para a qualidade da água e interação com o meio ambiente em cidades brasileiras, sendo temas de teses de doutorado e dissertações de mestrado. Dentre os estudos mais importantes, destacam-se os mais recentes, comentados a seguir.

Em Fortaleza, Ceará, CAVALCANTE et al (1996) realizaram um estudo enfocando a importância das águas subterrâneas para o abastecimento público do município, fazendo uma caracterização hidrogeológica da área. Neste estudo, foi constatado que no

mínimo 40% da população de Fortaleza (incluindo fábricas, hospitais, condomínios, residências, etc.) utiliza água subterrânea, principalmente do sistema aquífero dunas/paleodunas, que é tido como a melhor unidade aquífera na área, capaz de fornecer vazão de até 15m³/h/poço, com média de 6m³/h, utilizando poços tubulares rasos (10-15m de profundidade).

As águas, predominantemente cloretadas sódicas, apresentam, no geral, boa qualidade físico-química porém, com restrição em termos bacteriológicos, em 70-80% das águas, decorrente do uso e da ocupação do meio, falta de saneamento básico e perfuração de poços sem a aplicação de procedimentos técnicos adequados. Como recomendação, os autores sugerem que os órgãos que operam com abastecimento d'água procedam uma divulgação, na sociedade, da importância dos reservatórios subterrâneos, no sentido de conscientizar o usuário para o uso racional e para a preservação quantitativa e qualitativa das águas subterrâneas.

Em Natal, Rio Grande do Norte, MELO et al (1996a e 1996b) estudaram as águas subterrâneas na zona sul da cidade. O primeiro trabalho trata de uma avaliação dos riscos potenciais de contaminação das águas subterrâneas e o segundo sobre contaminação da água subterrânea por nitrato; ambos na zona sul de Natal.

No primeiro trabalho, os autores elaboraram um modelo hidrogeológico conceitual considerando um sistema hidráulico único, complexo e indiferenciado, denominado Sistema Aquífero Dunas/Barreiras. Através da metodologia apresentada em FOSTER & HIRATA (1991) sobre o perigo potencial de contaminação das águas subterrâneas, os autores destacaram, dentre as atividades potenciais de contaminação, o sistema de saneamento com deposição local de efluentes, a ocupação desordenada do terreno, a deposição inadequada de resíduos sólidos, além de cacimbões transformados em fossas, lagoas com afluxo de esgotos e eventuais fugas na rede de esgotos.

No segundo trabalho, os autores verificaram que o íon

nitrato é o componente iônico dominante nas águas subterrâneas de Natal afetadas pelas atividades urbanas atribuídas ao sistema de deposição local de efluentes, provocando teores de nitrato elevados (>45mg/L). Neste trabalho foi feita uma avaliação da contaminação por nitrato, com um diagnóstico sobre sua formação, baseado no modelo hidrogeológico conceitual desenvolvido no trabalho anterior e propuseram a adoção de medidas visando a proteção das águas subterrâneas da cidade de Natal.

No litoral paraibano, MOURA (1992), fez um estudo utilizando um tratamento geoestatístico aplicado às qualidades das águas subterrâneas, produzindo mapas de isovalores, de tendência e de resíduos para o cálcio, magnésio, sódio, potássio, cloreto, sulfato, pH, resíduo seco e dureza, nos aquíferos Beberibe e Barreiras. O estudo levou o autor a caracterizar as águas subterrâneas geoquimicamente além de relacioná-las com as águas superficiais, estabelecendo também direções e sentidos de fluxo.

Em Niterói, Rio de Janeiro, TUBBS & SILVA FILHO (1996a e 1996b) desenvolveram dois trabalhos sobre a região litorânea do município. O primeiro sobre a hidroquímica das águas subterrâneas e o segundo sobre os aspectos ambientais relacionados à utilização das águas subterrâneas.

No primeiro, usando diagramas de Piper-Hill, os autores classificaram as águas como bicarbonatadas cálcicas e cloretadas sódicas, relacionaram o tipo de água e o tipo de rocha cristalina, cristalina alterada, básica e sedimento costeiro. Os resultados mostram uma dependência confirmada através de relações iônicas.

Levados pelo aumento da exploração dos recursos hídricos subterrâneos e pela ausência de estudo e de controle institucional, os autores desenvolveram o segundo trabalho destacando os níveis de nitrato, amônia fosfato, ferro e manganês, que indicaram a modificação da qualidade da água de 25% dos poços estudados. Aspectos exploratórios e gerenciais contribuíram para a deterioração do aquífero, demonstrado por

indícios de salinização, redução de volumes explorados e a presença endêmica de ferro-bactérias, que freqüentemente inviabilizaram a exploração de alguns poços.

Em Porto Alegre, Rio Grande do Sul, FREITAS & LISBOA (1996) estudando a água subterrânea, estabeleceram uma tipologia das águas existentes, e detectaram a presença de elementos químicos deletérios (fluoreto, ferro, manganês e cloreto) oriundos da própria litologia, bem como de fontes externas aos aquíferos (ferro, cloreto e nitrato) que penetraram nos mesmos durante o ciclo hidrológico. O estudo mostrou uma área atual de risco no aquífero fraturado, principalmente no setor noroeste da zona urbana de Porto Alegre, com vulnerabilidade para os íons de fluoreto, manganês, ferro e nitrato. Já o segundo aquífero, o sedimentar, apresenta impedimentos no que se refere aos íons de fluoreto, cloreto, manganês e ferro, nas porções noroeste, sudoeste e sudeste da área estudada. Os autores recomendam estudos hidrogeológicos mais detalhados, maior controle sobre a perfuração de poços, monitoramento dos poços existentes e a construção de mapas de vulnerabilidade dos sistemas aquíferos.

Em Recife, Pernambuco, na área desta tese, muitos estudos hidrogeológicos foram realizados, principalmente nas décadas de 60 e 70, porém com pouco enfoque sobre a hidroquímica e a qualidade da água subterrânea na maioria deles, com exceção do trabalho de COSTA (1968) que fez o primeiro estudo geológico e hidrogeológico do Recife, com geofísica de superfície (eletroresistividade), testes de bombeamento, seções geológicas, avaliação das reservas totais e reguladoras, e uma caracterização hidroquímica, tendo-se como base os dados dos 180 poços cadastrados na época.

Na década de 80, as dissertações de mestrado de BATISTA (1984) e ROLIM FILHO (1987) trataram do assunto.

BATISTA (op.cit.) deu maior ênfase à hidrodinâmica dos aquíferos da Planície do Recife, fazendo um trabalho que foi de suma importância para os estudos posteriores, já alertava sobre o problema de salinização quer pelo avanço da interface marinha

quer pela drenança vertical descendente, ou ainda pela deficiência na cimentação do espaço anelar. No sub-capítulo "Qualidade da Água e seus Usos", o autor fez uma breve avaliação da qualidade da água do sistema aquífero, bem como registrou o tipo de utilização para a qual ela se prestava e recomendou um estudo hidroquímico detalhado das águas da Planície.

ROLIM FILHO (op.cit.), complementando o estudo de BATISTA (op.cit.), preocupou-se mais com a hidroquímica e com a qualidade da água, fez uma análise estatística dos dados existentes para caracterização hidroquímica dos aquíferos, bem como a classificação da Planície em áreas de gradação de riscos, quanto a utilização de suas águas, tanto para consumo humano como para uso industrial, na tentativa de permitir, desta forma, aos hidrogeólogos e hidroquímicos preverem as possíveis qualidades da água a ser obtida quando na elaboração de projetos de poços na área do Recife, reduzindo assim, os riscos de contaminação quando tal projeto for levado a efeito.

No final da década de 80 para o início da década de 90, foi feita a Carta Geotécnica da Cidade do Recife, executada pelo Centro de Tecnologia da UFPE em convênio com a FINEP, que constou de um estudo sobre as águas subterrâneas.

Em 1991, COSTA et al., publicaram um trabalho com dados hidrogeológicos da Carta Geotécnica do Recife Com base nos dados de poços existentes na região e na bibliografia disponível sobre a área, elaboraram o mapa isopiezométrico para caracterizar a super-exploração do aquífero, assim como o mapa de resíduo seco refletindo o problema de salinização, destacando as principais características dos aquíferos existentes e mapeando quatro zonas mais críticas de exploração.

Em 1994, a CPRM, através do Projeto SINGRE, publicou uma versão condensada do relatório elaborado por Leal sobre a vulnerabilidade das águas subterrâneas da Região Metropolitana do Recife - RMR. Este trabalho é talvez um dos mais completos voltados para a qualidade das águas subterrâneas da RMR. Contém mapas base do arcabouço estrutural e geológico da RMR além das

descrições sumárias dos mesmos; mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas com quatro zonas mapeadas, avaliadas segundo os procedimentos de FOSTER et al (1988); mapa de carga contaminante com quatro zonas mapeadas representadas por áreas urbanas saneadas ou não, presença de indústrias, mais ou menos poluentes, cemitérios, lixões, postos de combustíveis, etc.; mapa de risco de contaminação das águas subterrâneas, com informações atualizadas até 1993, resultante da interação e superposição dos mapas de vulnerabilidade dos aquíferos e de cargas contaminantes, definindo cinco classes de riscos.

O trabalho contém também definições das classes de vulnerabilidade e áreas de risco gerando o mapa hidrogeológico simplificado que constitui o embasamento de todos os resultados discutidos, indica as características hidrogeológicas dos aquíferos no que concerne a porosidade e permeabilidade das rochas e a profundidade da zona saturada com água explotável no aquífero livre, e define três zoneamentos do aquífero livre na RMR.

Dada a importância da água subterrânea, na Planície do Recife, para o abastecimento público doméstico e a sua utilização desordenada, está sendo desenvolvido desde o início do ano de 1995, um estudo hidrogeológico na Região Metropolitana do Recife, denominado de Projeto HIDROREC, através de um Convênio firmado entre o International Development Resourch Center do Canadá - I.D.R.C. e a Fundação de Apoio ao Desenvolvimento de Ensino da UFPE - FADE.

Este estudo iniciou-se com um cadastramento de poços da região com visita ao local e às empresas perfuradoras do Município de Recife. Após o cadastramento dos poços da Planície do Recife, num total de 1.896, com aquisição das fichas técnicas e construtivas dos mesmos, verificou-se que 276 poços tinham dados físico-químicos da época de perfuração, alguns com outras análises posteriores totalizando 303 análises físico-químicas.

Estas análises físico-químicas disponíveis, são utilizadas nesta dissertação para um tratamento estatístico das

mesmas, interpretando a presença dos elementos maiores nas águas subterrâneas, correlacionando os resultados obtidos com a litologia dos aquíferos ou unidades aquíferas, visando caracterizar geoquimicamente a água subterrânea na Planície do Recife.

Além destes dados, utiliza-se também resultados de uma coleta em 1996, de água em 91 poços para comparação dos resultados atuais com os anteriores, dos quais 11 já continham análises físico-químicas, para detectar alguma evolução hidroquímica nos aquíferos estudados.

CAPÍTULO 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

2.1. LOCALIZAÇÃO

A área em estudo, localiza-se na Planície do Recife, inserida na Região Metropolitana do Recife (RMR) no Estado de Pernambuco (Figura 2.1), entre os paralelos $08^{\circ}09'19''$ e $08^{\circ}00'41''$ de Latitude Sul e os meridianos $34^{\circ}57'32''$ e $34^{\circ}51'52''$ de Longitude Oeste de Greenwich, totalizando uma área de aproximadamente 100 km^2 .

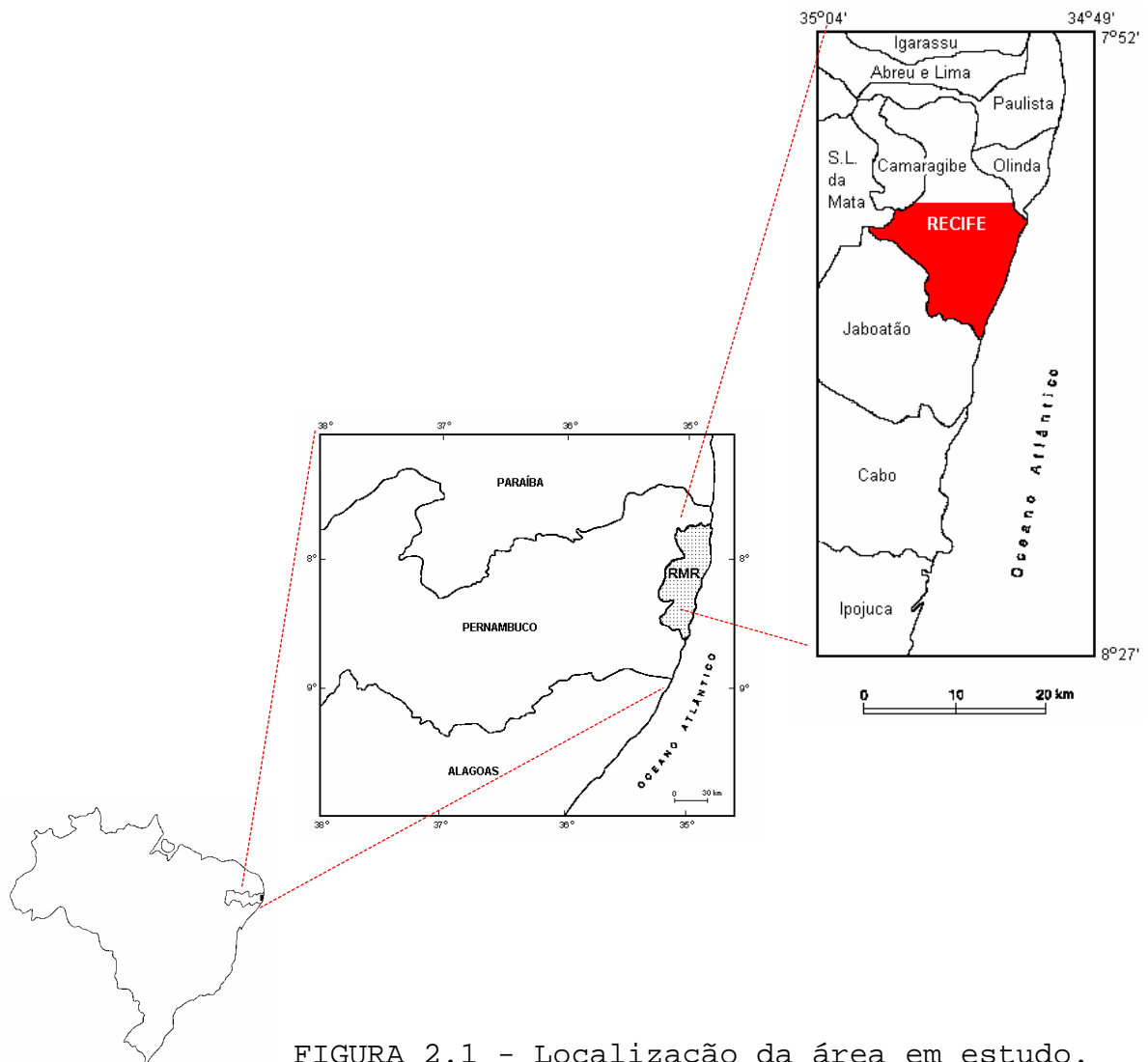


FIGURA 2.1 - Localização da área em estudo.

2.2. ASPECTOS CLIMÁTICOS

Trata-se de uma região tropical litorânea com chuvas de monções durante quase todo o ano, que, pela classificação de Köppen, é do tipo Ams', quente e úmida.

Com base nos dados climatológicos (Tabela 2.1) da Estação Meteorológica de Recife/PE (nº 82.900), numa série de 30 anos, de 1961 a 1990 (DNM, 1992), a taxa de precipitação pluviométrica anual é abundante, com média de 2.458,00mm, e períodos de máximo entre abril e julho e de mínimo entre outubro e dezembro, excedendo a evaporação total em 1.068mm/ano (Figura 2.2). A estação chuvosa ocorre no outono-inverno, nos meses de março a agosto, com valores de precipitação mensal variando em torno de 50 a 390mm.

A temperatura média anual é de 25,5°C (Figura 2.3) com máximo de aproximadamente 26,5°C de dezembro a março e mínimo de aproximadamente 24°C de julho a agosto, sendo pouco relacionável com a evaporação total e havendo uma certa relação com a precipitação e com a umidade relativa do ar que é alta, atingindo um valor médio em torno de 80%, com máximo em 85% no mês de maio e mínimo em 73% em janeiro (Figura 2.3), sendo o mês mais seco o de novembro. A insolação média anual é em torno de 2.464h com máximo de 266h no mês de novembro e mínimo de 108h no mês de agosto.

TABELA 2.1 - Médias mensais de normais climatológicas de 1961 a 1990, na Estação Meteorológica de Recife/PE (DNM, 1992)

MESES	PRECIPITAÇÃO (mm)	EVAPORAÇÃO (mm)	TEMPERATURA (°C)	UMIDADE (%)	INSOLAÇÃO (horas)
JANEIRO	103,4	131,9	26,6	73,0	246,3
FEVEREIRO	144,2	114,2	26,6	77,0	210,8
MARÇO	264,9	97,8	26,5	80,0	203,9
ABRIL	326,4	155,2	25,9	84,0	185,2
MAIO	328,9	70,2	25,2	85,0	186,6
JUNHO	389,6	76,4	24,5	85,0	168,3
JULHO	385,6	90,9	24,0	85,0	169,8
AGOSTO	213,5	113,9	23,9	85,0	108,1
SETEMBRO	122,5	113,3	24,6	78,0	216,6
OUTUBRO	66,1	138,4	25,5	76,0	247,3
NOVEMBRO	47,8	144,1	25,9	74,0	265,8
DEZEMBRO	65,0	143,4	26,3	75,0	255,2
MÉDIA ANUAL	204,8	115,8	25,5	79,8	205,3

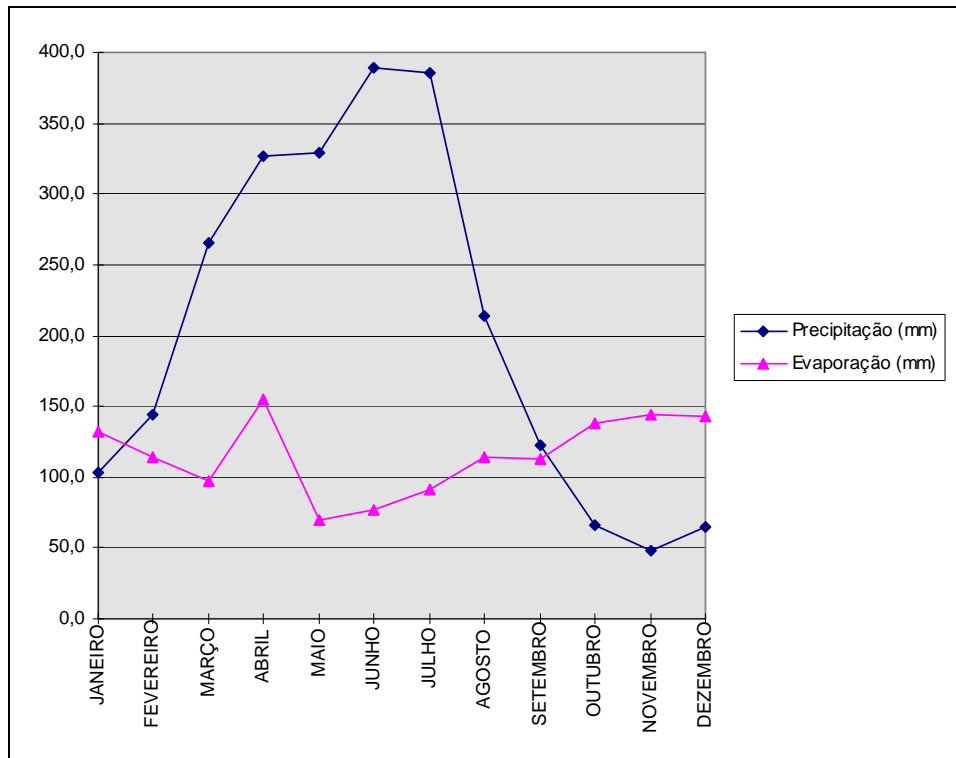


FIGURA 2.2 - Normais Climatológicas de precipitação e evaporação na Estação Meteorológica de Recife-PE (Fonte dos dados: DNM, 1992)

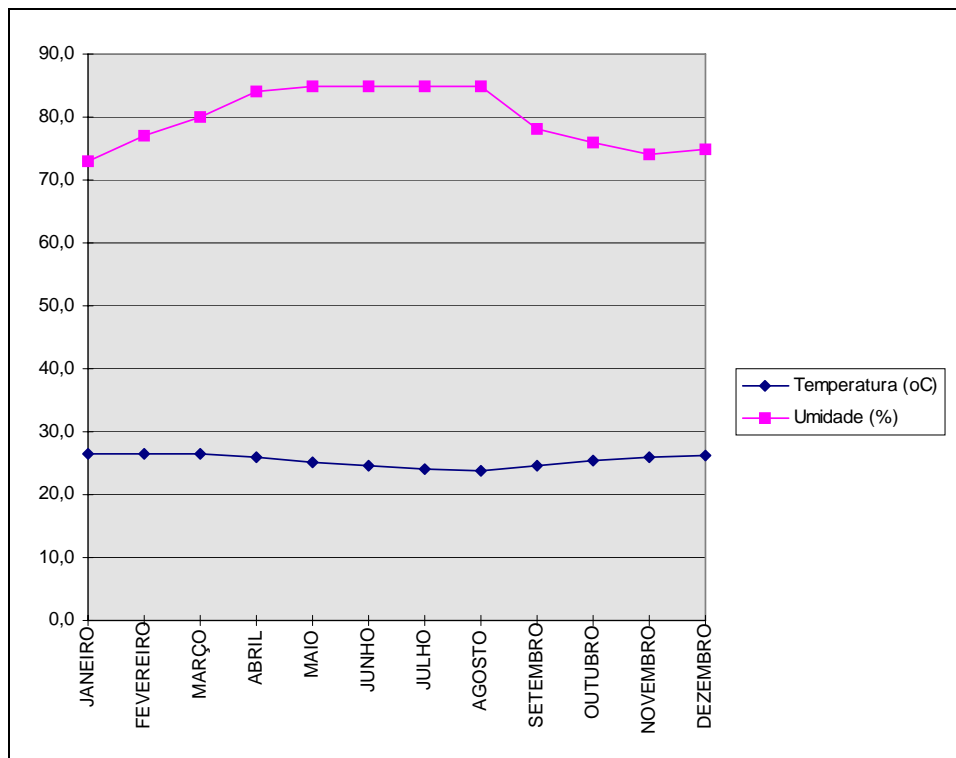


FIGURA 2.3 - Normais Climatológicas de temperatura e umidade na Estação Meteorológica de Recife-PE (Fonte dos dados: DNM, 1992)

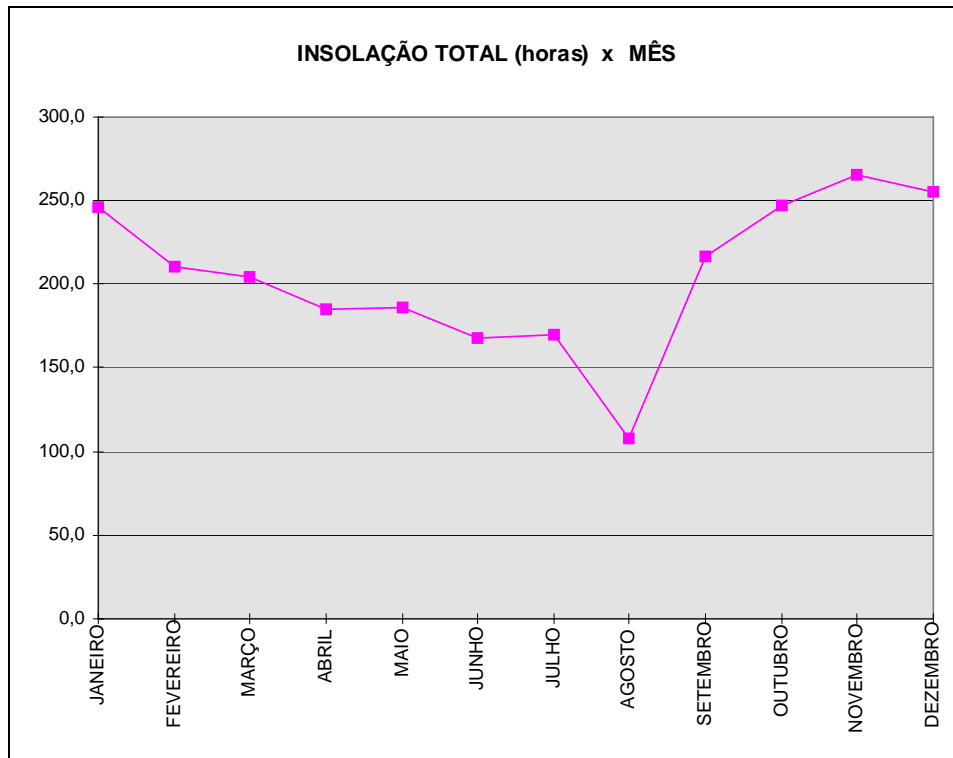


FIGURA 2.4 - Normais Climatológicas de insolação na Estação Meteorológica de Recife-PE (Fonte dos dados: DNM, 1992)

BATISTA (1984) encontrou para a região da Planície do Recife, uma taxa de evapotranspiração real de 950mm utilizando a fórmula de Turc. Um trabalho da COMPESA (1986), verificou que 10% da água de precipitação, infiltra e alimenta os aquíferos.

2.3. RELEVO

Na região estudada, predomina, como tipo morfológico principal, áreas baixas com cotas inferiores a 10m, mostrando um relevo plano, como o próprio nome Planície do Recife já diz, constituído por depósitos de sedimentos quaternários, que coincidem com as planícies de inundação dos vales de antigos rios e riachos.

Bordejando a área, encontra-se um segundo tipo morfológico que são áreas elevadas com cotas variando entre 10 e 100m, moldadas sobre o embasamento cristalino e sedimentos da

Formação Barreiras, formando morros isolados ou áreas dissecadas por vales profundos.

2.4. VEGETAÇÃO

A vegetação original é a Mata Atlântica, cuja característica é a da mata densa, e os manguezais que ocupam as partes mais baixas e alagadas, sob influência das águas das marés. Porém, devido a ação antrópica, com o crescimento urbano desordenado, principalmente nas periferias da cidade do Recife, as áreas de Mata Atlântica encontram-se reduzidas aos cumes de alguns morros sob controle do IBAMA.

2.5. HIDROGRAFIA

A Região Metropolitana do Recife corresponde a uma faixa costeira com aproximadamente 2.500km², banhada pelas bacias hidrográficas dos rios Botafogo, Beberibe, Capibaribe, Jaboatão, Pirapama e Ipojuca. Porém, a área em estudo, a Planície do Recife, é banhada apenas pelo Rio Capibaribe no centro (com 10% da área da Planície) tendo, nos limites da mesma, os rios Beberibe ao norte, e Jaboatão ao sul (Figura 2.5).

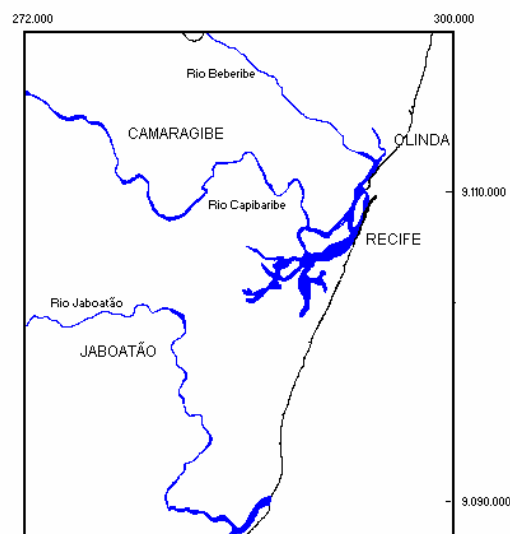


FIGURA 2.5 - Principais rios que banham a Planície do Recife

2.6. GEOLOGIA

Regionalmente, a Região Metropolitana do Recife (RMR), é constituída pelas rochas do embasamento cristalino e pelas rochas sedimentares sobrepostas (Figura 2.6.), pertencentes às Bacias Sedimentares Costeiras Cabo e Pernambuco-Paraíba, subdividindo-a em três domínios principais:

- ↪ Na área Oeste : o Embasamento Cristalino do Maciço Pernambuco-Alagoas;
- ↪ Na área Sul : a Bacia Vulcano-Sedimentar do Cabo;
- ↪ Na área Norte : a Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba.

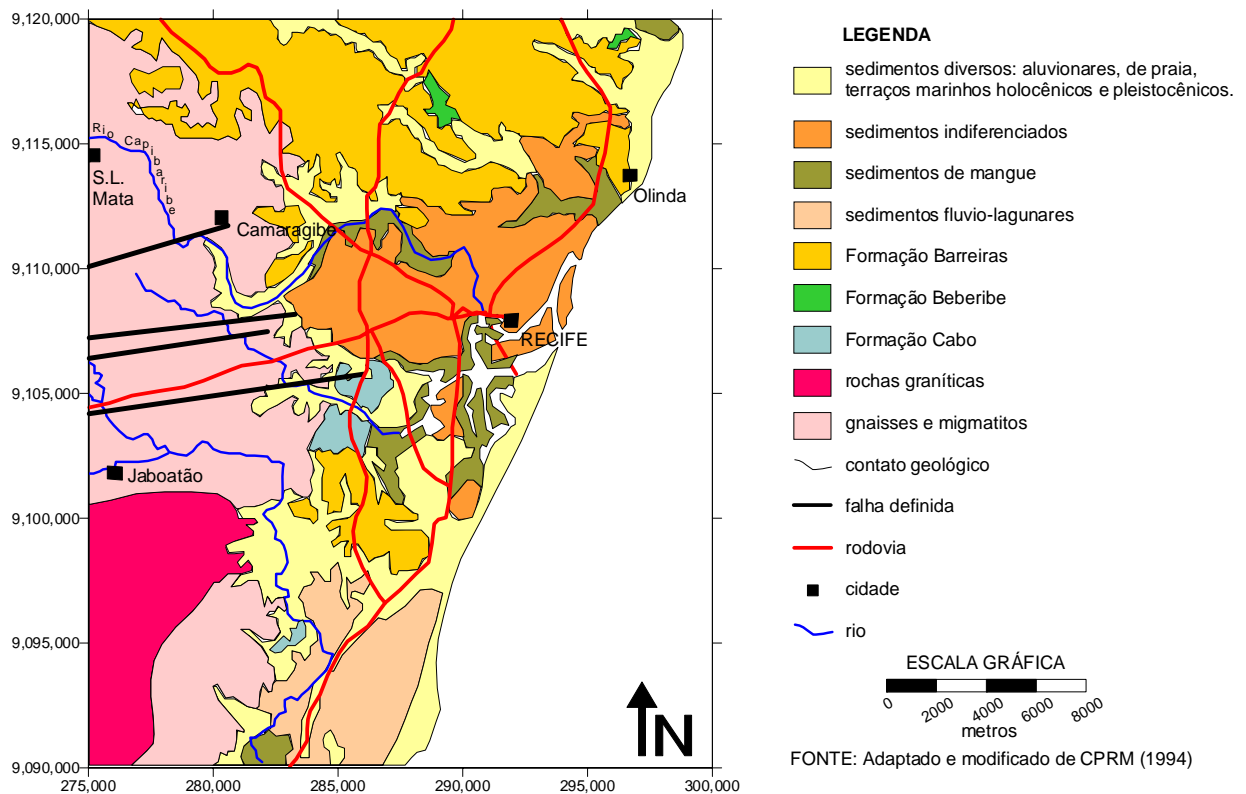


FIGURA 2.6 - Mapa Geológico da Planície do Recife e adjacências

O **Embasamento Cristalino**, representado pelo **Maciço Pernambuco-Alagoas**, mergulha para leste com inclinação da ordem de 28m/km (BATISTA, 1984) com uma suave inclinação para sudeste oscilando entre os valores de 8 e 14m/km. É constituído por

granitos, gnaisses e migmatitos de idade Pré-Cambriana, que bordejam as bacias sedimentares do Cabo e Pernambuco-Paraíba.

As duas bacias sedimentares, denominadas pela CPRM (1994b) de *Rift* do Cabo e Sub-Bacia Norte, possuindo evoluções tectônicas distintas, são separadas pelo falhamento transcorrente denominado de "Lineamento Pernambuco" que corta todo o Estado de Pernambuco. O mesmo pode ser visto na Figura 2.7, juntamente com as principais estruturas das duas bacias sedimentares, no domínio da Planície do Recife, segundo a CPRM (1994a; 1994b).

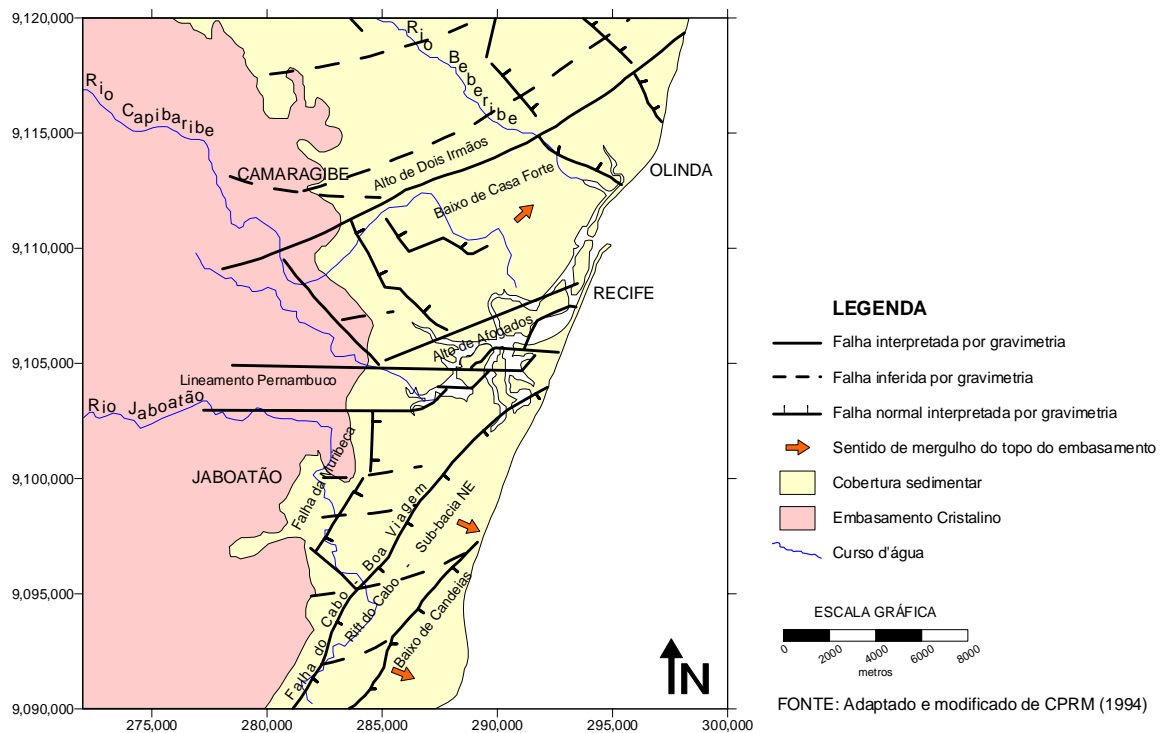


FIGURA 2.7 - Mapa do Arcabouço Estrutural da Planície do Recife e adjacências.

O conhecimento sobre a tectônica destas bacias, foi ampliado através de levantamento gravimétrico executado pela CPRM (1994a), tendo sido identificados os dois compartimentos estruturais no *Rift* do Cabo: o Baixo de Candeias e o Baixo do Cupe/Suape, apenas o primeiro ocorrendo na Planície do Recife. O Baixo de Casa Forte, localizado a norte do Lineamento

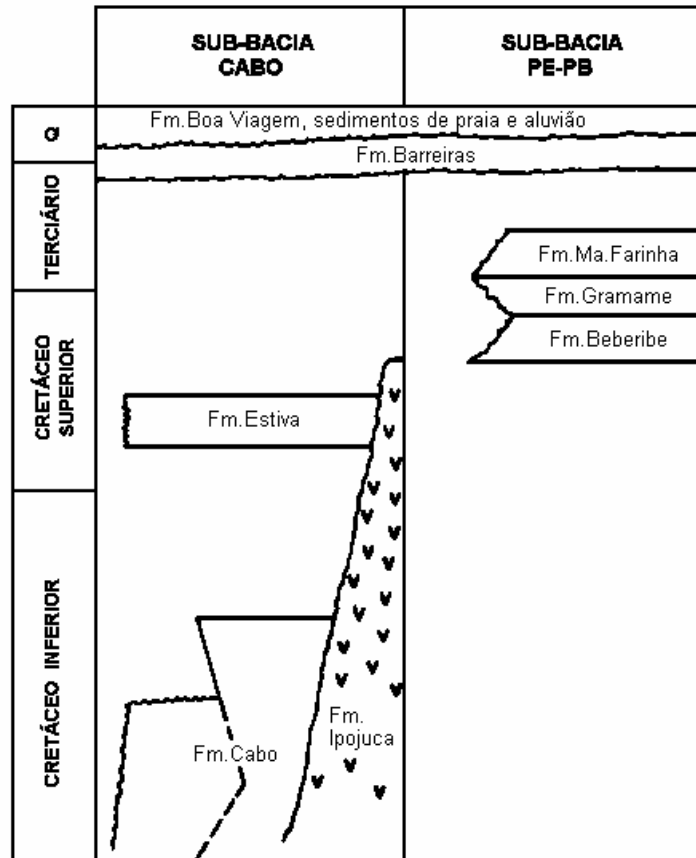
Pernambuco, corresponde a uma estrutura assimétrica e rasa, ladeada pelos altos de Afogados e Dois Irmãos. Foram identificadas cinco direções de falhamento, sendo as falhas de direção NNE-SSW as mais evidentes. São falhas normais e de grande rejeito, que delimitam o *Rift* do Cabo formando um padrão escalonado de aprofundamento do embasamento em direção ao mar.

A **Bacia Sedimentar do Cabo**, de idade Cretácea e do tipo *Rift*, ocupa toda a faixa costeira sul do Estado de Pernambuco, possuindo uma forma alongada na direção N40E, uma largura média de 10km, na parte emersa e com um espesso pacote sedimentar atingindo mais de 3.000m. Abrange as seguintes unidades lito-estratigráficas: Formação Cabo do Cretáceo Inferior, Formação Estiva do Cretáceo Superior e Formação Ipojuca do Cretáceo Inferior a Superior (Figura 2.8).

A **Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba**, de idade Terciária apresenta-se, estruturalmente, como uma homoclinal, com o embasamento cristalino mergulhando suavemente para leste, constituindo uma faixa continental de largura média em torno de 20 km ao longo de todo o litoral norte da RMR, estreitando-se quase que abruptamente nas proximidades do Lineamento Pernambuco, para assumir uma largura média de 8km. Abrange as seguintes unidades lito-estratigráficas: Formação Beberibe do Cretáceo Superior, Formação Gramame do Cretáceo Superior e Formação Maria Farinha do Terciário (Figura 2.8).

Localmente, na Planície do Recife, recobrando parte dos sedimentos destas duas bacias, encontram-se sedimentos Tércio-Quaternários da Formação Barreiras e sedimentos recentes Quaternários da Formação Boa Viagem (COSTA et al., 1994) e outros de origem praiial, paludial, lagunar e fluvial (Figura 2.8).

Uma descrição sucinta será feita a seguir de cada uma das unidades, representadas na coluna lito-estratigráfica (Figura 2.8) e no mapa geológico (Figura 2.6).



FONTE: Adaptado e Modificado de ALHEIROS & FERREIRA (1991)

FIGURA 2.8 - Coluna Lito-estratigráfica da Planície do Recife.

EMBASAMENTO CRISTALINO

As rochas cristalinas afloram extensivamente na porção oeste da Região Metropolitana do Recife, ao longo de toda a borda das duas bacias sedimentares e servem de substrato para os sedimentos desta.

Modalmente, constituem-se de granitos, granodioritos e granitos pórfiros na porção a sul do Lineamento, na Bacia do Cabo, e de gnaisses e migmatitos diversos na porção a norte do Lineamento na Bacia PE-PB, caracterizando-se, em ambos os casos, como péssimos reservatórios de água subterrânea, sendo consideradas como o substrato impermeável das rochas das bacias sedimentares costeiras.

FORMAÇÃO CABO

Ocorre exclusivamente na bacia homônima e imediatamente ao sul do Lineamento Pernambuco, sendo seus afloramentos mais setentrionais conhecidos na periferia da cidade do Recife, ocorrendo, pois, em sub-superfície em extensa profundidade, como verificado em recente perfuração de um poço pela CPRM (referência nº 9-JG-1-PE), com apoio da PETROBRÁS, na praia de Piedade que atingiu a profundidade de 1.100m sem encontrar o embasamento cristalino.

É constituída de conglomerados polimíticos de matriz arcoseana, arcósios, siltitos, argilitos e arenitos grosseiros, apresentando espessuras extremamente variáveis, desde algumas dezenas de metros até mais de 2.900m, conforme perfil revelado pelo poço perfurado pela PETROBRÁS na praia do Cupe.

FORMAÇÃO ESTIVA

Como a formação anterior, seu aparecimento restringe-se à região sul da RMR, porém nos domínios da Planície do Recife, torna-se inexistente.

Constitui-se de uma seqüência clástico-carbonática depositada discordantemente sobre a Formação Cabo, interdigitando-se com a mesma, predominando, na base, arcósios carbonáticos, crescendo verticalmente a participação carbonática até caracterizar, no topo, margas e calcários dolomíticos fossilíferos.

FORMAÇÃO IPOJUCA

Ocorre na porção sul da RMR ocupando áreas restritas nos municípios de Ipojuca e Cabo, constituindo-se de um conjunto de rochas vulcânicas de composição extremamente variável, desde basáltica até riolítica, e se apresentando como derrames,

sills, plugs e diques, atravessando as formações Cabo e Estivas.

FORMAÇÃO BEBERIBE

Ocorre extensivamente na Bacia Pernambuco-Paraíba, ao norte da RMR, assentada diretamente sobre o embasamento cristalino, e aflorando nos leitos dos rios. Possui espessura média da ordem de 180m, alcançando valores máximos de 250 a 300m na zona litorânea entre Olinda e Itamaracá, reduzindo-se no sentido norte-sul e aumentando de oeste para leste.

É constituída de arenitos aquíferos quartzosos continentais de granulação variável contendo intercalações de silte e argilas na seção inferior (Beberibe Inferior) e arenitos aquíferos calcíferos de caráter marinho na seção superior (Beberibe Superior). Estas intercalações de silte e argilas tem espessura média de 10m, podendo, em alguns locais, tornar-se muito delgada e até mesmo, inexistir, verificando-se uma maior conexão hidráulica entre as duas seções, ou aquíferos. Regionalmente, este nível siltico-argiloso, funciona como aquitardo, separando os dois sub-níveis e condicionando um comportamento de semi-confinado para o nível inferior.

FORMAÇÃO GRAMAME

Ocorre restritamente ao longo de uma faixa estreita e descontínua na porção leste da Bacia Sedimentar PE-PB, de Olinda para norte, recobrando os arenitos calcíferos da Formação Beberibe, em contato concordante e gradacional, e geralmente encobertos por sedimentos da Formação Barreiras, não ocorrendo, no entanto, na Planície do Recife. Sua espessura máxima, detectada em poços, não ultrapassa os 80m.

É constituída, da base para o topo, de arenitos calcíferos que gradam para calcários arenosos e culminam com

calcário dolomítico e margoso muito fossilífero, não lhe conferindo importância alguma como reservatório de água subterrânea.

FORMAÇÃO MARIA FARINHA

Embora constituindo uma unidade estratigráfica individualizada em termos de conteúdo fossilífero, esta formação tem características litológicas e modo de ocorrência idênticos aos da Formação Gramame que lhe é subjacente e concordante, tendo também pouco valor como reservatório de água subterrânea.

FORMAÇÃO BARREIRAS

Ocorre principalmente na porção ocidental da faixa sedimentar da zona norte, recobrando discordantemente e indistintamente o cristalino e as formações cretácicas e terciárias das duas bacias, correspondendo à zona de tabuleiros dissecados por vales estreitos e profundos, totalizando uma área aproximada de 50km² nas circunvizinhanças da Planície.

É constituída de areias argilosas e argilas variegadas, de origem continental, exibindo localmente níveis arenosos mais grosseiros, apresentando-se com espessuras muito variáveis. Constitui um sistema aquífero merecedor de atenção na zona norte da RMR, caracterizando-se por uma superfície freática e, eventualmente, níveis confinados em profundidade, porém, na Planície do Recife, não é representativo.

SEDIMENTOS RECENTES/FORMAÇÃO BOA VIAGEM

Ocorrem em quase toda a extensão da Planície do Recife, recobrando os sedimentos Cretácicos das duas bacias, ou seja,

da Formação Cabo, na zona sul, e da Formação Beberibe, na zona centro-norte da Planície. Possui uma espessura média de 50m e máxima em torno de 80m (COSTA et al., op.cit.).

Vários tipos de sedimentos recentes, segundo a CPRM (1994b), são identificados: aluviões, sedimentos de praia, terraços marinhos holocênicos, terraços marinhos pleistocênicos, mangues, depósitos flúvio-lagunares e quaternário indiferenciado da Planície do Recife. Destes, os quatro primeiros foram reunidos e denominados sedimentos diversos pela CPRM (op.cit.) e denominados de Formação Boa Viagem por COSTA et al (op.cit.) sendo constituída por uma seqüência alternada de psamitos e pelitos, ou seja, areias variegadas, argilas, limos e vasas, de origem continental ou marinha. Embora possam constituir localmente bons armazenadores de água subterrânea, a importância como aquífero é comprometida na Planície do Recife, em razão da sua vulnerabilidade por contaminação com águas salinizadas e/ou poluídas.

ALHEIROS et al (1995), dentro do mapeamento geológico do Município do Recife, definiram, para a Planície do Recife, cinco unidades litológicas de idade quaternária, definidas por três terraços marinhos (praias pleistocênicas, pleistocênicas modificadas e holocênicas), depósitos flúvio-lagunares e mangues. As **praias pleistocênicas** constituídas de areia de praias com cimentação por ácido húmico e Fe_2O_3 ; as **praias pleistocênicas modificadas** constituídas de areias de praia com intercalações de argilas orgânicas; as **praias holocênicas** constituídas de areias de praia com fragmentos de conchas; os **depósitos flúvio-lagunares** constituídos de areias, siltes e argilas orgânicas; e os **mangues** constituídos por areias finas, siltes e argilas orgânicas com vegetação típica.

2.7. HIDROGEOLOGIA

Ao longo da faixa costeira, ocupada pelas rochas sedimentares na Planície do Recife, as condições

hidrogeológicas são variáveis, ocorrendo aquíferos livres ou confinados, localizados ou com extensões regionais, com importância exploratória restrita ou destacada. A recarga desses aquíferos se faz através da infiltração direta das águas da chuva nas áreas aflorantes ou por infiltração através das camadas confinantes, devido ao abaixamento da pressão em função de bombeamento (FRANÇA et al, 1988).

O principal aquífero presente na Planície do Recife, é o Beberibe Inferior, com permeabilidade média de $2,37 \times 10^{-5}$ m/s (BATISTA, 1984), pertencente à Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba, ocorrendo outros dois aquíferos de menor importância porém, intensivamente explorado que são o Aquífero Cabo, pertencente à bacia sedimentar homônima, com uma permeabilidade muito variada entre $8,13 \times 10^{-4}$ m/s e $4,0 \times 10^{-7}$ m/s, e o Aquífero Boa Viagem que recobre os dois primeiros.

O Aquífero Beberibe Inferior, de maior potencialidade e boas condições hidrodinâmicas, segundo COSTA et al (1994), predomina na zona norte do Recife, onde é mais espesso (cerca de 200m), ocorrendo ainda na zona centro-leste, com espessura que varia desde 50m (no centro) até 150m (na costa), sempre recoberto pelo Aquífero Boa Viagem. Na zona oriental, representada pelos bairros de Engenho do Meio, Cidade Universitária e parte de Dois Irmãos, falta completamente o Aquífero Beberibe Inferior, ocorrendo apenas o Aquífero Boa Viagem, com reduzida espessura (em torno de 50m). Na zona sul, em Boa Viagem e Imbiribeira, apesar de faltar também o Aquífero Beberibe, que se limita com o Lineamento Pernambuco, o falhamento N-S, provavelmente mais recente que o E-W (reativado), acarretou um afundamento do bloco, que recebeu um espesso depósito de sedimentos do Aquífero do Cabo, recobertos pelo Aquífero Boa Viagem.

O recobrimento do manancial, na maior parte da Planície, é constituído por aluviões e terraços marinhos, bastante arenosos e freqüentemente salinizados até 50-60 metros por influência das zonas de mangues.

A vulnerabilidade natural de cada aquífero em um dado

local tem grau de confiabilidade dependente da resolução da escala de trabalho. Os estudos hidrogeológicos mais detalhados da RMR, são os de BATISTA (op.cit.) e os da CPRM (1994b).

Batista calculou a vazão de escoamento natural subterrâneo com valor aproximado de 8 milhões de m³ anuais e constatou sobre-exploração e indícios de salinização, a partir da superfície do terreno, causada por poços abandonados, mal construídos ou pela super-exploração, além da baixa produtividade (vazão específica) dos poços bombeados devido às deficiências construtivas e não pelas características naturais dos aquíferos.

A CPRM confeccionou um mapa de vulnerabilidade e outro de risco de contaminação das águas subterrâneas, determinando 04 (quatro) zonas em cada um, na Região Metropolitana do Recife, sendo de alta, moderada, baixa e desprezível vulnerabilidade e de máximo, alto, moderado e baixo risco de contaminação. Pelo mapa de vulnerabilidade, a parte norte da Planície do Recife é uma zona de moderada vulnerabilidade enquanto que, a parte sul, é bastante heterogênea, com a zona de alta vulnerabilidade prevalecendo, um pouco, sobre as outras três. Pelo mapa de risco de contaminação, a parte norte da Planície é dividida em áreas com moderado risco a leste e alto risco a oeste, enquanto que, a parte sul, também bastante heterogênea, tem áreas de moderado a máximo risco, prevalecendo o alto risco de contaminação.

Neste mesmo trabalho, a CPRM confeccionou um mapa hidrogeológico simplificado constituindo o embasamento de todos os resultados discutidos no mesmo quanto a vulnerabilidade e riscos de contaminação das águas subterrâneas, distinguindo 03 (três) zonas aquíferas livres, de acordo com a permeabilidade do material e profundidade do nível freático. Parte deste mapa hidrogeológico simplificado, no que concerne aos domínios da Planície do Recife, é apresentada na Figura 2.9, onde, apenas três das quatro zonas aquíferas são significativas na área da Planície.

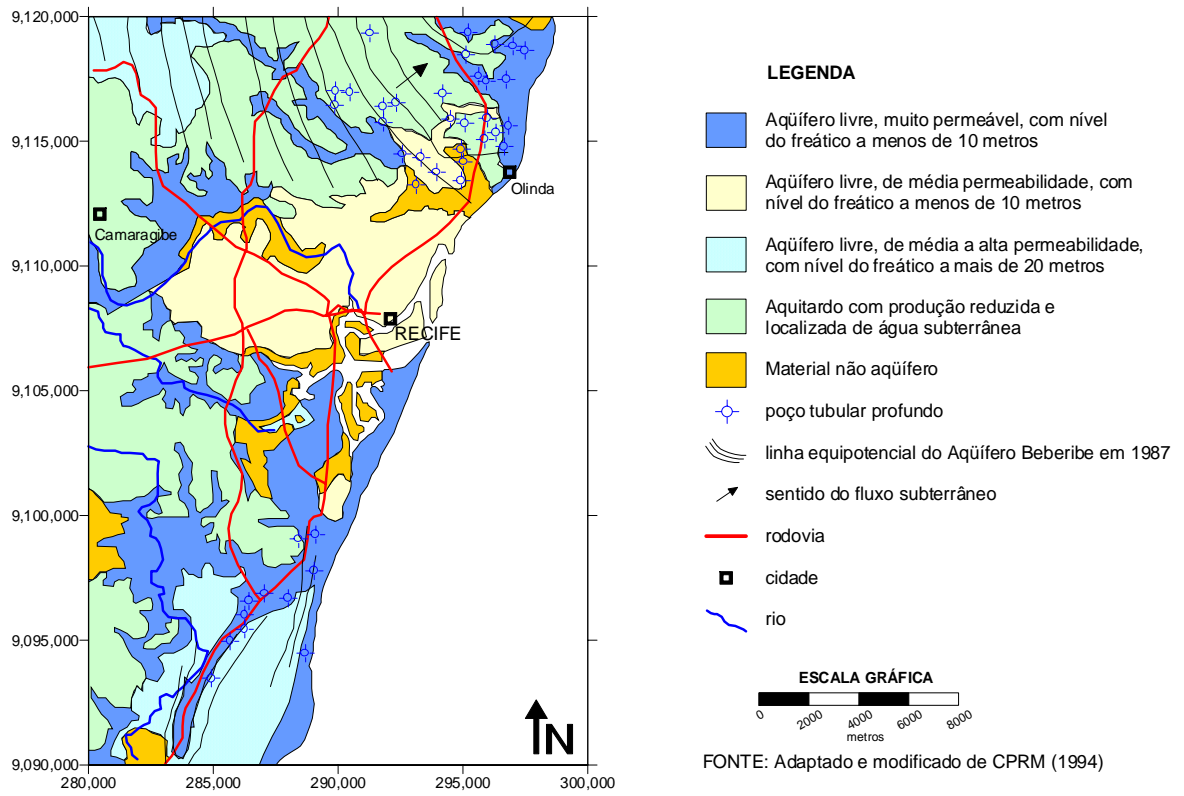


FIGURA 2.9 - Mapa Hidrogeológico Simplificado da Planície do Recife e adjacências

CAPÍTULO 3. HIDROQUÍMICA-FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo, são discutidos apenas os constituintes iônicos, as propriedades físico-químicas e as relações iônicas (índices hidrogeoquímicos) mais representativas relativas às análises de laboratórios que foram utilizados neste trabalho para a caracterização hidroquímica, deixando-se de lado as medidas organolépticas e as bacteriológicas, também contidas nas fichas de poços.

Os fundamentos a seguir expostos, têm como base dados e discussões de LOGAN (1965), SUDENE (1966) e CUSTODIO & LLAMAS (1976), além de autores mais recentes tais como SZIKSZAY (1993) e SANTIAGO & FRISCHKORN (1995).

3.1. CONSTITUINTES IÔNICOS

a. Cálcio (Ca^{++})

O cálcio é um constituinte básico do calcário, cal, gesso e cimento. Ele é largamente dissolvido na água subterrânea, a partir do calcário ou de silicatos cálcicos existentes na superfície da terra, sendo o cátion predominante em muitas águas subterrâneas, podendo ser precipitado facilmente e afetado por processos de troca iônica (ou de bases) pois normalmente se encontra em estado de saturação. Pode atingir facilmente concentrações acima de 200 mg/L, além de ser o principal constituinte da dureza. A tabela 3.1 mostra os valores de solubilidade dos sais mais freqüentemente encontrados dissolvidos na água indicando a facilidade de precipitação de carbonato de cálcio.

A quantidade de cálcio existente em qualquer suprimento de água para uso doméstico tem um papel importante na nutrição humana, quer benéfico quer prejudicial. Altas concentrações não tem aparentemente nenhum efeito fisiológico adverso, a menos de

causar um forte gosto salgado. Ele é essencial ao crescimento das plantas, e a sua abundância em uma água para irrigação tende a reduzir os perigos de um alto teor de sódio através de troca de base.

TABELA 3.1 - Solubilidade de Compostos Dissolvidos na Água.

COMPOSTO	SOLUBILIDADE
NaCl	361
CaCl ₂	746
MgCl ₂	546
KCl	262
Na ₂ SO ₄	193
CaSO ₄	2,016
MgSO ₄	355
NaHCO ₃	93
Na ₂ CO ₃	255
CaCO ₃	0,0153

Fonte: LIMA, 1996

b. Magnésio (Mg⁺⁺)

O magnésio é encontrado em dolomito e calcário dolomítico e é, em natureza, semelhante ao cálcio, porém com uma solubilidade maior (Tabela 3.1). As águas naturais obtêm os seus conteúdos de magnésio principalmente a partir do dolomito ou do calcário dolomítico. O magnésio é um constituinte comum da incrustação e o seu conteúdo não deve exceder a 150mg/L, na água potável. À concentrações mais elevadas na água, pode ser indício de mistura com água do mar ou poluição industrial além de produzir incrustações, um gosto salobro e efeitos fisiológicos adversos para o sistema humano. É essencial ao crescimento das plantas, porque é um importante constituinte da clorofila. Sua presença, em um suprimento de água para irrigação, tende a reduzir os perigos de um alto teor de sódio.

c. Sódio (Na⁺)

O sódio ocorre em quantidades variáveis, comumente na forma de cloreto ou de bicarbonato de sódio, em todas as águas naturais e é altamente concentrado nos oceanos. Sua procedência, assim como a ocorrência, é muito variável, é muito

solúvel (Tabela 3.1) e raramente chega a saturar. Não é utilizado como um critério para potabilidade da água, ao ser utilizado por pessoas saudáveis, desde que causa um gosto bastante salgado e desagradável, antes de atingir concentrações prejudiciais. Em concentrações acima de 100mg/L, pode contribuir para que ocorra corrosão.

Nas águas de irrigação, o conteúdo de sódio é extremamente crítico, particularmente nas águas que estão sendo utilizadas em solos argilosos, com baixo conteúdo de ar e permeabilidade pobre. Altas concentrações de sódio no solo o deixa endurecido prejudicando as culturas. O perigo do uso de uma água, com alto conteúdo de sódio, na irrigação, não depende tanto do conteúdo absoluto de Na quanto da quantidade relativa de Na nos cátions totais pois, processos de troca de cátions, com substituição do Na do solo por Ca e Mg, podem reduzir o efeito da saturação de sódio. Quase todos os esquemas para a classificação de águas para irrigação dependem, quer direta quer indiretamente, do conteúdo relativo de sódio. Altos níveis de sódio podem também causar distúrbios nutritivos nas plantas, principalmente por retardar a absorção de cálcio, magnésio e potássio, pelas mesmas.

d. Potássio (K^+)

A concentração de potássio é raramente maior do que poucos décimos de meq/L, nas águas naturais, pois durante o seu processo de formação, geralmente é fixado definitivamente pelas argilas, e raramente tem efeito na fisiologia humana. Ele é altamente essencial ao crescimento das plantas e é comumente adicionado à terra como fertilizante. Assemelha-se ao cálcio ou ao magnésio em seus efeitos sobre as propriedades do solo. Por sua similaridade química, o sódio e o potássio são quase sempre, apresentados e considerados juntos.

e. Ferro (Fe^{++} ; Fe^{+++})

O ferro, assim como o manganês, tem um importante papel

na água subterrânea onde, sua presença ou ausência, depende do seu estado de oxidação e do pH. Geralmente é oriundo de ataques a sulfetos, óxido de ferro e, principalmente de silicatos ricos em ferro. Ele é considerado a impureza que mais causa problemas à água e tem a capacidade de causar o que comumente se denomina de "água vermelha" ou "mancha preta". Devido ao fato deste elemento estar presente em quantidades variadas na maioria dos solos, também é encontrado em grande parte das águas superficiais e subterrâneas.

Usualmente ocorre como bicarbonato de ferro $[\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2]$ e cloreto de ferro $[\text{FeCl}_2]$ ou, em porções moderadas, sob a forma de sulfato de ferro $[\text{FeSO}_4]$ (MENEZES, 1992), quando então, é responsável pela formação de água ácida de natureza muito corrosiva. Na forma iônica, ocorre principalmente como íon ferroso (Fe^{++}) e secundariamente como íon férrico (Fe^{+++}); para a medida de concentração de ferro na água, este último, é reduzido ao íon ferroso determinando-se, assim, todo o ferro dissolvido, denominado de ferro total.

De um modo geral, pode-se afirmar que, águas que contém menos do que 0,2mg/L de ferro não produzirão efeitos danosos na maioria dos fins a que se destinam; águas que contém de 0,2 a 0,5mg/L de ferro, são de natureza duvidosa; e, águas que contém mais do que 0,5mg/L de ferro, certamente causarão problemas como precipitação no poço, na bomba, no encanamento, em tanques e em acessórios, formando uma massa vermelha ou porcelana de cor marrom avermelhada, difícil de ser removida.

Por outro lado, certos tipos de bactérias (como a *Crenothrix*, a *Thiobacillus thiooxydans*, e a *Thiobacillus ferrooxidans*), causam problemas em águas que contém ferro, transformando-o em uma forma insolúvel e produzindo uma espécie de lodo que comumente se aglomera como uma massa semi-sólida, obstruindo o aquífero, nas vizinhanças do poço, assim como, a tela, a bomba, tubulações, medidores e válvulas. Quando as bactérias morrem, dão à água um mau gosto e odores, tornando-a avermelhada, manchando roupas e encanamento.

f. Cloreto (Cl^-)

O íon cloreto ocorre em todas as águas naturais, em quantidades variáveis, sendo o principal ânion existente no oceano e em algumas fontes minerais. Assim como o sódio, sua origem nas águas subterrâneas é muito variada e raramente chega a saturar. Praticamente não é afetado pelos processos de troca iônica ou outro tipo de ação modificadora. É mais comumente encontrado, nas águas naturais, associado ao sódio, sob a forma de cloreto de sódio. Outros tipos encontrados, são os cloretos de cálcio, magnésio e ferro, que aumentam a dureza de não-carbonato ou permanente e podem aumentar a ação corrosiva da água.

A uma concentração de 300mg/L, o cloreto pode ser notado somente por pessoas de paladar sensível. Acima de 1.500mg/L geralmente não podem ser tolerados pelos seres humanos, ficando, o conteúdo de 250mg/L, aceito como o limite máximo preferido, em águas potáveis. Concentrações acima da média regional podem indicar poluição. A concentração de cloreto é um importante critério para águas de irrigação pois, altas concentrações impedem o crescimento da maioria das culturas, e até mesmo quantidades moderadas são tóxicas para algumas delas.

g. Sulfato (SO_4^{2-})

Procede, principalmente, da dissolução de gesso e anidrita e oxidação de sulfetos nas rochas, sendo afetado pela redução devido a atividades bacterianas, e podendo se precipitar sob a forma de sulfato de cálcio [SO_4Ca] e mais raramente sulfato de bário [SO_4Ba].

Nos suprimentos de água potável, ele não deve exceder a 200mg/L. A água contendo mais de 400mg/L, provavelmente terá efeitos laxativos, quando utilizada pela primeira vez. Águas com mais de 2.000mg/L, provavelmente não podem ser toleradas pelas pessoas, sem um período de adaptação bastante longo. Nos solos, o principal efeito do sulfato é aumentar a sua salinidade. É essencialmente importante para a nutrição das plantas e deve estar presente em todos os suprimentos de água

para irrigação.

h. Carbonato ($\text{CO}_3^{=}$) e Bicarbonato (HCO_3^-)

As quantidades relativas dos íons de carbonato em uma água dependem do pH e do conteúdo de gás carbônico, sendo muito solúveis e difícil precipitação. Suas origens estão na dissolução do CO_2 atmosférico ou do solo, de calcários e dolomitos ou hidrólise de silicatos. Em água potável, um excesso de 300mg/L de íons de carbonato não pode ser tolerado. Tais quantidades são raras, entretanto, porque o bicarbonato ordinariamente predomina sobre o carbonato. Em proporções normais, o carbonato e o bicarbonato juntos não são fisiologicamente danosos, quando em quantidades até 500mg/L.

Nas análises de água para irrigação, a quantidade de carbonatos é freqüentemente apresentada como íons de bicarbonato, isto é, o conteúdo de carbonato é matematicamente convertido em " HCO_3 equivalente" e somado ao conteúdo de bicarbonato. Nas análises para fins sanitários e para uso industrial, ambos são comumente apresentados em conjunto, como "alcalinidade total".

O conteúdo de bicarbonato existente em uma água é de grande importância na avaliação de sua adequabilidade para fins de irrigação. Em quantidades normais, o bicarbonato é provavelmente de pouca importância na nutrição da planta, porém em altas concentrações pode causar uma clorose induzida por bicarbonato. A presença de carbonato dos metais alcalinos é bastante indesejável, quer em água para irrigação quer na solução do solo.

i. Nitrato (NO_3^-)

Os íons de nitrato, apesar de serem constituintes comuns, raramente ocorrem em grandes quantidades, em águas naturais não poluídas, representando o estágio final da oxidação de materiais orgânicos e, se estiver presente em quantidades excessivas, indicará contaminação. Pode-se suspeitar haver

poluição em um suprimento de água potável, se o nitrato exceder de 5 a 10mg/L mas, águas não poluídas podem conter mais de 10mg/L de nitrato e, portanto, outro critério deve ser usado antes que o suprimento de água seja condenado somente com base neste teste. O nitrogênio é o principal requisito para a nutrição apropriada da planta e é adicionado ao solo ou à água como fertilizante, em muitos países. A sua ocorrência em uma água não tem qualquer efeito danoso ao solo, sendo normalmente estável, porém podendo ser fixado pelo solo e reduzido a N_2 ou NH_4 em ambientes redutores.

j. Potencial Hidrogênico - pH

A molécula de água se dissocia, em um íon positivo de hidrogênio (H^+) e um íon negativo denominado, hidroxila (OH^-). O "pH" é a unidade de medida de concentração dos íons de hidrogênio (H^+), expressando a alcalinidade ou a acidez de uma água natural, e é uma função do gás carbônico dissolvido. A maioria das águas naturais estão classificadas no grupo levemente alcalino, pH 7,0-8,5, valores estes, com os quais elas podem ser utilizadas para irrigação ou para beber. Uma água com pH superior a 9 é geralmente inadequada para quaisquer usos. A medida do pH, é importante para a determinação da natureza corrosiva ou incrustante de uma amostra d'água.

k. Sólidos Totais Dissolvidos (T.D.S.) ou Resíduo Seco (R.S.)

O resíduo seco é obtido evaporando a água à $105^{\circ}C$ somando-se com os colóides e com os sólidos suspensos ($>10^{-3}mm$) existentes na água, têm-se os sólidos totais. Águas potáveis de boa qualidade contém menos de 500mg/L de sólidos dissolvidos. Quando águas melhores não estão disponíveis, águas contendo até 1.500mg/L ou mais podem ser utilizadas embora tais águas não tenham bom paladar e não aliviem a sede. A maioria do gado pode beber água com até 10.000mg/L, porém, é necessário um período de tempo apreciável para se tornar acostumado a tais concentrações.

3.2. PROPRIEDADES IÔNICAS

a. Condutividade Elétrica (C.E.) e Resistividade (ρ)

A capacidade que uma solução possui de transmitir ou impedir a passagem de uma corrente elétrica, é uma propriedade importante que depende fortemente dos tipos e das concentrações dos íons existentes na solução, além da influência da temperatura. Quanto maior a concentração de íons, maior será a condutividade e menor a resistividade.

A condutividade elétrica de uma água, uma das mais simples das medições, é a medida do conteúdo iônico fornecendo uma excelente aproximação sobre a quantidade de sólidos totais dissolvidos, desde que a maioria dos sais em solução sejam ionizados. A condutividade elétrica de uma boa água potável é inferior a $750\mu\text{mho/cm}$, e águas de irrigação com valores de C.E. mais baixos que $750\mu\text{mho/cm}$ podem ser utilizadas quase que indiscriminadamente. Na faixa de 750 a $2.250\mu\text{mho/cm}$, a qualidade e a adequabilidade diminuem e, acima de $2.250\mu\text{mho/cm}$ podem causar danos às culturas comuns.

3.3. RELAÇÕES IÔNICAS (ÍNDICES HIDROGEOQUÍMICOS)

As relações entre os íons dissolvidos em uma água podem guardar certa relação com o terreno do qual procede a água, indicar a ação de fenômenos modificadores, ou indicar uma característica específica da água considerada. Podem-se estabelecer muitos tipos de relações cuja utilidade é função do problema a estudar. É freqüente designar estas relações com o nome de índices hidrogeoquímicos, onde todos os valores são expressos em meq/L, tal como indica o símbolo **r**. As utilizadas neste trabalho (CUSTÓDIO & LLAMAS, op.cit.) são discutidas a seguir:

a. Relações rMg/rCa e rNa/rCa

A relação rMg/rCa varia freqüentemente entre 0,3 e 1,5; em águas continentais os valores próximos de 1 indicam uma provável influência de terrenos dolomíticos ou com serpentina, e valores superiores a 1 sugerem estar em geral relacionados com terrenos ricos em silicatos magnesianos, como gabros e basaltos. Entretanto, é preciso observar que quando ocorre precipitação de $CaCO_3$ em uma água, aumenta a relação rMg/rCa sem que seja indicação dos terrenos atravessados. No caso de dissolução de calcário, ocorre uma diminuição da razão.

Como a água do mar tem rMg/rCa ao redor de 5, as águas que circulam por terrenos de formação marinha ou que tenham sofrido mistura com a água do mar tem também uma relação elevada. Uma elevação do conteúdo em cloretos e da relação rMg/rCa pode ser um bom indício de contaminação marinha.

Nos processos de troca iônica que produzem abrandamento da água, pois o Ca^{++} se fixa melhor que o Mg^{++} , espera-se um aumento da relação. No entanto não é uma regra geral, pois o processo depende da proporção inicial de cada íon.

Os processos de redução de sulfatos que facilitam a precipitação de $CaCO_3$ sugerem um crescimento da relação rMg/rCa , mas a presença simultânea de troca iônica $Mg^{++} \leftrightarrow Ca^{++}$ pode permitir que a precipitação possível de $CaCO_3$ se realize às custas do Mg^{++} .

A relação rNa/rCa só tem interesse para comparar os valores na água com os da rocha do aquífero, ou para seguir possíveis processos de troca de bases; neste caso é preciso lembrar que a precipitação ou dissolução de sais de Ca altera as relações sem que haja troca de base.

b. Relação rK/rNa

Esta relação pode variar entre 0,001 e 1 em águas doces, sendo mais freqüente que varie entre 0,004 e 0,3 (SCHOELLER, 1956) enquanto que, para a água marinha, fica no intervalo de 0,02 a 0,025.

Devido a fixação preferencial de K^+ no terreno, esta

relação é menor na água que na rocha origem e é tanto menor quanto mais concentrada em sais é a água. Ela é limitada pela precisão das medidas e é facilmente mudada pelo solo. Se existem aportes artificiais de K^+ , pode-se seguir sua diminuição no sentido do fluxo e então esta relação pode ser interessante (CUSTÓDIO, 1966).

Os trabalhos realizados na ilha vulcânica de Lanzarote (CUSTÓDIO, 1974) indicam uma tendência a decrescer a relação rK/rNa conforme aumenta a salinidade, passando desde valores de 0,05 para águas com um resíduo seco em torno de 1.000mg/L a valores de 0,02 para águas com um resíduo seco de mais de 4.000mg/L.

c. Relação $rCl/rHCO_3$

Como o conteúdo em HCO_3 é um valor relativamente constante em águas subterrâneas, esta relação se presta para seguir o processo de dissolução no sentido do fluxo subterrâneo; ainda que esse processo faça crescer ligeiramente o denominador, um aumento na relação indica um avanço no processo de concentração. Se existem fenômenos de redução de sulfatos ou aportes exteriores de CO_2 pode haver aumento do conteúdo em HCO_3^- e neste caso não convém utilizar esta relação sem muitas precauções. A precipitação de $CaCO_3$ também pode influir nesta relação.

A relação $rCl/rHCO_3$ é especialmente útil na caracterização da intrusão marinha já que em águas continentais tem valor entre 0,1 e 5 e na água do mar varia entre 20 e 50. Se o aumento de cloretos é devido a concentração de sais em zonas de recarga, a relação cresce muito menos para igual aumento de cloretos que por intrusão marinha.

d. Índice de Troca de Bases

Índice de Troca de Bases (*itb*) ou Índice de Desequilíbrio entre Cloretos e Alcalinos é a troca de bases que afeta principalmente os cátions Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} e também ao H^+ , Li^+ e Sr^{++} enquanto que o K^+ e o NH_4^+ tendem a ser fixados irreversivelmente. Geralmente também modifica, as relações

entre cátions tais como rK/rNa , rNa/rCa , rNa/rMg , rMg/rCa , $rNa/r(Mg+Ca)$, $\%rNa$, rCa/rCl , rMg/rCl , rNa/rCl , etc.

Por definição (SCHOELLER, 1962), o Índice de Troca de Base é dado por:

$$itb = \frac{rCl - r(Na + K)}{rCl} \quad (3.1)$$

Nas águas subterrâneas o itb pode tomar valores positivos ou negativos, em geral, próximos de 0. Quando há abrandamento (troca de Ca^{++} e Mg^{++} por Na^+) seu valor tende a diminuir enquanto que, se existe endurecimento, tende a crescer.

Em águas nas quais os íons Cl^- e Na^+ são dominantes, pode existir um notável abrandamento sem que o valor itb seja apenas afetado por estar o Ca e Mg em quantidades muito inferiores ao Na. Neste caso, é melhor adotar como índice,

$$itb = \frac{rCl - r(Na + K)}{r(SO_4 + HCO_3 + NO_3)} \quad (3.2)$$

utilizado, em geral, para valores negativos que estão relacionados com terrenos plutônicos, em especial com os graníticos. A água do mar, tem valores na faixa de +1,2 a +1,3 e as salmouras com $rCl > 500$ tem valor sempre positivo. Para águas pouco salinas, pode ser tanto positivo quanto negativo.

Um aumento no valor de itb indica uma troca de bases com endurecimento da água e uma diminuição indica troca de base com abrandamento.

Quando ocorre uma redução de sulfatos, o primeiro valor (itb) não é afetado, pois pode ver-se afetado o segundo [$itb(-)$]. O mesmo sucede quando se dissolve ou precipita $CaCO_3$ ou $CaSO_4$.

Com o processo de aumento da salinidade de uma água, o valor itb tende a crescer lentamente (SCHOELLER, 1956).

e. Razão de Adsorção de Sódio (SAR)

Esta razão é utilizada, juntamente com a condutividade, elétrica para a classificação da água para fins de irrigação, indicando se a água é apropriada ou não para tais fins. Quanto maior o SAR menos apropriada ela será.

O SAR é uma relação que indica a percentagem de sódio contido na água que pode ser adsorvido pelo solo e é calculado através da seguinte equação:

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

(3.3)

CAPÍTULO 4. METODOLOGIA

Discute-se neste capítulo, a metodologia adotada nesta monografia que inclui a técnica de coleta d'água em campo, os métodos de análise, os critérios para o uso da água com as representações gráficas (apresentação dos resultados), e os tratamentos estatísticos dos dados.

Inicialmente, foi pesquisado o cadastro de poços da Região Metropolitana do Recife e constatou-se que 276 poços, ou seja, 14,5% dos 1.896 poços cadastrados na Planície do Recife e adjacências, continham análises físico-químicas da época de perfuração, e, alguns deles, foram analisados posteriormente, totalizando assim, 303 análises físico-químicas.

Devido a grande variação temporal das análises físico-químicas, de setembro de 1966 a dezembro de 1994, foi feita uma nova amostragem para ter dados recentes com uma melhor caracterização química das águas subterrâneas da Planície do Recife.

4.1. TRABALHO DE CAMPO

A nova coleta de amostra d'água (segundo grupo), feita pela equipe técnica do Projeto HIDROREC, seguiu os seguintes pontos:

- ↳ volume da amostra: 1 a 2 litros;
- ↳ tipo de recipiente: garrafas plásticas de polietileno sem cor, para evitar contaminação;
- ↳ preparo dos recipientes: lavagem com água destilada e, com a água a ser coletada;
- ↳ coleta da água: diretamente na saída do poço ou na entrada dos reservatórios quando o poço tinha instalação de bomba, ou através da garrafa amostradora

de poço quando o poço não estava instalado;

- ↳ acondicionamento das garrafas: preenchimento com a água coletada até a borda da boca da garrafa para não ficar nenhum espaço com ar e hermeticamente fechada com fita crepe;
- ↳ acompanhada pelos seguintes dados: número da amostra; local da amostragem; pH e condutividade elétrica da água na ocasião da coleta; e nome da pessoa que coletou a amostra;
- ↳ tempo: o transporte para o laboratório e a análise foram feitos no mesmo dia ou de um dia para o outro.

O acondicionamento e o tempo, são de suma importância para evitar a entrada de ar e provocar reações que modifiquem as concentrações. As medidas que podem modificar-se à presença do ar são: oxigênio dissolvido, pH, carbonato e bicarbonato, sulfato, sulfito, nitrito, amônia, e ferro-ferroso. Os constituintes que não apresentam sensibilidade quando em contato com o ar são: sólidos totais, cálcio, magnésio, cloretos, brometos, iodetos, fluoretos, cianetos, sílica, sulfatos, ferro total, e demais metais, material orgânico e demanda química de oxigênio.

4.2. TRABALHO DE LABORATÓRIO

4.2.1. Métodos de Medida

Os métodos de análises para medidas dos elementos maiores foram:

- ↳ via aquosa, gravimetria, titulação (volumétrico) para análise de HCO_3^- , CO_3^{2-} , Ca^{++} , Mg^{++} e Cl^- (Método de Mohr, com nitrato de prata);
- ↳ espectrofotometria de absorção atômica para análise de Ca^{++} e Mg^{++} ;
- ↳ fotometria de chama para análise de Na^+ e K^+ ;
- ↳ turbidímetro para análise de SO_4^{2-} ;
- ↳ aparelhos portáteis de campo para medida de pH

(peagâmetro) e de condutividade elétrica (condutivímetro);

Os sólidos totais dissolvidos foram determinados filtrando a amostra para a remoção de materiais em suspensão, evaporando-a até secar totalmente, a uma temperatura de 103 a 105°C e pesando o resíduo. O resultado é expresso em mg/L, representando a concentração de todo o material dissolvido e do material coloidal existente na amostra.

4.2.2. Conversão de Unidade

Os resultados das análises chegam do laboratório expressos em meq/L ou em mg/L. No tratamento dos resultados, é necessário transformar de uma unidade para outra, o que foi feito utilizando a Tabela 4.1, com o seguinte critério:

- ↳ Para transformar **mg/L** em **meq/L**, multiplica-se por "X" ou divide-se por "Y".
- ↳ Para transformar **meq/L** em **mg/L**, multiplica-se por "Y" ou divide-se por "X".

TABELA 4.1 - Fatores de conversão de unidades

CÁTIONS	"X"	"Y"	ÂNIONS	"X"	"Y"
Cálcio, Ca ⁺⁺	0.04990	20.04	Cloreto, Cl ⁻	0.02820	35.46
Magnésio, Mg ⁺⁺	0.08224	12.16	Sulfato, SO ₄ ⁼	0.02082	48.03
Sódio, Na ⁺	0.04350	22.99	Bicarbonato, HCO ₃ ⁻	0.01639	61.02
Potássio, K ⁺	0.02558	39.10	Carbonato, CO ₃ ⁼	0.03333	30.01
			Nitrato, NO ₃ ⁻	0.01613	62.01
Alumínio, Al ⁺⁺⁺	0.11120	8.993	Brometo, Br ⁻	0.01251	79.92
Amônia, NH ₄ ⁺	0.05543	18.04	Fluoreto, F ⁻	0.05263	19.00
Bário, Ba ⁺⁺	0.01456	68.68	Fosfato, PO ₄ ⁻⁻⁻	0.03159	31.66
Chumbo, Pb ⁺⁺	0.009652		Hidróxido, OH ⁻	0.05880	17.01
Cobre, Cu ⁺⁺	0.03148	31.77	Iodeto, I ⁻	0.00788	129.00
Estrôncio, Sr ⁺⁺	0.02282	43.82	Nitrito, NO ₂ ⁻	0.02174	46.01
Ferro, Fe ⁺⁺	0.03581	27.93	Sulfeto, S ⁼	0.06237	16.03
Ferro, Fe ⁺⁺⁺	0.05372	18.62			
Hidrogênio, H ⁺	0.99210	1.008			
Lítio, Li ⁺	0.14410	6.940			
Manganês, Mn ⁺⁺	0.03640	27.47			
Manganês, Mn ⁺⁺⁺⁺	0.07281	13.74			

NOTA: Os valores "Y" são os pesos químicos equivalentes dos íons, baseados nos Pesos Atômicos Internacionais de 1957, e os valores "X" são os recíprocos.

FONTE: LOGAN (1965).

4.3. Tratamento dos Dados

4.3.1. Consistência dos Resultados

Para testar a consistência das análises, foram usados três tipos de tratamento: *erro relativo de análise, correlação entre condutividade elétrica e concentração iônica, e correlação entre sólidos totais dissolvidos medidos e calculados.*

Estes testes são fundamentais porque os resultados das fichas foram medidos por 17 laboratórios diferentes.

a) Erro Relativo de Análise ou "Percentagem de Erro"

Este teste se baseia na soma dos ânions e dos cátions, em meq/L, que em uma solução qualquer são iguais. A "Percentagem de Erro" é o método padrão utilizado para julgar a precisão de uma análise, segundo a expressão:

$$Erro(\%) = \frac{\left| \sum \text{anions} - \sum \text{cations} \right|}{\sum \text{anions} + \sum \text{cations}} \times 100 \quad (4.1)$$

Esta equação deve ser utilizada juntamente com a tabela de erros permissíveis pelas faixas das somas iônicas (Tabela 4.2). Se o erro de qualquer análise é, substancialmente maior do que aquele constante nesta tabela, significa um problema na medida no laboratório.

TABELA 4.2 - Erros Permissíveis pelas Faixas das Somas Iônicas

Soma de ânions ou cátions (meq/L)	Erro permissível (%)
1	10
2	6
6	4
14	3
30	2

É comum o laboratório não fazer as medidas de sódio e potássio e determiná-las pelo método da diferença, assumindo que a soma de sódio e potássio é igual à diferença entre os ânions totais e a soma de cálcio e magnésio (em meq/L). O mesmo processo é aplicado na falta de determinação de outros íons, como o sulfato. Com esta metodologia, preenche-se lacunas deixadas pelas medidas, porém não é possível verificar a precisão de uma análise, pois seu erro sempre parecerá ser zero.

b) Condutividade Elétrica versus Concentração Iônica

O valor numérico da relação entre estes parâmetros, isto é, a divisão da condutividade elétrica ($\mu\text{mho/cm}$) pela soma dos ânions ou dos cátions (meq/L), deve estar entre 90 e 100 para a maioria das águas, ou seja,

$$90 \leq \frac{\text{Condutividade Elétrica}}{\sum \text{anions ou cations}} \leq 100 \quad (4.2)$$

Pode ser inferior a 80 para as águas duras, com alto teor de íons de bicarbonato ou de sulfato, e pode ser maior do que 100 para as águas brandas e com alto teor de cloreto.

c) Sólidos Totais Dissolvidos medidos e calculados

Se a análise é completa, esta comparação pode ser útil na avaliação da precisão da mesma.

Para calcular sólidos dissolvidos, soma-se todos os íons dissolvidos, convertendo o bicarbonato em íon de carbonato, pela multiplicação por 0,4917. A soma deve ser aproximadamente o valor dos sólidos totais dissolvidos determinado pela evaporação. Na faixa de 100 à 500 mg/L de salinidade total, a diferença de 10-20 mg/L, entre os dois valores, é normal.

4.3.2. Informatização dos Dados

Todos os dados originários das fichas de análise dos laboratórios, foram organizados em tabelas (planilhas) no programa de planilha eletrônica EXCEL, da MicroSoft Corporation.

Com os mesmos dados, após a exclusão das análises físico-químicas incompletas iônicamente, num total de 42, foram gerados arquivos apropriados para utilização no programa químico HC-GRAM, versão 2.18, da Borland International, que elabora diagramas triangulares de Piper.

O programa estatístico STATISTICA, versão 4.3, da StatSoft Inc., foi utilizado para tratar estatisticamente os dados físico-químicos, incluindo a análise de agrupamento, em cada aquífero para cada universo (grupo) de amostras.

A área da Planície do Recife foi digitalizada, para geração da base digital georeferenciada, através de uma mesa digitalizadora e do software SGI, Sistema Geográfico de Informações, versão 2.4E da ENGESPACO/INPE. Através do software IDRISI for Windows, versão 1.01.002, da Clark University Graduate School of Geography, a base digital foi vetorizada para geração de um arquivo "máscara" a ser utilizado no programa SURFER.

Com o programa computacional SURFER_32 for Windows, versão 6.01, da Golden Software Inc., foram elaborados os mapas de localização dos poços, superfícies tridimensionais e mapas de contorno de isovalores de cada elemento.

Na elaboração das figuras, após algumas serem geradas pelos programas utilizados e outras através de scanners de mesa, as mesmas foram convertidas em arquivos bitmap (.bmp), em arquivos windows metafile (.wmf) e arquivos tagged image file format (.tif) e usados para tratamentos das imagens com programas específicos como o COREL PHOTO PAINT, versão 5.0, da Corel, o PAINT, versão 7.0, da MicroSoft Corporation, e o PAINT SHOP PRO, versão 3.12, da Jasc Inc.

4.3.3. Apresentação dos Resultados

A interpretação dos valores de concentração dos elementos maiores, após a verificação da validade dos dados, é facilitada pelas representações gráficas que são variadas e bastante úteis. Dado o grande número de dados, optou-se pelas representações do tipo diagrama de Piper (PIPER, 1944), gráficos colunares (histogramas), além de mapas e superfície de contorno dos isovalores.

O diagrama de Piper é construído utilizando o percentual de cada cátion e ânion, com as concentrações expressas em meq/L, enquanto que, o gráfico colunar e o mapa e superfície de contorno de isovalores, são construídos utilizando os valores em mg/L.

4.3.4. Classificação das Águas

Os parâmetros definidos anteriormente, são indicadores das condições adequadas da água para os diferentes usos. Os resultados das análises da composição química e das propriedades iônicas foram comparados com padrões estabelecidos de potabilidade e de usos na irrigação e na indústria para que ela possa ser usada sem causar danos já conhecidos.

Não são necessárias todas as análises possíveis para que se possa verificar as condições de uso de uma água, mas os parâmetros a serem determinados dependem da finalidade a que se destina a amostra. SANTIAGO & FRISCHKORN (1995) resumiram as necessidades de análises na Tabela 4.3.

Neste trabalho, foram considerados principalmente os critérios para uso doméstico (consumo humano), comentando-se um pouco sobre a classificação para a irrigação, por serem usuais aos profissionais que lidam com o assunto, deixando-se de lado os outros critérios supracitados, por não haver utilidade na área deste trabalho.

TABELA 4.3 - Uso as Águas e Tipo de Análise

FINALIDADE	TIPOS DE ANÁLISE
Pesquisa Científica e Consumo Humano	Elementos maiores e traços, bactérias.
Irrigação	Cálcio, magnésio, condutividade, sódio, temperatura e boro, e análise bacteriológica.
Indústria	Dureza, ferro, manganês e SiO ₂ .
Pecuária	Resíduo seco.
Prospecção Mineral	Elementos traços do elemento.
Recreação	pH e bactérias.
Fins Sanitários	Curtume: cromo e bactérias. Galvanoplastia: prata, cobre, etc.

As características que delimitam a potabilidade da água destinada ao abastecimento doméstico, denominadas "padrões de potabilidade", compreendem critérios essenciais (visando a proteção contra contaminação por microorganismos patogênicos e contra a poluição por substâncias tóxicas ou venenosas) e critérios complementares (visando a adequação da água em aspectos estéticos, organolépticos, econômicos, etc. - cor, sabor, odor, turbidez, dureza, corrosividade, etc.).

Os critérios (normas) não são gerais mas, existem associações nacionais e internacionais com padrões que, embora muito próximos, não são idênticos, devido às peculiaridades locais. Apesar da variação entre regiões, há uma tendência mundial de padronização das normas propostas pela Organização Mundial de Saúde - OMS. Tais padrões de potabilidade vigentes mundialmente, foram resumidos pela Secretaria do Meio Ambiente de São Paulo (1990) e em SZIKSZAY (1993).

Para a finalidade de irrigação, os gráficos que relacionam a condutividade elétrica com o SAR (Razão de Adsorção do Sódio) são os mais usuais e aceitos. O gráfico mais conhecido é o do U.S. Salinity Laboratory-US.S.L. (US. DEPT. OF AGRICULTURE, 1954), que contém classificações largamente utilizadas para indicar salinidades. As classificações e o gráfico (Figura 4.1), são expostas a seguir.

Quanto à Condutividade Elétrica, águas do tipo,

- C₀**: Podem ser utilizadas sem restrições para a irrigação.
- C₁**: Podem ser utilizadas para irrigar a maioria das culturas, na maioria dos solos, com pequeno risco de incidentes provenientes da salinidade do solo, salvo se a permeabilidade deste último for extremamente fraca.
- C₂**: Podem ser utilizadas se houver uma lixiviação moderada do solo. As plantas de fraca tolerância salina podem ser cultivadas na maioria dos casos, sem perigo.
- C₃**: Só podem ser utilizadas em solos bem drenados. Mesmo quando o solo é bem cuidado, devem ser tomadas disposições especiais de luta contra a salinidade e apenas as plantas de boa tolerância salina devem ser cultivadas.
- C₄**: Geralmente não servem para a irrigação, todavia, podem ser excepcionalmente utilizadas em solos permeáveis, bem cuidados e abundantemente irrigados. Somente as plantas de altíssima resistência salina, podem ser cultivadas.
- C₅**: São utilizáveis apenas em terrenos excessivamente permeáveis e muito bem cuidados; salvo exceções, unicamente para palmeiras, sobretudo para valores acima de 10.000mmho/cm.

Quanto à Razão de Adsorção do Sódio, as águas do tipo,

- S₁**: Podem ser utilizadas em quase todos os solos com fraco risco de aparição de teores nocivos de sódio susceptível de troca.
- S₂**: Apresentam perigo de sódio para os solos de textura fina e com forte capacidade de troca de cátions. Podem ser utilizadas nos solos de textura grosseira ou ricos em matéria orgânica, com boa permeabilidade.
- S₃**: Oferecem perigo de teores nocivos de sódio na maioria dos solos, salvo nos solos gipsíferos. Exigem tratamento especial do solo: boa drenagem, lixiviação e presença de matérias orgânicas.
- S₄**: São geralmente imprestáveis para a irrigação, salvo se a salinidade global for fraca ou pelo menos média e quando são aplicadas em solos ricos em calcário.

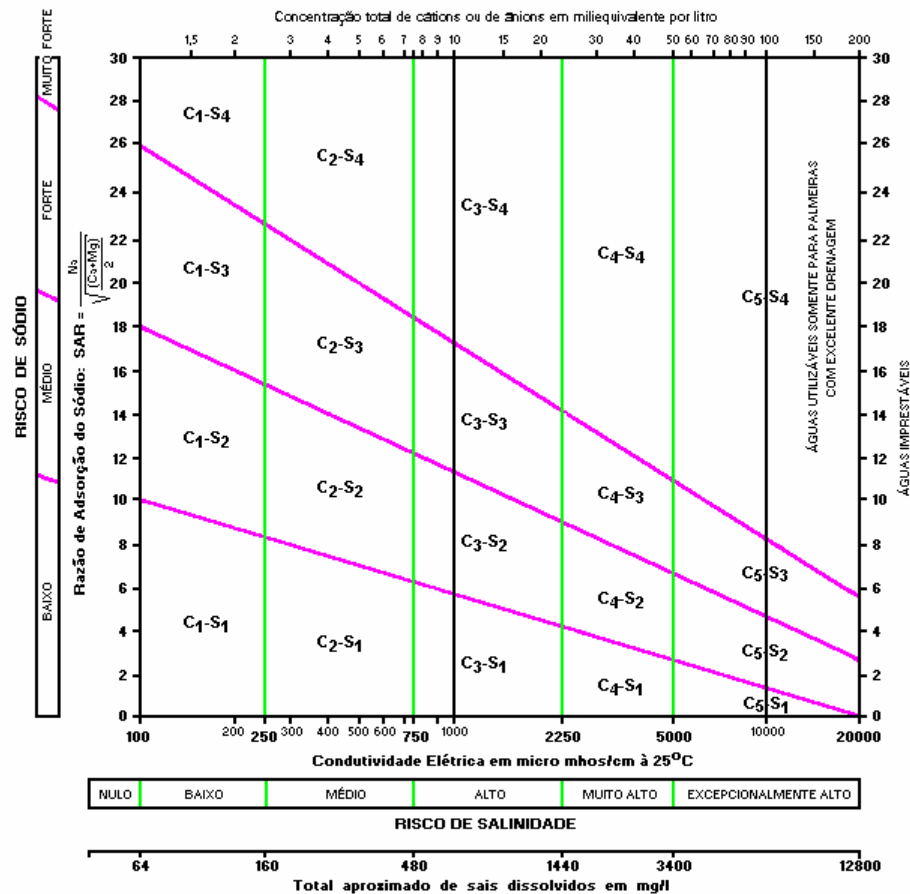


FIGURA 4.1 - Diagrama do U.S.Salinity Laboratory (US.S.L.) para a Classificação de Águas para Irrigação.

4.3.5. Tratamento Estatístico

Dispõe-se, neste trabalho, de uma quantidade considerável de dados (294 análises físico-químicas) correspondentes a 267 poços amostrados, cada um deles com 11 determinações de concentração iônica e parâmetros físicos. Se as informações forem apresentadas num quadro contendo cada uma das observações individuais, sua compreensão fica difícil, por isso, a primeira idéia é mostrar o caráter dos valores encontrados, produzindo um arranjo por classes através da elaboração de tabelas de freqüência que contém os intervalos de classes (It) nos quais os dados se dividem convenientemente, de forma empírica entre 4 e 15 intervalos (Tabela 4.4) ou através da expressão de Sturges (MARANHÃO, 1989):

$$I_t = \frac{A}{1 + 3,32 \cdot \log N}$$

(4.3)

onde, A = representa a amplitude da população dada pela diferença entre os valores máximo e mínimo
 N = número de informações

TABELA 4.4 - Número de Classes em Função da Quantidade de Observações Disponíveis

Quantidade de Observações		Número de Classes	
6	a	11	4
12	a	22	5
23	a	45	6
46	a	90	7
91	a	181	8
182	a	362	9
363	a	724	10
725	a	1.448	11
1.449	a	2.896	12
2.897	a	5.792	13
5.793	a	11.584	14
Acima de		11.584	15

Fonte: MARANHÃO, 1989

Os limites de cada classe, foram estabelecidos de forma empírica de acordo com as concentrações de cada elemento observado, acrescentando-se 0.01 ao início de cada classe, a partir da segunda classe. Daí, foi só contar a quantidade de observações que caem dentro de cada intervalo e tabelar os resultados.

Os resultados expressos nas tabelas de freqüência são melhor visualizados se mostrados em histogramas de freqüência, que consistem de um conjunto de retângulos cujas bases sobre um eixo horizontal, têm largura igual à amplitude do intervalo de classe e alturas, proporcionais às freqüência das classes, representando os números de observações.

A partir dos histogramas de freqüência, construiu-se polígonos de freqüência, ligando os pontos dos topos dos

retângulos. Estendendo o número de amostras para o infinito, ou fazendo a amplitude do intervalo tender a zero (LANDIM, 1993), o polígono tenderá a uma curva, denominada de **curva de freqüência** ou **curva de distribuição**.

As curvas de freqüência mais comuns são a **curva normal** ou **gaussiana**, caracterizada por uma perfeita simetria e uma disposição em forma de sino, a **curva log-normal**, caracterizada por sua distribuição assimétrica, em que um ramo é mais alongado do que o outro, e a **curva multimodal**, caracterizada, principalmente, pela presença de vários picos.

Além da tabela de freqüência, outros parâmetros estatísticos se prestam a descrever uma série grande de dados em termos numéricos, correspondentes a parâmetros individuais.

Os parâmetros utilizados como medida de tendência central são: a média aritmética, a média aritmética ponderada, a média geométrica, a média harmônica, a mediana e a moda. Os parâmetros utilizados como medida de dispersão são: a amplitude total, o desvio médio, o desvio padrão, a variância e o coeficiente de variação. Os parâmetro adotados neste trabalho são definidos a seguir.

↳ Média Aritmética

Corresponde ao resultado da relação entre o somatório das medidas e o número total N de medidas, sendo matematicamente apresentada pela expressão:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N} \quad (4.4)$$

Ou ainda, a partir de tabelas de freqüência, pela expressão:

$$\bar{X} = \frac{\sum F_i x_i}{N} \quad (4.5)$$

onde: F_i representa as freqüências das observações;

I_i o ponto central das classes de freqüência; e

N o número de observações.

↳ Desvio Padrão

Caracteriza a amplitude dos desvios das medidas individuais, ou a dispersão da variável, em relação à média aritmética dessas medidas. Por isso, ele é definido como o desvio padrão aritmético (S) que pode ser matematicamente definido respectivamente, pela expressão:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\bar{X} - X_i)^2}{N-1}} = \sqrt{\frac{\sum F_i \cdot I^2}{N} - \left(\frac{\sum F_i \cdot I_i}{N}\right)^2} \quad (4.6)$$

↓ Pequeno número de observações ↓ grande quantidade de observações (tabelas de freqüência)

onde: \bar{X} é a média aritmética das observações;

X_i exprime as várias observações;

F_i representa freqüências das observações;

I_i o intervalo central das classes; e

N é o número de observações.

↳ Coefficiente de Variação

O coeficiente de variação (V) é a principal expressão quantitativa para definir a regularidade das amostras e é definido pela razão entre o desvio padrão aritmético (S) e a média aritmética (X) para essa mesma série de valores. Assim,

$$V = \frac{S}{X} \cdot 100 \quad (4.7)$$

Os parâmetros definidos até aqui tratam cada variável individualmente; para tratá-los associadamente, outros parâmetros devem ser definidos. Para relacionar pares de variáveis, ou seja, expressar matematicamente o grau de correlação existente entre dois elementos (x,y), usou-se o **coeficiente de correlação linear de Pearson (r)**, definido pela expressão:

$$r = \frac{n \cdot \sum (x \cdot y) - (\sum x) \cdot (\sum y)}{\sqrt{[n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2] \cdot [n \cdot \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (4.8)$$

Quando o coeficiente de correlação é zero as duas variáveis não são correlacionáveis, enquanto que para $r=\pm 1$ elas apresentam uma perfeita função de dependência. Os valores entre 0 e ± 1 exprimem os diferentes graus de dependência estatística. Um baixo valor de r indica que pode existir uma forte correlação não-linear, precisando-se encontrar a curva que melhor se ajusta aos dados disponíveis que pode ser uma curva exponencial, uma curva logarítmica ou uma curva potencial.

Obtido o melhor ajuste, pode-se até prever o valor de y através do valor de x , substituindo-o na equação correspondente à curva de melhor ajuste. Esta técnica de cálculo é conhecida como **análise de regressão**.

Para testar a dependência entre uma única variável dependente e diversas variáveis independentes pode-se usar o método de regressão múltipla

Neste método, cada variável é isolada e mantida constante enquanto as variáveis restantes variam sistematicamente sendo observados os seus efeitos sobre a variável dependente. A variável a ser inicialmente mantida constante é aquela que ocasiona a maior influência na variabilidade da variável dependente. Embora este método seja multivariante no sentido que mais de uma variável é medida simultaneamente em cada observação, trata-se, na realidade, de uma técnica univariante, pois o estudo é apenas em relação à variação da variável dependente y .

Quando a variável independente x corresponde ao tempo, os valores de y de numa reta ou curva de regressão, em qualquer momento, constituem uma série temporal e a reta ou curva de ajuste de y versos x é denominada de **tendência**.

O comportamento espacial de variáveis mapeáveis pode ser mostrado com os valores distribuindo-se segundo curvas de mesmo valor constituindo o mapa de isovalores.

A **análise de superfície de tendência** é um método matemático que permite separar os dados de um mapa em dois conjuntos: o primeiro de natureza regional, apresentando a

própria superfície, e o segundo que corresponde às flutuações locais que são as anomalias, apresentando os valores residuais.

Colocando em mapa os valores de uma variável y qualquer, obtida de uma curva de regressão, calcula-se a superfície que melhor se ajusta aos valores no espaço tridimensional. Esta superfície de melhor ajuste corresponde à **tendência (trend regional)**, enquanto que a partir dos **valores residuais** ($y_{\text{calculado}} - y_{\text{amostra}}$) é possível desenhar, o mais corretamente possível a depender da ordem do grau de ajustamento da curva, o **mapa residual** ou **mapa das anomalias**. O grau da superfície de tendência, varia de 1ª ordem a 8ª ordem, dependendo do número de amostras ou pontos (Tabela 4.5).

TABELA 4.5 - Relação entre a Ordem da Superfície de Tendência com o Número Mínimo de Pontos em que a tendência deve ser Analisada.

Grau da Superfície de Tendência	Número Mínimo de Pontos
1ª ordem	9
2ª ordem	18
3ª ordem	30
4ª ordem	45
5ª ordem	63
6ª ordem	75
7ª ordem	108
8ª ordem	135

Fonte: MARANHÃO (1989)

Quando o interesse é pelo melhor ajuste dos dados, procura-se a superfície de mais alto grau possível. Para a detecção de anomalias, o que interessa são os resíduos e calcula-se, então, superfícies de baixo grau com os respectivos mapas de resíduos positivos e negativos.

Usando o conceito de tendência, através de determinados interpoladores, é possível criar mapas de isovalores onde as isolinhas são traçadas, considerando que, entre dois pontos consecutivos de amostragem, dispostos sobre o mesmo perfil da malha, existe uma variação constante de valor.

O interpolador mais utilizado neste tipo de processo é o

de **krigagem** (krigeagem) que calcula valores de variáveis, espacialmente distribuídas, a partir de valores adjacentes, considerados como independentes pelo semivariograma, ou seja, é um método de estimativa por médias móveis.

O semivariograma mostra a medida de grau de dependência espacial entre as amostras, ao longo de um suporte específico, e para sua construção são usados os valores obtidos, considerando uma ergodicidade nos incrementos (LANDIM, op.cit).

A krigagem usa informações a partir do semivariograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar um ponto, ou uma área, ou um volume. Como o semivariograma é uma função da distância entre locais de amostragens, mantendo o mesmo número de amostras, os pesos serão diferentes de acordo com o seu arranjo geográfico.

Para estudar variações simultâneas de diversas propriedades, é necessário utilizar análise estatística multivariante (DAVIS, 1973) como, por exemplo, análise de agrupamento.

A análise de agrupamento é utilizada para analisar a similaridade entre amostras (indivíduos) caracterizadas por variáveis, sendo consideradas simultaneamente todas as variáveis de cada amostra definindo-se, desta forma, grupos com determinado grau de similaridade (DAVIS, op.cit.).

Uma análise de agrupamento (MÖBUS, 1987), parte de uma matriz inicialmente simétrica, constituída por coeficientes de similaridade entre itens, gerados a partir de variáveis normalizadas (padronizadas). Os grupos iniciais de semelhança, com maiores coeficientes de similaridade, são encontrados, e admitirão, novos membros, em ordem sucessiva no sentido de decréscimo de similaridade (agrupamento hierárquico), até que todas as amostras estejam corretamente correlacionadas, ou seja, corretamente agrupadas.

Uma padronização das variáveis é usada para transformar os valores em um intervalo comum, sem, contudo, alterar a relação das mesmas. Quando a medida de similaridade utilizada for o coeficiente de correlação de Pearson (r), a padronização

é desnecessária pois este já se constitui num dado padronizado.

As medidas de similaridade usualmente utilizadas são duas: o coeficiente de correlação linear do produto momento (*Pearson*), que procura detectar a similaridade existente entre as variáveis (correlação entre elas - modo **r**), indicando alta similaridade quando apresenta altos valores positivos (próximos a +1); e o coeficiente de distância, usado para verificar a similaridade entre amostras (indivíduos semelhantes - modo **q**), que indica grande similaridades, para valores pequenos (próximos a zero).

Dentre os agrupamentos hierárquicos, existem diversos critérios para se promover a união entre variáveis, dentre os quais se destacam os métodos aglomerativos e os divisivos, sendo os aglomerativos, os mais empregados (WREGW & MÖBUS, 1992). Nos métodos aglomerativos as formas de agrupamento podem ser por união simples (single linkage), por união completa (complete linkage), e por união pela média (mean linkage). O método empregado nas análises dos dados neste trabalho, foi o método por união completa.

A forma usual de representação gráfica mostrando o relacionamento entre as amostras é o dendograma (ou diagrama ramificado), o qual projeta, num espaço bidimensional, o agrupamento hierárquico, sendo possível acompanhar os sucessivos níveis de similaridade do processo, e obter o grau de similaridade e determinação do número de grupos. Um número de amostras menor que o número de variáveis (parâmetros) compromete a eficácia da análise.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, os resultados finais dos tratamentos empregados nos dados físico-químicos, são mostrados expressos em tabelas, diagramas e gráficos, e mapas e superfícies de isovalores.

Com as fichas dos 276 poços cadastrados na Planície do Recife, que tinham dados hidroquímicos, construiu-se a Tabela 5.1, em anexo, contendo a localização, os parâmetros físicos e hidráulicos e a situação atual. Foram organizados também dois pequenos bancos de dados referentes, um às companhias perfuradoras (Tabela 5.2 - em anexo) e outro aos laboratórios responsáveis pelas análises físico-químicas destes poços (Tabela 5.3 - em anexo). Os dados físicos e químicos foram organizados na Tabela 5.4 (em anexo), com 303 análises, porque alguns poços foram analisados mais de uma vez. Todo o trabalho de organização dos dados, em tabelas, foi executado com o auxílio da planilha eletrônica EXCEL, versão 7, da Microsoft Corporation.

Os dados da Tabela 5.4, foram tratados quanto à consistência, utilizando os métodos descritos no Capítulo 4, em 4.3.1 ("*Consistência dos Resultados*"). Após quatro filtragens específicas, foram excluídas 100 análises, das quais, 24 foram por erro percentual acima do limite aceitável, 18 por duplicidade parcial (iônica) e total de análises, 42 por erro superior a 30% referente às relações entre resíduo seco e condutividade elétrica, e 16 por configuração final nos limites da área em estudo. Após estas filtragens, o número de poços ficou reduzido a 187 (Figura 5.1.a) e, o número de análises físico-químicas a 203. Essas análises, feitas de 1966 a 1994, serão referenciadas como 1º grupo de amostragem.

Além das análises já existentes, coletou-se água em 91 poços (Figura 5.1.b), que foram analisadas em apenas um laboratório. A confiabilidade destas análises é comprovada pela eficácia na precisão das análises, das quais não houve nenhuma análise excluída pelas filtragens aplicadas no primeiro grupo de amostras. Essas análises, feitas em 1996, serão referenciadas como 2º grupo de amostragem.

Desses 91 poços do segundo grupo de amostragem, 11 já pertenciam ao primeiro grupo de amostras. Daí, foram acrescentados os dados gerais dos novos poços à Tabela 5.1 e os dados físico-químicos das análises à Tabela 5.4, formando assim, duas tabelas únicas para todas as amostras.

Na Tabela 5.1, está também indicado o aquífero explorado pelo poço amostrado. No primeiro grupo ou universo de amostras, dos 79 poços no Aquífero Beberibe Inferior (ABI) têm-se 86 análises, dos 24 poços no Aquífero Boa Viagem (ABV) têm-se 26 análises e dos 84 poços no Aquífero Cabo (AC) têm-se 91 análises. No segundo grupo, dos 91 poços válidos para a área em estudo, 34 pertencem ao ABI, 46 pertencem ao ABV, e 11 pertencem ao AC. Das 91 coletas deste segundo grupo, 11 foram de poços já amostrados no grupo anterior, sendo 8 no ABI, 1 no ABV e 2 no AC.

Com base nos dados da Tabela 5.4, construímos a Tabela 5.5, em anexo, que apresenta relações iônicas consideradas importantes como índices hidrogeoquímicos, comentados no Capítulo 3, em 3.3 (*"Relações Iônicas (Índices Hidrogeoquímicos)"*).

Os resultados obtidos em cada tratamento comentado no Capítulo 4, em 4.3 (*"Tratamento dos Dados"*), aplicado aos dados das tabelas 5.4 e 5.5, são discutidos a seguir.

5.1. Parâmetros Estatísticos

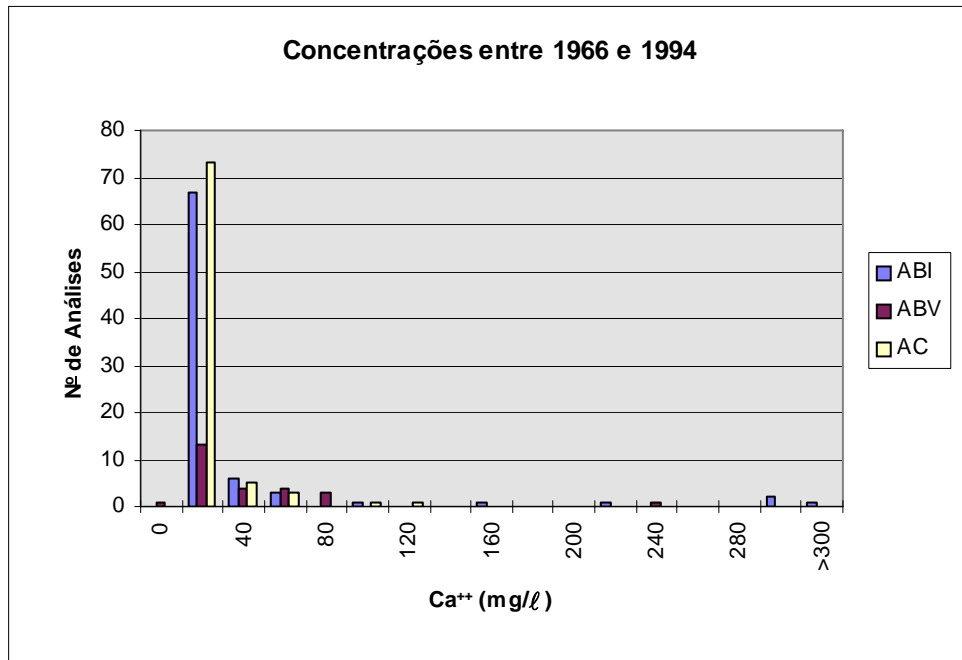
Como mencionado no Capítulo 4, em 4.3.5 ("Tratamento Estatístico"), dispõe-se de uma considerável quantidade de dados, 294 análises físico-químicas contendo, cada uma delas, 16 determinações (elementos) entre concentrações iônicas, parâmetros físicos e índices hidrogeoquímicos, dificultando, desta forma, a compreensão destes dados. Daí, resolveu-se mostrar o caráter dos valores encontrados com os elementos mais significativos como o cálcio, o sódio, o cloreto, o bicarbonato, o pH e a condutividade elétrica, construindo-se as tabelas de freqüência (Tabelas 5.6 a 5.11) juntamente com o respectivo histograma de freqüência (Figuras 5.2 a 5.7), para cada elemento supracitado e em cada grupo de amostragem.

Os intervalos de classes, foram estabelecidos empiricamente de acordo com as faixas de concentrações de cada elemento. Quanto às relações iônicas, foram construídas apenas tabelas de freqüência para cada uma (Tabelas 5.12 a 5.16), com seus intervalos de classe regidos pelo exposto no Capítulo 3, em 3.3 ("Relações Iônicas (Índices Hidrogeoquímicos)"), e pelas classificações da US.S.L. (Tabelas 5.17 e 5.18), exposto no Capítulo 4, em 4.3.4 ("Classificação das Águas").

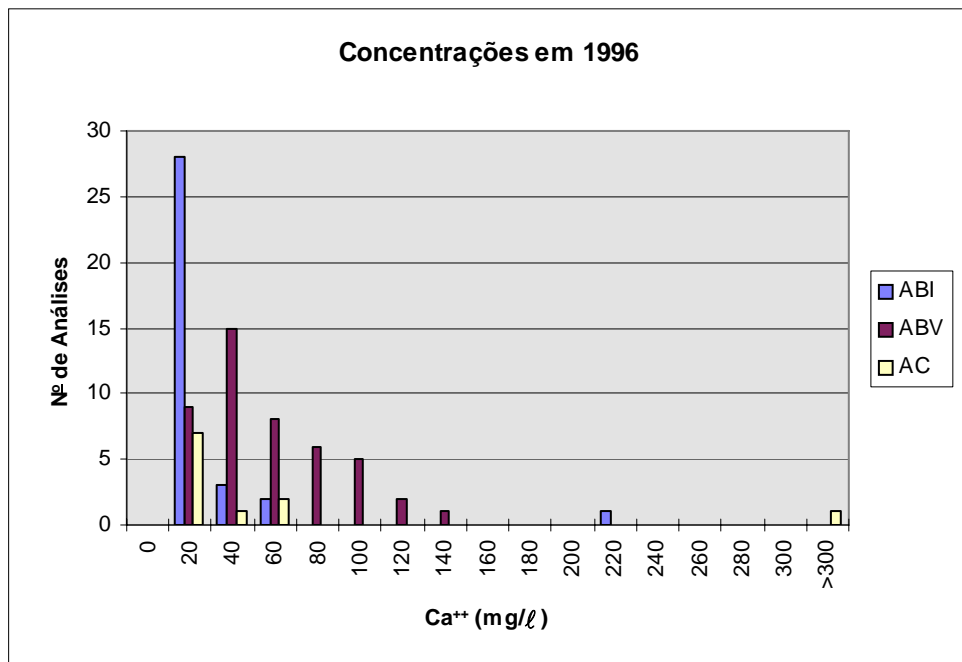
TABELA 5.6 - Tabelas de Freqüência para o Cálcio.

ABI: Aquífero Beberibe Inferior; ABV: Aquífero Boa Viagem; AC: Aquífero Cabo; obs: freqüência observada; %_{AC}: freqüência acumulada.

Intervalos de Classe	1° Grupo de Amostras						2° Grupo de Amostras					
	ABI		ABV		AC		ABI		ABV		AC	
	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}
0,00-20,00	67		14		73		28		9		7	
20,01-40,00	6		4		5		3		15		1	
40,01-60,00	3		4		3		2		8		2	
60,01-80,00	0		3		0		0		6		0	
80,01-100,00	1	94	0	96	1	99	0	97	5	93	0	91
100,01-120,00	0		0		1		0		2		0	
120,01-140,00	0		0		0		0		1		0	
140,01-160,00	1		0		0		0		0		0	
160,01-180,00	0		0		0		0		0		0	
180,01-200,00	0	95	0	96	0	100	0	97	0	100	0	91
200,01-220,00	1		0		0		1		0		0	
220,01-240,00	0		1		0		0		0		0	
240,01-260,00	0		0		0		0		0		0	
260,01-280,00	0		0		0		0		0		0	
280,01-300,00	2		0		0		0		0		0	
> 300,00	1		0		0		0		0		1	
Total	82	100	26	100	83	100	34	100	46	100	11	100



(a)



(b)

FIGURA 5.2 - Histogramas de Frequência das concentrações de cálcio. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.

TABELA 5.7 - Tabelas de Freqüência para o Sódio.

ABI: Aquífero Beberibe Inferior; ABV: Aquífero Boa Viagem; AC: Aquífero Cabo; obs: freqüência observada; %_{AC}: freqüência acumulada.

Intervalos de Classe	1° Grupo de Amostras						2° Grupo de Amostras					
	ABI		ABV		AC		ABI		ABV		AC	
	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}
0,00-20,00	27		10		3		19		7		0	
20,01-40,00	27		5		30		8		15		1	
40,01-60,00	3		2		23		2		10		4	
60,01-80,00	0		1		7		2		3		1	
80,01-100,00	0	85	2	83	2	90	1	94	3	83	2	73
100,01-120,00	3		0		2		0		1		1	
120,01-140,00	0		0		2		0		0		1	
140,01-160,00	0		2		2		1		0		0	
160,01-180,00	0		0		0		0		0		0	
180,01-200,00	0	90	0	92	0	99	0	97	2	89	0	91
200,01-220,00	0		1		0		0		2		0	
220,01-240,00	0		0		0		0		0		0	
240,01-260,00	0		0		0		0		0		0	
260,01-280,00	0		0		0		0		0		0	
280,01-300,00	0		0		0		0		0		0	
> 300,00	7		1		1		1		3		1	
Total	67	100	24	100	72	100	34	100	46	100	11	100

TABELA 5.8 - Tabelas de Freqüência para o Cloreto.

ABI: Aquífero Beberibe Inferior; ABV: Aquífero Boa Viagem; AC: Aquífero Cabo; obs: freqüência observada; %_{AC}: freqüência acumulada.

Intervalos de Classe	1° Grupo de Amostras						2° Grupo de Amostras					
	ABI		ABV		AC		ABI		ABV		AC	
	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}
0,00-50,00	62		14		65		25		15		1	
50,01-100,00	5		8		7		4		17		7	
100,01-150,00	6		0		6		3		5		1	
150,01-200,00	2		2		1		1		2		0	
200,01-250,00	1	88	0	92	0	87	0	97	1	87	0	82
250,01-300,00	1		0		1		0		2		1	
300,01-350,00	0		0		1		0		1		0	
350,01-400,00	0		0		1		0		0		0	
400,01-450,00	0		0		2		0		0		0	
450,01-500,00	0		0		0		0		0		0	
500,01-550,00	1		0		1		0		0		0	
550,01-600,00	0		0		0		0		0		0	
600,01-650,00	1		0		0		0		0		0	
650,01-700,00	0		0		1		0		0		0	
700,01-750,00	0		0		0		0		0		0	
750,01-800,00	1		0		1		0		0		0	
800,01-850,00	0		0		1		0		0		0	
850,01-900,00	0		0		0		0		0		0	
900,01-950,00	0		0		0		0		0		0	
950,01-1000,00	0	93	0	92	2	99	0	97	0	93	0	91
1000,01-2000,0	2		2		1		1		2		0	
2000,01-3000,0	2		0		0		0		1		0	
> 3000,00	2		0		0		0		0		1	
Total	86	100	26	100	91	100	34	100	46	100	11	100

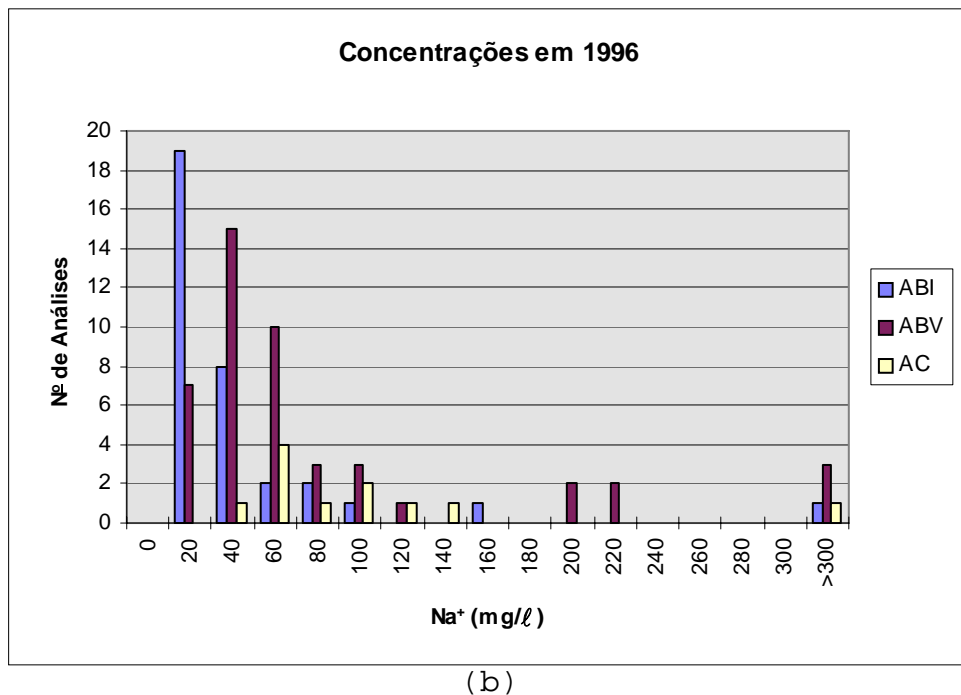
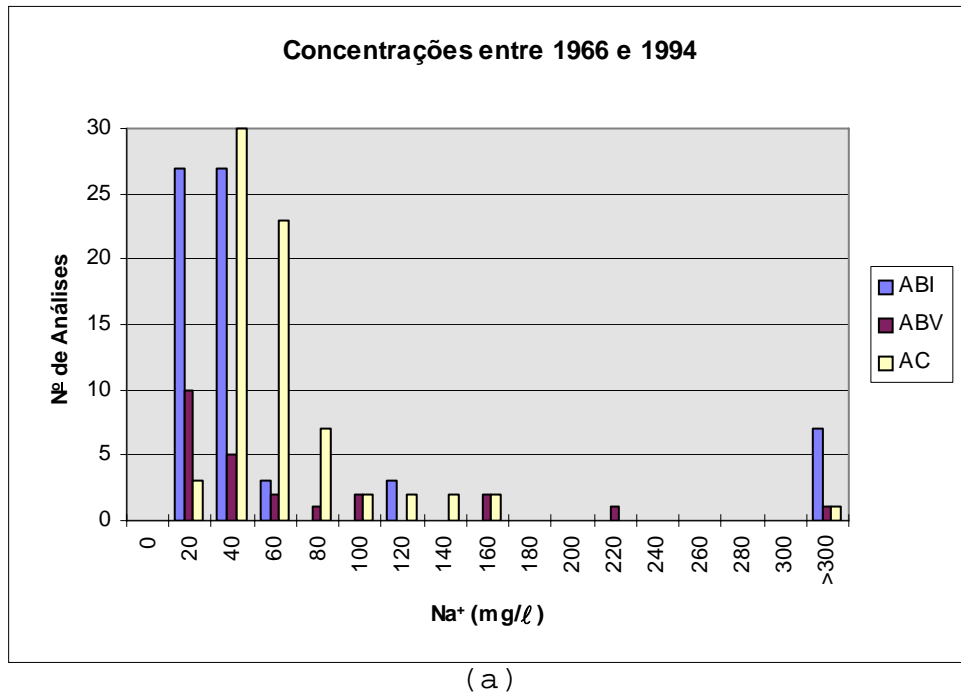


FIGURA 5.3 - Histogramas de Frequência das concentrações de sódio. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.

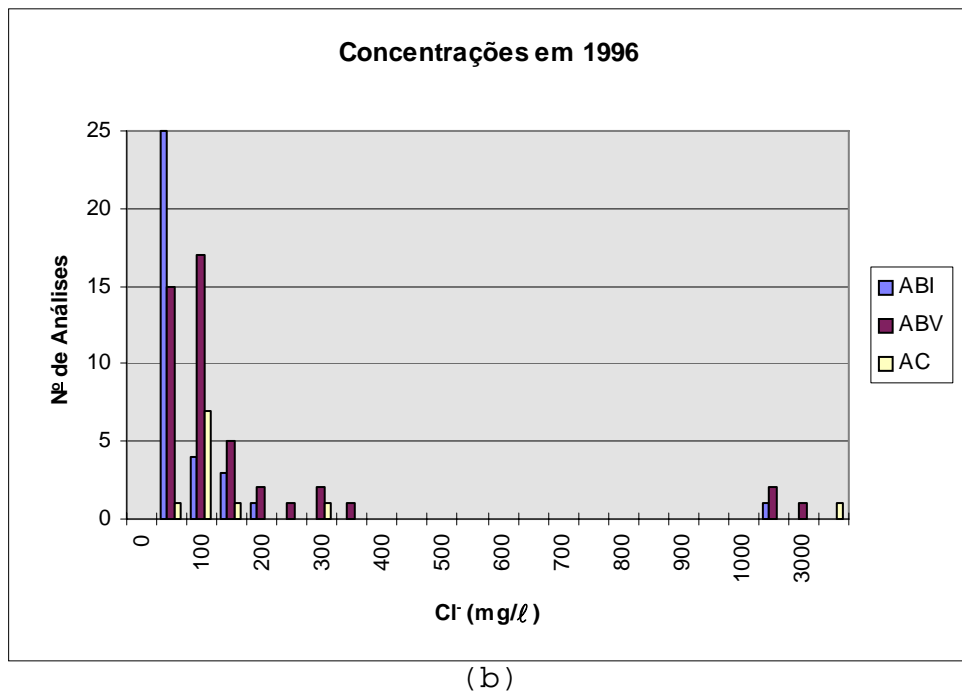
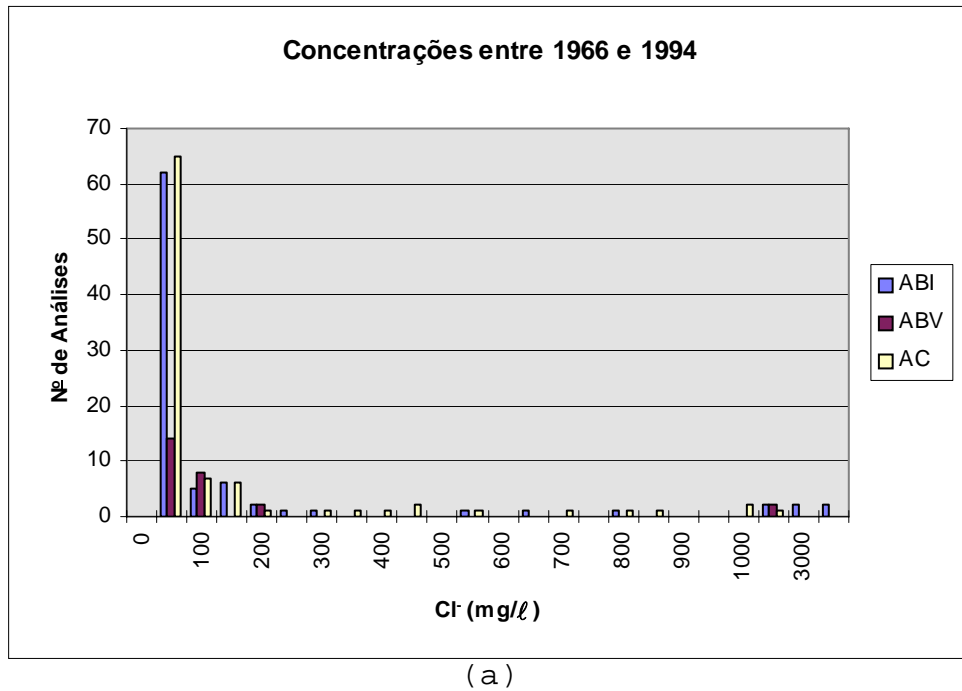


FIGURA 5.4 - Histogramas de Frequência das concentrações de cloreto. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.

TABELA 5.9 - Tabelas de Freqüência para o Bicarbonato.

ABI: Aqüífero Beberibe Inferior; ABV: Aqüífero Boa Viagem; AC: Aqüífero Cabo; obs: freqüência observada; %_{AC}: freqüência acumulada.

Intervalos de Classe	1° Grupo de Amostras						2° Grupo de Amostras					
	ABI		ABV		AC		ABI		ABV		AC	
	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}
0,00-50,00	40		7		6		19		6		4	
50,01-100,00	35		5		44		12		9		2	
100,01-150,00	5		4		21		0		9		2	
150,01-200,00	0		1		8		2		8		1	
200,01-250,00	0		0		4		0		4		1	
250,01-300,00	2		1		2		0		6		0	
300,01-350,00	0		3		2		0		1		1	
350,01-400,00	1	100	1	85	0	99	1	100	1	96	0	100
400,01-450,00	0		0		0		0		0		0	
450,01-500,00	0	100	1	88	0	99	0	100	1	98	0	100
500,01-550,00	0		0		1		0		0		0	
550,01-600,00	0		0		0		0		0		0	
600,01-650,00	0		0		0		0		1		0	
650,01-700,00	0		2		0		0		0		0	
700,01-750,00	0		0		0		0		0		0	
750,01-800,00	0		0		0		0		0		0	
800,01-850,00	0		0		0		0		0		0	
850,01-900,00	0		0		0		0		0		0	
900,01-950,00	0		0		0		0		0		0	
950,01-1000,00	0		0		0		0		0		0	
1000,01-2000,0	0		1		0		0		0		0	
2000,01-3000,0	0		0		0		0		0		0	
> 3000,00	0		0		0		0		0		0	
Total	83	100	26	100	88	100	34	100	46	100	11	100

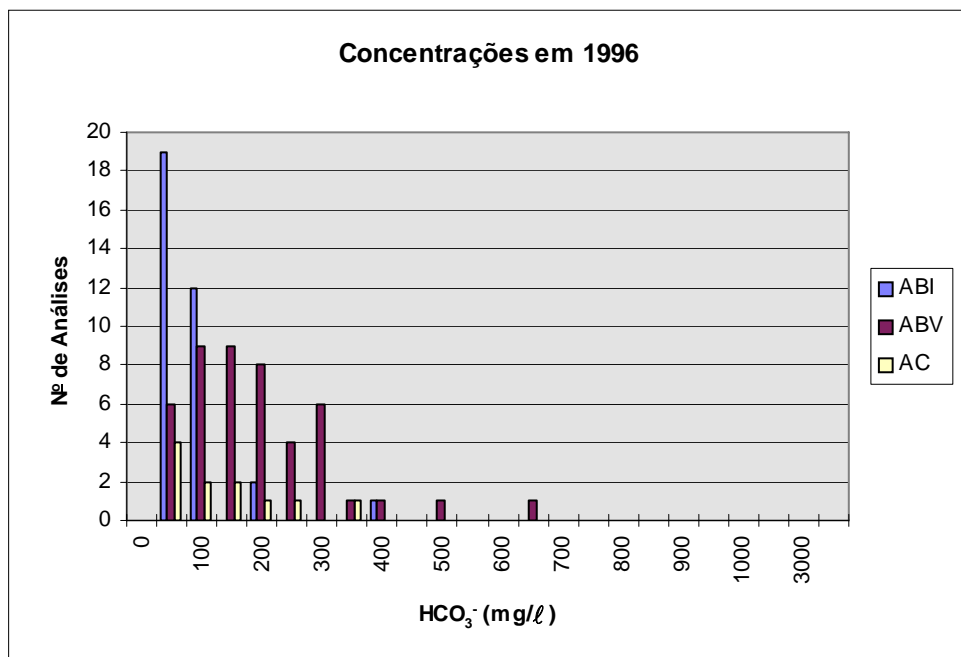
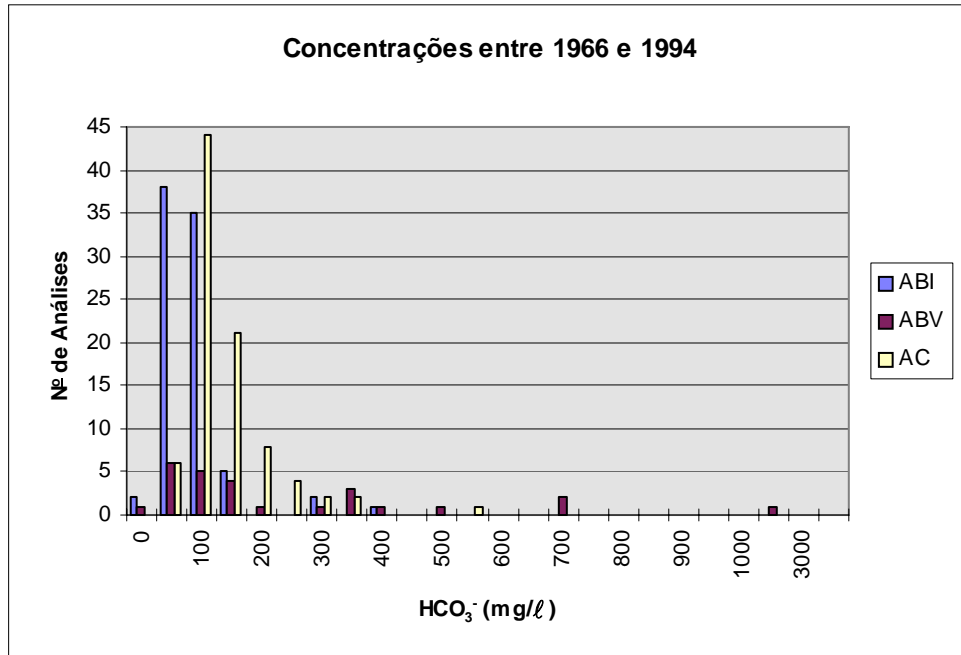


FIGURA 5.5 - Histogramas de Frequência das concentrações de bicarbonato. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.

TABELA 5.10 - Tabelas de Freqüência para o Condutividade Elétrica.

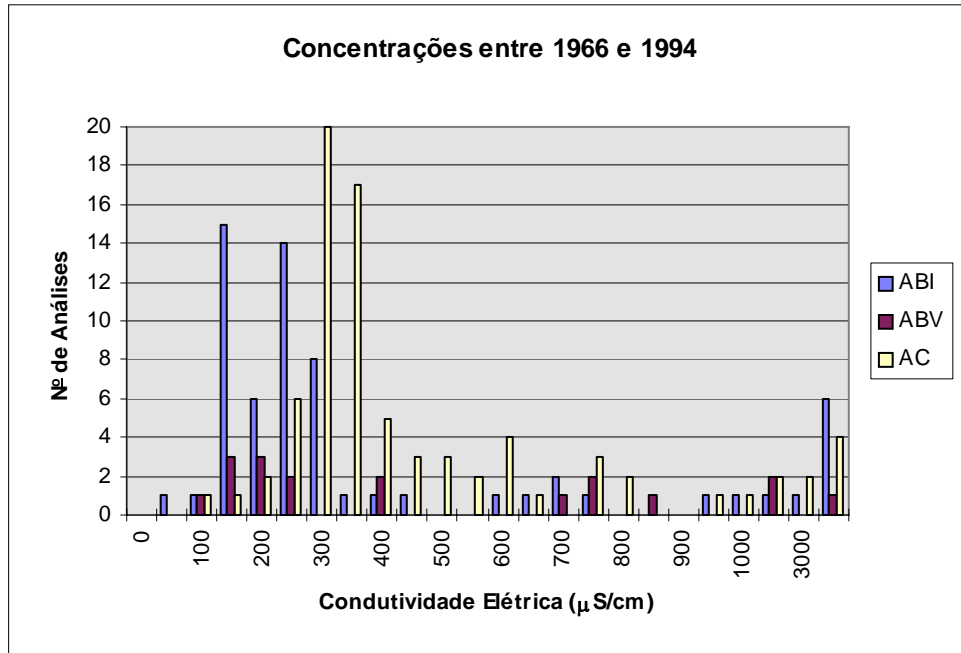
ABI: Aquífero Beberibe Inferior; ABV: Aquífero Boa Viagem; AC: Aquífero Cabo; obs: freqüência observada; %_{AC}: freqüência acumulada.

Intervalos de Classe	1° Grupo de Amostras						2° Grupo de Amostras					
	ABI		ABV		AC		ABI		ABV		AC	
	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}
0,00-50,00	1		0		0		0		0		0	
50,01-100,00	1		1		1		1		0		0	
100,01-150,00	15		3		1		8		2		0	
150,01-200,00	6		3		2		7		2		0	
200,01-250,00	14		2		6		6		2		0	
250,01-300,00	8		0		20		3		1		0	
300,01-350,00	1		0		17		0		1		0	
350,01-400,00	1		2		5		0		4		2	
400,01-450,00	1		0		3		1		1		2	
450,01-500,00	0	76	0	61	3	73	1	79	7	43	1	45
500,01-550,00	0		0		2		2		1		1	
550,01-600,00	1		0		4		0		0		0	
600,01-650,00	1		0		1		0		3		0	
650,01-700,00	2		1		0		0		0		1	
700,01-750,00	1		2		3		2		0		2	
750,01-800,00	0		0		2		1		6		0	
800,01-850,00	0		1		0		1		2		0	
850,01-900,00	0		0		0		0		1		0	
900,01-950,00	1		0		1		0		3		0	
950,01-1000,00	1		0		1		0		1		0	
1000,01-2000,0	1		2		2		1		6		1	
2000,01-3000,0	1		0		2		0		0		0	
> 3000,00	6		1		4		0		3		1	
Total	63	100	18	100	80	100	34	100	46	100	11	100

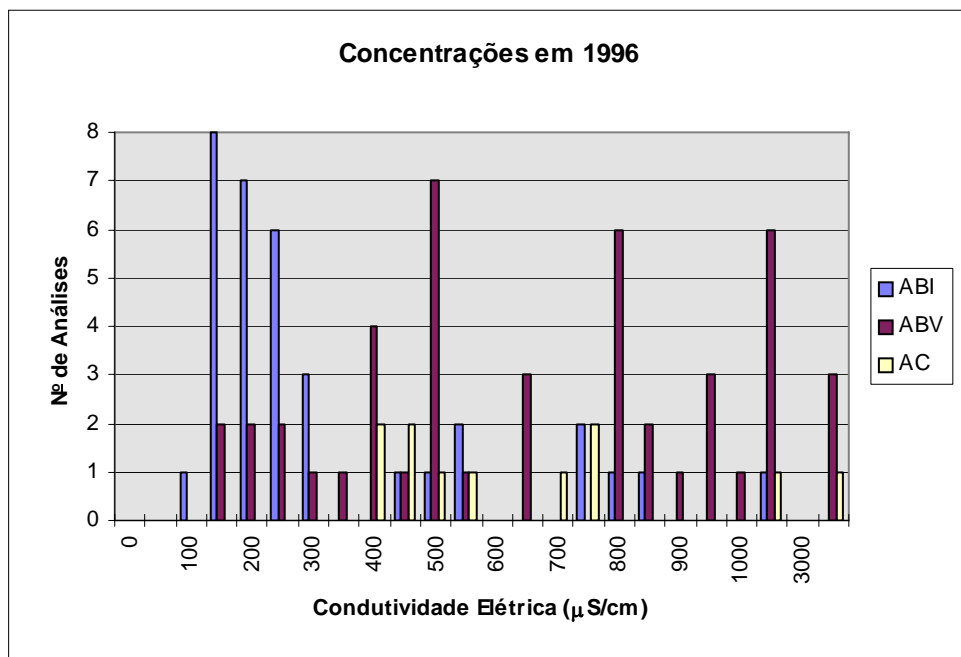
TABELA 5.11 - Tabelas de Freqüência para o pH.

ABI: Aquífero Beberibe Inferior; ABV: Aquífero Boa Viagem; AC: Aquífero Cabo; obs: freqüência observada; %_{AC}: freqüência acumulada.

Intervalos de Classe	1° Grupo de Amostras						2° Grupo de Amostras					
	ABI		ABV		AC		ABI		ABV		AC	
	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}	obs	% _{AC}
4,6-5,0	1		0		0		0		0		0	
5,1-5,5	4		0		2		0		0		1	
5,6-6,0	12	20	1	4	9	12	3	9	2	4	0	9
6,1-6,5	20		6		14		14		6		1	
6,6-7,0	23		2		28		9		2		3	
7,1-7,5	16		9		26		5		10		2	
7,6-8,0	4	76	5	84	6	85	1	85	8	57	1	64
8,1-8,5	2		2		3		1		18		3	
8,6-9,0	1	4	1	12	0	3	1	6	0	39	0	27
Total	83	100	26	100	88	100	34	100	46	100	11	100

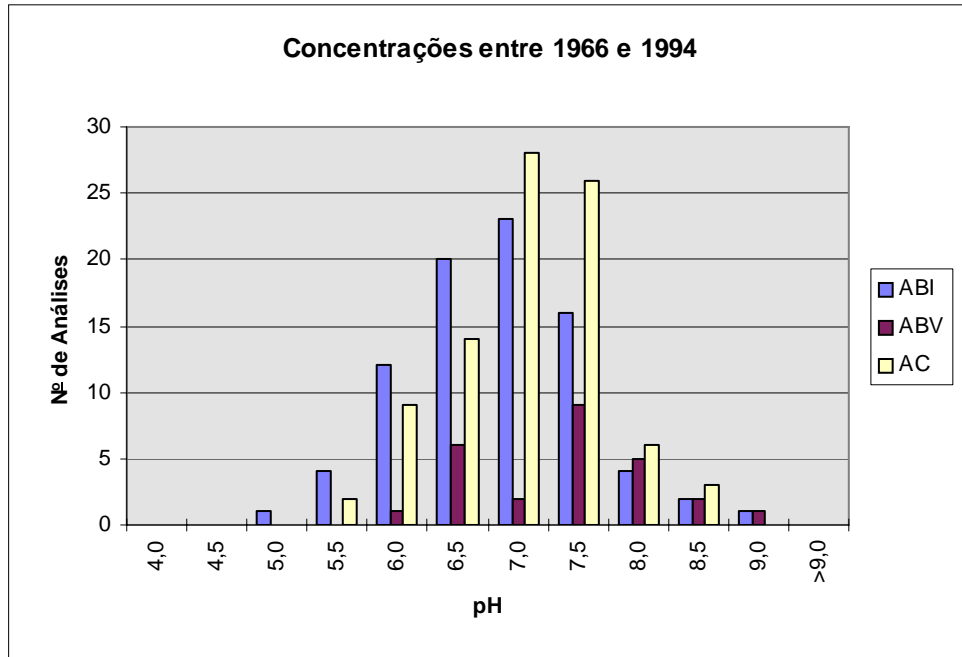


(a)

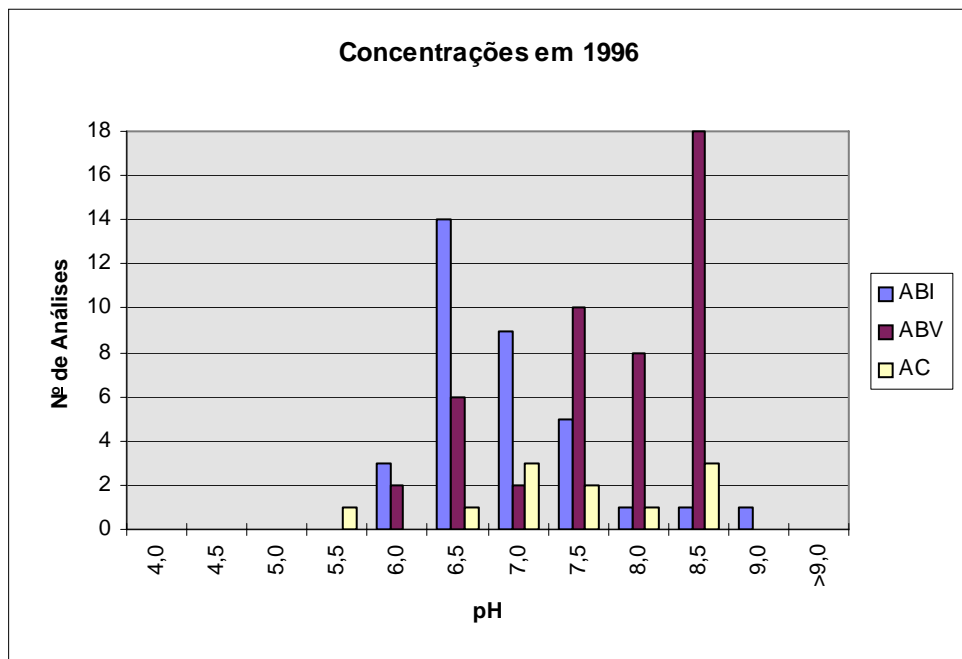


(b)

FIGURA 5.6 - Histogramas de Frequência das concentrações de condutividade elétrica. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.



(a)



(b)

FIGURA 5.7 - Histogramas de Frequência das concentrações de pH. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.

Observa-se, pelos histogramas das figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5, que as curvas de frequência ou curvas de distribuição para o cálcio, o sódio, o cloreto e o bicarbonato, em todos os aquíferos, nas duas épocas de amostragens, tem um comportamento assimétrico resultando numa curva log-normal. Pelos histogramas da Figura 5.6, a condutividade elétrica, tem um comportamento diferente resultando numa curva multimodal. Pelos histogramas da Figura 5.7, observa-se, na amostragem do 1º grupo, que as curvas dos aquíferos tem um comportamento simétrico, resultando em curvas normais, ou gaussianas, enquanto que, na amostragem do 2º grupo, os comportamentos das curvas dos aquíferos mudam muito, resultando em curvas multimodais.

A importância deste tipo de interpretação, se dá ao fato de poder-se avaliar graficamente o caráter dos valores encontrados, definindo os parâmetros estatísticos para cada tipo de distribuição, e ainda observar valores muito extremos, no caso de uma distribuição log-normal, que poderão representar anomalias dentro do grupo analisado.

TABELA 5.12 - Tabela de Frequência para a Relação Iônica rMg/rCa.

<i>Intervalos de Classe</i>	<i>ABI</i>		<i>ABV</i>		<i>AC</i>	
	1ºG	2ºG	1ºG	2ºG	1ºG	2ºG
< 0,3	1	3	1	2	1	1
0,3 - 1,5	27	18	11	29	36	7
1,5 - 4,0	51	13	12	15	44	3
4,0 - 6,0	3	0	1	0	2	1

TABELA 5.13 - Tabela de Frequência para a Relação Iônica rK/rNa.

<i>Intervalos de Classe</i>	<i>ABI</i>		<i>ABV</i>		<i>AC</i>	
	1ºG	2ºG	1ºG	2ºG	1ºG	2ºG
< 0,02	3	0	4	0	10	0
0,02 - 0,025	2	0	2	0	11	0
0,025 - 1	62	34	18	46	51	11

TABELA 5.14 - Tabela de Freqüência para a Relação Iônica $rCl/rHCO_3$.

Intervalos de Classe	ABI		ABV		AC	
	1ºG	2ºG	1ºG	2ºG	1ºG	2ºG
até 5,0	65	28	23	38	76	7
5,0 - 20,0	9	4	2	7	7	2
20,0 - 50,0	4	2	0	1	5	1
> 150	3	0	0	0	0	1

TABELA 5.15 - Tabela de Freqüência para a Relação Iônica *ITB*.

Intervalos de Classe	ABI		ABV		AC	
	1ºG	2ºG	1ºG	2ºG	1ºG	2ºG
-1,5 a -1,0	30	15	13	6	62	3
-1,0 a -0,5	17	11	6	23	5	3
-0,5 a 0,0	18	6	5	15	4	4
0,0 a 0,5	2	2	0	2	1	1
0,5 - 1,0	19	0	2	0	19	0
1,0 - 1,5	0	0	0	0	0	0

TABELA 5.16 - Tabela de Freqüência para a Relação Iônica *SAR*.

Intervalos de Classe	ABI		ABV		AC	
	1ºG	2ºG	1ºG	2ºG	1ºG	2ºG
0-2	39	29	14	31	19	2
2-4	18	3	5	7	34	5
4-6	3	1	3	3	17	2
6-8	1	0	0	2	6	0
8-10	2	1	0	0	4	1
10-12	1	0	0	0	1	0
12-14	0	0	0	2	1	0
14-16	1	0	0	1	0	0
16-18	1	0	0	0	0	0
18-20	0	0	1	0	1	0
20-22	0	0	0	0	0	0
22-24	0	0	0	0	0	0
24-26	1	0	0	0	0	1

TABELA 5.17- Tabela de Freqüência para as classificações da água quanto à irrigação, segundo a classificação do U.S.Dept.Agriculture

CLASSIFICAÇÃO	ABI		ABV		AC		TOTAL GERAL
	1º Grupo	2º Grupo	1º Grupo	2º Grupo	1º Grupo	2º Grupo	
C0-S1	2	1	1	--	1	--	5
C1-S1	32	21	8	6	7	--	74
C2-S1	12	9	5	18	52	8	104
C3-S1	1	2	3	17	1	1	25
C4-S1	--	--	--	--	--	--	--
C5-S1	1	--	--	--	--	--	1
C0-S2	--	--	--	--	--	--	--
C1-S2	--	--	--	--	--	--	--
C2-S2	--	--	--	--	3	1	4
C3-S2	1	1	--	2	1	--	5
C4-S2	--	--	--	--	--	--	--
C5-S2	--	--	--	--	--	--	--
C0-S3	--	--	--	--	--	--	--
C1-S3	--	--	--	--	--	--	--
C2-S3	--	--	--	--	1	--	1
C3-S3	--	--	--	--	--	--	--
C4-S3	2	--	--	--	--	--	2
C5-S3	--	--	--	--	--	--	--
C0-S4	--	--	--	--	--	--	--
C1-S4	--	--	--	--	--	--	--
C2-S4	--	--	--	--	--	--	--
C3-S4	--	--	--	--	--	--	--
C4-S4	--	--	--	1	1	--	2
C5-S4	2	--	--	2	--	1	5
TOTAL	53	34	17	46	67	11	228

TABELA 5.18 - Tabela de Freqüência para as classes de SAR e de condutividade elétrica, segundo a classificação do U.S.Dept.Agriculture

CLASSES	ABI		ABV		AC		TOTAL GERAL
	1º Grupo	2º Grupo	1º Grupo	2º Grupo	1º Grupo	2º Grupo	
C0	2	1	1		1		5
C1	32	21	8	6	7		74
C2	12	9	5	18	56	9	109
C3	2	3	3	19	2	1	30
C4	2			1	1		4
C5	3			2		1	6
S1	48	33	17	41	61	9	209
S2	1	1		2	4	1	9
S3	2				1		3
S4	2			3	1	1	7

Os valores das razões iônicas, bem como para classificação da água para irrigação, expostos nas tabelas de frequência 5.12 a 5.18, são discutidos em 5.5 ("*Gráficos Circulares e de Barras*"), usando gráficos circulares que representam os dados de uma forma mais clara.

As concentrações dos íons maiores, pH, condutividade elétrica e resíduo seco, correspondente aos poços nos respectivos aquíferos em cada grupo, foram tratadas estatisticamente, eliminando-se os valores extremos mostrados nos histogramas anteriores por pertencerem a outro universo de valores, e foram tabulados para uma visualização mais direta dos parâmetros estatísticos analisados, que foram: média aritmética, desvio padrão aritmético, coeficiente de variação, valor mínimo, valor máximo e n^o de amostras. As relações iônicas também tiveram o mesmo tratamento estatístico, porém sem que fossem eliminados os valores extremos, pois os mesmos serão importantes para interpretações feitas mais adiante.

A Tabela 5.19, agrupa os valores dos parâmetros estatísticos analisados, para 1^o e 2^o grupos de amostragem, de cada elemento, correspondentes aos aquíferos Beberibe Inferior (ABI), Boa Viagem (ABV), e Cabo (AC), e a Tabela 5.20, mostra os valores de cada relação iônica, para os respectivos grupos e aquíferos.

Pela Tabela 5.19, observa-se comparando as amostragens de 1966 a 1994 para 1996 que, no ABI, os valores médios de todos os elementos analisados permaneceram praticamente os mesmos, tendo diminuído um pouco o magnésio, o cloreto, o nitrato e o resíduo seco, e aumentado um pouco o cálcio, o sódio, o potássio, o sulfato, o bicarbonato, o pH, e a condutividade elétrica. Observa-se que, os valores máximos de concentração diminuíram em quase todos os elementos, exceto no sódio e no bicarbonato, diminuindo também o desvio padrão aritmético e o coeficiente de variação dos mesmos, aumentando no caso do sódio e do bicarbonato. Para o pH, a condutividade elétrica e o resíduo seco, estes parâmetros foram muito alternados, não havendo nenhuma ligação direta entre tais parâmetros.

No ABV, observa-se que, de 1966 a 1994 para 1996, os valores médios permaneceram próximos de uma amostragem para a outra, tendo pequeno aumento de todos os elementos, exceto de sódio que apresentou uma pequena diminuição. Esta variação é também observada, no caso dos elementos maiores, com os respectivos valores máximos, diferenciando-se no caso, pH, condutividade elétrica e resíduo seco, que tiveram suas médias aumentadas enquanto seus valores máximos diminuía. No geral, o desvio padrão aritmético aumentou em quase todos os elementos, exceto o do sódio, o do bicarbonato, o da condutividade elétrica e o do resíduo seco, e, o coeficiente de variação diminuiu, exceto o do cloreto.

No AC, de 1966 a 1994 para 1996, os valores médios pouco aumentaram em todos os elementos analisados, ao contrário dos seus respectivos valores máximos que diminuía em quase todos os elementos, exceto o do sulfato e o da condutividade elétrica, porém, pode-se dizer que, os parâmetros citados dos elementos analisados, permaneceram na faixa de valores. O desvio padrão aritmético, aumentou em quase todos os elementos, exceto o do magnésio e o do potássio. O coeficiente de variação, ao contrário do desvio padrão, diminuiu em quase todos os elementos, exceto o do bicarbonato e o do pH.

No geral, os valores médios de todos os elementos analisados aumentaram, de 1966 a 1994 para 1996, em todos os aquíferos, exceto o do magnésio, o do cloreto e o do resíduo seco no Aquífero Beberibe Inferior. Com relação ao desvio padrão e ao coeficiente de variação, pode-se observar que, no geral, quando o desvio padrão aumenta, diminui o coeficiente de variação de quase todos os elementos observados nos aquíferos Boa Viagem e Cabo, enquanto que, no Aquífero Beberibe Inferior, a relação era direta, ou seja, quando o desvio padrão aumenta, aumenta o coeficiente de variação, correspondente a maioria dos elementos. Os valores máximos dos elementos, no geral, diminuía nos aquíferos Beberibe Inferior e Cabo, e aumentaram no Aquífero Boa Viagem.

Pela Tabela 5.20, observa-se que as relações iônicas, no

geral, tiveram desvios padrão aceitáveis para os grupos amostrados, exceto na relação entre o cloreto e o bicarbonato nos grupos dos três aquíferos, onde tiveram um desvio padrão e um coeficiente de variação superiores às suas médias e às outras relações iônicas, devido, provavelmente, à mistura com águas salinas, elevando-se desta forma, os valores máximos nos respectivos aquíferos. Os valores excepcionalmente altos observados na relação rMg/rCa , no 1º grupo nos três aquíferos e no 2º grupo no Aquífero Cabo, também podem ser devidos à mistura com águas salinas, devendo, contudo, serem observadas as condutividades elétricas respectivas nestes poços para um diagnóstico mais representativo.

Usou-se correlações múltiplas entre 8 dos 11 elementos físico-químicos analisados para construir matrizes com os valores dos coeficientes de correlação do momento do produto Pearson, r , que refletem a extensão de uma relação linear entre dois conjuntos de dados. O número de elementos foi reduzido pois, correlações com "dados fechados", como é o caso de análises químicas, não tem muito significado a não ser que se diminua o número de elementos a correlacionar (BUTLER, 1974). Por isso, foram correlacionados apenas os seguintes elementos: cálcio, magnésio, sódio, potássio, cloreto, sulfato, bicarbonato e condutividade elétrica.

As tabelas 5.21 e 5.22, mostram as matrizes de coeficientes obtidos para o 1º grupo e o 2º grupo de amostras, respectivamente, do Aquífero Beberibe Inferior.

Observa-se que, em ambos os grupos, o bicarbonato não apresenta correlações com os outros elementos, além do potássio que apresentou apenas no 1º grupo. Sendo, no 1º grupo, a classificação mais marcante, o cloreto de sódio, com uma correlação entre seus íons de 99,9%, enquanto que, no 2º grupo, passa a ser o cloreto de magnésio, com uma correlação entre seus íons de 99,2%.

No 1º grupo (Tabela 5.21), observa-se ainda que, o cálcio, o magnésio e o sódio, estão bem correlacionados com o cloreto, o sulfato e a condutividade elétrica, apresentando,

entre eles, altas correlações acima de 87% ($\text{Ca} \times \text{SO}_4$) até 99,9% ($\text{Na} \times \text{Cl}$), e, no geral, as correlações são superiores a 90%.

TABELA 5.21 - Matriz de coeficientes de correlação do momento do produto Pearson, r , para o Aquífero Beberibe Inferior, no 1º grupo de amostras, entre 1966 a 1994.

	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^-	HCO_3^-	C.E.
Ca^{++}	1							
Mg^{++}	0,872	1						
Na^+	0,979	0,926	1					
K^+	0,321	0,711	0,476	1				
Cl^-	0,971	0,939	0,999	0,497	1			
SO_4^-	0,870	0,933	0,967	0,641	0,952	1		
HCO_3^-	0,303	0,357	0,410	0,515	0,380	0,368	1	
C.E.	0,952	0,910	0,972	0,405	0,970	0,915	0,291	1

TABELA 5.22 - Matriz de coeficientes de correlação do momento do produto Pearson, r , para o Aquífero Beberibe Inferior, no 2º grupo de amostras, de 1996.

	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^-	HCO_3^-	C.E.
Ca^{++}	1							
Mg^{++}	0,967	1						
Na^+	0,922	0,930	1					
K^+	0,858	0,886	0,900	1				
Cl^-	0,976	0,992	0,937	0,893	1			
SO_4^-	0,933	0,912	0,938	0,808	0,920	1		
HCO_3^-	0,114	0,105	0,399	0,273	0,077	0,225	1	
C.E.	0,834	0,811	0,909	0,870	0,807	0,840	0,523	1

No 2º grupo (Tabela 5.22), além dos mesmos elementos do 1º grupo, o potássio passa a ter correlações com o cloreto, o sulfato e a condutividade elétrica. Observa-se ainda que as correlações da CE com os outros elementos baixaram, com um máximo de correlação de 91% ($\text{Na} \times \text{CE}$), e, no geral, as correlações são superiores a 90%.

As tabelas 5.23 e 5.24 mostram as matrizes de coeficientes obtidos para o 1º grupo e o 2º grupo de amostras, respectivamente, do Aquífero Boa Viagem.

Observa-se que, em ambos os grupos, o sulfato não

apresenta correlação com os outros elementos, e o bicarbonato somente com o cálcio no 2º grupo. Em ambos os grupos a classificação mais marcante é a do cloreto de sódio, com 99,2% no 1º grupo e 98,8% no 2º grupo, apesar de, no 2º grupo, a maior correlação ser entre o cloreto e a condutividade elétrica.

TABELA 5.23 - Matriz de coeficientes de correlação do momento do produto Pearson, r , para o Aquífero Boa Viagem, no 1º grupo de amostras, entre 1966 a 1994.

	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	C.E.
Ca ⁺⁺	1							
Mg ⁺⁺	0,789	1						
Na ⁺	0,582	0,976	1					
K ⁺	0,605	0,958	0,984	1				
Cl ⁻	0,820	0,949	0,992	0,980	1			
SO ₄ ⁼	-0,044	-0,127	-0,143	-0,131	-0,201	1		
HCO ₃ ⁻	0,479	0,855	0,945	0,948	0,672	-0,113	1	
C.E.	0,979	0,987	0,958	0,624	0,983	-0,151	0,603	1

TABELA 5.24 - Matriz de coeficientes de correlação do momento do produto Pearson, r , para o Aquífero Boa Viagem, no 2º grupo de amostras, de 1996.

	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	C.E.
Ca ⁺⁺	1							
Mg ⁺⁺	0,617	1						
Na ⁺	0,597	0,822	1					
K ⁺	0,628	0,786	0,981	1				
Cl ⁻	0,606	0,850	0,988	0,961	1			
SO ₄ ⁼	0,493	0,545	0,566	0,611	0,542	1		
HCO ₃ ⁻	0,619	0,392	0,260	0,290	0,187	0,166	1	
C.E.	0,677	0,879	0,985	0,962	0,993	0,567	0,285	1

No 1º grupo (Tabela 5.23), observa-se ainda que, o cálcio, o magnésio, o sódio e o potássio se correlacionam com o cloreto e a condutividade elétrica, apresentando boas correlações acima de 82% (Ca \times Cl) até 99,2% (Na \times Cl), e, no geral, as correlações são superiores a 95%, com as mais baixas correlações referentes ao cálcio.

No 2º grupo (Tabela 5.24), destaca-se, principalmente, o

bicarbonato com correlações somente com o cálcio ($\text{Ca} \times \text{HCO}_3$, com 62%), seguido pelo sulfato por ter baixas correlações com os outros elementos. As correlações são acima de 60% ($\text{Ca} \times \text{Cl}$) chegando a 99% ($\text{Cl} \times \text{CE}$), sendo, assim como no 1º grupo, as correlações mais baixas referentes ao cálcio, e, no geral, as correlações são na faixa de 90%.

As tabelas 5.25 e 5.26 mostram as matrizes de coeficientes obtidos para o 1º grupo e o 2º grupo de amostras do Aquífero Cabo.

TABELA 5.25 - Matriz de coeficientes de correlação do momento do produto Pearson, r , para o Aquífero Cabo, no 1º grupo de amostras, entre 1966 a 1994.

	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^-	HCO_3^-	C.E.
Ca^{++}	1							
Mg^{++}	0,905	1						
Na^+	0,819	0,910	1					
K^+	0,384	0,298	0,287	1				
Cl^-	0,892	0,948	0,950	0,420	1			
SO_4^-	0,604	0,760	0,934	0,189	0,613	1		
HCO_3^-	0,152	0,054	0,215	-0,018	0,140	-0,061	1	
C.E.	0,896	0,867	0,980	0,411	0,953	0,578	0,348	1

TABELA 5.26 - Matriz de coeficientes de correlação do momento do produto Pearson, r , para o Aquífero Cabo, no 2º grupo de amostras, de 1996.

	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^-	HCO_3^-	C.E.
Ca^{++}	1							
Mg^{++}	0,939	1						
Na^+	0,997	0,917	1					
K^+	0,999	0,924	0,999	1				
Cl^-	0,999	0,927	0,999	1,000	1			
SO_4^-	0,994	0,932	0,990	0,990	0,990	1		
HCO_3^-	-0,296	-0,339	-0,264	-0,297	-0,303	-0,250	1	
C.E.	0,999	0,927	1,000	1,000	1,000	0,992	-0,283	1

Observa-se que, em ambos os grupos, o bicarbonato, não se correlaciona com os outros elementos, nem o potássio no 1º grupo. Sendo, no 1º grupo, a classificação mais marcante, o cloreto de sódio, com uma correlação entre seus íons de 95%,

enquanto que, no 2º grupo, passa a ser o cloreto de potássio, com uma correlação entre seus íons de 100% apesar de, no 1º grupo, a maior correlação ser entre o sódio e a condutividade elétrica (98%).

No 1º grupo (Tabela 5.25), observa-se ainda que, o cálcio, o magnésio e o sódio se correlacionam com o cloreto e a condutividade elétrica, apresentando altas correlações acima de 76% ($Mg \times SO_4$) até 98% ($Na \times CE$), além do sulfato que possui médias correlações entre os elementos supracitados com o mínimo de 58% ($SO_4 \times CE$) e máximo de 93% ($Na \times SO_4$), e, no geral, as correlações são superiores a 90%.

No 2º grupo (Tabela 5.26), além dos mesmos elementos do 1º grupo, o potássio passa a ter altas correlações com o cloreto, sulfato e condutividade elétrica. Esta matriz é a que apresentou as melhores correlações entre as amostras, com média de 99% de correlação, principalmente em relação ao sódio, chegando a ser de 100% em diversas correlações como $Na \times CE$, $K \times Cl$, $K \times CE$ e $Cl \times CE$, e com um valor mínimo de correlação de 92% ($Na \times Mg$).

5.2. Histogramas

Os histogramas de frequência das Figuras 5.2 a 5.7, resultantes das respectivas tabelas de frequência (Tabelas 5.6 a 5.11), expostos em 5.1 ("*Parâmetros Estatísticos*"), apresentam as concentrações de cálcio, sódio, cloreto, bicarbonato, condutividade elétrica e pH, nas águas subterrâneas nos três aquíferos da Planície do Recife. Considerando os limites de potabilidade estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS) que são, respectivamente de 200mg/L, 200mg/L, 250mg/L, 500mg/L, 500mS/cm e 6 a 8, e observando estes histogramas, com suas respectivas tabelas, para cada íon, obtém-se as informações complementares expostas a seguir.

↳ Cálcio e Sódio

Observa-se, pelos histogramas da Figura 5.2 e 5.3, e pelas tabelas 5.6 e 5.7, que, na primeira amostragem, ou seja, de 1966 a 1994, nos aquíferos Cabo, Boa Viagem e Beberibe Inferior, o total de valores abaixo de 100mg/L é de 99, 96 e 94% respectivamente para o cálcio e 90, 83 e 85% respectivamente para o sódio. Na segunda coleta, estes valores foram 91, 93 e 97% para o cálcio e 73, 83 e 94% para o sódio.

Para os limites de potabilidade de 200mg/L, estes percentuais de enquadramento aumentam, sendo de 100, 96 e 95% para o cálcio e de 99, 92 e 90% para o sódio, no primeiro grupo de amostras, ou seja, de 1966 a 1994, respectivamente aos aquíferos supracitados, e de 91, 100 e 97% para o cálcio e de 91, 89 e 97% para o sódio, no segundo grupo de amostras, em 1996.

Observa-se ainda que, comparando as amostragens entre 1966 a 1994 com as de 1996, o cálcio aumentou o percentual de água potável nos aquíferos Beberibe Inferior e Boa Viagem e diminuiu no Aquífero Cabo, enquanto que, para o sódio, aumentou no Aquífero Beberibe Inferior e diminuiu nos aquíferos Boa Viagem e Cabo.

↳ Cloreto

Dentro do limite de potabilidade para o cloreto, de 250mg/L, observa-se, pelos histogramas da Figura 5.4 e pela Tabela 5.8, que, para as amostras de 1966 a 1994, o percentual de amostras potáveis é de 87, 92 e 88% respectivamente, para os aquíferos Cabo, Boa Viagem e Beberibe Inferior, e, no grupo de amostras de 1996, é de 82, 87 e 97%, respectivamente, nos aquíferos supracitados.

Observa-se ainda que, comparando as amostragens entre 1966 a 1994 com as de 1996, em relação ao cloreto aumentou o percentual de água potável no Aquífero Beberibe Inferior e diminuiu nos aquíferos Cabo e Boa Viagem.

↳ Bicarbonato

Dentro do limite de potabilidade para o bicarbonato, de 500mg/L, observa-se, pelos histogramas da Figura 5.5 e pela Tabela 5.9, que, o percentual de amostras potáveis é de 88, 99 e 100% respectivamente aos aquíferos Boa Viagem, Cabo e Beberibe Inferior, para as amostras de 1966 a 1994, enquanto que, em 1996, é de 98% para o Aquífero Boa Viagem, estando as aquíferos Beberibe Inferior e Cabo com 100% de suas águas enquadradas no limite de potabilidade.

Observa-se então, comparando as amostragens entre 1966 a 1994 com as de 1996, que, em relação ao bicarbonato, o percentual de águas potáveis aumentou nos aquíferos Boa Viagem e Cabo, permanecendo constante no Aquífero Beberibe Inferior.

↳ Condutividade Elétrica

Dentro do limite de potabilidade para a condutividade elétrica, de 500 μ S/cm, observa-se, pelos histogramas da Figura 5.6 e pela Tabela 5.10, que, o percentual de amostras potáveis nas análises de 1966 a 1994, é de 73, 61 e 76% respectivamente para os aquíferos Cabo, Boa Viagem e Beberibe Inferior, e, no grupo de amostras de 1996, é de 45, 43 e 79% respectivamente aos aquíferos supracitados.

Observa-se então, comparando as amostragens entre 1966 a 1994 para as de 1996, que, em relação à condutividade elétrica, aumenta o seu percentual de amostras potáveis no Aquífero Beberibe Inferior e diminuiu significativamente nos aquíferos Cabo e Boa Viagem.

↳ Potencial Hidrogênico

Dentro do limite de potabilidade para o pH, entre 6 e 8, observa-se, pelos histogramas da Figura 5.7 e Tabela 5.11, que, o percentual das análises nesta faixa é de 85, 84 e 76%, respectivamente para os aquíferos Cabo, Boa Viagem e Beberibe Inferior, no grupo de amostras de 1966 a 1994, sendo, para as amostras de 1996, de 64, 57 e 85%, respectivamente aos

aqüíferos supracitados.

Quanto à acidez, ou seja, quanto às águas com pH abaixo de 6, observa-se que, nas amostras de 1966 a 1994, 20% das águas do Aqüífero Beberibe Inferior, 4% das águas do Aqüífero Boa Viagem e 12% das águas do Aqüífero Cabo, contém uma acidez elevada, enquanto que, nas amostras de 1996, os percentuais baixaram nos aqüíferos Beberibe Inferior e Cabo para 9% das águas, e que, permaneceu o mesmo percentual no Aqüífero Boa Viagem.

Quanto à alcalinidade, ou seja, quanto às águas com pH acima de 8, observa-se que, nas amostras de 1966 a 1994, índices são de 4, 12 e 3% das águas dos aqüíferos Beberibe Inferior, Boa Viagem e Cabo com alcalinidade elevada, enquanto que, nas amostras de 1996 os índices passam a ser de 6, 39, e 27% respectivamente aos aqüíferos da época anterior.

Observa-se ainda que, tomando-se como referência as amostragens entre 1966 a 1994 para as de 1996, o pH chega a aumentar o seu percentual de potabilidade no Aqüífero Beberibe Inferior e a diminuir nos aqüíferos Cabo e Boa Viagem, enquanto que a acidez diminui nos aqüíferos Beberibe Inferior e Cabo e permanece constante no Aqüífero Boa Viagem, e que, a alcalinidade aumenta em todos os aqüíferos com incidência maior nos aqüíferos Boa Viagem e Cabo.

5.3. Superfícies 2D e 3D

Os mapas (2D) e superfícies (3D) de isoteores foram elaborados através de interpolação, tomando-se por base os teores de cada elemento. Mesmo tendo sido utilizado o interpolador "kriging", é válido ressaltar que, devido às distribuições espaciais dos pontos amostrados e, como os picos apresentados nas figuras podem representar anomalias, a interpolação chega a ser forçada em alguns lugares, não correspondendo à real situação. Portanto, foi feita uma análise mais consistente, por aqüífero, dos mapas/superfícies

correspondentes a cada elemento, em cada grupo de análises. Também, foi feita uma análise, por elemento, nos aquíferos em cada grupo de análises.

↳ Aquífero Beberibe Inferior

O cálcio, representado pelos mapas/superfícies da Figura 5.8 **a** e **b**, possui valores de concentração maiores no 1º grupo de análises do que no 2º grupo. Nas análises efetuadas de 1966 a 1994, observa-se uma concentração maior do cálcio na parte do Recife central, com valores superiores a 200mg/L. Porém, nas análises efetuadas em 1996, observa-se que as concentrações diminuíram em toda a área, destacando-se um foco na parte sudoeste do Recife central, que, mesmo assim, não chega a ultrapassar 200mg/L.

O sódio e o cloreto, representados pelos mapas/superfícies das figuras 5.9 **a** e **b** e 5.10 **a** e **b**, respectivamente, também possuem valores de concentração bem maiores no 1º grupo de análises em relação ao 2º grupo. Em ambas as amostragens, destacam-se, um ou mais focos de concentrações elevadas, no caso do sódio, acima de 200mg/L, ultrapassando, na amostragem entre 1966 e 1994, valores de 1.500mg/L, e, no caso do cloreto, acima de 250mg/L, ultrapassando 1.000mg/L. Seus focos de concentrações elevadas coincidem e, assim como os do cálcio, encontram-se também no Recife central, porém, há um outro foco nos cloretos do 1º grupo, localizado no oeste da área estudada.

O bicarbonato, representado pelos mapas/superfícies da Figura 5.11 **a** e **b**, possui valores de concentração semelhantes no 1º grupo de análises e no 2º grupo. Em ambos os grupos, há uma heterogeneidade de distribuição das concentrações, sendo no 1º grupo maior do que no 2º grupo. Porém, em nenhum destes focos as concentrações ultrapassam 500mg/L.

O pH, representado pelos mapas/superfícies da Figura 5.12 **a** e **b**, possui valores semelhantes no 1º grupo e no 2º grupo de análises. No geral, mostram águas neutras em ambos os grupos, chegando a ficar um pouco ácida no 1º grupo e um pouco alcalina no 2º grupo. A heterogeneidade de distribuição dos valores, assemelha-se a do bicarbonato.

A condutividade elétrica, representada pelos mapas/superfícies da Figura 5.13 **a** e **b**, possui valores bem maiores no 1º grupo de análises em relação ao 2º grupo. Nas análises efetuadas de 1966 a 1994, observa-se valores superiores a $500\mu\text{S}/\text{cm}$, ultrapassando os $8.500\mu\text{S}/\text{cm}$. Nas análises efetuadas em 1996, observa-se que os valores diminuíram em toda a área, destacando-se um foco na parte sudoeste do Recife central, que, chega a ultrapassar $1.400\mu\text{S}/\text{cm}$.

A relação iônica entre o magnésio e o cálcio, representada pelos mapas/superfícies da Figura 5.14 **a** e **b**, apresenta valores maiores no 1º grupo de análises (0 a 3,6) em relação ao 2º grupo (0,2 a 2,4). Em ambas as épocas, os valores são superiores a 1,5, porém, nas análises efetuadas de 1966 a 1994, observa-se que estão mais próximos a 5, sugerindo uma mistura com água do mar. Porém, esta mistura só será provável em pontos no extremo leste da área, nas amostras de 1966 a 1994, e, no extremo sudeste da área, nas amostras de 1996, onde se verifica, através da Figura 5.10, concentrações crescentes de cloreto nestes mesmos pontos. Como os valores nas análises efetuadas em 1996, tanto para a relação iônica entre o magnésio e o cálcio como para o cloreto, foram menores, e, como os pontos de concentração são coincidentes numa mesma área, esta relação, sugere ainda que, a provável mistura com a água do mar tenha diminuído.

A respeito da relação iônica entre o potássio e o sódio, representada pelos mapas/superfícies da Figura 5.15 **a** e **b**, observa-se que a mesma apresenta valores próximos nas épocas de amostragem, porém dispersos heterogeneamente pela área, onde

uma maior coincidência espacial é observada no extremo norte da área, com presença de sedimentos da Formação Barreiras, indicando zona de baixa salinidade. Observa-se ainda que, as zonas de altos e baixos valores desta relação, coincidem com as zonas de baixos e altos valores da relação iônica anterior.

A relação iônica entre o cloreto e o bicarbonato, representada pelos mapas/superfícies da Figura 5.16 **a** e **b**, apresenta valores bem maiores no 1º grupo (0 a 140) de análises em relação ao 2º grupo (0-45). Em ambas as épocas, existem dois pontos com valores são superiores a 20, que corresponderiam a valores da água do mar, indicando possíveis focos de contaminação marinha. Observa-se ainda que, os focos de contaminação no 1º grupo não são os mesmos foco do 2º grupo, indicando que a provável contaminação marinha é mais recente. Ainda, como a faixa de valores para a água do mar situa-se entre 20 e 50, os valores encontrados no 1º grupo estão muito além da respectiva faixa, podendo ter sido feita uma superestimagem das concentrações nas análises físico-químicas pelo(s) laboratório(s), não correspondendo, portanto, à real situação, o que, aliás, é comprovado no 2º grupo, com valores mais condizentes.

O índice de troca de base, representado pelos mapas/superfícies da Figura 5.17 **a** e **b**, apresenta valores superiores no 1º grupo de análises em relação ao 2º grupo. Os valores na coleta de 1996, baixaram a extremos significando um abrandamento da água, refletido pela troca de cálcio e magnésio por sódio, de uma época (1966 a 1994) para outra (1996).

A razão de adsorção do sódio, representada pelos mapas/superfícies da Figura 5.18 **a** e **b**, apresenta valores superiores no 1º grupo de análises em relação ao 2º grupo, o que levaria a uma mudança de classe, para a irrigação, no mínimo de S2 a S1, segundo o risco de sódio (Figura 4.1) de acordo com a condutividade elétrica. Comparando-se os mapas/superfícies da Figura 5.18a com a Figura 5.13a, observa-se que existem dois focos de elevados valores, coincidentes espacial e quantitativamente, embora de unidades distintas, e

havendo outros focos distintos entre ambos. Comparando-se os mapas/superfícies das Figuras 5.18b e 5.13b, observa-se que são coincidentes em gênero e número, porém com graus diferentes, ou seja, coincidem-se os focos em número e distribuição espacial, porém onde o SAR é maior em relação ao outro foco, a condutividade é menor em relação ao seu outro foco de concentração. No geral, o segundo grupo representa melhor a situação do SAR na área.

↳ Aqüífero Boa Viagem

O cálcio, representado pelos mapas/superfícies da Figura 5.19 **a** e **b**, possui valores de concentração maiores no 1º grupo de análises em relação ao 2º grupo. Nas análises efetuadas de 1966 a 1994, observa-se uma concentração maior do cálcio na parte do Recife central com valores um pouco superiores a 200mg/L e um outro de concentração menor na parte noroeste da área. Porém, nas análises efetuadas em 1996, observa-se que as concentrações diminuíram em toda a área, de quase 50% em relação às anteriores, destacando-se pequenos focos na parte sul da área, região da praia de Boa Viagem, que, mesmo assim, não chega a ultrapassar 130mg/L.

O sódio e o cloreto, estão representados pelos mapas/superfícies das figuras 5.20 **a** e **b** e 5.21 **a** e **b**, respectivamente. O sódio possui valores de concentração maiores no 1º grupo de análises em relação ao 2º grupo e, o cloreto, concentrações na mesma faixa de valores. Em ambas as amostragens, destacam-se, um ou mais focos de concentrações elevadas, no caso do sódio, acima de 200mg/L, ultrapassando, na amostragem entre 1966 e 1994, valores de 1.000 mg/L, e, no caso do cloreto, acima de 250mg/L, ultrapassando 1.500mg/L. Nas análises efetuadas de 1966 a 1994, o foco de concentração elevada, a noroeste da área, encontrado para o sódio coincide com um dos focos do cloreto, que contém um outro foco no Recife central. Nas análises efetuadas em 1996, os focos de concentração elevada aumentam e são coincidentes, para os dois elementos, localizados no Recife central e no sul da área

estudada, região da praia de Boa Viagem.

O bicarbonato, representado pelos mapas/superfícies da Figura 5.22 **a** e **b**, possui valores de concentração completamente diferentes, diminuindo acentuadamente do 1º grupo para o 2º grupo de análises. Nas análises efetuadas de 1966 a 1994, observa-se uma concentração maior do bicarbonato na parte noroeste das área, com valores superiores a 1.700mg/L. Porém, nas análises efetuadas em 1996, observa-se que as concentrações diminuíram em toda a área, para quase 30% em relação às anteriores, destacando-se pequenos focos dispersos em toda a área, onde, mesmo assim, ficam na faixa dos 500mg/L.

O pH, representado pelos mapas/superfícies da Figura 5.23 **a** e **b**, possui valores bem semelhantes no 1º grupo e no 2º grupo de análises. No geral, mostram águas neutras a alcalinas em ambos os grupos. A heterogeneidade de distribuição dos valores, assemelha-se, em ambos os grupos, ao 2º grupo do bicarbonato.

A condutividade elétrica, representada pelos mapas/superfícies da Figura 5.24 **a** e **b**, possui valores bem semelhantes no 1º grupo e no 2º grupo de análises. Nas análises efetuadas de 1966 a 1994, encontra-se valores superiores a 7.000 μ S/cm, foco na parte do Recife central. Nas análises efetuadas em 1996, observa-se que permanece a faixa de valores, porém, aumentando-se o número de focos em toda a área, destacando-se além do foco na parte do Recife central, mais dois focos na praia de Boa Viagem, parte sul da área estudada.

A relação iônica entre o magnésio e o cálcio, representada pelos mapas/superfícies da Figura 5.25 **a** e **b**, apresenta valores maiores no 1º grupo de análises em relação ao 2º grupo. Em ambas as épocas, os valores são superiores a 1,5, porém, nas análises efetuadas de 1966 a 1994, observa-se que são superiores a 5. Com base no aumento de cloretos no mesmo foco de concentração elevada na amostragem de 1966 a 1994 (Figura 5.21), seria provável que houvesse mistura com água do mar, porém, como este foco situa-se no extremo noroeste da área, é provável que o aporte de cloretos seja por recarga local. Na amostragem de 1996, observa-se que a configuração do

mapa/superfície é completamente distinta da época anterior, porém, seus três focos de altos valores da relação iônica discutida, concentrados na zona mais litorânea, são coincidentes com os três focos de altas concentrações de cloretos (Figura 21b), indicando, que, nestes focos, poderá estar havendo contaminação marinha, enquanto que, nos outros focos da relação iônica, dispersos na área, o aporte de cloretos poderá ter sido por recarga local no aquífero.

A respeito da relação iônica entre o potássio e o sódio, representada pelos mapas/superfícies da Figura 5.26 **a** e **b**, observa-se que apresenta valores bastante próximos nas épocas de amostragem e uma maior coincidência espacial é observada no extremo norte da área, próximos aos sedimentos da Formação Barreiras, indicando uma zona de baixa salinidade. Observa-se ainda que, a zona de baixos valores desta relação, no extremo nordeste da área no 1º grupo, coincide com a zona de altos valores da relação iônica anterior, no mesmo grupo, e que, no 2º grupo, esta observação é consistente na zona sul/sudeste da área, na orla de Boa Viagem.

A relação iônica entre o cloreto e o bicarbonato, representada pelos mapas/superfícies da Figura 5.27 **a** e **b**, apresenta valores bem menores no 1º grupo de análises do que no 2º grupo. No 1º grupo, os valores apresentados, apesar de serem superiores à faixa de águas continentais (0,1 a 5), não são bons indicadores de contaminação marinha, porém, no 2º grupo, os altos valores desta relação iônica são bons indicadores, mostrando, na zona sul, orla de Boa Viagem, um foco de contaminação por água do mar.

O índice de troca de base, representado pelos mapas/superfícies da Figura 5.28 **a** e **b**, apresenta valores bem superiores no 1º grupo de análises em relação ao 2º grupo. Os valores na coleta de 1996, baixaram significando um abrandamento da água, refletido pela troca de cálcio e magnésio por sódio, de uma época (1966 a 1994) para outra (1996), assim como no Aquífero Beberibe Inferior.

A razão de adsorção do sódio, representada pelos mapas/superfícies da Figura 5.29 **a** e **b**, apresenta valores superiores no 1º grupo de análises em relação ao 2º grupo, o que levaria a uma mudança de classe, para a irrigação, no mínimo de S3 a S2, segundo o risco de sódio (Figura 4.1) de acordo com a condutividade elétrica. Comparando-se os mapas/superfícies da Figura 5.29a com a Figura 5.24a, observa-se que existe apenas um foco de elevadas concentrações de ambos os elementos, porém sem coincidência espacial alguma. Comparando-se os mapas/superfícies das Figuras 5.29b e 5.24b, observa-se que são coincidentes em gênero, número e grau, ou seja, coincidem-se os focos em número (três), em distribuição espacial (zona litorânea) e em grau (contornos proporcionais). No geral, assim como no Aquífero Beberibe Inferior, o segundo grupo representa melhor a situação do SAR na área.

↳ Aquífero Cabo

O cálcio, representado pelos mapas/superfícies da Figura 5.30 **a** e **b**, possui valores de concentração menores no 1º grupo em relação ao 2º grupo de análises. Nas análises efetuadas de 1966 a 1994, observa-se vários focos de concentração com valores inferiores a 100mg/L, dispersos por toda a área. Porém, nas análises efetuadas em 1996, observa-se que a concentração aumentou acentuadamente em um ponto observado, no extremo norte da área, próximo ao limite hipotético com o Aquífero Beberibe Inferior, com valor acima de 850mg/L.

O sódio, o cloreto e a condutividade elétrica, representados pelos mapas/superfícies das figuras 5.31 **a** e **b**, 5.32 **a** e **b** e 5.33 **a** e **b**, respectivamente, possuem, em ambos os casos, valores menores no 1º grupo em relação ao 2º grupo de análises. Em ambas as amostragens, destacam-se, um ou mais focos de concentrações elevadas, no caso do sódio, acima de 200mg/L, ultrapassando, na amostragem entre 1966 e 1994, valores de 550mg/L, no caso do cloreto, acima de 250mg/L, ultrapassando 1.100mg/L, e, no caso da condutividade elétrica,

acima de $500\mu\text{S}/\text{cm}$, ultrapassando $3.600\mu\text{S}/\text{cm}$. Nas análises efetuadas de 1966 a 1994, o foco de concentração elevada, a sudoeste da área, encontrado para o sódio coincide com um dos focos do cloreto e da condutividade elétrica, que contém mais dois outros focos cada um, alinhados com o anterior numa direção NW-SE. Nas análises efetuadas em 1996, é encontrado apenas um foco de concentração elevada em ambos os elementos, sendo, espacialmente, coincidentes, no extremo norte da área, próximo ao limite hipotético com o Aquífero Beberibe Inferior, assim como no cálcio; sendo, suas concentrações, neste grupo, acima de $2.600\text{mg}/\text{L}$ para o sódio, acima de $6.000\text{mg}/\text{L}$ para o cloreto e acima de $20.000\mu\text{S}/\text{cm}$ para a condutividade elétrica.

O bicarbonato, representado pelos mapas/superfícies da Figura 5.34 **a** e **b**, possui valores distintos de concentração, diminuindo do 1º grupo ao 2º grupo de análises. Nas análises efetuadas de 1966 a 1994, observa-se uma concentração maior do bicarbonato na parte noroeste das área, com valores superiores a $500\text{mg}/\text{L}$. Porém, nas análises efetuadas em 1996, observa-se que as concentrações diminuíram em toda a área, para quase 50% em relação às anteriores, destacando-se pequenos focos numa direção aproximada N-S na área, onde, mesmo assim, ficam abaixo dos $300\text{mg}/\text{L}$.

O pH, representado pelos mapas/superfícies da Figura 5.35 **a** e **b**, possui valores bem semelhantes no 1º grupo e no 2º grupo de análises. No geral, mostram águas neutras a ácidas em ambos os grupos, com valores de 5,6 a 8,2. A heterogeneidade de distribuição dos valores, assemelha-se, em ambos os grupos, ao 2º grupo do bicarbonato.

A relação iônica entre o magnésio e o cálcio, representada pelos mapas/superfícies da Figura 5.36 **a** e **b**, apresenta valores menores no 1º grupo de análises em relação ao 2º grupo. Em ambas as épocas, os valores são superiores a 1,5, porém, nas análises efetuadas de 1996, observa-se que são superiores a 5, ocorrendo o inverso do ocorrido nos outros dois aquíferos. Com base nos aumentos de cloretos (Figura 5.32),

próximos aos focos de concentração elevada nos dois grupos, seria provável que houvesse mistura com água do mar, em ambas as amostragens, porém, como estes focos situam-se nos extremos noroeste e norte da área, é provável que o aporte de cloretos seja por recarga direta no 1º grupo e por contaminação devido à presença de uma planície de inundação de rios recentes, no 2º grupo.

A respeito da relação iônica entre o potássio e o sódio, representada pelos mapas/superfícies da Figura 5.37 **a** e **b**, verifica-se que apresenta valores próximos nas épocas de amostragem, porém sem coincidência espacial. Observa-se ainda que, a zona de baixos valores desta relação, no extremo sudeste da área no 1º grupo, coincide com a zona de altos valores da relação iônica anterior, no mesmo grupo, e que, no 2º grupo, esta observação é consistente na zona sul/sudeste da área, na orla de Boa Viagem.

A relação iônica entre o cloreto e o bicarbonato, representada pelos mapas/superfícies da Figura 5.38 **a** e **b**, apresenta valores bem menores no 1º grupo de análises em relação ao 2º grupo. No 1º grupo, os valores apresentados são bons indicadores de contaminação marinha, mostrando, na zona sul, orla de Boa Viagem, um foco de contaminação por água do mar enquanto que, no 2º grupo, os valores são bem superiores à faixa de águas marinhas (20 a 50), podendo portanto, ter havido alguma análise superestimada, não podendo serem bons indicadores de contaminação marinha.

O índice de troca de base, representado pelos mapas/superfícies da Figura 5.39 **a** e **b**, apresenta valores bem superiores no 1º grupo de análises em relação ao 2º grupo. Os valores na coleta de 1996, baixaram a extremos significantes significando um abrandamento da água, refletido pela troca de cálcio e magnésio por sódio, de uma época (1966 a 1994) para outra (1996), assim como nos aquíferos anteriores.

A razão de adsorção do sódio, representada pelos mapas/superfícies da Figura 5.40 **a** e **b**, apresenta valores inferiores no 1º grupo de análises em relação ao 2º grupo, o

que levaria a uma mudança de classe, para a irrigação, no mínimo de S2 a S3, segundo o risco de sódio (Figura 4.1) de acordo com a condutividade elétrica, sendo o inverso do observado no Aquífero Boa Viagem. Comparando-se os mapas/superfícies da Figura 5.40a com a Figura 5.28a, observa-se que existe apenas dois focos de elevadas concentrações de ambos os elementos, com coincidência espacial, localizados na zona centro-leste da área. Comparando-se os mapas/superfícies das Figuras 5.40b e 5.28b, observa-se que apenas um foco, na zona norte coincide em número e grau, ou seja, coincidem-se os focos em distribuição espacial (zona norte) e em grau (contornos proporcionais).

↳ Correlação entre os Aquíferos

Confrontando-se os mapas de concentrações de isótopos dos três aquíferos, para cada elemento e em cada grupo de amostragem, por exemplo, para o cálcio do 1º grupo, os mapas de concentrações de isótopos das figuras 5.8.a, 5.19.a e 5.30.a, obtêm-se algumas correlações entre os aquíferos.

Para o 1º grupo, no entanto, não foi possível obter qualquer tipo de correlação entre o Aquífero Boa Viagem (ABV) e o Aquífero Cabo (AC), devido à carência de pontos amostrados no ABV neste grupo.

Mesmo sem esta limitação para os outros casos, observa-se, de acordo com o confronto de mapas supracitados, que não há qualquer tipo de correlação entre os aquíferos, ou seja, os tipos de águas dos aquíferos, bem como as concentrações dos elementos e suas relações iônicas, não interagem entre os casos (aquíferos).

5.4. Diagramas de Piper

Foram elaborados diagramas de Piper apresentando amostras coletadas durante a perfuração dos poços de 1966 a 1994 (1º grupo) e amostras coletadas em 1996 (2º grupo), para os

aqüíferos Beberibe Inferior, Boa Viagem e Cabo. Outros diagramas de Piper foram elaborados, apresentando as séries temporais de 10 anos em 10 anos, ou seja, das décadas de 70, 80 e 90 nas amostras coletadas de 1996 a 1994.

↳ Aqüífero Beberibe Inferior

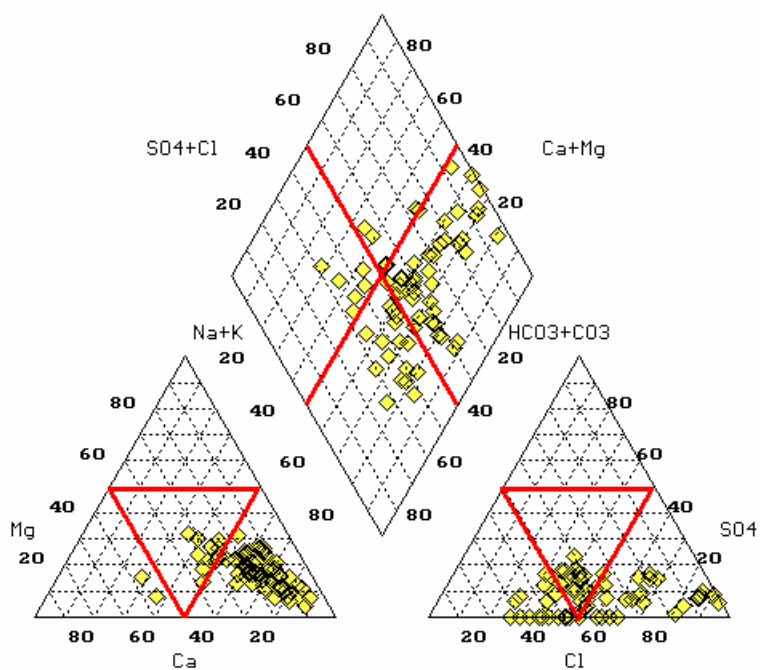
Embora a variação temporal seja grande no primeiro grupo de amostras, observa-se pela Figura 5.41 que, cationicamente, o padrão de água sódica se manteve predominante e, anionicamente, as águas do aqüífero evoluíram de bicarbonatada a cloretada para cloretada a mista, diminuindo, na grande maioria, a concentração do bicarbonato, porém, em ambas as épocas, com padrão geral de águas mistas. Com relação ao ambiente, em ambas as amostragens, são de água cloretada sódica.

A análise temporal das amostras do primeiro grupo, separados por décadas de 70, 80 e 90, como observa-se na Figura 5.42, mostra que, em geral, as águas não sofreram modificações permanecendo cloretadas a bicarbonatadas sódicas, ou seja, mistas sódicas.

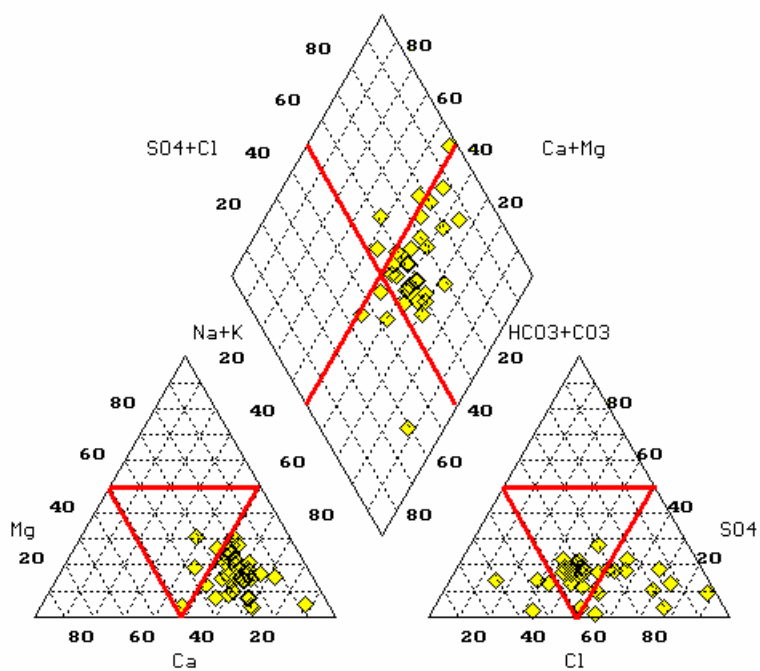
↳ Aqüífero Boa Viagem

Mesmo com uma variação temporal de quase 30 anos, na coleta das amostras do primeiro grupo, observa-se pela Figura 5.43 que, cationicamente, o padrão evoluiu de uma água predominantemente sódica para uma água mista a sódica e, anionicamente, o padrão de água mista (bicarbonatada a cloretada) se manteve praticamente o mesmo. Com relação ao ambiente, passou de uma água predominantemente bicarbonatada sódica para uma predominantemente cloretada cálcica.

A análise temporal das amostras do primeiro grupo, separados por décadas de 70, 80 e 90, como observa-se na Figura 5.44, mostra que, em geral, as águas não sofreram modificações permanecendo mistas (bicarbonatadas a cloretadas) sódicas.

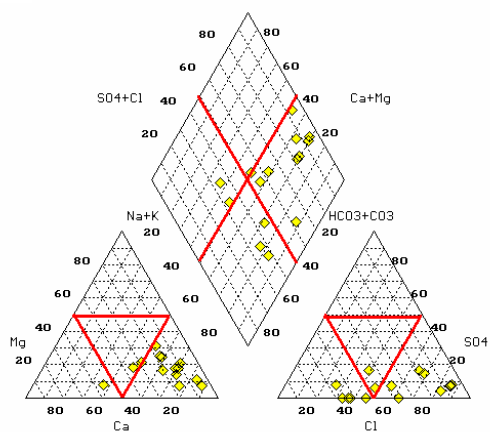


(a)

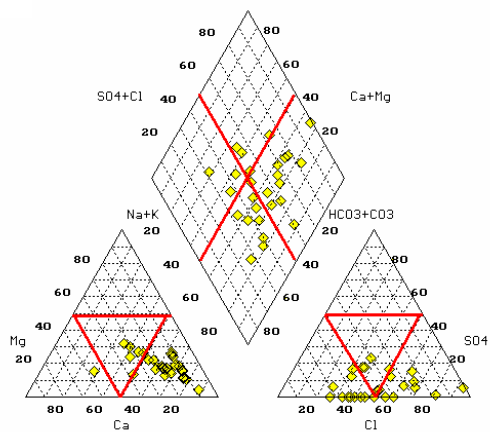


(b)

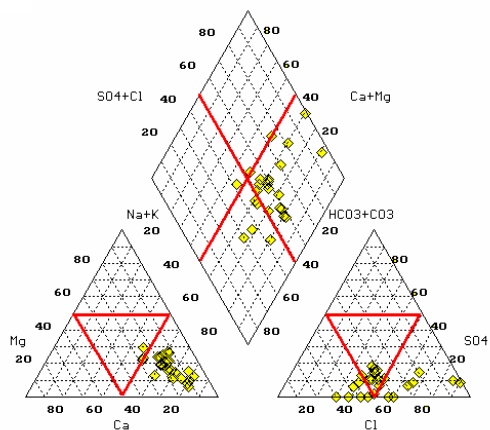
FIGURA 5.41 - Diagramas de Piper com amostras do Aquífero Beberibe Inferior. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.



(a)

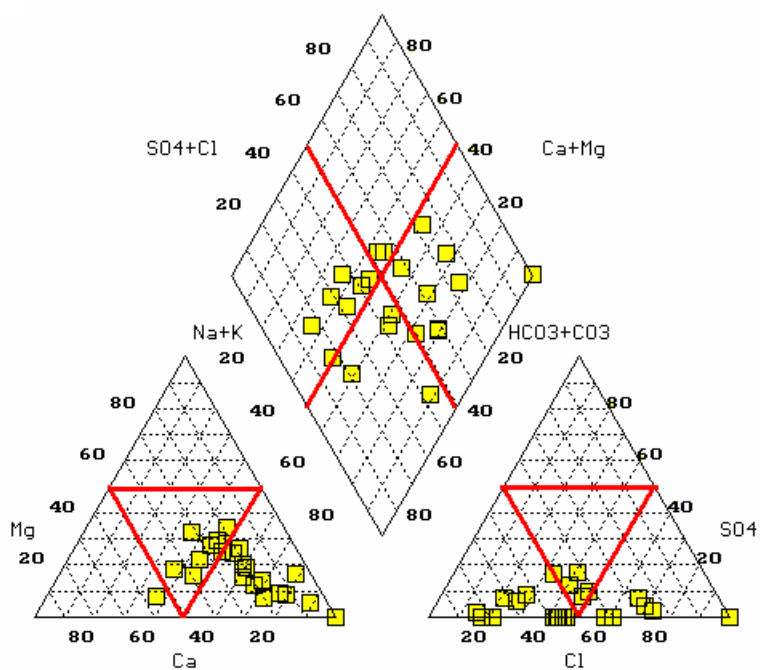


(b)

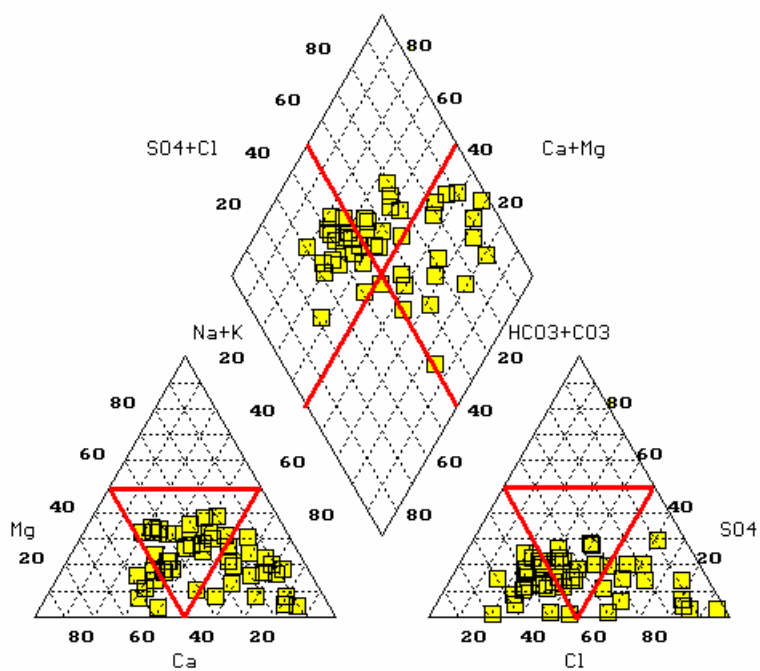


(c)

FIGURA 5.42 - Diagramas de Piper com amostras do Aquífero Beberibe Inferior. (a) coleta de 1970 a 1979; (b) coleta de 1980 a 1989; (c) coleta de 1990 a 1994.

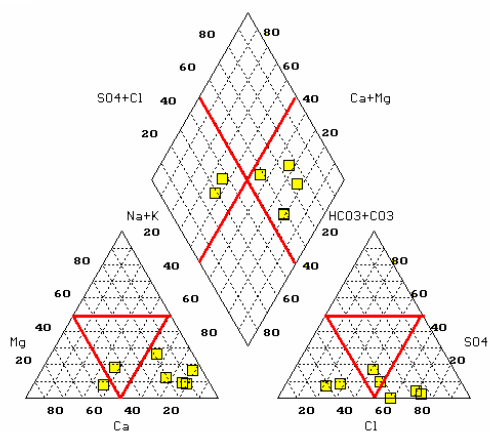


(a)

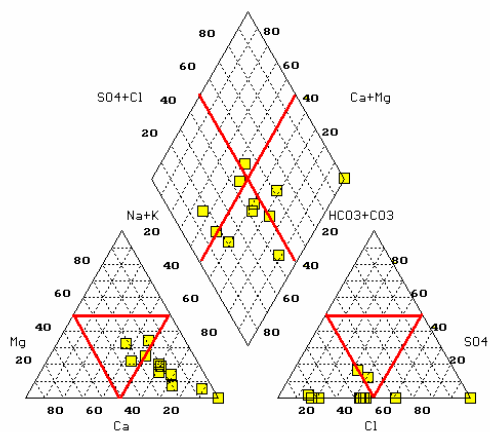


(b)

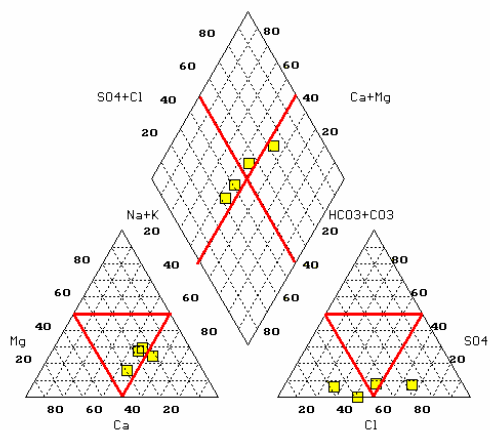
FIGURA 5.43 - Diagramas de Piper com amostras do Aquífero Boa Viagem. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 5.44 - Diagramas de Piper com amostras do Aquífero Boa Viagem. (a) coleta de 1970 a 1979; (b) coleta de 1980 a 1989; (c) coleta de 1990 a 1994.

↳ Aqüífero Cabo

Embora a variação temporal seja grande no primeiro grupo de amostras, observa-se pela Figura 5.45 que, cationicamente, o padrão de água sódica se manteve predominante e, anionicamente, as águas do aquífero evoluíram de bicarbonatada para cloretada. Com relação ao ambiente, passou de uma água predominantemente bicarbonatada sódica para uma predominantemente cloretada sódica.

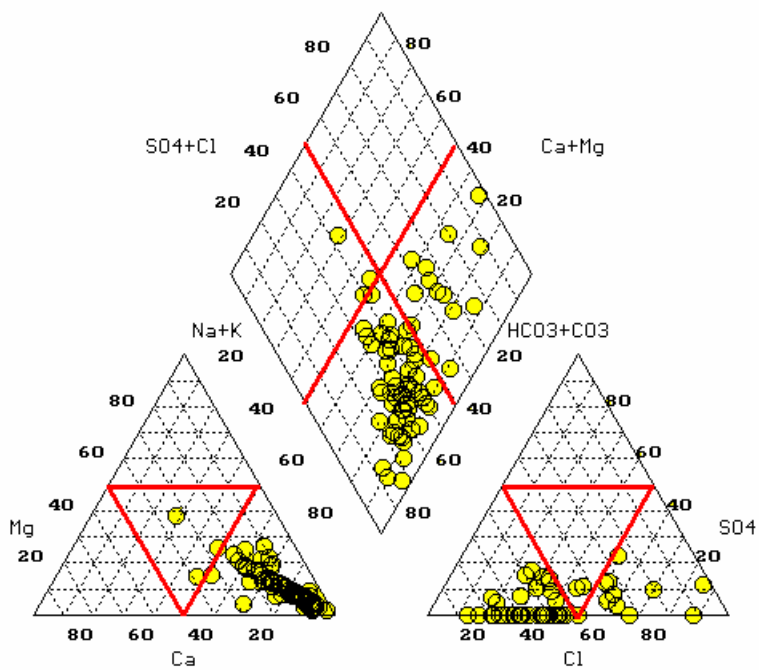
A análise temporal das amostras do primeiro grupo, separados por décadas de 70, 80 e 90, como observa-se na Figura 5.46, mostra que, em geral, as águas não sofreram modificações permanecendo bicarbonatadas sódicas.

5.5. Gráficos Circulares e de Barras

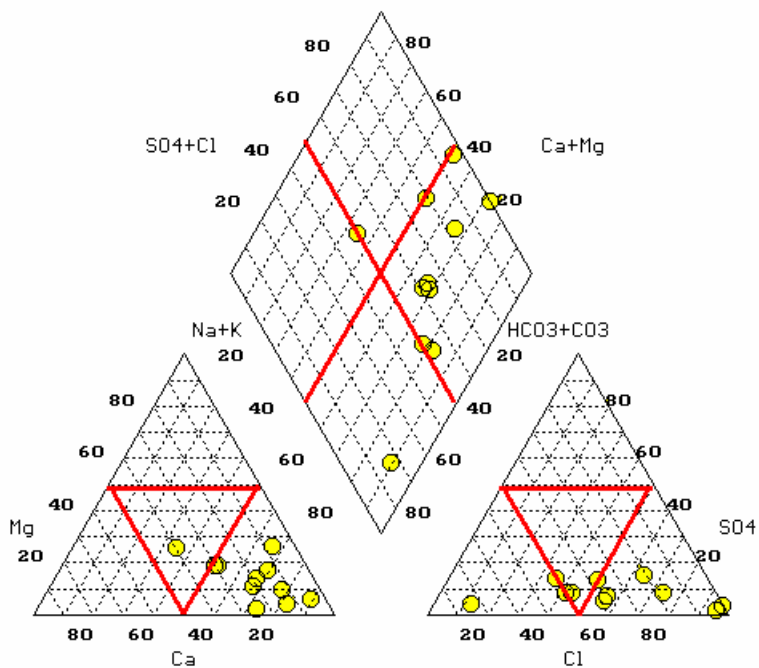
↳ Classificação das águas coletadas de 1966 a 1994

Os gráficos da Figura 5.47, mostram 6 tipos de águas nos aquíferos Boa Viagem e Beberibe Inferior, e apenas 4 tipos de águas no Aquífero Cabo, a saber: águas bicarbonatada sódica, cloretada sódica, mista mista e mista sódica, nos três aquíferos, além de águas bicarbonatada cálcica e bicarbonatada mista nos aquíferos Boa Viagem e Beberibe Inferior.

No Aquífero Beberibe Inferior (ABI), observa-se que a predominância é da água mista sódica com 43%, seguida da água cloretada sódica com 31%. No Aquífero Boa Viagem (ABV), observa-se a mesma predominância que no ABI, porém com percentuais menores, de 28% e 21%, respectivamente, seguidas da água bicarbonatada sódica com 17%. No Aquífero Cabo (AC), observa-se que este panorama muda muito, sendo a predominância da água bicarbonatada sódica com 60%, seguida da água mista sódica com 29%.

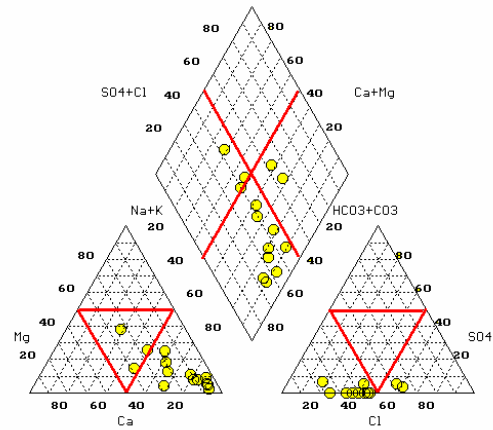


(a)

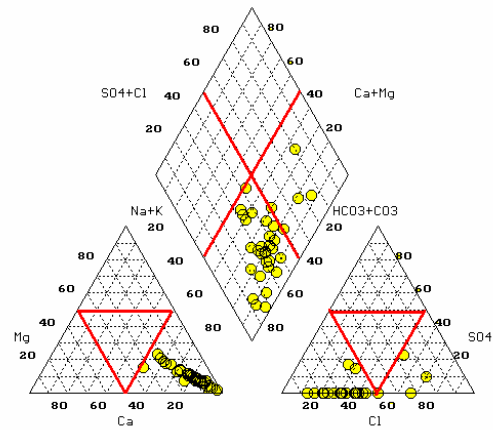


(b)

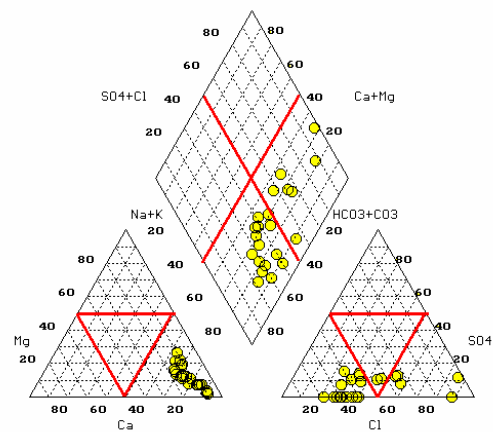
FIGURA 5.45 - Diagramas de Piper com amostras do Aquífero Cabo. (a) coleta de 1966 a 1994; (b) coleta em 1996.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 5.46 - Diagramas de Piper com amostras do Aquífero Cabo. (a) coleta de 1970 a 1979; (b) coleta de 1980 a 1989; (c) coleta de 1990 a 1994.

Pelos gráficos da Figura 5.48, observa-se que, cationicamente, as predominâncias dos cátions prevalecem nos três aquíferos, mudando-se apenas seus percentuais que passam a ser de 47% e 42% mistas, respectivamente para os aquíferos Beberibe Inferior e Boa Viagem, e, de 51% bicarbonatada para o Aquífero Cabo. Ainda, pelos gráficos da Figura 5.49, observa-se que, em todos os três aquíferos, a predominância de água sódica prevalece, e em muito, sobre os outros tipos, chegando a atingir 87, 67 e 96%, respectivamente nos aquíferos Beberibe Inferior, Boa Viagem e Cabo.

↳ Classificações das águas coletadas em 1996

Observa-se, pelos gráficos da Figura 5.50, que são encontrados 8 tipos de águas distribuídas nos aquíferos Beberibe Inferior com 6 tipos, Boa Viagem com 7 tipos e Cabo com 5 tipos, a saber: águas cloretada mista, cloretada sódica, mista mista e mista sódica, nos três aquíferos; além das águas bicarbonatada mista e bicarbonatada sódica a mais no Aquífero Beberibe Inferior; das águas bicarbonatada cálcica e bicarbonatada mista a mais no Aquífero Boa Viagem; e da água bicarbonatada sódica no Aquífero Cabo.

No Aquífero Beberibe Inferior (ABI), observa-se que a predominância é da água mista sódica com 40%, seguida das águas mista mista com 21% e cloretada sódica com 18%. No Aquífero Boa Viagem (ABV), observa-se uma mudança de água para cloretada sódica com 24%, mista mista com 22% e bicarbonatada cálcica com 20%. No Aquífero Cabo (AC), observa-se que a predominância é da água cloretada sódica com 46%, seguida da água mista sódica com 27%.

Pelos gráficos da Figura 5.51, observa-se que, cationicamente, as predominâncias dos cátions prevalecem nos três aquíferos, mudando-se apenas seus percentuais que passam a ser de 62% e 48% mistas, respectivamente para os aquíferos Beberibe Inferior e Boa Viagem, e, de 55% bicarbonatada para o Aquífero Cabo. Ainda, pelos gráficos da Figura 5.52, observa-se

que, nos aquíferos Beberibe Inferior e Cabo, a predominância de água sódica prevalece, e em muito, sobre os outros tipos, chegando a atingir 62, e 82%, respectivamente, enquanto que, no Aquífero Boa Viagem, a água chega a ser mista, com 37% de cálcica, 33% de sódica e 30% de mista propriamente dita.

↳ Relações Iônicas (Índices Hidrogeoquímicos)

Observa-se, pelos gráficos da Figura 5.53, que apresentam a relação iônica entre o magnésio e o cálcio, que, no 1º grupo, 33% das águas subterrâneas do Aquífero Beberibe Inferior, 44% do Aquífero Boa Viagem e 43% do Aquífero Cabo, estão na faixa das águas continentais (0,3 a 1,5), enquanto que 62, 48 e 54% das águas dos respectivos aquíferos estão com provável e fraca mistura com águas marinhas e, 4, 4 e 2% estão na faixa de grande mistura com águas marinhas (em torno de 5). No 2º grupo, observa-se que o comportamento muda para 53% das águas subterrâneas do Aquífero Beberibe Inferior, 63% do Aquífero Boa Viagem e 59% do Aquífero Cabo, estão na faixa de águas continentais, enquanto que 38, 33 e 25% das águas nos respectivos aquíferos estão fracamente misturadas, enquanto que, 8% das águas, apenas no Aquífero Cabo, demonstram uma forte mistura com águas marinhas.

Nos gráficos da Figura 5.54, observa-se, quanto à relação iônica entre o potássio e o sódio, que, no 1º grupo, apenas 3% das águas do Aquífero Beberibe Inferior, 8% do Aquífero Boa Viagem e 15% do Aquífero Cabo, estão na faixa de água marinha, podendo encontrar-se com focos de contaminação marinha. No 2º grupo, observa-se que, em todas as águas coletadas em 1996, não há indícios de contaminação marinha.

Nos gráficos da Figura 5.55, a relação iônica entre o cloreto e o bicarbonato mostra, no 1º grupo, que 88% das águas do Aquífero Beberibe Inferior, 92% do Aquífero Boa Viagem e 86% do Aquífero Cabo, situam-se dentro da faixa de águas continentais (0,1 a 5), que 11, 8 e 8%, dos respectivos aquíferos, situam-se numa faixa intermediária (5 a 20), e 9, 0

e 6% situam-se numa faixa crítica de intrusão marinha (20-50). No 2º grupo, os percentuais de águas continentais diminuem um pouco nos três aquíferos para 82, 83 e 64%, respectivamente, contudo, é válido lembrar que o número de amostras é reduzido, principalmente, no caso do Aquífero Cabo.

Quanto ao índice de troca de bases, observa-se nos gráficos da Figura 5.56, que, 55% das águas do Aquífero Beberibe Inferior, 63% do Aquífero Boa Viagem e 74% do Aquífero Cabo, podem ser consideradas águas abrandadas, enquanto 22, 8 e 21%, respectivamente, podem ser consideradas águas endurecidas, e, em nenhum dos aquíferos foi observado valores na faixa dos valores da água do mar (+1,2 a +1,3). No 2º grupo, observa-se que 72, 63 e 54% das águas dos respectivos aquíferos supracitados, podem ser consideradas águas brandas, enquanto que, nenhum percentual é estabelecido para águas duras, muito menos com presença de água marinha.

Quanto à razão de adsorção do sódio, observa-se nos gráficos da Figura 5.57, que, no 1º grupo, pelo menos 87% das águas do Aquífero Beberibe Inferior, 83% do Aquífero Boa Viagem e 65% do Aquífero Cabo, possuem valores de SAR até 4, podendo ser utilizadas em quase todos os tipos de solos, a depender apenas da condutividade elétrica das respectivas águas. No 2º grupo, pelo menos 94, 83 e 64% das águas dos respectivos aquíferos supracitados, estão na mesma situação anterior, observando-se ainda que, nos aquíferos Boa Viagem e Cabo, os percentuais permaneceram praticamente constantes, modificando-se um pouco para o Aquífero Beberibe Inferior.

↳ Classificações das águas para irrigação

Mesmo ciente de que numa Capital de Estado a prática de irrigação é muito pequena, fez-se uma breve classificação das águas dos aquíferos na Planície do Recife para tal uso. Isto porque, além de dar uma noção de salinidade para muitos técnicos da área, esta classificação poderá ter algumas utilidades práticas, principalmente ligada à jardinagem e ao

paisagismo.

No Aquífero Beberibe Inferior, observa-se pelos gráficos da Figura 5.58, que, são encontradas oito classificações de tipos de água para a irrigação, das quais, uma delas é bastante significativa, representando 59% de toda a água, com baixo risco de sódio e baixo risco de salinidade. Esta classificação predominante é a C1-S1, com 59% das águas na classe C1 e 90% na classe S1. No 2º grupo, observa-se menos classificações, apenas cinco, porém com os mesmos comportamentos que as do 1º grupo e com os percentuais aumentados para 62% classificadas em C1-S1, com 62% na classe C1 e 97% classificadas em S1.

No Aquífero Boa Viagem, observa-se pelos gráficos da Figura 5.59, que são encontradas quatro classificações de tipos de água para a irrigação, das quais, uma delas (C1-S1) é mais significativa, representando 47% de toda a água, com baixo risco de sódio e baixa condutividade elétrica. Esta classificação, C1-S1, tem o mesmo percentual (47%) para as classes de condutividade elétrica (C1) e com 100% das classes de SAR (Na). No 2º grupo, a classificação passa a ser C2-S1, com 40%, seguida bem próxima pelo tipo C3-S1, com 37%, observando-se com isto, que a condutividade elétrica da águas teve um aumento, no geral, pois a classe dominante passa a ser a C3 com 42% seguida pela C2 com 39%, ou seja, passam de um limite predominante de 250µS/cm no 1º grupo para um limite de 2250µS/cm, enquanto que, quanto ao risco de sódio, prevalece ainda a classe S1 com 89%.

No Aquífero Cabo, observa-se pelos gráficos da Figura 5.60, que, são encontradas oito classificações de tipos de água para a irrigação, das quais, uma delas é bastante significativa representando 79% de toda a água, com baixo risco de sódio e médio risco de salinidade. Esta classificação predominante é a C2-S1, com 85% das águas na classe C2 e 92% na classe S1. No 2º grupo, observa-se menos classificações, apenas quatro, porém com o mesmo comportamento que no 1º grupo e com os percentuais diminuídos um pouco, para 73% classificadas em C2-S1, com 82% na classe C2 e 82% classificadas em S1.

5.6. Análise de Agrupamento

A análise de agrupamento, descrita no Capítulo 4, em 4.3.5 ("*Tratamento Estatístico*"), foi efetuada nas análises físico-químicas dos poços nos três aquíferos, separadamente nos dois grupos de épocas de amostragem, tomando-se por base apenas alguns elementos para detecção do nível de similaridade entre os poços. Os elementos analisados foram o cálcio, o sódio, o cloreto, o bicarbonato, o pH e a condutividade elétrica. Os dendogramas, que representam graficamente os resultados da análise de agrupamento, apresentam: o critério de união utilizado que foi o de união completa (*Complete Linkage*); a medida de similaridade que foi o coeficiente de correlação linear do produto momento (*Pearson, r*); a distância de união (*Linkage Distance*), representada por $1-r$; e os casos analisados, ou seja, os poços e seus agrupamentos.

De uma maneira geral, observa-se, pelos dendogramas **a**, **b** e **c** da Figura 5.61, que as águas dos três aquíferos apresentam, em cada um, um alto coeficiente de correlação [$(1-Linkage Distance) \times 100 \%$], de no mínimo 95%, formando pequenos grupos de similaridade que, plotados espacialmente em mapas (Figura 5.62), mostraram uma mistura muito grande entre os grupos formados.

Com base na heterogeneidade temporal deste universo de amostras (1^o grupo amostrado) relativas ao período de 1966 a 1994, optou-se detalhar mais a análise de agrupamento no segundo universo de amostras relativas a 1996 (2^o grupo amostrado).

A um nível de correlação de 95%, observa-se, pelo dendograma da Figura 5.63, que se formam 2 grandes grupos de similaridade no Aquífero Beberibe Inferior com 23 e 10 poços em cada grupo, excluindo-se um poço; pelo dendograma da Figura 5.64, que se formam 3 grandes grupos de similaridade no Aquífero Boa Viagem com 5, 11 e 30 poços em cada grupo; e, pelo dendograma da Figura 5.65, que se formam, excluindo-se um poço, 2 grupos de similaridade no Aquífero Cabo com 4 e 6 poços em

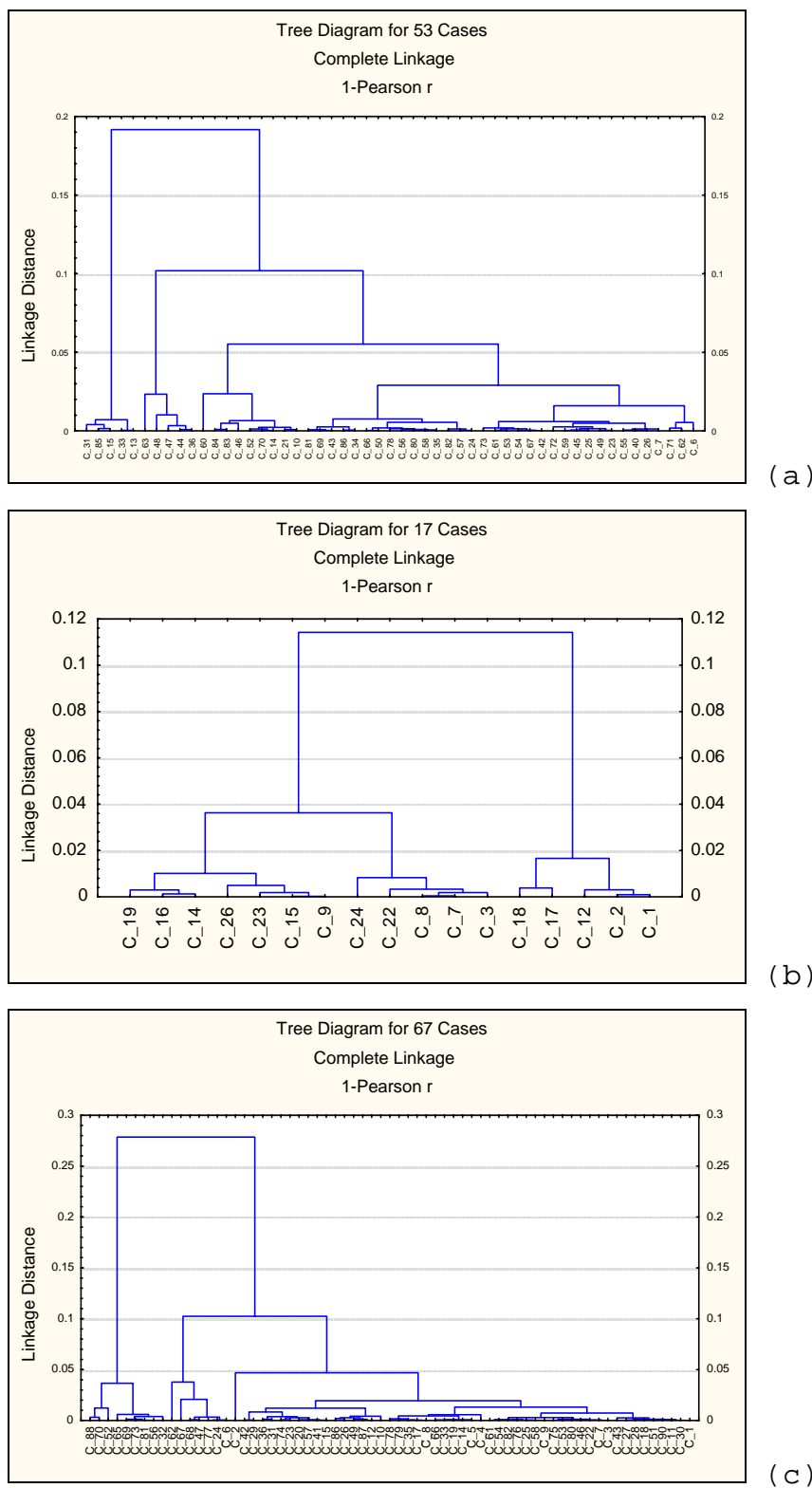


FIGURA 5.61 - Dendogramas Resultantes da Análise de Agrupamento das amostras de 1966 a 1994. (a) Aquífero Beberibe Inferior; (b) Aquífero Boa Viagem; (c) Aquífero Cabo

TABELA 5.27 - Relação entre os casos agrupados nos dendogramas da Figura 5.61 com os respectivos poços, nos três aquíferos do 1º grupo de amostragem. ABI: Aquífero Beberibe Inferior; ABV: Aquífero Boa Viagem; AC: Aquífero cabo.

CASOS	POÇOS - 1º Grupo			CASOS	POÇOS - 1º Grupo		
	ABI	ABV	AC		ABI	ABV	AC
C_1	430	425	1	C_47	929		196
C_2	432	427,2	6	C_48	944		198
C_3	433	538	14	C_49	955		199
C_4	434	539	17	C_50	956		203
C_5	435	540,1	27	C_51	972		222
C_6	491	540,2	30	C_52	973		228
C_7	533	569	35	C_53	979		234
C_8	552	576,1	38	C_54	989		236
C_9	566	648	41	C_55	1024		239
C_10	568	663	46	C_56	1086		245
C_11	570	798	48	C_57	1093		246
C_12	577	887	59	C_58	1095		251
C_13	580	1171	60	C_59	1097		257,1
C_14	630	1259,1	67	C_60	1133		257,2
C_15	632	1259,2	70	C_61	1158		261
C_16	656	1261	73	C_62	1164		264
C_17	667	1262	78	C_63	1165		271
C_18	669	1286	81	C_64	1167,1		274
C_19	670	1288	85	C_65	1167,2		277
C_20	690,1	1393	86	C_66	1182		283
C_21	691	1394	88	C_67	1243		293
C_22	730	1731	93	C_68	1289,1		311
C_23	744	1826	101	C_69	1289,2		314
C_24	748	1852	105	C_70	1291		316
C_25	752	1882	110	C_71	1293,1		317
C_26	756	1887	112	C_72	1293,2		319
C_27	781		115	C_73	1313,1		325
C_28	787		122	C_74	1318		340
C_29	790,1		125	C_75	1349,1		342
C_30	790,2		127	C_76	1349,2		345
C_31	790,3		128	C_77	1360		346
C_32	790,4		131	C_78	1361		348
C_33	792		135	C_79	1365		350
C_34	818		136	C_80	1374		351
C_35	821		141	C_81	1565		352
C_36	825		143	C_82	1568		356
C_37	844		145	C_83	1814		639,1
C_38	845		172,1	C_84	1855		639,2
C_39	846		172,2	C_85	1886		639,3
C_40	884		172,3	C_86	1888		692
C_41	902		172,4	C_87			764
C_42	909		176	C_88			767
C_43	917		185	C_89			772
C_44	920		186,1	C_90			1818
C_45	923		186,2	C_91			1884
C_46	928		193				

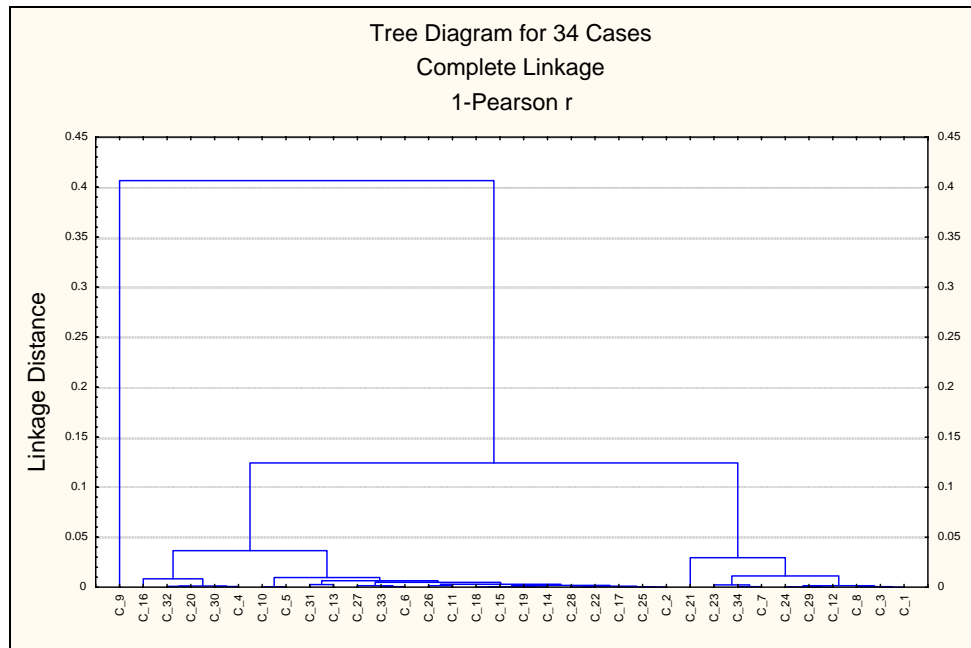


FIGURA 5.63 - Dendrograma resultante da análise de agrupamento das amostras de 1996, no Aquífero Beberibe Inferior.

TABELA 5.28 - Relação entre os casos agrupados nos dendogramas da Figura 5.63 com os respectivos poços, no Aquífero Beberibe Inferior do 2º grupo de amostragem (1996).

Casos	Poços	Casos	Poços
C_1	400	C_18	1071
C_2	417	C_19	1079
C_3	422	C_20	1125
C_4	432	C_21	1126
C_5	438	C_22	1223
C_6	491	C_23	1241
C_7	604	C_24	1243
C_8	626	C_25	1247
C_9	630	C_26	1264
C_10	801	C_27	1287
C_11	825	C_28	1314
C_12	852	C_29	1365
C_13	906	C_30	1788
C_14	917	C_31	1792
C_15	952	C_32	1801
C_16	973	C_33	1802
C_17	998	C_34	1805

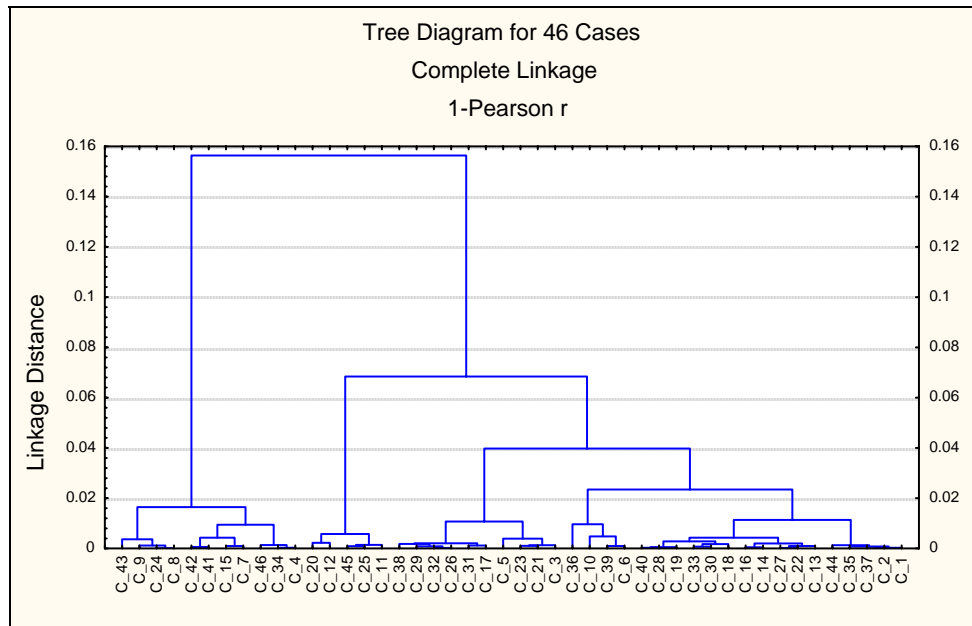


FIGURA 5.64 - Dendograma resultante da análise de agrupamento das amostras de 1996, no Aquífero Boa Viagem

TABELA 5.29 - Relação entre os casos agrupados nos dendogramas da Figura 5.64 com os respectivos poços, no Aquífero Boa Viagem do 2º grupo de amostragem (1996).

Casos	Poços	Casos	Poços
C_1	18	C_24	789
C_2	65	C_25	817
C_3	94	C_26	832
C_4	123	C_27	860
C_5	138	C_28	894
C_6	149	C_29	914
C_7	150	C_30	999
C_8	194	C_31	1021
C_9	330	C_32	1029
C_10	477	C_33	1041
C_11	527	C_34	1072
C_12	576	C_35	1085
C_13	596	C_36	1116
C_14	607	C_37	1145
C_15	610	C_38	1163
C_16	617	C_39	1210
C_17	620	C_40	1227
C_18	629	C_41	1233
C_19	638	C_42	1240
C_20	671	C_43	1317
C_21	678	C_44	1341
C_22	727	C_45	1346
C_23	741	C_46	1362

cada grupo.

A um nível de correlação de 98%, observa-se que se formam, excluindo-se dois poços, 3 grandes grupos de similaridade no Aquífero Beberibe Inferior (Figura 5.63) plotados no mapa da Figura 5.66, com 5, 9 e 18 poços em cada grupo; que se formam 5 grupos de similaridade no Aquífero Boa Viagem (Figura 5.64) plotados no mapa da Figura 5.67, com 4, 5, 10, 11 e 16 poços em cada grupo; e, que os 2 grupos de similaridade a um nível de 95% de correlação prevalecem no Aquífero Cabo (Figura 5.65) plotados no mapa da Figura 5.68, com 4 e 6 poços em cada grupo.

Com base na grande similaridade entre as amostras nos três aquíferos, foi feita uma nova análise de agrupamento com todos os poços de todos os aquíferos. A um nível de correlação de 95%, observa-se pelo dendograma da Figura 5.69 que se formam, excluindo-se um poço, 3 grandes grupos de similaridade, plotados no mapa da Figura 5.70, com 18, 20 e 52 poços em cada grupo. Este poço excluído, foi o mesmo excluído no Aquífero Beberibe Inferior, e apresentou, em ambos os dendogramas, similaridade com o restante das amostras a um nível de correlação abaixo de 60%.

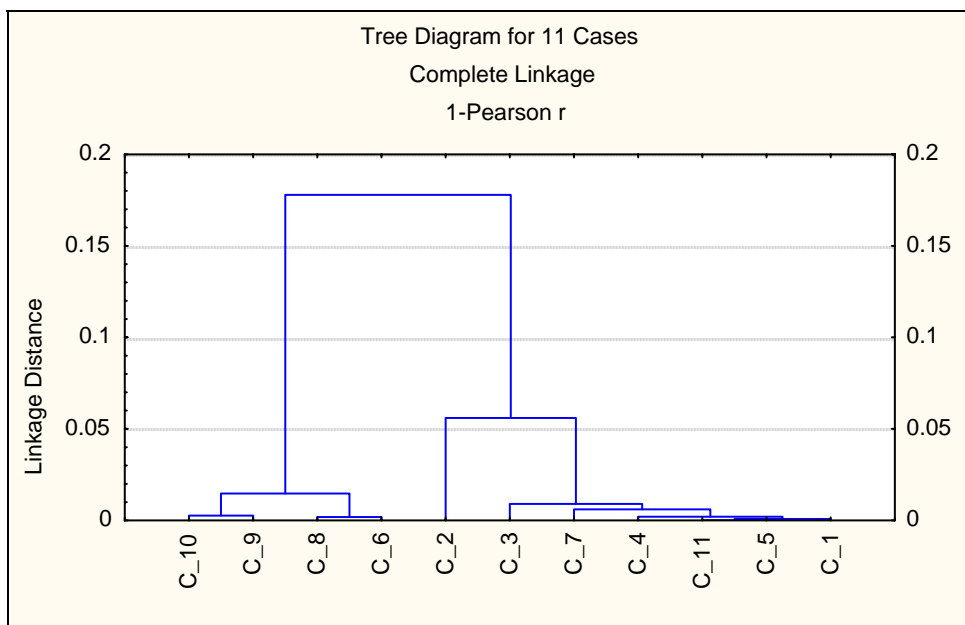


FIGURA 5.65 - Dendrograma resultante da análise de agrupamento das amostras de 1996, no Aquífero Cabo

TABELA 5.30 - Relação entre os casos agrupados nos dendogramas da Figura 5.65 com os respectivos poços, no Aquífero Cabo do 2º grupo de amostragem (1996).

Casos	Poços
C_1	96
C_2	125
C_3	169
C_4	173
C_5	182
C_6	247
C_7	311
C_8	530
C_9	531
C_10	1373
C_11	1378

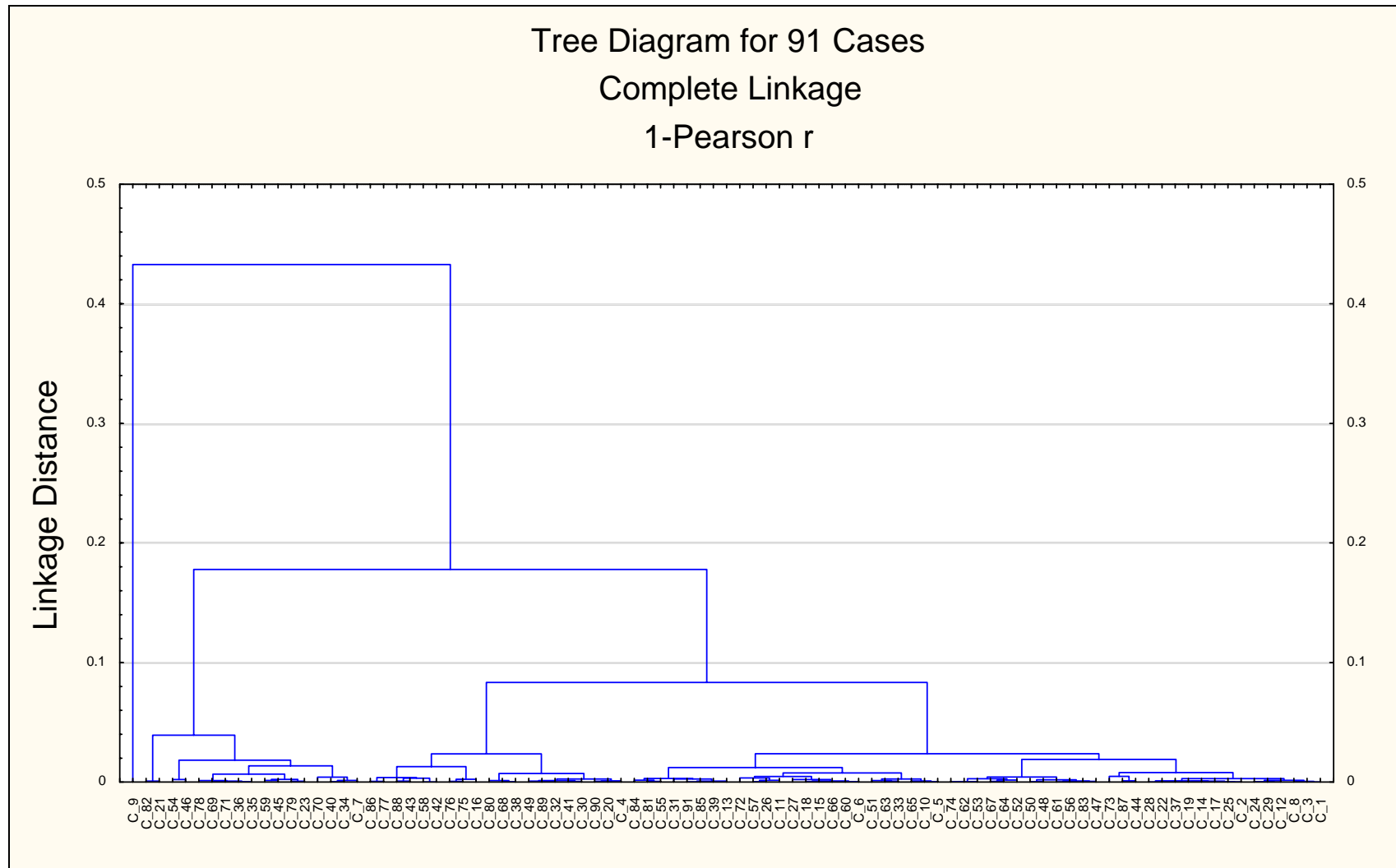


FIGURA 5.69 - Dendograma resultante da análise de agrupamento de todas as amostras de 1996, dos três aquíferos da Planície do Recife.

TABELA 5.31 - Relação entre os casos agrupados no dendograma da Figura 5.66 com os respectivos poços, nos três aquíferos do 2º grupo de amostragem. ABI: Aquífero Beberibe Inferior; ABV: Aquífero Boa Viagem; AC: Aquífero cabo.

CASOS	POÇOS	AQUÍFERO	CASOS	POÇOS	AQUÍFERO
C_1	400	ABI	C_47	596	ABV
C_2	417	ABI	C_48	607	ABV
C_3	422	ABI	C_49	610	ABV
C_4	432	ABI	C_50	617	ABV
C_5	438	ABI	C_51	620	ABV
C_6	491	ABI	C_52	629	ABV
C_7	604	ABI	C_53	638	ABV
C_8	626	ABI	C_54	671	ABV
C_9	630	ABI	C_55	678	ABV
C_10	801	ABI	C_56	727	ABV
C_11	825	ABI	C_57	741	ABV
C_12	852	ABI	C_58	789	ABV
C_13	906	ABI	C_59	817	ABV
C_14	917	ABI	C_60	832	ABV
C_15	952	ABI	C_61	860	ABV
C_16	973	ABI	C_62	894	ABV
C_17	998	ABI	C_63	914	ABV
C_18	1071	ABI	C_64	999	ABV
C_19	1079	ABI	C_65	1021	ABV
C_20	1125	ABI	C_66	1029	ABV
C_21	1126	ABI	C_67	1041	ABV
C_22	1223	ABI	C_68	1072	ABV
C_23	1241	ABI	C_69	1085	ABV
C_24	1243	ABI	C_70	1116	ABV
C_25	1247	ABI	C_71	1145	ABV
C_26	1264	ABI	C_72	1163	ABV
C_27	1287	ABI	C_73	1210	ABV
C_28	1314	ABI	C_74	1227	ABV
C_29	1365	ABI	C_75	1233	ABV
C_30	1788	ABI	C_76	1240	ABV
C_31	1792	ABI	C_77	1317	ABV
C_32	1801	ABI	C_78	1341	ABV
C_33	1802	ABI	C_79	1346	ABV
C_34	1805	ABI	C_80	1362	ABV
C_35	18	ABV	C_81	96	AC
C_36	65	ABV	C_82	125	AC
C_37	94	ABV	C_83	169	AC
C_38	123	ABV	C_84	173	AC
C_39	138	ABV	C_85	182	AC
C_40	149	ABV	C_86	247	AC
C_41	150	ABV	C_87	311	AC
C_42	194	ABV	C_88	530	AC
C_43	330	ABV	C_89	531	AC
C_44	477	ABV	C_90	1373	AC
C_45	527	ABV	C_91	1378	AC
C_46	576	ABV			

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES

Com os tratamentos empregados aos dados físico-químicos das águas subterrâneas na Planície do Recife, separadas em três aquíferos distintos, o Aquífero Beberibe Inferior (ABI), o Aquífero Boa Viagem (ABV) e o Aquífero Cabo (AC), conclui-se que:

O Aquífero Beberibe Inferior, constituído predominantemente por arenitos quartzosos continentais com intercalações de silte e argila, tem água predominantemente mista sódica (40%), de um ambiente cloretado sódico, sem mudanças significativas desde 1966, encontrando-se, atualmente, mais outros cinco tipos de água.

Classificadas para irrigação, as águas deste aquífero correspondem a cinco tipos, sendo a Cl-S1 predominante com 62% de todas as águas, indicando baixos riscos de sódio e de salinidade, podendo ser utilizadas para irrigar a maioria das culturas, na maioria dos solos.

A maioria das águas deste aquífero são potáveis, dentro dos limites de potabilidade dos elementos, segundo a Organização Mundial de Saúde. Estando, a condutividade elétrica com 79% dos valores abaixo de $500\mu\text{S}/\text{cm}$, o pH com 85% dos valores entre 6 e 8, o cálcio e o sódio com 97% das concentrações abaixo de $200\text{mg}/\text{L}$, o cloreto com 97% das concentrações abaixo de $250\text{mg}/\text{L}$, e o bicarbonato com 100% das concentrações abaixo de $500\text{mg}/\text{L}$. Ainda, com relação ao pH, apenas 9% das águas são consideradas ácidas e 6% consideradas alcalinas, não oferecendo muitas preocupações quanto à corrosão e à incrustação.

Entre os bairros de Coelhos e São José, existe um único foco de altas concentrações de cálcio, sódio e cloreto, com altas correlações entre esses elementos (>93%), foco coincidente com um dos focos de altos valores de condutividade

elétrica que também tem altas correlações (>80%) com estes elementos. Existem dois focos de concentrações máximas de bicarbonato situados no bairro do Cordeiro e proximidades, mas sem ultrapassar o limite de potabilidade. Esses dois focos também, coincidem com os outros focos de alta condutividade elétrica, mas com baixas correlações (52,3%) entre o bicarbonato e a condutividade elétrica.

A relação iônica entre o cloreto e o bicarbonato, aparece em dois pontos com valores superiores a 20, coincidentes com os focos de altos valores de condutividade elétrica e de cloretos, equivalentes a valores da água do mar, indicando possíveis focos de contaminação com água de origem marinha.

O Aquífero Boa Viagem, constituído predominantemente por areias variegadas, argilas, limos e vasas, de origem continental ou marinha, possui água predominantemente cloretada sódica (24%), porém, no geral, considerada como mista mista, de um ambiente cloretado cálcico, com mudança na predominância dos cátions, que era essencialmente sódica nas décadas de 70 e 80, encontrando-se, atualmente, mais outros seis tipos de água.

Na classificação para irrigação, encontram-se 6 tipos de águas, sendo C2-S1 e C3-S1 predominantes em 40 e 37% de todas as águas, indicando ter baixo risco de sódio e médio a alto risco de salinidade, podendo ser utilizadas em solos com uma lixiviação moderada a solos bem drenados, tomando-se cuidados especiais contra a salinidade para cultivar plantas de fraca tolerância salina (C2) a boa tolerância (C3).

A maioria das águas deste aquífero são potáveis, dentro dos limites de potabilidade dos elementos, segundo a OMS, estando, a condutividade elétrica com 43% dos valores abaixo de $500\mu\text{S}/\text{cm}$, o pH com 57% dos valores entre 6 e 8, o cloreto com 87% das concentrações abaixo de $250\text{mg}/\text{L}$, o sódio com 89% das concentrações abaixo de $200\text{mg}/\text{L}$, o bicarbonato com 98% das concentrações abaixo de $500\text{mg}/\text{L}$, e o cálcio com 100% das abaixo de $200\text{mg}/\text{L}$. Ainda, com relação ao pH, apenas 9% das águas são consideradas ácidas, porém, 39% das águas são consideradas alcalinas, oferecendo uma certa preocupação quanto à corrosão e

à incrustação.

Existem três focos, situados, um no bairro do Recife antigo e dois no bairro de Boa Viagem, coincidentes de altas concentrações de sódio, de cloreto, e de condutividade elétrica, que mantêm, entre si, altas correlações (>98,5). A relação iônica entre o cloreto e o bicarbonato, mostra que, um dos focos do bairro de Boa Viagem, apresenta, além das altas concentrações dos elementos supracitados, valores superiores a 20, equivalentes a valores da água do mar, indicando possível foco de contaminação com água de origem marinha neste bairro.

O Aquífero Cabo, constituído predominantemente por arenitos grosseiros de matriz arcoseana, arcósios, siltitos e argilitos, possui, atualmente, água predominantemente cloretada sódica (46%), de um ambiente de água também cloretada sódica, encontrando-se atualmente mais cinco tipos de água, com mudança na predominância dos ânions, que, antes, era essencialmente bicarbonatada.

Pela classificação para irrigação, encontra-se quatro tipos de água, sendo C2-S1 a predominante em 73% de todas as águas, indicando baixo risco de sódio e médio risco de salinidade, podendo ser utilizada para irrigar plantas de fraca tolerância salina, na maioria dos casos, se houver uma lixiviação moderada do solo.

A maioria das águas deste aquífero são potáveis, dentro dos limites de potabilidade dos elementos, segundo a OMS, estando, a condutividade elétrica com 45% dos valores abaixo de $500\mu\text{S}/\text{cm}$, o pH com 64% dos valores entre 6 e 8, o cloreto com 82% das concentrações abaixo de $250\text{mg}/\text{L}$, o cálcio e o sódio com 91% das concentrações abaixo de $200\text{mg}/\text{L}$, e o bicarbonato com 100% das concentrações abaixo de $500\text{mg}/\text{L}$. Medidas de pH mostram que, apenas 9% das águas são consideradas ácidas, e 27% consideradas alcalinas, com poucos riscos quanto à corrosão e à incrustação.

No bairro do Pina, existe um foco coincidente de altíssimas concentrações de cálcio, de sódio, de cloreto, e de condutividade elétrica, que mantêm, entre si, altas correlações

(99,9 e 100%). A relação iônica entre o cloreto e o bicarbonato, mostra que este foco, além das altíssimas concentrações dos elementos supracitados, apresenta valores superiores a 20, que corresponderiam a valores da água do mar, indicando possível foco de contaminação com água de origem marinha.

A análise de agrupamento mostra que, apesar das diferenças de classificações dos três aquíferos e dos prováveis focos de contaminação com água de origem marinha, existe, à uma correlação de 95%, grandes similaridades entre eles, agrupando os seus poços em 3 grandes grupos que, mesmo assim, estão misturados com uma correlação entre eles de 82%. Ou seja, as águas dos aquíferos da Planície do Recife são similares, podendo ser consideradas, no geral, como um único tipo, de boa qualidade para o consumo humano e para a irrigação.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por tudo, pois sem ele nada teria sentido.

Aos meus pais, Waldir e Ciçône, por serem quem são, amigos, incentivando, acreditando e dando subsídios para a minha formação profissional e pessoal.

À minha esposa, Valéria, pela sua paciência, crédito, incentivo, amor e horas/dias sacrificados para a conclusão deste trabalho.

Aos meus irmãos, Cristina, Ciçône, Orlando e Luciano, pela amizade e união que sempre tivemos.

Ao International Development Research Center (IDRC) do Canadá pela oportunidade em participar do Projeto HIDROREC e pelo constante apoio financeiro.

Ao CNPq, pela ajuda financeira através da bolsa de estudo.

Aos meus orientadores, meu pai, Prof^a. Marlúcia e Prof. Franklin, pela aceitação da minha orientação, dedicação e orientação profissional e pedagógica, além dos conhecimentos a mim repassados.

À equipe de trabalho do Projeto HIDROREC, Jackson, Adson, Alexandre, Maurício e Almir (meu primo), pelo esforço inicial e discussões, propiciando bases para o desenvolvimento deste trabalho.

Às empresas perfuradoras de poços da RMR por cederem gentilmente os dados dos poços por elas perfurados, sem os quais, seria impraticável o trabalho.

Aos proprietários dos poços, pela compreensão dos objetivos do trabalho e colaboração no acesso aos poços.

À equipe do Laboratório AGROLAB, Prof. Viana e Dra. Vânia, pelas análises físico-químicas efetuadas em tempo hábil e pelas discussões sobre a teoria.

Aos meus amigos de pós-graduação, em particular a René Lima de Castelo Branco, Mônica Pimenta de Castelo Branco, José de Assis Ferreira, Wilton José Silva da Rocha, Alexandre Vasconcelos e Carlos Aguiar, pela união e discussões durante o curso, além da amizade cultivada nos dias de hoje.

Aos meus amigos de trabalho, em particular a Luciano Álvaro Maia Gomes, Porfírio Sales Neto, Fernando Antonio Carneiro Feitosa, Gilberto Möbus, Carlos Eduardo Sobreira Leite, Nelson Paiva Raulino de Souza e Antônio Ribeiro Zaranza, pela amizade cultivada, companheirismo profissional e discussões sobre este trabalho, além do incentivo para a conclusão do mesmo.

Ao meu Gerente de Departamento, Antônio Ribeiro Zaranza e ao ex-Diretor Técnico, Manoel Pereira, pelo crédito a mim depositado e constantes batalhas nas tentativas frustradas de minha liberação junto à Instituição para prosseguimento e conclusão deste trabalho.

Ao amigo Gilberto Möbus pela importante colaboração neste trabalho, discutindo a teoria estatística, os resultados e as conclusões, além da ajuda computacional, da revisão do texto final e repasse de conhecimentos.

À amiga Lúcia Brito, pelo gentil trabalho de digitalização da minha área de estudo.

Ao amigo Carlos Eduardo S. Leite, pela ajuda computacional.

Ao amigo Nelson P. R. de Souza, pela revisão e tradução do resumo para o abstract.

Ao meu primo Almany Costa Santos, professor da UFPE, pelas sugestões, discussões e fornecimento de bibliografias, além do nosso laço de amizade.

Ao Prof. Josué Mendes Filho, do Dept.de Física da UFC, pelo incentivo e apoio juntamente com a minha orientadora, Profa. Dra. Maria Marlúcia Freitas Santiago que, mais do que orientadora, foi companheira e amiga durante toda a jornada.

À Prof^a. Ankerim Aurélia Kimmelman e Silva, do CEPAS/USP, pelas sugestões, discussões, bibliografias e incentivos dados.

A todos os meus amigos que direta e indiretamente participaram e contribuíram na elaboração deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- ALHEIROS, M.M. & FERREIRA, M.da G.V.X., 1991. *A sub-bacia Cabo. Revisão geológica da faixa sedimentar costeira de Pernambuco, Paraíba e parte do Rio Grande do Norte*. Recife, UFPE - Estudos Geológicos. Série B, Vol.10.
- ALHEIROS, M.M., FERREIRA, M.da G.de V.X., LIMA FILHO, M.F.de, 1995. *Mapa geológico do Recife. Escala 1:25.000, com Sinopse Geológica*. Convênio Carta Geotécnica da Cidade do Recife. FINEP/LSI-DEC-UFPE. Recife.
- BATISTA, R.P., 1984. *Estudo hidrogeológico da Planície do Recife. Dissertação de Mestrado*. Recife, UFPE. 607p.
- BUTLER, J.C., 1974. *Analysis of correlations between percentages*. Journal of Geological Education. p.56-61.
- CAVALCANTE, I.N., REBOUÇAS, A.da C., VERÍSSIMO, L.S., 1996. *As águas subterrâneas no município de Fortaleza, Ceará*. In: IX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Salvador, Bahia. 53-57.
- COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO-COMPESA, 1986. *Plano Diretor de Abastecimento d'Água - RMR (PDAA)*. Recife, COMPESA. 74p.
- COMPANHIA PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS-CPRM, 1994a. *Sistema de Informações para Gestão Territorial da Região Metropolitana do Recife - Projeto SINGRE, Levantamento Gravimétrico da Área Sedimentar da Região Metropolitana do Recife*. Recife: CPRM/FIDEM. 38p. (Série Cartografia Temática, 2).
- COMPANHIA PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS-CPRM, 1994b. *Sistema de Informações para Gestão Territorial da Região Metropolitana do Recife - Projeto SINGRE, Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas da Região Metropolitana do Recife*. Recife: CPRM/FIDEM. 27p. (Série Recursos Hídricos, 2).
- COSTA, W.D., 1968. *Reconhecimento geológico e hidrogeológico do Recife e municípios adjacentes*. Recife, DSE-SUDENE.
- COSTA, W.D., SANTOS, A.C., COSTA FILHO, W.D., 1991. *A superexploração e a salinização da água subterrânea na*

Planície do Recife. In: XIV Simpósio de Geologia do Nordeste. Recife, SBG. 139-142.

COSTA, W.D., SANTOS, A.C., COSTA FILHO, W.D., 1994. *O controle estrutural na formação dos aquíferos na Planície do Recife*. In: 8º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Recife, ABAS. 38-43.

CUSTÓDIO, E., 1966. *Hidroquímica*. Cap.8 del estudio de los recursos hídricos totales de los ríos Besós y Bajo Llobregat, 2º informe. Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental y Servicio Geológico de Obras Públicas. Barcelona.

CUSTÓDIO, E., 1974. *Contribuciones al conocimiento geohidroquímico de la Isla de Lanzarote (Islas Canarias, España)*. Simposio Internacional sobre Hidrologia de Terrenos Volcánicos. Gobierno Español-UNESCO-PNUD. Arrecife de Lanzarote.

CUSTODIO, E. & LLAMAS, C., 1976. *Hidrologia subterranea*. 1ª Edição. Barcelona, Omega. Tomo I.

DAVIS, J., 1973. *Statistics and data analysis in geology*. New York, John Wiley. 550p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE METEOROLOGIA-DNM, 1992. *Normais climatológicas (1961-1990)*. Brasília.

FOSTER, S. & HIRATA, R.C., 1991. *Determinacion del riesgo de contaminacion de aguas subterráneas. Una metodologia basada en datos existentes*. CEPIS. Technical Report (OPS-OMS-HPE). Lima, Peru. 81p.

FOSTER, S., HIRATA, R. C., ROCHA, G. A., 1988. *Riscos de poluição das águas subterrâneas: uma proposta metodológica de avaliação regional*. In: 5º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo, ABAS. 175-185.

FRANÇA, H.P.M.de, VASCONCELOS NETO, B.G.M., ANDRÉ, H.O., CIRILO, J.A., CABRAL, J.J.S.P., 1988. *Análise preliminar do comportamento hidrodinâmico e da intrusão marinha no Aquífero Beberibe na Região Metropolitana Norte do Recife*. In: 1º Simpósio de Hidrogeologia do Nordeste. Recife, ABAS. 59-72.

FREITAS, M.A.de & LISBOA, N.A., 1996. *Aspectos da qualidade das águas subterrâneas dos diferentes sistemas aquíferos da região de Porto Alegre-RS*. In: IX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Salvador, Bahia. 109-112.

- LANDIM, P.M.B., 1993. *Análise estatística de dados geológicos*. Publicação Didática N° 4. São Paulo, UNESP/Campus de Rio Claro.
- LIMA, C.H., 1996. *Dinâmica de salinização das águas subterrâneas na região dos Inhamuns*. Dissertação de Mestrado. Fortaleza, UFC. 83p.
- LOGAN, J., 1965. *Interpretações de análises químicas da água*. Recife, U.S.Agency for International Development. 67p.
- MARANHÃO, R.J.L., 1989. *Introdução à pesquisa mineral*. 4ª Edição. Fortaleza, BNB. 796p.
- MELO, J.G.de, REBOUÇAS, A.da C., QUEIROZ, M.A., 1996a. *Avaliação dos riscos potenciais de contaminação das águas subterrâneas na zona sul de Natal, Rio Grande do Norte*. In: IX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Salvador, Bahia. 84-87.
- MELO, J.G.de, REBOUÇAS, A.da C., QUEIROZ, M.A., 1996b. *Contaminação de águas subterrâneas na zona sul de Natal, Rio Grande do Norte*. In: IX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. . Salvador, Bahia. 88-91.
- MENEZES, M.A.S., 1992. *Ferro-bactérias em água subterrânea - Estudo de casos no Ceará*. Dissertação de Mestrado. São Paulo, USP. 82p.
- MÖBUS, G., 1987. *Análise estrutural e hidrogeol[ogica do aquífero fraturado da Formação Serra Geral - Região noroeste do Rio Grande do Sul*. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, Universidade Federal do rio Grande do Sul - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 124p.
- MOURA, F.A.P.de, 1992. *Estudo geoestatístico da qualidade das águas subterrâneas do litoral paraibano*. Dissertação de Mestrado. Recife, UFPE.
- PIPER, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Am. Geophysical. Union Trans.* 25:914-923.
- ROLIM FILHO, J.L., 1987. *Uma análise estatística da hidroquímica do aquífero da região do Recife*. Dissertação de Mestrado. Recife, UFPE. Vol.I e II.

- SANTIAGO, M.M.F. & FRISCHKORN, H., 1995. *Hidrogeoquímica*. Apostila do Curso de Pós-Graduação. Fortaleza, UFC.
- SCHOELLER, H., 1956. *Géochimie des eaux souterraines. Applications aux eaux des gisements de pétrole*. Editions Technic. Paris.
- SCHOELLER, H., 1962. *Les eaux souterraines*. Paris, Mason. 642p.
- SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DE SÃO PAULO, 1990. *Compilação de Padrões Ambientais*. São Paulo, CETESB/Governo do Estado.
- SUPERINTENDÊNCIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE-SUDENE, 1966. *A análise química de águas. Especificações Técnicas sobre Perfuração*. Recife, SUDENE/CONESP.
- SZIKSZAY, M., 1993. *Geoquímica das Águas*. Boletim IG-USP. Série Didática Nº 5. São Paulo: IGEOC-USP.
- TUBBS, D. & SILVA FILHO, E.V.da, 1996a. *Hidroquímica das águas subterrâneas da região litorânea do município de Niterói, Estado do Rio de Janeiro*. In: IX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Salvador, Bahia. 267-269.
- TUBBS, D. & SILVA FILHO, E.V.da, 1996b. *Aspectos ambientais relacionados a utilização das águas subterrâneas na região litorânea do município de Niterói, Rio de Janeiro*. In: IX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Salvador, Bahia. 270-272.
- US DEPT.OF AGRICULTURE, 1954. US Salinity Laboratory, *Handbook 60*.
- WREGW, M. & MÖBUS, G., 1992. *Análise de agrupamento em aquífero fraturado*. In: 7º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Belo Horizonte, ABAS. P.175-180.

ANEXOS

