UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEOFÍSICAS E GEOLÓGICAS

HIDROGEOLOGIA DA ÁREA PILOTO PONTA DE PEDRAS - ILHA DE MARAJÓ

Tese Apresentada por

JACYRO PIUCI

como requisito parcial à obtenção do grau em

MESTRE EM CIÊNCIAS

Na área de

GEOFÍSICA

Conferido pelo Programa de Pós-Graduação em
Ciências Geofísicas e Geológicas da
Universidade Federal do Pará

Aprovado: 14.08.79

NORBERT FENZL (ORIENTADOR) I

ALDO DA CUNHA REBOUÇAS (ORIENTADOR) II

WATERLOO NAPOLEÃO DE LIMA

Comitê de Tese

P 693 PIUCI, JACYRO

Hidrogeologia da Área Piloto - Ponta de Pedras - Ilha do Marajo, Belem, UFPa, NCGG, 1978.
143 p.

Tese apresentada ao Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas-UFPa, para obtenção do grau de Mestre em Ciências na área de Geofísica.

1. Hidrogeologia - Ilha do Marajó I. Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas(UFPa). II Título.

CDD: 551.4809811
CDU: 556.3(911.52)
(Ponta de Pedras)
(043.5)

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Dr. Norbert Fenzl pela orientação desta Tese de Mestrado, bem como as críticas e sugestões que nos ofereceu, desde aspectos gerais até detalhes que nos teriam passado despercebidos.

Ao Dr. Aldo da Cunha Rebouças por ter-nos ajudado na proposição das linhas gerais de tal tipo de trabalho.

À Dra. Elena Franzinelli pelas discussões e sugestões relacionadas com a geologia da área em estudo.

Não poderíamos deixar de registrar aqui, nossos agradecimentos sinceros a todos os integrantes do Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas que direta ou indiretamente contribuiram com a realização deste trabalho. Nossa particular gratidão ao técnico Magalhães do Laboratório de Análises de Água.

Nossos agradecimentos aos estagiários: Batista Sena, Jubal e Newton Riker e à Dalva que corrigiu a ortografia na Língua Portuguesa e pacientemente datilografou a preliminar deste trabalho.

Agradecemos à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) por arcar com os gastos dispendidos para realizarmos esta pesquisa no âmbito do Projeto Utilização dos Recursos Hídricos da Ilha de Marajó.

RESUMO

Constatou-se um aquífero pouco profundo, substancial para o desenvolvimento da região em estudo: sistema aquífero Ponta de Pedras. Esse aquífero é livre em alguns locais e semi-confinado em sua maior parte. Sua profundidade de topo máxima encontrada foi de 14,0 m, porém, em várias sondagens no ocidente da área e na sondagem em Igarapé Vilar, seu topo não foi atingido, podendo estar a mais de 16,0 m de profundidade. As profundidades de sua base e as espessuras desse aquífero são maiores que 34,0 m e 17,0 m, respectivamente, na sondagem de Mangabeira. Sua alimentação é feita principalmente por águas meteóricas. Taxas de infiltração entre 10^6 a 10^7 m^3 por dia em 1 Km^2, foram estimadas para o mês de fevereiro de 1977. Suas porosidades efetivas, estimadas entre 25% e 37%, permitiu calcular um volume de água subterrânea próximo de $250x10^6$ m^3. O coeficiente de Darcy (K) médio é de aproximadamente 200 litros por dia por centímetro quadrado do sistema aquífero.

As águas subterrâneas estudadas têm as seguintes características físico-químicas: pH sempre ácido entre 2,4 e 6,7; condutividade elétrica entre 13 a 2.000 micromhos por centímetro, sendo que as mais condutivas são as da região da bacia do Rio Tijucaquara; sílica com teor médio de 10,4 mg/l; ferro total com teor máximo de 4,0 mg/l; cálcio e magnésio com teores bastante baixos implicando em águas moles na maioria das vezes; manganês com teor máximo de 0,15 mg/l; nitrogênio e fosforo com concentrações bastante baixas. O sódio e potássio são os elementos químicos que visualizam com facilidade a variação sazonal do quimismo dessas águas.

Nos finais dos períodos chuvosos essas águas subterrâneas são menos salinizadas, por outro lado, nos períodos de pequenas precipitações até início da estação chuvosa, o excesso de sais impede a potabilidade de várias dessas águas.

O uso doméstico dessas águas está limitado normalmente pelas seguintes características: pH ácido; ferro total acima de 0,3 mg/l com máximo de 4,0 mg/l em várias delas; isentas de fluoretos; excesso de manganês em algumas delas (0,15 mg/l); excesso de

cloreto em um piezômetro.

O uso dessas águas subterrâneas na agricultura pode estar limitado em alguns locais da área onde: pH menor que 5,0; condutividades altas durante os períodos de menor precipitação; altas porcentagens de sódio (83% a 97%).

ABSTRACT

A shallow aquifer which is very important for the development of the Ponta de Pedras region has been found and studied. Most of this aquifer is semiconfined, excepted in some areas where he can be considered as beeing free. In various wells drilled in the western part of the area and also near Igarapé-Vilar, the aquifer could not be detected.

The maximum depth of the top of the aquifer reaches 14m. The depth of the base of the aquifer and its thickness exceeds respectively 34m and 17m in the well at Mangabeira. Its recharge is principally by means of meteoric water and the infiltration rate was estimated to be 10^6 to 10^7 $m^3/day/km^2$ for the month of february 1977. The effective porosity was estimated to be between 25% and 37% permiting the calculation of a volume of stored ground-water of $250x10^9$ liters. The average Darcy coefficient (K) of the aquifer system is approximately 200/l/day/cm^2.

The studied ground water has the following physical and chemical characteristics: pH always acid, between 2,4 and 6,7; electrical conductivity between 13 and 2000 µmhos/cm, the most conductive waters being from the region of the basin of the Tijucaquara River; silica with average concentration of 10,4 mg/l; total iron with very low concentration implying soft water in most of the samples; manganese with a mean concentration of 0,15 mg/l; nitrogen and phosphorous with low concentrations.

Sodium and potassium showed the best correlation with seasonal precipitation.

At the end of the rainy season the ground water shows extremly low concentrations of nearly all elements. During the period of infrequent rainfall and until the beginning of the rainy sea

son, the salinity increases in some areas and this causes the water to be non-potable.

The domestic use of these waters is normally limited by the following characteristics: pH too acid; total iron much over 0,3 mg/l with a maximum of 4,0 mg/l; lack of fluorides; excess of chloride in one well but generally very low contents of most chemical elements.

The use of these ground waters in agriculture may be limited in some parts of the area where the pH is less than 5; the conductivity too high during the dry season and when the sodium content reaches 83% to 97% (SAR).

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO . . . . . .

CAPÍTULO 1 2

1. GENERALIDADES 2

1.1. Objetivos 2
1.2. Localização da Área 2
1.3. Clima 2
1.4. Vegetação 4
1.5. Influência das Marés 5

CAPÍTULO 2 7

2. GEOLOGIA 7

2.1. Geologia Regional 7
2.2. Geologia Local 11
2.2.1. Geomorfologia 14

CAPÍTULO 3 17

3. MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO 17

3.1. Interpretação de Fotografias Aéreas 17
3.2. Sondagens Geológicas 17
3.3. Dados Sedimentológicos 18
3.4. Piezômetros 26
3.5. Poços 26
3.6. Campanhas de Campo 30

CAPÍTULO 4 31

4. OS AQÜÍFEROS 31

4.1. Considerações Sobre a Hidrologia 31
4.2. O Principal Aqüífero Ponta de Pedras 31
4.2.1. Características Gerais 31
4.2.1.1. Profundidades do Topo 33
4.2.1.2. Isóbatas 33
4.2.1.3. Isópacas 36
4.2.2. Alimentação do Sistema Aqüífero 38
4.2.2.1 Influências Mecânicas 40

4.2.2.2. Variações Sazonais da Superfície Piezométrica . . . 41
4.2.2.3. Taxas de Infiltração 43
4.2.3. Propriedades Físicas 44
4.2.3.1. Porosidade (m) 44
4.2.3.2. Coeficiente de Uniformidade (U) 47
4.2.3.3. O Coeficiente de Darcy (K) 48

CAPÍTULO 5 51

5. HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 51

5.1. Introdução 51
5.2. Atividade do Íon Hidrogênio (pH) 51
5.2.1. Reações Possíveis que Aumentam a Acidez das Águas . .
Subterrâneas em estudo 55
5.3. Condutividade Elétrica (σ) 58
5.4. Sílica 61
5.4.1. Reações Envolvendo Sílica 66
5.5. Ferro 68
5.5.1. Fontes de Ferro 68
5.5.2. Espécies de Ferro em Águas Naturais 69
5.5.3. Controle de Solubilidade do Ferro 70
5.5.4. Coleta de Amostras de Águas Subterrâneas para Me . .
dir Teores de Ferro 71
5.5.5. Teores de Ferro em Águas Subterrâneas 72
5.5.6. Ferro em Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras . . . 73
5.6. Manganês 76
5.7. Cálcio 79
5.8. Magnésio 82
5.9. Sódio 85
5.10. Potássio 90
5.11. Alcalinidade 92
5.12. Enxofre 94
5.13. Cloro 99
5.14. Bicarbonato e Carbonato 101
5.15. Nitrogênio 105
5.16. Fósforo 106
5.17. Dureza 109
5.18. Comportamento Hidroquímico das Águas Subterrâneas . .

em Função das Variações Climáticas Sazonais 112
CAPÍTULO 6 118
6. USO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 118
6.1. Tipos de Zoneamento Horizontal das Águas Subterrâneas 118
6.2. Uso Doméstico e Abastecimento Público 120
6.2.1. Características Físicas 125
6.2.2. Características Químicas 125
6.2.2.1. Ferro 126
6.2.2.2. Fluoretos 127
6.2.2.3. Nitrogênio 127
6.2.2.4. pH 128
6.2.2.5. Outras Características Químicas de Potabilidade . . 129
6.3. Uso na Agricultura 130
6.3.1. Relação entre Sódio (Na) e outros Cátions Importantes 131
7. CONCLUSÕES 135
8. BIBLIOGRAFIA 138

ÍNDICE DAS ILUSTRAÇÕES

Fig. 1.2 Mapa da Situação 3
Fig. 1.5 Variação do Nível da Água por Influência da Maré do Rio Marajó-Açu (P. de Pedras) 6
Fig. 2.1.1 Mapa Estrutural da Bacia do Marajó, Adaptado de Ludwig (1968) 9
Fig. 2.1.2 Perfil Geológico da Bacia do Marajó, Adaptado de Ludwig (1968) 10
Fig. 2.1.3 Coluna Estratigráfica Preliminar dos Sedimentos da Área de Marajó e Litorânea, Adaptado de Schaller et al. (1971) 12
Fig. 3.2 Localização das Perfurações e Perfis Geológicos . . 19
Fig. 3.3 Perfis Geológicos de 1 a 8. Localização na Fig. 3.2 20
Tab. 3.3 Análises Granulométricas de Amostras de Sedimentos da Unidade Pleistocênica. Ponta de Pedras . . . 21
Figs. 3.3 A;B;C;D;E;F;G;H Curvas Granulométricas de Amostras de Sedimentos de Ponta de Pedras. Perfis de 1 a 8 22
Fig. 3.4.1 Piezômetro (Sem Escala) 27
Fig. 3.4.2 Detalhe da Seção do Filtro do Piezômetro 28
Fig. 3.5 Localização dos Poços Escavados e Perfurados em Ponta de Pedras 29
Fig. 4.2.1 Seções Transversais do Sistema Aqüifero Ponta de Pedras. Perfis de 1 a 8 (Localização na Fig. 3.2) 34
Fig. 4.2.1.1 Mapa das Isoprofundidades do Topo do Sistema Aqüifero Ponta de Pedras. Linhas de Contorno de 2 em 2 Metros 35
Fig. 4.2.1.2 Mapa das Isóbatas do Sistema Aqüifero Ponta de Pedras. Linhas de Contorno de 2 em 2 Metros 37
Fig. 4.2.1.3 Mapa das Isópacas do Sistema Aqüifero Ponta de Pedras. Linhas de Contorno de 2 em 2 Metros 39
Fig. 4.2.2.2 Variação da Superfície Piezométrica (m) em Função da Precipitação Média Mensal (mm) . .

Desde Outubro de 1976 até Outubro de 1977 . . . 42
Quadro 4.2.3.1 Valores de d_{10}, m-me, m e me Segundo Vários Autores e Valores para o Sistema Aqüífero Ponta de Pedras 46
Quadro 4.2.3.2 Coeficientes de Uniformidade e Porosidades do Sistema Aqüifero Ponta de Pedras e Valores Encontrados através de Experiências Feitas em Areias por Hazen (1892) . . . 48
Tab. 5.1.A Análises Químicas das Águas Subterrâneas. Amostras Coletadas em Junho-Julho de 1977. Valores em Miligramas por Litro 52
Tab. 5.1.B Análises Químicas das Águas Subterrâneas. Amostras Coletadas em Outubro de 1977. Valores em Miligramas por Litro 53
Quadro 5.2 Valores de pH Medidos no Campo e no Laboratório. Amostras de Águas Subterrâneas Coletadas nos Dias 26 a 31 de Outubro e Medidos em Laboratório Dia 1º de Novembro de 1977 54
Fig. 5.2 Distribuição do pH de Amostras de Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras. Amostragem feita em Junho-Julho de 1977. Valores Medidos em Laboratório 57
Fig. 5.3 Condutividade Elétrica das Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras. Amostras Coletadas em Piezômetros em Junho-Julho de 1977. Medidas em Laboratório em Micromhos por Centímetro (Escala Log.). . . . 60
Fig. 5.3.A Condutividade Elétrica das Amostras de Águas de Poços de Ponta de Pedras em Função do Resíduo Fixo a 103 - 105°C, Miligramas por Litro (Escala Log.) 62
Fig. 5.3.B Condutividade Elétrica das Amostras de Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras Coletadas em Piezômetros na Campanha de Junho-Julho de 1977, em Função da Concentração dos Íons $Cl^{+} + SO_4^{--}$ em Miligramas por Litro (Escala Log.) 63
Fig. 5.3.C Condutividade Elétrica das Amostras de Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras Coletadas em . .

Piezômetros na Campanha de Outubro de 1977, . . em Função da Concentração dos Íons $Na^+ + K^+$ . . em Miligramas por Litro (Escala Log.) 64

Fig. 5.4 Distribuição de Isoteores de Sílica (SiO_2) em . . Miligramas por Litro. Amostras de Águas Subter . . râneas de Ponta de Pedras Coletadas em Piezôme . . tros em 26 a 30 de Outubro de 1977 67

Fig. 5.5.6 Isoteores de Ferro Total em Miligramas por Li . . tro. Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras Cole . . tadas em Junho-Julho de 1977 em Piezômetros 75

Fig. 5.5.6.1 Campo de Estabilidade para Formas de Ferro . . Sólido e Dissolvido em Função do Eh e pH . . a 25°C e Pressão de 1 Atmosfera. Atividade . . de Espécies de Enxofre 96 mg/l em SO_4^{--}. Es . . pécies de Dióxido de Carbono 1000 mg/l em . . HCO_3^- e Ferro Dissolvido 0,0056 mg/l, Adapta . . do de Hem(1970) 77

Fig. 5.6 Campo de Estabilidade de Manganês Sólido e So . . lúvel em Função do Eh e pH a 25°C e Pressão de . . 1 Atmosfera. Atividade de Espécies de Dióxido . . de Carbono Dissolvido 100 mg/l em HCO_3^-. Espé . . cies de Enxofre Ausente, Adaptado de Hem(1970) . . 80

Fig. 5.7 Distribuição dos Teores de Cálcio. Amostras de . . Águas Subterrâneas Coletadas em Piezômetros em . . Junho-Julho de 1977, em mg/l. (Escala Log) 83

Fig. 5.8 Distribuição de Teores de Magnésio nas Águas . . Subterrâneas de Ponta de Pedras em Miligramas . . por Litro. Amostras Coletadas através de Piezô . . metros em Junho-Julho de 1977. (Escala Log.) . . . 86

Fig. 5.9 Distribuição de Teores de Sódio mais Potássio . . $(Na^+ + K^+)$ nas Águas Subterrâneas de Ponta de . . Pedras, em Miligramas por Litro. Amostras Cole . . tadas em Junho-Julho de 1977. (Escala Log.) 88

Fig. 5.9.1 Variações das Concentrações de Sódio e Potás . . sio em Miligramas por Litro, em Função da Preci . . pitação Média Mensal em Milímetros 93

Fig. 5.11 Percentagem de Espécies de Dióxido de Carbono Dissolvido em Solução em Função do pH, a 25°C e 1 Atmosfera de Pressão, Adaptado de Hem(1970) . . 95
Fig. 5.12 Campos de Domínio de Espécies de Enxofre em Equilíbrio a 25°C e Pressão de 1 Atmosfera. Atividade Total do Enxofre Dissolvido 96 mg/l em SO_4^{--}, Adaptado de Hem(1970). 97
Fig. 5.12.1 Distribuição de Teores de Sulfato (SO_4^{--}) nas Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras. Amostras Coletadas através de Piezômetros em Junho-Julho de 1977, em Miligramas por Litro. Escala Log. 98
Fig. 5.13.A Distribuição dos Teores de Cl^- nas Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras. Amostras Coletadas através de Piezômetros em Junho-Julho de 1977, em Miligramas por Litro. Escala Log. . . 102
Fig. 5.13.B Distribuição dos Teores de Cl^- nas Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras. Amostras Coletadas através de Piezômetros em Outubro de 1977, em Miligramas por Litro. Escala Log. . . . 103
Fig. 5.14 Distribuição dos Teores de Bicarbonato (HCO_3^-) nas Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras, em Miligramas por Litro. Amostras de Águas Coletadas através de Piezômetros em Junho-Julho de 1977 107
Fig. 5.16 Percentagens de Espécies de Fósforo Total Dissolvido em Solução em Função do pH, a 25°C e 1 Atmosfera de Pressão, Adaptado de Hem(1970) . . 108
Quadro 5.17 Comparação entre a Dureza das Águas do P24 e P38 e suas Respectivas Concentrações de Elementos Químicos que Controlam suas Durezas . . . 110
Fig. 5.17 Distribuição da Dureza, em mg/l de $CaCO_3$ das Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras. Amostras Coletadas através de Piezômetros em Junho-Julho de 1977, Escala Log. 111
Fig. 5.18.A Evolução Química das Águas Subterrâneas no Poço PP01 em Função das Precipitações, Adapta . .

do de Fenzl e Piuci (1977) 113
Fig. 5.18.B Evolução Química das Águas Subterrâneas no . . Poço PE07 em Função das Precipitações, Adap . . tado de Fenzl e Piuci (1977) 114
Fig. 6.1 Zoneamento Horizontal das Águas Subterrâneas Ra . . sas de Ponta de Pedras. Amostras de Águas Cole . . tadas em Junho-Julho de 1977, Adaptado de Fenzl . . e Piuci(1977) 119
Quadro 6.2 Padrões de Potabilidade em Miligramas por Li . . tro, Adaptado de Azevedo Netto(1973). 121
Fig. 6.1.A Distribuição Geográfica da Relação $r\frac{SO_4}{Cl}$, em . . Miliequivalentes. Amostras de Águas Subterrâ . . neas de Ponta de Pedras Coletadas em Campa . . nhas Trimestrais de 1977. 122
Fig. 6.1.B Distribuição Geográfica da Relação $r\frac{Ca}{Mg}$, em . . Miliequivalentes. Amostras de Águas Subterrâ . . neas de Ponta de Pedras Coletadas em Campa . . nhas Trimestrais de 1977. 123
Fig. 6.1.C Distribuição Geográfica da Relação $r\frac{Cl-Na}{Cl}$, em . . Miliequivalentes. Amostras de Águas Subterrâ . . neas de Ponta de Pedras Coletadas em Campa . . nhas Trimestrais de 1977. 124
Fig. 6.3.1.A Valores de SAR para Águas Subterrâneas de . . Ponta de Pedras. Amostras Coletadas em Ju . . nho-Julho de 1977, Adaptado de Rijo e Mano . . el Filho(1972). 133
Fig. 6.3.1.B Valores de SAR para Águas Subterrâneas de . . Ponta de Pedras. Amostras Coletadas em Ou- . . tubro de 1977, Adaptado de Rijo e Manoel Fi . . lho(1972) 134

INTRODUÇÃO

Faz-se necessário o conhecimento das águas subterrâneas de uma região quando se pretende incrementar seu desenvolvimento. Por outro lado, a necessidade da formação de pessoal especializado em áreas específicas do conhecimento humano, levou a Universidade Federal do Pará, através do Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas (NCGG), com auxílios provenientes do Ministério do Planejamento e do Ministério da Educação e Cultura, a dar os subsídios financeiros para a realização desta Dissertação de Mestrado em Hidrogeologia, no âmbito do Projeto de Utilização dos Recursos Hídricos da Ilha de Marajó.

A parte oriental da Ilha de Marajó com aproximadamente 25.000 Km^2 tem seu desenvolvimento baseado essencialmente na criação de gado bovino nas planícies de campos naturais. Esses campos naturais estão sujeitos a inundações nos períodos chuvosos e por outro lado, sofrem por falta de água nos períodos de seca, implicando em grandes prejuízos com a dizimação de parte das manadas.

As águas subterrâneas dessa região são os principais recursos hídricos para a manutenção de seu desenvolvimento porém, a natureza geológica dos aquíferos pouco profundos - os mais usados - e/ou influência de marés, impedem ou limitam a utilização dessas águas subterrâneas em vários locais.

As principais pesquisas hidrogeológicas nessa região foram desenvolvidas até 1974 através do Instituto de Desenvolvimento Econômico Social do Pará, com o uso de sondagens eletroresistivas e algumas sondagens geológicas (IDESP, 1974; Tancredi, 1972 e Tancredi et al., 1975a).

A necessidade de conhecimento mais profundo e detalhado desses recursos hídricos, levou a implantação de áreas pilotos para o desenvolvimento das pesquisas - Ponta de Pedras, Soure e Salvaterra - a partir de 1975, pelo Projeto Marajó do NCGG.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é o estudo das condições de ocorrência e físico-químico das águas subterrâneas pouco profundas na região de Ponta de Pedras.

Para tanto foi necessário a realização de perfurações geológicas, instalação de piezômetros e observações sistemáticas durante o ano hidrológico 1977-1978.

Vale salientar que as pesquisas realizadas proporcionou informações para um maior aprofundamento dos conhecimentos da área em estudo, além de uma simples Dissertação de Mestrado.

1.2 Localização da Área

A área de pesquisa, abrangendo 225 Km^2 aproximadamente, distando 44 Km em linha reta de Belém, situa-se na região SE da Ilha de Marajó, tendo Ponta de Pedras como seu principal aglomerado humano.

Encontra-se delimitada pelos seguintes acidentes naturais: na parte oriental pela Baía de Marajó; ocidentalmente pelos Rios Marajó-Açu, Puxador e Canal; ao norte pelos Rios Curral Panema e da Fábrica; ao sul pelo Rio Marajó-Açu.

Suas coordenadas geográficas aproximadas, são as seguintes: Longitudes 48^{o} 48' W e 49^{o} W e Latitudes 1^{o} 12' S e 1^{o} 24' S (Fig. 1.2).

1.3. Clima

Segundo a classificação de Köppen, o clima da Ilha situa-se entre os tipos Am e Af, isto é, tropical e úmido (Tancredi et al., 1975a).

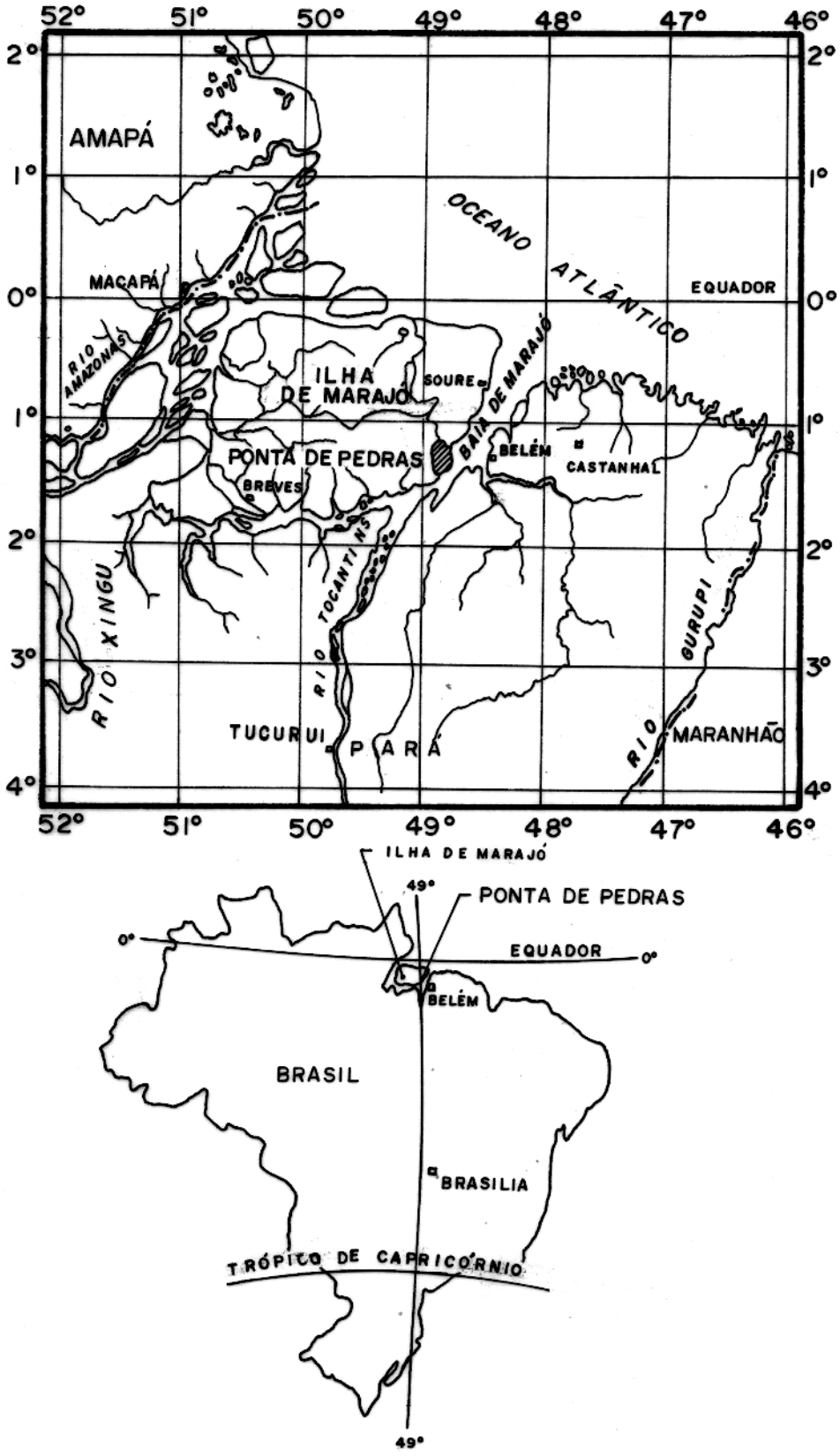


Fig. 1.2 Mapa da Situação.

A estação chuvosa desenvolve-se de janeiro até junho com chuvas intensas e contínuas; o período seco, caracteriza-se por estiagens e precipitações esparsas e se desenvolve de julho até dezembro. Entre uma estação e outra, existe em período de transição.

Os dados de pluviometria usados neste trabalho foram conseguidos através de três pluviômetros instalados da área.

A distribuição pluviométrica para a Ilha de Marajó, indica que a isoieta anual de 2.500 mm abrange a região na área em estudo (IDESP, 1974).

A média anual de temperatura igual a 27°C cobre toda Ilha de Marajó (Tancredi et al., 1975a).

A temperatura média do ar igual a 28,2°C, foi obtida com medidas feitas na área em estudo nos dias 1º, 02 e 03 de julho de 1977 (Fenzl e Piuci, 1977).

1.4. Vegetação

Através de fotografias aéreas da área em estudo, pode-se observar os vários tipos de vegetação que aí ocorrem. Verifica-se que, esses tipos de vegetação se desenvolvem em função dos diferentes terrenos, sendo que alguns tipos dessa vegetação são exclusivos das partes banhadas pelas águas de marés - "aningas" e "mangueiros" - pertencentes ao tipo mangófitas.

Embora não haja desmatamento intensivo, nota-se a destruição de florestas na parte oriental da área, com finalidades exploratórias e agropecuárias.

A nível deste estudo, podemos separar quatro principais aspectos físicos quanto à vegetação: florestas densas acompanhando a drenagem, onde existe uma influência marcante da maré enchente formando igapós; campos naturais com vegetação tipo cerrado ocupando áreas não inundáveis; capoeiras formadas por desmatamento e uma parte relativamente pequena de culturas agrícolas.

Igapós abertos e fechados são encontrados naquela região, porém aqueles de forma aberta predominam (Ranzani, 1969 e Moreira,

1976).

1.5. Influência das Marés

A drenagem da área sofre influência das marés em toda sua extensão. Essa drenagem é constituida, principalmente: pela Baía de Marajó; pelos rios que a delimita e pela Bacia do Rio Tijucaquara.

Um grande número de igarapés e pequenos furos completam a rede fluvial da área, dando um aspecto afogadiço, principalmente nos grandes refluxos de marés.

A influência das marés na área, se deve ao fato da mesma se encontrarna região da desembocadura da Calha Amazônica e às baixas altitudes. Assim, a drenagem da área em estudo tem seu fluxo normal barrado pelas marés no Oceano Atlântico. Desse modo, com o aparecimento de um degrau entre o nível do mar - mais alto - e o nível do rio - mais baixo -, a propagação de energia potencial se processa através de uma cinemática que atinge todos os rios do baixo e médio Amazonas.

Na área em estudo, essa cinemática que se propaga nesses meios materiais elásticos liquídos, é observada de um modo interessante quando se percorre o Rio Marajó-Açu até a localidade Ponta, através dos rios: Puxador, Canal e Curral Panema. As marés que se fazem sentir no Rio Puxador têm sempre sentido inverso daquelas que ocorrem simultaneamente nos Rios Canal e Curral Panema.

A figura 1.5 mostra a variação do nível d'água do Rio Marajó-Açu medida nos dias 08 e 09 de agosto de 1975 na cidade de Ponta de Pedras.

Atualmente, o projeto Hidrologia através do NCGG, instalou dois mareógrafos na área em estudo para analisar mais detalhadamente essa complexidade. Amplitudes de marés da ordem de 2,5 até 4,0 metros, têm sido registradas no mareógrafo de Ponta de Pedras.

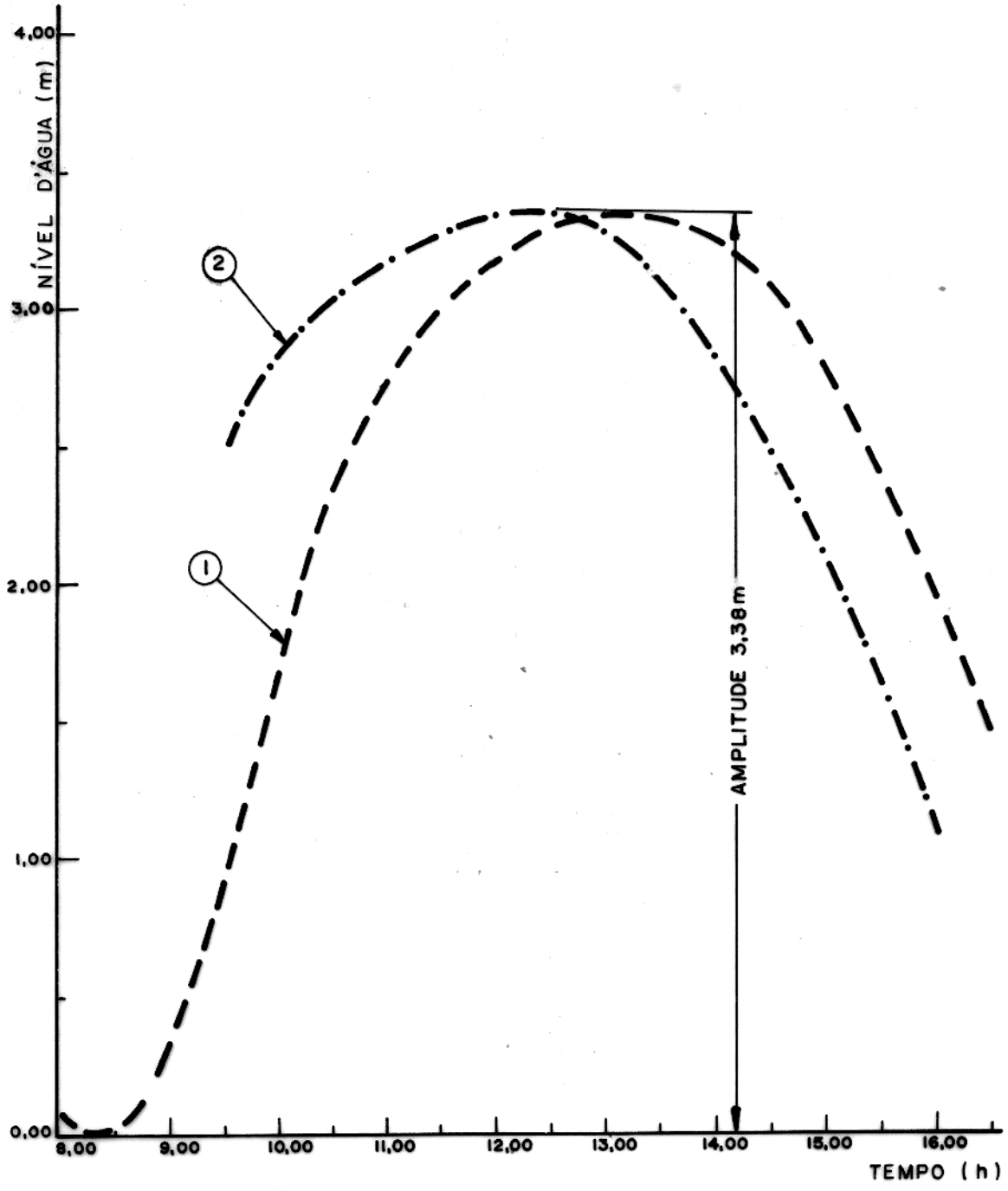


Fig. 1.5 Variação do Nível D'água por Influência da Maré do Rio Marajó-Açu (P. de Pedras).

CAPÍTULO 2

2. GEOLOGIA

Os principais trabalhos sobre a geologia da área foram realizados pela Petrobrás.

Sondagens foram realizadas entre 1926 e 1932, pelo Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil, no Estado do Pará nas regiões de Itaituba, Barreirinha e Monte Alegre; pesquisas geológicas e geofísicas foram feitas pelo Conselho Nacional do Petróleo (C.N.P) na região da Ilha de Marajó, e trabalhos realizados pela Petrobrás a partir de meados de 1954, destacam-se dentre os mais importantes (Abreu, 1973).

Mais recentemente, o Projeto Radam realizou o levantamento de Recursos Naturais da área, através de imagens obtidas em 1971/72 com Radar Gens 1000 tipo abertura sintética, banda X, em uma Aeronave Caravelle-PT-DUW, a uma altura de vôo com 11.000 metros na escala 1:250.000.

2.1. Geologia Regional

A Bacia do Marajó tem seu nome a partir da Ilha de Marajó e se situa nos estuários dos Rios Amazonas e Tocantins, entre os paralelos $1^{o}N$ e $4^{o}S$ e meridianos $51^{o}W$ e $47^{o}W$. Com aproximadamente 150.000 Km^2, desenvolve-se desde a Plataforma Continental ao norte até regiões continentais ao sul.

Seus limites geológicos-estruturais são: a noroeste o Escudo das Guianas, a sudoeste o Escudo Central Brasileiro, a oeste o Arco de Gurupá situado entre os dois escudos, e se separa da Bacia Paleozóica do Maranhão pelo Arco de Tocantins ao sul (Ludwig, 1968).

Esse mesmo autor, considera todos esses Arcos como sendo remanescentes do Arco de Marajó, de idade Carbonífera. Outros autores consideram a separação das Bacias do Marajó e Maranhão como sendo através do Alto do Guamá-São Vicente de Ferrer, os quais seriam

resultados de epirogênese Cretácea.

Trabalhos realizados pelo C.N.P. e pela Petrobrás através de geofísica e perfuração de poços profundos, foram substanciais para definir a Bacia do Marajó, tal como é conhecida hoje, como sendo formada essencialmente por duas grandes fossas tectônicas - o "graben" de Limoeiro com "strike" variando de N30^{o}W até N60^{o}W e o "graben" de Mexiana com alinhamento geral N35^{o}E.

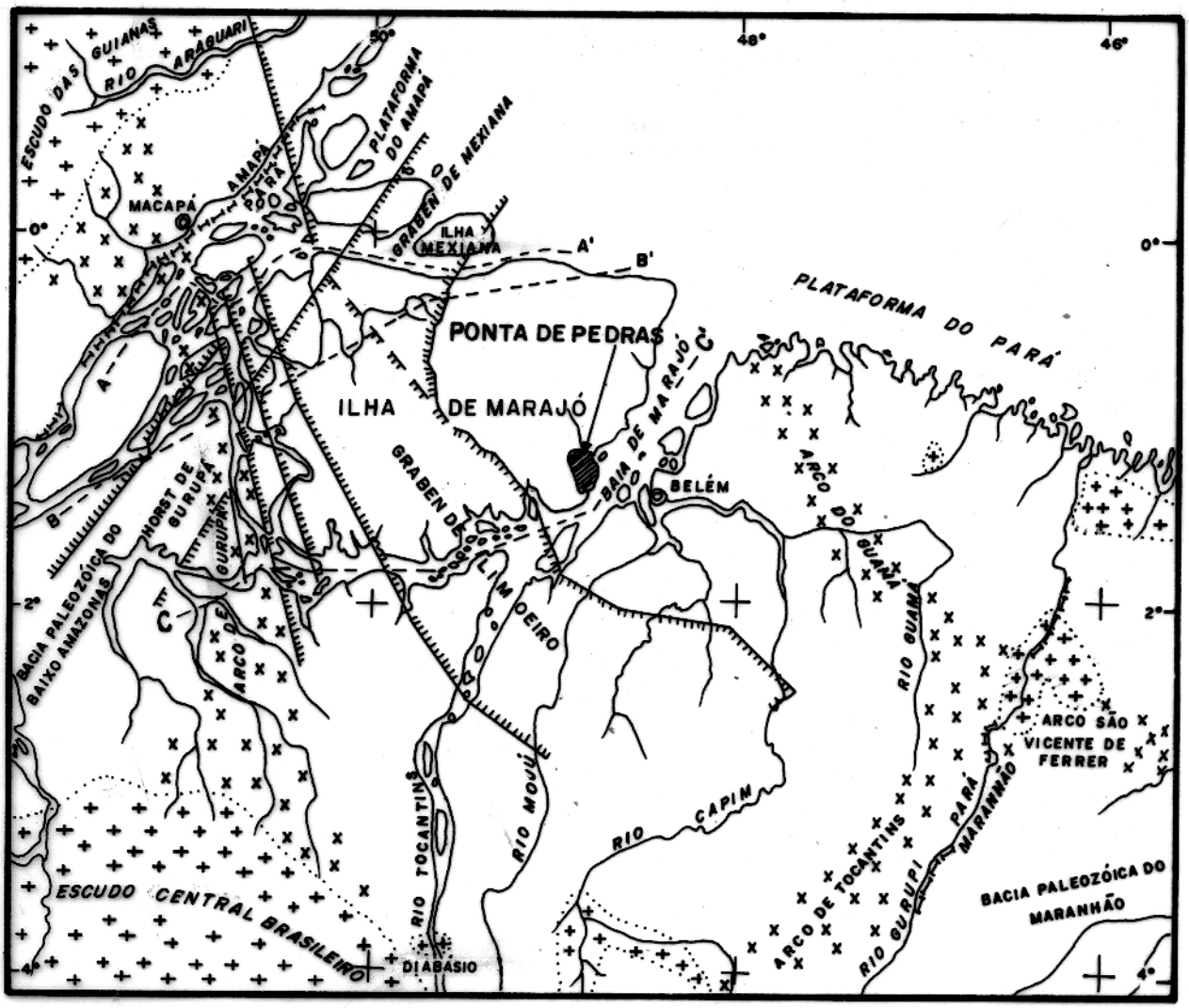
A interpretação de levantamentos geofísicos levou a distinguirem duas ramificações para o "graben" de Mexiana: a primeira se estendendo com direções gerais NE-E recebe o nome de Mexiana Leste e a segunda ramificação dita Mexiana-Oeste com direções N-NW. Esses dois "grabens" juntos (Limoeiro e Mexiana) formam o que se conhece como fossa Marajoara ou "graben" de Marajó (Resende e Ferradaes, 1971). O termo "Fossa Tectônica de Marajó" foi usado por Leonardos (1948) e por Oliveira (1951), e Amaral (1955) usou o termo "Graben de Marajó", todos referindo-se às mesmas estruturas tectônicas.

A origem da Fossa Marajoara como resultado da subsidência estabelecida por falhamentos normais que se desenvolveram durante o Cretáceo inferior e superior é defendida por Ludwig (1968) e que continuaram, segundo Resende e Ferradaes (1971), "com movimentos tectônicos relativamente insignificantes durante o Terciário".

As feições geomorfológicas e as características geológicas da região mostram que esses movimentos tectônicos não são tão insignificantes e se fazem sentir inclusive nas regiões onde sedimentos mais jovens estão se depositando.

Além daquela grande fossa tectônica, duas plataformas - do Pará e do Amapá - completam a relativamente simples estrutura regional básica daquela bacia sedimentar. O Mapa Estrutural da Bacia do Marajó, adaptado de Ludwig (1968) é mostrado na figura 2.1.1.

Verifica-se que um considerável pacote de sedimentos neocretáceos e cenozóicos, chegando a atingir 5.500 m de espessura ao longo dos "grabens", preenche os baixos tectônicos e formam uma cobertura sedimentar em toda a bacia, não dando nenhuma oportunidade de afloramento às rochas cristalinas do embasamento (Fig. 2.1.2).



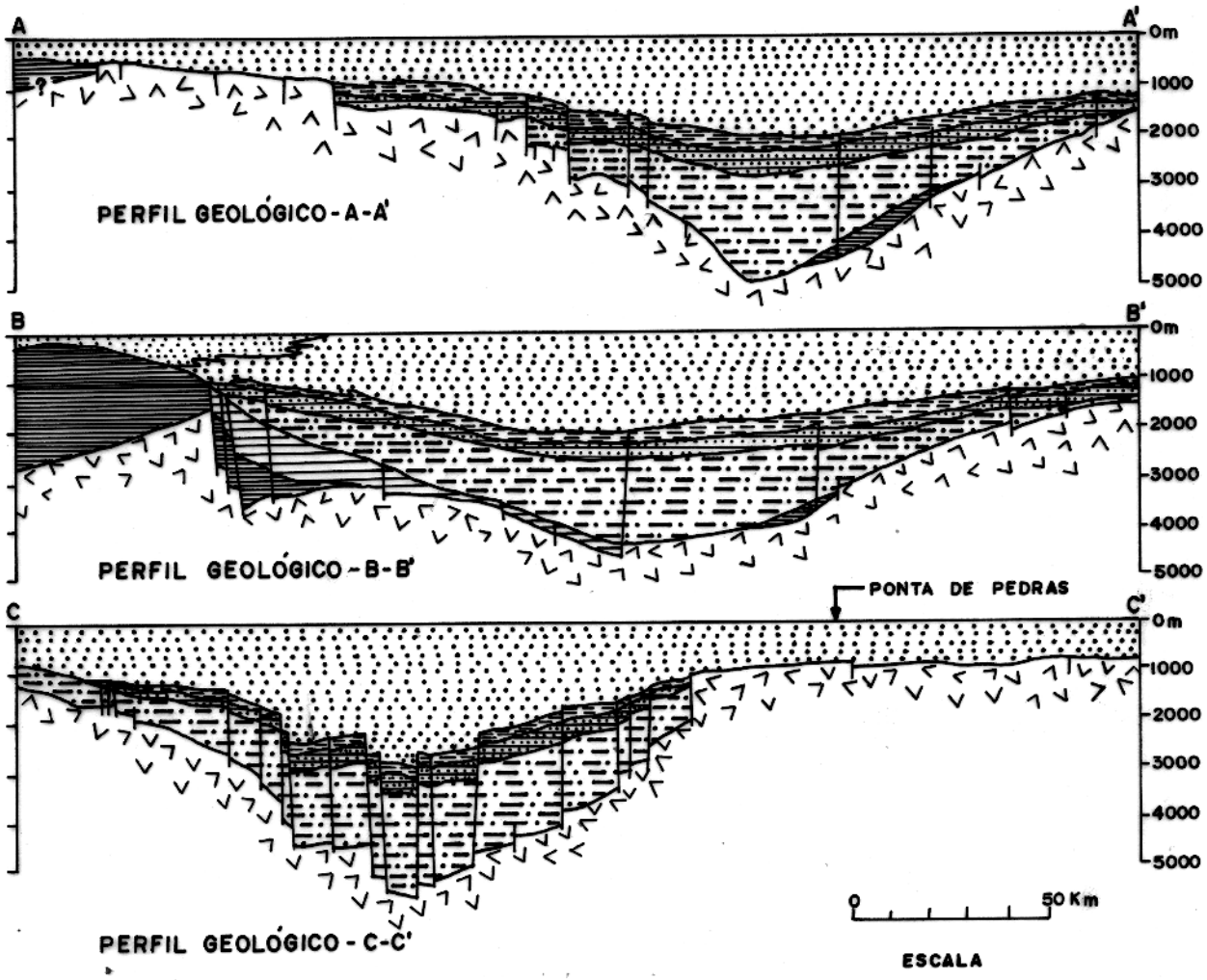
LEGENDA

- ROCHAS CRISTALINAS
- ARCOS DO EMBASAMENTO NÃO AFLORANTE
- LINHA DE PERFIL GEOLÓGICO

0 100 200 km

ESCALA

Fig. 2.1.1 Mapa Estrutural da Bacia do Marajó, Adaptado de Ludwig (1968).



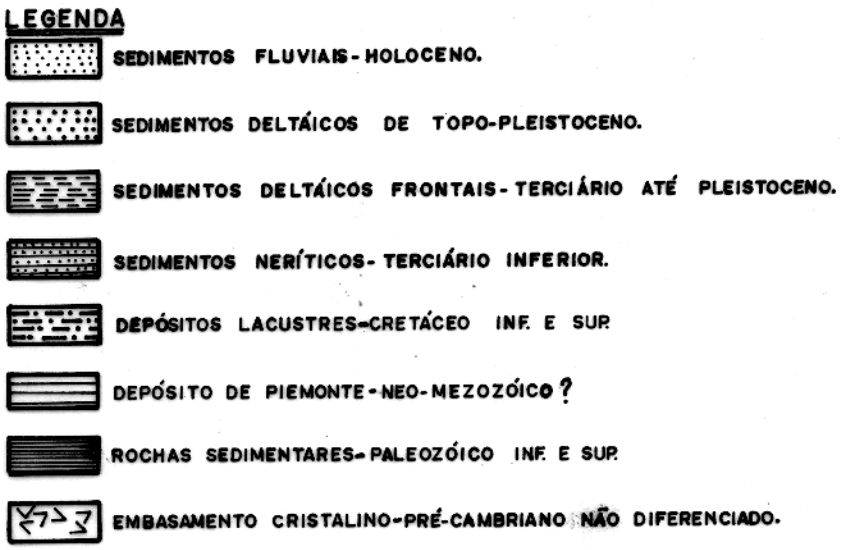


Fig. 2.1.2 Perfil Geológico da Bacia do Marajó, Adaptado de Ludwig (1968).

As modificações e adaptações que fizemos na coluna estratigráfica proposta por Schaller et al. (1971) tiveram como objetivo a compreensão da estratigrafia da área que abrange a Ilha de Marajó e parte litorânea, conforme mostra a figura 2.1.3.

Verifica-se através das figuras 2.1.2 e 2.1.3 que, dentre as formações geológicas existentes, apenas as mais recentes apresentam interesse para o estudo, isto é, pertencentes ao Grupo Pará.

O Grupo Pará compreende os sedimentos clásticos de origem fluvial com idade desde Mioceno superior até Holoceno, sendo que é dividido em duas formações: Formação Pirarucu e Formação Tucunaré.

A Formação Pirarucu, constituida por clásticos pelíticos de idade miocênica superior até pleistocênica, provavelmente não aflora na área em estudo.

Na área de estudo, as profundidades atingidas estão localizadas na Formação Tucunaré. A sua idade foi avaliada em 35.000 anos, segundo Tancredi et al. (1975b), através de datação pelo método C_{14} em sedimentos carbonosos.

Do material terrígeno que chega na desembocadura da Calha Amazônica, 82% são de origem Andina (Gibbs, 1967).

2.2. Geologia Local

A região de Ponta de Pedras situa-se geologicamente na Bacia de Marajó a 30 Km de distância, aproximadamente, do flanco norte do "graben" do Limoeiro.

A geologia dessa área é formada por um pacote de Sedimentos Deltáicos Frontais e de Topo, com 700-800 m de espessura, que se depositaram desde o Terciário até o Pleistoceno sobre o embasamento cristalino (Ludwig, 1968).

Até a profundidade que foram estudados, 34 metros no máximo, os sedimentos que compõem a geologia da área, podem ser entendidos em duas unidades principais: a mais importante delas é cons

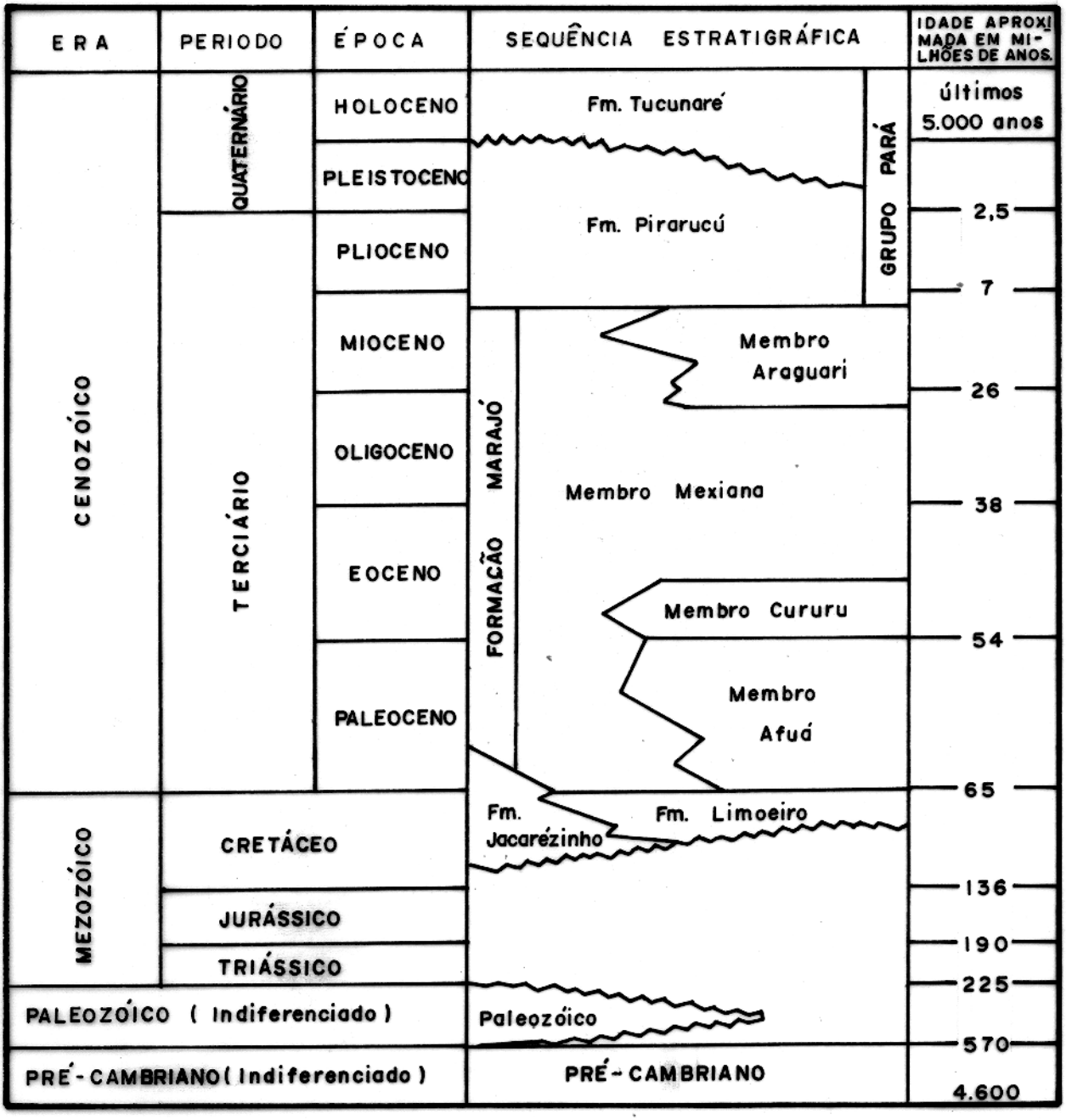


Fig. 2.1.3 Coluna Estratigráfica Preliminar dos Sedimentos da Área de Marajó e Litorânea, Adaptado de Schaller et al. (1971).

tituída por sedimentos terrígenos, depositados mecanicamente, com granulometria variando de pelitos até microconglomerados com idade provavelmente pleistocênica; a segunda unidade, de extensão limitada ao acompanhamento da rede de drenagem e às praias dos sopés das falésias, se constitui de sedimentos terrígenos holocênicos que estão sendo retrabalhados por ação intempérica e erosiva e redepositados mecanicamente nos locais de origem.

O padrão faciológico mais comum em todas as perfurações feitas pode ser definido como sendo uma sucessão de intercalações de camadas pelíticas e psamíticas, sendo que suas espessuras variam bastante no espaço.

Os corpos areno-quartzozos têm granulometrias bastante variadas entre areias finas e microconglomeráticas (alguns seixos de Qz com mais de 20 mm de tamanho foram encontrados no P30). Em geral esses sedimentos são muito mal selecionados e não possuem nenhum cimento além daquelas partes cimentadas com ferro. As cores desses sedimentos grosseiros variam bastante, podendo ser amarelada, esbranquiçada, vítrea, avermelhada, amarronsada etc.

As partes arenosas cimentadas com ferro estão restritas às camadas mais rasas, acompanhando a atual variação sazonal da superfície piezométrica, as argilas se acham da mesma maneira, em menor proporção, limonitizadas.

Outras partes de arenitos cimentados fortemente com ferro, não acompanham a variação atual do nível d'agua subterrânea, podendo ser indício de cimentações mais antigas que as primeiras descritas aqui.

Os afloramentos dos sedimentos ferruginosos (arenitos principalmente) são testemunhos da erosão diferencial que modela o atual relevo.

Os arenitos e microconglomerados ferruginosos estão presentes na área em estudo, inclusive na parte central da mesma nos Rios Humaitá e Cachoeirinha. Nesses locais, blocos de arenitos com vários metros de extensão são encontrados durante a maré vazante.

Em geral, a cimentação com ferro está presente nos estratos mais rasos através da limonitização tanto dos mais finos como dos mais grosseiros, com preferência para estes. Esse cimento fer

ruginoso se distribui de uma maneira descontínua e irregular em toda área objeto de estudo.

É possível observar em cascalhos da Praia Grande que os sedimentos se acham estratificados plano horizontalmente, às vezes com pequenas deformações em seus estratos que se intercalam em argilitos e arenitos ferruginosos.

Minerais de argila: caulinita, ilita e smectita foram detectados em análises difratométricas nos laboratórios do NCGG pelo Dr. Werner Truckenbrodt em 1978.

As argilas variam bastante de cor, desde brancas até carbonosas, vermelhas, amarelas, marrons, rocheadas, etc. A distribuição espacial dos corpos argilosos é complexa. Às vezes se assemelham a corpos lenticulares e outras aparecem como camadas milimétricas, centimétricas e maiores, intercaladas em corpos mais grosseiros.

Um corpo lenticular de caolim ocorre como matriz de uma areia microconglomerática quartzoza, na base de uma seqüência arenosa gradacional, na parte da área onde se localiza o corpo lenticular arenoso quartzozo de maior expressão.

Considera-se que os sedimentos quartenários que formam essa região com espessuras superiores a 200 m, são originados do sistema fluvial Tocantins e Amazonas (Beurlen, 1970).

Duas fraturas em sedimentos da Unidade Pleistocênica são notadas na área, uma delas na Praia de Mangabeira e outra nos blocos de arenito ferruginoso nas cabeceiras do Rio Cachoeirinha, ambas com direção aproximada NE e vizíveis apenas na maré vazante. A presença dessas fraturas mostra a ação de movimentos tectônicos atingindo a Unidade Pleistocênica.

2.2.1. Geomorfologia

A geomorfologia da área foi estudada a partir de dados de campo interpretados a partir de trabalhos específicos de Barbosa et al. (1974).

O mapeamento realizado pelo Projeto Radam revelou três

feições geomorfológicas na Ilha de Marajó: "a leste planícies colmatadas, no centro o Pediplano Pleistocênico e a oeste uma extensa região ainda em processo de colmatagem".

Na região de Ponta de Pedras, a feição geomorfológica dominante é a do Pediplano Pleistocênico. Na quase totalidade da extensão da área, o processo erosional está presente fazendo parte da formação do atual relevo plano com ligeiras ondulações.

Apenas em pequenas faixas acompanhando sempre a rede de drenagem, existe um processo de sedimentação na maioria das vezes de natureza "planície de maré", onde se acham os rios, igarapés, furos e igapós.

O processo de desmonte do Pediplano Pleistocênico, originado pelo trabalho ondulatório e de maré, realizado na costa oriental pela Baía de Marajó e em menor escala na parte NW da área além de alguns outros pontos nas margens dos rios, dá origem às falésias nesses sedimentos cenozóicos, feição típica da costa oriental da Ilha de Marajó.

Durante a transgressão Flandriana, um processo de desmonte e deposição simultânea deu origem à Baía do Marajó e toda rede de drenagem atual da área, deixando como testemunho desse processo erosional, as falésias e as "pontas de pedras" formadas diferencialmente em rochas sedimentares com diferentes resistências ao intemperismo. Desse modo temos as ocorrências conhecidas como "grés do Pará", as quais nada mais são do que arenitos e argilitos ferruginosos.

Alguns pequenos lagos em colmatagem na parte oriental da área - Antonio Vieira - são testemunhos da transgressão atual, dando origem a essa feição geomorfológica que é o atulhamento de pequenos vales existentes anteriormente ao afogamento atual.

A formação das praias Grande, Mangabeira e outras menores, está ligada diretamente às suas respectivas falésias, onde um retrabalhamento e seleção dos sedimentos grosseiros da Unidade Pleistocênica dão origem às mesmas.

Através de correlações feitas entre as falésias presentes na área em estudo e mesmas feições geomorfológicas existentes na

parte oriental da Baía do Marajó (por exemplo: falésia de Maraú na Ilha de Mosqueiro) além daquelas que ocorrem em Salinópolis; Baía de Japerica; Algodoal; São Luiz do Maranhão, e uma série de outras falésias encontradas no litoral norte, podemos dizer que a Ilha de Marajó esteve ligada ao continente até quando a drenagem atual se estabeleceu dando origem à Baía do Marajó e por conseguinte a separação da Ilha, dando aparecimento às feições geomorfológicas de hoje.

Com efeito, Barbosa et al. (1974) concluiu através de correlação entre formações geológicas e os eventos tectônicos presentes na Bacia Sedimentar do Marajó, que a "reativação Waldeniana na fossa de Marajó não cessou até o início do Holoceno, quando ocorreu a transgressão Flandriana".

Assim, as feições geomorfológicas atuais, típicas de uma área afogada, foram originadas pela última transgressão ocorrida recentemente.

CAPÍTULO 3

3. MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO

3.1. Interpretação de Fotografias Aéreas

As fotografias aéreas em escala aproximada 1:20.000 permitiram a construção de um mapa-base nessa escala para plotação e interpretação dos dados obtidos.

A partir das fotografias aéreas pode-se constatar um relevo bastante plano sem elevações topográficas acentuadas. Estruturas por ventura presentes nos sedimentos, não foram registradas na fotointerpretação, devendo-se essa dificuldade ao fato do relevo muito plano estar estabelecido em sedimentos tão jovens que ocupam a parte superior de um pacote com espessuras da ordem de 700 m.

Texturas distintas indicam diferenças entre áreas com solos predominantemente arenosos, áreas de solos argilosos com drenagens boas e áreas com influências de marés (planícies de marés) onde se acham os igarapés, igapós e um emaranhado de minúsculos furos ligando-es entre si principalmente nas marés enchentes.

Os vários tipos de cobertura vegetal são distintos nessas fotografias aéreas.

3.2. Sondagens Geológicas

As perfurações na área em estudo tiveram como objetivo o conhecimento litoestratigráfico e a instalação de piezômetros.

Para realizar essas perfurações foram usados dois tipos de equipamentos:

a)- Trado Mecânico (TM)

b)- Sonda à Percussão e Trado (SPT).

O equipamento TM mostrou-se relativamente limitado para uma geologia com argilas duras e areias ou arenitos.

O equipamento SPT com auxílio de uma bomba para circulação de lama, mostrou-se mais eficiente para realização de tais sondagens.

As perfurações de ensaio em um trabalho para prospecção de águas subterrâneas, é um método relativamente de maiores custos, porém é somente através dessas investigações de sub-superfície, além dos métodos geofísicos, que se pode selecionar com precisão os corpos geológicos mais importantes como portadores de águas subterrâneas em condições de serem usados na escala pretendida.

Mais de 50 sondagens geológicas com profundidade máxima de 34 m foram realizadas na área, conforme localização indicada na figura 3.2.

3.3. Dados Sedimentológicos

A figura 3.3 mostra os perfis geológicos de 01 a 08 construidos a partir das perfurações feitas, conforme localização mostrada na figura 3.2.

Análises granulométricas em 30 amostras de sedimentos da Unidade Pleistocênica mostram que a fração areia predomina na maioria delas. A Tabela 3.3 fornece os resultados percentuais das frações que compõem as amostras de sedimentos peneirados. Análises mecânicas dessas amostras indicam o mal selecionamento desses sedimentos (Figs. 3.3. A;B;C;D;E;F;G;H).

Correlaçãoes geológicas da área em estudo com sedimentos da Ilha de Outeiro, proximidades de Belém, são possíveis de serem feitas.

De fato, foi encontrada uma grande semelhança entre as assembléias de minerais pesados em amostras de sedimentos arenosos recentes da cabeceira do Rio Cachoeirinha, em Ponta de Pedras e da Praia Barro Branco em Outeiro (Piuci e Góes, 1978).

Os conhecimentos sobre a geologia da área em estudo poderão ser muito mais desenvolvidos, a partir de análises mais completas dos sedimentos amostrados. Além disso, existe necessidade de se correlacionar detalhadamente aquela geologia com áreas adjacen

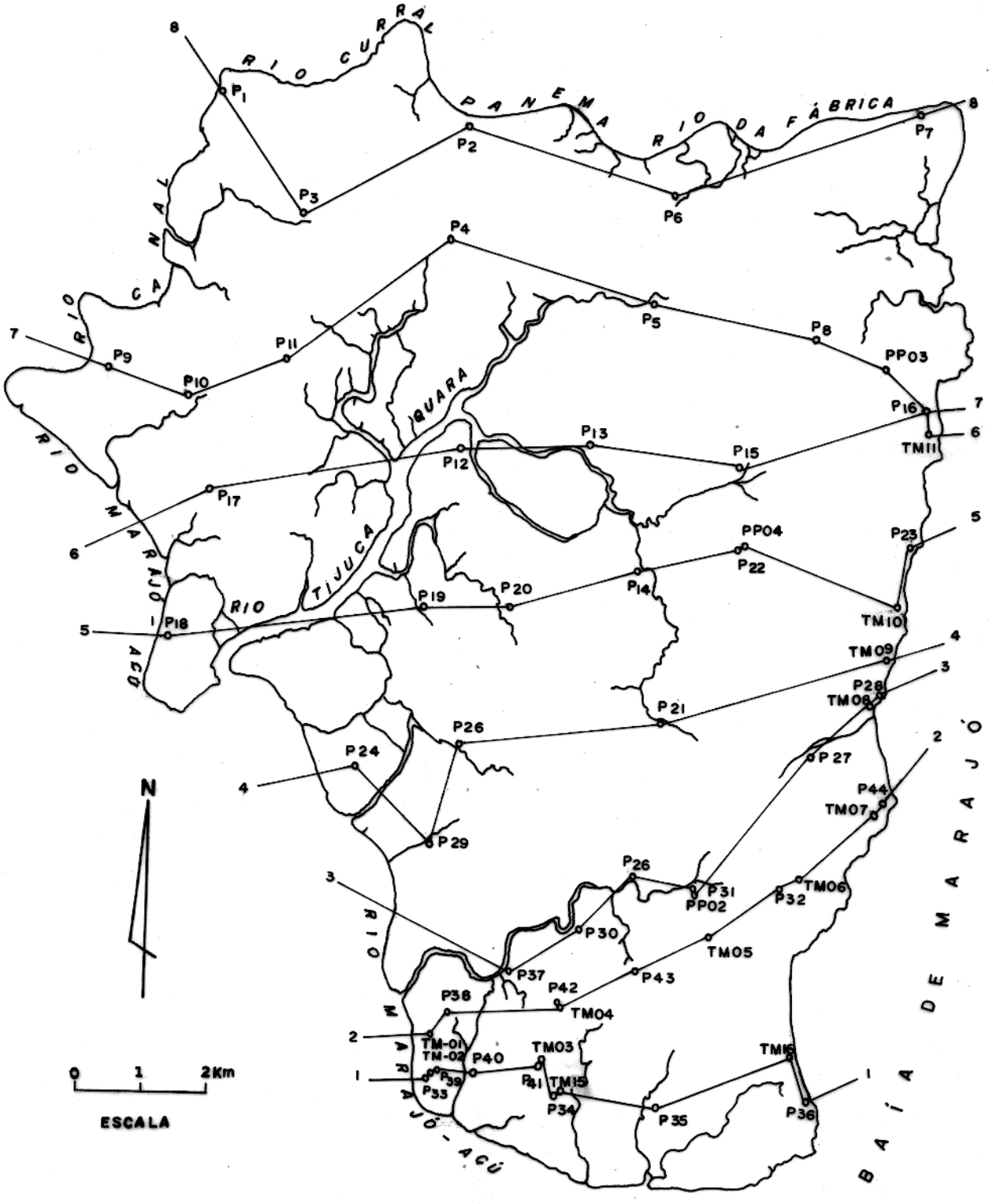
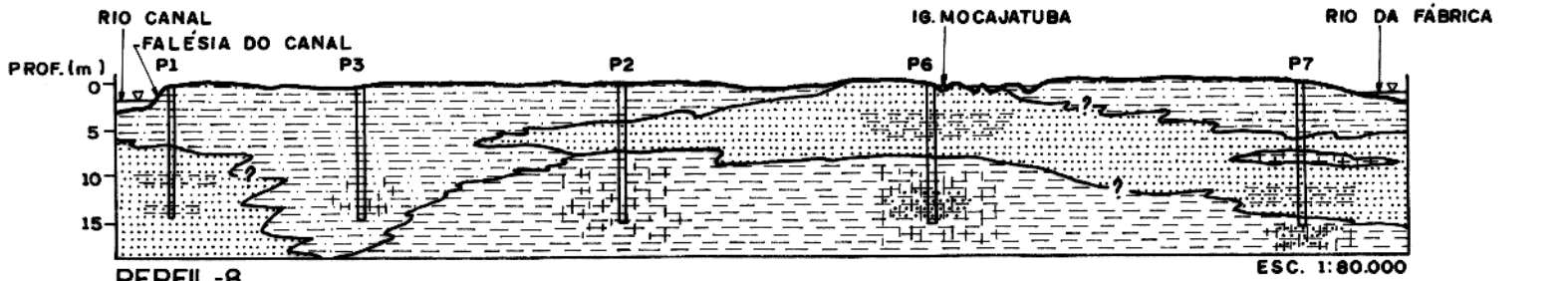
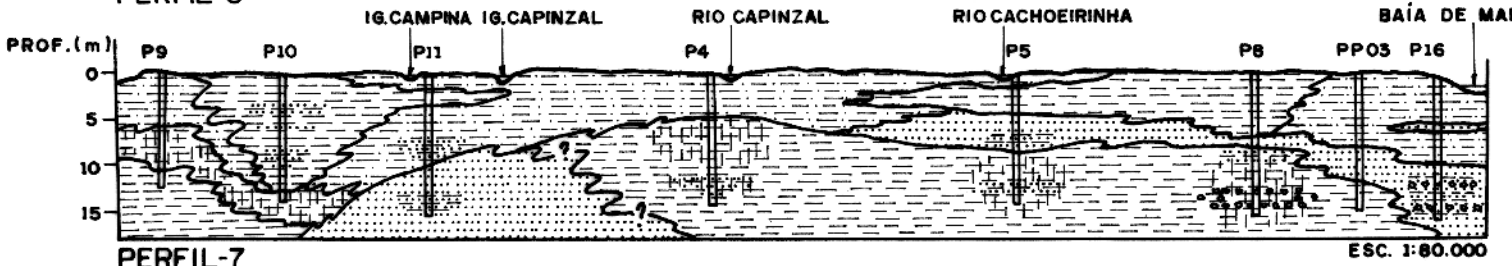


Fig. 3.2 Localização das Perfurações e Perfis Geológicos.



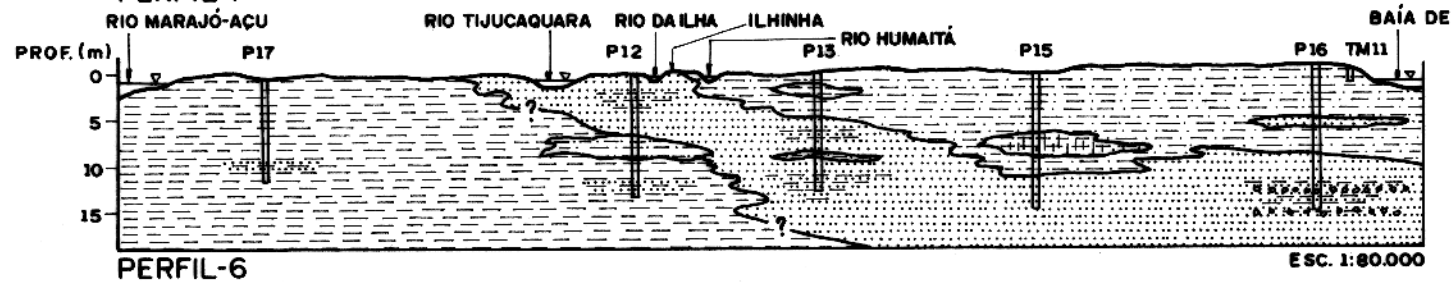
PERFIL-8

ESC. 1:80.000



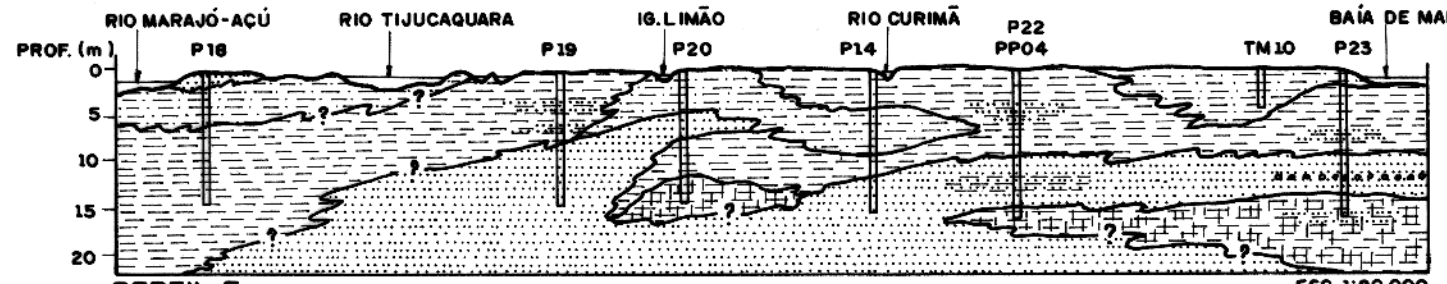
PERFIL-7

ESC. 1:80.000



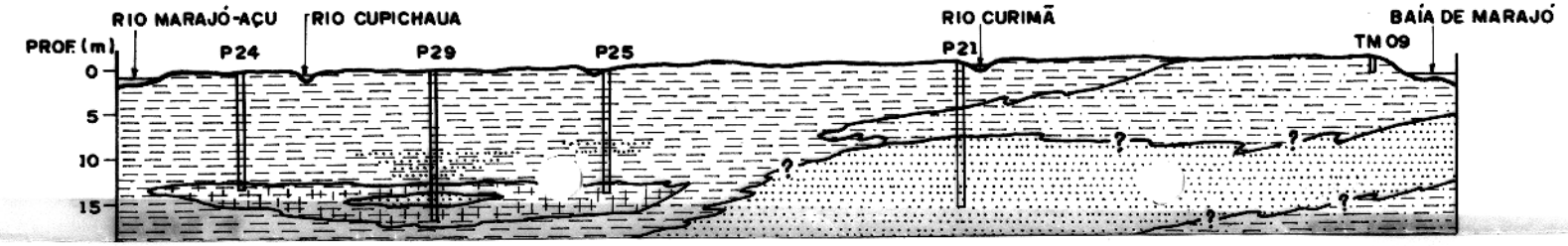
PERFIL-6

ESC. 1:80.000



PERFIL-5

ESC. 1:80.000



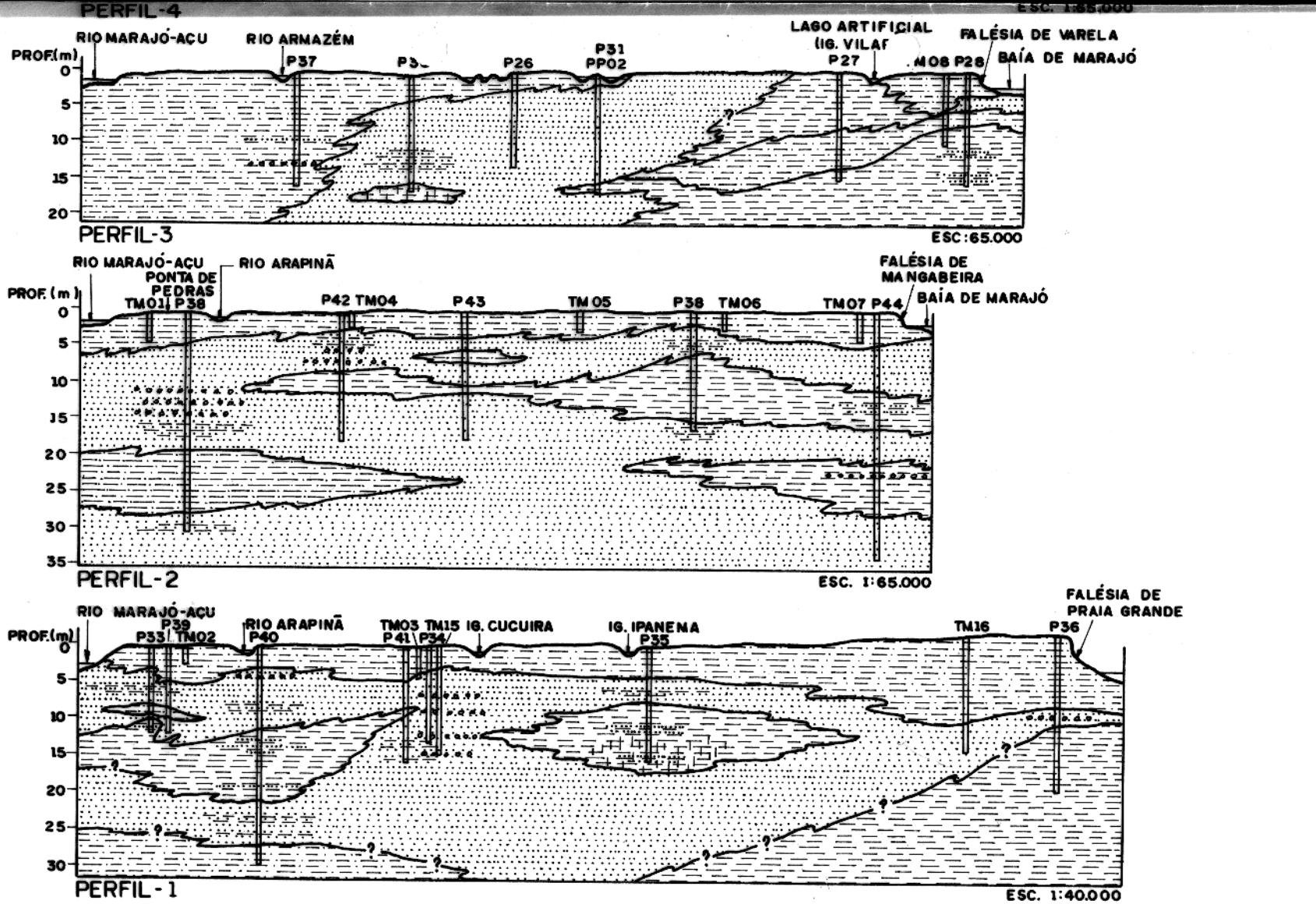


Fig. 3.3 Perfis Geológicos de 1 a 8. Localização na Fig. 3.2.

PERFIL GEOLÓGICO	NÚMERO DA AMOSTRA	FRAÇÃO		CASCALHO %	AREIA %	SILTE E ARGILA %
		FINA %	GROSSA %			
1	P36-19,60-20,00	80,30	16,49	2,56	13,93	80,30
	TM16-15,00	0,59	99,41	——	99,41	0,59
	TM15-10,00	0,05	99,93	0,06	99,87	0,05
	P34-5,30-6,00	1,04	98,89	2,54	96,35	1,04
	TM03-0,00-0,60	3,10	96,60	8,30	89,74	1,96
	TM03-4,10-4,40	1,96	98,04	8,30	89,74	1,96
	P41-6,00-6,10	5,01	95,01	4,77	90,24	5,01
	P41-8,10-8,13	1,68	98,29	——	98,29	1,68
	P40-7,00	2,94	97,10	4,16	92,94	2,94
	TM02-1,00-1,40	53,02	49,98	3,33	46,65	53,02
	P33-9,20-10,00	28,80	71,42	0,34	71,08	28,80
2	P32-3,50-3,80	9,09	90,91	——	90,91	9,09
	P38-1,00-1,10	38,65	61,34	0,09	61,25	38,65
	P38-11,20-11,25	5,25	94,72	1,37	93,35	5,25
	P38-16,00	78,24	21,78	3,08	18,70	78,24
3	PP02-12,00	0,12	99,88	——	99,88	0,12
	P31-6,80-7,00	0,50	99,50	0,08	99,42	0,50
	P30-5,10-5,40	0,22	99,62	——	99,62	0,22
4	P29-14,00,14,30	1,04	99,02	——	99,02	1,04
5	P22-13,00-14,00	1,48	98,52	——	98,52	1,48
	P14-11,80-12,00	19,09	82,06	1,55	80,51	19,09
	P20-1,50-1,60	60,10	39,31	8,44	30,87	60,10
	P20-5,75-5,95	8,03	91,84	1,83	90,01	8,03
	P19-7,50-7,75	2,25	96,91	<1,00	96,91	2,25
6	P16-10,50-10,60	1,09	98,52	0,06	98,46	1,09
	P13-7,85-8,05	5,38	94,62	——	94,62	5,38
7	P8-9,80-9,90	67,86	32,14	——	32,14	67,86
	P5-13,75-14,00	2,19	97,81	——	97,81	2,19
	P11-12,80-13,00	7,51	92,49	——	92,49	7,51
8	P1-8,20-8,40	4,94	95,06	——	95,06	4,94

Tab. 3.3 Análises Granulométricas de Amostras de Sedimentos da Unidade Pleistocênica. Ponta de Pedras.

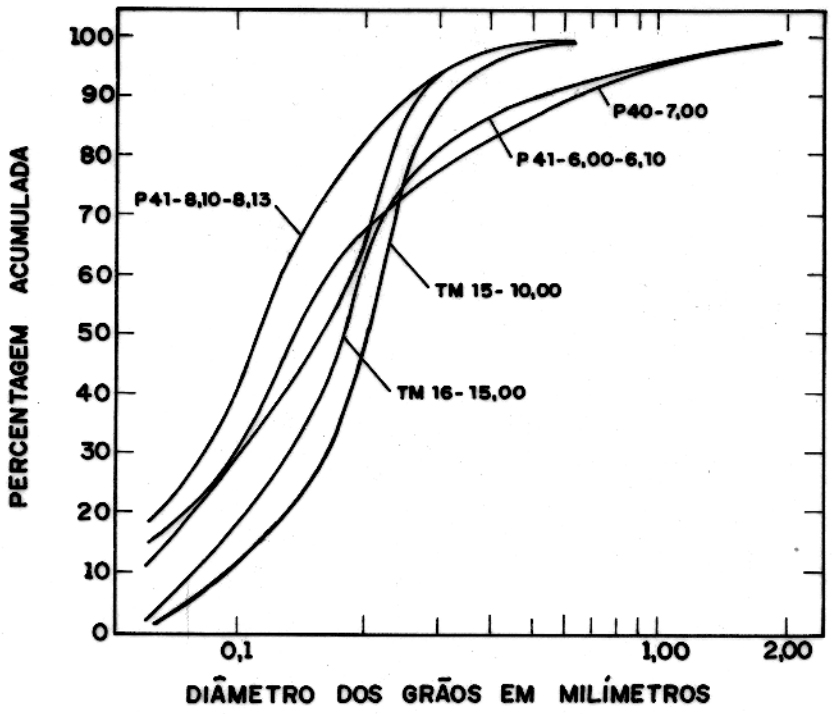


Fig. 3.3.A Curvas Granulométricas de Amostras de Sedimentos de Ponta de Pedras. Perfil 1.

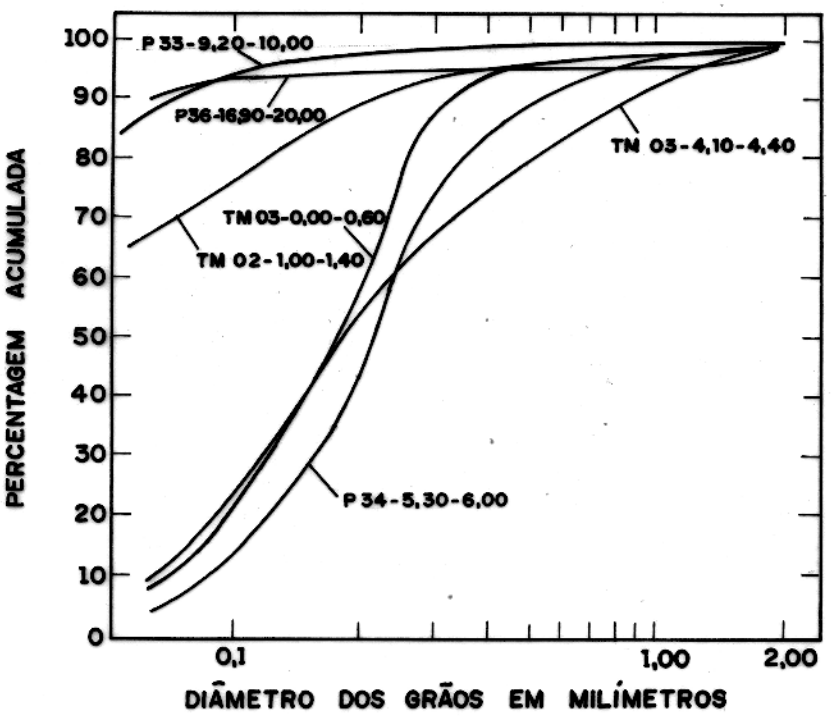


Fig. 3.3.B Curvas Granulométricas de Amostras de Sedimentos de Ponta de Pedras. Perfil 1.

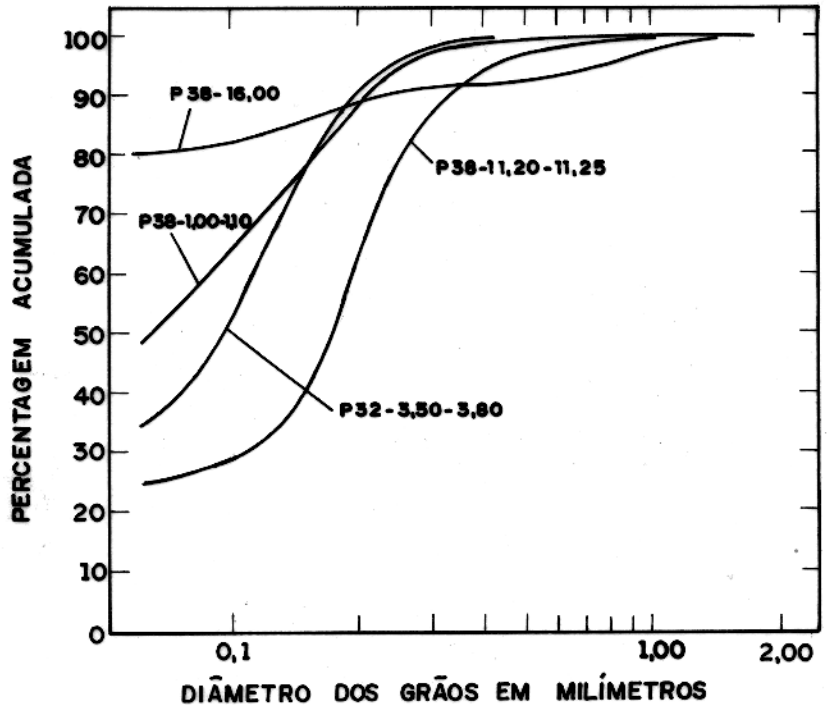


Fig. 3.3.C Curvas Granulométricas de Amostras de Sedimentos de Ponta de Pedras. Perfil 2.

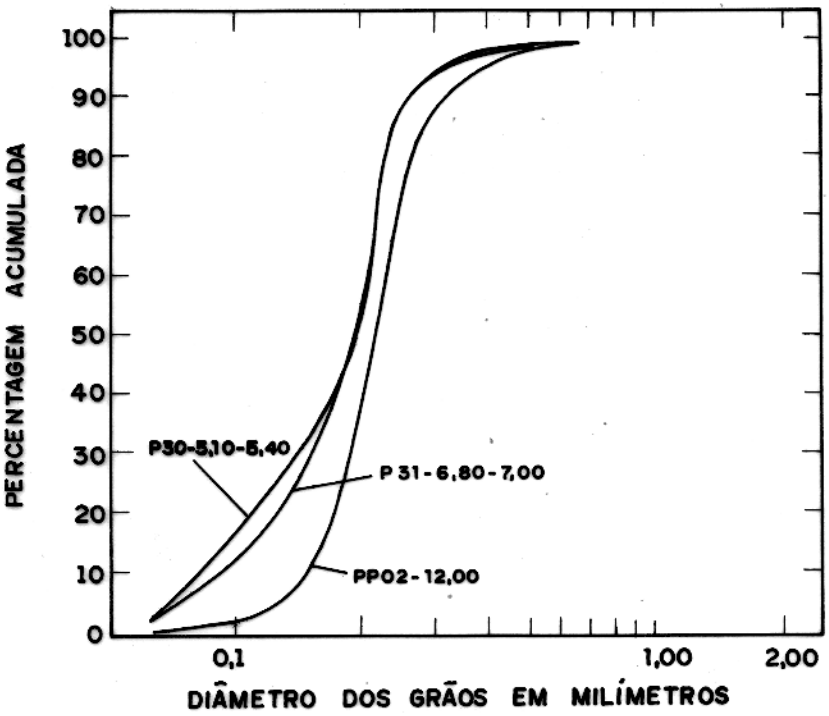


Fig. 3.3.D Curvas Granulométricas de Amostras de Sedimentos de Ponta de Pedras. Perfil 3.

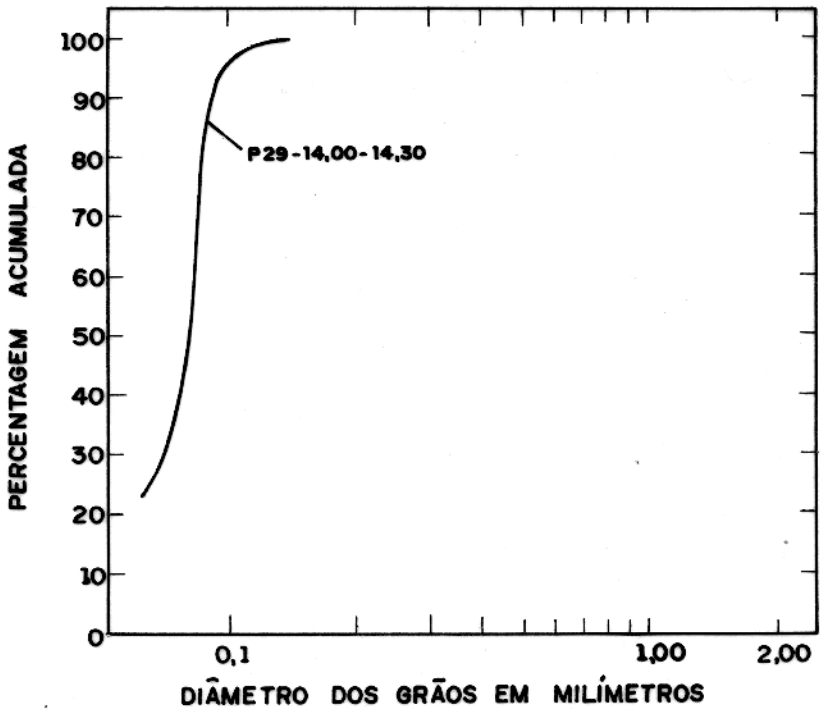


Fig. 3.3.E Curvas Granulométricas de Amostras de Sedimentos de Ponta de Pedras. Perfil 4.

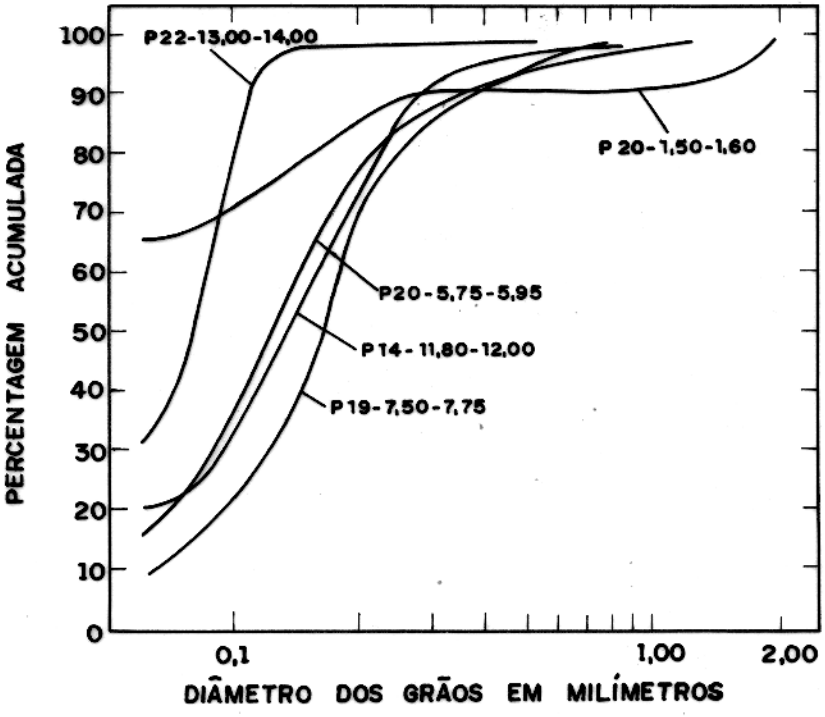


Fig. 3.3.F Curvas Granulométricas de Amostras de Sedimentos de Ponta de Pedras. Perfil 5.

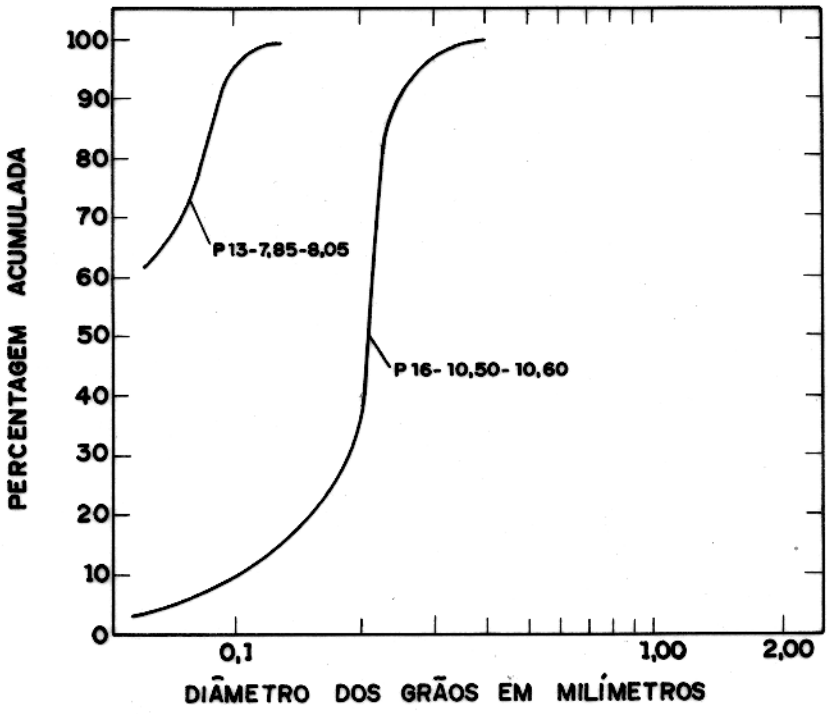


Fig. 3.3.G Curvas Granulométricas de Amostras de Sedimentos de Ponta de Pedras. Perfil 6.

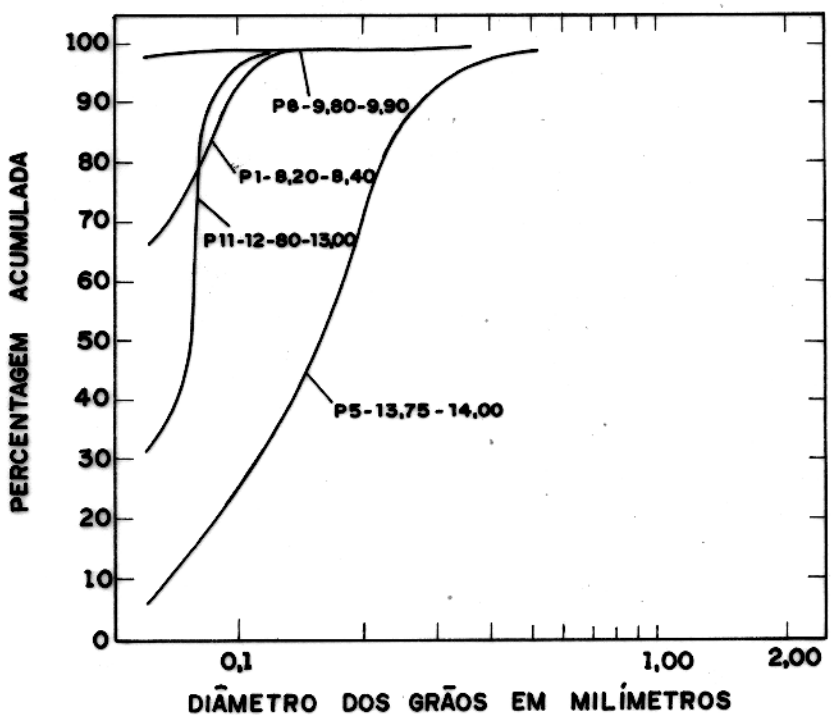


Fig. 3.3.H Curvas Granulométricas de Amostras de Sedimentos de Ponta de Pedras. Perfis 7 e 8

tes na Ilha e nas partes continentais.

As perfurações com 150 m de profundidade realizadas pela CPRM em Soure (Ilha de Marajó), no Campus da UFPa. e na Marambáia (Belém), poderão trazer informações interessantes para o correlacionamento geológico-estratigráfico entre Ilha e Continente.

3.4. Piezômetros

Para realizar o presente trabalho foram instalados na área, mais de quarenta piezômetros numa malha aproximada de 2x2,5 Km^2, como é mostrado na figura 3.2.

Esses piezômetros com profundidades médias de 10 a 15 m, estão revestidos com tubos plásticos tipo PVC com diâmetros de 1 1/2 até 04 polegadas.

Em 50% aproximadamente da zona saturada, na parte inferior, foram feitas aberturas no mesmo material para passagem das águas subterrâneas. O espaço anelar foi lacrado com concreto para impedir infiltrações diretas.

As figuras 3.4.1 e 3.4.2 mostram o piezômetro e sua secção de filtro.

3.5. Poços

O cadastramento dos poços usados pela população da área objeto de pesquisa, possibilitou a seleção de vários deles para estudo das águas subterrâneas.

O abastecimento da cidade de Ponta de Pedras é feito por poços perfurados, mas todos os outros poços para uso doméstico são do tipo escavado.

Os poços perfurados PP02, PP03 e PP04 foram construídos para ensaios de bombeamento.

Águas de alguns poços cadastrados serviram para analisar a evolução do quimismo dessas águas subterrâneas.

A figura 3.5 mostra a localização dos poços na área em

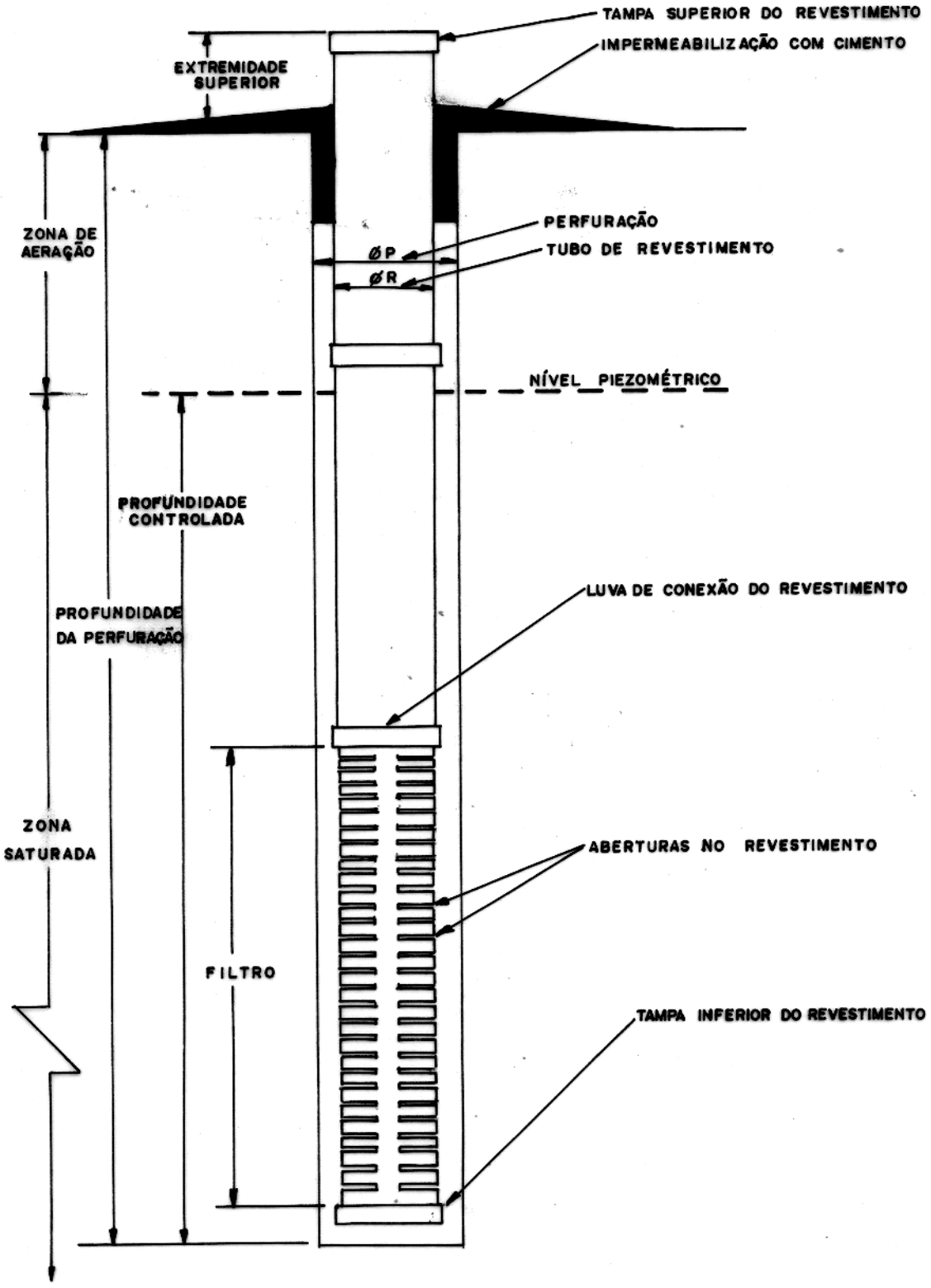


Fig. 3.4.1 Piezômetro (Sem Escala).

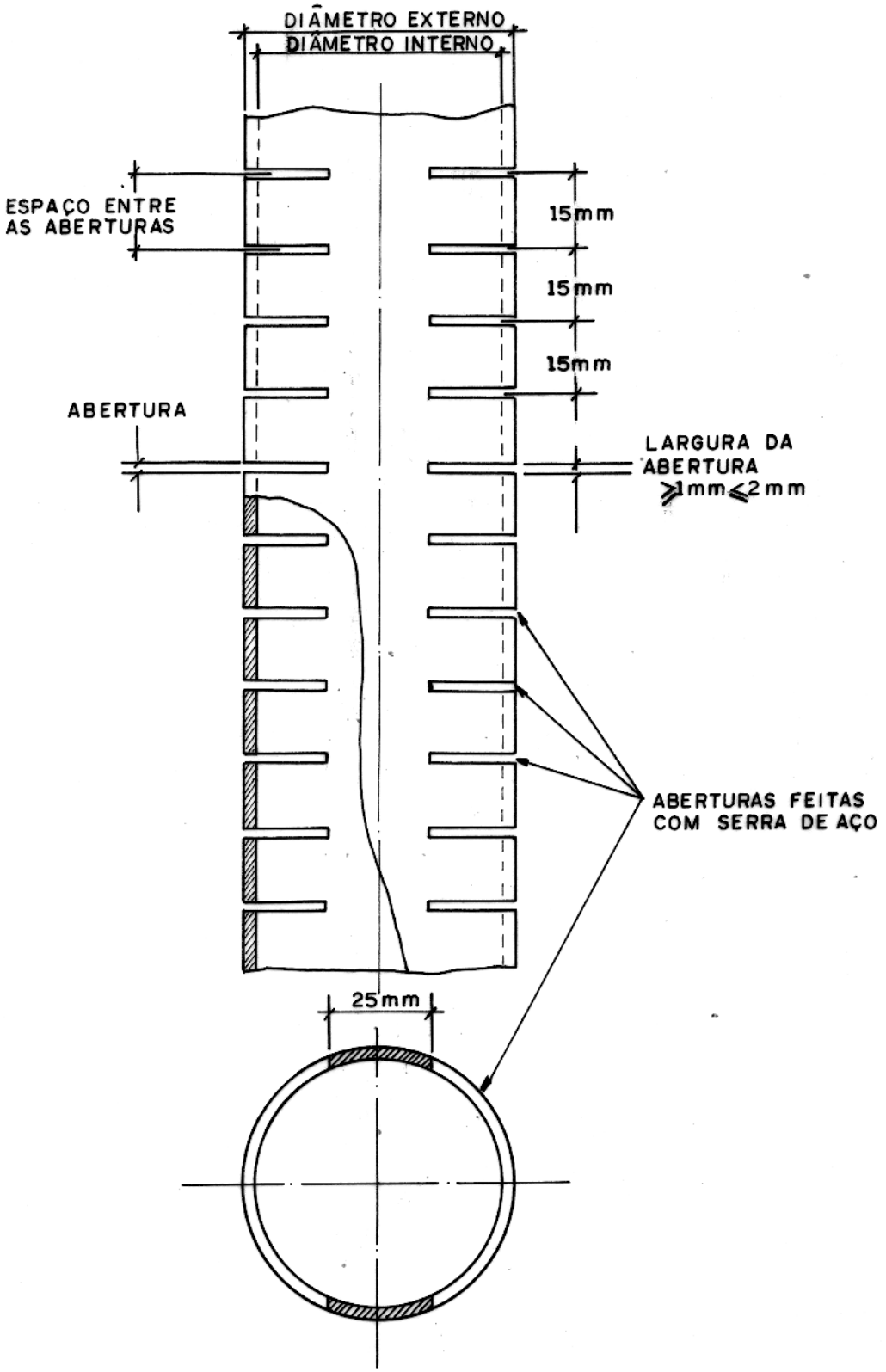


Fig. 3.4.2 Detalhe da Seção do Filtro do Piezômetro.

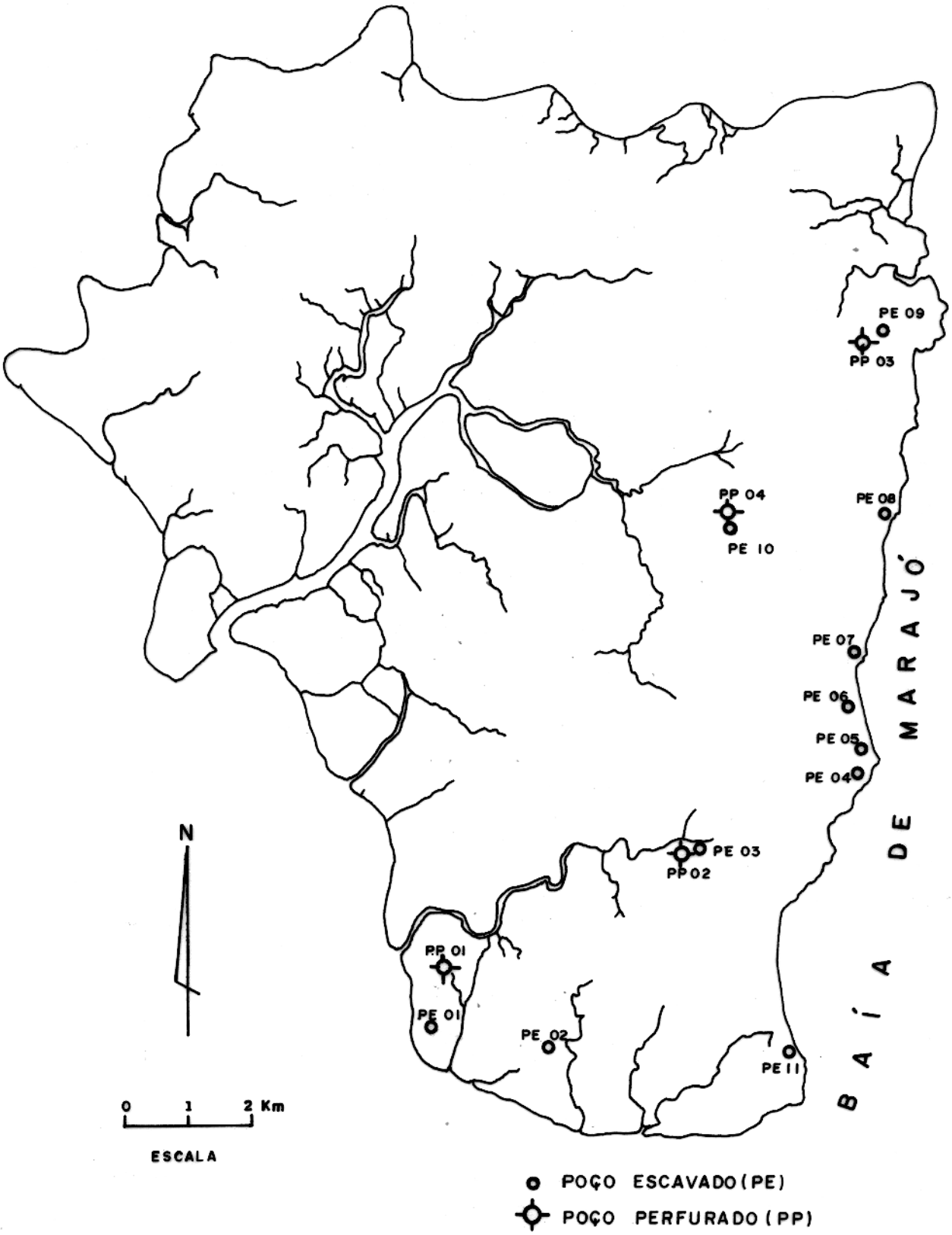


Fig. 3.5 Localização dos Poços Escavados e Perfurados em Ponta de Pedras.

estudo.

3.6. Campanhas de Campo

Campanhas trimestrais foram realizadas em um intervalo de tempo menor possível (cinco dias) para coletar águas de todos os pontos de controle. Campanhas mensais foram feitas para coletar águas de alguns pontos para efeito de estudos mais detalhados sobre a evolução do quimismo dessas águas.

Nas campanhas executadas em cada piezômetro tomamos as informações seguintes:

a)- Profundidade da superfície piezométrica

b)- Temperatura da água "in loco"

c)- Temperatura do ar

d)- pH da amostra de água

Além disso coletamos amostras de águas com 01 a 03 litros de volume nos piezômetros e poços de controle, para análise em laboratório. As temperaturas das águas e as amostras foram tomadas a uma profundidade de 01 metro abaixo da superfície piezométrica.

CAPÍTULO 4

4. OS AQUÍFEROS

Na área pesquisada somente camadas geológicas arenosas da chamada Unidade Pleistocênica (que foram perfuradas até máximo 34 m de profundidade) podem ser consideradas como aquíferos.

Esses corpos arenosos perfurados, provavelmente estão em comunicação entre si, apesar de se apresentarem complexamente no que diz respeito à situação geológica dos mesmos e de comportarem diferentes tipos de águas subterrâneas.

O sistema aquífero, denominado preliminarmente de "aquífero Ponta de Pedras", Fenzl e Piuci (1977), está sendo estudado aqui como um conjunto de corpos arenosos que formam o principal aquífero de pequenas profundidades da área pesquisada.

4.1. Considerações Sobre a Hidrologia

A distribuição pluviométrica é caracterizada por sua grande irregularidade durante o ano hidrológico. Os dados obtidos indicam que: janeiro-abril é a época mais chuvosa (com um máximo em abril); outubro-dezembro é uma época extremamente seca. Essa irregularidade porém, não parece afetar a tal ponto de compromoter as reservas do sistema aquífero considerado.

A influência das marés, considerada na seção 1.5. deste trabalho, é um fenômeno hidrológico de superfície que também participa do comportamento hidráulico do sistema aquífero.

Deve ser levado em consideração ainda, o sistema hidrológico global que regula os fenômenos naturais na região do Baixo Amazonas, principalmente.

4.2. O Principal Aquífero Ponta de Pedras

4.2.1. Características Gerais

Os estudos realizados indicaram a existência de um fácies

geológico formado por areias quartzozas com intercalações argilosas em proporções diversas que se estende de maneira irregular de sul a norte na área pesquisada. Na parte ocidental da área, até a profundidade perfurada, esse fácies arenoso não foi encontrado.

Embora esse modelo proposto seja uma aproximação da complexidade geológica que a área apresenta por causa de sua gênese - região Deltáica - é muito provável que esse corpo geológico clástico grosseiro quartzozo esteja de um modo ou de outro interligando-se de maneira que as águas subterrâneas que estão contidas nele, estão em contato entre si.

Nesse caso, é provável que no momento em que uma parte mais ou menos arenosa do sistema aquífero for solicitada a respeito da água que contém, outras partes do sistema cederão água com maior ou menor rapidez para que seja alcançado o equilíbrio quantitativo.

Essa suposição pode ser feita com ressalvas para os corpos mais argilosos, onde a velocidade das águas subterrâneas nesses meios clásticos finos não terão a mesma ordem de grandeza das partes grosseiras, para fornecer de imediato o líquido solicitado nas partes do sistema aquífero com deficiência de vazão por esgotamento.

O fato de ser constatado um certo zoneamento horizontal no quimismo das águas subterrâneas estudadas, não é suficiente para confirmar a existência de mais de um sistema aquífero devido ao fato de que os piezômetros - de onde os resultados das análises físico-químicas das águas foram conseguidos - estão instalados com suas zonas de filtro, independentemente de se ter constatado ou não a seqüência arenosa quartzoza que está definindo o sistema aquífero Ponta de Pedras.

Esse sistema aquífero é formado essencialmente por areias quartzozas muito soltas, favorecendo desse modo a porosidade e os parâmetros físicos do mesmo.

Areias quartzozas de alta pureza e completamente soltas - encontradas no P26, P30, P31 e P34 - indicam que naquela região abrangida por esses piezômetros, se encontra a parte mais importan

te do sistema aquífero do ponto de vista hidráulico.

Testes preliminares de bombeamento no PP02 indicaram vazões de 100 litros por minuto sem rebaixamento sensível da superfície piezométrica.

O sistema aquífero estudado apresenta-se aflorando nas proximidades dos piezômetros P6, P12 e P31. Na maior parte do sistema existe, provavelmente, algum grau de confinamento de intensidades diversas, porém não grandes.

As seções transversais do sistema aquífero, de sul para norte, ajudam compreender sua complexa disposição espacial bem como as relações com corpos argilosos intercalados (Fig. 4.2.1).

4.2.1.1. Profundidades do Topo

Considerando que a área se encontra em uma planitude horizontal especial, construimos o mapa das profundidades do topo do sistema aquífero a partir dos dados obtidos das perfurações geológicas (Fig. 4.2.1.1).

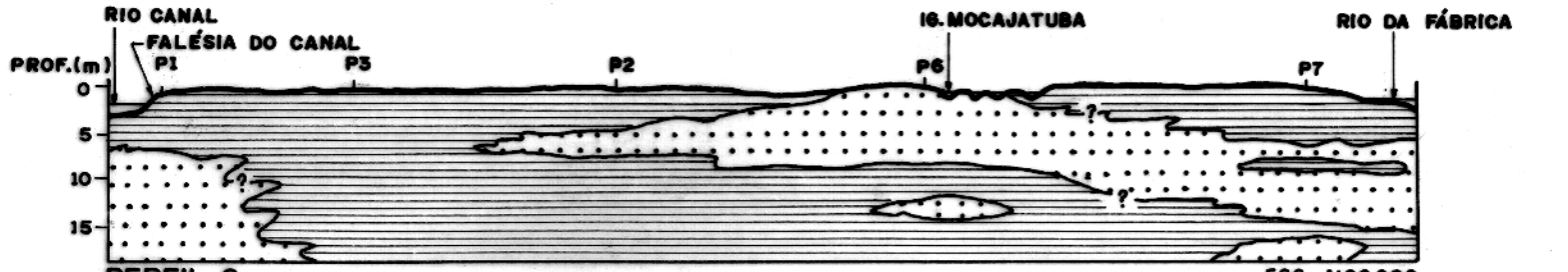
Observa-se que na parte ocidental da área em estudo e nas proximidades do P27, não existe continuação do sistema aquífero; se existir, suas profundidades de topo estarão além de 12 (doze) e 15 (quinze) metros, respectivamente.

Pelo fato de que não se constata variação da superfície piezométrica quando se perfura esses corpos geológicos, podemos dizer que o sistema aquífero é livre nas áreas onde aflora e semi-confinado no restante de sua extensão.

4.2.1.2. Isóbatas

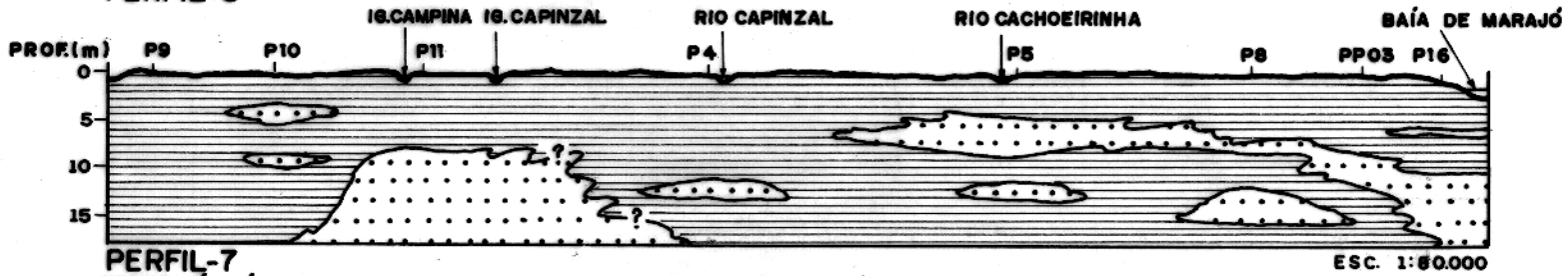
Para definir a base do sistema aquífero, valem as mesmas considerações feitas para o topo. Assim, entende-se aqui por profundidade da base, a profundidade que se perfura desde a superfície do terreno até se atingir a base do sistema aquífero, embora isso não tenha ocorrido em várias perfurações.

Cuidados devem ser observados quando se atravessa uma par



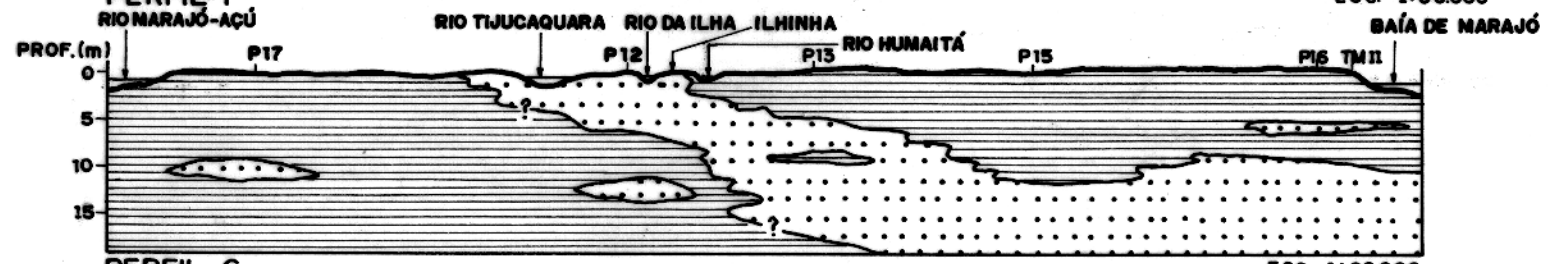
PERFIL-8

ESC. 1:80.000



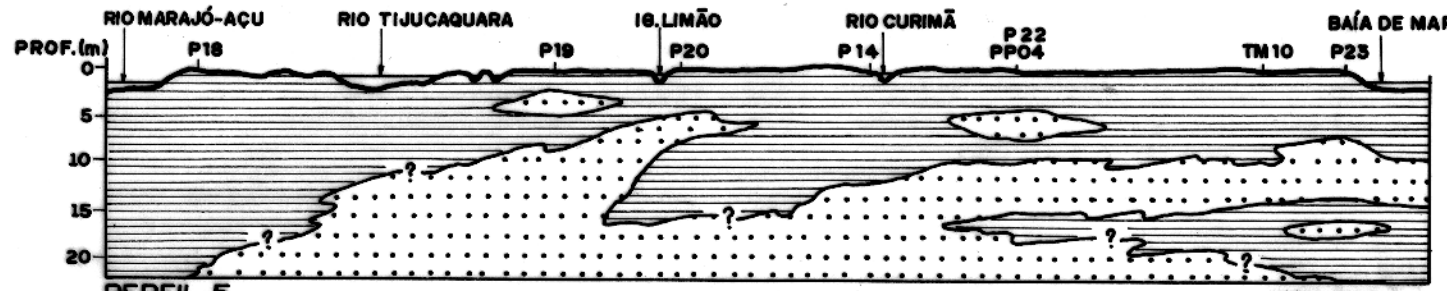
PERFIL-7

ESC. 1:80.000



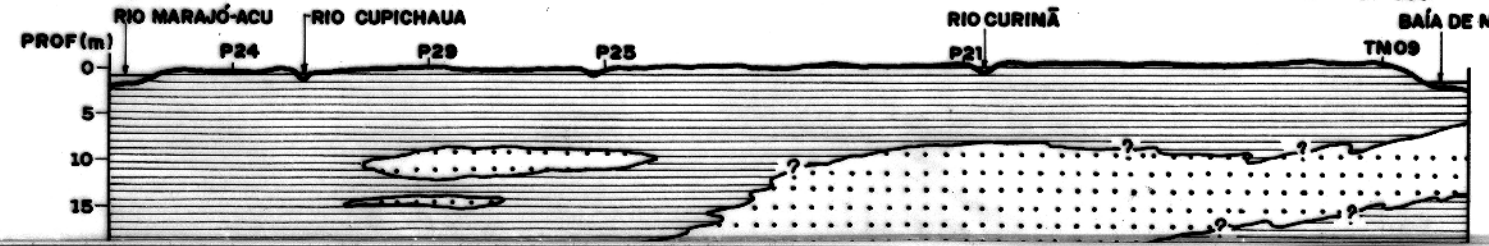
PERFIL-6

ESC. 1:80.000



PERFIL-5

ESC. 1:80.000



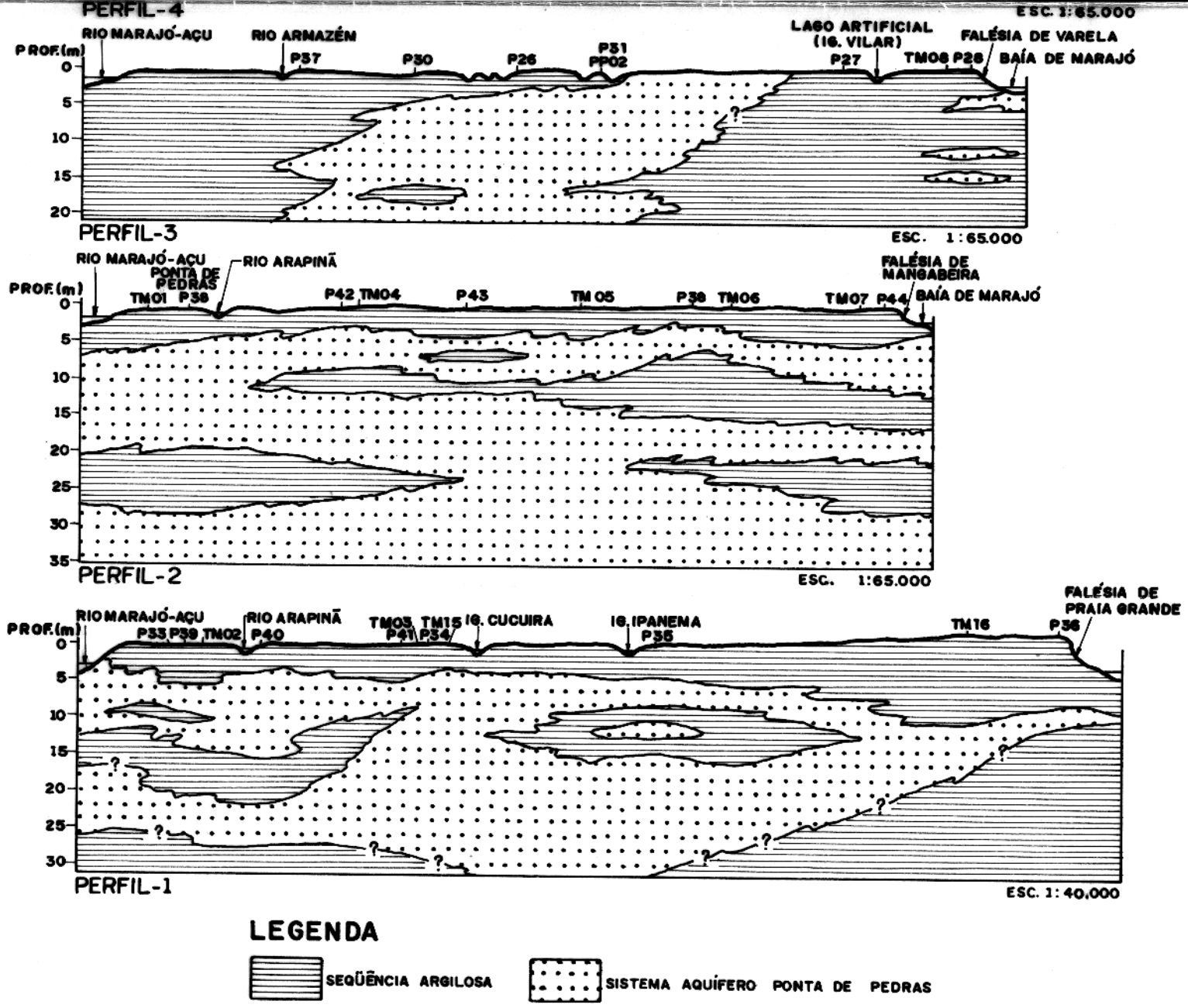


Fig. 4.2.1 Seções Transversais do Sistema Aquífero Ponta de Pedras. Perfis de 1 a 8 (Localização na Fig. 3.2).

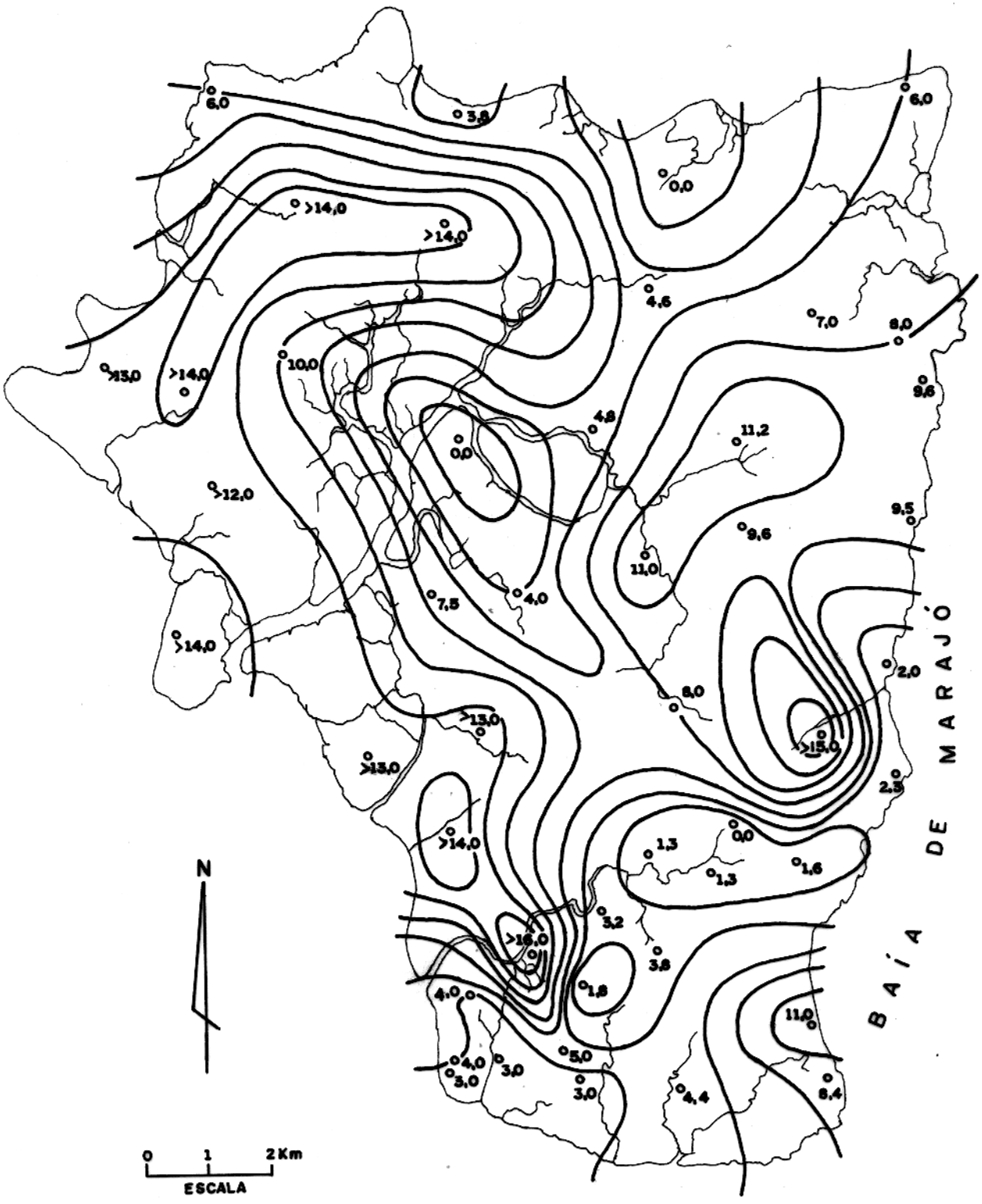


Fig. 4.2.1.1 Mapa das Isoprofundidades do Topo do Sistema Aquífero Ponta de Pedras. Linhas de Contorno de 2 em 2 Metros.

te do sistema aquífero e se encontra um corpo geológico argiloso intercalado, Nesse caso, não significa obrigatoriamente que a base do sistema aquífero seja limitada por essa intercalação argilosa, podendo ser mais profunda embora a perfuração não a tenha atingido. A maioria das perfurações geológicas não atingiu a base do sistema aquífero, mas pode-se observar que suas maiores profundidades estão localizadas na parte sul e sudeste da área estudada.

A construção de um mapa de isóbatas do sistema aquífero Ponta de Pedras foi possível a partir das sondagens geológicas realizadas naquela área (Fig. 4.2.1.2).

4.2.1.3. Isópacas

Devido que o sistema aquífero Ponta de Pedras não é uniforme em profundidade, e está intercalado com corpos mais ou menos argilosos nem sempre interessantes para explotação de águas subterrâneas, calculou-se as espessuras do sistema aquífero levando-se em consideração a soma das seções arenosas de interesse para águas subterrâneas.

Na perfuração P40, por exemplo, apesar de se ter perfurado 30 metros sem atingir a base do aquífero, a existência de corpos argilosos intercalados reduz a espessura do sistema aquífero para 14 metros que representa a parte produtiva do sistema.

Assim, denominamos de espessuras totais à soma das seções arenosas que se destacam em uma perfuração; espessuras essas que poderão ser usadas para extração de água em uma determinada zona do sistema aquífero.

As maiores espessuras do sistema aquífero estão localizadas na parte sul e sudeste da área estudada. O P44 apresenta espessura maior que 17 metros.

Assim, a região entre a cidade de Ponta de Pedras e Mangabeira, apresenta-se como a parte mais propícia para explotação das águas subterrâneas do sistema aquífero no que diz respeito às suas espessuras.

A distribuição geográfica das isópacas do sistema aquífe

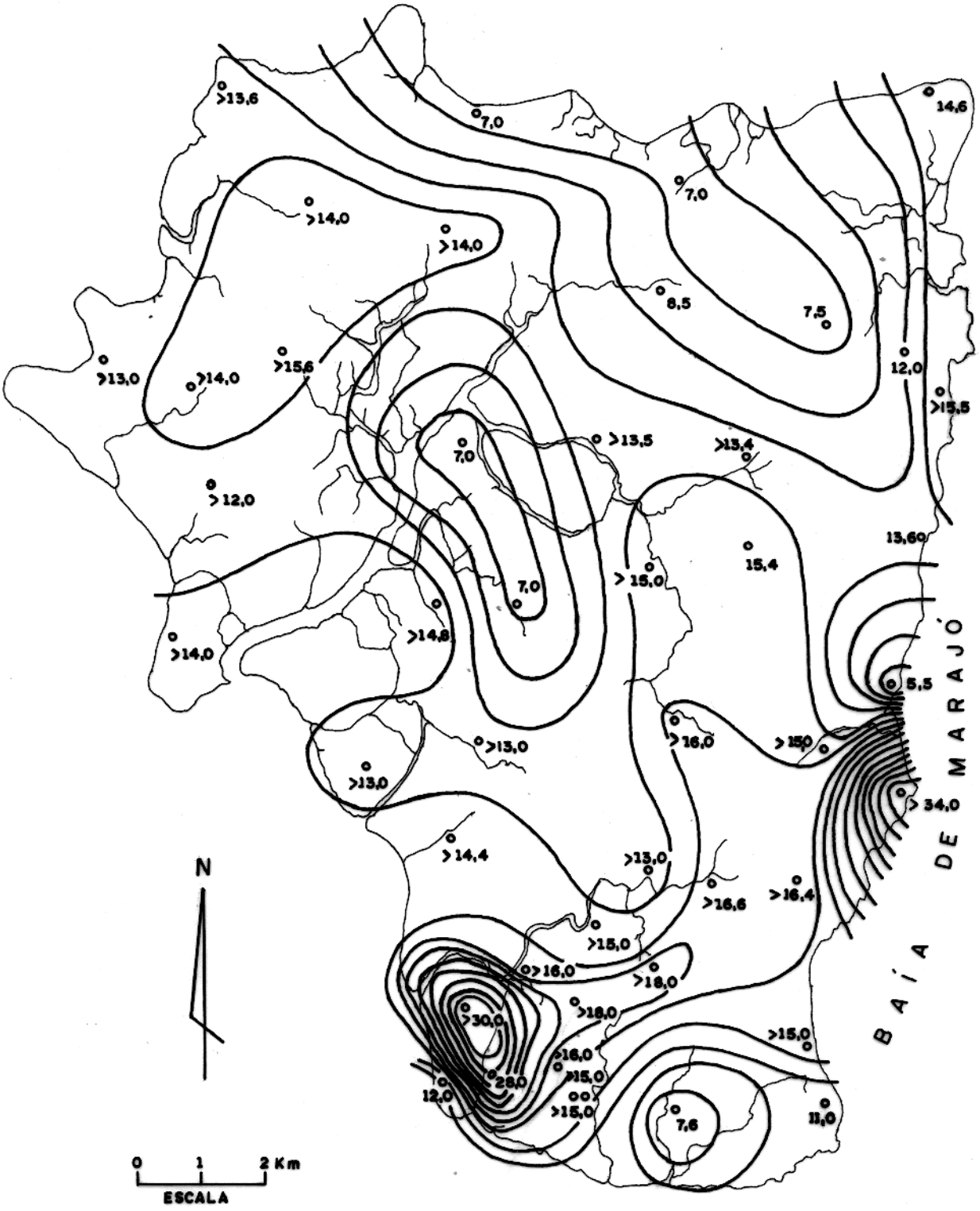


Fig. 4.2.1.2 Mapa das Isóbatas do Sistema Aquífero Ponta de Pedras. Linhas de Contorno de 2,0 em 2,0 Metros.

ro, Fig. 4.2.1.3, facilita a localização e projetos de poços para abastecimento da região de Ponta de Pedras.

4.2.2. Alimentação do Sistema Aquífero

O sistema aquífero Ponta de Pedras é alimentado principalmente por águas meteóricas que se infiltram através do solo e subsolo.

1- Nas regiões onde o sistema aquífero se encontra aflorando - Caju, Caimbé e Ilhinha - as recargas são feitas diretamente.

2- Nas regiões onde o sistema aquífero se encontra confinado por um pacote mais ou menos argiloso, as recargas são feitas indiretamente e serão mais ou menos rápidas dependendo da espessura da camada. Essa recarga está na dependência também da quantidade de areias contidas nesse pacote tampão, além de depender de seu grau de compactação, cimentação e fissuramento.

3- Nas regiões com cobertura vegetal tipo cerrado a infiltração é facilitada no início da estação chuvosa e difilcutada após períodos intensamente chuvosos. Nesses períodos as águas de enxurrada são abundantes e precisam ser controladas para não poluirem poços e fontes naturais de abastecimento.

4- Nas regiões onde existe cultivo agrícola, a infiltração é facilitada. Áreas com criações de gado poderão ter infiltrações menores por causa de compactações de solos causadas pelo pisoteamento dos animais.

5- A concetração da quase totalidade das precipitações em apenas alguns meses do ano - período chuvoso - e a não conveniente distribuição pluviométrica anual fazem com que a infiltração fique mal distribuida durante o ano hidrológico além de se perder - por evaporação - quantidades apreciáveis de precipitações por não terem tempo suficiente para se infiltrarem.

6- A área em estudo tem uma planitude horizontal especial e apresenta ainda uma forma de relevo que dificulta a drenagem, a infiltração fica facilitada por esses dois fatores.

7- Os vários tipos de vegetação - florestas, campos de cerrados, matas secundárias, matas terciárias e regiões de agrope

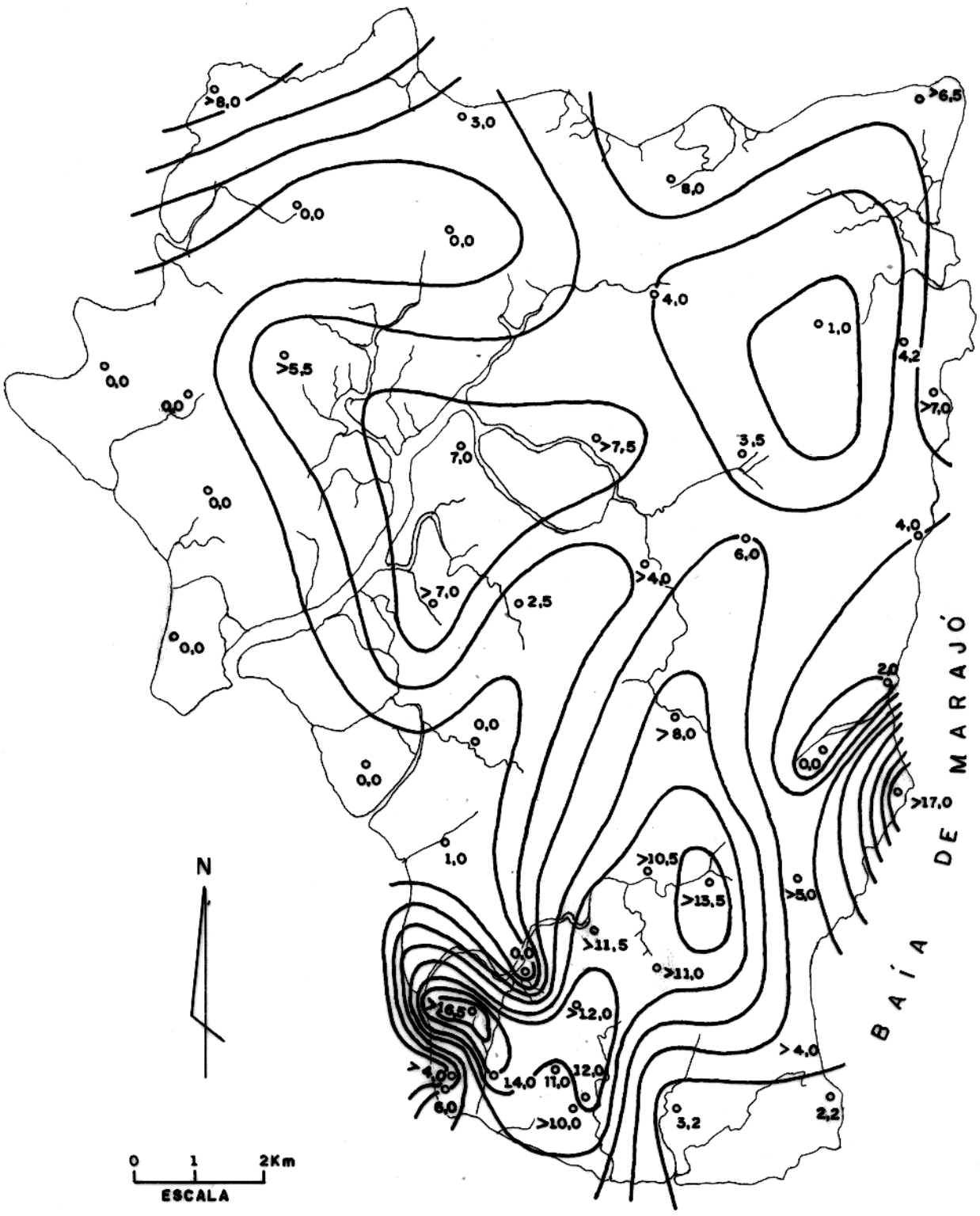


Fig. 4.2.1.3 Mapa das Isópacas do Sistema Aquífero Ponta de Pedras. Linhas de Contorno de 2,0 em 2,0 Metros.

cuária apresentam diferentes tipos de solos implicando por conse quência, que a distribuição da infiltração é uma função da cobertu ra vegetal.

4.2.2.1. Influências Mecânicas

Toda rede de drenagem da região de Ponta de Pedras sofre influência das marés, seção 1.5. Essas variações cíclicas de curta duração têm provavelmente influências mecânicas-elásticas na super fície piezométrica do sistema aquífero, principalmente nas bordas onde existe contato entre o sistema de drenagem e o sistema aquífe ro. Isso pode ser observado nas fontes naturais do sistema aquífe ro localizadas em vários pontos da rede de drenagem.

Até o presente, essas influências mecânicas estão sendo tratadas apenas em termos de reconhecimento, embora possam ter es pecial interesse como objetos de estudo em trabalhos mais específi cos sobre o relacionamento hidráulico entre águas superficiais e subterrâneas nessas regiões costeiras do baixo Amazonas, por exem plo no poço do Campus da UFPa, perfurado pela CPRM (150 m de prof.).

As relações mecânicas-elásticas entre aquíferos e superfí cies de águas livres: drenagens, lagos, oceanos, etc., são dos pro blemas mais importantes no estudo da hidrologia (Castany, 1968 e 1971). Vários trabalhos tratando de formulações matemáticas aplica das em modelos especiais similares têm sido realizados em outras regiões. Estudos em laboratório das relações entre águas subterrâ neas e as de superfície mostram, por exemplo, o volume de água ar mazenada nas margens do aquífero em função do tempo e a variação caudal das águas subterrâneas (Todd, 1959). Essas influências de marés atingem aquíferos livres ou não, podendo implicar em dificul dades de operação de bombas em poços de abastecimento. Esses moti vos de preocupação, entre outros, deverão ser considerados duran te o projeto, a execução, a operação e a conservação de po ços para abastecimento na região em estudo ou similares.

4.2.2.2. Variações Sazonais da Superfície Piezométrica

A superfície das águas subterrâneas de Ponta de Pedras mostra uma configuração sozonal de flutuação relacionada com os índices de precipitações daquela região (Fig. 4.2.2.2).

Para equacionar as variações sazonais da superfície piezométrica do sistema aquífero foram usados os piezômetros que apresentaram um agrupamento natural a partir de suas características construtivas e de localização com os tipos de comportamentos de curvas.

Características Construtivas:

- Localização da zona do filtro;
- Obliteração do filtro;
- Condições da extremidade superior (anel de concreto e tampa).

Localização:

- Tipos de vegetação;
- Topografia;
- Tipos de solos;
- Posição em relação a reservatórios superficiais;
- Condições geológicas;
- Distribuição irregular das precipitações de chuva.

Uma maior precisão na medida dos níveis piezométricos seria obtida com a instalação de limnigrafos nos mesmos.

Três grupos são distintos entre os piezômetros estudados:

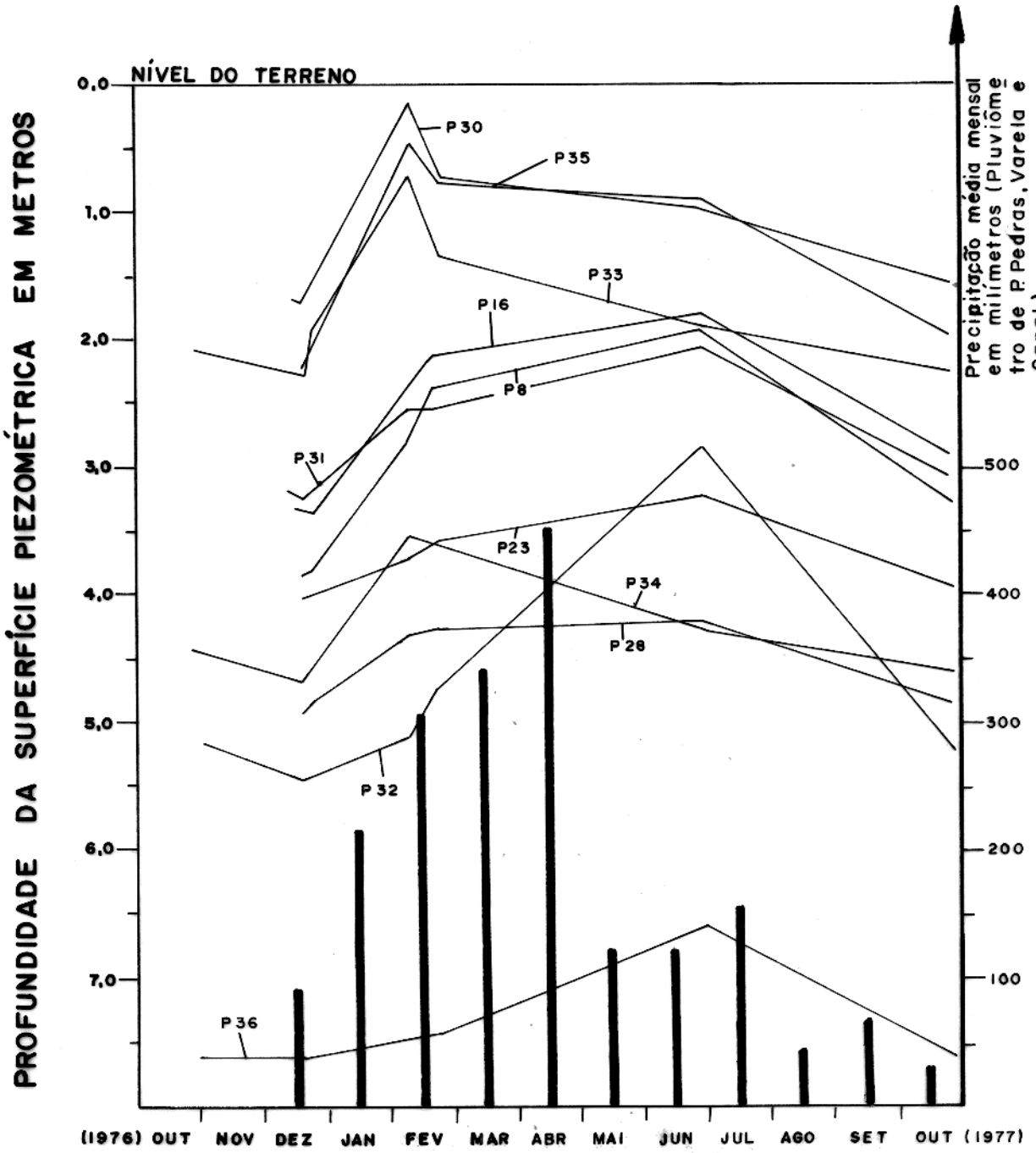
A- P30; P33; P34; P35;

B- P8; P16; P23; P28; P31;

C- P32; P36.

Embora esses estudos sejam preliminares e considerando ainda a possibilidade da não vizualização de algum outro fenômeno não identificado até agora, podemos concluir que:

1- A localização das seções-filtros estão de maneira que os piezômetros respondem pelas variações sazonais da superfície piezométrica mesmo quando em sequências argilosas. Essas respostas



GRUPOS; A_P30; P33; P34; P35
B_P8; P16; P23; P28; P31
C_P32; P36

Fig 4.2.2.2 Variação da Superfície Piezométrica (m) em Função da Precipitação Média Mensal(mm). Desde Outubro de 1976 até Outubro de 1977.

são possíveis graças às intercalações arenosas na seção-filtro ou próximo delas, o que garante uma comunicação hidráulica entre o sistema aquífero e o piezômetro dando condições de se medir as variações reais da superfície piezométrica. Mesmo nesses casos as obliterações das seções-filtros ainda não se deram a ponto de impedirem a comunicação hidráulica entre pontos do sistema aquífero e os piezômetros.

Uma das maiores dificuldades para interpretação do equacionamento deste fenômeno em estudo, é a falta de medidas consecutivas com periocidades mais bem definidas, por exemplo a falta de medida dos níveis piezométricos durante os meses de março-abril-maio de 1977, nesses piezômetros estudados.

4.2.2.3. Taxas de Infiltração

A anisotropia hidráulica dos terrenos é um dos fatores que mais limitam o cálculo de valores médios das quantidades de água que efetivamente se infiltram nos solos e alimentam os aquíferos.

A instalação de infiltrômetros é a melhor técnica para superar essa dificuldade (Manoel Filho e Guilhot, 1972).

Em Ponta de Pedras, os locais mais adequados para instalação de infiltrômetros são proximidades do P28; P41; P22 e P01.

Medidas da variação sazonal da superfície piezométrica podem facilitar o cálculo dos valores médios das taxas de infiltração, mas é necessário controle topográfico, do terreno. A falta de um mapa topográfico é um outro fator limitante, para o conhecimento dos volumes de água que se infiltram no sistema aquífero em Ponta de Pedras.

Variações da superfície piezométrica medidas em vários pontos de controle, durante fevereiro de 1977, mostram preliminarmente taxas de infiltração variando entre 10^6 a 10^7 m^3 por dia em superfícies do terreno com 1 Km^2. Quantidades tão altas de infiltração são esperadas nos períodos de altas pluviosidades. Embora as quantidades de águas infiltradas sejam altas, não podemos esquecer que provavelmente uma grande parte delas vai servir apenas para

alimentar as bacias de drenagem, fazendo parte do sistema aquífero somente nos períodos chuvosos, mas mesmo assim garantindo a alimentação dos mesmos.

4.2.3. Propriedades Físicas

As condições ambientais que governam a quantidade e a movimentação das águas subterrâneas no interior de meios porosos são entendidas oomo propriedades físicas desses meios porosos.

Ensaio de bombeamento é um método amplamente usado para se conhecer as grandezas das propriedades físicas de um sistema aquífero. Neste trabalho, os coeficientes físicos do sistema aquífero Ponta de Pedras foram calculados ou estimados a partir das análises granulométricas processadas em amostras de sedimentos desse aquífero. Os resultados encontrados poderão servir para comparação com aqueles que podem ser obtidos por ensaio de bombeamento nos poços PP01; PP02; PP03 e PP04.

4.2.3.1. Porosidade (m)

A quantidade de vazios relativa a um volume de sedimentos é definida como porosidade. A porosidade é uma das propriedades do aquífero que relaciona sua capacidade de armazenar água.

Por outro lado, o fato de um corpo geológico estar saturado com água não significa que ele tem facilidade para cede-la.

Em um corpo geológico saturado em água, a parte dessa que drena pela ação da gravidade é aquela que interessa à hidrogeologia. Dessa maneira, compreende-se em um aquífero a porosidade total (m) e a porosidade efetiva (me) que é aquela relativa aos espaços vazios que cedem água pela ação do campo gravitacional.

Análises granulométricas realizadas em sedimentos do sistema aquífero Ponta de Pedras deixam estimar porosidades totais variando entre 40% e 45%. Esses valores podem ser comparados com aqueles encontrados por Schoeller (1962) em areias continentais: 33,1% e 35,3%.

As porosidades do sistema aquífero Ponta de Pedras foram estimadas a partir de comparação feita entre os coeficientes desse sistema aquífero e coeficientes calculados por Hazen (1892) (Quadro 4.2.3.2).

Segundo Johnson (1974) o conceito de porosidade efetiva (me) está relacionado ao tamanho efetivo das partículas de tal modo que para maiores valores desses, correspondem maiores valores para a permeabilidade, embora a porosidade total permaneça constante ou mesmo diminua.

Segundo vários autores, o tamanho efetivo das partículas de sedimentos geológicos é definido através do diâmetro correspondente à percentagem acumulada de dez por cento retida na curva obtida por análise mecânica dos sedimentos (d_{10}).

Amostras de sedimentos do sistema aquífero em estudo indicaram d_{10} variando entre 0,064 e 0,148 milímetro. Amostras desses sedimentos em profundidade entre 10 e 12 metros, nas localidades de Cucuira (P34), Vila Nova (P31) e Jagarajó (P16) apresentaram os maiores tamanhos efetivos encontrados.

A porosidade efetiva (me) do sistema aquífero em estudo foi estimada a partir de comparação com resultados de experiências realizadas em outros sedimentos por vários autores dos quais alguns estão sendo citados aqui.

Porosidades efetivas (me) iguais a 26% e 31% para areias com diâmetros efetivos (d_{10}) iguais a 0,06 e 0,17 milímetro, respectivamente, são valores obtidos por Allen Hazen em Schoeller (1962).

Valores percentuais de água gravitacional variando entre 33,1% e 37,8% para sedimentos com d_{10} entre 0,0067 e 0,185 milímetro são descritos por King; Atterberg e Zunker em Schoeller (1962).

Podemos admitir que as porosidades efetivas do sistema aquífero tenham uma ordem de grandeza entre 25% e 37%, embora suas porosidades totais estejam estimadas com valores entre 40% e 45%.

Nas partes do sistema aquífero em estudo onde predominam as frações arenosas, é de se esperar que os valores de porosidade efetiva sejam os maiores entre aqueles que estão sendo estimados,

por exemplo para sedimentos arenosos grosseiros encontrados nos P22; P26; P30; P32; P34; P40; P41; P42.

Nas partes do sistema aquífero onde predominam as frações finas, é de se esperar que os valores da porosidade efetiva sejam bem menores. Nesses sedimentos a percentagem de água retida (m-me) deve ser relativamente maior.

O quadro 4.2.3.1 dá valores de d_{10}, m-me, m e me segundo vários autores e valores para o sistema aquífero Ponta de Pedras.

A U T O R		d_{10}	m-me	m	me
ALLEN HAZEN		0,06	16	42	26
		0,17	11	42	31
K I N G		0,185	3,5	40,1	36,6
		0,155	4,1	40,8	36,7
		0,118	5,0	40,6	35,6
		0,082	6,6	39,7	33,1
ATTERBERG		0,139	5,1	40,4	35,3
ZUNKER		0,0067	13,41	38,1	34,69
SISTEMA AQUÍFERO PONTA DE PEDRAS		Valores Obtidos em Anál. Gran.	Valores Estimados		
NÚMERO DA AMOSTRA	TM16 - 15,00	0,079	15	40	25
	TM15 - 10,00	0,095	12	42	30
	P34 - 5,30 - 6,00	0,087	15	40	25
	TM03 - 0,00 - 0,60	0,064	15	40	25
	TM03 - 4,10 - 4,40	0,072	15	40	25
	PP02 - 12,00	0,148	8	45	37
	P31 - 6,80 - 7,00	0,088	12	42	30
	P30 - 5,10 - 5,40	0,078	15	40	25
	P19 - 7,50 - 7,75	0,064	15	40	25
	P16 - 10,50 - 10,60	0,105	12	42	30
	P5 - 13,75 - 14,00	0,069	15	40	25

Quadro 4.2.3.1 Valores de d_{10}, m-me, m e me Segundo Vários Autores e Valores para o Sistema Aquífero Ponta de Pedras.

Embora os valores da porosidade efetiva anunciados aqui tenham sido apenas estimados, já se pode computar números ilustrativos que mostram a quantidade de águas subterrâneas disponíveis para exploração naquela região.

Assim, conhecendo-se o volume total do sistema aquífero - através do mapa das isópacas(Fig. 4.2.1.3) - e usando-se uma porosidade efetiva média na ordem de grandeza de 30%, calcula-se um volume aproximado de 250 bilhões (250×10^9) de litros de águas subterrâneas na região de Ponta de Pedras.

4.2.3.2. Coeficiente de Uniformidade (U)

Hazen (1892) introduziu o conceito de coeficiente de uniformidade (U) que é a medida da razão entre o diâmetro dos grãos correspondentes a 60% em peso dos sedimentos granulometrados (d_{60}) e o diâmetro efetivo que corresponde a 10% em peso do mesmo material (d_{10}).

Esse autor mostrou que o coeficiente de uniformidade das areias está intimamente ligado ao conceito de porosidade e que quando esse coeficiente se aproxima da unidade, a porosidade tende a aumentar. Os coeficientes de uniformidade das amostras de sedimentos arenosos do sistema aquífero variam entre 1,55 e 3,13 sendo que a maioria desses coeficientes estão no intervalo entre 2,02 e 2,81 (Quadro 4.2.3.2). Em geral, quando $U < 2$ os sedimentos têm granulometria uniforme e quando $U > 2$ suas granulometrias são variadas. Assim sendo, os sedimentos do sistema aquífero Ponta de Pedras têm granulometrias uniformes e pouco variadas.

Johnson (1974) considera importante a relação entre o grau de uniformidade e a capacidade de transmitir água por misturas de sedimentos finos e grossos.

SEDIMENTOS DO SISTEMA AQÜÍFERO PONTA DE PEDRAS				EXPERIÊNCIAS EM AREIAS POR ALLEN HAZEN	
PERFIL GEOLÓGICO.	NÚMERO DA AMOSTRA	U	m	U	m
1	TM16 - 15,00	2,47	40	1,8	45
	TM15 - 10,00	2,32	42	2,0	42
	P34 - 5,30 - 6,00	2,67	40	2,3	44
	TM03 - 0,00 - 0,60	3,13	40	2,3	42
	TM03 - 4,10 - 4,40	3,13	40	2,4	40
3	PP02 - 12,00	1,55	45	7,8	32
	P31 - 6,80 - 7,00	2,28	42	9,0	36
	P30 - 5,10 - 5,40	2,69	40		
5	P19 - 7,50 - 7,75	2,81			
6	P16 - 10,50 - 10,60	2,02			
7	P5 - 13,75 - 14,00	2,57			

Quadro 4.2.3.2 Coeficientes de Uniformidade e Porosidades do Sistema Aqüífero Ponta de Pedras e Valores Encontrados através de Experiências Feitas em Areias por Allen Hazen.

4.2.3.3. O Coeficiente de Darcy (K)

Schoeller (1962) define o coeficiente de Darcy (K) - também condutividade hidráulica - de uma rocha pela expressão:

$$K = \left(\frac{\gamma}{\mu}\right) \left(a \times b\right) \left(d^2 f(m)\right)$$

onde, $\left(\frac{\gamma}{\mu}\right)$ = fator do líquido

$\left(a \times b\right)$ = fator intermediário (rocha-líquido)

$\left(d^2 f(m)\right)$ = k = coeficiente de permeabilidade, um fator da rocha.

Em condições naturais $\left(a \times b\right) = 1$ e a relação será:

$$K = \left(\frac{\gamma}{\mu}\right) \cdot k$$

onde, γ = peso específico do líquido

μ = viscosidade do líquido

Assim, pode-se determinar o coeficiente de Darcy pela granulometria, usando-se as relações de Schlichter e de Terzaghi, em Schoeller (1962; p.107 - 108).

A relação de Schlichter: (1) $K = \left(\frac{\gamma}{\mu}\right) \cdot \frac{10,0219}{K_1} \cdot (d_{10})^2$ (cm/s)

A relação de Terzaghi: (2) $K = \left(\frac{C}{\mu_o}\right) \left(\frac{\mu_o}{\mu_\theta}\right) \left(\frac{m-0,13}{\sqrt[3]{1-m}}\right)^2 (d_{10})^{\frac{2}{2}}$ (cm/s)

As relações (1) e (2) foram aplicadas para o cálculo de K do sistema aquífero de Ponta de Pedras. A fórmula de Schlichter deu resultados bem inferiores a fórmula de Terzaghi, isso causado provavelmente pelo fator $\left(\frac{C}{\mu_o}\right)$ da relação (2), estimado com valor igual a 700. Porém resolvemos calcular a média de K entre os resultados das relações (1) e (2). O valor de K encontrado parece ser uma aproximação válida para o sistema aquífero Ponta de Pedras. O resultado deverá ser confirmado futuramente por ensaios de bombeamento.

Procedimento do cálculo:

Os valores limites de d_{10} e m para o sistema aquífero em estudo são:

- d_{10} (min.) = 0,0064 cm
- d_{10} (max.) = 0,0148 cm
- m (min.) = 0,25 (25%)
- m (max.) = 0,37 (37%)

A temperatura da água "in situ" usada: T = 28°C.

Outros valores usados: μ_o = 1,301 = viscosidade da água à 10°C

μ_θ = 0,836 = viscosidade da água à 28°C

$\frac{C}{\mu_o} \simeq 700$

$$\frac{\gamma}{\mu} = 1.244 \quad \text{à} \quad 28^{o}C$$

O valor médio de K encontrado foi:

$K = 2,28.10^{-4}$ cm/s ou $2,28.10^{-4}$ $cm^3/s/cm^2$.

Em centímetro por dia:

$K \simeq 20$ cm/d.

Em litros por dia e por centímetro quadrado do sistema aquífero:

$K \simeq 200$ $\ell/d/cm^2$.

CAPÍTULO 5

5. HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

5.1. Introdução

O conhecimento das características físico-químicas gerais das águas subterrâneas em estudo, tem como objetivo principal ajudar compreender os seguintes problemas na região de Ponta de Pedras:

a- Hidroquímica dessas águas subterrâneas
b- Variação sazonal do quimismo dessas águas
c- Classificação dessas águas para uso humano e na agricultura
d- Relacionamento entre a qualidade dessas águas e a litologia dos corpos geológicos que as contém.

Os resultados das análises químicas das águas subterrâneas de Ponta de Pedras, coletadas através de piezômetros nas campanhas de campo de junho-julho e outubro de 1977, estão nas Tabelas 5.1.A e 5.1.B.

5.2. Atividade do Íon Hidrogênio (pH)

A atividade do íon hidrogênio é convenientemente expressada em termos de pH representado pelo logarítmo negativo na base 10 da atividade do íon hidrogênio em moles por litro. Temos assim que:

$$pH = -\log_{10} (H^+).$$

Os valores de pH das amostras de águas subterrâneas de Ponta de Pedras foram medidos com papel tornassol no momento da coleta e medidos com um pH Meter Model 7 da CORNING em laboratório quando analisadas.

As medidas do pH feitas em laboratório, mostraram que a acidez dessas águas tendem a aumentar durante o intervalo de tempo em que são coletadas e analisadas. Os valores do pH medido em campo e em laboratório estão no quadro 5.2.

Nº AMOSTRA	pH	σ MICROMHOS por centímetro	SiO_2	Fe	Mn	Ca	Mg	Na	K	ALCALINIDADE Ca CO_3	SO_4	Cl	HCO_3	NO_3	PO_4	DUREZA $CaCO_3$
P1	5,0	27		3,0		<0,05	<0,05	3,0	1,5	15,0	4,8	6,5	18,3			5,0
P2	5,3	22		1,0		<0,05	<0,05	3,0	2,0	15,0	2,0	5,0	18,3			5,0
P3	5,3	25		0,0		<0,05	<0,05	4,5	3,0	15,0	2,5	5,0	18,3			3,0
P4	6,2	73		3,0		2,00	4,37	8,0	3,0	35,0	6,0	7,0	42,7			20,0
P5	5,5	50		2,0		1,60	2,04	5,5	2,0	30,0	11,0	9,5	36,6			10,0
P6	5,5	52		2,0		2,00	2,92	4,8	2,0	20,0	14,4	8,0	24,4			14,0
P7	5,5	57		2,0		4,80	3,20	4,0	2,5	30,0	6,9	6,0	36,6			18,0
P8	3,5	160		2,0		0,40	2,09	6,0	2,0	0,0	6,6	13,5	0,0			9,0
P9	6,0	50		2,0		2,40	3,06	4,3	2,0	25,0	6,4	5,5	30,5			15,0
P10	4,0	107		2,0		1,60	2,52	13,5	1,5	2,5	6,6	30,9	3,1			12,0
P11	4,8	25		2,0		<0,05	<0,05	3,5	1,0	10,0	8,2	6,0	12,2			6,0
P12	5,3	120		2,0		4,00	3,89	16,0	2,5	20,0	8,5	22,5	24,4			20,0
P13	5,0	35		2,0		<0,05	<0,05	3,8	1,5	10,0	8,2	8,0	12,2			7,0
P14	4,4	24		2,0		<0,05	<0,05	3,0	1,0	10,0	8,8	7,5	12,2			3,0
P15	5,0	43		1,0		<0,05	<0,05	6,0	1,5	10,0	4,6	10,5	12,2			4,0
P16	4,8	25		2,0		<0,05	<0,05	3,3	1,0	10,0	4,1	8,0	12,2			3,0
P17	5,7	245		2,0		3,20	2,13	35,0	5,0	15,0	4,0	28,9	18,3			12,0
P18	5,6	82		2,0		2,40	7,43	6,5	2,0	30,0	5,1	9,0	36,6			33,0
P19	6,1	320		2,0		3,60	11,76	36,5	3,0	35,0	5,3	72,4	42,7			52,0
P20	5,7	65		2,0		1,60	1,80	7,0	2,0	10,0	6,3	16,0	12,2			9,0
P21	5,9	39		2,0		<0,05	<0,05	2,5	2,0	15,0	6,4	7,5	18,3			7,0
P22	6,7	76		0,8		8,00	5,10	3,5	2,0	30,0	6,6	10,0	36,6			28,0
P23	6,0	30		2,0		2,00	1,70	2,5	1,0	15,0	5,3	7,0	18,3			8,0
P24	6,6	700		2,0		5,20	12,34	265,0	5,5	20,0	6,7	202,6	24,4			56,0
P25	6,3	149		4,0		3,20	4,81	17,5	3,0	20,0	6,6	31,4	24,4			23,0
P26	6,2	50		3,0		2,40	1,85	4,5	2,0	15,0	6,6	10,0	18,3			10,0
P27	6,1	31		3,0		<0,05	<0,05	3,5	1,0	15,0	6,7	8,5	18,3			5,0
P28	6,1	34		0,4		<0,05	<0,05	3,3	2,0	15,0	11,5	7,5	18,3			7,0
P29	6,4	132		0,3		4,40	5,25	16,5	2,0	15,0	10,0	28,4	18,3			26,0
P30	4,9	28		4,0		<0,05	<0,05	2,5	0,5	10,0	9,6	5,5	12,2			6,0
P31	5,8	44		3,0		1,60	2,53	4,0	1,0	10,1	9,4	10,0	12,2			12,0
P32	6,5	34		4,0		<0,05	<0,05	2,9	1,5	15,0	8,3	9,0	18,3			8,0
P33	4,5	175		4,0		7,60	3,96	19,5	2,0	5,0	8,2	42,9	6,1			24,0
P34	6,0	29		0,15		<0,05	<0,05	3,0	1,0	5,0	8,1	8,0	6,1			6,0
P35	4,5	56		4,0		2,00	1,94	5,0	1,0	5,0	7,9	13,0	6,1			10,0
P36	6,3	70		4,0		6,80	3,20	6,3	2,0	2,5	7,4	12,0	30,5			20,0
P37	4,3	50		4,0		<0,05	<0,05	3,4	1,0	10,0	7,1	8,0	6,1			5,0
P38	6,1	430		4,0		15,21	13,31	48,0	16,0	30,0	7,6	103,8	36,6			70,0
P40	5,2	45		0,1		2,80	1,74	4,8	1,8	15,0	6,6	12,2	18,3			10,0
P41	5,3	14		0,6		<0,05	<0,05	1,5	1,0	15,0	6,6	5,0	18,3			5,0

Tab. 5.1.A Análises Químicas das Águas Subterrâneas. Amostras Coletadas em Junho-Julho de 1977. Valores em Miligramas por Litro.

Nº AMOSTRA	pH	σ MICROMHOS por centímetro	SiO_2	Fe	Mn	Ca	Mg	Na	K	ALCALINIDADE $CaCO_3$	SO_4	Cl	HCO_3	NO_3	PO_4	DUREZA $CaCO_3$
P1	4,6	35	12,0	0,3	0,05	0,05	0,05	1,0	4,0	20,0	4,6	5,8	24,4	0,44	0,05	4,0
P2	4,5	19	9,4	0,4	0,05	0,05	0,05	1,0	3,0	10,0	3,5	5,3	12,2	0,22	0,05	3,5
P3	4,9	25	9,6	1,5	0,05	0,05	0,05	2,0	5,0	20,0	5,8	5,6	24,4	0,22	0,05	2,0
P4	6,0	85	12,6	0,4	0,05	4,00	3,89	3,0	10,0	35,0	5,9	7,7	42,7	0,44	0,05	20,0
P5	5,4	48	12,6	1,1	0,05	0,05	0,05	2,0	6,0	20,0	12,8	9,4	30,5	0,66	0,05	8,0
P6	5,8	62	12,0	1,0	0,05	2,40	2,33	2,0	6,0	25,0	7,7	7,0	30,5	0,22	0,05	12,0
P7	5,8	54	8,2	0,3	0,05	4,40	2,33	2,5	5,0	25,0	14,2	6,8	30,5	0,44	0,05	14,0
P8	3,8	73	10,6	1,0	0,01	2,00	2,43	1,0	8,0	10,0	14,8	14,0	12,2	0,22	0,05	12,0
P9	5,6	52	9,2	2,3	0,10	2,00	1,94	2,0	5,0	10,0	25,7	5,8	12,2	0,66	0,15	10,0
P10	3,1	170	9,0	0,6	0,10	1,20	2,50	4,5	16,0	10,0	8,6	41,4	12,2	0,44	0,05	11,5
P11	4,2	22	10,1	0,3	0,05	0,05	0,05	0,5	2,5	10,0	7,2	4,4	12,2	0,55	0,10	5,5
P12	5,4	120	9,3	1,3	0,10	4,00	3,64	2,0	15,0	35,0	7,7	20,1	42,7	0,44	0,15	19,0
P13	4,8	34	11,5	0,2	0,05	0,05	0,05	0,5	4,5	10,0	10,7	6,5	12,2	0,44	0,15	6,0
P14	3,5	26	8,3	0,2	0,00	0,05	0,05	0,5	3,5	10,0	5,4	6,3	12,2	0,22	0,10	4,0
P15	4,6	42	9,0	0,4	0,05	0,05	0,05	1,0	7,5	15,0	9,1	10,2	18,3	0,44	0,05	7,0
P16	4,6	30	9,8	0,3	0,00	0,05	0,05	0,5	4,5	5,0	7,2	7,5	6,1	0,66	0,05	3,5
P17	5,4	300	10,2	0,3	0,05	2,00	4,62	5,5	37,0	20,0	6,6	28,3	24,4	0,22	0,10	21,0
P18	5,7	68	11,5	2,3	0,15	1,80	4,18	1,0	6,0	25,0	7,1	6,1	30,5	0,44	0,10	19,0
P19	5,6	280	12,1	0,6	0,05	0,05	0,05	2,5	31,0	30,0	6,9	36,1	36,6	0,22	0,10	8,0
P20	4,9	58	10,0	0,8	0,10	1,60	9,45	1,0	8,0	15,0	7,4	16,2	18,3	0,44	0,13	40,5
P21	3,6	39	10,5	2,3	0,15	0,05	0,05	1,0	4,0	20,0	10,0	12,3	24,4	0,66	0,10	8,0
P22	4,8	99	9,0	1,2	0,05	9,61	4,61	1,5	6,0	30,0	7,1	11,1	36,6	0,44	0,05	28,6
P23	3,7	30	8,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,1	4,0	15,0	11,5	6,1	18,3	0,66	0,05	6,0
P24	4,3	2.000	15,0	3,0	0,15	13,6	40,2	20,0	280,0	25,0	29,0	607,9	30,5	0,44	0,15	179,0
P25	5,3	180	7,0	0,4	0,05	4,00	5,10	3,0	22,5	20,0	5,3	38,7	24,4	0,22	0,10	25,0
P26	4,1	21	7,5	2,8	0,10	0,05	0,05	0,1	3,0	15,0	6,6	7,3	18,3	0,55	0,05	3,0
P27	3,7	38	8,4	1,3	0,15	0,05	0,05	1,0	5,5	15,0	8,4	8,5	18,3	0,44	0,10	5,0
P28	3,6	39	15,0	0,7	0,05	0,05	0,05	1,0	6,0	15,0	8,6	9,7	18,3	0,44	0,10	5,0
P29	4,5	170	13,1	0,4	0,05	4,40	5,10	2,5	19,0	20,0	8,2	31,7	24,4	0,66	0,10	25,0
P30	3,8	41	14,0	0,2	0,05	0,05	0,05	0,1	3,0	10,0	11,0	5,8	12,2	0,22	0,05	2,5
P31	3,8	52	8,0	0,3	0,05	0,05	0,05	0,5	6,0	15,0	12,3	9,7	18,3	0,22	0,10	9,5
P32	4,4	51	10,5	1,2	0,10	0,05	0,05	0,1	3,5	15,0	16,6	8,2	18,3	0,44	0,05	9,5
P33	3,0	170	9,0	2,9	0,15	4,60	3,74	1,0	15,0	5,0	6,3	32,2	6,1	0,66	0,05	20,0
P34	3,5	14	6,0	0,2	0,00	0,05	0,05	0,1	2,0	10,0	16,3	4,8	12,2	0,44	0,10	2,5
P35	2,4	500	11,0	0,4	0,05	2,00	3,64	3,5	29,0	0,0	16,5	108,9	0,00	0,55	0,10	17,0
P36	4,6	97	13,1	0,4	0,05	5,61	3,01	1,5	8,0	25,0	14,5	11,9	30,5	0,44	0,10	18,0
P37	3,1	54	16,0	0,6	0,10	0,05	0,05	1,0	6,5	10,0	11,5	19,1	12,2	0,22	0,05	6,5
P38	3,9	750	14,5	3,2	0,10	16,4	13,81	40,0	50,0	20,0	11,0	137,2	24,4	0,44	0,05	72,0
P40	3,8	30	12,0	0,7	0,10	0,05	0,05	0,10	4,5	5,0	8,7	8,0	6,1	0,44	0,05	6,0
P41	3,5	16	12,5	0,6	0,05	0,05	0,05	0,10	2,0	5,0	8,1	53,2	6,1	0,44	0,10	2,0
P42	3,9	23	13,0	2,9	0,10	0,05	0,05	0,10	3,0	15,0	6,6	7,5	18,3	0,22	0,05	3,0
P43	3,3	40	9,1	2,9	0,05	0,05	0,05	0,5	5,0	5,0	3,3	8,2	6,1	0,44	0,10	1,5
P44	4,2	90	8,0	2,0	0,05	6,01	2,91	1,0	4,0	20,0	5,6	8,5	24,4	0,22	0,10	18,0

Tab. 5.1.B Análises Químicas das Águas Subterrâneas. Amostras Coletadas em Outubro de 1977. Valores em Miligramas por Litro.

pH no campo	pH no laboratório	pH no campo	pH no laboratório	pH no campo	pH no laboratório
5,2	4,6	4,8	4,6	5,1	3,8
4,8	4,5	4,8	5,4	4,8	4,4
5,0	4,9	5,0	5,7	5,0	3,0
5,3	6,0	5,2	5,6	5,0	3,5
4,8	5,4	5,2	4,9	4,4	2,4
5,3	5,8	5,1	3,6	4,7	4,6
6,3	5,8	5,4	4,8	4,5	3,1
5,0	3,8	4,8	3,7	5,1	3,9
5,6	5,6	5,5	4,3	5,0	3,8
4,8	3,1	4,8	5,3	5,0	3,5
4,7	4,2	4,7	4,1	5,4	3,9
5,5	5,4	5,1	3,7	4,8	3,3
4,8	4,8	5,1	3,6	5,4	4,2
4,8	3,5	5,3	4,5	5,1	3,1
5,0	4,6	5,1	3,8	5,0	3,5

Quadro 5.2 Valores de pH Medidos no Campo e no Laboratório. Amostras de Águas Subterrâneas Coletadas nos Dias 26 a 31 de Outubro e Medidos em Laboratório Dia 1º de Novembro de 1977.

A tendência do pH diminuir depois que a amostra foi coletada, compreende-se pelo fato de que ela pode ser afetada pela oxidação do ferro ferroso (Hem, 1970).

As águas subterrâneas de Ponta de Pedras apresentaram valores de pH sempre ácidos, sendo que na maioria das vezes fortemente ácidos, sugerindo a presença de ácidos húmicos. Mais de 90 amostras de água analisadas mostraram pH variando entre 2,4 e 6,7, intervalo relativamente grande, com um valor médio igual a pH 4,7.

Atenção deve ser mantida para valores de pH menores que 3,0 pois podem estar inclusive errados ou certas reações químicas nessas águas ainda não são conhecidas.

A figura 5.2 mostra a distribuição do pH, medidos em laboratório, de amostras de águas subterrâneas coletadas em piezômetros instalados na área em estudo, onde o pH varia entre 3,5 e 6,7.

5.2.1. Reações Possíveis que Aumentam a Acidez das Águas Subterrâneas em Estudo.

Água pura se apresenta normalmente dissociada em H^+ e OH^-, essa dissociação pode ser mostrada pela expressão:

$$H_2O\ (aq) = H^+ + OH^-$$

Por definição, quando as concentrações de hidroxila e oxidrila forem iguais, $(H^+) = (OH^-)$, temos pH = 7,0. Essa atividade iônica é conseguida com a água a 25°C (Hem, 1970). Para valores mais altos de temperatura, o pH tende a diminuir.

As reações mais importantes em meio aquoso envolvendo o íon H^+ são aquelas que ocorrem com a presença de dióxido de carbono dissolvido. Essas reações podem ser mostradas através das seguintes expressões:

1- $CO_2\ (aq) + H_2O\ (aq) = H_2CO_3\ (aq)$,

2- $H_2CO_3\ (aq) = H^+ + HCO_3^-$,

3- $HCO_3^- = H^+ + CO_3^{-2}$

As reações (1), (2) e (3) mostram que o CO_2 dissolvido em meio aquoso, pode participar da diminuição do pH das águas (Hem, 1970). Os valores de pH tão baixos na área em estudo, se deve à presença do CO_2 dissolvido naquelas águas subterrâneas.

A origem do CO_2 do solo está ligada ao apodrecimento de matéria orgânica, que por sua vez é usado pelos vegetais que realizam a fotossíntese (Overbeek, 1964; Epstein, 1972).

Segundo Buckup (p.107) "a matéria seca vegetal é integrada por um grupo de 6 (seis) elementos químicos fundamentais: C, O, H, S, P. Ocorre um amplo predomínio do carbono participando com aproximadamente 50% nas moléculas das substâncias vegetais"

A presença de sedimentos com vegetais carbonos fósseis intercalados junto à sequência argilo-arenosa em vários piezômetros instalados em Ponta de Pedras, parece também ser uma das fontes importantes de compostos carbônicos naquelas águas subterrâneas. Esse fato é evidenciado no P8, onde a região do filtro do piezômetro está instalada em uma sequência de estrados sedimentares com abundância de vegetal carbonoso. Água do P8 coletada em 29.06.1977 apre

sentou um pH 3,5 medido em laboratório. Água desse mesmo piezômetro coletada em 26.10.1977 apresentou pH 5,0 medido no momento da coleta e pH 3,8 em laboratório, inclusive a amostra de água, coletada nesse piezômetro, apresentava-se com cor carbonosa e quando colocada em repouso, depositou-se no fundo do recipiente uma lâmina de lama da mesma cor,

Outros tipos de reações que podem envolver a dissociação de solutos ácidos nas águas subterrâneas da área em estudo, participando do comportamento do pH, incluem:

$$H_2PO_4 = HPO_4^{-} + H^+$$

$$H_2S\ (aq) = HS^- + H^+ \quad e$$

$$HSO_4^- = SO_4^{-2} + H^+$$

Nas seções 5.16 e 5.12 deste trabalho, é mostrado o comportamento do fosfato (PO_4^{-2}) e sulfato (SO_4^-).

O cimento ferruginoso presente nos sedimentos bem como concentrações relativamente altas de ferro em solução nas águas subterrâneas da área em estudo, mostram uma grande possibilidade de reações envolvendo precipitados que podem ser expressados assim:

$$Fe^{+3} + 3\ H_2O = Fe\ (OH)_3\ (c) + 3\ H^+$$

Esse tipo de reação influencia no pH das águas subterrâneas elevando sua acidez.

Reações que influenciam o pH das águas subterrâneas em estudo, envolvendo o ferro em sua forma reduzida também são susceptíveis de estarem ocorrendo naquela área, e podem ser representadas pela expressão:

$$FeS_2\ (c) + 8\ H_2O = Fe^{+2} + 2\ SO_4^{-2} + 16\ H^+ + 14\ e^-$$

Essa reação na presença de oxigênio, dá como resultado:

$$7/2\ O_2 + 14\ e^- + 14\ H^+ = 7\ H_2O$$

tendo então:

$$FeS_2 + 7/2\ O_2 + H_2O = Fe^{+2} + 2SO_4^{-2} + 2H^+$$

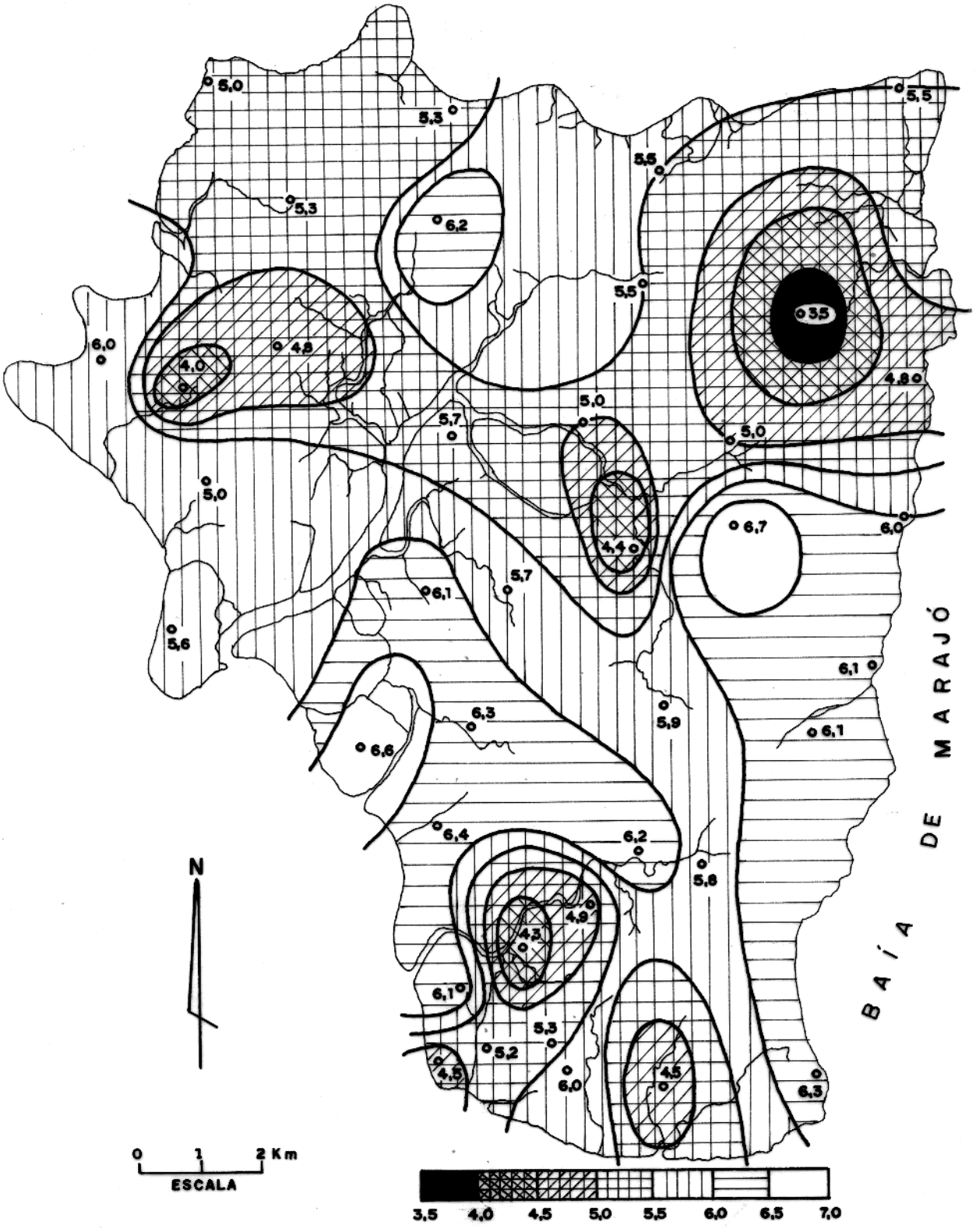


Fig. 5.2 Distribuição do pH de Amostras de Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras. Amostragem feita em Junho-Julho de 1977. Valores Medidos em Laboratório.

A presença de argilas caulinítiças intercaladas nos estratos sedimentares daquela área, sugerem a presença de ácido silícico, que influencia o pH e são representadas pela equação que mostra a origem do caulim:

$$2NaAlSi_3O_8(C) + 2H^+ + 9H_2O(l) = Al_2Si_2O_5(OH)_4(C) + 4H_4SiO_4(aq) + 2Na^+$$

(albita) (caulinita) (ácido silícico)

5.3. Condutividade Elétrica (σ)

A condutividade elétrica é a habilidade que uma substância tem para conduzir a corrente elétrica. A Sociedade Americana para Testes e Materiais (1964, p.383) tem definido a condutividade elétrica da água como "o recíproco da resistividade em ohms medido entre faces opostas de um centímetro cúbico de uma solução aquosa a uma temperatura específica". Quando a condutividade é pequena, os valores são dados em micromhos por centímetro a T^oC (micromhos/cm a T^oC) em Hem (1970).

Medidas geofísicas de resistividade, entretanto, comumente estão expressas em ohm. metro (ohm.m), se referindo a um cubo com 1 metro de aresta.

Partindo da definição de resistividade pode-se escrever a expressão:

(1) $R = \rho \frac{L}{A}$,

onde:

R é a resistência, ρ é a resistividade, L é o comprimento e A é a área da secção de um material.

A partir da expressão (1), pode-se conhecer a resistividade de um corpo, conhecendo-se os outros parâmetros.

De (1), podemos escrever (2):

(2) $\frac{1}{\rho} = \frac{L}{A}$,

onde:

$\frac{1}{\rho} = \sigma$ é a condutividade elétrica da água.

As condutividades de mais de 90 amostras de águas subterrâneas de Ponta de Pedras foram medidas em laboratório, onde a temperatura oscilou entre 25°C e 31°C sendo que predominantemente próximo de 26°C. A temperatura padrão para medidas em laboratório é de 25°C, mas podem ser obtidas em outras temperaturas, porém é importante que a temperatura seja especificada (Hem, 1970).

A condutividade elétrica das águas subterrâneas aqui em estudo, variaram entre 13 a 2.000 micromhos por centímetro, o que equivale a resistividades entre 770 e 5 ohms.m.

A maioria das amostras de águas dos poços usados pela população (poços escavados) apresentou condutividade baixa variando entre 13 e 65 micromhos por centímetro.

Amostras de águas dos poços PP01 e PE01 indicaram condutividades variando entre 230 a 380 micromhos por centímetro. Amostras de águas de piezômetros coletadas na campanha de junho - julho de 1977 apresentaram condutividades variando entre 14 a 700 micromhos por centímetro. Na campanha de outubro de 1977 as águas dos piezômetros acusaram um intervalo de variação ainda maior, de 14 a 2.000 micromhos por centímetro.

A figura 5.3 mostra a distribuição de isocondutividades das águas subterrâneas de Ponta de Pedras, coletadas através de piezômetros em junho-julho de 1977. Essa figura mostra uma região de águas subterrâneas com condutividades significativas, na Bacia do Rio Tijucaquara.

Vários autores consideram que a condutividade de uma solução aquosa é diretamente proporcional à sua concentração iônica e à sua temperatura. Entretanto, Hem (1970) lembra que sua condutividade não informa com simplicidade sua concentração iônica e Johnson (1974) lembra que em soluções tão diluidas como a maioria das águas subterrâneas, a condutividade é proporcional à quantidade de minerais dissolvidos.

Por outro lado, água quimicamente pura tem uma condutividade elétrica muito baixa.

Isso sugere que as águas subterrâneas de Ponta de Pedras são pobremente mineralizadas, a menos daquelas localizadas na re

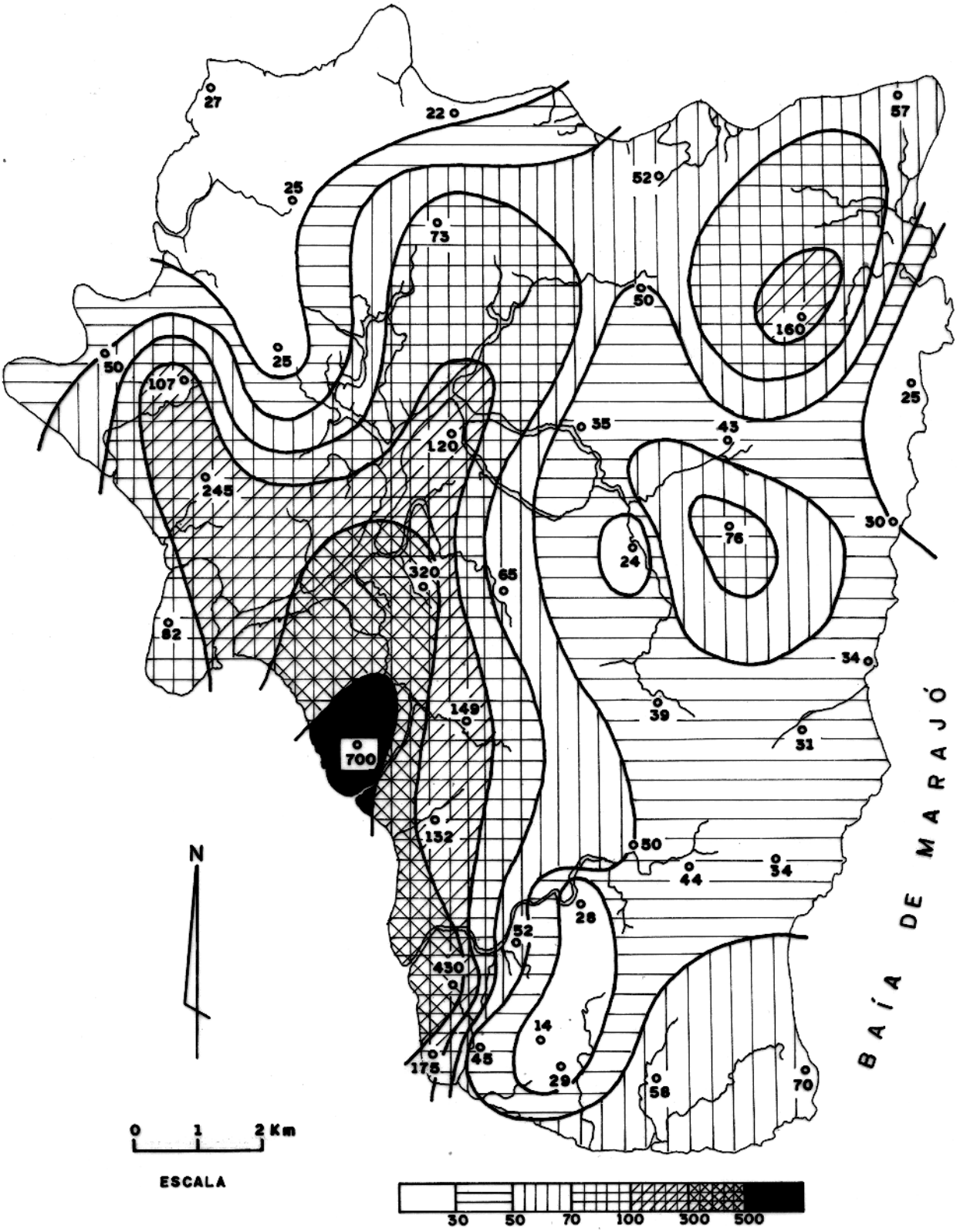


Fig. 5.3 Condutividade Elétrica das Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras. Amostras Coletadas em Piezômetros em Junho-Julho de 1977. Medidas em Laboratório em Micromhos por Centímetro. (Escala Log.).

gião do P24 (Bacia do Rio Tijucaquara).

No presente trabalho, estamos apresentando três gráficos que possibilitam o controle analítico das águas subterrâneas de Ponta de Pedras, em função de suas condutividades, figuras 5.3.A; 5.3.B e 5.3.C.

A figura 5.3.A representa uma função do tipo CA=R, onde:
C é a condutividade elétrica em micromhos por centímetro a 26°C.
R é o resíduo fixo a 103 - 105°C em miligramas por litro.
A é um fator que usualmente varia entre 0,55 e 0,75, para a maioria das águas subterrâneas (Hem, 1970).

Nas águas subterrâneas de Ponta de Pedras, o valor do fator A varia entre 0,50 e 1,00 para a maioria das amostras de águas analisadas.

A figura 5.3.B mostra a afinidade da condutividade elétrica com a quantidade de cloreto mais sulfato dissolvido nas amostras de águas subterrâneas de Ponta de Pedras coletadas através de piezômetros na campanha trimestral de junho-julho de 1977.

Naturalmente existe uma tendência da condutividade elétrica aumentar em função da concentração iônica de sódio mais potássio (Fig. 5.3.C). Pode-se notar uma exponensialidade nessas duas funções.

5.4. Sílica

O termos "sílica", representado pelo óxido SiO_2 é amplamente usado para se referir ao elemento químico silício nas águas naturais, mas sua forma verdadeira está hidratada e geralmente é representada por H_4SiO_4 ou $Si(OH)_4$ (Hem, 1970).

O sílicio é o elemento químico mais abundante na crosta terrestre depois do oxigênio (Mason, 1966; Horn e Adams, 1966; Rösler e Lange, 1972).

Rochas sedimentares do tipo "resistate" (p. ex. sedimentos arenosos quartzozos) são as mais ricas em Si e as rochas sedimentares do tipo "hidrolizate" (p. ex. sedimentos argilosos) contém esse elemento químico em segundo lugar em abundância (Horn e Adams,

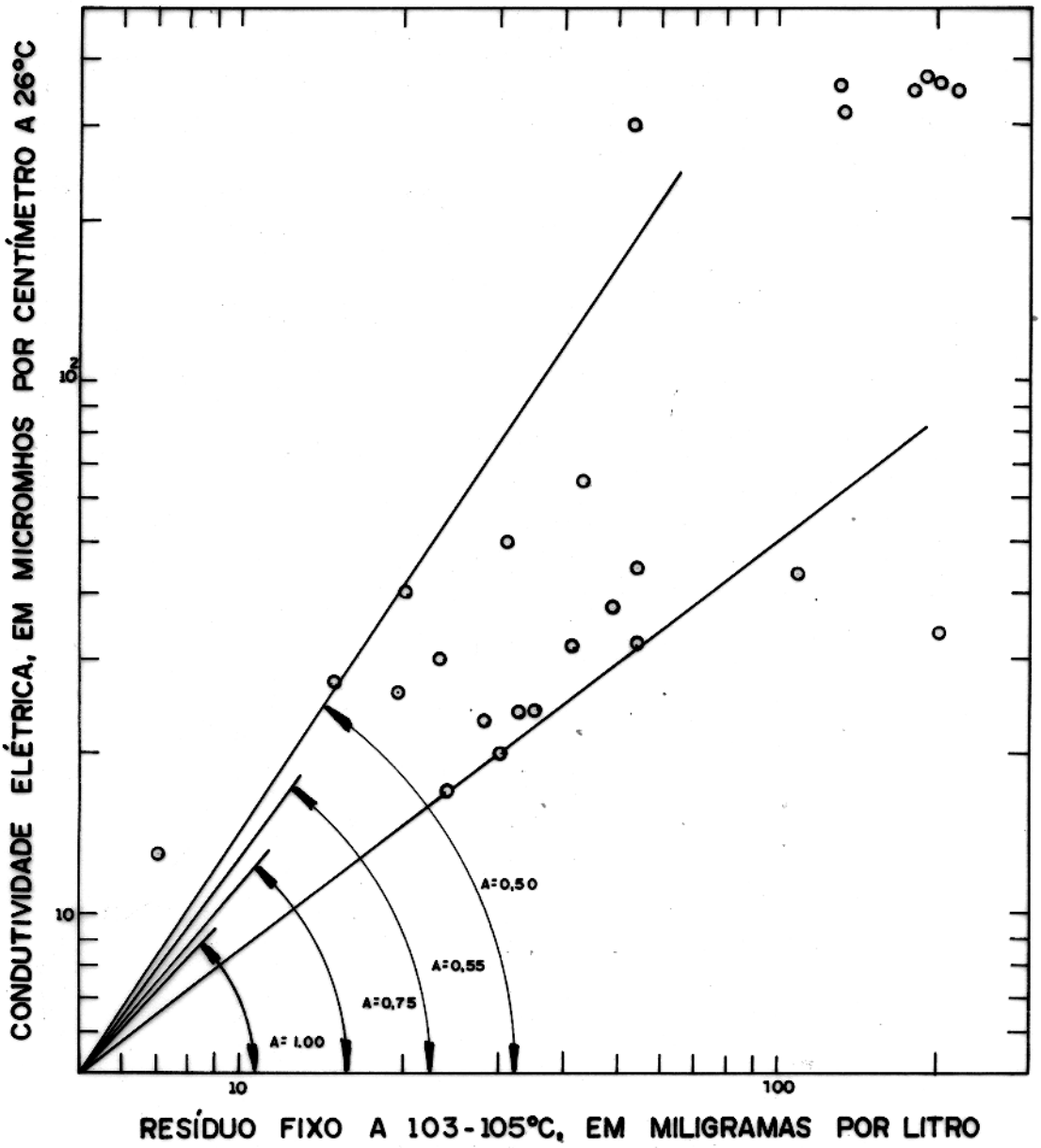


Fig. 5.3.A Condutividade Elétrica das Amostras de Águas de Poços de Ponta de Pedras em Função do Resíduo Fixo a 103 - 105°C, em Miligramas por Litro. (Escala Log.).

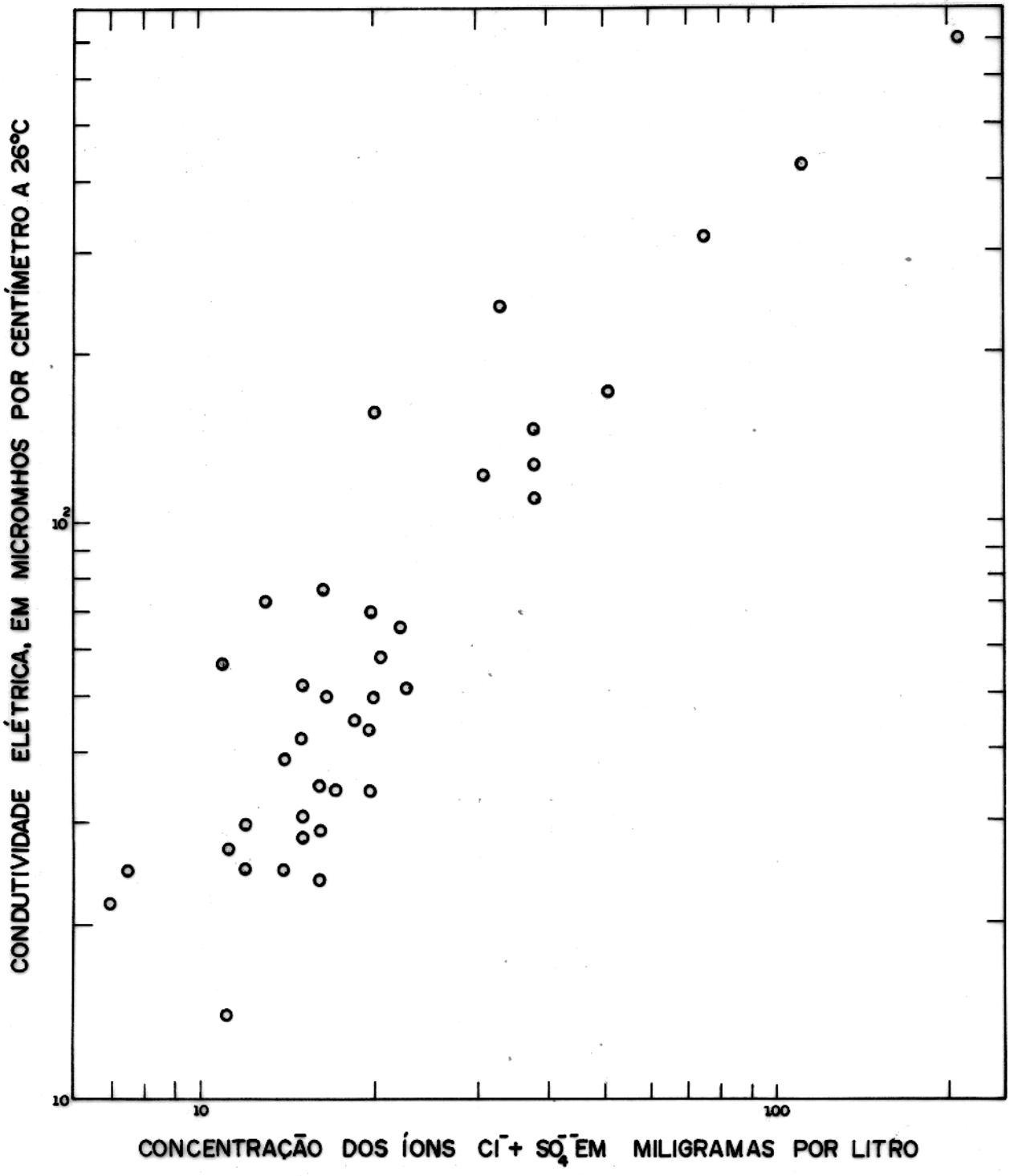


Fig. 5.3.B Condutividade Elétrica das Amostras de Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras Coletadas em Piezômetros na Campanha de Junho-Julho de 1977, em Função da Concentração dos Ions Cl^- + SO_4^{--} em Miligramas por Litro. (Escala Log.).

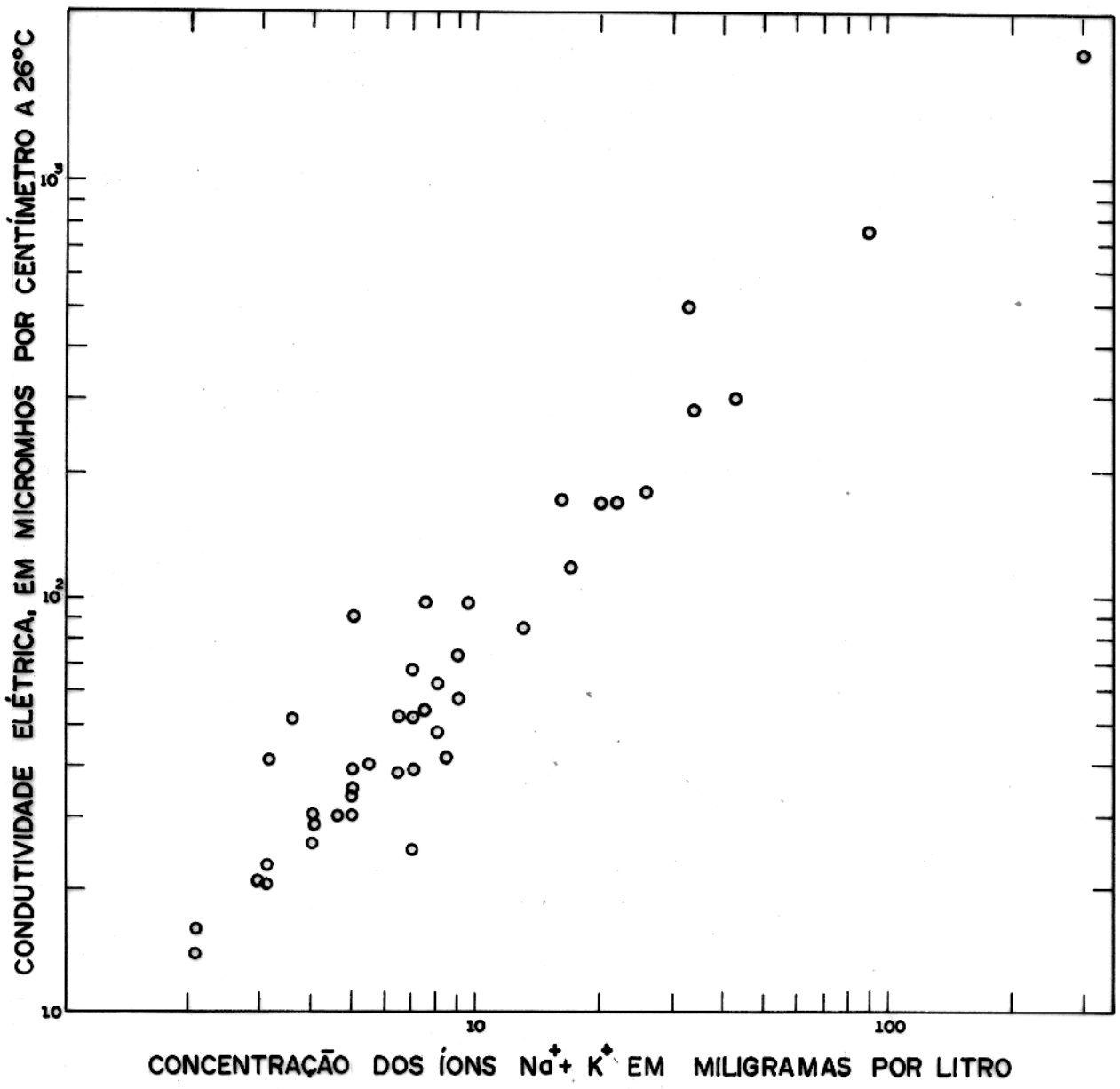


Fig. 5.3.C Condutividade Elétrica das Amostras de Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras Coletadas em Piezômetros na Campanha de Outubro de 1977, em Função da Concentração dos Ions $Na^+ + K^+$ em Miligramas por Litro.(Escala Log.).

1986). Sedimentos argilosos podem conter 28, 89 por cento de Si (Minami, 1935).

Visando-se a geoquímica da área em estudo, é importante lembrar que aqueles sedimentos são do tipo "resistate" e "hydrolyzate" os quais são fontes de sílica para as águas subterrâneas em estudo.

A sílica dissolvida em águas naturais resulta originariamente da decomposição dos minerais silicáticos, entre os quais o quartzo - forma cristalina de SiO_2 - é o mais resistente ao ataque intempérico pela água. Assim, esse mineral faz parte de muitos sedimentos do tipo "resistate" em bacias sedimentares.

Em condições normais de pressão e temperatura, onde os minerais silicáticos são intemperizados, a maior parte das reações que participam dessas transformações são tratadas como processos irreversíveis (Hem, 1970).

A solubilidade da sílica depende do pH da solução. Se o pH diminui, por exemplo, pela adição de dióxido de carbono, a sílica é precipitada.

Esse processo pode algumas vezes levar a notáveis concentrações de sílica. Normalmente o dióxido de carbono resulta da decomposição de substâncias orgânicas (Rankama e Sahama, 1950).

Teores médios de sílica em águas subterrâneas iguais a 17 mg/l e em águas superficiais iguais a 14 mg/l, são descritos por Davis (1964).

Amostras de águas subterrâneas de Ponta de Pedras, coletada em piezômetros em 26 a 30 de outubro de 1977, acusaram uma concentração da sílica (SiO_2) variando de 6,0 a 16,0 miligramas por litro nos piezômetros P34 e P37, respectivamente. A concentração média de sílica, em miligramas por litro, para 43 amostras é igual a 10,4.

Amostras de águas de poços usados pela população, coletadas em 26 e 27 de outubro de 1977, indicaram teores de sílica iguais a 10,8 mg/l (PP01), 10,5 mg/l (PE03) e 9,0 mg/l (PE07).

Amostra de água do Rio Canal, próximo ao P1, apresentou um teor de sílica de 4,0 mg/l e água da Baía do Marajó, próximo ao P28, indicou concentração de sílica igual a 4,0 mg/l. Desse modo, as águas superficiais estão apresentando teores de sílica bem menores que os teores apresentados pelas águas subterrâneas daquela região. Cuidados devem ser tomados com recipientes de vidro, pois esse enriquecem o conteúdo de sílica das amostras (Hem, 1970). Em nossas amostragens usamos recipientes de polipropileno, os quais são melhores para tais fins.

A figura 5.4 mostra a distribuição de teores de sílica em amostras de águas subterrâneas de Ponta de Pedras coletadas em outubro de 1977, onde notasse uma zona de maiores teores situada a SW da área em estudo.

5.4.1. Reações Envolvendo Sílica

Hem (1970) considera que alguma literatura mais antiga se refere à sílica na água em forma coloidal, mas espécies iônicas carregadas, usualmente SiO_3^{-2}, poderão ser especificadas.

A dissociação do ácido silícico representa a fonte mais importante de sílica dissolvida em água (Krauskopf, 1956). Essa reação poderá ser escrita da seguinte forma:

$$H_4SiO_4\ (aq) = H^+ + H_3SiO_4$$

O ácido silícico é produzido durante a decomposição de minerais silicáticos quando atacados por água. Essas reações podem ser mostradas, por exemplo, na decomposição de feldspato sódico:

$$2NaAlSi_3O_8(C) + 2H + 9H_2O(aq) = \underset{\text{(caulinita)}}{Al_2Si_2O_5(OH)_4(C)} + \underset{\text{(ácido silícico)}}{4H_4SiO_4(aq)} + 2Na^+$$

A caulinita produzida por essa reação pode se dissolver aumentando a concentração de ácido silícico, Polzer e Hem (1965):

$$Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 6H^+ = 2Al^{+3} + \underset{\text{(ácido silícico)}}{2H_4SiO_4} + H_2O$$

Essa reação provavelmente ocorre na região de Ponta de

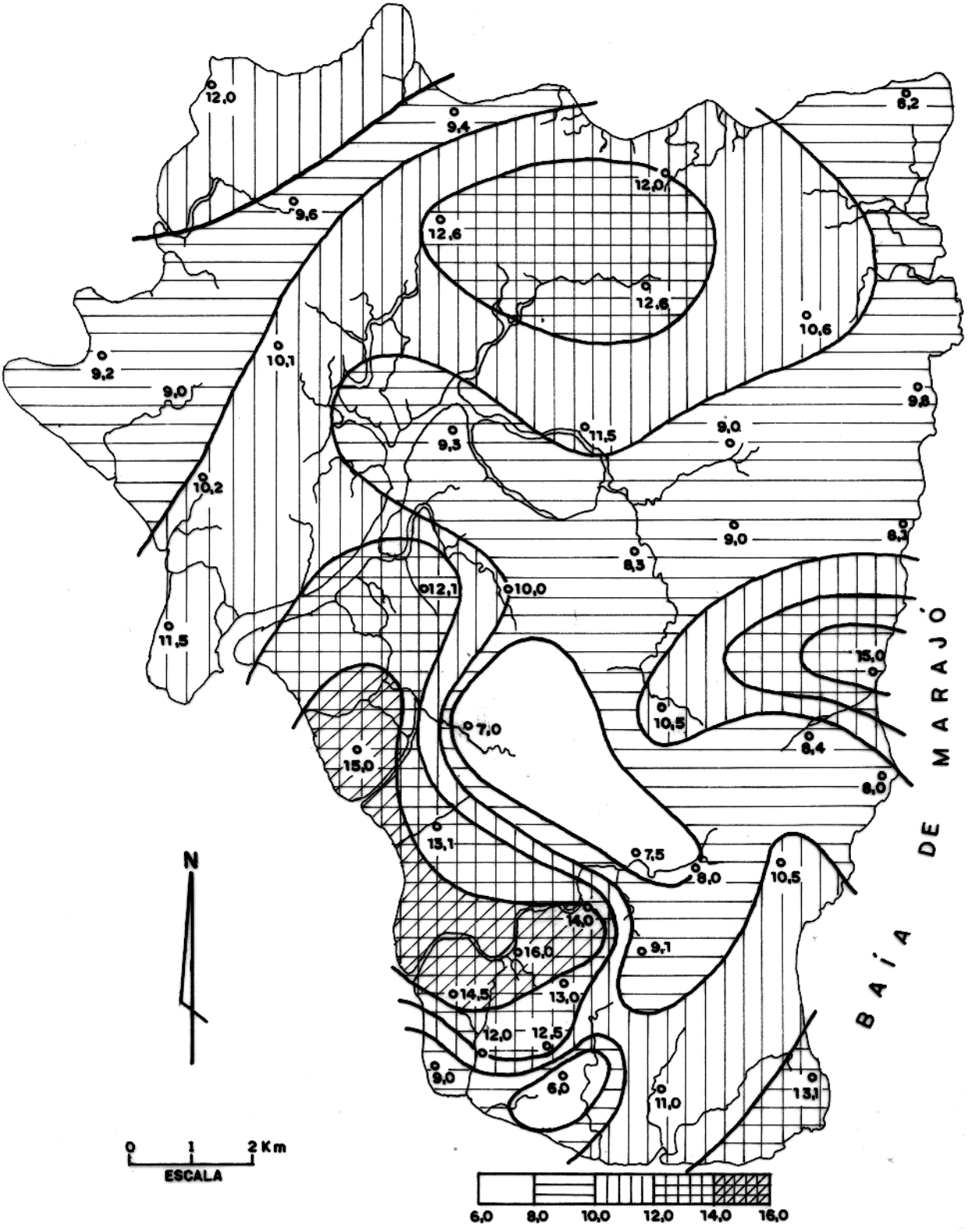


Fig. 5.4 Distribuição de Isoteores de Silica (SiO_2) em Miligramas por Litro. Amostras de Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras Coletadas em Piezômetros em 26 a 30 de Outubro de 1977.

Pedras.

5.5. Ferro

O elemento ferro é um constituinte de rochas e solos, abundante e disperso.

Praticamente todas as águas potalizáveis contém um pouco de ferro.

Concentrações de alguns décimos de miligramas por litro afetam a utilidade das águas para algumas finalidades domésticas e industriais.

Por essa razão o ferro é sempre incluído como um dos elementos mais importantes nas análises de águas (Hem, 1970).

5.5.1. Fontes de Ferro

Nas rochas ígneas, os principais minerais que contém ferro são; piroxênios, anfibólios, biotita, magnetita e nesosilicatos semelhantes à olivina. O ferro ferroso é a forma mais comum, mas pode estar misturado com ferro férrico como no caso da magnetita ($FeO.Fe_2O_3$)(Hem, 1970).

Em sedimentos, o mesmo autor considera que o ferro ocorre na forma ferrosa em espécies semelhantes a polisulfetos-pirita ou marcasita (FeS_2). Carbonato de ferro (siderita)e misturas de óxidos (magnetita) também ocorrem como em minerais de rochas ígneas ou metamórficas. O ferro férrico está comumente misturado com ferroso em glauconita e ferro ferroso e férrico estão espalhados como menores componentes na maioria dos sedimentos. Os óxidos e hidróxidos férricos são muito importantes pontos de apoio para minerais de ferro. Hematita (Fe_2O_2) é uma forma desitratada. As espécies hidratadas $Fe(OH)_3$ são geralmente externamente uma estrutura cristalina bem definida e podem conter menos água que a soma indicada. A limonita é uma espécie hidratada $2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$.

Os óxidos férricos hidratados contidos nas rochas e solos são comumente responsáveis por colorações vermelha, marrom e amarela. A solução de ferro a partir de minerais silicáticos é um pro

cesso normalmente lento, mas próximo da superfície de alteração de silicatos portadores de ferro, pode ser produzida uma acumulação de óxidos e hidróxidos de ferro. As espécies de minerais-óxidos e sulfeto - são usualmente as principais fontes através das quais o ferro dissolvido de água subterrânea é derivado (Hem, 1970).

O ferro está sempre presente também no metabolismo das plantas e animais (Rankama e Sahama, 1968; Hem, 1970). Nas plantas, o elemento ferro é um micronutriente exigido em quantidades relativamente menores que outros micronutrientes (Epstein, 1975).

Portanto, o ferro deverá existir em restos orgânicos em decomposição nos solos, e as atividades na biosfera têm uma forte influência na ocorrência de ferro nas águas.

5.5.2. Espécies de Ferro em Águas Naturais

A forma mais comum de íon de ferro em solução nas águas subterrâneas é o íon ferroso Fe^{+2} (Hem, 1970 e 1976).

O complexo $FeOH^{+}$ pode ocorrer em soluções muito pequenas com espécies de dióxido de carbono dissolvido. Complexos ferrosos são formados por muitas moléculas orgânicas, mas informações exatas sobre as espécies que podem ser esperadas em água natural não estão avaliadas.

Para pH > 11, o ânion $HFeO_2^{-}$ pode existir em apreciável quantidade, mas pH muito alto é raramente alcançado em sistemas naturais.

Íon férrico pode ocorrer em soluções ácidas sob a forma Fe^{+3}, $FeOH^{+2}$, $Fe(OH)_2^{+}$ e formas polimétricas, a forma predominante e suas concentrações dependem do pH. Para pH>4,8 a solubilidade de espécies férricas é menor que 0,01 miligramas por litro (Hem, 1970).

As soluções mais concentradas de ferro férrico podem conter partes de formas polimerizadas de hidróxido férrico, e as espécies $Fe(OH)_3$ (aq) têm sido anunciadas por Lamb e Jacques (1938).

Hidróxido férrico coloidal está comumente presente em águas superficiais e pequenas quantidades podem persistir igualmen

em águas claras.

Espécies férricas aniônicas semelhantes a FeO_4^{-2} são improváveis para serem encontradas em águas naturais porque elas requerem fortes condições oxidantes e forte pH que não são prováveis de ocorrerem.

5.5.3. Controle de Solubilidade do Ferro

Hem (1970 e 1976) apresenta um diagrama Eh-pH (Potencial Redox - pH) para o ferro, onde os campos de estabilidade para o ferro em forma sólida e dissolvida são uma função do Eh e pH a $25^{o}C$ e 1 atmosfera de pressão e foram construidos usando as equações que formulam a ação da lei das massas e a equação de Nernst.

As variáveis de principal importância que influenciam a solubilidade do ferro inclui o pH, o Potenciâl Redox Eh, o dióxido de carbono dissolvido e espécies de enxofre. Cálculos desse tipo feitos por Hem e Cropper (1959) foram verificados no campo em estudos de águas subterrâneas por Barnes e Back (1964).

Dos diagramas Eh-pH pode-se tirar conclusões importantes para a compreensão da solubilidade do ferro, entre outras relacionamos:

- o íon Fe^{+3} só é solúvel em ambientes onde o pH é menor que 2,5.
- quando se aumenta o pH a partir de 2,5 até 4,8, Fe^{+3} permanece em solução combinando-se em $FeOH^{+2}$ e $Fe(OH)_2^{+}$.
- para pH>4,8 o Fe^{+3} precipita como hidróxido férrico.
- para pH>6,5 e Eh = 0,010 até 0,80 volts, o ferro atinge seu valor máximo de oxidação e com valência máxima +6 combina-se com oxigênio dando o composto solúvel FeO_4^{-2}.
- o ferro ferroso Fe^{+2} é solúvel em águas naturais para pH<8,5 sendo que sua solubilidade aumenta com a diminuição do pH.
- para qualquer valor de pH da faixa de intervalos entre 0,5 até 14, o íon Fe^{+2} precipita na presença de enxofre dando o composto FeS em um ambiente com Eh<0,020 volts.

- para pH alcalino entre 8,3 e 11,2 e Eh<0 o Fe^{+2} precipita como carbonato ferroso $FeCO^3$.
- para ph>11,2 e Eh variando entre -0,40 e -0,67, o Fe^{+2} é solúvel na forma $HFeO_2^-$.
- o Fe^{+2} precipita com enxofre para formar pirita FeS apenas em uma pequena região do gráfico Eh-pH onde as condições de pH são bastante redutoras e o Potencial Redox Eh está entre -0,65 e -0,80.
- o ferro tem tendência para permanecer solúvel na forma Fe^{+2} em ambientes redutores com pH ácido.
- o ferro tem tendência para precipitar como óxido ou hidróxido férrico em presença de ambientes oxidantes com pH desde ácidos até alcalinos.

5.5.4. Coleta de Amostras de Águas Subterrâneas para Medir Teores de Ferro

O ferro no estado ferroso é instável em presença do ar, mudando para o estado férrico quando a água que o contém é colocada em presença de ar. Em contato com o ar, o ferro dissolvido, no estado ferroso, passa para o estado férrico e sai da solução porque sendo muito insolúvel se precipita. Os compostos precipitados são formados, principalmente, por óxidos e hidróxidos férricos que são conhecidos comumente como ferrugem.

Água de poço contendo ferro dissolvido em proporção apreciável pode ser completamente límpida e incolor logo após o bombeamento.

Colocada por algum tempo em contato com o ar, o ferro dissolvido é afetado. A água começa a se turvar e mais tarde um depósito cor de ferrugem pode ter sido formado no fundo do recipiente.

Em poços onde o revestimento e instalações são de ferro, a água entrando em contato com esses materiais, poderá adquirir ferro. Quanto mais corrosiva for a água, mais ferro das superfícies de contato entram em solução. Um poço que não está sendo usado a algum tempo, acusará maior teor de ferro que a água do aquífero. Johnson (1974) considera, por isso, que na coleta de amostras a bomba deve ser colocada em funcionamento durante o tempo necessá

rio e suficiente para que a água que permanecia estacionada seja removida.

Quando a água passar a ser límpida completamente, a amostra deverá ser tomada o mais próximo possível da descarga da bomba antes que a água entre em contato com o ar.

Segundo esse autor, os teores de ferro dissolvido em águas subterrâneas podem diminuir após a amostragem no poço até o momento em que é analisada em laboratório, dando resultados falsos sobre as condições naturais da água no aquífero.

Para se evitar em parte esse problema, adiciona-se ácido (por exemplo HCl) na amostra no momento da coleta, apenas naquela que se destina à análise para se medir teores de ferro dissolvido.

Essa adição ácida tem por objetivo baixar o pH de solução favorecendo a continuidade solúvel do teor de ferro original (Hem, 1970).

5.5.5. Teores de Ferro em Águas Subterrâneas

Sob condições anaeróbicas a forma mais abundante do ferro dissolvido em águas subterrâneas é Fe^{+2}, o qual poderá estar presente em fortes concentrações em equilíbrio com compostos de ferro (Berner, 1975).

White (1963) considera que o ferro dissolvido em fontes termais de águas subterrâneas está em intervalos de concentração desde <0,01 ppm até 500 ppm, e que outros tipos de águas subterrâneas com pH>4 têm concentrações de ferro variando desde <0,01 ppm e valores maiores que 100 ppm são encontrados em águas subterrâneas de minas ácidas onde o pH<2.

Dados de teores de ferro de águas subterrâneas de poços nos U.S.A., analisados pelo U.S. Geolical Survey variam de 2,3 mg/l até 11,0 mg/l (Hem, 1970).

Müller (1965) em Rösler e Lange (1972), apresenta teores de ferro em águas subterrâneas conatas de grandes profundidades na Bacia Thuringian e North German Plain com valores bastante altos, chegando a 782 miligramas por litro.

Ovchinnikov (1963) e Jordan (1967), em Rösler e Lange (1972), citam teores de ferro em águas de fontes minerais, também bastante altos: Fe^{+2} = 499,5 mg/l e Fe^{+3} = 152,7 mg/l.

Teores de ferro, em três fontes termais no Japão, variando de 0,217 até 1,01 miligramas por litro foram descritos por Uzumasa em Rösler e Lange (1972).

Em são Luiz do Maranhão, de um total de 29 amostras de águas subterrâneas analisadas os resultados foram: 5 amostras de poços profundos em aquífero confinado, 1 amostra de poço tubular em aquífero livre e 15 amostras de outros tipos de poços, não apresentaram ferro.

Sete outros poços apresentaram águas com teores de ferro entre 0,05 até 1,9 miligramas por litro. Um poço apresentou água com teor de ferro igual a 8 miligramas por litro (SUDENE, 1972).

5.5.6. Ferro em Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras

Análises químicas realizadas em mais de 120 amostras de águas subterrâneas de Ponta de Pedras, coletadas desde 03.11.1976 até 30.10.1977, indicaram concentrações de ferro total variando entre 0,0 até 4,0 miligramas por litro, com um valor médio igual a 1,3 miligramas por litro.

Amostras dessas águas coletadas através de piezômetros em junho-julho de 1977, indicaram concentrações de ferro total variando de 0,0 até 4,0 miligramas por litro, com um valor médio igual a 2,2 miligramas por litro.

Amostras dessas águas coletadas através de piezômetros em 26 a 30 de outubro de 1977, indicaram concentrações de ferro total variando entre 0,1 e 3,2 miligramas por litro, com um valor médio igual a 1,0 miligramas por litro.

Amostras dessas águas coletadas em poços usados pela população, maioria do tipo escavado, desde 03.11.1976 até 30.10. 1977, indicaram concentrações de ferro total variando entre 0,0 até 4,0 miligramas por litro, com um valor médio igual a 0,7 miligramas por litro.

A figura 5.5.6 mostra a distribuição de isoteores de ferro total em amostras de águas subterrâneas de Ponta de Pedras, coletadas em junho-julho de 1977.

Os poços usados pela população, principalmente aqueles do tipo escavado, apresentam teores de ferro total mais baixos que os apresentados por águas de piezômetros. Isso é devido, muito provavelmente, à precipitação do ferro férrico que é oxidado a partir do ferro ferroso, fenômenos já discutidos neste trabalho em seções anteriores. Os valores mais altos de teor de ferro nas águas desses poços foram encontrados no PE01 e PP01, onde seus valores de pH são baixos entre 3,3 e 5,2. Acidez alta favorece a solubilidade do ferro em águas naturais (Hem, 1970 e 1975).

Os piezômetros apresentaram águas com teores de ferro mais elevados, em média, devido em parte, ao fato deles estarem lacrados até o momento de coleta. Desse modo, as águas dos piezômetros têm tendência em dificultar a oxidação do ferro ferroso e portanto refletem com mais veracidade os teores de ferro total dissolvidos naquelas águas subterrâneas.

A concentração de ferro total nas amostras de piezômetros coletados em outubro de 1977, apresentaram um valor médio bem menor (1,0 mg/l) que o valor médio encontrado em amostragem feita em junho-julho de 1977. De fato, a partir do mês de julho, aproximadamente, a superfície piezométrica sofre um rebaixamento e o ferro dissolvido na forma reduzida vai sendo oxidado, precipitando-se como cimento ferruginoso dos sedimentos, diminuindo assim seus teores em ferro total dissolvido.

Os processos de oxidação do ferro ferroso pódem estar ocorrendo em presença da água passando para formas menos solúveis. Essas reações podem ser expressas:

$$Fe^{+2}\ (aq) - e^{-} = Fe(OH)_3$$

(precipita)

Precipitação de Fe^{+} também pode ocorrer na presença de enxofre (S):

$$Fe^{+2}\ (aq) + S^{-2}\ (aq) = Fe\ S$$

(precipita)

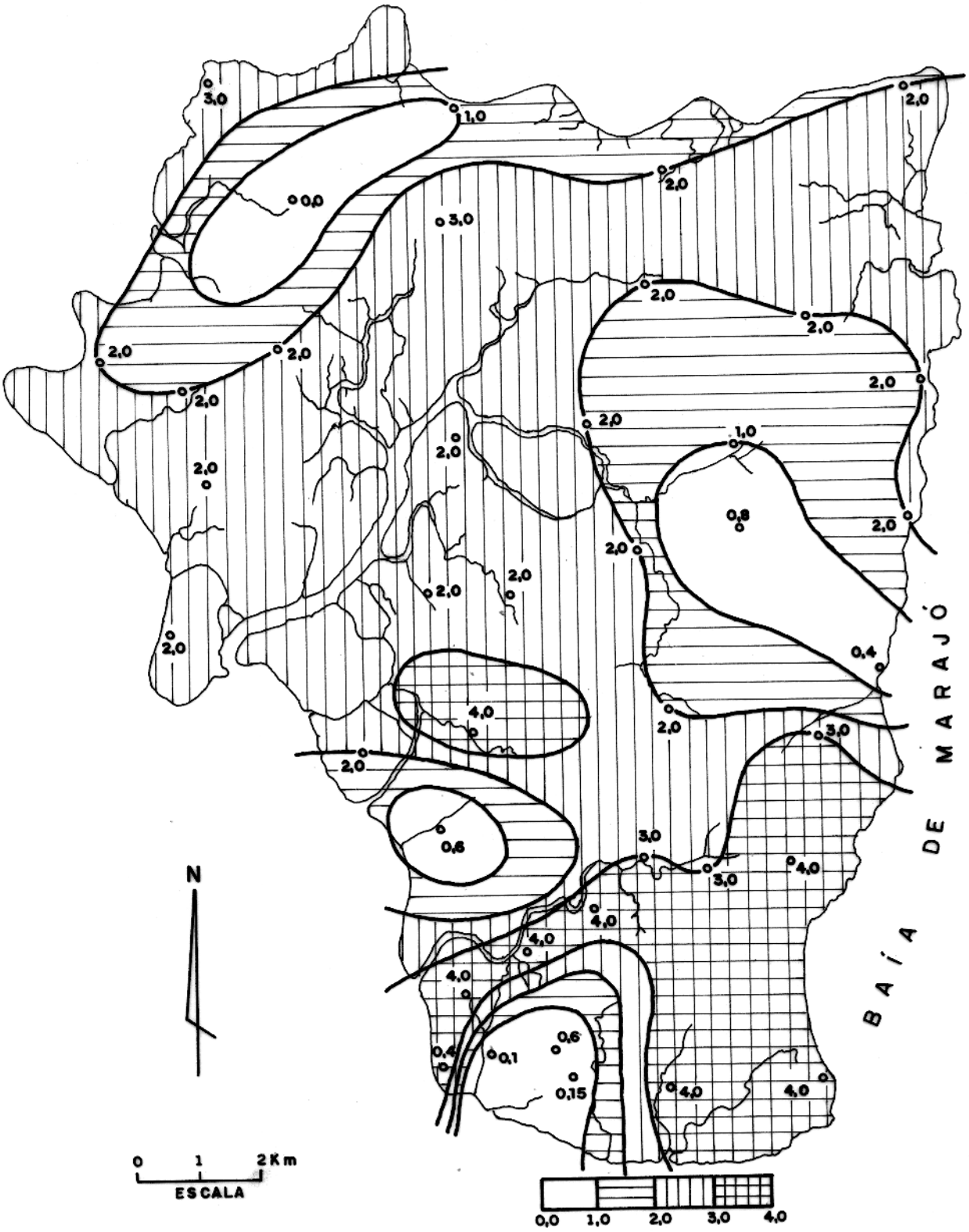


Fig. 5.5.6 Isoteores de Ferro Total em mg/l. Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras Coletadas em Junho-Julho de 1977 em Piezômetros.

Para águas subterrâneas com pH entre 2,5 e 4,8 podem ocorrer compostos férricos iônicos dissolvidos, tais como:

$Fe(OH)_2^+$ e $FeOH^{+2}$

Ions Fe^{+3}, se ocorrerem nas águas subterrâneas de Ponta de Pedras, estarão bem restritos, pois necessitam pH<2,5.

É provável que parte da oxidação do ferro ferroso nas águas subterrâneas em estudo, é feita pela ação das bactérias do ferro.

Segundo Sistrom (1973) a oxidação do ferro é realizada pelo Ferrobacilus segundo a reação:

$$Fe^{+2} \rightarrow Fe^{+3} + e^-$$

A intercalação de vegetais fósseis nos sedimentos da área em estudo, pode contribuir com ambientes favoráveis para a redução de ferro férrico dando concentrações de ferro ferroso relativamente altas para aquelas águas subterrâneas.

A figura 5.5.6.1 é um gráfico Eh-pH, adaptado de Hem (1970), mostrando o campo de variação do pH das águas subterrâneas em estudo e as possíveis formas de ferro presentes.

5.6. Manganês

Pequenas concentrações de manganês em água podem constituir em objetáveis impurezas. Por essa razão, as concentrações de manganês são objetos de estudo em análises de água. Na química da água o manganês se assemelha ao ferro, quimicamente, porém suas concentrações são bem menores (Hem, 1970).

Segundo Horn e Adams (1966), excluindo o oxigênio, o manganês é o décimo elemento mais abundante em rochas ígneas, o décimo primeiro mais abundante em rochas sedimentares do tipo "resistates" e o décimo segundo elemento mais abundante em rochas sedimentares do tipo "hydrolyzates".

Em minerais de rocha ígnea, o manganês encontra-se, usualmente, na forma reduzida Mn^{+2}, entretanto, óxidos e hidróxidos de

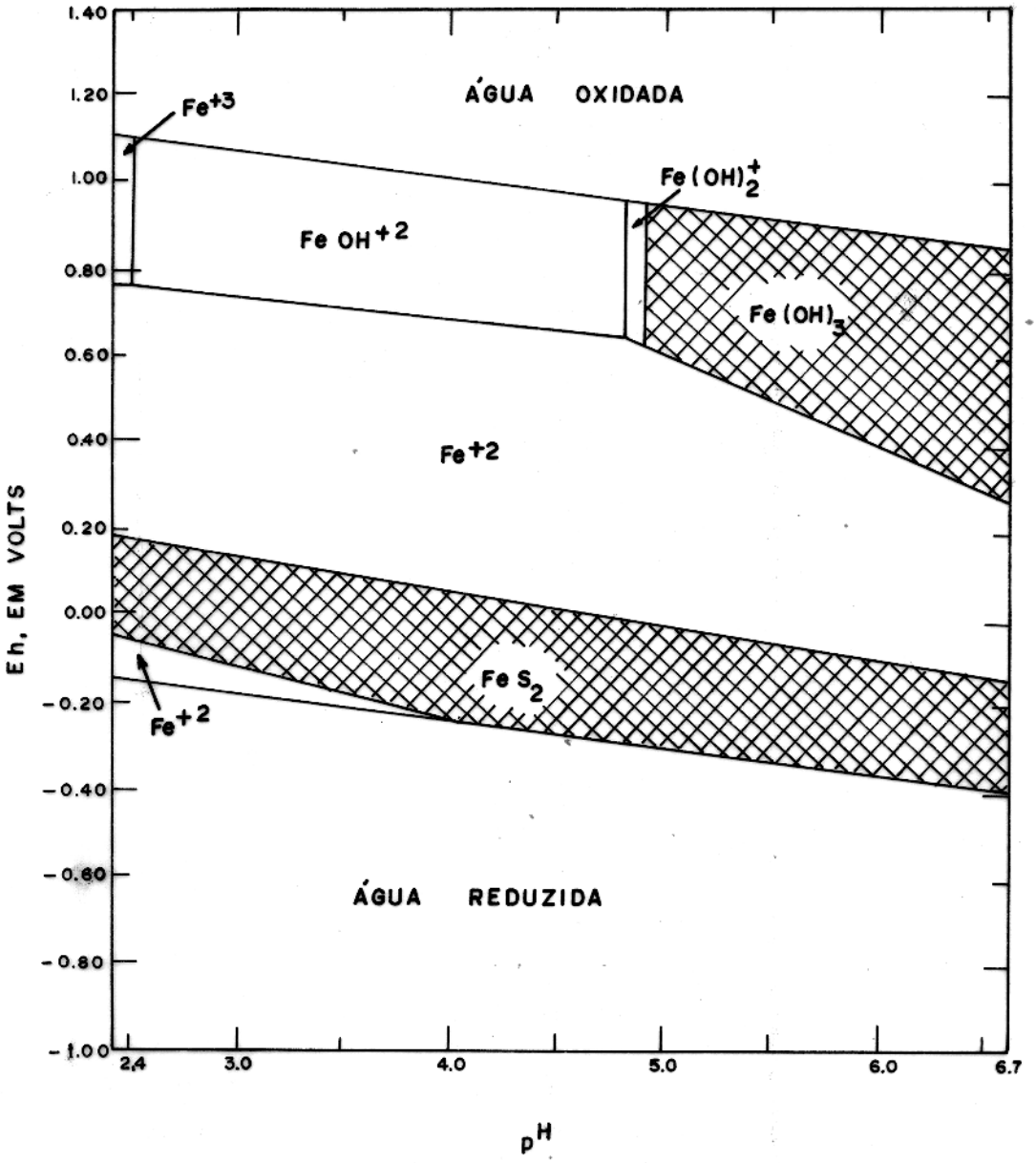


Fig. 5.5.6.1 Campo de Estabilidade para Formas de Ferro Sólido e Dissolvido em Função do Eh e pH a 25°C e Pressão de 1 Atmosfera. Atividade de Espécies de Enxofre 96 mg/l em SO_4^{-2}. Espécies de Dióxido de Carbono 1.000 mg/l em HCO_3^- e Ferro Dissolvido 0,0056mg/l, Adaptado de Hem(1970).

manganês são formas mais comuns em rochas e solos, onde os estados de oxidação do elemento são: Mn^{+2}, Mn^{+3} ou Mn^{+4} (Hem, 1970; Rankama e Sahama, 1950).

Manganês é essencial para as plantas e animais, mas em excesso é tóxico (Rankama e Sahama, 1950).

Bactérias do Manganês, provavelmente, fazem parte da oxidação desse elemento, com efeitos similares às bactérias do ferro (Hem, 1970).

O manganês assim como o ferro, são micronutrientes exigidos pelas bactérias (Epstein, 1975).

Análises químicas em 75 amostras de águas subterrâneas da região em estudo, indicaram que o elemento químico manganês pode estar ausente em algumas amostras, mas na maioria delas está presente chegando a concentrações máximas de 0,25 miligramas por litro. Em média, a concentração de manganês para essas amostras atingiu 0,06 miligramas por litro.

Amostras de águas de poços usados pela população, coletadas de 08.04.1977 até 27.10.1977, indicaram ausência de manganês em algumas delas, mas na maioria delas esse elemento químico se mostrou presente atingindo concentrações de 0,10 miligramas por litro. Essas amostras apresentaram uma média para concentração de manganês de 0,04 miligramas por litro.

Amostras de águas subterrâneas coletadas em piezômetros em 26 a 30 de outubro de 1977, não apresentaram manganês nos P14, P16 e P34, mas o manganês foi detectado na maioria dessas amostras atingindo concentrações de 0,15 miligramas por litro nos P18, P21, P24 e P33. As amostras de águas de piezômetros apresentaram uma concentração média para o manganês igual a 0,07 miligramas por litro.

As amostras de águas dos piezômetros apresentaram uma média de teor de manganês maior que o teor médio apresentado pelos poços usados pela população.

Nos poços usados pela população é provável que a ação bacteriana favoreça a precipitação do manganês através de sua oxidação. Além disso, pequenos aumentos de pH nessas águas podem provo

car a precipitação de MnO (c) (Morgan, 1967; Hem, 1963 e 1964). Nos piezômetros a ação das bactérias do manganês deve ser relativamente menor.

Segundo o gráfico Eh-pH de Hem (1970), adaptado para as águas subterrâneas em estudo, o íon Mn^{+} parece predominar, Fig. 5.6.

5.7. Cálcio

Cálcio é o quinto elemento químico mais abundante na crosta terrestre (Mason, 1971).

Segundo Horn e Adams (1966) em Hem (1970), o cálcio ocupa o terceiro lugar em abundância nas rochas sedimentares do tipo "resistates", o quinto lugar nas rochas sedimentares do tipo "hydrolyzates", e nas rochas sedimentares do tipo "precipitates" o cálcio é o elemento químico mais abundante.

A composição de substâncias solúveis em águas de rios, segundo vários autores, onde o cálcio aparece sempre como o cátion mais importante é apresentado em Rösler e Lange (1972). Em muitas águas doces, o cálcio é o principal cátion (Hem, 1970). Águas subterrâneas de poços profundos da Ilha de São Luiz do Maranhão apresentaram teores de cálcio variando entre 0,8 até 178,0 mg/l.

O cálcio é um constituinte invariável em todas as plantas e um dos elementos mais importantes na formação dos ossos dos vertebrados (Rankama e Sahama, 1950). A deficiência de cálcio afeta severamente o crescimento das raízes das plantas. Muitos dos sôlos insuficientes em cálcio são ácidos de modo que essa insuficiência pode ser acompanhada por níveis tóxicos de iônios hidrogênio e de metais pesados como alumínio, manganês e outros que tendem entrar em solução quando o pH é baixo. As raízes danificadas são susceptíveis à infecção por bactérias e fungos (Epstein, 1975). Isso pode estar acontecendo na área em estudo.

As águas subterrâneas de Ponta de Pedras, em estudo, são muito pobres em concentrações de cálcio. Nessas águas, parece que

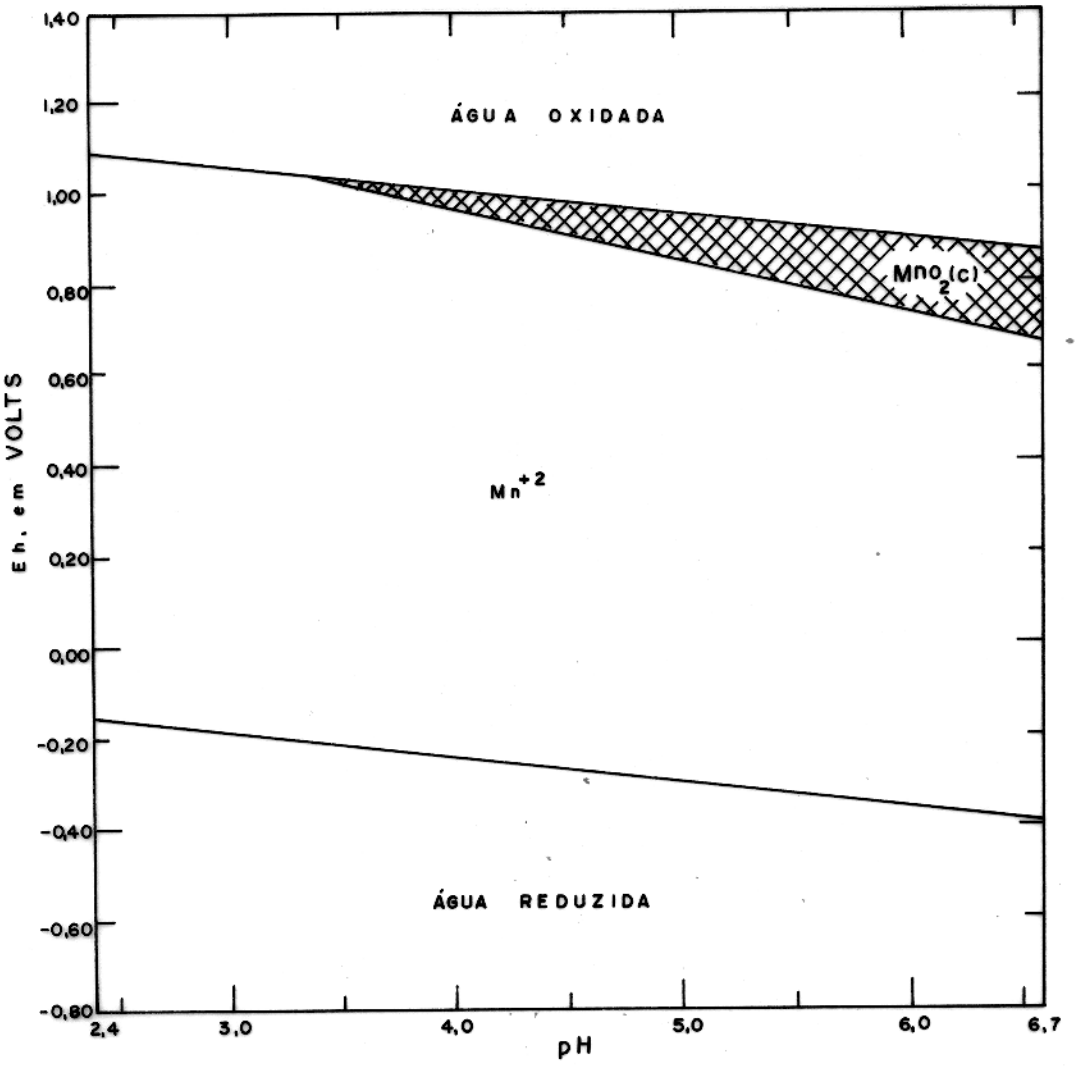


Fig. 5.6 Campo de Estabilidade de Manganês Sólido e Solúvel em Função do Eh e pH a 25°C e Pressão de 1 Atmosfera. Atividade de Espécies de Dióxido de Carbono Dissolvido 100 mg/l em HCO_3^-. Espécies de Enxofre Ausente, Adaptado de Hem(1970).

as baixas concentrações de cálcio estão relacionadas aos baixos valores de pH encontrados.

Análises químicas realizadas em mais de 100 amostras dessas águas indicaram que o cálcio está praticamente ausente em várias delas, chegando a uma concentração máxima de 16,4 miligramas por litro. Essas águas apresentaram uma concentração média de cálcio igual a 1,9 miligramas por litro.

Análises em amostras de águas de poços usados pela população indicaram ausência, praticamente, de cálcio na maioria delas, sendo que os maiores teores desse elemento foram encontrados no PP01 (3,6 - 4,4 miligramas por litro). Águas desses poços apresentaram uma concentração média de cálcio igual a 1,4 miligramas por litro.

Amostras de águas subterrâneas coletadas através de piezômetros em junho-julho de 1977 apresentaram ausência de cálcio, praticamente, em várias delas, sendo que o valor máximo encontrado foi de 15,2 miligramas por litro e uma concentração média de 2,3 miligramas por litro.

Amostras de águas subterrâneas coletadas através de piezômetros em outubro de 1977, apresentaram teores de cálcio semelhantes aos anteriores, com um teor máximo de 16,4 miligramas por litro e uma média igual a 2,4 miligramas por litro. As maiores concentrações de cálcio foram encontradas no P38.

Os valores médios para concentrações de cálcio são ligeiramente menores do que aqueles encontrados para concentrações do elemento químico magnésio, sugerindo alguma contribuição de águas do mar nessas águas subterrâneas, durante a deposição dos sedimentos que as contém.

O P24 apresenta concentrações de cálcio bem menores que as concentrações do magnésio, sugerindo a presença de água salgada naqueles sedimentos. Segundo Hem (1970) uma baixa razão Ca/Mg pode ser indicação da contaminação por água de mar. Porém, a localização do P24 sugere a contaminação do aquífero por infiltração de substâncias relacionadas à criação de gado nas proximidades do piezômetro.

A figura 5.7 mostra a distribuição dos teores de cálcio das águas subterrâneas de Ponta de Pedras, coletadas em junho-julho de 1977.

O baixo teor de cálcio nas águas subterrâneas em estudo, sugere a ausência de minerais de rochas sedimentares do tipo "precipitates".

De fato, sedimentos desse tipo não foram encontrados na área em estudo.

A presença de corpos de argila caulinitica na área, pode indicar que a principal fonte de cálcio daquelas águas subterrâneas é a decomposição de feldspatos cálcicos.

Com efeito, sedimentos do tipo "hydrolyzates" derivados de minerais intemperizados dão origem a argilas portadoras de cálcio. Assim, a decomposição da anortita pode mostrar esse fato através da expressão:

$$CaAl_2Si_2O_8 + H_2O + 2H^+ = Al_2Si_2O_5(OH)_4 + Ca^{+2}$$

(anortita) (argila caulinítica)

Outros tipos de argilas presentes na área em estudo, também podem ser fontes do elemento químico cálcio. Com efeito, segundo Hem (1970) a montmorilonita, como portadora de cálcio, pode contribuir com esse elemento dissolvido nas águas subterrâneas.

Cálcio também está presente em forma de íons adsorvidos em superfícies minerais carregadas negativamente nos solos, sedimentos e rochas sedimentares. Com a variação do quimismo onde esse elemento se encontra adsorvido, ele poderá entrar em solução e contribuir com teores de cálcio nas águas subterrâneas, mas o contrário também poderá ocorrer.

5.8. Magnésio

O magnésio é o oitavo elemento químico mais abundante na crosta terrestre (Mason, 1971).

Rankama e Sahama (1950) consideram que o magnésio é um elemento químico característico de sedimentos dos tipos "precipita

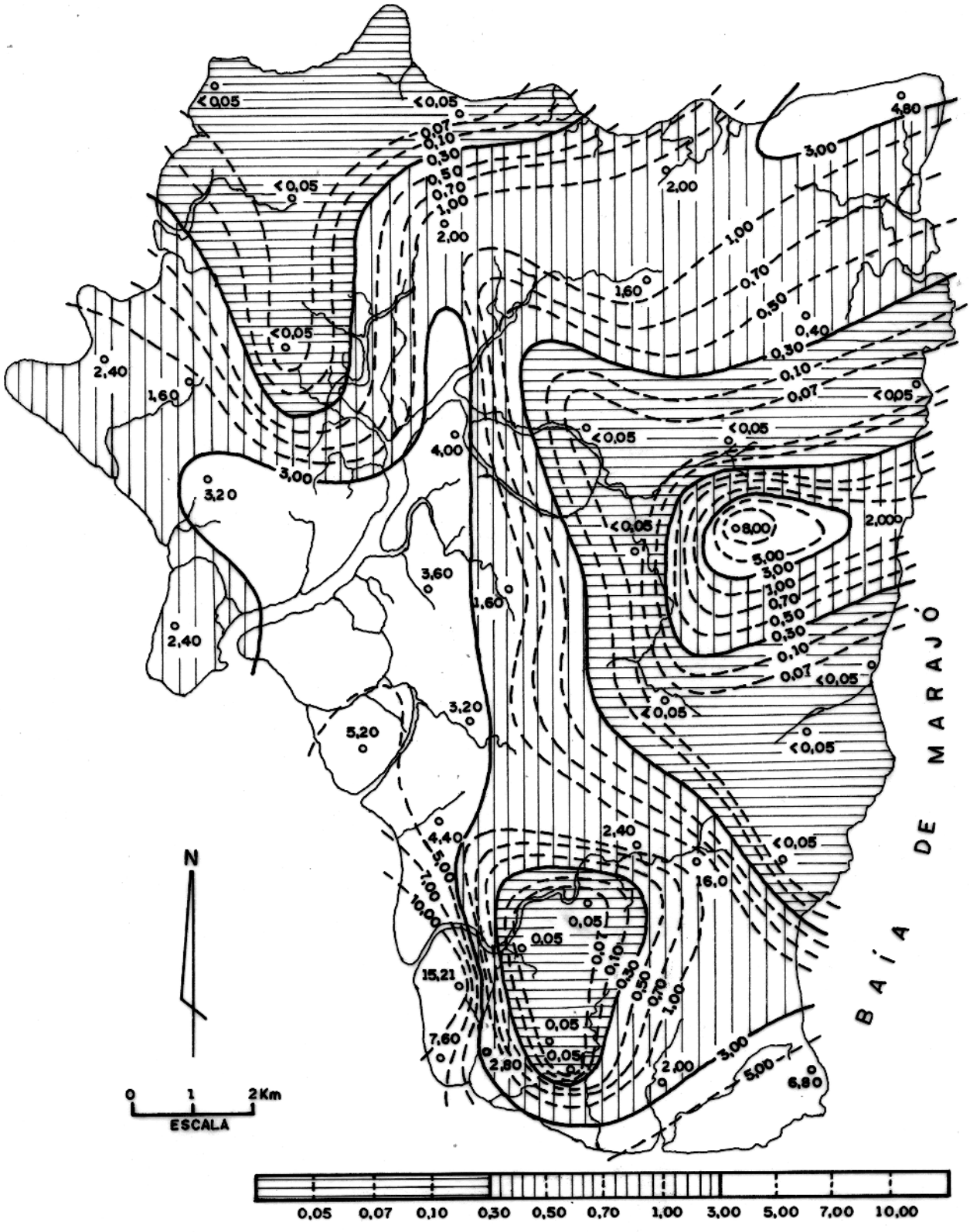


Fig. 5.7 Distribuição dos Teores de Cálcio. Amostras de Águas Subterrâneas Coletadas em Piezômetros em Junho-Julho de 1977, em mg/l. Escala Log.

tes" e "evaporates".

Horn e Adams (1966) consideram que depois do oxigênio, o magnésio é o sétimo elemento químico mais abundante nas rochas sedimentares do tipo "resistates", o sexto elemento químico mais abundante nos sedimentos do tipo "hydrolyzates" e o terceiro elemento químico mais abundante em sedimentos do tipo "precipitates".

Segundo vários autores o comportamento do magnésio é muito similar ao do cálcio. Esses dois elementos são as principais causas da dureza. Por outro lado, o comportamento geoquímico do magnésio é substancialmente diferente do cálcio (Hem, 1970).

O magnésio é um micronutriente essencial para todos os tipos de plantas (Epstein, 1975).

As águas subterrâneas de Ponta de Pedras são muito pobres em magnésio.

Análises químicas realizadas em mais de 100 amostras dessas águas indicaram que o magnésio está praticamente ausente em várias delas, chegando a uma concentração máxima de 40,2 miligramas por litro no P24 (amostras coletadas em outubro de 1977). Essas águas apresentaram uma concentração média de magnésio igual a 2,4 miligramas por litro.

Análises em amostras de águas de poços usados pela população indicaram ausência praticamente de magnésio na maioria delas, sendo que os maiores teores desse elemento foram encontrados no PP01 (6,0 - 6,4 miligramas por litro). Águas desses poços apresentaram uma concentração média de magnésio igual a 1,6 miligramas por litro.

Amostras de águas subterrâneas coletadas através de piezômetros em junho-julho de 1977 apresentaram ausência de magnésio, praticamente, em várias delas, sendo que os valores máximos encontados foram nos P24 e P38 (12,3 e 13,3 miligramas por litro, respectivamente). Essas águas apresentaram uma concentração média de magnésio igual a 2,6 miligramas por litro.

Amostras de águas subterrâneas coletadas através de piezômetros em outubro de 1977, apresentaram teores de magnésio seme

lhantes aos anteriores, com exceção do P24 que apresentou a maior concentração de magnésio igual a 40,2 miligramas por litro. Essas águas indicaram uma concentração média de magnésio igual a 2,7 miligramas por litro.

Valores médios para concentrações de magnésio são ligeiramente maiores do que aqueles encontrados para concentrações do elemento químico cálcio. A razão Ca/Mg, em miliequivalentes, igual a 0,205 encontrada em amostras de água do P24 coletada em outubro de 1977 sugere que águas salmouras podem estar presentes na região daquele piezômetro.

A figura 5.8 mostra uma distribuição de teores de magnésio para águas subterrâneas de Ponta de Pedras muito semelhante à distribuição de teores de cálcio vistos na figura 5.7.

O íon magnésio Mg^{+2}, normalmente é a forma predominante em solução em águas naturais. Esse íon é hidratado e pode ser representado por $Mg(H_2O)_6^{+2}$, mas é costume omitir-se a água de hidratação da fórmula (Hem, 1970).

O íon magnésio presente nas águas subterrâneas de Ponta de Pedras é originado de minerais argilosos que se formaram e se depositaram naquela área através de intemperismo e transporte de minerais magnesianos e ferromagnesianos pré-existentes nos cratons e que forneceram esse material para a Bacia do Marajó. Em minerais de rochas sedimentares e sedimentos, principalmente quando são argilosos, o íon de magnésio está adsorvido em suas faces. Segundo Hem (1970) essa força de adsorção é um pouco maior do que a do cálcio, sendo que esse efeito não é muito importante para o controle sobre concentrações de magnésio.

O mesmo autor constata que em águas doces naturais, as concentrações de magnésio são normalmente menores do que as concentrações de sódio.

5.9. Sódio

O sódio é o sexto elemento mais abundante na crosta terrestre (Mason, 1971). Nas rochas ígneas o sódio é muito mais abundante do que nas rochas sedimentares (Horn e Adams, 1966).

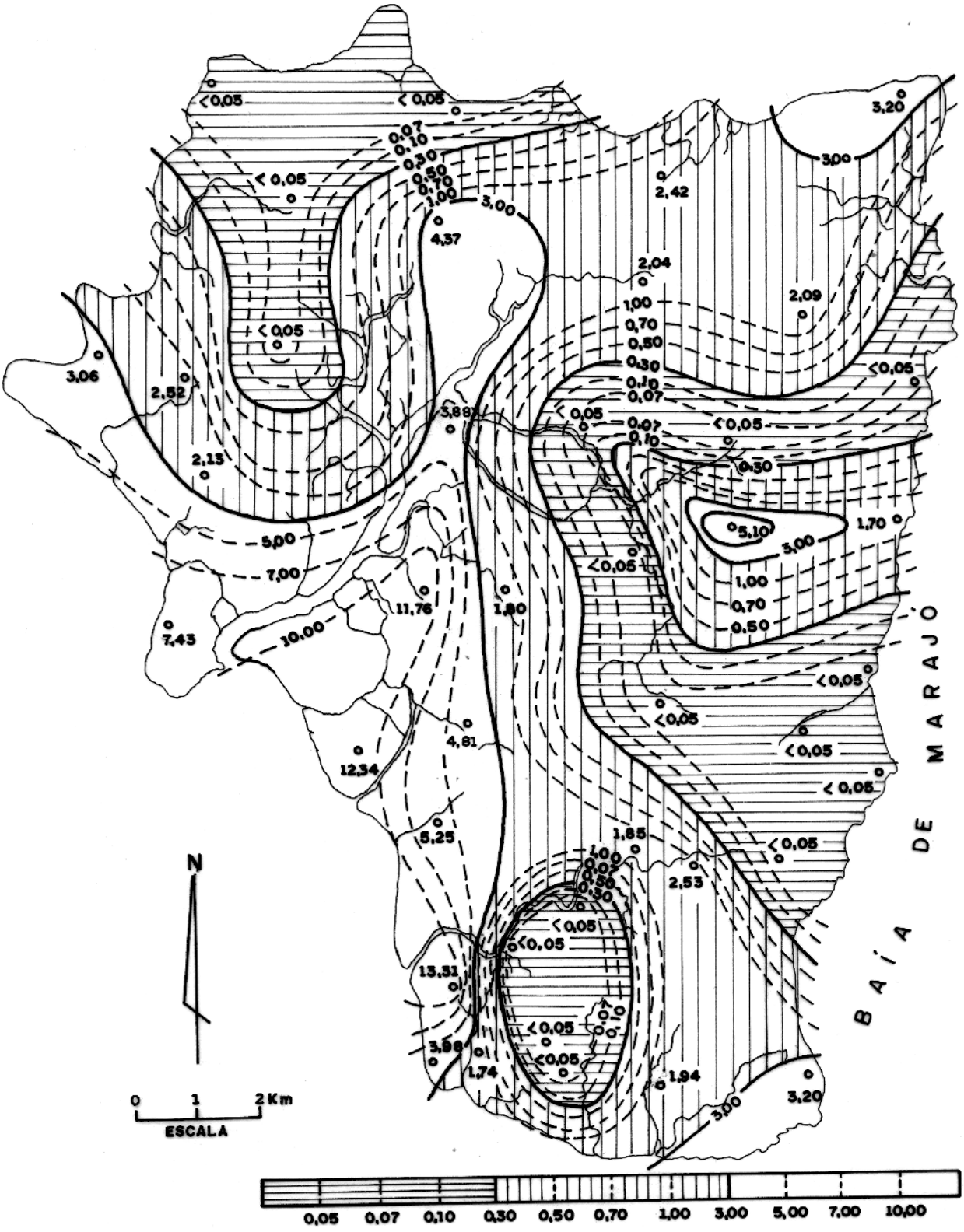


Fig. 5.8 Distribuição de Teores de Magnésio nas Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras, em mg/l. Amostras Coletadas através de Piezômetros em Junho-Julho de 1977. Escala Log.

O sódio é o principal elemento químico de rochas sedimentares do tipo evaporito (Rankama e Sahama, 1950). Em rochas ígneas, o sódio é ligeiramente mais abundante do que o potássio, mas em sedimentos, o sódio é muito menos abundante (Hem, 1970).

Sabe-se que o sódio de um modo geral, não é exigido pelas plantas verdes. Entretanto certas halófitas, plantas indígenas em solos salinos, não somente toleram altas concentrações de sal no meio mas de fato exigem sódio. A essencialidade do elemento sódio para as plantas é conhecida para alguns membros dos grupos das plantas superiores, algas e bactérias mas a essencialidade é desconhecida para os fungos (Epstein, 1975).

Os elementos químicos sódio e potássio, em nossas amostras de águas foram medidos através de absorção atômica.

Análises químicas realizadas em mais de 120 amostras de águas subterrâneas de Ponta de Pedras, coletadas desde 22.12.1976 até 30.10.1977 indicaram teores de sódio variando entre 0,1 até 464,0 miligramas por litro. Essas amostras apresentaram um teor médio de sódio igual a 22,2 miligramas por litro.

Amostras de águas de poços usados pela população, na área em estudo, indicaram teores de sódio variando entre 0,1 miligramas por litro (PE03) até 464,0 miligramas por litro (PE01), com um teor médio igual a 52,1 miligramas por litro.

Amostras de águas subterrâneas coletadas através de piezômetros em junho-julho de 1977, apresentaram concentrações do elemento sódio variando entre 1,5 e 265,0 miligramas por litro (P41 e P24, respectivamente), com um teor médio igual a 14,9 miligramas por litro.

Amostras de águas subterrâneas coletadas através de piezômetros em outubro de 1977, apresentaram concentrações do elemento sódio variando 0,1 miligramas por litro (P23; P26; P30; P32; P34; P40; P41 e P42) e 20,0 miligramas por litro (P24), com um teor médio igual a 2,7 miligramas por litro.

A figura 5.9 mostra a distribuição de teores de sódio mais potássio ($Na^+ + K^+$) em amostras de águas subterrâneas da área em estudo, coletadas em junho-julho de 1977.

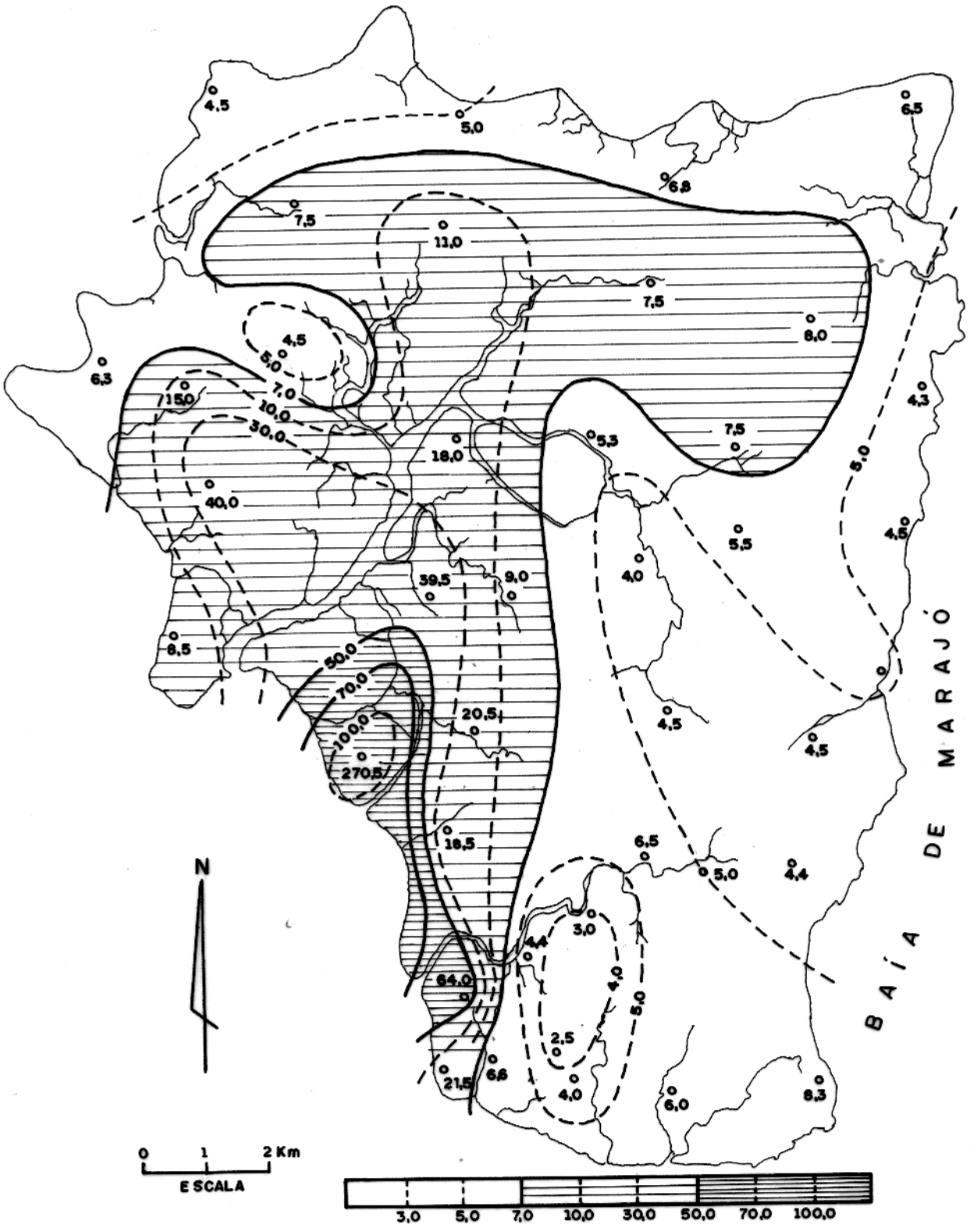


Fig. 5.9 Distribuição de Teores de Sódio mais Potássio ($Na^+ + K^+$) nas Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras, em mg/l. Amostras Coletadas em Junho-Julho de 1977. Escala Log.

A presença do sódio e sua distribuição nas águas subterrâneas em estudo está ligada aos tipos de rochas sedimentares existentes naquela área. Vários piezômetros instalados em sedimentos do tipo "resistates" - no caso, areias quartzozas - apresentaram águas subterrâneas com teores de sódio relativamente baixos. Os maiores teores de sódio encontrados nessas águas estão relacionados, em geral, a sedimentos argilosos do tipo "hydrolyzates".

Com efeito, em sedimentos arenosos quartzozos puros, sem cimento, o sódio tem tendência em se diluir devido a facilidade que as águas subterrâneas encontram para se movimentarem nesses tipos de sedimentos. Em sedimentos arenosos quartzozos misturados com argilas que contém sódio, os teores de sódio nas águas subterrâneas tendem a aumentar.

Em sedimentos do tipo "hydrolyzates" as partículas normalmente, são muito pequenas e a circulação da águas através desse material é grandemente dificultada. Assim, a água permanece em contato com os minerais de argila durante períodos de tempo suficientes para se enriquecer em sais dissolvidos (Hem, 1970).

Sedimentos do tipo evaporitos não foram encontrados em nossa área de estudo. Os baixos teores de sódio nas águas subterrâneas estudadas refletem esse fato.

As maiores concentrações de sódio encontradas naquelas águas subterrâneas (PE01; PP01; P24 e P38) sugerem algum tipo de poluição. De fato, esses poços e piezômetros estão instalados em locais sujeitos a poluição provocada por criação de gado.

A variação sazonal das concentrações de sódio nas águas subterrâneas em estudo, tem ligação com a distribuição da pluviosidade durante o ano hidrológico. Porém essas ligações são defazadas uma em relação a outra. Isso quer dizer que os períodos mais chuvosos não correspondem diretamente com as menores concentrações de sódio, por que a infiltração e a percolação das águas de precipitação nas zonas sub-saturada e saturada não são imediatas, e dependem de vários fatores, fazendo com que a diluição do sódio seja posterior às precipitações.

A variação das concentrações do elemento sódio nessas

águas é um fato muito interessante. Amostras coletadas em outubro de 1977 apresentaram teores de sódio dez ou mais vezes menores que os teores encontrados nos mesmos pontos de amostragem em junho-julho de 1977.

Quase todos os compostos de sódio são solúveis e em consequência disso são lixiviados do solo e da zona sub-saturada pelas precipitações, permanecendo em solução (Johnson, 1974).

5.10. Potássio

O potássio é o sétimo elemento mais abundante na crosta terrestre (Mason, 1971). Nas rochas ígneas o potássio é pouco menos abundante do que o sódio, mas nas rochas sedimentares o potássio é bem mais abundante do que o sódio (Horn e Adams, 1966).

O potássio é um elemento característico de rochas sedimentares do tipo "hydrolyzates" e "evaporates" (Rankama e Sahama, 1950).

Horn e Adams (1966) consideram que as rochas sedimentares do tipo "resistates" contém potássio em proporções bastante consideráveis.

O potássio é liberado com grande dificuldade através dos minerais silicáticos e exibem uma forte tendência para serem reincorporados em produtos sólidos de decomposição de rochas, especialmente certos minerais de argila (Hem, 1970).

O potássio é um macronutriente essencial para todas as plantas - plantas superiores, algas, fungos, bactérias (Epstein, 1975). O potássio é também um constituinte universal de todos os animais (Rankama e Sahama, 1950).

Análises químicas realizadas em mais de 120 amostras de águas subterrâneas de Ponta de Pedras coletadas desde 22.12.1976 até 30.10.1977 indicaram teores de potássio variando entre 0,5 até 280,0 miligramas por litro, essas amostras apresentaram um teor médio de potássio igual a 10,4 miligramas por litro.

Amostras de águas de poços usados pela população na área em estudo, indicaram teores de potássio variando entre 0,5 até

142,0 miligramas por litro, com uma concentração média igual a 13,0 miligramas por litro.

Amostras de águas subterrâneas coletadas através de piezômetros em junho-julho de 1977, apresentaram concentrações do elemento potássio variando entre 0,5 miligramas por litro (P30) e 16,0 miligramas por litro (P38), com uma concentração média igual a 2,3 miligramas por litro.

Amostras de águas subterrâneas coletadas através de piezômetros em outubro de 1977, apresentaram concentrações do elemento potássio variando entre 2,0 miligramas por litro (P34 e P41) e 280,0 miligramas por litro (P24), com uma concentração média igual a 15,7 miligramas por litro.

A distribuição dos teores de potássio na área em estudo é mostrada na figura 5.9.

A distribuição do potássio nas águas subterrâneas de Ponta de Pedras está relacionada aos tipos de sedimentos que ocorrem naquela área, embora os estudos feitos não tenham constatado fragmentos de feldspato não alterado ou micas.

Com efeito, o potássio está presente comumente também em ilita ou outros minerais de argila (Hem, 1970). Tancredi et al. (1975b) constatou a presença de caulinita, montmorilonita e ilita em sedimentos quaternários da Ilha de Marajó.

Embora algumas amostras tenham indicado altos teores de potássio, relativamente, a presença de evaporitos - importantes fontes de sais de potássio - não foi verificada.

A presença de potássio em todas as plantas poderá ser uma fonte importante desse elemento químico naquelas águas subterrâneas.

Durante os períodos de precipitações escassas, a vegetação dos campos naturais e de áreas desmatadas para agricultura são carbonizadas, favorecendo o aparecimento do carbonato de potássio (K_2CO_3) e dióxido de potássio nas cinzas.

Com efeito, as cinzas foram a primeira e única forma de

adubo potássico empregado na agricultura até o descobrimento das jazidas de sais potássicos solúveis (Murayama, 1976).

Dessa maneira, é possível que o potássio seja carreado com águas de infiltração e percolação desde o solo, onde se encontra nas cinzas, até atingir as águas subterrâneas rasas.

O fato de não usarem fertilizantes nos solos da área em estudo, afasta a possibilidade desses altos teores de potássio terem esse tipo de origem.

O potássio ocorre na forma iônica K^+ em águas naturais e plantas. O tamanho do íon K^+ é substancialmente maior que o íon Na^+ e isso explica porque adsorve menos fortemente do que o sódio nas reações de troca iônica (Hem, 1970).

A figura 5.9.1 mostra a variação das concentrações dos elementos químicos sódio e potássio em função das precipitações em águas subterrâneas da área em estudo, durante o ano de 1977. Nessa figura podemos ver que a maior velocidade de diluição do sódio e potássio é a partir do mês de maio, quando as precipitações atingiram seus índices máximos. Porém, embora o sódio continue se diluindo até o mês de outubro, o potássio tem um comportamento completamente invertido a partir do início da diminuição das precipitações (maio-junho) e passa a se concentrar rapidamente até o início do novo período de precipitações.

5.11. Alcalinidade

Na química da água, a alcalinidade é a capacidade que ela tem para neutralizar um ácido (Hem, 1970).

A alcalinidade das águas subterrâneas de Ponta de Pedras foi medida com dois indicadores químicos: fenolftaleina e metilo range. Esses indicadores são os mais usados para se medir a alcalinidade das águas naturais (Hem, 1970 e Johnson, 1974).

Várias espécies de solutos podem contribuir com a alcalinidade, mas em muitas águas naturais a alcalinidade é praticamente toda produzida pelo ácido fraco mais comum: ácido carbônico, formado onde o dióxido de carbono é dissolvido (Hem, 1970).

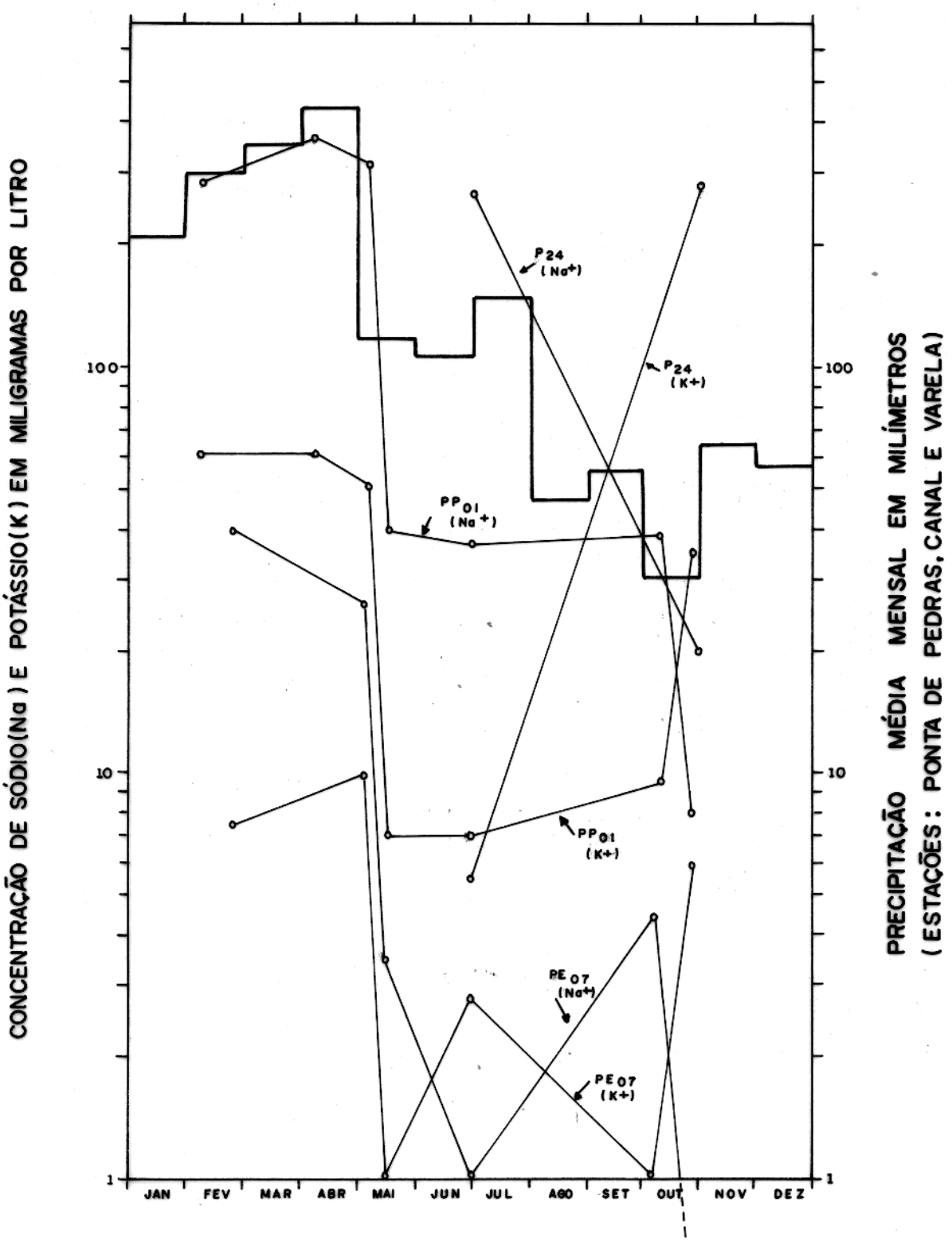


Fig. 5.9.1 Variações das Concentrações de Sódio e Potássio em Miligramas por Litro, em Função da Precipitação Média Mensal em Milímetros.

Amostras de águas subterrâneas de Ponta de Pedras coletadas em outubro de 1977, não apresentaram alcalinidade com o indicador fenolftaleina.

Essas mesmas amostras apresentaram alcalinidade com uso do indicador metilorange, variando desde 0,0 miligramas por litro (P35) até 35,0 miligramas por litro (P4 e P12). Essas águas apresentaram concentrações do íon HCO_3^- variando desde 0,0 miligramas por litro (P35) até 42,7 miligramas por litro (P4 e P12) e ausência dos íons CO_3^- e OH^-.

O relacionamento entre alcalinidade e o íon HCO_3^- nas águas subterrâneas em estudo é evidente através dos resultados obtidos nessas análises. Pode-se dizer que toda alcalinidade dessas águas é proveniente da presença do íon HCO_3^- e da forma aquosa H_2CO_3.

Esse comportamento pode ser compreendido, sabendo-se que o dióxido de carbono dissolvido em água pode fornecer os íons que estão predominando nas mesmas. Esse fato é confirmado pelas altas concentrações de íon H^+, o qual já foi explicado na seção 5.2.

A figura 5.11 - adaptada de Hem (1970) - mostra que em regiões de pH ácido, as formas predominantes em soluções com espécies de dióxido de carbono dissolvido são:

H_2CO_3 (aq) e HCO_3^-.

Na figura 5.11, para pH > 6,3 a forma iônica predominante no controle da alcalinidade das águas subterrâneas em estudo é o íon HCO_3^-. Para pH < 6,3 predomina a forma H_2CO_3 (aq).

5.12. Enxofre

O elemento enxofre quando dissolvido em água ocorre geralmente na forma completamente oxidada S^{+6} combinado com o oxigênio formando o íon sulfato SO_4^{-2}.

A forma reduzida S^{-2} está algumas vezes formando o íon HS^- ou H_2S dissolvido mas não dissociado (Hem, 1970).

Nas águas subterrâneas de Ponta de Pedras, o enxofre foi

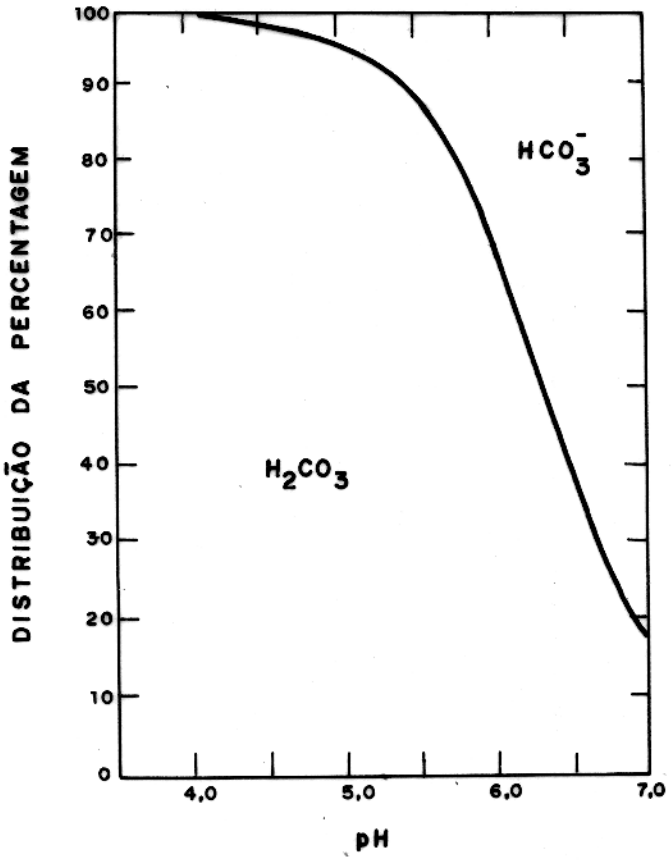


Fig. 5.11 Percentagem de Espécies de Dióxido de Carbono Dissolvido em Solução em Função do pH, a 25°C e 1 Atmosfera de Pressão, Adaptado de Hem(1970).

medido na forma iônica SO_4^{-2}.

A figura 5.12 mostra que para o intervalo de pH daquelas águas, o enxofre está predominantemente na forma SO_4^{-2} e que para valores de Eh entre - 0,38 e 0,10, a forma predominante é o ácido sulfídrico H_2S, que está dissociado, provavelmente em H^+ e S^{-2}.

Para pH < 4,5 é possível a presença de ácidos minerais livres nas águas subterrâneas (Hem, 1970). Nesse caso o ácido sulfídrico é provavelmente um dos ácidos que devem contribuir com os ácidos minerais livres presentes nas águas subterrâneas aqui em estudo. Enxofre na forma cristalizada S(c) pode ocorrer nessas águas, em campos de estabilidade relativamente restritos.

Concreções de minerais piritosos foram encontrados em sedimentos arenosos no P5 a 8,5 metros de profundidade.

Segundo Hem (1970) a oxidação da pirita pode ser uma fonte importante não só de sulfato como de íons hidrogênio e ferro, em águas subterrâneas.

É provável que as águas de chuva que precipitam na região em estudo contribuam com os teores de sulfato naquelas águas subterrâneas rasas. Hem (1970) considera que regiões próximas do oceano recebem chuvas com concentrações de sulfato acima de 10 mg/l, frequentemente. Vários outros autores se referem a esse fato.

O enxofre é um macroconstituinte essencial para todos os tipos de plantas, Epstein (1975); geràlmente ele é absorvido pelas plantas na forma de sulfato (Murayama, 1976). Bactérias redutoras de sulfatos são encontradas em águas subterrâneas (Johnson, 1974). Nesse caso as bactérias transformam sulfatos em ácido sulfídrico.

Bactérias do enxofre podem transformar o ácido sulfídrico em sulfatos solúveis e insolúveis nas águas, ocorrendo nesse caso um processo de oxidação do enxofre (Rankama e Sahama, 1950).

A figura 5.12.1 mostra a distribuição de teores de SO_4^{-2} nas águas subterrâneas de Ponta de Pedras, em amostras coletadas em junho-julho de 1977, através de piezômetros.

Amostras de águas de poços usados pela população na área em estudo, coletadas desde 03.11.1976 até 30.10.1977, indicaram

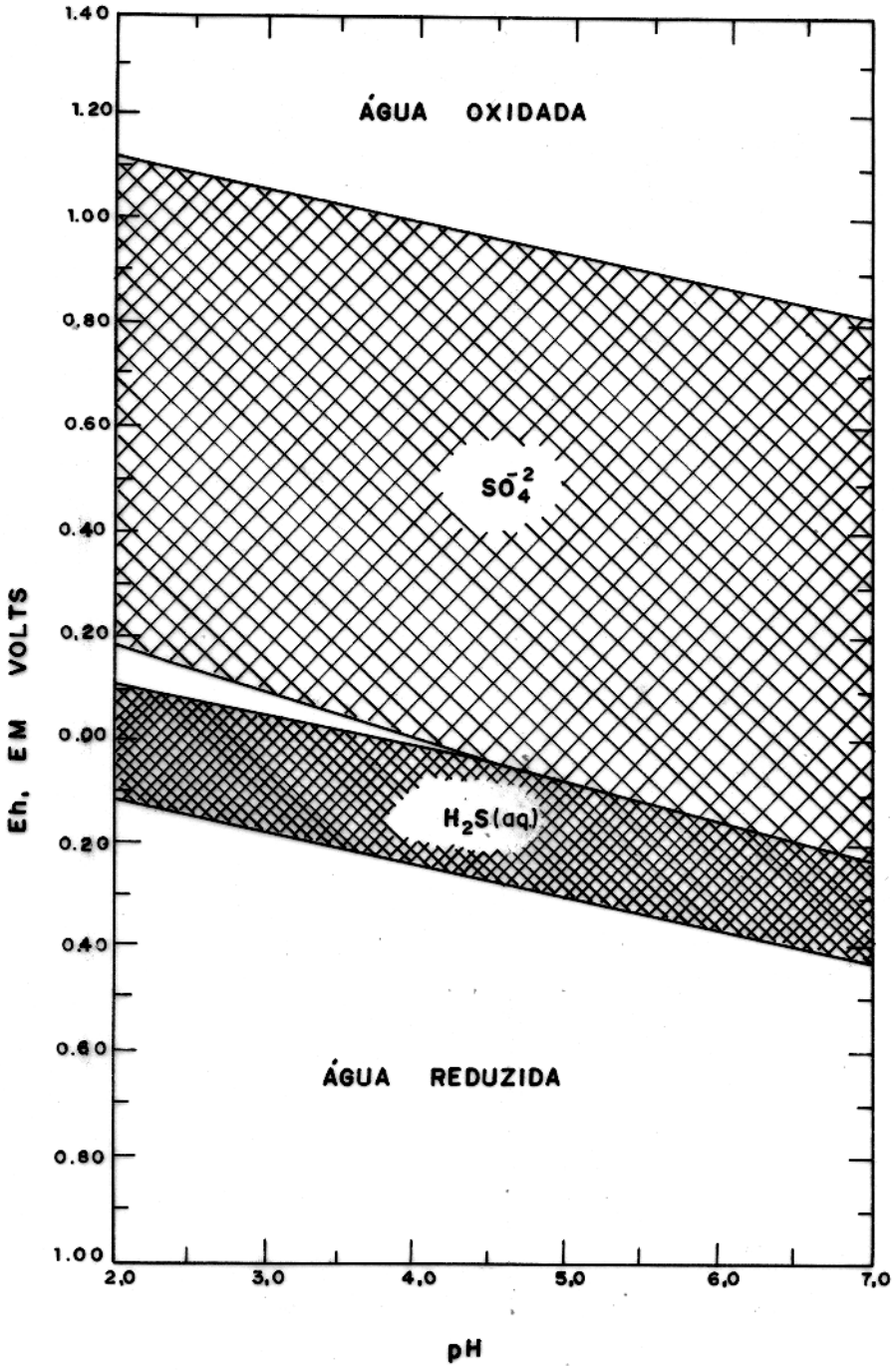


Fig. 5.12 Campos de Domínio de Espécies de Enxofre em Equilíbrio a 25°C e Pressão de 1 Atmosfera. Atividade Total do Enxofre Dissolvido 96 mg/l em SO_4^{-2}, Adaptado de Hem(1970).

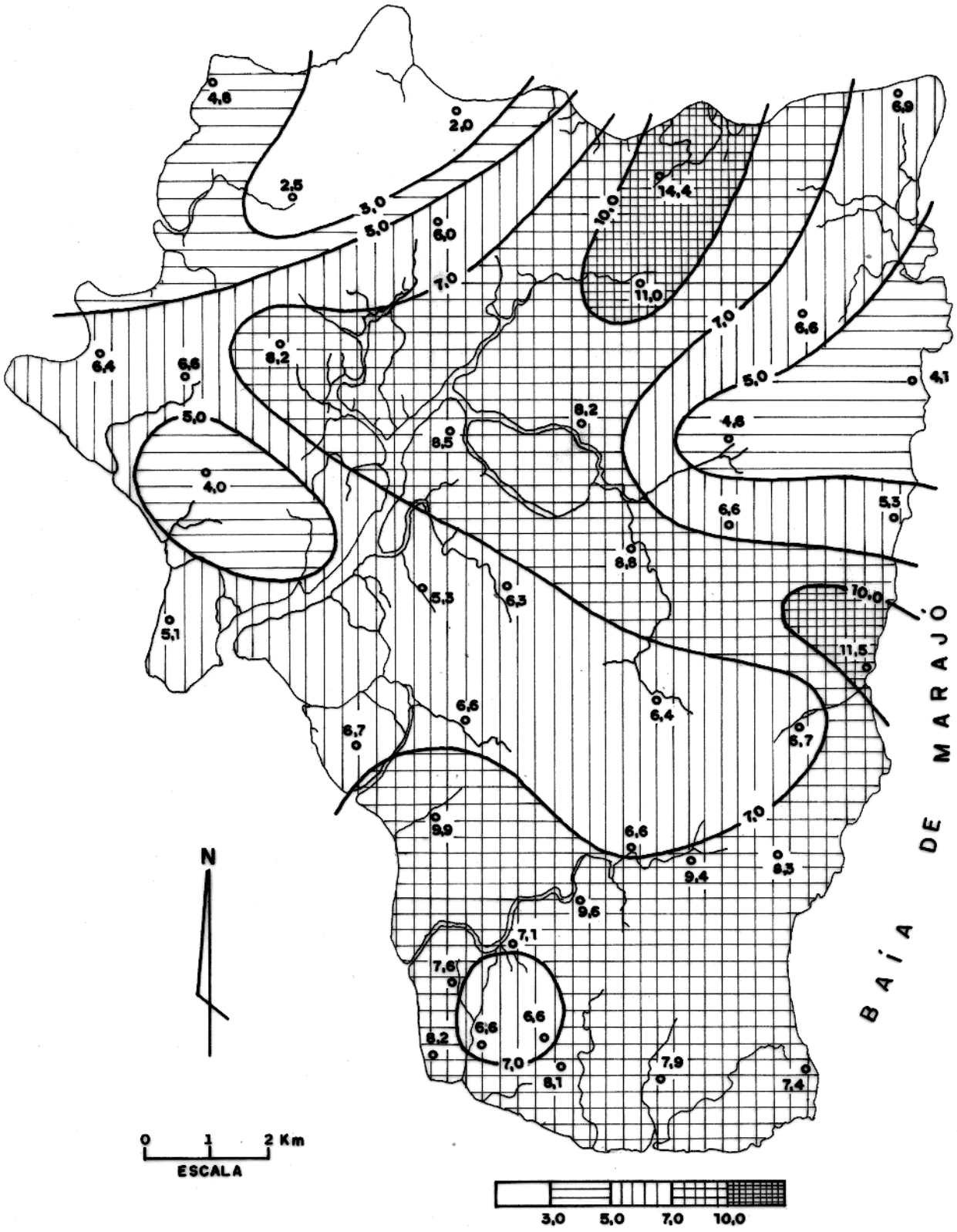


Fig. 5.12.1 Distribuição de Teores de Sulfato (SO_4^{-2}) nas Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras. Amostras Coletadas através de Piezômetros em Junho-Julho de 1977, em mg/l. Escala Log.

concentração de sulfato variando entre 1,6 miligramas por litro (PE02 e PE09) até 34,9 miligramas por litro (PP01), com uma concentração média igual a 7,6 miligramas por litro.

Amostras de águas coletadas em piezômetros em junho-julho de 1977, indicaram concentrações de sulfato variando entre 2,0 miligramas por litro (P2) e 14,4 miligramas por litro (P6), com uma média igual a 7,1 miligramas por litro.

Amostras de águas coletadas em piezômetros em outubro de 1977, indicaram teores de sulfato variando entre 3,3 miligramas por litro (P43) e 29,0 miligramas por litro (P24), com uma média igual a 9,8 miligramas por litro, um pouco maior do que a média anterior.

Mais de 120 amostras de águas subterrâneas da área em estudo, foram analisadas para teores de SO_4^{-2}, sendo que a média geral encontrada foi de 8,4 miligramas por litro.

5.13. Cloro

O elemento químico cloro é pouco abundante na litosfera. Nas rochas ígneas o cloro é mais abundante do que nas rochas sedimentares, com exceção das rochas sedimentares do tipo "precipitates" (Horn e Adams, 1966). Embora o cloro seja mais predominante nos sedimentos do tipo "precipitates" e nos evaporitos, esse elemento químico não é característica específica de nenhum tipo de rocha sedimentar (Rankama e Sahama, 1950). Mas as fontes consideravelmente mais importantes do cloro estão associadas a rocha sedimentares, particularmente aos evaporitos (Hem, 1970).

O cloro está presente em todas as águas naturais, mas nas

águas marinhas é o elemento predominante (Johnson, 1974).

Nas plantas superiores e algas, o cloro é um elemento essencial, nos fungos sua essencialidade é desconhecida e nas bactérias é conhecida somente para alguns grupos (Epstein, 1975).

Nas águas naturais o cloro está predominantemente na forma iônica Cl^- (Hem, 1970).

Amostras de águas de poços usados pela população na área em estudo, indicaram teores de Cl^- variando entre 4,0 miligramas por litro (PE02 e PE06) e 74,0 miligramas por litro (PP01), com uma média igual a 21,1 miligramas por litro.

Amostras de águas de piezômetros coletadas em junho-julho de 1977, indicaram concentrações de Cl^- variando entre 5,0 miligramas por litro (P2, P3 e P41) e 202,6 miligramas por litro (P24), com uma média igual a 19,3 miligramas por litro.

Amostras dessas águas coletadas em outubro de 1977, mostraram que as concentrações de Cl^- encontradas nessas amostras variaram desde 4,4 miligramas por litro (P11) até 609,7 miligramas por litro (P24).

As maiores concentrações de Cl^- encontradas nos poços PP01 e PE01 e nos piezômetros P24, P35 e P38, sugerem que nesses locais poderá estar acorrendo alguma forma de poluição através de infiltração de águas superficiais mais mineralizadas. Porém, deve-se considerar também a possibilidade dessas águas subterrâneas de pequenas profundidades estarem sendo contaminadas por aquíferos adjacentes mais profundos com águas conatas.

As altas concentrações de Cl^- estão diretamente relacionadas às condutividades mais elevadas sendo que o NaCl é um dos melhores contribuintes para a passagem de corrente elétrica em soluções eletrolíticas.

As fontes de Cl^- nas águas subterrâneas em estudo, estão relacionadas com influência de marés do passado geológico, águas de chuva e também com a decomposição de matéria vegetal.

A influência de maré desde o tempo geológico em que os se

dimentos foram depositados, faz-se sentir no teor de cloro dessas águas através de prováveis águas conatas em aquíferos mais profundos e adjacentes. A hidroquímica das águas superficiais da região está sendo estudada e poderá esclarecer se essas águas contribuem ou não com as concentrações de Cl^- das águas subterrâneas aqui em estudo.

A proximidade da área em estudo com o Oceano Atlântico, sugere que as contribuições de Cl^- através de águas de chuva não são desprezíveis.

As concentrações de Cl^- para essas águas subterrâneas são consideradas altas, principalmente na região da Bacia do Rio Tijucaquara. Com efeito, o teor de Cl^- em águas subterrâneas de regiões úmidas, comumente é inferior a 5 mg/l (Johnson, 1974).

Os altos teores de Cl^- encontrados na Bacia do Tijucaquara sugerem dificuldades na circulação das águas superficiais e subterrâneas naquela região. De fato, dois fatores se destacam nessa contribuição: o primeiro deles diz respeito a sedimentos argilosos predominantes naquela área e o segundo está relacionado à dificuldade que aquela bacia hidrológica encontra para se escoar. De fato, argilas e bacias de drenagens fechadas têm tendência em apresentar elevadas concentrações de cloreto (Hem, 1970).

As concentrações elevadas de Cl^- durante os períodos de pequenas precipitações estão relacionadas também à evapotranspiração na área em estudo. A evapotranspiração deve ser o fenômeno principal na contribuição das concentrações de Cl^- durante o período das secas. Amostras de águas do Rio Canal - próximo ao P1- e da Baía do Marajó - próximo ao P28 - coletadas em outubro de 1977 indicaram teores de Cl^-, respectivamente iguais a 87,1 e 66,6 miligramas por litro.

A figura 5.13.A mostra a distribuição de Cl^- nas águas subterrâneas de Ponta de Pedras, em amostras de águas coletadas em junho-julho de 1977. A figura 5.13.B mostra essa distribuição para amostras coletadas em outubro de 1977.

5.14. Bicarbonato e Carbonato

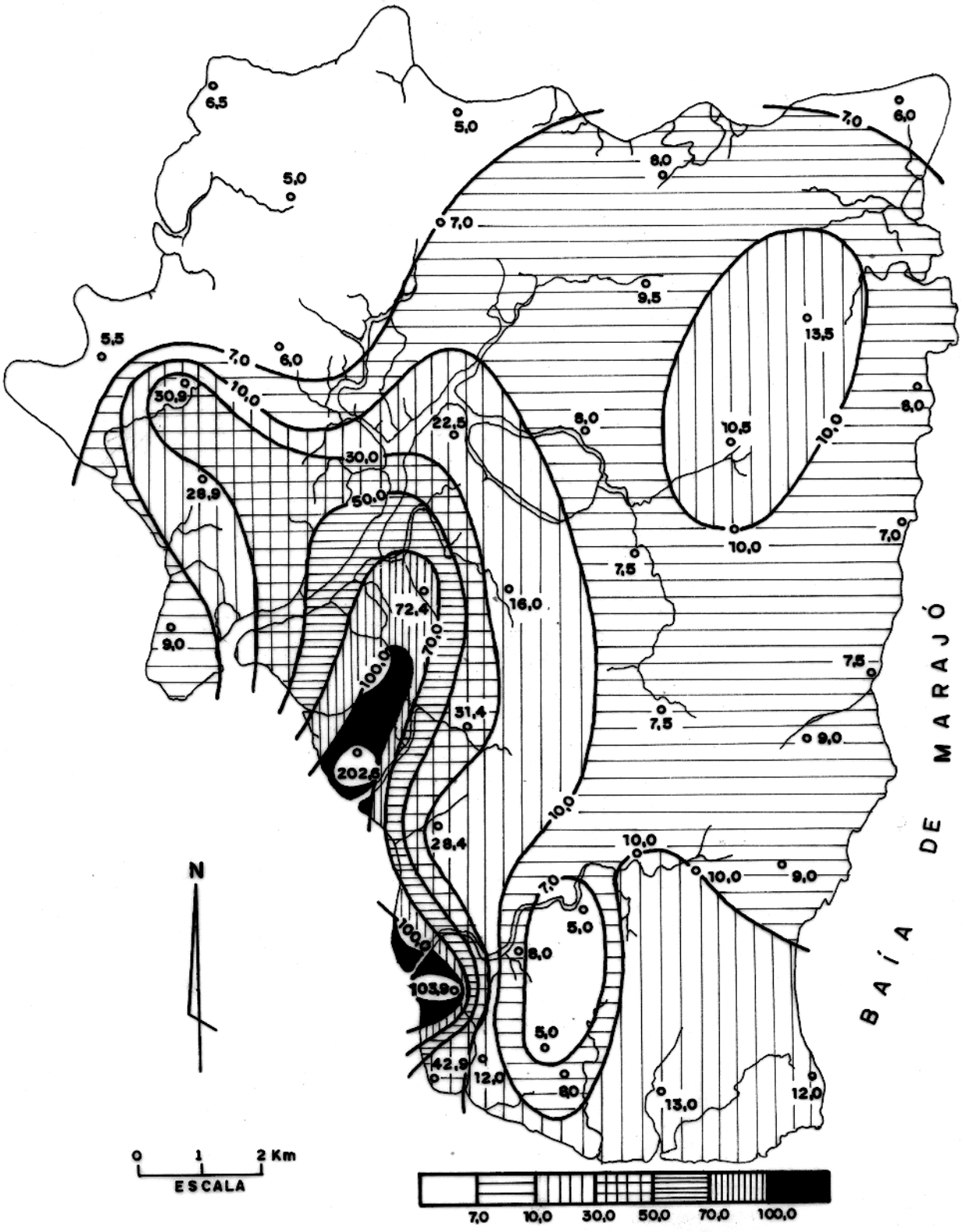


Fig. 5.13.A Distribuição dos Teores de Cl^- nas Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras. Amostras Coletadas através de Piezômetros em Junho-Julho de 1977, em mg/l. Escala Log.

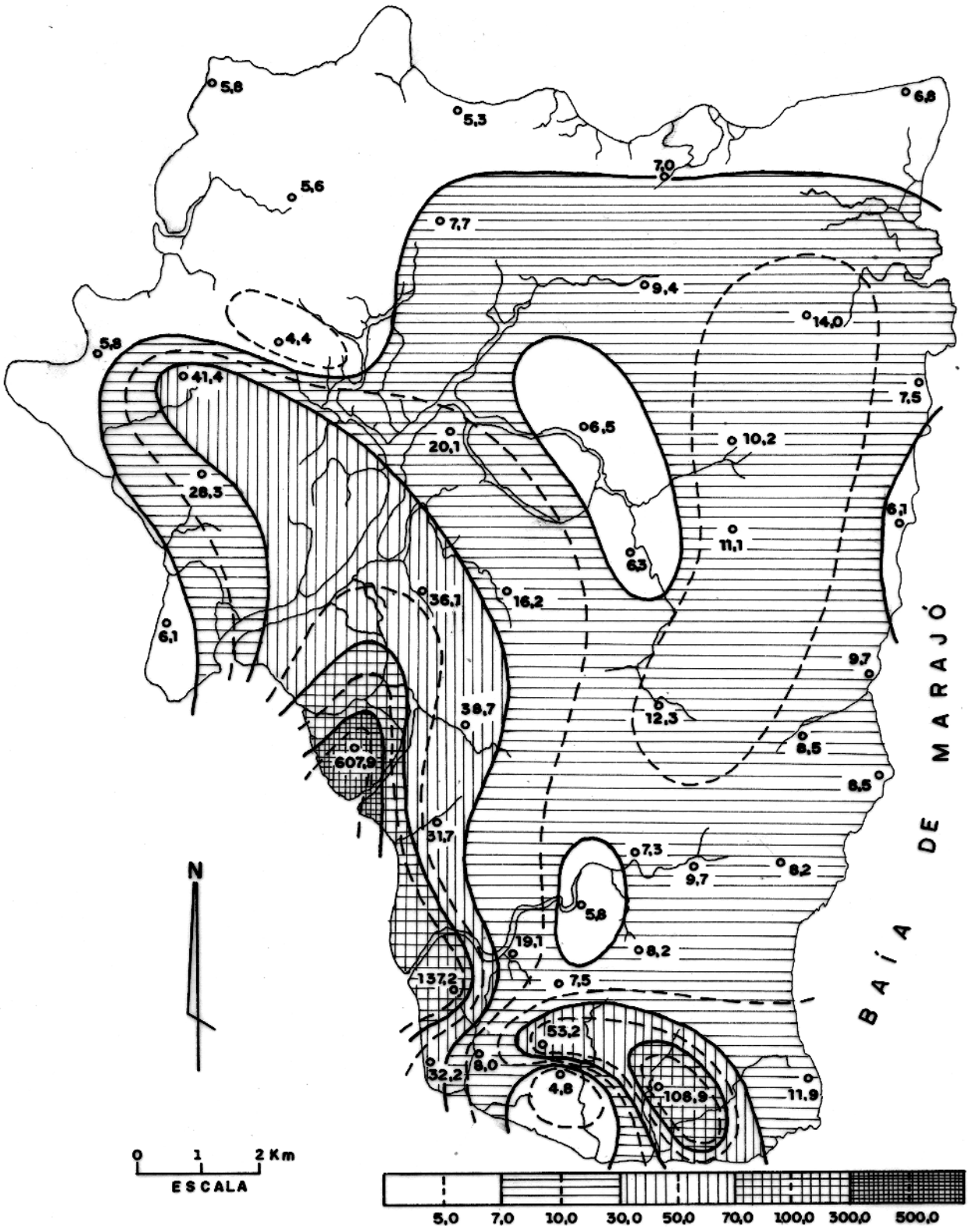


Fig. 5.13.B Distribuição dos Teores de Cl^- nas Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras. Amostras Coletadas através de Piezômetros em Outubro de 1977, em mg/l. Escala Log.

A quantidade de íons bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{-2}) nas águas naturais, está diretamente ligada ao dióxido de carbono (CO_2) dissolvido nas mesmas, mas as proporções de cada um desses íons também estão relacionadas com o quimismo particular de cada água.

Nas águas subterrâneas em estudo, o íon carbonato não foi encontrado em nenhuma das amostras analisadas. Porém, altas concentrações do íon bicarbonato são frequentes.

O dióxido de carbono presente na atmosfera pode atingir as águas subterrâneas, principalmente as de pequenas profundidades, através de águas de infiltração onde se encontra diluido. A matéria orgânica em decomposição nos solos, principalmente vegetais, também é uma importante fonte de CO_2 para águas subterrâneas de pequenas profundidades.

Neste trabalho, em seções anteriores, nós discutimos a importância de matéria vegetal carbonosa presente em estratos intercalados com outros sedimentos na área em estudo. Esses sedimentos carbonosos fósseis, quando em presença com oxigênio também são fontes importantes de dióxido de carbono nas amostras de águas subterrâneas aqui em estudo.

As menores concentrações de bicarbonato (HCO_3^-) estão relacionadas com valores baixos de pH.

O ácido carbônico dissolvido terá dois tipos de comportamento distintos principais:

Se a água tem pH < 6,3 predomina a forma H_2CO_3 (aq) e nesse caso teremos menores concentrações, relativamente, de bicarbonato (HCO_3^-).

No P8 a forma H_2CO_3 (aq) predomina de tal modo que íons HCO_3^- não foram encontrados em amostra daquela água coletada em 29.06.1977. Amostra de água do P35, coletada em 30.10.1977, confirma esse fato. Se a água tem pH > 6,3 predomina o íon bicarbonato (HCO_3^-) que se origina da decomposição parcial do ácido carbônico.

É muito provável que não se de a decomposição do bicarbonato, conforme equação (3) da seção 5.1.2. De fato, íons de carbo

nato (CO_3^{-2}) não foram encontrados nas amostras analisadas.

A figura 5.14 mostra a distribuição de teores de bicarbonato (HCO_3^-), em miligramas por litro, em amostras de águas subterrâneas de Ponta de Pedras coletadas através de piezômetros em junho-julho de 1977.

5.15. Nitrogênio

O elemento químico nitrogênio se encontra essencialmente na atmosfera. Nas rochas o nitrogênio está presente em pequenas quantidades (Hem, 1970). O nitrogênio é um dos elementos mais importantes nos processos biológicos. Para todos os tipos de plantas o nitrogênio é o macronutriente de maior essencialidade (Epstein, 1975). O nitrogênio pode ocorrer em todos os estados de oxidação desde N^{-3} até N^{+5}.

No estado mínimo de oxidação N^{-3} ele forma em meio aquoso o cátion nitrogênio amoniacal (NH_4^+). No estado máximo de oxidação N^{+5} ele forma o ânion nitrato (NO_3^-) e no estado de oxidação N^{+3} ele forma o ânion nitrito (NO_2^-). Outros tipos de íons podem estar presentes em meio aquoso, com outros estados de oxidação do nitrogênio. De todas as formas iônicas, o NO_3^- é o mais importante para os vegetais e essencial para todo tipo de vida (Hem, 1970). Águas subterrâneas com teores elevados de nitrogênio podem estar poluidas por detritos orgânicos. Teores de 90 ppm de nitrato (NO_3^-) em águas são considerados perigosos para crianças novas pois podem ocasionar a cianose (Johnson, 1974).

Nas águas subterrâneas aqui estudadas, as concentrações de nitrogênio foram medidas em função de três formas iônicas: nitrogênio amoniacal (NH_4^+), nitrato (NO_3^-) e nitrito (NO_2^-). De um modo geral, as formas NH_4^+ e NO_2^- se prestam mais para o conhecimento de fontes de nitrogênio orgânico, enquanto a forma NO_3^- tem sido mais usada para se conhecer nitrogênios inorgânicos (Hem, 1970).

Valores bastante baixos de teores de NH_4^+, NO_3^- e NO_2^- nessas águas analisadas sugerem que as águas subterrâneas de Ponta de Pedras não são poluidas no que diz respeito à presença do elemento-químico nitrogênio.

De um modo geral as concentrações das formas iônicas NH_4^+ e NO_3^- se equivalem, enquanto as concentrações de NO_2^- são bastante baixas e na maior parte das amostras analisadas, o nitrito não está presente. Isso mostra que nessas águas estudadas, o nitrogênio se apresenta preferencialmente no seu estado mínimo ou máximo de oxidação. Com efeito, o nitrito está raramente presente em concentrações suficientes para influenciar o balanço iônico (Hem, 1970).

5.16. Fósforo

O elemento químico fósforo encontra-se nas águas naturais com mais probabilidade na forma aniônica. Seu estado de oxidação mais comum em sistemas naturais é provavelmente P^{+5}.

Os teores de fósforo em análises químicas são fornecidos em termos de uma quantidade equivalente ao ânion ortofosfato (PO_4^{-3}). Mas em águas naturais esse tipo de íon só se apresenta quando a solução tem pH > 10,0 (Hem, 1970).

O fósforo é um macronutriente essencial para todos os tipos de plantas (Epstein, 1975). No metabolismo animal esse elemento químico é essencial.

Análises químicas realizadas em 80 amostras de águas subterrâneas de Ponta de Pedras, indicaram teores de fósforo em termos de PO_4^{-3} muito baixos. As concentrações encontradas para esse íon foram sempre inferiores a 0,40 miligramas por litro, sendo que para a maioria delas os valores estão próximos de 0,05 miligramas por litro e cinco delas não apresentaram esse íon em quantidades mensuráveis pelos métodos usados em laboratório.

Nas águas subterrâneas aqui estudadas, as espécies iônicas presentes mais comuns, em função do pH, temperatura e pressão, são com maiores possibilidades de íons $H_2PO_4^-$ e HPO_4^{-2}. Para pH < 4 é possível a presença do ácido fosfórico H_3PO_4. Ambas formas aniônicas $H_2PO_4^-$ e HPO_4^{-2} são produtos da dissociação do ácido H_3PO_4, sendo que em sua dissociação contribui com a concentração de íons H^+ na solução.

A figura 5.16, adaptada de Hem (1970), mostra íons e suas percentagens mais prováveis de ocorrerem nas águas subterrâneas, es

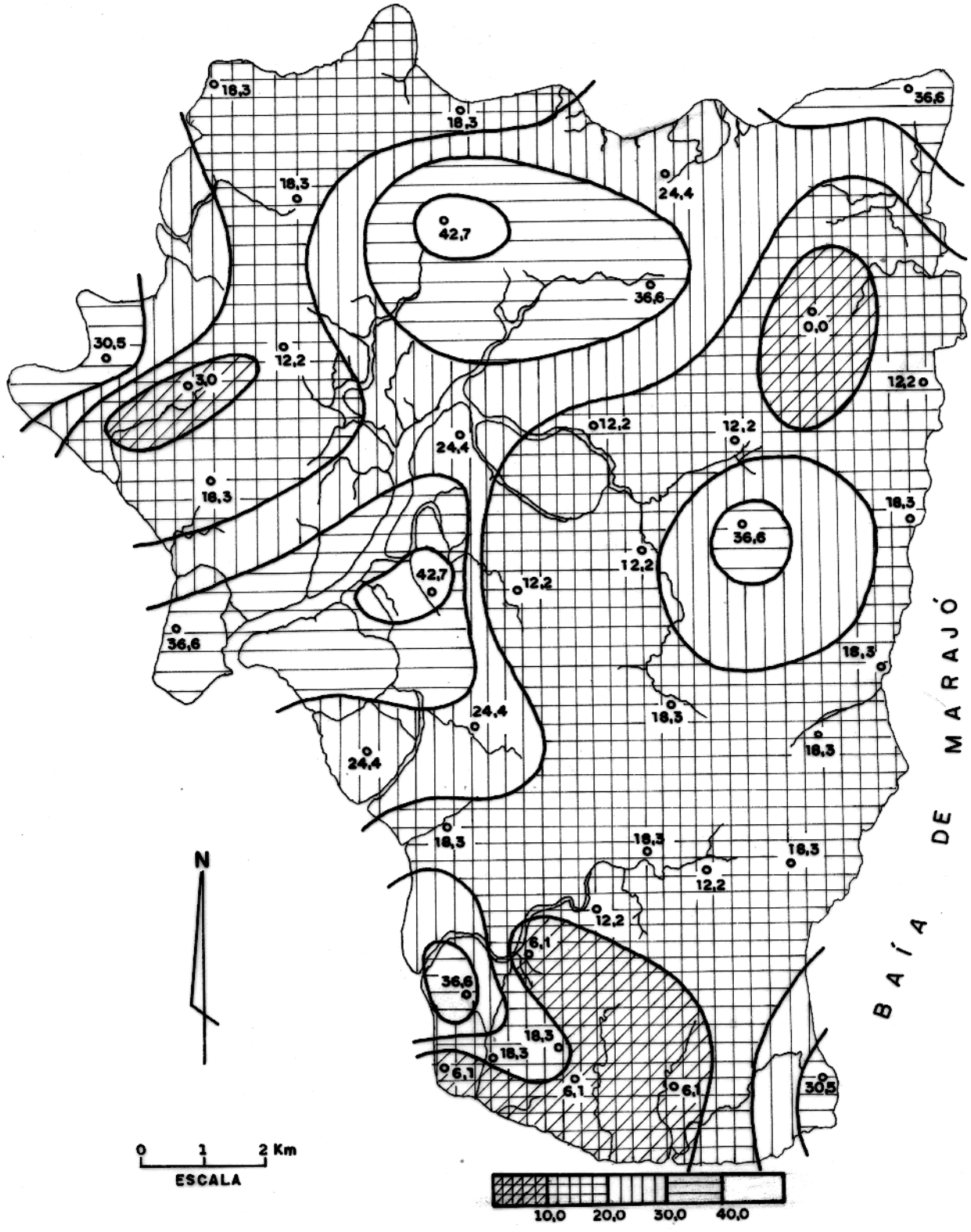


Fig. 5.14 Distribuição dos Teores de Bicarbonato (HCO_3^-), nas Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras, em mg/l. Amostras de Águas Coletadas através de Piezômetros em Junho-Julho de 1977.

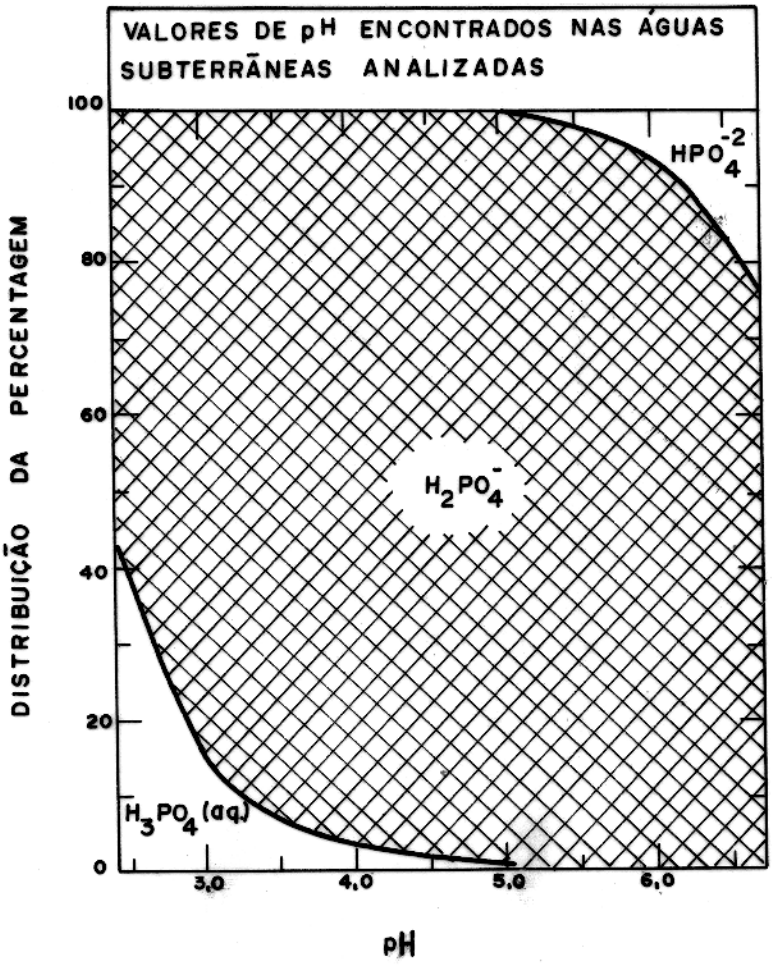


Fig. 5.16 Percentagens de Espécies de Fósforo Total Dissolvido em Solução em Função do pH a 25°C e 1 Atmosfera de Pressão, Adaptado de Hem(1970).

tudadas aqui, sendo que a predominância do campo é dada pelo ânion $H_2PO_4^-$. Mas o fósforo forma ions complexos com muitos outros solutos presentes em águas naturais (Hem, 1970).

5.17. Dureza

A dureza das águas subterrâneas aqui estudadas, foi medida em termos de miligramas por litro de carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Usamos a classificação de Durfor e Becker (1964, p.27) em Hem (1970) para descrever se uma determinada água é "dura" ou "mole". Nessa classificação temos:

Dureza em mg/l de $CaCO_3$	Descrição
0 - 60	Mole
61 - 120	Moderadamente dura
121 - 180	Dura
> 180	Muito dura

Com base nessa classificação, as águas subterrâneas de Ponta de Pedras são consideradas moles.

O piezômetro P38 apresentou água moderadamente dura, em amostras de águas coletadas em junho-julho e outubro de 1977. Amostra de água coletada no P24 em outubro de 1977 apresentou dureza máxima igual a 179 mg/l de $CaCO_3$.

As águas subterrâneas aqui classificadas como água moderadamente dura e água dura, apresentaram as maiores concentrações de cálcio e magnésio. Johnson (1974) considera que quase toda a dureza da água é devida aos cátions cálcio e magnésio.

Essas águas (P24 e P38) também apresentam as maiores concentrações de cloreto além de altos teores de sulfato e bicarbonato.

Os sais minerais que contribuem com a dureza das águas subterrâneas em estudo são provavelmente em ordem de importância:

- Cloreto de cálcio e magnésio
- Bicarbonato de cálcio e magnésio
- Sulfatos de cálcio e magnésio

A contribuição de nitratos de cálcio e magnésio deve ser

pequena.

A comparação feita entre a dureza das águas subterrâneas do P24 e P38 e suas respectivas concentrações de cálcio, magnésio e cloro, mostra que a concentração de cloreto de cálcio e magnésio, durante os períodos de estiagem (mês de outubro) são os principais determinantes nas durezas dessas águas. Isso é mostrado no quadro 5.17.

Podemos ainda concluir que a dureza total das águas subterrâneas em estudo está determinada predominantemente pela dureza de não carbonato ou permanente, aquela que não pode ser eliminada por aquecimento, é causada pelo cálcio e magnésio que se combinam com íons de sulfato, cloreto e nitrato presentes, mais o pequeno efeito de dureza de outros constituintes menores.

A figura 5.17 mostra a distribuição da dureza (em mg/l de $CaCO_3$) nas águas subterrâneas de Ponta de Pedras em amostras de águas coletadas em piezômetros em junho-julho de 1977.

Características / Amostra e data de coleta	Dureza em mg/l de $CaCO_3$	Ca em mg/l	Mg em mg/l	Cl em mg/l
P24 junho julho de 1977	56,0	5,2	12,3	202,6
P24 outubro de 1977	179,0	13,6	40,2	607,9
P38 junho julho de 1977	70,0	15,2	13,3	103,8
P38 outubro de 1977	72,0	16,4	13,5	137,2

Quadro 5.17 Comparação entre a Dureza das Águas do P24 e P38 e suas Respectivas Concentrações de Elementos Químicos que Controlam suas Durezas.

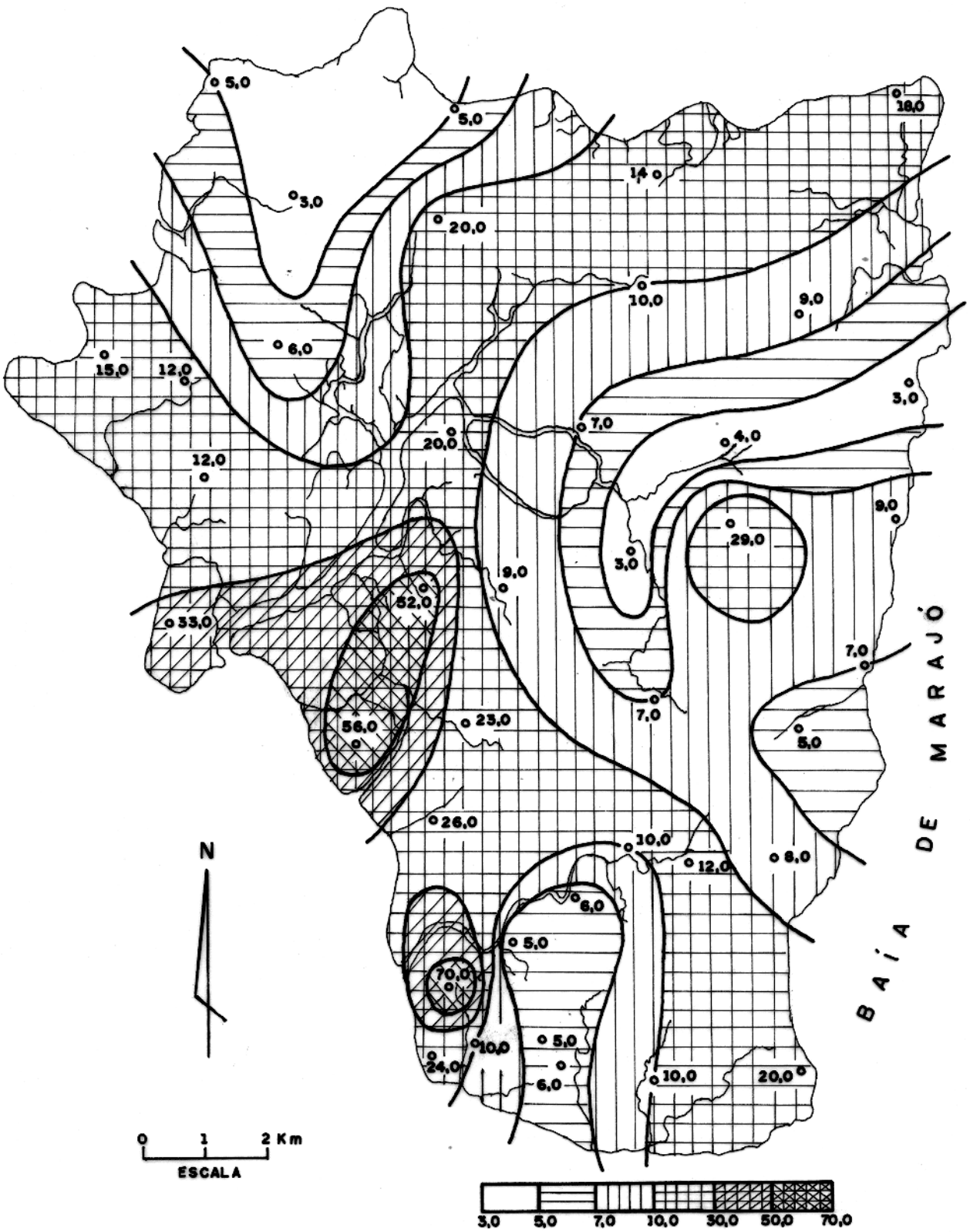


Fig. 5.17 Distribuição da Dureza, em mg/l de $CaCO_3$, das Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras. Amostras Coletadas através de Piezômetros em Junho-Julho de 1977. Escala Log.

5.18. Comportamento Hidroquímico das Águas Subterrâneas em Função das Variações Climáticas Sazonais

O quimismo das águas subterrâneas de pequenas profundidades tem um comportamento que reflete nitidamente as variações climáticas sazonais, especialmente em regiões de clima quente e úmido.

Segundo D.A.E.E. (1974) a dissolução de sais minerais na superfície do solo é bastante rápida em clima tropical e contribuem com os seguintes elementos químicos nas águas: Ca, Mg, Na, Fe, HCO_3 e SiO_2.

Na área em estudo esse relacionamento está sendo pesquisado através de análises químicas dessas águas em amostragens feitas periodicamente.

Algumas conclusões sobre o comportamento químico dessas águas subterrâneas, em função das precipitações na área em estudo já foram feitas, usando um diagrama adaptado para equacionar a relação CHUVA-QUIMISMO de amostras de águas dos poços PP01 e PE07 (Figs. 5.18.A e 5.18.B), onde três etapas principais de comportamento foram constatadas nessas águas subterrâneas estudadas (Fenzl e Piuci, 1977).

a- Enriquecimento químico relativo das águas subterrâneas de pouca profundidade, durante os meses de novembro até fevereiro.

b- Diluição gradual das águas subterrâneas durante os meses de fevereiro até abril.

c- Diluição rápida das águas subterrâneas no mês de abril.

Foram analisadas 08 amostras de água do poço PP01, de fevereiro até dezembro de 1977. No poço PE07 foram analisadas 09 amostras de água de novembro de 1976 até dezembro de 1977.

O diagrama adaptado é composto de três fatores interrelacionados:

a- No eixo das abcissas estão lançadas as datas de coleta das amostras de água.

b- No eixo das ordenadas - lado esquerdo - estão lançadas as concentrações dos elementos característicos de cada

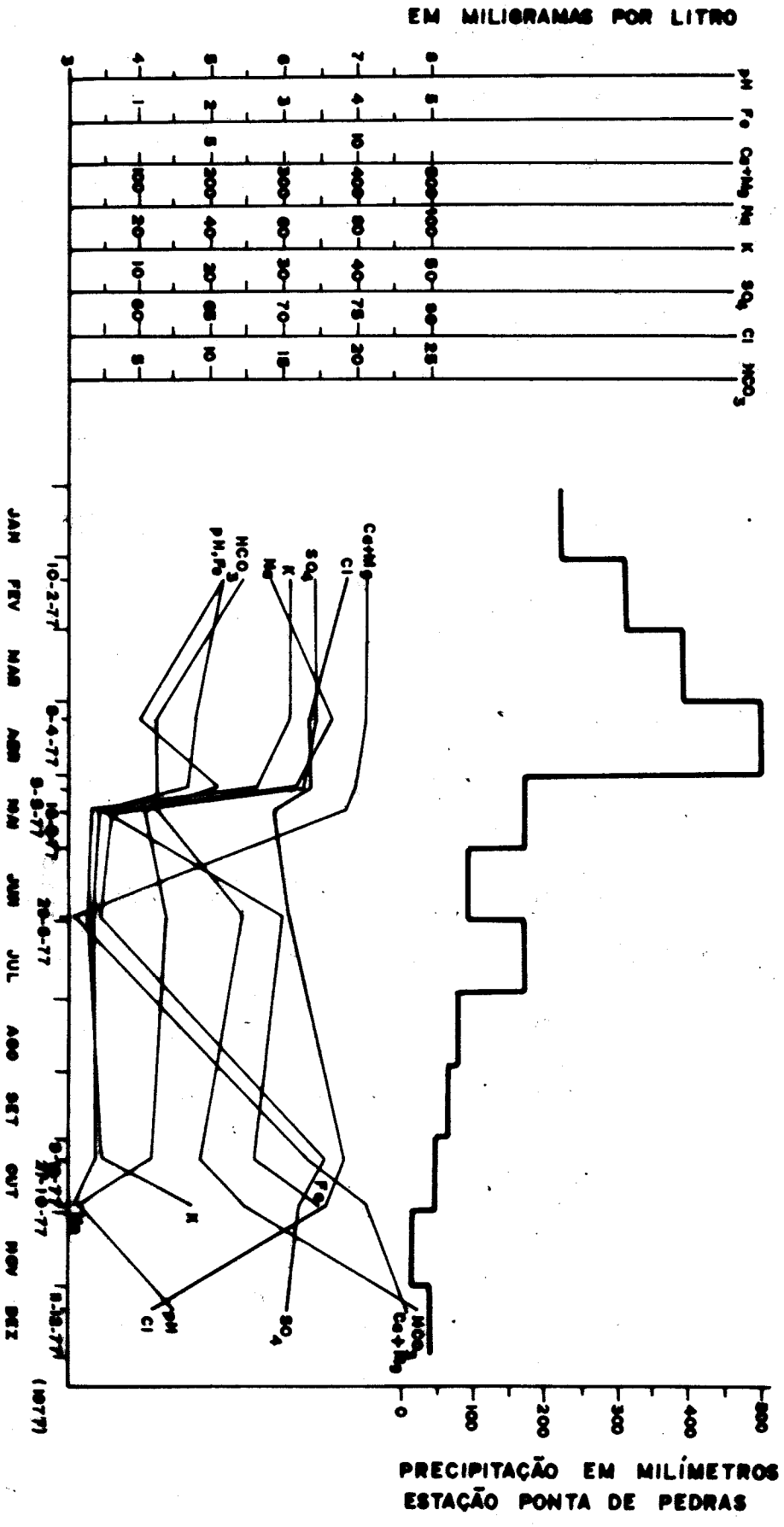


Fig. 5.18.A Evolução Química das Águas Subterrâneas no Poço PP01 em Função das Precipitações, Adaptado de Fenzl e Piuci(1977).

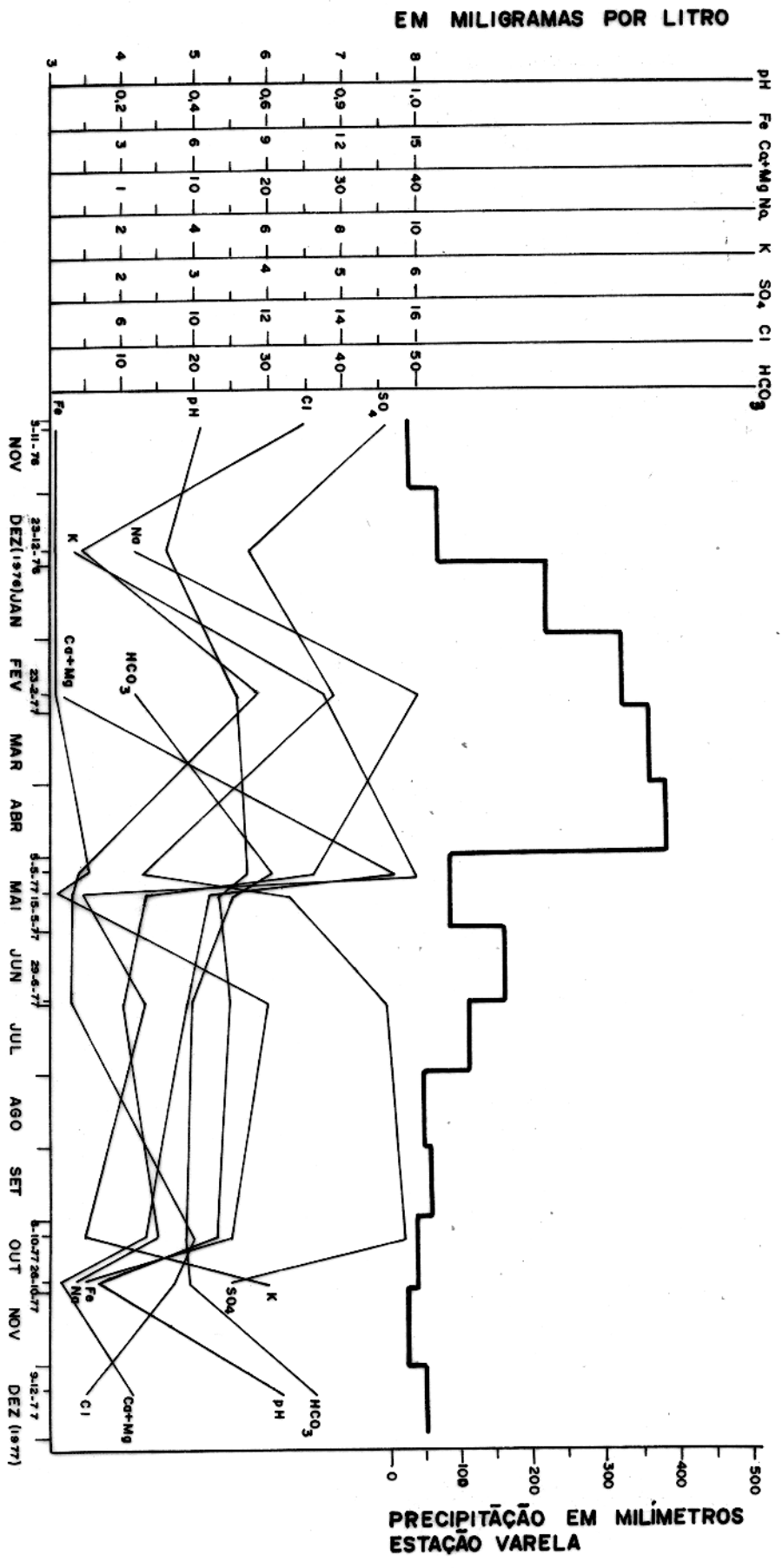


Fig. 5.18.B Evolução Química das Águas Subterrâneas no Poço PE07 em Função das Precipitações, Adaptado de Fenzl e Piuci(1977).

amostra, em miligramas por litro.

c- No eixo das ordenadas - lado direito - estão lançadas as precipitações de chuva, em milímetros, obtidas das estações pluviométricas respectivas.

O mês de novembro foi o mês mais seco do período estudado. Para facilitar as explicações dos diagramas adaptados, consideramos esse mês de menor índice pluviométrico como ponto inicial.

Comparando-se a distribuição das precipitações nas estações pluviométricas referidas em função das concentrações dos elementos característicos das águas analisadas, podemos concluir:

- No mês de novembro as águas subterrâneas passam por um enriquecimento mineral absoluto, devido a perda de água nas zonas de aeração e saturada. Essa diminuição de água, provavelmente por evapotranspiração, estabelece uma concentração mineral nessas águas subterrâneas que se estendem até o mês de dezembro quando essa mineralização atinge seus maiores valores no ciclo hidrológico em estudo. Nesse período os ânions Cl^- e SO_4^{-2} tiveram comportamento inverso com diminuição de suas respectivas concentrações.

Os elementos característicos que mostram o enriquecimento mineral absoluto dessas águas subterrâneas por aumento de concentração iônica, são principalmente: Ca + Mg, o ânion bicarbonato HCO_3^{-2} e o pH.

- No mês de dezembro, embora as precipitações tenham sido maiores do que no mês anterior, as águas dessas primeiras chuvas não influem ainda o quimismo das águas subterrâneas. As águas dessas primeiras precipitações são consumidas de imediato pelos solos e zona de aeração que se encontram relativamente com deficiência de água. Assim, as águas subterrâneas do mês de dezembro podem apresentar os maiores teores de elementos característicos. Isso foi observado melhor no mês de dezembro de 1977.

- A partir de dezembro as precipitações aumentam até atin

gir um máximo no mês de abril. Durante as precipitações dos primeiros meses (dezembro, janeiro e fevereiro) as águas de infiltração provocam uma lixiviação das zonas sub-saturadas, carreando elementos químicos para a água subterrânea e provocando um enriquecimento químico relativo, apesar do aumento de volume de água nas zonas saturadas. Isso pode ser observado no diagrama do poço PE07 para os elementos característicos: Na; K; Cl; SO_4 e pH.

- De fevereiro até abril, o excesso de precipitação provoca uma diluição lenta e gradativa dos constituintes característicos, principalmente porque nessas águas de precipitação já encontram a zona de aeração bastante lixiviada.

- No mês de maio a mineralização dessas águas subterrâneas sofre uma queda brusca devido ao excesso de precipitações que ocorrem até abril. Essa desmineralização rápida, pode ser observada para todos os elementos característicos nas amostras de água dos poços PP01 e PE07, coletadas em 5, 15 e 16 de maio de 1977.

- No mês de junho essas águas subterrâneas apresentam uma tendência para se mineralizarem novamente, devido à diminuição sensível das precipitações a partir do mês de maio. Porém, seu conteúdo mineral permanece pobre até o mês de outubro, a partir do qual elas passarão novamente para um enriquecimento mineral absoluto.

Conclusões a respeito do comportamento individual dos elementos característicos dessas águas em função das precipitações, podem ser compreendidas:

- O pH tem tendência em diminuir com o aumento das precipitações. Por outro lado , o bicarbonato (HCO_3^-) tem tendência em diminuir de concentração no mesmo período. Isso provavelmente é devido a um maior envolvimento das águas de precipitação com dióxido de carbono nas reações químicas que se processam nessas águas subterrâneas durante os períodos chuvosos.

- Os teores de ferro aumentam sensivelmente a partir da diminuição das precipitações. Isso se deve a dois fatores primordiais:

  1- a diminuição do pH aumenta a solubilidade de certas espécies de ferro como já foi discutido na seção 5.5.3 deste trabalho.

  2- Os processos de metabolismo animal e vegetal nos solos durante os períodos chuvosos se dão provavelmente em ambiente redutor, aumentando a quantidade de ferro solúvel.

O aumento do teor de ferro nas águas subterrâneas nas épocas secas, podem se dar por falta de oxigênio (O_2) nos solos durante as épocas chuvosas, quando é produzida uma maior quantidade de ferro solúvel que é carreado por infiltração para a zona saturada, Fenzl e Piuci (1977).

- Os teores de Ca + Mg diminuem sensivelmente durante o aumento progressivo das precipitações, aumentando sensivelmente a partir do início do período seco.
- O sódio e o potássio se diluem com o aumento das precipitações. Porém, às vezes se comportam de maneira inversa, enquanto um se dilui o outro se concentra. Isso foi discutido em seções anteriores.
- Os teores de sulfato (SO_4^{-2}) e cloreto (Cl^-) diminuem com o aumento das precipitações e aumenta com a diminuição das precipitações, atingindo teores máximos em outubro para abaixar sensivelmente no mês de menor precipitação.

CAPÍTULO 6

6. USO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Uma finalidade imediata para o estudo da qualidade das águas é a determinação satisfatória para propor seu uso.

O uso das águas subterrâneas rasas de Ponta de Pedras está sendo proposto em função de suas características físico-químicas gerais.

Para uso doméstico, os microorganismos nocivos deverão estar virtualmente ausentes, sendo que análises bacteriológicas dessas águas deverão ser objeto de estudo. A presença ou não de elementos químicos altamente tóxicos para o ser humano também deverá ser objeto de pesquisa.

Para o uso na agricultura, as águas estudadas foram analizadas no que diz respeito à percentagem de sódio (% Na) sobre o total dos cátions; à relação Na/Ca, à razão de adsorção do sódio (SAR) e à condutividade elétrica.

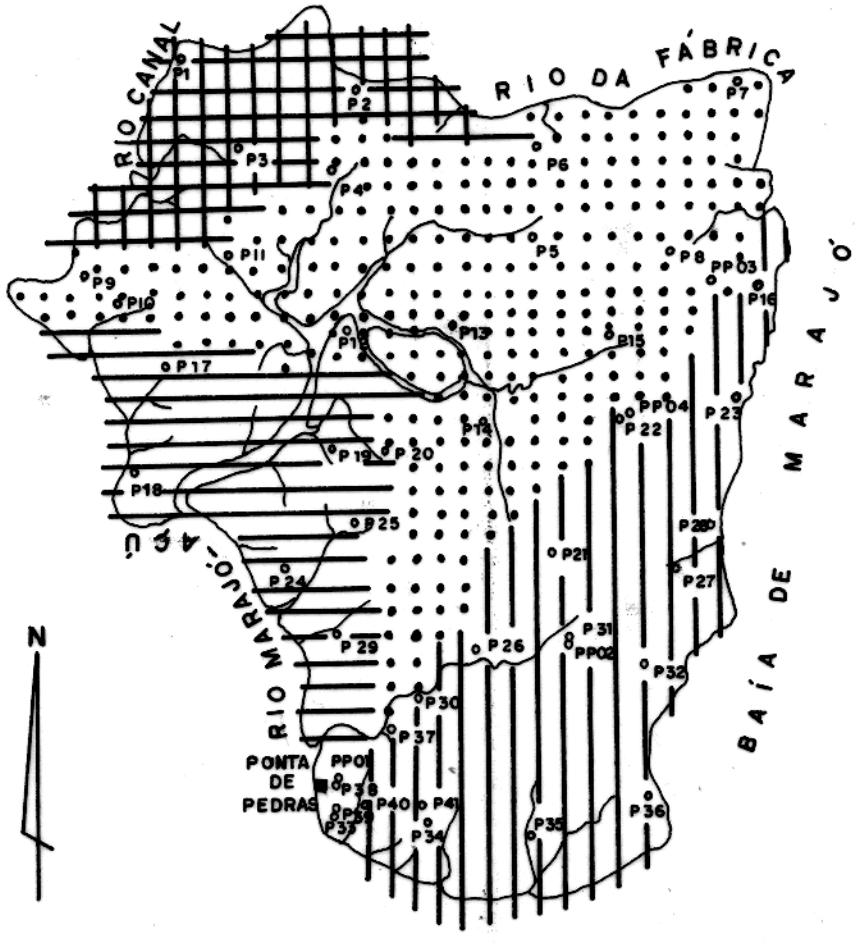
A concentração total de sais e o elemento químico boro deverão ser analisados nas próximas amostragens.

6.1. Tipos e Zoneamento Horizontal das Águas Subterrâneas

Para diferenciar os tipos de águas subterrâneas em estudo e seu zoneamento horizontal foram comparadas as distribuições geográficas dos teores em miligramas por litro dos elementos característicos: Ca; Mg; Na; K; Cl; SO_4; HCO_3; dureza; pH e condutividade.

Diagrama de análise da água, adaptado de Schoeller e Berkaloff, usado para facilitar o agrupamento natural dessas águas.

Os elementos característicos que melhor serviram para grupar essas águas em um zoneamento horizontal foram: pH; dureza; condutividade e Na. Assim, podemos distinguir quatro agrupamentos principais de tipos de águas na região de Ponta de Pedras (Fig.6.1).



CONSTITUIÇÃO QUÍMICA \ TIPOS DE ÁGUA	A	B	C	D
PH	>5,0	5,0 < PH < 6,6	3,5 < PH < 6	5,0 < PH < 6,2
DUREZA $CaCO_3$ mg/l	>30	3 < D < 20	10 < D < 20	<10
CONDUTIVIDADE µmhos/cm	>100	25 < C < 80	50 < C < 100	<50
Na	>10	<6	5 < Na < 10	<5

Fig. 6.1 Zoneamento Horizontal das Águas Subterrâneas Rasas de Ponta de Pedras. Amostras de Águas Coletadas em Junho - Julho de 1977, Adaptado de Fenzl e Piuci(1977).

As relações características $r \frac{SO4}{Cl}$; $r \frac{Ca}{Mg}$ e $r \frac{Cl-Na}{Cl}$, em miliequivalentes, foram comparadas para campanhas de campo trimestrais em 1977, para mostrar as tendências prováveis de variações que elas sofrem durante o ano hidrológico na região de Ponta de Pedras (Figs. 6.1.A; 6.1.B; e 6.1.C).

6.2. Uso Doméstico e Abastecimento Público

Para que uma água seja considerada potável, ela deve estar bacteriológica e quimicamente fora de perigo para o uso humano. Além disso, a água usada em casa deverá ser livre de propriedades físicas indesejáveis semelhantes a cor ou turbidez, deverá ainda ser livre de gosto ou odor.

A potabilidade das águas subterrâneas em estudo foi examinada do ponto de vista de suas características físico-químicas gerais. Para isso foram usados os PADRÕES DE POTABILIDADE (Quadro 6.2), estabelecidos pelos seguintes organismos: Serviço de Saúde Pública dos Estados Unidos (U.S.P.H.S), Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT-PB-19) e Organização Mundial da Saúde (WHO). Elementos traços, altamente tóxicos não foram analisados neste trabalho, mas é provável que suas concentrações sejam inferiores ao máximo permissível.

Em geral, as águas subterrâneas de Ponta de Pedras são potáveis, com exceção para o pH que se apresenta muitas vezes bastante ácido e o ferro que apresenta concentrações acima dos limites permissíveis.

Devemos considerar, além disso, que a potabilidade das águas subterrâneas estudadas aqui, varia em função da distribuição pluviométrica anual. Dessa maneira, nos finais dos períodos chuvosos essas águas subterrâneas são menos salinizadas. Nos períodos de pequenas precipitações e início da estação chuvosa essas águas podem deixar de ser potáveis, apresentando excesso de sais, o que dá uma característica salobra para várias delas (Piuci e Fenzl 1978a).

É de interesse considerar-se aqui as características dos

CARACTERÍSTICAS	U.S.P.H.S	ABNT-PB-19		Org. Mundial da Saúde	
		Recomendado	Tolerado	Permissível	Excessivo
FÍSICAS					
Turbidês	5	1	5	5	25
Cor	15	10	30	5	50
Odor ou cheiro	3	Inobjetável		Inobjetável	
Sabor	Ausência	Inobjetável		Inobjetável	
QUÍMICAS					
ABS	0,5	—	—	—	—
Manganês (em Mn)	0,05	—	0,1	0,1	0,5
Chumbo (em Pb)	0,1 (0,05)	—	0,1	0,1	—
Cobre	1,0	—	3,0	1,0	1,5
Zinco	5,0	—	15,0	5,0	15,0
Ferro (em Fe)	0,3	—	—	0,3	1,0
Magnésio (em Mg)	125,0	—	0,3	5,0	15,0
Arsênico (em As)	0,01 (0,05)	0,05	0,10	0,2	—
Selênio (em Se)	(0,01)	—	0,05	0,05	—
Cromo (hexavalente)	0,05	—	0,05		—
Fluor (F)	—	1,0	1,5	—	—
Cloretos (Cl)	250	—	250	200	600
Composto de fenol	0,001	—	0,001	0,001	0,002
Sulfetos	250	—	0,5	200	400
Dureza ($CaCO_3$)	—	100	250	—	—
Cloro livre	—	0,2	200	—	—
Nitrogênio nítrico	45	—	—	—	50
Sólidos totais	500	500	1000	500	1500
Cianetos (em CN)	0,01 (0,2)	—	—	0,01	—
Cálcio (em Ca)	—	Limites p/ dureza		75	200
pH	—	pH (saturação) 6		7,0 - 8,5	<6,5>9,2

Quadro 6.2 Padrões de Potabilidade em Miligramas por Litro, Adaptado de Azevedo Netto (1973).

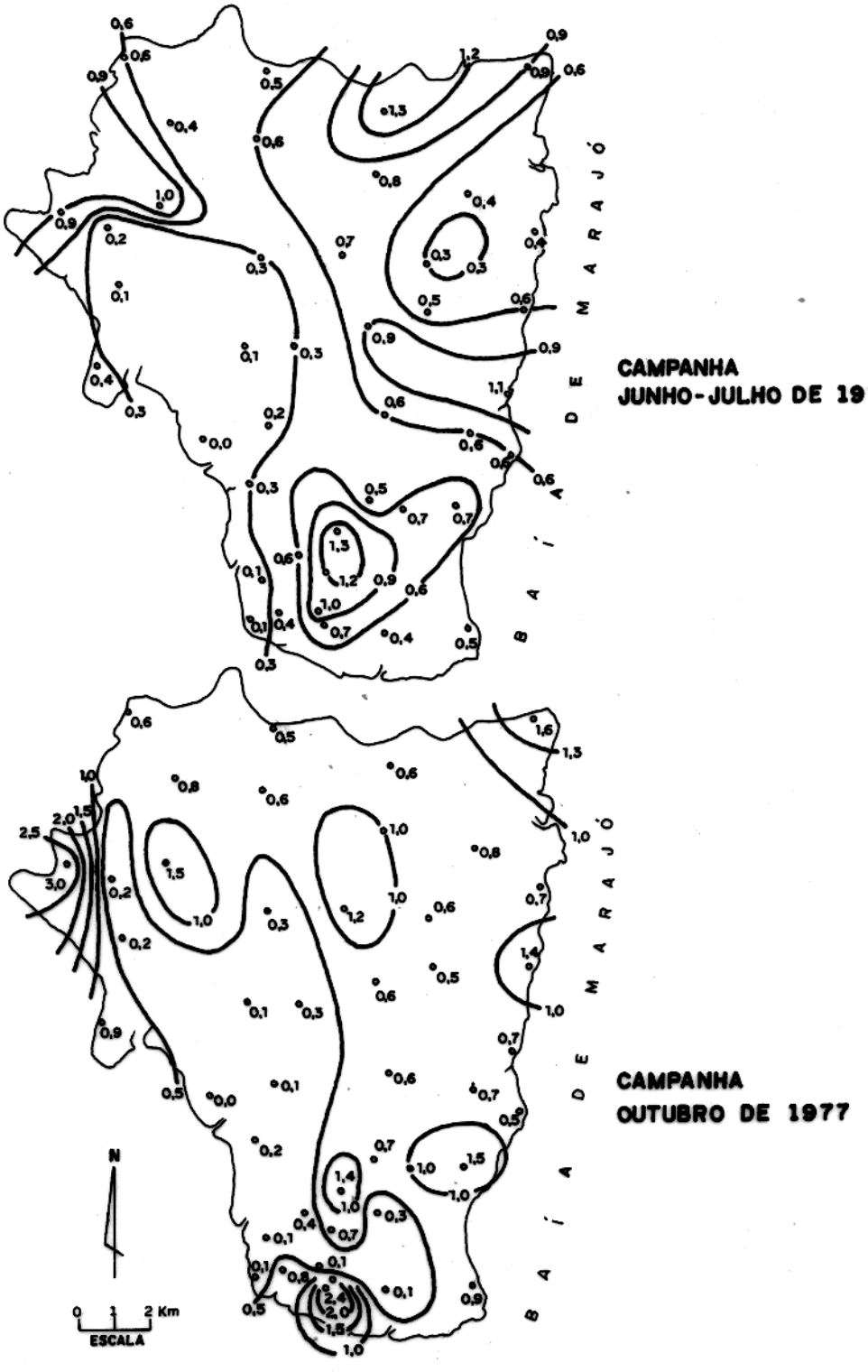


Fig. 6.1.A Distribuição Geográfica da Relação $r\frac{SO_4}{Cl}$, em Miliequivalentes. Amostras de Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras Coletadas em Campanhas Trimestrais de 1977.

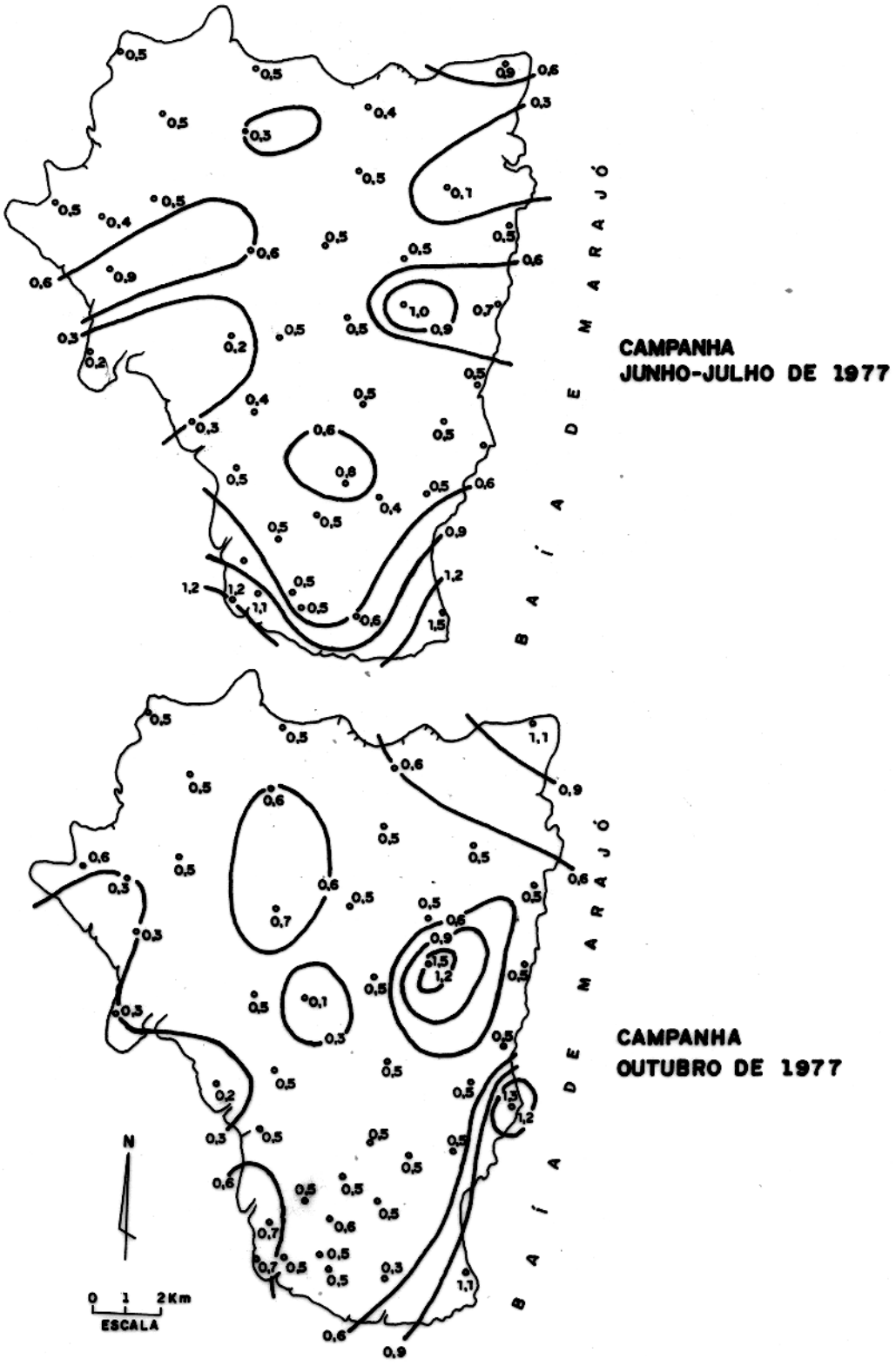


Fig. 6.1.B Distribuição Geográfica da Relação $r\frac{Ca}{Mg}$, em Miliequivalentes. Amostras de Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras Coletadas em Campanhas Trimestrais de 1977.

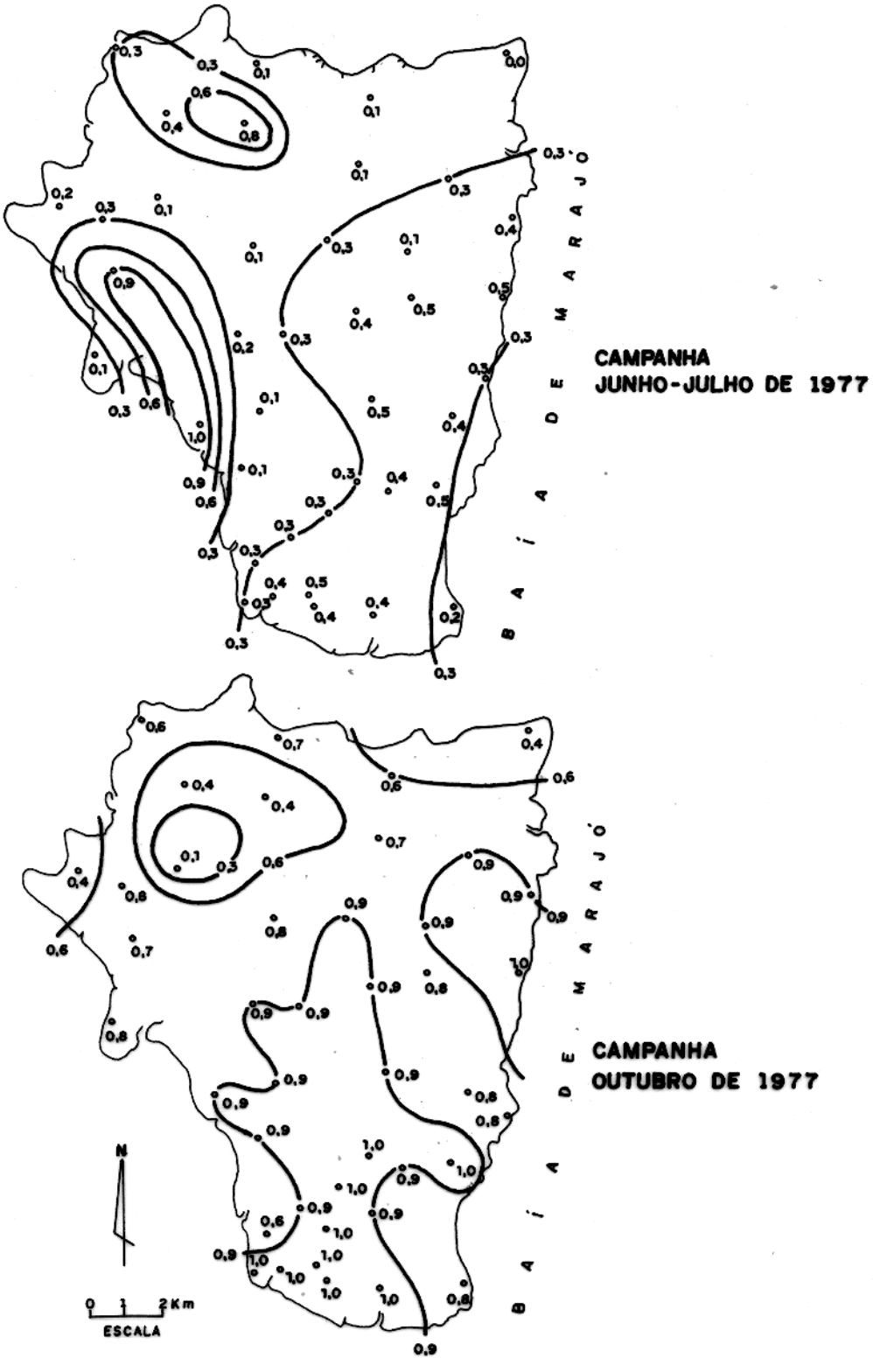


Fig. 6.1.C Distribuição Geográfica da Relação $r\frac{Cl-Na}{Cl}$, em Miliequivalentes. Amostras de Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras Coletadas em Campanhas Trimestrais de 1977.

Padrões de Potabilidade, individualmente.

6.2.1. Características Físicas

Nas águas subterrâneas em estudo, foram analisadas características físicas no que diz respeito à: Turbidez, Cor, Odor e Sabor.

Os poços PP01, PE01, PE02 e PE03 apresentaram águas excessivamente turvas, acima de 90 mg/1 em SiO_2. O poço PP01 em Ponta de Pedras atingiu turbidez de 150 mg/1 em SiO_2 em 08.04.1977. Os outros poços estudados apresentaram turbidez menor que 25 mg/1 em SiO_2, porém todos eles possuem teores de turbidez acima daqueles recomendados pela ABNT-PB-19; isso vem corroborar o fato desses poços serem de qualidade construtiva inferior. Alguns desses poços apresentam turbidez dentro do limite permissível pela U.S.P.H.S.; ABNT-PB-19 e WHO, por exemplo o PE04 e PE07. Os teores de cores das águas de vários desses poços são inferiores aos limites permissíveis pela U.S.P.H.S. e WHO, sendo que os teores máximos (20 mg/1 na escala da platina) foram encontrados nos poços PP01; PE01 e PE03.

Odor ou cheiro não foi encontrado em nenhuma das amostras de águas subterrâneas estudadas.

O sabor das amostras dessas águas coletadas em piezômetros em outubro de 1977 apresentou-se levemente ácido para P8, P10, P14, P28, P35, P37.

A ABNT-PB-19 e a WHO não fazem objeção para essas duas últimas características físicas em águas potáveis.

6.2.2. Características Químicas

As características químicas usadas nas águas subterrâneas em estudo foram aquelas que dizem respeito à concentração de Mn, Fe, Mg, F, Cl, SO_4, N, Ca, além da dureza e do pH.

6.2.2.1. Ferro

O ferro contido na água causa manchas nas instalações sanitárias e roupas lavadas, incrustações nos filtros de poços e obstrução nas canalizações. Teores acima de 0,5 mg/l são incômodos. Alguns processos industriais não admitem mais que 0,1 mg/l. Concentrações de alguns miligramas por litro podem ser reduzidos a 0,1 mg/l ou menos por aeração.

Águas contendo ferro favorecem a proliferação das bactérias do ferro, sendo as espécies mais importantes representadas pela Crenothrix e Leptothrix (Hem, 1970).

As bactérias do ferro se proliferam abundantemente nos encanamentos e sistemas de recirculação de água bem como em outros lugares, promovendo ação obstrutiva e redução de vazão. Frequentemente as proliferações se rompem, desprendendo-se em grandes massas.

As bactérias do ferro são filamentosas e crescem presas às paredes do poço e condutos artificiais ou naturais, como nos aquíferos, provocando obliteração dos mesmos.

As bactérias do ferro prosperam melhor sem a presença de luz e são encontradas mais frequentemente nas águas muito pobres em oxigênio e com dióxido de carbono junto com o ferro dissolvido.

As águas com teor de ferro em excesso, deverão ser tratadas. Se as quantidades de ferro e dióxido de carbono não forem altas nas águas subterrâneas, e se não houver outro tratamento, elas poderão ser menos incômodas evitando-se a aeração.

É importante observar que as bactérias do ferro não figuram entre os hospedeiros intestinais do homem e dos animais e menos ainda como patógenos segundo dados de Stanier et al.(1976).

Os processos de proliferação de bactérias do ferro são realizados em parte pela oxidação do ferro ferroso (Hem, 1970).

Pesquisas sobre biogeoquímica e bactérias de oxidação do ferro ferroso em habitat geotermal no Yellowstone National Park - USA, em fontes quentes e ácidas, indicaram que as Thiobactérias que se desenvolvem nesse tipo de ambiente são as Thiobacillus fer

rooxidans, sendo que a temperatura ideal para isso está entre 85-90°C (Brock et al., 1976).

Na maioria das águas subterrâneas de Ponta de Pedras, os teores de ferro são excessivos, chegando atingir 4,0 mg/l em algumas águas. Esse fato constitui um problema para a potabilidade dessas águas. Uma maneira de se eliminar teores de ferro tão altos nessas águas é através de aeração e filtração das mesmas. Com efeito, esse método está sendo usado amplamente em Ponta de Pedras e em vários outros poços para abastecimento em outras cidades.

Aeração e filtração das águas do poço PP01, reduzem sensivelmente seus teores de ferro. De fato, análises químicas realizadas em águas do PP01, antes e depois da aeração e filtragem mostraram teores de ferro de 1,8 mg/l e 0,35 mg/l, respectivamente.

6.2.2.2. Fluoretos

Quando o elemento químico fluor é consumido em quantidades desejáveis é benéfico e preventivo de cáries dentárias, além de contribuir na formação da estrutura óssea do homem e animais.

Em climas quentes com temperatura variando entre 26°C e 32°C, teores de fluor entre 0,8 e 0,7 mg/l são limites ótimos recomendados pelo U.S.P.H.S. (1962) em Hem (1970).

As águas subterrâneas de Ponta de Pedras estudadas, estão isentas de fluoretos.

Para evitar cáries dentárias na população de Ponta de Pedras, o fluor poderia ser adicionado nas águas distribuídas para consumo. Porém os teores de fluor adicionados artificialmente devem ser controlados rigorosamente, pois em excesso pode causar manchas escuras no esmalte dos dentes das crianças e fluorose cumulativa em pessoas adultas.

6.2.2.3. Nitrogênio

O elemento químico nitrogênio tem dois aspectos interessantes na comparação com teores Padrões de Potabilidade das águas.

Primeiro, está ligado ao fato de que o nitrogênio (NO_3^-) em excesso pode causar metahemoglobinemia infantil em crianças novas (cianose). Para isso, concentrações de nitrogênio acima de 10 mg/l, equivalentes a 44 mg/l de nitratos, são indesejáveis para uso doméstico. O outro aspecto interessante no estudo dos teores de nitrogênio é ligado ao fato de que altos teores de nitrato podem indicar poluição das águas por fontes de dejetos (D.A.E.E., 1974).

O U.S.P.H.S. considera um limite de 45 mg/l de nitrogênio nítrico para águas potáveis. A WHO considera que teores de nitrogênio nítrico iguais a 50 mg/l são excessivos.

As águas subterrâneas em estudo não sofrem restrições em suas potabilidades no que diz respeito aos teores de nitrogênio encontrados. Com efeito, os teores de nitrogênio nas formas nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-) e nitrogênio amoniacal (NH_4^+), encontrados nessas águas são bastante baixos, sendo que o teor máximo encontrado foi de 4,43 mg/l na forma NO_3^-, no poço PE07.

Os baixos conteúdos de nitrogênio nessas águas subterrâneas, sugerem inclusive que as mesmas não estão poluidas por materiais orgânicos, esgotos, despejos industriais ou fertilizantes.

6.2.2.4. pH

A ABNT-PB-19 considera que uma determinada água é potável quando seu pH é igual a 6 (água tratada).

A WHO considera excessivo pH entre os limites $< 6,5 > 9,2$ e permite pH entre 7,0 - 8,5 para uma água ser potável.

Com base nesses intervalos de valores de pH, a maioria das águas subterrâneas em estudo não são potáveis.

Com efeito, as águas subterrâneas em estudo apresentam pH igual a 6,7 no máximo, sendo que a maioria delas apresenta pH menor que 5,0 e algumas delas são hiperácidas. A implicação dessas águas ácidas com a saúde das pessoas que as consomem, ainda não foi esclarecida na região em estudo.

O pH das águas para abastecimento pode ser elevado artificialmente pela adição de substâncias corretivas especiais, tornan

do a água potável (Azevedo Netto, 1973).

6.2.2.5. Outras Características Químicas de Potabilidade

1- O elemento manganês foi encontrado em teores máximos de 0,15 mg/l. Essas concentrações de manganês estão próximas daquelas toleradas pela ABNT-PB-19 e permitidas pela WHO, porém estão acima daquelas recomendadas pelo U.S.P.H.S.

2- O elemento magnésio apresentou teores de concentração bastante baixos, sendo que seu conteúdo máximo encontrado foi de 40,2 mg/l no P24. O U.S.P.H.S permite concentrações de 125,0 mg/l de magnésio nas águas potáveis. A ABNT-PB-19 tolera teores máximos de 0,3 mg/l e a WHO considera que teores de 15 mg/l de magnésio são excessivos. Em função da grande variação de teores de magnésio permitidos, tolerados e em excesso, podemos dizer que as águas subterrâneas estudadas não deixam de ser potáveis por causa dos teores de magnésio que apresentam.

3- Cloretos em águas potáveis são permitidos e tolerados até concentrações entre 200 a 250 mg/l. Teores de cloreto iguais a 600 mg/l são considerados excessivos pela WHO. As concentrações de cloreto encontradas nas águas subterrâneas em estudo não afetam sua potabilidade. Amostra de água do P24 coletada em outubro de 1977 foi a única que apresentou teor de cloreto pouco acima dos padrões considerados excessivos pela WHO.

4- Sulfatos em águas potáveis são permitidos em teores de 200 a 250 mg/l pela WHO e U.S.P.H.S. A ABNT-PB-19 tolera teores até 0,5 mg/l, teores de 400 mg/l de sulfato são considerados excessivos pela WHO.

As águas subterrâneas estudadas aqui apresentam teores de sulfato em geral, bastante baixos, o que não impede sua potabilidade.

5- A potabilidade dessas águas subterrâneas também não são afetadas pelos seus baixos teores em Ca e por serem águas moles em sua maior parte.

6.3. Uso na Agricultura

Um estudo mais completo sobre águas para irrigação inclui o conhecimento das propriedades físico-químicas das águas, dos solos e dos tipos de plantas que se pretende irrigar.

Neste trabalho analisamos algumas das características físico-químicas dessas águas com vistas a se fazer reconhecimento sobre as possibilidades de se usar as mesmas em irrigação.

Alguns elementos analisados anteriormente em outras seções deste trabalho já deixa concluir que:

1- As águas subterrâneas não apresentam problemas para irrigação quanto à sua temperatura absoluta.

2- Quanto a dureza dessas águas, em geral não apresentam restrições para uso na irrigação.

3- O fato de várias dessas águas terem apresentado acidez elevada (pH menor que 5,0), restringe seu uso para irrigação em alguns locais da área em estudo. Por exemplo, nas proximidades dos piezômetros P10, P11, P8 e alguns locais próximos à cidade Ponta de Pedras.

4- A condutividade dessas águas aumenta nos períodos de menores quantidades de chuvas, podendo acarretar problemas de irrigação em alguns locais da área estudada.

A maioria das águas subterrâneas analisadas em junho-julho (período chuvoso) e outubro (período seco) de 1977, apresentaram condutividades menores que 100 micromhos por centímetro. Condutividades maiores que 100 micromhos por centímetro foram encontradas na parte sudoeste da área em estudo e no P35. Condutividades maiores que 250 micromhos por centímetro foram encontradas nas águas do P17, P19, P24, P38 e P35, em outubro de 1977. Apenas o P24 apresentou condutividade maior que 750 micromhos por centímetro no período seco.

Isso mostra que em Ponta de Pedras a maioria das águas estudadas têm salinidades fraquíssimas e podem ser utilizadas sem restrição para a irrigação, do ponto de vista da condutividade elétrica.

6.3.1. Relação entre Sódio (Na) e outros Cátions Importantes

A irrigação feita repetidamente pode causar problemas no solo. Pelo fato das plantas assimilarem muito pouco dos elementos químicos da água de irrigação, poderá ocorrer uma demasiada impregnação de minerais prejudicando a fertilidade do solo (Johnson, 1974).

Os cátions que participam desse processo conhecido como TROCA DE BASE, são principalmente o sódio (Na), o cálcio (Ca), o magnésio (Mg) e o potássio (K). Quando uma água de irrigação com elevado teor de sódio é aplicada ao solo, é deslocada uma quantidade equivalente de cálcio ou outros íons. Isso causa a defloculação e a redução da permeabilidade do solo (Todd, 1959).

Por causa desses problemas, existe necessidade de se conhecer a química das águas para irrigação e em especial as relações que o sódio tem com outros cátions importantes.

Nas águas subterrâneas de Ponta de Pedras, as relações do elemento sódio com outros elementos, foram analisadas em mais de 80 amostras.

As principais relações do sódio nessas águas estão estabelecidas, todas em miliequivalentes, por:

a- % de Na sobre o total dos cátions

b- Relação Na/Ca

c- SAR (Sodium Adsorption Ratio)

A porcentagem de Na sobre o total dos cátions é dada pela expressão:

$$\% \text{ Na} = \frac{(\text{Na} + \text{K})\ 100}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}}$$

Embora as águas subterrâneas de Ponta de Pedras sejam em geral pobremente mineralizadas, a maioria delas contém relativamente altas porcentagens de sódio (83% a 97%), em relação aos outros cátions. Essas águas com relativas altas porcentagens de sódio podem causar problemas na permeabilidade dos solos irrigados. Outra grande parte das águas subterrâneas em estudo, têm porcentagens de sódio entre 30% a 70%, sendo que elas poderiam ser usadas para

irrigação desde que as outras características também fossem favoráveis. As águas com porcentagens de sódio relativamente baixas (P22 com 20% Na e P44 com 21% Na) seriam as melhores para irrigação desde que as outras características não as impessam para tal.

A relação Na/Ca tem um grande intervalo de valores variando desde zero até 130. A relação Na/Ca mostrou nitidamente que no final do período chuvoso (junho-julho) a quantidade de sódio disponível nas águas subterrâneas é significativamente bem maior que a disponibilidade do Ca. No período seco (outubro) essa relação cai em valores absolutos, mostrando que nesse período o Ca passa a ter uma importância bem maior naquelas águas em relação ao Na. Desse modo, as águas subterrâneas para irrigação se prestam mais durante os períodos secos, pelo menos no que diz respeito à relação Na/Ca.

A Razão de Adsorção do Sódio (SAR) é calculada pela expressão:

$$SAR = Na/\left(\frac{Ca + Mg}{2}\right)^{1/2}$$

Para determinar os valores de SAR para as águas subterrâneas estudadas, foi usado um nomograma logarítmico especial para essa finalidade, adaptado de Rijo e Manoel Filho (1972). As figuras 6.3.1.A e 6.3.1.B dão valores de SAR para algumas dessas águas subterrâneas de Ponta de Pedras a partir de amostras coletadas em junho-julho e outubro de 1977. Mais de 80 amostras dessas águas apresentaram SAR menor do que 4. Isso mostra que as águas subterrâneas de Ponta de Pedras são do tipo EXCELENTE para irrigação, tratando-se da Razão de Adsorção do Sódio.

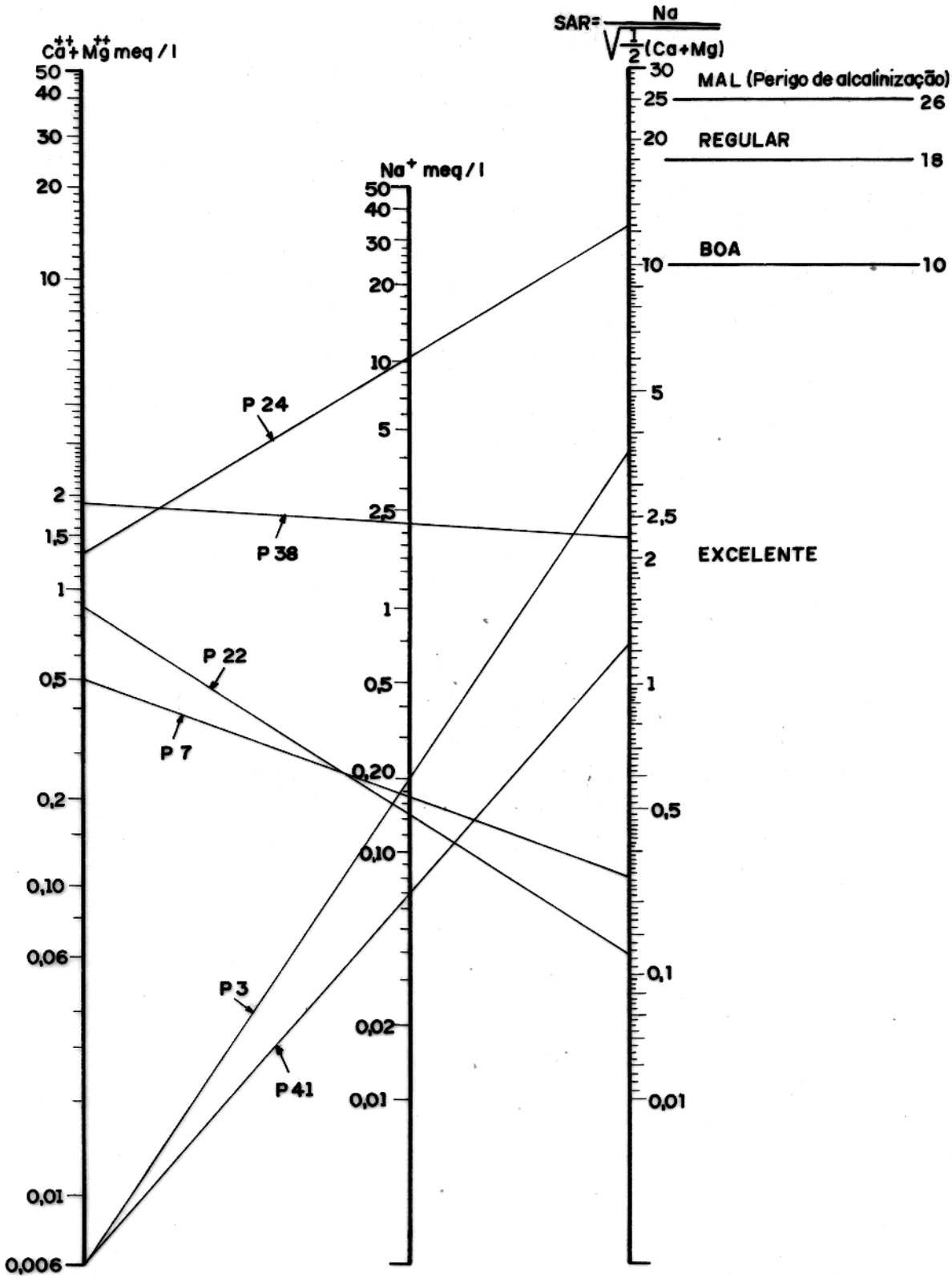


Fig. 6.3.1.A Valores de SAR para Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras. Amostras Coletadas em Junho-Julho de 1977, Adaptado de Rijo e Manoel Filho(1972).

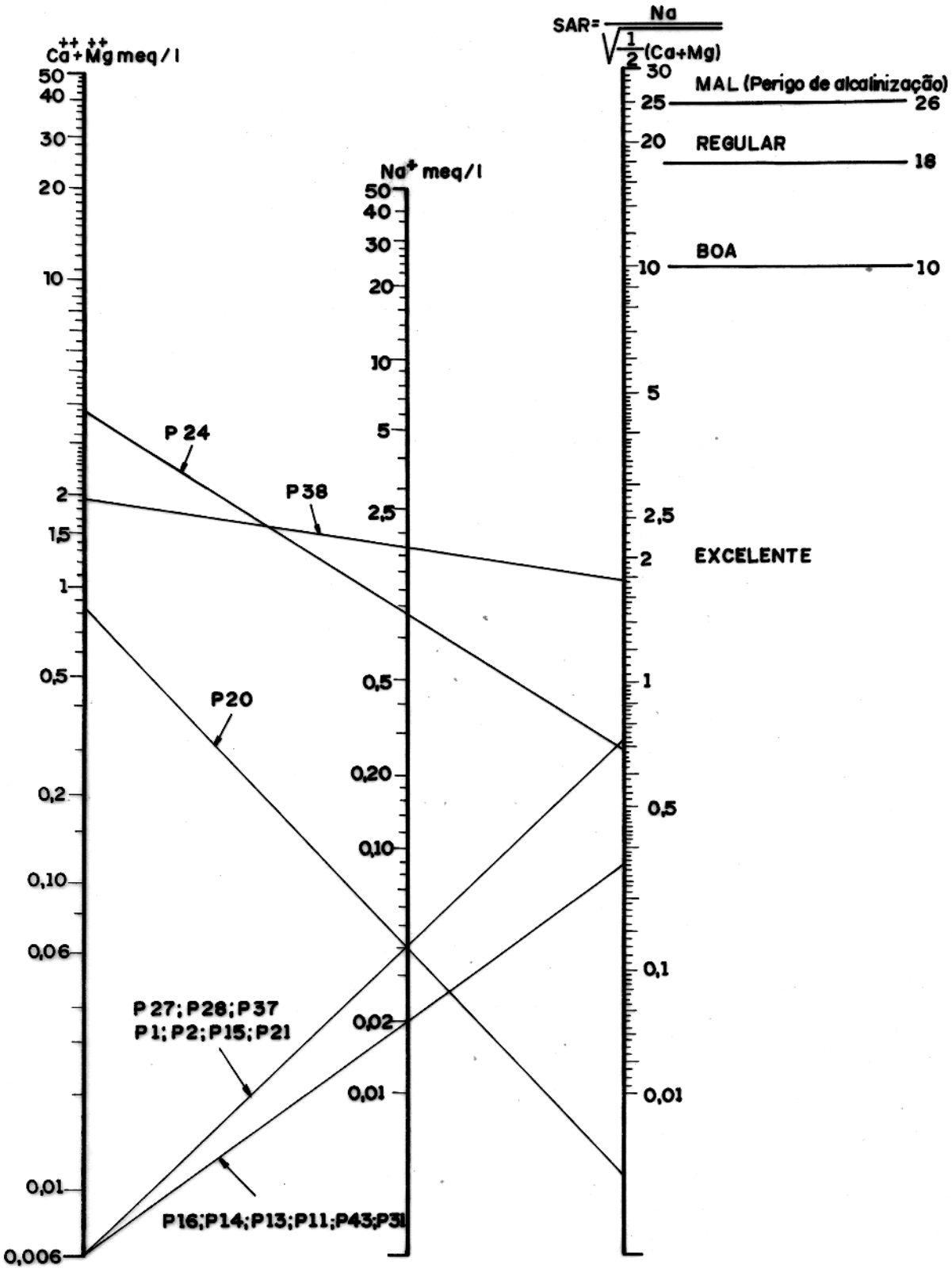


Fig. 6.3.1.B Valores de SAR para Águas Subterrâneas de Ponta de Pedras. Amostras Coletadas em Outubro de 1977, Adaptado de Rijo e Manoel Filho(1972).

7. CONCLUSÕES

A geologia da área estudada é formada principalmente por sedimentos terrígenos, depositados mecanicamente, com granulometria pelítica até microconglomerática pertencentes à Formação Tucunaré de idade provavelmente pleistocênica.

O principal aquífero Ponta de Pedras é constituido por um fáceis geológico arenoso quartzozo grosseiro e friável com intercalações argilosas, com uma distribuição complexa no espaço.

Em sua maior parte o sistema aquífero está semi-confinado, nas outras partes ele é livre. Suas maiores espessuras (>17m) estão localizadas na parte sul e sudeste da área estudada. Na região oeste da área, o topo do sistema aquífero não foi atingido com as perfurações feitas.

O sistema aquífero é alimentado por precipitações meteóricas com taxas de infiltração estimadas para o mês de fevereiro de 1977 entre 10^6 a 10^7 m^3 por dia em 1 km^2.

As prosidades efetivas do aquífero variam entre 25% e 37%. O valor médio do coeficiente de Darcy (K), obtido por granulometria, é de aproximadamente 20 centímetros por dia correspondendo a boas condições hidrodinâmicas. Sua transmissibilidade média é aproximadamente de 200 litros por dia por centímetro quadrado.

As características físico-químicas das águas do sistema aquífero, estudadas a partir de resultados analíticos das campanhas trimestrais junho-julho e outubro de 1977, são:

- pH com valor médio de 4,7, indicando águas sempre ácidas;
- condutividades elétricas entre 13 e 2000 micromhos por centímetro, indicando águas pobremente mineralizadas, a menos daquelas localizadas na região da Bacia do Rio Tijucaquara que são as mais condutivas;
- silica (SiO_2) com teores relativamente baixos, variando entre 6,0 a 16,0 miligramas por litro na campanha de outubro de 1977. Os maiores teores foram encontrados na parte sudoeste da área;
- ferro com teores médios relativamente altos: 2,2 miligramas por litro para amostras de campanha de junho-julho de 1977;

- manganês com concentrações máximas de 0,15 miligramas por litro, relativamente baixas;
- cálcio com teores baixos (max. 16,4 mg/l) sugerindo ausência de minerais de rochas sedimentares do tipo "precipitates". As principais fontes de cálcio nas águas estudadas são provavelmente as argilas caulinítícas;
- magnésio com teores médios muito baixos iguais a 2,4 miligramas por litro e máximo de 40,2 miligramas por litro;
- sódio com grande intervalo de concentrações entre 1,5 e 265,0 miligramas por litro na campanha de junho-julho de 1977. Na campanha de outubro de 1977 o intervalo de concentrações diminuiu bastante, entre 0,1 e 40,0 mg/l. As maiores concentrações foram registradas na Bacia do Rio Tijucaquara;
- potássio com intervalo de concentrações entre 2,0 e 280,0 miligramas por litro na campanha de outubro de 1977;
- alcalinidade à metilorange variando entre 0,0 e 35,0 miligramas por litro. Toda alcalinidade dessas águas é proveniente do íon HCO_3^- e da forma aquosa H_2CO_3;
- sulfato (SO_4^{-2}) com teores relativamente baixos entre 3,3 e 29,0 mg/l em outubro de 1977;
- cloreto com teores médios de 21,1 e 19,3 miligramas por litro nas campanhas de junho-julho e outubro de 1977, respectivamente. Fontes de cloretos nessas águas estão relacionadas provavelmente com influência de marés no passado geológico, águas de chuva e também com a decomposição de matéria vegetal;
- bicarbonato é frequente em altas concentrações. As menores concentrações de bicarbonato estão relacionadas com baixos valores de pH. Teores de carbonato são nulos;
- nitrogênio nas formas NH_4^+, NO_3^- e NO_2^- com teores bastante baixos. Isso sugere que essas águas não são poluidas com respeito à presença do elemento nitrogênio;
- fosfato com teores sempre inferiores a 0,40 miligramas por litro;
- dureza baixa indicando águas moles predominantemente. Algumas amostras mostraram-se moderadamente duras e somente água do P24 é classificada como água dura.

O relacionamento CHUVA-QUIMISMO mostrou enriquecimento quí

mico dessas águas subterrâneas nos meses de novembro até fevereiro, diluição gradual desde fevereiro até abril e diluição rápida no mês de abril.

O uso dessas águas para consumo humano em geral está limitado por serem ácidas, com altos teores de ferro e por serem desprovidas de fluoretos.

Na agricultura, várias dessas águas terão que ser usadas com precaução por apresentarem relativas altas percentagens de sódio (%Na) entre 83% e 97%.

8. BIBLIOGRAFIA

ABREU, S.F. (1973) Recursos Minerais do Brasil. São Paulo, Edgar Blücher. v.II. p.309-401.

AMARAL, S.E.(1955) Sedimentologia e Geologia das Camadas Perfuradas na Região do Rio Amazonas. São Paulo, USP, Faculdade de Ciências e Letras. Geol. 12. p. 1-93. (Bol. 192).

ASTIER, J.L.(1975) Geofísica Aplicada a La Hidrogeologia. Madrid, Paraninfo. 344p.

AZEVEDO NETO, J.M. De (1973) Planejamento de Sistemas de Abastecimento de Água. Curitiba, Universidade Federaldo Paraná e Organização Mundial da Saúde. 281 p.

BARBOSA, G.V.; RENNÓ, C.V.& FRANCO, E.M.S.(1974) Levantamento de Recursos Naturais. Geomorfologiada Folha S.A. 22 Belém. Rio de Janeiro, D.N.P.M., Programa de Integração Nacional, v.5. p. 11-29.

BARNES, I. & BACK, W.(1964) Geochemistry of iron-rich Ground Water of Southern Maryland. Jour. Geology, 72: p.435-447.

BERNER, R.A.(1975) Abundance in Natural Waters. Geochemistry of iron, Benchmark, Paper in Geology, 18: pp.59-60, Edited by Henry Lepp., U.S.A.

BEURLEN, K.(1970) Geologie von Brasilien. Berlin, Stuttgart, Gebrüder Borntraeger Verlag.

BROCK, T.D.; COOK, S.; PETERSEN, S. & MOSSER, J.L.(1976) Biogeochemistry and bacteriology of ferrous ironoxidação in Geothermal Habitats. Geochimica et Cosmochimica Acta.(5), May.

BUCKUP, L. Botânica. Porto Alegre. Ed. do Professor Gaucho Ltda.

CASTANY, G.(1968) Prospection et Exploitation dex Eaux Souterraines. Paris, Dunod. 717 p.

CASTANY, G.(1971) Tratado Practico de Las Águas Subterrâneas. Bar

celona, Omega. 672 p.

D.A.E.E.(1974) Estudos de Águas Subterrâneas, Região Administrativa 6, Ribeirão Preto. São Paulo, Departamento de Águas e Energia Elétrica.

DAVIS, S.N.(1964) Sílica in Streams and Ground Water. Am. Jour.Sci. 262: p.870-891.

EPSTEIN, E.(1975) Nutrição Mineral das Plantas. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos.

FENZL, N. & PIUCI, J.(1977) Estudio Hidroquímico de Las Águas Subterrâneas de Pequênas Profundidades na Área Piloto Ponta de Pedras - Ilha de Marajó. V Congresso Geológico Venezolano, Caracas, Noviembre.

GIBBS, R.(1967) The Geochemistry of the Amazon River System: Part I, The Factors that Control the Salinity and the Composition and Concentration Suspended Solids. Geol. Soc. of America Bul. 78: p. 1203-1232, 17 Figs., October.

HAZEN, A. (1892) Some Physical Property of Sands and Gravels,Mass., State Broad of Health, 24th Annual Report.

HEM, J.D. & CROPPER, W.H.(1959) Survey of ferrous-ferric equilibria and redox potentials. U.S. Geol. Survey Water - Supply Paper 1459-A, 31p.

HEM, J.D.(1963) Chemical Equilibria and Rates of Manganese Oxidation, U.S. Geol. Survey Water - Supply Paper 1667-A, 74p.

HEM, J.D.(1964) Deposition and Solution of Manganese Oxides. U.S. Geol. Survey Water - Supply Paper 1667-B. 42p.

HEM, J.D.(1970) Study and Interpretation of the Chemical Caracteristics of Natural Water. 2ed. Washington, Geological Survey Water - Supply, Paper 1473, United States Government Printing Office.

HEM,J.D.(1977) Reaction of Metal ions at surfaces of hydrous iron oxide. Geochimica et Cosmochimica. Acta. 41(4):p.

527-538. April.

HORN, M.K. & ADAMS, J.A.S.(1966) Computer - Derived Geochemical Balances and Element Abundances. Geochim. et Cosmochim. Acta. 30: p.279-297.

IDESP(1974) Estudos Integrados da Ilha de Marajó. Belém.

JOHNSON, E.E.(1974) Água Subterrânea e Poços Tubulares. São Paulo, CETESB. 392p.

JORDAN, H.(1967) Bäderbuch der Deutschen Demokratischen Repûblik. Leipzing, Verlag. G. Thieme.

KRAUSKOPF, K.B.(1956) Dissolution and Precipitation of Silica at low temperatures. Geochim. et Cosmochim. Acta. 10: p. 1-26.

LAMB, A.B. & JACQUES, A.O.(1938) The slow hydrolysis of ferric chloride in dilute solution; 2, The change in hydrogen-ion concentration. Am. Chem. Soc. Jour.,60: p. 1215.

LEONARDOS, O.H.(1948) Possibilidades de Petróleo na Fossa Tectônica do Marajó, Pará. Mineração e Metalurgia. Rio de Janeiro.

LUDWIG, G.(1968) Die Geologische Entwicklung des Marajó - Bechens in Nordbrasilien. Geol. Jb., 86: p.845-878, 3Abb., 8 Tab., 10 Taf., Hannover, Oktober.

MANOEL FILHO, J. & GUILHOT, P.(1972) Elementos de Hidrogeologia Prática. 2ed. Recife, SUDENE, Departamento de Recursos Naturais, Divisão de Hidrogeologia, Divisão de Documentação, outubro.

MASON, B.H.(1971) Princípios de Geoquímica. São Paulo, Polígono, 403 p.

MINAMI, E.(1935) Selen - Gehalte von europäischen und Japanischen Tonschiefern. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, IV, N. F., 1(12): p. 143.

MOREIRA, E.(1976) Os Igapós e Seu Aproveitamento. Belém, Núcleo de Altos Estudos Amazônicos (NAEA), Universidade Fe

deral do Pará.

MORGAN, J.J.(1967) Chemical Equilibria and Kinetic Properties of Manganese in Natural Waters. In: Faust, S.J., & Hunter, J.V., eds. - Principles and Aplications of Water Chemistry, New York, John Wiley. p. 561-624.

MÜLLER, E.P.(1959) Zur Geochemie der Tiefenwässer und der organischen Sbstanz im Nordteil der DDR.Z. angew. Geologie 15(1969) 3, 113-124.

MURAYAMA, S.(1976) Horticultura. Campinas, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola.

OLIVEIRA, A.I.(1951) Notas Sobre a Fossa Tectônica do Marajó. Engenharia, Mineração e Metalurgia, Rio de Janeiro.

ORELLANA, E. (1972) Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua. Madrid, Paraninfo, 523 p.

OVCHINNIKOV, A.M.(1963) Mineral Waters. 2ed. Gosgeotechizdat, Moscow.

OVERBEEK, J.VAN(1970) Como vivem as Plantas. São Paulo, USP.

PIUCI, J. & FENZL, N.(1978a) Variação do Quimismo das Águas Subterrâneas Rasas Durante Um Ano Hidrológico e Suas Consequências para o Uso Humano. In: Reunião Anual da SBPC, 30. São Paulo, 9-15 jul. Resumos, p. 394.

PIUCI, J. & FENZL, N.(1978b) Características Físico-Químicas das Águas Subterrâneas Rasas de Ponta de Pedras (Ilha de Marajó) e Suas Consequências para Uso Humano e Agrícola. Congresso Brasileiro de Geologia, 30. Recife.

PIUCI, J. & GÓES, A.M.(1978) Reconhecimento Geológico da Região de Ponta de Pedras - Ilha de Marajó - Pará. Congresso Brasileiro de Geologia, 30. Recife.

POLZER, W.L. & HEM, J.D.(1965) The Dissolutions of Kaolinite. Jour. Geophys. Research, 70: p. 6233-6240.

RANKAMA, K. & SAHAMA, TH.G.(1968) Geochemistry. The University of

Chicago Press. 912p.

RANZANI, G.(1969) Manual de Levantamento de Solos. 2ed. São Paulo, USP.

RESENDE, W.M. & FERRADAES, J.O.(1971) Integração Geológica Regional da Bacia Sedimentar da Foz do Rio Amazonas. Congresso Brasileiro de Geologia, 25. São Paulo, Anais. v.3.

RIJO, L. & MANOEL FILHO, J.(1972) Elementos de Hidrogeologia Prática. 2ed., Recife, SUDENE, Departamento de Recursos Naturais, Divisão de Hidrogeologia, Divisão de Documentação.

RÖSLER, H.J. & LANGE, H.(1972) Geochemical Tables. German Democratic Republic, Elsevier. 468p.

RZHEVSKY, V. & NOVIC, G.(1971) The Physies of Rocks. Moscow, MIR Publishers. 320p.

SCHALLER, H.; VASCONCELOS, D.N. & CASTRO, J.C.(1971) Estratigrafia Preliminar da Bacia Sedimentar da Foz do Rio Amazonas. Congresso Brasileiro de Geologia, 25. São Paulo, Anais. v.3. p. 189-202.

SCHOELLER, H.(1962) Les Euax Souterraines. Paris, Masson.

SHUVAL, H.(1972) Readings in Water Quality and Pollution Control. Hebrew University of Jerusalem-School of Applied and Thechnology, Human Enviromental Sciences. Jerusalem, Edited by Prof. Hillel Shuval.

SISTROM, W.R.(1973) A Vida dos Micróbios. São Paulo, p.64. Pioneira e MEC.

STANIER, R.Y.; DOVDOROFF, M. & ADEOBERG, E.A.(1976) Mundo dos Micróbios. São Paulo, Edgard Blücher, 741p.

SUDENE(1972) Abastecimento D'água. Planejamento Geral. São Luiz-MA, v. I,II e III. Recife, Departamento de Saneamento Básico.

TANCREDI, A.C.F.N.S.(1972) Aplication de La Prospection Electrique a L'Etude Hidrogeologique de L'Ile de Marajó-Etat

du Pará - Brésil. Université de Strasbourg. Service de La Carte Géologique D'alsace et de Lorraine, Juin.

TANCREDI, A.C.F.N.S.; REIS, C.M. dos & SILVA, H.F. da (1975a) Étude Hydrogéologique de L'ile de Marajó. Association Internationale des Hydrogéologues, Mémoires, v.XI Reúnion de Porto Alegre/Brésil.

TANCREDI, A.C.F.S.; SIEFFERMANN, G.; BESNUS, Y.; FUSIL, G.; & DELIBRIAS, G.(1975b) Présence et Formation de Niveaux de Sidérite dans Sédiments Récents du Delta Amazonien. Versailles, Bulletin du Groupe Français des Argiles, TOME XXVII, p. 13-29.

TODD, D.K.(1959) Hidrologia de Águas Subterrâneas. São Paulo, E. Blücher, 319 p.

WHITE, D.E.(1963) Chemical Composition of Subsurface Waters. U.S. GEOL. Surv. Profess. Papers 440-F.