

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**HIDROGEOQUÍMICA DO
SISTEMA AQÜÍFERO GRANULAR CENOZÓICO
DO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE, RS**

LARISSA RAMAGE

**ORIENTADOR: ARI ROISENBERG
CO-ORIENTADOR: ANTÔNIO PEDRO VIERO**

**BANCA EXAMINADORA: Prof. Dr^a. Ana Maria Pimentel Misuzaki
Prof. Dr. Luiz Fernando Scheibe
Prof. Dr. Nicolai Mirlean**

**Dissertação de Mestrado apresentada
como requisito para obtenção do
Título de Mestre em Geociências.**

Porto Alegre – 2005

Ramage, Larissa

Hidroggeoquímica do sistema aquífero granular cenozóico do município de Porto Alegre, RS. / Larissa Ramage. - Porto Alegre : UFRGS, 2005.

[111 f.] il.

Dissertação (Mestrado). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2005.

1. Hidroggeoquímica. 2. Água subterrânea. 3. Aquífero sedimentar. I. Título.

Catálogo na Publicação
Biblioteca Geociências - UFRGS
Veleida Ana Blank CRB 10/571

*Para **Bruna**,
minha filha.*

*Eu lhe desejo um
mundo iluminado e
livre de ignorâncias.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para a realização deste estudo:

- a minha família, em especial meus pais, pelo estímulo e motivação;
- a minha grande amiga, Rosemeri S. Siviero, pela cumplicidade;
- ao orientador desse estudo, Dr. Ari Roisenberg, e ao co-orientador, Dr. Antônio Pedro Viero, pela sabia orientação e amizade ao longo deste trabalho, ao Prof. Nelson Amoretti Lisboa pelas brilhantes sugestões e correções que foram de vital importância;
- a todos os colegas e amigos do IG, principalmente Eri Takeuchi, Cláudio Roisenberg e Luciane D. Chaves; ao pessoal da sala 105 do Laboratório de Hidrogeoquímica, Maria Paula C. Marimon, Arthur S. Nanni, Eduardo Sanberg, Ronaldo Herlinger, Leandro Bettiolo e Rafael Midugno;
- a todas as pessoas que tiveram a boa vontade e cooperação por permitirem coletar amostras de água nos poços de suas residências, hospitais, clubes e estabelecimentos comerciais;
- a UFRGS, professores e funcionários pelo apoio;
- ao Departamento Municipal de Águas e Esgotos de Porto Alegre (DMAE) pelo convênio firmado para este estudo, por permitir a utilização do banco de dados e pela realização das análises químicas e físicas de amostras de água, em especial a Eng^a Miriam Schwarzbach, a Quím.^a Iara Morandi e a Biól.^a Maria Mercedes Bendati, aos técnicos Ivan e Adami e ao estagiário Felipe, pelo auxílio nas coletas;
- aos funcionários da Cia.T.Janér e CORSAN pelo fornecimento do cadastro, dados construtivos e análises químicas dos poços;
- ao químico Júlio Carlos Zeitter do Laboratório de Geoquímica da UFRGS, pelo auxílio nas análises hidroquímicas; e ao técnico Gilberto S. dos Santos do Laboratório do Centro de Estudo de Geologia Costeira e Oceânica (CECO) da UFRGS, pela ajuda na caracterização mineralógica e textural dos sedimentos;
- Enfim, a todas as pessoas que estiveram comigo nesta etapa da vida...

A compreensão humana não é um exame desinteressado, mas recebe infusões da vontade e dos afetos; disso se originam ciências que podem ser chamadas “ciências conforme a nossa vontade”. Pois um homem acredita mais facilmente no que gostaria que fosse verdade. Assim, ele rejeita coisas difíceis pela impaciência de pesquisar; coisas sensatas, porque diminuem a esperança; as coisas mais profundas da natureza, por superstição; a luz da experiência, por arrogância e orgulho; coisas que não são comumente aceitas, por deferência à opinião do vulgo. Em suma, inúmeras são as maneiras, e às vezes imperceptíveis, pelas quais os afetos colorem e contaminam o entendimento.

Francis Bacon, *Novum organon* (1620)

SUMÁRIO

Dedicatória	i
Agradecimento	ii
Epígrafe	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
Lista de figuras	vi
Lista de tabelas e quadros	vii
Lista de Abreviaturas e Símbolos	viii
I. INTRODUÇÃO	2
1.1. Considerações iniciais	2
1.2. Objetivos	3
II. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA	4
2.1. Localização, acesso e dados municipais	5
2.2. Aspectos Fisiográficos	7
2.2.1. Geomorfologia e Vegetação	7
2.2.2. Clima	8
2.2.3. Solos	9
2.3. Geologia da área	10
2.3.1. Embasamento Cristalino Granítico-gnáissico Pré-Cambriano	10
2.3.2. Cobertura Sedimentar Cenozóica	12
2.4. Aspectos Hidrológicos	14
2.4.1. Águas superficiais	14
2.4.2. Águas subterrâneas	15
III. METODOLOGIA	17
3.1. Estudo preliminar	18
3.2. Análises hidroquímicas	19
3.2.1. Análises realizadas por titulometria	21
3.2.2. Análises realizadas por potenciometria	22
3.2.3. Análises realizadas por gravimetria	22
3.2.4. Análises realizadas por contagem microbiana	23
3.2.5. Análises realizadas por espectrofotometria	23
3.2.6. Análises realizadas por espectrofotometria de absorção atômica	24
3.2.7. Análise estatística	25
3.3. Análise mineralógica	26
IV. ARTIGO CIENTÍFICO	27
<i>“Caracterização hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Granular Cenozóico de Porto Alegre, RS”</i>	
V. RESULTADOS E INTERPRETAÇÕES	49
5.1. Introdução	50
5.2. Propriedades Físicas das águas do SAGC	52
5.2.1. Temperatura da água	52
5.2.2. Cor	52

5.2.3. Odor	52
5.2.4. Turbidez	53
5.3. Propriedades Iônicas	53
5.3.1. Condutividade elétrica	54
5.3.2. Dureza	56
5.3.3. Alcalinidade	56
5.3.4. pH	56
5.3.5. Eh	57
5.3.6. Resíduos totais, filtrados e voláteis	53
5.4. Constituintes Iônicos Principais	58
5.4.1. Sódio	58
5.4.2. Potássio	59
5.4.3. Cálcio	60
5.4.4. Magnésio	62
5.4.5. Ferro e Manganês	63
5.4.6. Cloreto	65
5.4.7. Sulfato	68
5.4.8. Bicarbonato	69
5.4.9. Nitrato	70
5.5. Constituintes Iônicos Secundários	71
5.5.1. Fosfato	71
5.5.2. Sílica	72
5.5.3. Zinco, chumbo e cádmio	73
5.5.4. Fluoreto	73
5.6. Constituintes menores	74
5.7. Análise bacteriológica	75
5.8. Modelamento Geoquímico	76
5.9. Tratamento estatístico dos dados químicos	79
VI. CONCLUSÕES	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
ANEXO A. Resultados físico-químicos e bacteriológicos dos poços PDU	97
ANEXO B. Resultados físico-químicos dos poços da segunda etapa de estudo	103
ANEXO C. Descrição mineralógica e textural de um perfil de sedimentos do SAGC	106

*Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Granular Cenozóico
do Município de Porto Alegre, RS*

Larissa Ramage

RESUMO

As águas subterrâneas são significativamente afetadas pelo ambiente deposicional no Sistema Aquífero Granular Cenozóico. Os sedimentos terciários e quaternários da Planície Costeira do Rio Grande do Sul que ocorrem em Porto Alegre foram depositados em Sistemas de Laguna/Barreira que geraram depósitos de leques aluviais, fluviais, lacustres e deltáicos. O Sistema Aquífero Granular Cenozóico na área estudada sofreu influência de transgressões e regressões marinhas iniciadas há 400 mil anos. No presente estudo foram analisadas 39 amostras de água subterrânea na região de Porto Alegre, que se destacam por possuir alto conteúdo de íons, em particular: cloreto (13 a 1680 mg/L), sulfato (4 a 500 mg/L), cálcio (0,9 a 125 mg/L), magnésio (0,7 a 154 mg/L) e sódio (17 a 740 mg/L), permitindo classificá-las como cloretada-cálcico-sódicas com elevados teores de sulfato. Os resultados físico-químicos foram tratados estatisticamente (análise fatorial e análise discriminante), o que permitiu identificar 4 grupos de águas, a partir dos parâmetros de maior correlação, que compreendem cloreto, potássio, cálcio, magnésio, sulfato, sódio, dureza e condutividade elétrica. A dissolução de sais de ambiente marinho ou mixohalino associada com condições hidrodinâmicas de fluxos de baixa velocidade e elevado tempo de residência, são fatores decisivos para a existência dos vários tipos hidroquímicos. O modelamento geoquímico indicou subsaturação em fluorita, halita e gipsita, enquanto calcita e dolomita tendem a saturação. Por outro lado, os cálculos indicam supersaturação em fluorapatita, gipsita, caolinita e goetita.

Palavras-chave: Sistema Aquífero Granular Cenozóico, hidrogeoquímica, água subterrânea, salinização, Porto Alegre.

*Hidrogenochemistry of Cenozoic Aquifer System Granular
at Porto Alegre, RS*

Larissa Ramage

ABSTRACT

The groundwaters are affected by the depositional environment in a sedimentary aquifer. The Tertiary and Quaternary sediments of the Coastal Plain (Cenozoic Granular Aquifer System) partially cover the crystalline Precambrian shield in the Porto Alegre area, Southern Brazil. These deposits are formed in a lagoon/barrier system of alluvial fans, fluvial, lacustrine and deltaics sediments. The Cenozoic Granular Aquifer System has been affected by marine transgressions during the period initiating at 400,000 years. In the present study, 39 groundwater samples from the Cenozoic granular aquifer had been analyzed and show a distinguished high ionic contents, mainly chloride (13 to 1680 mg/L), sulphate (4 to 500 mg/L), calcium (0.9 to 125.0 mg/L), magnesium (0.7 to 154.0 mg/L) and sodium (17 to 740 mg/L) and can be classified as Cl^- - Ca^{2+} - Na^+ water with high sulphate. Statistical analysis (factorial analysis and discriminate analysis) had been applied in the physico-chemical parameters, allowing to identify 4 different groups of samples, using the higher correlated parameters: chloride, potassium, calcium, magnesium, sulphate, sodium, hardness and electric conductivity. The dissolution of salts associated with the marine or mixohaline environment under slow hydrodynamic conditions and increased residence time are decisive factors for the salinization of groundwaters. Geochemical modelling show subsaturation in fluorite, halite and gypso, while calcite and dolomite tend to saturation. The results are supersaturated concerning fluorapatite, gibbsite, kaolinite and goethite.

Key words: Cenozoic Aquifer System Granular, hidrogenochemistry, groundwater, salinization, Porto Alegre.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo II

- Figura 1** Mapa de localização da área estudada 6
Figura 2 Mapa Geológico e distribuição dos poços 11

Capítulo IV

- Figura 1** Mapa Hidrogeológico de Porto Alegre 38
Figura 2 Perfil esquemático do Sistema Aquífero Granular Cenozóico 38
Figura 3 Gráficos binários das concentrações de cloreto 41
Figura 4 Cristais de gipsita 42
Figura 5 Gráficos binários das concentrações dos parâmetros analisados 44

Capítulo V

- Figura 1** Diagrama trilinear de Piper 51
Figura 2 Gráficos binários das relações CE 54
Figura 3 Gráfico binário das concentrações de cálcio 61
Figura 4 Gráfico binário das concentrações de cálcio+magnésio *versus* dureza 62
Figura 5 Gráfico binário da relação ferro *versus* manganês 64
Figura 6 Gráfico binário das concentrações cloreto 67
Figura 7 Gráficos binários das relações bicarbonato 70
Figura 8 Gráfico binário da relação sílica *versus* alumínio 75
Figura 9 Dendograma extraído do programa estatístico SPSS 11.5. 84

LISTA DE TABELAS

Capítulo II

Tabela 1	Compartimentação geomorfológica de Porto Alegre adotando a hierarquização realizada pelo Projeto RadamBrasil	7
-----------------	--	---

Capítulo IV

Tabela 1	Composição química das águas subterrâneas do SAGC	36
Tabela 2	Matriz de correlação dos dados hidroquímicos	37
Tabela 3	Sumário dos parâmetros usados no tratamento estatístico	39

Capítulo V

Tabela 1	Classificação das águas segundo a dureza em mg/L de CaCO ₃	55
Tabela 2	Índice de saturação mineral (SI) de fases minerais	79
Tabela 3	Resultado da correlação entre as variáveis	81
Tabela 4	Carga fatorial (F1 e F2) obtida em cada poço analisado	81
Tabela 5	Grupos formados a partir do dendograma	82

LISTA DE QUADROS

Capítulo III

Quadro 1	Métodos de determinação dos parâmetros químicos analisados	20
-----------------	--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CE	Condutividade Elétrica
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CORSAN	Companhia Rio-Grandense de Saneamento
DMAE	Departamento Municipal de Águas e Esgotos de Porto Alegre
GPS	Global Position System
IBGE	Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IG	Instituto de Geociências
NA	nível d'água
ND	não detectado
NTU	Unidade Nefelométrica
PDU	Projeto DMAE-UFRGS
SAGC	Sistema Aquífero Granular Cenozóico
SAFPc	Sistema Aquífero Fraturado Pré-cambriano
TURB	Turbidez
UFC	Unidades Formadoras de Colônia
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UTM	Universal Transversor de Mercator
VMP	Valor Máximo Permitido
$\mu\text{S/cm}$	microsiemes/cm

I. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais, 2

1.2. Objetivos, 3

1.1. Considerações Iniciais

As águas subterrâneas constituem uma porção do sistema circulatório da água da Terra. O seu aproveitamento data de tempos antigos e o seu estudo assume uma importância cada dia maior como instrumento para resolver os problemas de suprimento hídrico para a humanidade.

Do volume total de água existente na Terra, 97,2% corresponde à água presente nos oceanos, imprópria para a maioria dos usos. Outra parte encontra-se sob a forma de gelo nos pólos e vapor de água na atmosfera, restando 6% do total de água doce na fase líquida disponível para o homem. Do total da reserva de água existente, quase 80% consistem em águas subterrâneas, sendo que, parte não está disponível ou não é utilizável por encontrar-se a grandes profundidades. Assim, as águas subterrâneas constituem importante fonte de abastecimento de água em todo o mundo. Convém preponderar a superioridade da água subterrânea como fonte de abastecimento doméstico, industrial ou agrícola, neste sentido é de vital importância saber as características das águas subterrâneas.

O estudo dos parâmetros físicos-químicos das águas subterrâneas e do condicionamento geológico do Município de Porto Alegre permite caracterizar a interação entre a água e a rocha.

Este trabalho está organizado em 6 capítulos: O Capítulo I apresenta o estudo proposto em linhas gerais, a importância da água subterrânea e objetivos do trabalho. No Capítulo II está caracterizada a área estudada, fornecendo elementos sobre sua localização, aspectos fisiográficos e geológicos. O Capítulo III versa sobre a metodologia empregada nos estudos de campo e de laboratório. No Capítulo IV consta o artigo científico submetido e estruturado conforme as normas exigidas pela Revista Latino-Americana de Hidrogeologia (RLH). O Capítulo V expõe os resultados e interpretações, onde são discutidos individualmente os constituintes que caracterizam a

água subterrânea. O Capítulo VI apresenta as principais conclusões finais sobre o Sistema Aquífero Granular Cenozóico (SAGC) e a qualidade da água correspondente a este aquífero.

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste em caracterizar o Sistema Aquífero Granular Cenozóico da área do Município de Porto Alegre e integrar todos os dados químicos coletados e adquiridos sobre a água subterrânea associada. Os resultados permitem enfatizar o comportamento dos principais parâmetros físico-químicos e sua distribuição espacial, fornecendo elementos para identificação da origem do conteúdo iônico das águas.

Tais metas são alcançadas através do levantamento das informações geológicas de detalhe e dos dados hidrogeológicos, que constituem a base para compreensão dos processos geoquímicos atuantes no meio aquoso, verificando-se a interação e influência do ambiente deposicional na composição química das águas do aquífero. Os resultados são importantes para a avaliação do manancial subterrâneo de Porto Alegre e seu potencial em relação à qualidade das águas subterrâneas do SAGC.

II. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

- 2.1. Localização, acesso e dados municipais, 5
 - 2.2. Aspectos Fisiográficos, 7
 - 2.2.1. Geomorfologia e Vegetação, 7
 - 2.2.2. Clima, 8
 - 2.2.3. Solos, 9
 - 2.3. Geologia da área, 10
 - 2.3.1. Embasamento Cristalino Granítico-gnáissico Pré-Cambriano, 10
 - 2.3.2. Cobertura Sedimentar Cenozóica, 12
 - 2.4. Aspectos Hidrológicos, 14
 - 2.4.1. Águas superficiais, 14
 - 2.4.2. Águas subterrâneas, 15
-

2.1. Localização, acessos e dados municipais

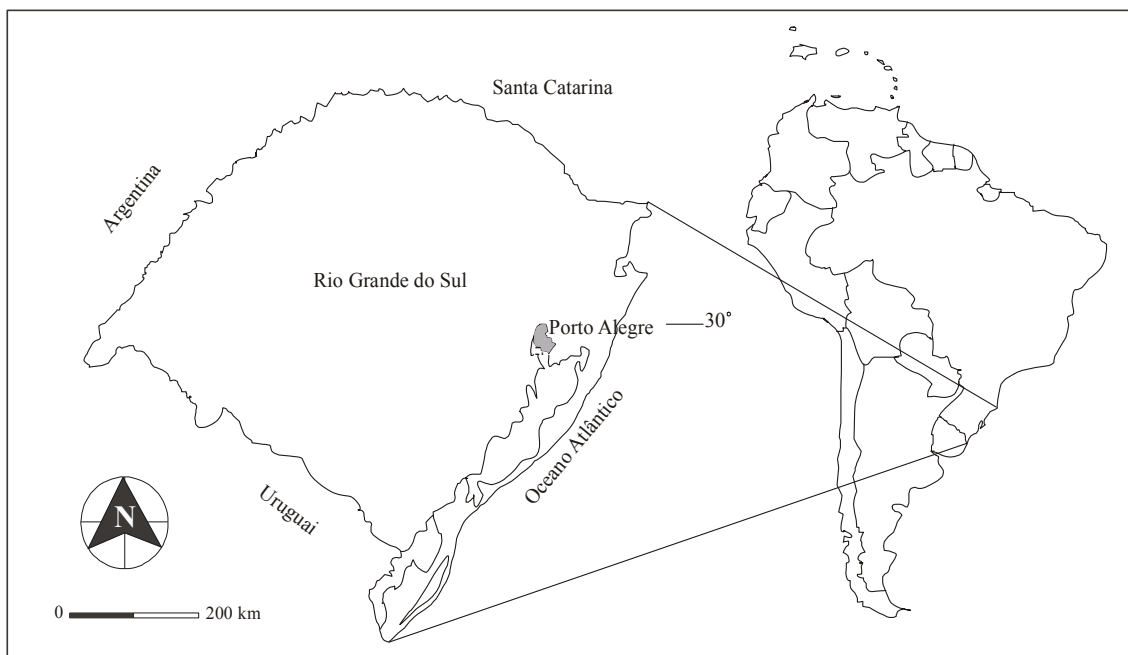
A cidade de Porto Alegre situa-se na região Leste do Estado do Rio Grande do Sul, sendo limitada pelos paralelos 29°55'56'' e 30°16'05'' de latitude Sul e pelos meridianos 51°01'08'' e 51°16'00'' de longitude Oeste (FIG. 1). Abrange as Folhas Porto Alegre (SH. 22-Y-B-III-2) e parte da Folha São Leopoldo (SH. 22-V-D-VI-4), em escala de 1:50.000, confeccionadas pela Diretoria de Serviço Geográfico do Ministério do Exército.

A capital gaúcha possui uma área total de 476,3 quilômetros quadrados, da qual 44,5 quilômetros quadrados constituem 16 ilhas do chamado Delta do Jacuí. Está circundada por 40 morros e limitada por uma orla fluvial de 72 quilômetros de extensão, distribuída entre o Delta do Jacuí e o Lago Guaíba.

O Município de Porto Alegre faz fronteira com os municípios de Triunfo, Nova Santa Rita, Canoas e Cachoeirinha, ao Norte; Viamão, ao Sul; Alvorada e Viamão, a Leste; e, a Oeste é limitado pelo Lago Guaíba.

As principais vias de acesso à capital são a BR-116 que faz ligação com a região Norte do Estado, a BR-290 que se dirige para a região central do Estado, a BR-101 que percorre o litoral Norte e a região Sul do Rio Grande do Sul e a RS-040 que se direciona através de Viamão para as praias de Cidreira e Pinhal.

FIGURA 1 – Mapa de localização da área estudada.



Porto Alegre é a capital do Estado do Rio Grande do Sul e possui população de pouco mais de 1.400.000 de habitantes (estimativa CENSO 2004), tendo maior densidade populacional nos bairros centrais e adjacências. A zona Sul da cidade mostra uma área menos urbanizada, com atividades agrícolas remanescentes e a zona Norte possui a maior parte do parque industrial. O abastecimento de água tratada abrange 99% da população, havendo seis pontos de captação no Lago Guaíba, um no reservatório da Lomba do Sabão e outro no Delta do Jacuí (Ilha da Pintada). Dois pontos de captação utilizam o potencial do manancial subterrâneo (Poço Pitinga e Poço Quirinas) e atendem às populações locais, representando 0,04% da água tratada e distribuída de Porto Alegre.

Os principais usos da água subterrânea na região estudada são residencial (30%), indústrias (10%), comércio (10%), clubes (9%), hotelaria (8%), postos de gasolina (7%), hospitais (7%), órgãos públicos (6%), escolas (5%), transportadoras (4%) e outros (4%). Na região Sul da área o abastecimento é realizado a partir de poços tubulares geralmente rasos perfurados no SAGC.

2.2. Aspectos Fisiográficos

2.2.1. Geomorfologia e Vegetação

O Município de Porto Alegre encontra-se situado na intersecção dos quatro domínios morfoestruturais do Estado: Província Costeira, Planalto Meridional, Depressão Periférica e Escudo Sul-Rio-Grandense.

O Projeto RADAMBRASIL (JUSTUS *et al.*, 1986) propõe três hierarquias geomorfológicas: Domínio Morfoestrutural; Regiões Geomorfológicas e Unidades Geomorfológicas. Foram identificados três Domínios Morfoestruturais na área estudada, que correspondem, de modo geral, às províncias geológicas. Assim, tem-se: **Domínio dos Depósitos Sedimentares** (refere-se às formas de acumulação recente), correlacionada com a Província Costeira; **Domínio das Bacias e Coberturas Sedimentares** (refere-se às bacias sedimentares), representada pela Depressão Periférica; **Domínio dos Embasamentos em Estilos Complexos** (refere-se aos grandes maciços de rochas cristalinas), correspondente ao Escudo Sul-Rio-Grandense. Cada domínio morfoestrutural é relacionado com a correspondente Região Morfológica e esta, por sua vez, à Unidade Geomorfológica (TAB. 1).

TABELA 1

Compartimentação geomorfológica de Porto Alegre utilizando a hierarquização realizada pelo Projeto RadamBrasil.

DOMÍNIO MORFOESTRUTURAL	REGIÕES GEOMORFOLÓGICAS	UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS
Depósitos Sedimentares	Planície Costeira Interna	Planície Lagunar e Aluvio-Coluvionar
Bacias e Coberturas Sedimentares	Depressão Central Gaúcha	Depressão do Rio Jacuí
Embasamento em Estilos Complexos	Planalto Sul-Rio-Grandense	Planaltos Residuais Canguçu-Caçapava

A Região Geomorfológica Planalto Sul-Rio-Grandense, ocorre na área central da cidade de Porto Alegre, sendo constituído por rochas ígneas e metamórficas, denominadas Terras Altas (MENEGAT *et al.*, 1998), com altitude de até 311 metros. As formas de relevo registradas nesta região variam de colinas, pontas e até cristas, representando formas residuais de relevo emolduradas nas rochas granitóides, muitas

vezes, coincidindo com zonas realçadas por falhas (Morros São Pedro e Santa Teresa). A vegetação é composta por Savana Gramíneo-Lenhosa e Floresta Estacional Semidecidual.

A Planície Costeira Interna ocorre ao redor do Lago Guaíba, desde da zona Norte à zona Sul da cidade, bem como nos bairros Cidade Baixa, Bom Fim, Santana, Partenon, Parque Farroupilha e Praia de Belas. É formada por depósitos lagunares e aluvio-coluvionares, de idade quaternária, recobertos por Floresta Estacional Decidual. Grande parte da cobertura florestal desta formação foi gradativamente erradicada, sendo substituída por culturas, contribuindo desta maneira para a formação de Vegetação Secundária de origem antrópica. A vegetação de “restinga” ocupa uma estreita faixa ao longo do Lago Guaíba, Sul de Porto Alegre, recobrendo depósitos de areias finas e médias, quartzosas, assim como areias e depósitos finos, siltico-argilosos, ricos em matéria orgânica.

A Depressão Central Gaúcha ocorre na divisa de Canoas e ilhas do Delta do Jacuí, Noroeste da área estudada, e corresponde à planície e terraços fluviais/lagunares, e terraços do Arroio Dilúvio, possuindo altitudes variáveis de 10 a 40 metros. A vegetação associada é do tipo Floresta Ombrófila Densa, representada pela Floresta das Terras Baixas, revestindo sedimentos de origem fluvial marinha e lacustre do Quaternário.

2.2.2. Clima

A cidade de Porto Alegre está situada na latitude de 30° Sul e a aproximadamente a 100 km de distância do oceano. Segundo a classificação de W. Köppen, o clima da cidade é classificado como subtropical úmido (Cfa), por registrar valores de temperatura média do mês mais quente superiores a 22°C e apresentar chuvas bem distribuídas ao longo de todo o ano. A temperatura média do ar é 19,4°C, sendo que a temperatura máxima absoluta anual do ar é 37,8°C registrada no mês de janeiro, e a temperatura mínima absoluta anual é 1,4°C no mês de julho.

A precipitação pluviométrica é maior no período mais frio do ano, nos meses de junho a setembro, registrando uma precipitação média anual de 1.324 mm de chuva. A umidade relativa média do ar é de 76%, mantendo-se elevada ao longo de todo o ano, com picos de máxima nos meses mais frios.

2.2.3. Solos

A classificação dos solos da região de Porto Alegre é baseada no Projeto RADAMBRASIL (1986) e no Atlas Ambiental de Porto Alegre (1998), este último tendo adotado o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (1987).

No Planalto Sul-Rio-Grandense, que corresponde às áreas mais elevadas da cidade, é constituído por rochas ígneas e metamórficas. Os solos originados são chamados não-hidromórficos, destacando-se os podzólicos e litólicos. Os litossolos ocorrem nas partes de maior declividade e são solos pouco desenvolvidos e rasos, de espessura não superior a 0,5 metros com um horizonte A diretamente sobre a rocha ou sobre um horizonte C, geralmente com muito material de rocha em decomposição. Os solos podzólicos vermelho-amarelos, ocorrem normalmente nos depósitos de leques aluviais, com textura média/argilosa, normalmente cascalhentos. Apresentam perfis profundos e permeáveis, com uma seqüência de horizontes A, B e C bem diferenciados. O horizonte B apresenta uma considerável concentração de argila e no horizonte C (MOURA; RUEDA, 1998, p.43).

Na Depressão Central Gaúcha e na Planície Costeira (Terras Baixas), formadas por terraços lacustres e fluviais, o relevo é homogêneo, em forma de coxilha, com presença de morros testemunhos. Estes solos, condicionados pela presença de água, originam solos hidromórficos, destacando-se os planossolos e solos tipo glei. Os solos tipo glei, moderadamente profundos, mal drenados e com baixa permeabilidade, possuem os horizontes A, B e C sobre depósitos sedimentares de terraços lacustres. Os planossolos são solos típicos de locais planos e baixos com excesso de água e apresentam elevada concentração de argila, ocorrendo próximos ao Lago Guaíba sobre cordões arenosos.

2.3. Geologia da área

O Município de Porto Alegre está inserido na Folha Porto Alegre (SH.22-Y-B) e tem sua geologia compartimentada em duas unidades geológicas distintas: O Embasamento Cristalino Granítico-gnáissico Pré-Cambriano (ECGP), representado por granitos, gnaisses graníticos e escassos diques riolíticos e basálticos; e a Cobertura Sedimentar Cenozóica (CSC), constituída por depósitos terciários e quaternários (FIG. 2).

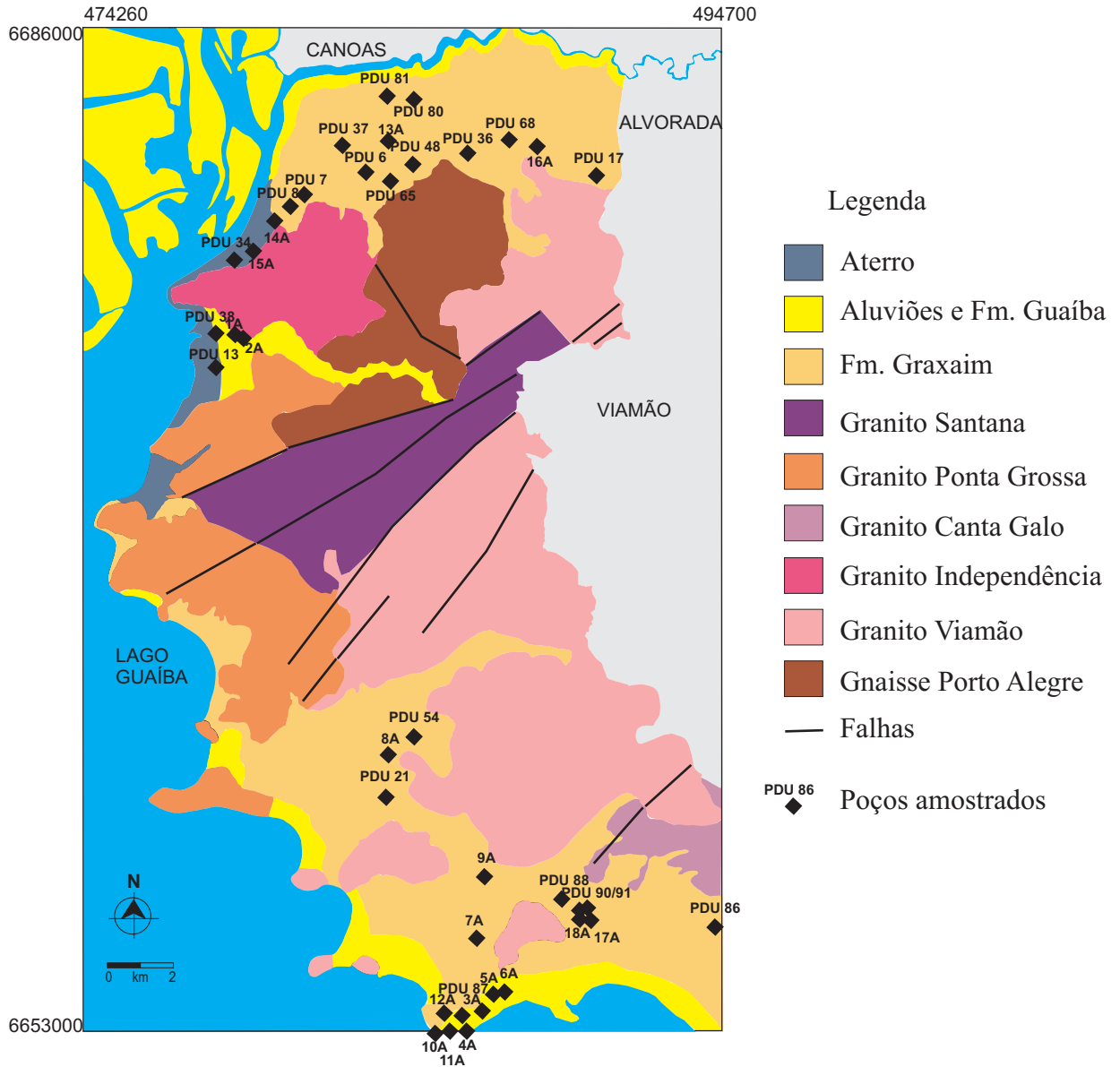
2.3.1. Embasamento Cristalino Granítico-gnáissico Pré-Cambriano

A área correspondente ao ECGP aparece recortada por grandes falhas de direção NE, com destaque para aquelas que determinam o alinhamento dos Morros Santana, Glória e Teresópolis, mostrando-se relevantes, ainda, na direção NW, como no Morro Santo Antônio e no Morro Santa Teresa. Muitas fraturas de direção NW alojam diques de riolito, enquanto aquelas de direção NE tem associado, principalmente, diques de diabásio.

O ECGP faz parte do Batólito de Pelotas, que representa um complexo batolítico com extensão da ordem de 2.500 km², de natureza multi-intrusiva, caráter polifásico e origem relacionada ao Ciclo Orogenético Brasileiro (Fragoso Cesar *et al.* 1986). O embasamento cristalino de Porto Alegre foi dividido em seis unidades litológicas distintas (Philipp *et al.* 1998): Gnaise Porto Alegre, Granito Viamão, Granito Independência, Granito Canta Galo, Granito Ponta Grossa e Granito Santana. Associado a essas unidades ocorre diques de riolitos, dacitos e diabásio subordinados.

Todas as unidades graníticas são constituídas por rochas de granulometria média a grossa, mostrando texturas equigranular a porfirítica e composições variáveis de sienogranito a monzogranito, dependendo da relação plagioclásio/feldspato potássico. O Granito Santana pode alcançar composicionais mais alcalinas até feldspato alcalino granito.

FIGURA 2 - Mapa geológico e distribuição dos poços tubulares (modificado de Schneider *et. al.*,1974; Roisenberg, 2001).



A mineralogia dos granitos compreende, quartzo, feldspato potássico (microclínio na maioria dos casos) e plagioclásio, enquanto biotita e óxidos metálicos (principalmente magnetita) são menos freqüentes. Apatita, titanita, alanita, zircão são os acessórios mais comuns (turmalina é registrada no Granito Independência). Cloritas, epidotos, carbonatos, óxidos metálicos e micas brancas são os principais minerais de alteração em todas as unidades graníticas. Fluorita é encontrada como cristais intersticiais nos granitos Canta Galo, Ponta Grossa e Santana, mas também ocorre preenchendo fraturas milimétricas a centimétricas no Granito Santana ou associada com calcita, molibdenita e pirita (Granito Ponta Grossa).

2.3.2. Cobertura Sedimentar Cenozóica

Depósitos sedimentares Cenozóicos ocorrem na porção Norte, Sul e contorno do Lago Guaíba, no Município de Porto Alegre, representados pelas Formações Graxaim e Guaíba (Schneider *et al.*, 1974).

O termo Formação Graxaim (Delaney, 1965) compreende sedimentos arcoseanos depositados em ambiente fluviais e lacustrinos que afloram na Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Os depósitos fluviais apresentam-se sob forma de leques aluviais, em ambiente semi-árido, sendo constituídos por areias quartzosas grossas a médias, areias feldspáticas grossas, cascalho e silte; e depósitos de planície aluvial, constituídos por areias grossas a médias com estratificação acanalada e níveis menos significativos de silte e argila com estratificação plano-paralela. Os depósitos lacustrinos constituem lentes de argilas verdes maciças, com até 3 metros de espessura, que se intercalam com depósitos fluviais (Ayala, 1980). Ocorrem ao Sul do município, nos bairros Lami, Serraria, Ponta Grossa e Belém Novo. Ao Norte da área estudada é possível encontrar estes depósitos nos bairros São Geraldo, Navegantes e São João.

A Formação Guaíba representa a deposição costeira resultante das oscilações eustáticas durante o Pleistoceno (JOST, 1971). Assenta discordantemente

sobre a Formação Graxaim. São acumulações fluviais constituídas por um conjunto de depósitos arenosos grossos a finos e conglomerados ortoquartzíticos intercalados com lâminas areno-argilosas de tonalidade creme, castanho e cinza-claro. Tais acumulações se restringem às calhas aluvionares. Esta formação está localizada próxima a Ponta da Serraria e ao longo do Arroio Dilúvio e possui uma espessura média de 20 metros.

Os depósitos holocênicos são formados em ambientes fluviais, praias, paludais e deltáicos, consistindo em areias e cascalhos, ao longo das várzeas da rede de drenagem, assim como argilas e siltes de planícies de inundação. Encontram-se localizados nas margens Sul e Sudoeste do Lago Guaíba. Os depósitos fluviais são representados por sedimentos areno-argilosos aluvionares, e cascalhos de calhas de rios. Os depósitos praias contêm, essencialmente, areias e siltes quartzosos formados em feixes de restingas. Os depósitos paludais ocorrem sob a forma de turfeiras e argilas siltosas e arenosas, ricas em matéria orgânica. Depósitos deltáicos são presentes no delta do rio Jacuí a Norte de Porto Alegre e possuem espessura variável.

Os depósitos da CSC de Porto Alegre são influenciados pelas sucessivas transgressões e regressões marinhas, relacionadas aos processos glacio-eustáticos iniciados no Quaternário. Estas transgressões ao alcançar a CSC provavelmente deixam uma carga de sais nos espaços intergranulares dos sedimentos. Tais eventos transgressivos e regressivos moldaram o domínio morfoestrutural “Depósitos Sedimentares” correspondentes à Província Costeira.

Os sedimentos da Província Costeira são formados durante os eventos de rebaixamento do nível do mar, quando os sedimentos oriundos das drenagens fluviais originárias das terras altas passaram a se depositar no bordo da plataforma ou diretamente no talude continental, possibilitando o desenvolvimento de uma extensa planície costeira (VILLWOCK, 1972), sobre a qual desenvolveu-se um sistema de rios, lagunas, deltas e estuários. No período de elevação do nível do mar, as águas recobriram os sedimentos presentes na planície costeira, inibindo o aporte sedimentar (DILLENBURG, 1987). Estes eventos de flutuações do nível de mar iniciados há 400.000 anos geraram quatro sistemas deposicionais do tipo Laguna/Barreira I, II, III e IV (VILLWOCK *et al.* 1986; VILLWOCK; TOMAZELLI, 1995).

Leques aluviais são formados próximos às encostas das terras altas, a partir de processos gravitacionais e aluviais, depositando sedimentos que gradam de elúvios e colúvios até depósitos aluviais, nas regiões mais distais (TOMAZELLI *et al.*, 1987; TOMAZELLI *et al.*, 2000). Estes depósitos continentais começaram a se formar provavelmente durante o Terciário e os processos são ainda ativos no Cenozóico, fazendo-se presente nos dias de hoje, com intensidade controlada pelas variações climáticas que ocorreram no Quaternário.

2.4. Aspectos hidrológicos

2.4.1. Águas superficiais

Três grandes regiões hidrográficas são reconhecidas no Rio Grande do Sul, pelas direções principais de escoamentos dos rios: Região Hidrográfica da Bacia do Rio Uruguai, Região Hidrográfica das Bacias Litorâneas e Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba. Porto Alegre encontra-se inserida na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba, cujos rios e arroios desembocam diretamente no Lago Guaíba.

O Lago Guaíba possui 470 km² de superfície, tem uma profundidade média de 2 metros e encontra-se 4 metros acima do nível do mar. Possui uma forma de cotovelo e cerca de 50 quilômetros de comprimento, estendendo-se do Delta do Jacuí até a Ponta de Itapuã, ao Sul. O regime de escoamento das águas do Guaíba é bidimensional, tanto no sentido longitudinal quanto transversal.

No Município de Porto Alegre são definidas 27 sub-bacias hidrográficas, identificadas por critérios topográficos e de planejamento operacional (MENEGAT; KIRCHHEIM, 1998, p.36), algumas das quais desprovidas de arroios. As principais sub-bacias são: Sub-bacia do Arroio Dilúvio, Sub-bacia do Arroio do Salso e Sub-bacia do Lami.

A direção do fluxo das águas escoadas pelas sub-bacias é radial e centrífuga, estando as nascentes dos principais arroios junto ao limite de Porto Alegre com Viamão, próximo a Lomba do Sabão. A região das nascentes possui forma de anel, a partir do qual os canais espraiam-se em três padrões definidos (MENEGAT;

KIRCHHEIM, 1998, p.37) A Norte de Porto Alegre, os arroios, na maior parte canalizados, drenam as águas para Norte, desembocando no Rio Gravataí. Na região central, as cabeceiras dos arroios, a Leste, escoam as águas para Oeste e desembocam diretamente no Lago Guaíba. Na região Sul, os canais drenam suas águas do Norte para o Sul até o Guaíba.

Porto Alegre é drenada por 18 arroios principais, com diversos afluentes. O maior deles é o Arroio Dilúvio com 17.600 metros de extensão, que atravessa a cidade de Leste para Oeste, desaguando no Lago Guaíba.

2.4.2. Águas subterrâneas

As águas subterrâneas de Porto Alegre foram reunidas segundo o tipo de rocha e estruturas em dois sistemas aquíferos: Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano (SAFPc) e Sistema Aquífero Granular Sedimentar (SAGC). Os sistemas aquíferos caracterizam-se por um conjunto de elementos físicos e geométricos, que podem ser modificados através de ações externas como bombeamento, recarga, drenagem, etc. A definição dos sistemas acima citados foi efetuada com base nos critérios de estrutura, permeabilidade, condições de superfície passíveis de interferir no comportamento das águas subterrâneas, tipos de aquífero (livre, confinado ou semiconfinado).

O SAFpC é constituído por rochas graníticas e metamórficas, recobertos em grande parte, por capas de alteração intempérica (elúvios) e por depósitos de leques aluviais (colúvios). O armazenamento e a circulação de água é devido à porosidade secundária condicionada pelas falhas e fraturas abertas. As vazões variam de 0,1 a 9,0 m³/h, sendo que nos poços que interceptam falhas a vazão pode alcançar até 30 m³/h. A composição da água recai predominantemente nos tipos bicarbonatada cálcico-sódicas e bicarbonatada sódicas (ROISENBERG, 2001; ROISENBERG *et al.*, 2003).

O SAGC é caracterizado por depósitos sedimentares de material não-consolidado, argilo-arenosos a arenosos, correspondentes à Cobertura Sedimentar Cenozóica, distribuída do Norte a Oeste e estendendo-se até o Sul do município. O

rendimento destes aquíferos pode atingir vazões de até 30 m³/h. O armazenamento e a circulação da água dependem, basicamente, da quantidade de poros ou interstícios do aquífero (MACHADO, 1993, 1997). As características físicas dos materiais constitutivos do aquífero (porosidade, granulometria, etc.) condicionam a velocidade de fluxo das águas, em alguns níveis tendo baixa velocidade ou mesmo estagnantes. Caracteriza-se por ser um aquífero livre a semiconfinado, tendo recarga feita por infiltração das águas de chuva e de águas do SAFPC, quando em contato com rochas fraturadas do embasamento. A composição das águas é predominantemente de águas cloretadas cálcico-sódicas e, secundariamente, cloretadas sódicas (ROISENBERG, 2001).

III. METODOLOGIA

- 3.1. Trabalhos preliminares, 18
 - 3.2. Análises hidroquímicas, 19
 - 3.2.1. Análises realizadas por titulometria, 21
 - 3.2.2. Análises realizadas por potenciometria, 22
 - 3.2.3. Análises realizadas por gravimetria, 22
 - 3.2.4. Análises realizadas por contagem microbiana, 23
 - 3.2.5. Análises realizadas por espectrofotometria, 23
 - 3.2.6. Análises realizadas por espectrometria de absorção atômica, 24
 - 3.2.7. Análise estatística, 25
 - 3.3. Análises mineralógica, 26
-

3.1. Trabalhos preliminares

A primeira parte do presente estudo compreende em adquirir e agrupar o maior número de dados de poços para o desenvolvimento do estudo hidrogeoquímico da água subterrânea do Município de Porto Alegre.

Inicialmente, foi ampliado o cadastro de poços fornecido pelo Departamento Municipal de Águas e Esgotos de Porto Alegre/DMAE, tendo sido coligidos dados adicionais, a partir dos registros em trabalhos de teses e dissertações, bem como em empresas de perfuração de poços (Hidrogeo, Coperbrás, a extinta Cia. T. Jáner, Hidrotécnica e outras menores). Os dados coletados referem-se ao perfil dos poços, profundidade, vazão, níveis estático e dinâmico, resultados de análises químicas, físicas e bacteriológicas.

A seguir foi realizado o reconhecimento geológico da área do Município, uniformizando-se a nomenclatura das unidades registradas nos perfis dos poços. Os resultados desse levantamento foram integrados, constituindo a base desse estudo.

De um total de 350 poços cadastrados, passou-se a um extensivo programa de amostragem de água dividido em dois períodos (junho de 1999 a julho de 2000), durante os quais selecionaram-se 90 poços para análise nos laboratórios do DMAE, de modo a abranger toda a extensão do Município de Porto Alegre, mantendo-se a representatividade na geologia da região. O critério de seleção atendeu, ainda, à completude dos dados construtivos, além de parâmetros físicos e químicos. Desse total (90), 30 poços tiveram a amostragem repetida em duas estações, uma no inverno e outra no verão, a fim de se verificar há existência de uma variação das características hidroquímicas, totalizando no total 120 análises de água subterrânea.

A análise do perfil de perfuração permitiu a identificação de 22 poços (PDU), dentre os 90 amostrados, que se situavam na área abrangida pelo SAGC (ANEXO A).

Na segunda etapa de amostragem (novembro de 2000 a fevereiro de 2001) foram coletadas 18 amostras adicionais de água em poços cujo perfil de perfuração localizava-se exclusivamente nos depósitos sedimentares cenozóicos (ANEXO B), tendo como finalidade caracterizar o comportamento hidrogeoquímico deste sistema aquífero, sem interferência do SAFPC. Neste caso, foram analisados somente os parâmetros físico-químicos considerados característicos do SAGC nos Laboratórios de Geoquímica e de Hidrogeoquímica do Instituto de Geociências da UFRGS.

A distribuição destes últimos poços é irregular, com maior concentração nas áreas mais populosas e urbanizadas da cidade, já que naquelas com menor densidade populacional (Lami, Ponta Grossa e Serraria) os poços são rasos e muitos do tipo cacimba.

3.2. Análises hidroquímicas

A amostragem de água, efetuada após 30 minutos de bombeamento, foi realizada em frascos de vidro ou de plástico, coletadas e preservadas de acordo com os critérios estabelecidos no Guia de Coleta e Preservação de Amostras de Água (CETESB, 1998). Os procedimentos analíticos seguiram as técnicas propostas pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998) (QUADRO 1). Amostras em branco e em duplicata foram usadas para medir a acuracidade dos métodos analíticos empregados.

As medidas de temperatura do ar, água, pH, Eh, e condutividade foram realizadas *in situ*. Os parâmetros odor, cor e turbidez foram determinados no laboratório de análises químicas do DMAE. O odor é baseado em determinações subjetivas, a partir da diluição da amostra com água destilada até que nenhum odor seja perceptível. A medida de cor é feita através da comparação com uma solução padrão de platina-cobalto (ppm de Pt-Co). A turbidez é determinada com turbidímetro, pelo método nefelométrico e os valores são expressos em UNT (Unidade Nefelométrica de Turbidez). Este método baseia-se na comparação da intensidade de luz que passa através da amostra sob

condições definidas com a intensidade de luz que passa através do padrão de referência sob mesmas condições.

QUADRO 1

Métodos de determinação dos parâmetros químicos analisados. CE – condutividade elétrica; CBH – contagem de bactérias heterotróficas; NMP – número mais provável; MUG - Metil-Umbeliferil-Galactosídeo; EDTA – ácido etileno diamino tetraacético. Unidades utilizadas: cátions e ânions – mg/L; alcalinidade – mg/L de CaCO₃; CE - µS/cm; dureza – mg/L de Ca e Mg como CaCO₃; turbidez – UNT, coliformes totais, fecais e CBH – contagem de UFC (Unidades Formadoras de Colônia) em 100 ml de amostra.

PARÂMETRO	LIMITE DE DETECÇÃO	MÉTODO ANALÍTICO	EQUIPAMENTO
pH	0-14	Potenciometria	pHmetro Quimis Q-400
CE	0,01	Condutivímetro	Quimis 405P
Turbidez	0,01	Nefelométrico	Turbidímetro HACH 2100P
Cor	5	Pt-Co com padrões permanentes	Colorímetro Hellige Aqua-Tester
Alcalinidade	0,5	Titulação potenciométrica	Orion 960/940
Dureza	1	Titulometria com EDTA	Titulométrico
Cloreto	0,5	Método do nitrato de mercúrio	Titulométrico
Sulfato	10	Gravimetria	
Fluoreto	0,2	Potenciometria	HACH One Laboratory pH/Isemeter
Sólidos Totais, Suspensos e Dissolvidos	10	Gravimetria	
Coliformes totais	2 NMP/100mL	Técnica do substrato enzimático	Seladora Colilert
Coliformes fecais	2 NMP/100mL	Técnica do substrato cromógeno MUG em cartelas	Seladora Colilert
CBH	1	Técnica de <i>Pour-Plate</i>	
Fosfato total	0,01	Método do ácido ascórbico e digestão com persulfato de potássio	Espectrofotômetro Varian DMS100S e CELM E-225D
Nitrato	0,01N / 0,05NO ₃	Método do ácido fenol dissulfônico e hidróxido de amônio	Espectrofotômetro Varian DMS100S e CELM E-225D
Nitrito	0,001N / 0,003 NO ₂	Método da sulfanilamida e da N (1-Naftil) etilenodiamina	Espectrofotômetro Varian DMS100S e CELM E-225D
Nitrogênio Kjeldahl	0,01N	Método da determinação do N na forma de amônia por nesslerização e titulação	Espectrofotômetro Varian DMS100S e CELM E-225D
Sulfeto Total	0,1	Método do azul de metileno	Espectrofotômetro Varian DMS100S e CELM E-225D
Arsênio	0,03	Método dietilditiocarbamato de prata	Espectrofotômetro Varian DMS100S e CELM E-225D
Mercúrio	0,00010	Técnica de vapor a frio	VARIAN Absorção Atômica 10/1475 – GEMINI

PARÂMETRO		LIMITE DE DETECÇÃO	MÉTODO ANALÍTICO	EQUIPAMENTO
Outros Metais	Alumínio	0,1	Espectrofotometria de emissão e absorção atômica com digestão ácida	VARIAN Absorção Atômica 10/1475 – GEMINI
	Bário	0,01		
	Berílio	0,001		
	Cádmio	0,001		
	Cálcio	0,001		
	Chumbo	0,01		
	Cobalto	0,004		
	Cobre	0,004		
	Cromo total	0,005		
	Estanho	0,1		
	Estrôncio	0,001		
	Ferro total	0,09		
	Lítio	0,002		
	Magnésio	-		
	Manganês total	0,003		
	Molibdênio	0,02		
	Níquel	0,007		
	Potássio	-		
	Prata	0,003		
	Sódio	-		
Vanádio	0,03			
Zinco	0,001			

A seguir serão descritos resumidamente os métodos analíticos utilizados em laboratório.

3.2.1. Análises realizadas por titulometria

O método consiste em determinar a quantidade de uma substância, mediante a adição de um reativo-padrão que reage em proporção definida e conhecida. Sabendo-se esta proporção e tendo-se determinado a quantidade, pode-se calcular a quantidade da substância presente. O ponto final da reação de titulação é visualizado por um indicador, como fenolftaleína ou laranja de metilo, ou eletroquimicamente com um pHmetro.

3.2.2. Análises realizadas por potenciometria

O método potenciométrico é baseado no princípio da geração de potenciais elétricos em soluções que contém íons ou em células eletrolíticas com um ou mais eletrodos metálicos. A diferença de potencial entre os eletrodos é utilizada para determinar a concentração da substância a ser determinada. Ao calcular os resultados para o pH, a concentração está relacionada com o potencial através da equação de Nernst, expresso em °C.

Eletrodos especiais de íon-seletivo são utilizados para determinação direta de constituintes em amostra. Trata-se de equipamento simples, constituído de eletrodo de referência, acoplado a eletrodo indicador e dispositivo para leitura do potencial. Este método foi utilizado para determinar a quantidade de fluoreto na amostra.

3.2.3. Análises realizadas por gravimetria

Resíduos totais (RT), filtráveis (RF) e voláteis (RV) foram obtidos através de método gravimétrico. Consiste na adição de reagentes especiais à amostra de água, que precipitarão os componentes dissolvidos. A solução é evaporada determinando-se a massa de sólidos remanescentes em determinadas temperaturas estabelecidas.

Para análise de resíduos filtráveis, a amostra de água passa por uma membrana de fibra de vidro, sendo evaporada e posteriormente pesada.

Na determinação dos resíduos voláteis, os resíduos RT e RF são aquecidos até 550 °C, secos e pesados, sendo a diferença obtida correspondente aos resíduos voláteis.

3.2.4. Análises realizadas por contagem microbiana

Este método é capaz de determinar o número total de bactérias e fungos presentes nas amostras. Primeiramente, é necessário transferir assepticamente um volume pequeno da amostra em placas de Petri com posterior adição de cultura, seguida de incubação. O método consiste na contagem da população de microrganismos que apresentam crescimento visível, em incubação de 24 e 48 horas em estufa microbiológica mantida a 35-37°C. Decorridas as primeiras 24 horas de incubação observa-se os tubos. Aqueles que continuarem incolores (cor original) devem ser reincubados por mais 24 horas. Caso tenha ocorrido mudança da coloração inicial para uma tonalidade verde-azulada, a amostra apresenta registro positivo para coliformes totais. Neste caso, a amostra deve ser observada sob luz ultravioleta (UV) com comprimento de onda de 365 nm. Se a amostra fluorescer indica positividade para coliformes fecais. Quando há presença de crescimento bacteriano no ensaio de contagem microbiológica é realizada pesquisa de patógenos. Este método permite a detecção da presença de células viáveis de microrganismos *Salmonella sp.*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas Aeruginosas* e *Staphylococcus Aureus*.

A determinação de Contagem de Bactérias Heterotróficas (CBH) foi efetuada através do Método de Contagem em Placas, obtida por semeadura de 1 mil de amostra ou de diluições, de modo a permitir a contagem estabelecida no padrão bacteriológico, por incorporação em ágar padrão (*Plate Count Agar*) com incubação a 35°C por 48 horas.

3.2.5. Análises realizadas por espectrofotometria

Este método utiliza aparelhos chamados fotômetros ou colorímetros digitais. O princípio de funcionamento consiste em adicionar reagentes às amostras a serem analisadas, em que os componentes presentes reagem com substâncias químicas, formando complexos que desenvolvem cor. A intensidade da cor depende da

concentração da substância e é determinada a partir da absorção de luz na solução, empregando-se um fotômetro.

A medida da absorção deve ser feita com preparação de um branco, que geralmente é a amostra sem reagentes, para determinar as contribuições dos solventes e de materiais indesejáveis da própria amostra. O valor do branco nunca deverá ser superior a 10 % do valor observado numa amostra.

3.2.6. Análises realizadas por espectrometria de absorção atômica

A espectrometria de absorção atômica é das ferramentas analíticas mais utilizadas para análise de metais. No presente estudo serviu para determinação dos teores de Al, Ba, Be, Cd, Ca, Pb, Co, Cu, Cr total, Sn, Sr, Fe total, Li, Mg, Mn total, Mo, Ni, K, Ag, Na V e Zn. A metodologia empregada segue os mesmos fundamentos e princípios da espectrofotometria, considerando-se que existe relação entre o grau de absorção e a concentração do elemento na amostra, o que é diferenciado pelo equipamento.

As radiações de ressonância são produzidas em lâmpadas de cátodo oco (fonte de emissão) que são específicas para elementos individuais ou para grupos de elementos. O feixe energético paralelo emitido atravessa a amostra solubilizada e nebulizada na chama de um queimador alimentado por gases carburantes e comburentes. O queimador, pela ação da temperatura, converte em átomos neutros e livres os elementos presentes na amostra sob forma molecular, iônica, etc. A radiação de ressonância parcialmente absorvida é isolada por um monocromador (prisma) que elimina eventuais radiações parasitas. A radiação, ao chegar no sistema de leitura, é detectada por um tubo fotomultiplicador que produz sinal elétrico proporcional à intensidade luminosa recebida, que é amplificado e medido por um galvanômetro. Para leitura, um computador eletrônico faz automaticamente a correção da lei logarítmica que correlaciona a concentração com as intensidades inicial e final.

3.2.7. Análise estatística

Devido ao grande número de dados hidroquímicos obtidos, optou-se por tratar estatisticamente os resultados, através de análises estatísticas multivariantes. Estas permitem considerar as variações de diversos parâmetros simultaneamente e fornecem informações na razão direta do número de variáveis utilizadas, considerando a variabilidade nas diferentes propriedades medidas e a relação entre estas variáveis (WREGE; MOBUS, 1992).

A análise de agrupamento (*cluster*) é uma técnica multivariante empregada para analisar similaridade entre indivíduos (amostras) caracterizados por variáveis. Neste método são definidos grupos de indivíduos com determinado grau de similaridade, sendo considerado simultaneamente todas as variáveis de cada indivíduo (DAVIS, 1973).

Utilizou-se o tratamento estatístico do *software* SPSS 11.5, onde cada parâmetro físico-químico é reduzido a fatores, pelo Método de Ward. Obtém-se uma matriz de componentes, em que são selecionados parâmetros ou variáveis que contém maior correlação para o sistema aquífero estudado. A definição do número de variáveis a serem extraídas utiliza o critério de *eigenvalues* e o modelo *VARIMAX* de rotação ortogonal, gerando-se a matriz de componentes rotacionados. A matriz de correlação é constituída por coeficientes de associação (similaridade) a partir das variáveis com uso da normalização Kaizer. O índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), que mede a adequação da amostra tem como limite mínimo de aceitabilidade o valor de 0,50. Coeficientes com maior similaridade ou semelhança são encontrados e agrupados hierarquicamente em ordem de decréscimo de similaridade.

As medidas de similaridade utilizadas são o coeficiente de correlação linear do produto momento (Pearson), que detecta a similaridade entre as variáveis (Modo R) e o coeficiente de distância, usado para verificar a similaridade entre indivíduos (Modo Q).

A forma usual para representação gráfica mostrando o relacionamento das amostras é o dendograma (ou diagrama ramificado), que projeta, num espaço

bidimensional, o grupamento hierárquico. Deve ser lido da esquerda para a direita, onde as linhas verticais indicam os conglomerados, e as linhas horizontais a distância euclidiana entre os mesmos.

3.3. Análise mineralógica

Foi realizada caracterização granulométrica e mineralógica de detalhe do perfil do poço 1A, perfurado em sedimentos Cenozóicos no Centro Administrativo Fernando Ferrari (CAFF) de Porto Alegre, sendo a amostra obtida dos arquivos de sondagem da Companhia Rio-Grandense de Saneamento/CORSAN. Em cada horizonte descrito foi separado um quartil de amostra, que passou pelos seguintes procedimentos: secagem; desagregação; pesagem; peneiração; determinação do percentual de finos e grossos e análise mineralógica de cada fração (ANEXO C).

A composição mineralógica de cada fração foi determinada com uso de técnicas específicas:

- Lupa binocular - para componentes detríticos de diâmetro igual ou superior a areia. Nestes, além da composição, foram registradas as propriedades morfoscópicas (esfericidade e arredondamento dos grãos).
- Difração de Raios-X - para identificação das frações silte e argila, com ênfase na composição dos argilo-minerais presentes no horizonte entre 6 a 12 m de profundidade.
- Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) – para análise e observação de grãos não identificados pelos métodos anteriores e do horizonte pelítico (6 a 12 metros).

IV. ARTIGO CIENTÍFICO

*Caracterização hidrogeoquímica do
Sistema Aquífero Granular Cenozóico
de Porto Alegre, RS*

Submetido para a Revista Latino-Americana de Hidrogeologia (RLH)

*Caracterização hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Granular Cenozóico
de Porto Alegre, RS*

Larissa Ramage¹

Ari Roisenberg¹

Antônio Pedro Viero¹

¹ – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências.

RESUMO

A geoquímica e a qualidade da água subterrânea são significativamente afetadas pelo ambiente deposicional em aquíferos sedimentares. Os sedimentos terciários e quaternários da Planície Costeira do Rio Grande do Sul que ocorrem em Porto Alegre foram depositados em Sistemas de Laguna/Barreira que geraram depósitos de leques aluviais, fluviais, lacustres e deltáicos. O Sistema Aquífero Granular Cenozóico na área estudada sofreu influência de transgressões marinhas que se iniciaram há 400 mil anos. No presente estudo foram analisadas 39 amostras de água subterrânea na região de Porto Alegre, que se destacam por possuir águas com alto conteúdo de íons, em particular: cloreto (13 a 1650 mg/L), sulfato (4 a 400 mg/L), cálcio (0,9 a 125 mg/L), magnésio (0,7 a 154 mg/L) e sódio (17 a 740 mg/L), permitindo classificá-las como cloretada-cálcico-sódicas com elevados teores de sulfato. Os resultados físico-químicos foram tratados estatisticamente (análise fatorial e análise discriminante), o que permitiu identificar 4 grupos de águas, a partir dos parâmetros de maior correlação, que compreendem cloreto, potássio, cálcio, magnésio, sulfato, sódio, dureza e condutividade elétrica. A dissolução de sais de ambiente marinho ou

mixohalino associada com condições hidrodinâmicas de fluxos de baixa velocidade e elevado tempo de residência, são fatores decisivos para salinização das águas deste aquífero. O modelamento geoquímico indicou subsaturação em fluorita, halita e gipsita, enquanto calcita e dolomita tendem a saturação. Por outro lado, os cálculos indicam supersaturação em fluorapatita, gipsita, caolinita, zeolita e goetita.

Palavras-chave: hidrogeoquímica, água subterrânea, salinização, aquífero sedimentar, Porto Alegre.

ABSTRACT

The geochemistry and quality of the groundwater are affected by the depositional environment in a sedimentary aquifer. The Tertiary and Quaternary sediments of the Coastal Plain (Cenozoic Granular Aquifer System) partially cover the crystalline Precambrian shield in the Porto Alegre area, Southern Brazil. These deposits are formed in a lagoon/barrier system of alluvial fans, fluvial, lacustrine and deltaic sediments. The Cenozoic Granular Aquifer System has been affected by marine transgressions during the period initiating at 400,000 years. In the present study, 39 groundwater samples from the Cenozoic granular aquifer had been analyzed and show a distinguished high ionic contents, mainly chloride (13 to 1650 mg/L), sulphate (4 to 400 mg/L), calcium (0.9 to 125.0 mg/L), magnesium (0.7 to 154.0 mg/L) and sodium (17 to 740 mg/L) and can be classified as Cl^- - Ca^{2+} - Na^+ water with high sulphate. Statistical analysis (factorial analysis and discriminate analysis) had been applied in the physico-chemical parameters, allowing to identify 4 different groups of samples, using the higher correlated parameters: chloride, potassium, calcium, magnesium, sulphate, sodium, hardness and electric conductivity. The dissolution of salts associated with the

marine or mixohaline environment under slow hydrodynamic conditions and increased residence time are decisive factors for the salinization of groundwaters. Geochemical modelling show subsaturation in fluorite, halite and gypsite, while calcite and dolomite tend to saturation. The results are supersaturated concerning fluorapatite, gibbsite, kaolinite, zeolites and goethite.

Key words: hidrogeochemistry, groundwater, salinization, sedimentary aquifer, Porto Alegre.

INTRODUÇÃO

São escassos os estudos existentes sobre o Aquífero Cenozóico no Município de Porto Alegre, o que motivou o desenvolvimento do presente trabalho. Foi realizado detalhado reconhecimento geológico da região, compatibilizado com informações divulgadas por outros autores: SCHNEIDER *et al.* (1974) ; ANDREIS *et al.* (inédito); ROISENBERG (2001); MENEGAT *et al.* (1998).

Os dados hidrogeoquímicos foram obtidos a partir da análise de amostras de água subterrânea em 39 poços tubulares perfurados no Sistema Aquífero Granular Cenozóico (SAGC). A coleta foi realizada após 30 minutos de bombeamento, seguindo as recomendações da APHA (1998). Os poços amostrados têm profundidades entre 12 e 202 metros, sendo 56% perfurados e com entrada de água exclusivamente na Cobertura Sedimentar Cenozóica e 44% trespassam os sedimentos e alcançam o Embasamento Cristalino.

O pH, a condutividade elétrica e a temperatura da água foram determinados *in situ*, enquanto outros parâmetros físico-químicos e bacteriológicos foram analisados em laboratório, utilizando os seguintes métodos analíticos: alcalinidade total por titulação potenciométrica; cloreto e dureza por titulometria; sólidos totais e sulfato por gravimetria; fluoreto pelo método eletrométrico; fosfato e nitrato foram determinados por espectrofotometria; Al, Ba, Ca, Fe total, Mg, Mn, K, Na, por absorção atômica.

O modelamento hidrogeoquímico utilizou o Programa EQ/3 (Wolery & Daveler, 1992), que determina o índice de saturação (SI) da amostra de água com respeito à precipitação mineral calculado por $SI = \log Q / K$, onde: Q é o produto da atividade do íon na solução e K é a constante de equilíbrio da reação.

Os dados hidrogeoquímicos foram submetidos à análise estatística, resultando em matriz de correlação através de análise fatorial e *cluster analysis*, com uso do *software* SPSS 11.5.

ASPECTOS GEOGRÁFICOS E GEOLÓGICOS

Porto Alegre está situada no Sul do Brasil a uma distância aproximada de 100 km do litoral e em altitude mínima de 10 metros acima do nível do mar, limitada a Oeste pelo Lago Guaíba perfazendo uma orla de 72 km. Distribui-se em três compartimentos geomorfológicos: Terras Baixas ao Norte, constituída pelas planícies e terraços fluviais do Rio Gravataí e ilhas do Delta do Jacuí; Terras Altas, na área central, representadas por cristas e colinas de rochas granitóides que alcançam 311 metros de

altitude e Terras Baixas ao Sul que compõem terraços e cordões lacustres (MENEGAT *et al.*, 1998).

São reconhecidos dois Domínios geológicos: Embasamento Granítico-Gnaíssico pertencente ao Escudo Sul-Rio-Grandense e Cobertura Sedimentar Cenozóica representada por depósitos do tipo laguna/barreira, que ocupam 40% da área estudada.

O Escudo Sul-Rio-Grandense em Porto Alegre é representado por rochas gnáissicas e graníticas pré-cambrianas divididas em seis unidades litoestratigráficas principais: Gnaisse Porto Alegre, Granito Independência, Granito Viamão, Granito Canta Galo, Granito Ponta Grossa e Granito Santana, associadas a diques riolíticos, dacíticos e basálticos (PHILIPP *et al.*, 1994; PHILIPP, 1995; 1998).

COBERTURA SEDIMENTAR CENOZÓICA

Esta unidade pertence ao Sistema Depositional da Planície Costeira do Rio Grande do Sul e sua origem está correlacionada aos processos glacio-eustáticos iniciados ao final do Terciário, os quais ocasionaram quatro sucessivas transgressões e regressões marinhas, que resultaram no Sistema Laguna/Barreira (VILLWOCK, 1972). A descrição geológica a seguir tem como objetivo fornecer elementos para melhor compreensão das características geoquímicas das águas subterrâneas do SAGC, como resultado dos processos de interação rocha-água.

Os eventos transgressivos iniciaram nos últimos 400.000 anos e acabaram definindo a atual morfologia da Planície Costeira, gerando depósitos com espessura máxima de 65 metros na região estudada. Em Porto Alegre tem-se o registro

de todas as quatro grandes transgressões marinhas, sendo as três mais antigas ocorridas há 400.000, 325.000 e 120.000 anos. Estes eventos originaram depósitos lacustres presentes na porção Sul da área estudada, dispostos paralelamente à margem do Lago Guaíba. Ao Norte, predominam depósitos deltáicos, terraços e de planícies fluviais que se formaram durante as duas últimas transgressões marinhas (120.000 e 5.000 anos).

Os depósitos de leques aluviais formados próximo às encostas das Terras Altas, originados por processos gravitacionais, são textural e mineralogicamente imaturos e possuem composição arcoseana dominante e granulação grossa a fina (TOMAZELLI *et al.*, 1987). As condições químicas oxidantes prevalentes durante a deposição e a diagênese imprimem nos sedimentos coloração avermelhada e propiciam concentração de óxidos e hidróxidos de ferro. A deposição dos leques aluviais iniciou no Terciário (Plioceno), continuando durante o Cenozóico, com intensidade de deposição controlada pelas mudanças climáticas de úmida a árida. Os sedimentos pertencem a Formação Graxaim (DELANEY, 1965). e graduam desde elúvios e colúvios, nas regiões proximais, até depósitos nitidamente aluviais.

Na área estudada o Sistema Laguna/Barreira I foi formado como produto do primeiro evento transgressivo-regressivo Pleistocênico e gerou depósitos de leques aluviais e eluvionares compostos por areias médias a grossas, mal selecionadas com matriz siltico-argilosa. O Sistema Laguna/Barreira II formou depósitos de cordões litorâneos constituídos de areias subarcoseanas grossas a conglomeráticas, esbranquiçadas, moderadamente selecionadas com laminação plano-paralela.

Os depósitos flúvio-lacustres (Sistema Laguna/Barreira III) foram acumulados numa depressão onde a carga sedimentar trazida pelos rios provenientes das terras altas acumulou sedimentos fluviais e lagunares de areias grossas a

conglomeráticas, esbranquiçadas a avermelhadas. Ocorrem na parte Norte de Porto Alegre, próximo ao vale do Rio Gravataí, ao longo do Arroio Dilúvio, do Lago Guaíba, nas cotas entre 3 e 4 metros.

O Sistema Laguna/Barreira IV é registrado na atual borda do Lago Guaíba, sendo formado por depósitos de planície e canal fluvial, depósitos lacustres e depósitos deltáicos, constituídos por areias grossas, amareladas, intercaladas com corpos tabulares siltico-argilosos, que contém restos vegetais.

ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

O município de Porto Alegre possui dois sistemas aquíferos principais: Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano (SAFPc) e o Sistema Aquífero Granular Cenozóico-SAGC (FREITAS, 1998); (FREITAS; LISBOA, 1996). O SAFPc é representado pelas rochas do embasamento cristalino, constituindo aquíferos descontínuos associados a zonas fraturadas (ROISENBERG, 2001; ROISENBERG *et al.*, 2003). As águas subterrâneas deste sistema são classificadas como bicarbonatadas cálcico-sódicas a sódicas, passando a tipos intermediários de composição cloretada-bicarbonatada-cálcico-sódica em consequência da mistura com águas do SAGC que possuem composição cloretada-cálcico-sódica.

O SAGC está sotoposto ao SAFPc, sendo constituído por sedimentos do Terciário e Quaternário resultantes de eventos transgressivos e regressivos que conferem à água altos teores de sais. Caracteriza-se por ser um aquífero granular, extenso, livre ou semi-confinado, com recarga natural proveniente da infiltração de

águas meteóricas. Os perfis hidrogeológicos indicam que a espessura deste aquífero aumenta em direção à borda do Lago Guaíba.

A elevada proporção de materiais granulares inconsolidados confere a este aquífero boa potencialidade hídrica (MACHADO, 1993; 1997). O nível estático dos poços é próximo a superfície, varia entre 1,0 e 2,5 metros de profundidade e as vazões alcançam no máximo 15 m³/h.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As águas subterrâneas do SAGC caracterizam-se por possuir elevados teores de cloreto, sulfato, sódio, cálcio, magnésio e dureza (Tab. 1). Processos de mistura com águas do SAFPC ocasionam forte diluição dos íons principais presentes no SAGC.

A análise estatística dos dados hidrogeoquímicos permitiu agrupar as amostras de águas subterrâneas conforme os parâmetros que tinham maior correlação: cloreto, dureza, sulfato, condutividade, cálcio, magnésio, potássio e sódio (Tab. 2).

IV. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DO
SISTEMA AQUIFERO GRANULAR CENOZÓICO DE PORTO ALEGRE, RS

Tabela 1 – Composição química das águas subterrâneas do SAGC (mg/L). RT105 (resíduo sólido total a 105°C); Dur (dureza mg/L de CaCO₃); Alct (alcalinidade total); CE (condutividade elétrica µS/cm); ND (não detectado); < (menor que o limite de detecção).

POÇO	RT 105	pH	CE	Dur	Alct	HCO ₃	SO ₄	PO ₄	SiO ₂	NO ₃	F	Al	Na	Cl	Ba	Fe t	Ca	Mg	Mn	K
PDU6	823	7,2	1276	354	188,5	229,88	144	0,05	22	<0,04	3,77	ND	152,3	45,8	0,08	1,66	115,10	17,52	1,81	2,84
PDU7	412	7,7	646	168	146,9	178,99	74	0,33	41	<0,04	3,91	<0,1	45,3	39,3	0,07	0,24	55,80	7,17	0,111	1,89
PDU8	610	7,4	893	280	93,8	114,36	134	0,08	47	<0,04	1,88	<0,1	46,3	28,5	0,03	<0,09	79,80	16,97	0,013	2,89
PDU13	766	7,4	1175	321	117	142,65	20	0,3	25	0,18	2,33	<0,1	62,9	372	0,7	<0,09	98,60	20,39	0,98	3,89
PDU17	211	6,4	193,6	31	22,6	27,57	<10	0,01	97	0,14	0,72	1,4	17,2	38,1	0,13	0,57	5,29	2,50	0,149	2,42
PDU21	1460	7,2	2810	451	124,9	152,32	62	0,01	53	0,18	1,19	0,1	191,0	781	0,21	0,63	96,20	33,00	0,159	9,34
PDU34	329	6,7	447	85	136,5	166,51	20	0,4	60	3,2	0,88	<0,1	40,8	41,2	0,05	0,09	18,70	9,28	<0,003	6,97
PDU36	469	8,0	755	169	160,4	195,20	45	0,03	34	ND	2,76	1,8	59,7	107,8	0,14	0,14	45,30	12,06	0,214	2,76
PDU37	2038	7,7	3160	565	141,7	172,66	143	0,01	<20	ND	2,8	0,1	282,0	495,6	0,21	0,36	125,80	63,60	0,335	9,4
PDU38	398	8,0	671	142	101,7	123,76	49	0,03	33	ND	3,02	<0,1	61,9	103,9	0,19	<0,09	37,60	13,91	0,271	3,74
PDU48	147	7,8	161,7	42	54,6	66,51	12	ND	23	2,01	2,08	<0,1	18,2	13,2	0,03	<0,09	9,78	3,56	0,3	1,4
PDU54	581	7,4	901	120	170	207,27	60	0,03	256	ND	1,34	11,8	115,1	82,2	0,23	8,22	22,90	15,41	0,87	4,45
PDU65	339	7,0	526	152	182,6	222,72	45	0,16	50	19,26	1,32	<0,1	62,9	32,1	0,12	<0,09	31,10	14,90	0,06	3,2
PDU68	355	7,2	480	51	109,8	133,90	56	0,58	81	1,39	4,43	3,8	97,5	38,6	0,05	1,69	7,76	5,10	0,127	3,23
PDU80	2428	7,1	4030	720	418,9	510,90	129	3,61	45	0,08	0,22	<0,1	464,0	909,7	0,47	17	125,00	9,58	2,11	21,4
PDU81	1169	8,2	2240	126	115,4	140,23	129	0,02	<20	<0,04	5,39	<0,1	378,0	445,6	0,07	0,18	38,60	10,10	0,019	3,07
PDU86	763	8,0	1324	129	103,4	125,83	14	0,01	25	0,04	4,23	<0,1	137,8	327,5	0,08	0,17	76,70	5,42	0,289	4,3
PDU87	365	7,2	423	50	115,6	140,98	24	0,11	90	2,29	0,92	4,9	65,1	41,7	0,04	2,01	6,55	1,05	0,18	2,94
PDU88	288	8,3	462	136	100,7	122,24	0	0,04	36	0,09	2,34	0	31,4	72,7	0,02	0,2	37,70	8,25	0,23	2,05
PDU90	2908	6,7	1445	214	83,1	101,37	20	0	42	0,01	0,62	0	204,0	406,6	0,13	0,95	56,50	15,77	1,20	6,54
PDU91	1482	6,4	335	51	38,8	47,33	32	0,07	58	1,02	0	0	41,4	69,2	0,16	0,39	9,42	5,31	0,26	2,63

Tabela 2 – Matriz de correlação dos dados hidroquímicos, com os respectivos coeficientes de correlação (r).

	Cl	Dureza	SO ₄	CE	pH	Ca	Mg	K	Na
Cl	1,000	0,835	0,744	0,970	-0,212	0,534	0,815	0,497	0,890
Dureza		1,000	0,721	0,902	-0,058	0,834	0,773	0,490	0,738
SO ₄			1,000	0,829	-0,333	0,425	0,836	0,247	0,876
CE				1,000	-0,183	0,622	0,849	0,501	0,922
pH					1,000	0,225	-0,251	-0,120	-0,343
Ca						1,000	0,440	0,416	0,435
Mg							1,000	0,080	0,762
K								1,000	0,459
Na									1,000

As amostras foram classificadas em 4 grupos (Tab. 3) cuja distribuição areal mostra nítida diferenciação em direção ao SAFFpc. Os grupos 1 e 2 estão mais próximos das rochas do embasamento cristalino, seguido do Grupo 3 presente na região Sul e Norte, enquanto o Grupo 4 ocorre somente ao Sul da área estudada (Fig. 1 e Fig.2).

Figura 1- Mapa Hidrogeológico do Município de Porto Alegre, RS.

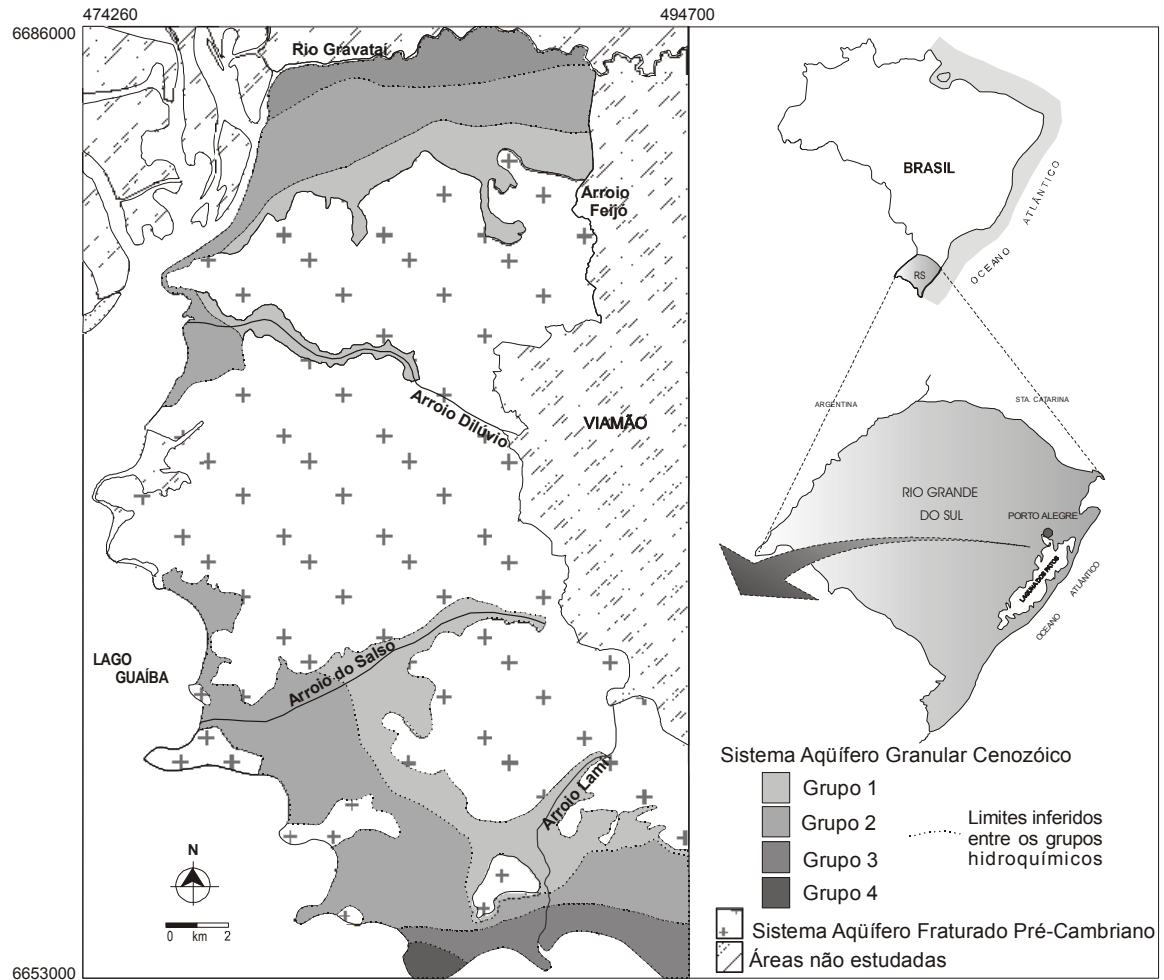


Figura 2 – Perfil esquemático do Sistema Aquífero Granular Cenozóico.

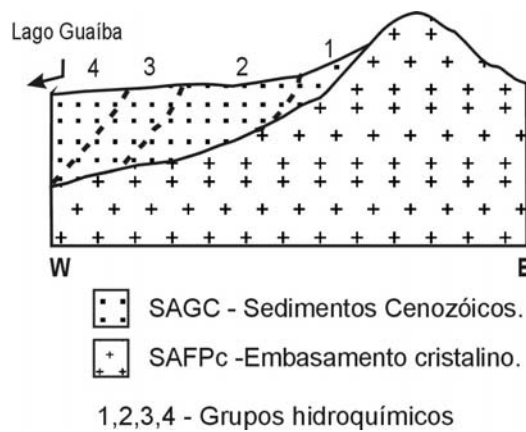


Tabela 3 - Sumário dos parâmetros usados no tratamento estatístico, identificados em grupos químicos. CE – condutividade elétrica em $\mu\text{S/cm}$, dureza em mg/L de CaCO_3 , ânions e cátions em mg/L .

	CE	pH	Dureza	Cl	K	Ca	Mg	SO ₄	Na
Grupo 1									
Máximo	901,0	7,49	152,0	85,0	4,4	31,1	14,9	60,0	115,1
Mínimo	161,7	5,43	5,52	13,2	1,4	0,9	0,7	4,0	17,2
Média	459,2	6,75	60,5	50,7	3,1	13,0	6,9	30,3	58,0
Grupo 2									
Máximo	3160	8,30	565,0	781	9,4	125,8	63,6	144,0	297,7
Mínimo	462	6,52	124,0	28,5	2,0	22,0	5,4	14,0	31,4
Média	1382	7,44	235,6	274,9	4,5	63,4	18,6	56,6	150,0
Grupo 3									
Máximo	4030	7,10	720,0	909,7	21,4	125,0	34,0	250,0	529,0
Mínimo	315	5,48	118,7	27,5	12,5	15,0	9,5	26,0	464,0
Média	2401	6,14	338,5	565,7	16,3	54,6	19,3	135,0	496,5
Grupo 4									
Máximo	6540	6,36	846,0	1650,0	2,5	84,0	154,0	400,0	740,3
Mínimo	2830	5,40	428,0	520,0	2,5	72,0	60,0	300,0	570,8
Média	4685	5,88	637,0	1085,0	2,5	78,0	107,0	350,0	655,5

As águas do Grupo 1 apresentam os menores valores de parâmetros químicos discriminados no tratamento estatístico. Os grupos 3 e 4 apresentam águas com maior concentração iônica, devido a dissolução e lixiviação dos sais presentes nos sedimentos. O Grupo 2, predominante na área, apresenta valores intermediários entre os Grupos 1 e os grupos 3 e 4.

A origem dos principais íons nas águas do SAGC foi analisada com base nas informações dos processos hidroquímicos, geológicos e antropogênicos. Processos de precipitação/dissolução mineral e reações de troca de cátions são importantes para a caracterização química das águas subterrâneas do SAGC. Serão descritos, a seguir, a relação entre os íons discriminados na análise estatística.

O modelamento geoquímico realizado nas análises químicas de águas do SAGC registra subsaturação em halita, fluorita, gipsita, calcita e dolomita, na grande

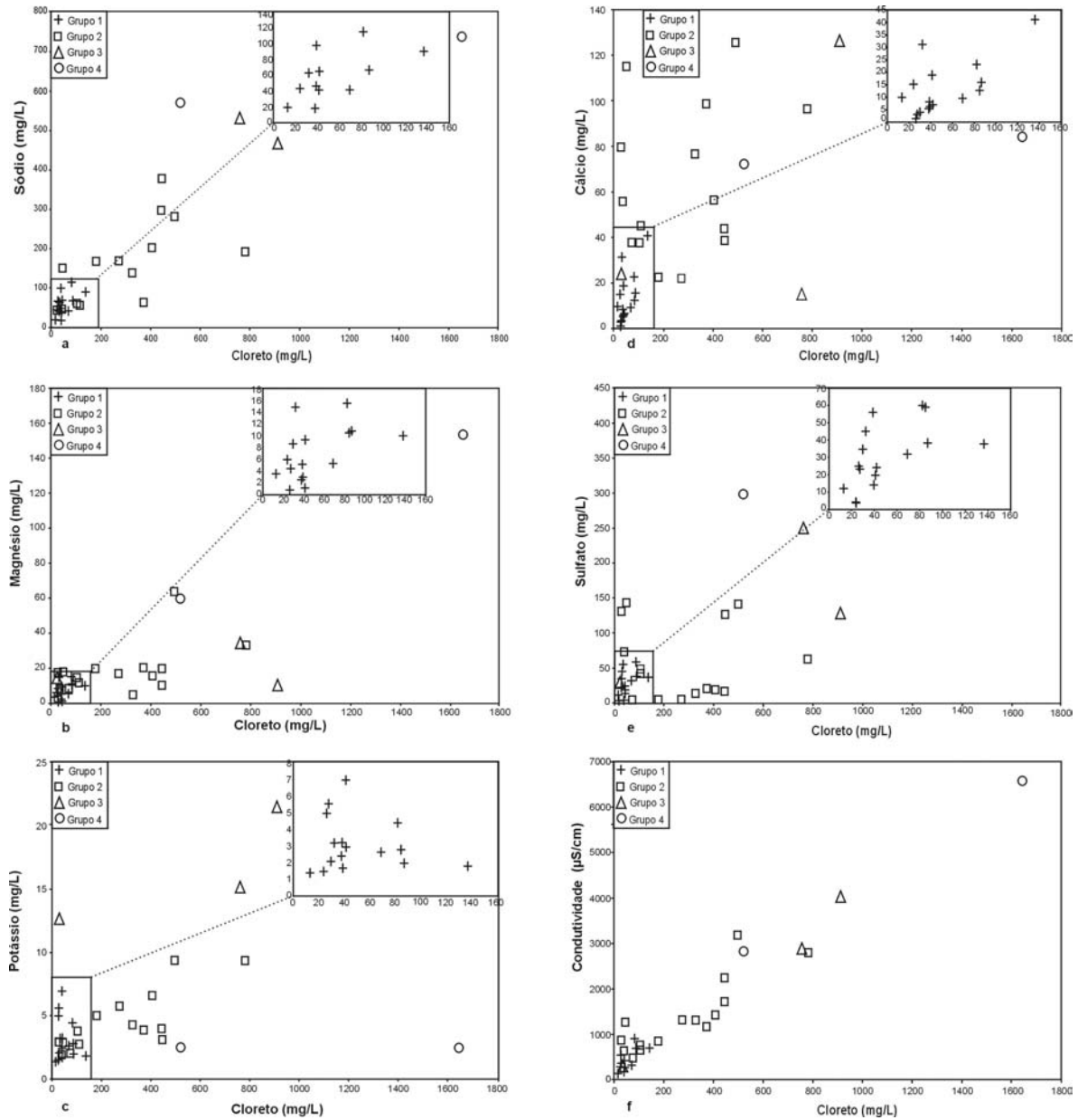
maioria dos casos. Por outro lado, os cálculos indicam supersaturação em argilo-minerais (gibbsita, caolinita e montmorilonita), zeolitas, goetita e fluorapatita.

Cloreto

As concentrações máximas do íon cloreto são proporcionais aos altos valores de sulfato, dureza, cálcio, magnésio, potássio e sódio e, provavelmente, relacionados com os eventos marinhos transgressivos que deram origem aos depósitos sedimentares. O cloreto apresenta uma correlação positiva com a dureza ($r= 0,835$), sulfato ($r= 0,744$), CE ($r= 0,970$), magnésio ($r= 0,815$) e sódio ($r= 0,870$). A partir do Grupo 1, em direção ao Grupo 4, registra-se um aumento nos teores de cloreto, sódio, magnésio, cálcio e sulfato (Fig. 3). Nem todas as amostras apresentam cloreto elevado, o que justifica-se pelas condições hidrodinâmicas e litologia constituinte do aquífero. Na região abrangida pelo Grupo 4, os poços que captam águas a partir de 14 m de profundidade, possuem conteúdo mais elevado de cloreto que os níveis superficiais, devido à presença de lentes siltico-argilosas em subsuperfície.

O conteúdo de cloreto nas águas das chuvas da região é da ordem de 6.0 mg/L (Vasquez, 2000), enquanto estudos de efluentes domésticos demonstram valores da ordem de 50 mg/L (Roisenberg, 2001). Desta forma, os elevados teores cloreto nas águas do SAGC são explicados como herança do ambiente deposicional do aquífero e das transgressões marinhas.

Figura 3 - Gráficos binários das concentrações (mg/L) de cloreto vs. sódio (a), magnésio (b), potássio (c), cálcio (d), sulfato (e) e condutividade $\mu\text{S}/\text{cm}$ (f) nas amostras de água do SAGC.

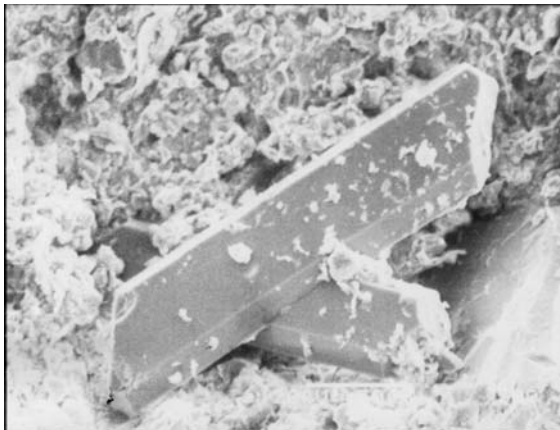


Sulfato

O sulfato possui correlação positiva, além do cloreto, com o magnésio ($r=0,836$), o sódio ($r=0,876$), o cálcio ($r=0,425$), a CE ($r=0,829$) e a dureza ($r=0,721$). A origem do sulfato nas águas subterrâneas do aquífero é provavelmente relacionada com a dissolução de gipsita registrada no sedimento silítico-argiloso (Fig. 4):



Figura 4 – Cristais de gipsita em sedimento silítico-argiloso observados ao MEV. Aumento x 500.

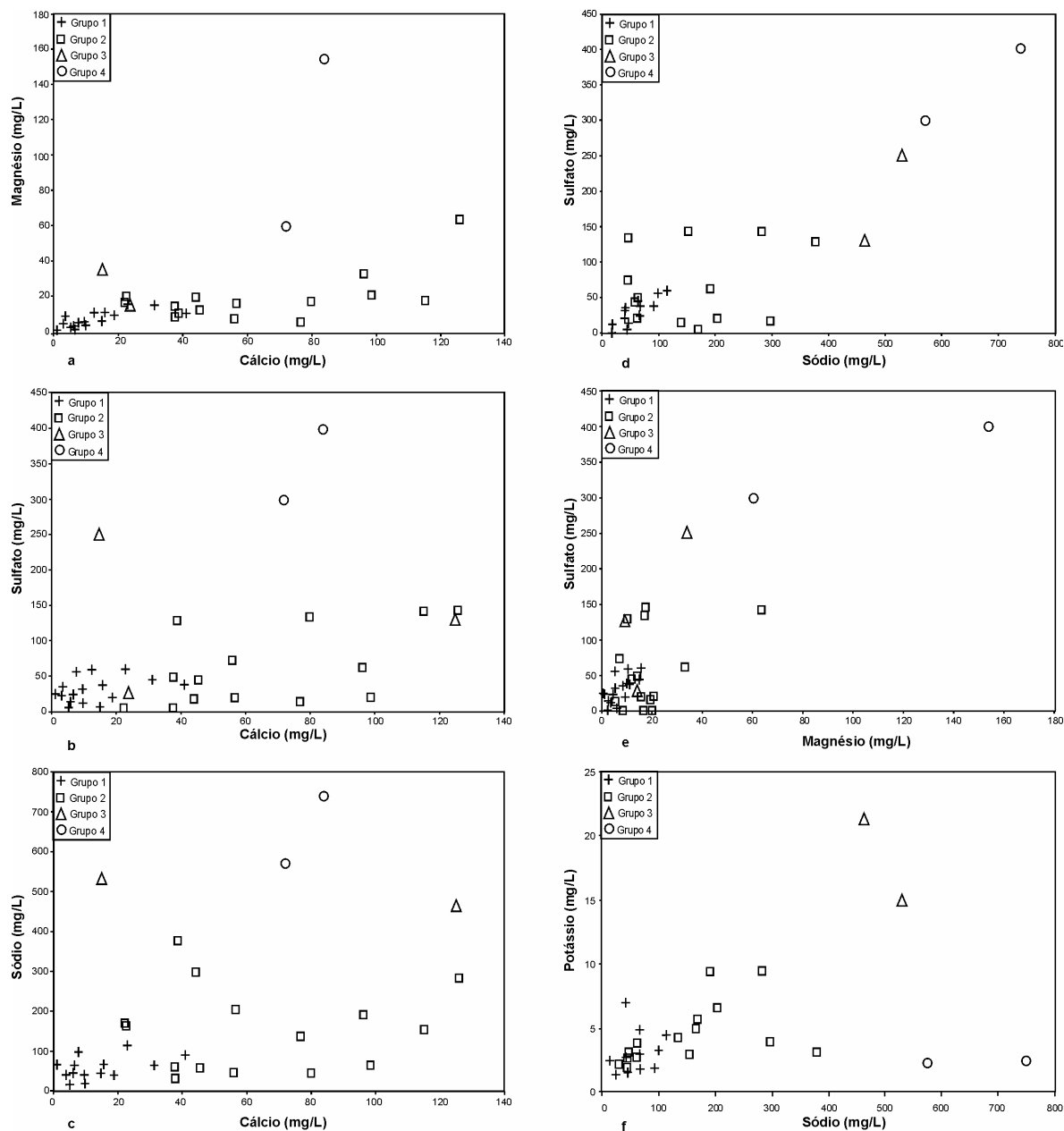


Cálcio e sódio

O cálcio possui correlação positiva com o sódio ($r=0,435$), potássio ($r=0,440$) e magnésio ($r=0,416$). O sódio, por outro lado, apresenta crescimento diretamente proporcional com o aumento dos demais parâmetros físico-químicos utilizados na matriz de correlação. As relações cálcio vs. sódio (Fig. 5c) são variáveis nos quatro grupos estatísticos, assim, o cálcio é claramente mais abundante nos Grupos 2 e 3, enquanto o sódio cresce do Grupo 1 ao 4, comportamento idêntico observado no caso do íon sulfato.

A origem do cálcio é provavelmente vinculada com a dissolução de carbonatos (calcita e dolomita) abundante em ambientes com influência marinha. Deve ser registrado que a dissolução de gipsita também promove a liberação iônica de cálcio. O sódio, por sua vez, possui derivação idêntica a do cloreto, com o qual mantém nítida correlação.

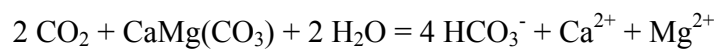
Figura 5 - Gráficos binários das concentrações (mg/L) de cálcio vs. magnésio (a), sulfato (b), sódio (c) e de sódio vs. sulfato (d) e potássio (f) e de magnésio vs. sulfato (e) nas amostras de água do SAGC.



Magnésio

O magnésio possui uma correlação positiva com a maioria dos parâmetros, à exceção do potássio e pH, sendo claramente mais abundante no Grupo 4.

Dada a estreita relação deste elemento com o cálcio, é provável que sua origem esteja relacionada à dissolução de carbonatos, em particular dolomita, considerando-se que inexistem minerais ferromagnesianos na composição do SAGC.



Condutividade Elétrica, dureza e pH

A condutividade elétrica e a dureza crescem do Grupo 1 ao 4, tal como relatado para o sódio, sulfato e cloreto. Por outro lado, o pH não apresenta relações de interdependência evidentes com nenhum dos parâmetros analisados.

CONCLUSÕES

A heterogeneidade da composição química das águas subterrâneas do SAGC é reflexo da expressiva variação composicional dos sedimentos que constituem o aquífero, em decorrência dos diferentes ambientes deposicionais, e da espessura do aquífero poroso, a partir do embasamento cristalino, que corresponde ao aquífero fraturado subjacente. Os estudos demonstram que os parâmetros com maior correlação estatística são C.E., dureza, cloreto, potássio, cálcio, magnésio, sódio e sulfato. Os mesmos estudos

descrevem quatro grupos distintos de águas, que comportam-se como águas cloretada-cálcico-sódicas.

As maiores concentrações de íons nas águas são registradas nas regiões com maior espessura de sedimentos, próximas ao Lago Guaíba e mais distais em relação ao embasamento cristalino.

A origem do SAGC na região de Porto Alegre é relacionada com os eventos transgressivos e regressivos ocorridos no Quaternário, o que, aliado a baixa velocidade hidrodinâmica, contribuiu para a distinta assinatura salina das águas subterrâneas.

As características hidroquímicas do SAGC podem ser influenciadas pela mistura com águas do aquífero fraturado subjacente, em particular nas zonas mais proximais em relação ao embasamento cristalino. É considerado que reações de trocas de cátions e processos adsorptivos na fração argilosa e nos óxidos/hidróxidos de ferro dos sedimentos podem contribuir para o controle da distribuição areal e migração dos íons em solução.

Com a relação ao índice de saturação mineral, de maneira geral as águas do SAGC encontram-se subsaturadas em relação à gipsita, fluorita e halita, enquanto dolomita e calcita são subsaturadas, mas tendem a registrar leve saturação nos grupos 2 e 3. Os resultados demonstram que gipsita, caolinita, zeolita, fluorapatita e goetita aparecem com índices supersaturados nas águas subterrâneas.

Altas concentrações do íon fluoreto são registradas nos poços que possuem influência de águas do SAFPC, diferindo dos baixos teores observados nos poços que captam somente águas do SAGC, não possuindo nenhuma correlação com a salinidade.

Os resultados obtidos atestam que a contribuição antropogênica à composição das águas subterrâneas do SAGC é negligenciável, como demonstram os baixos teores de nitrato e de íons associados à contaminação por atividade industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA, AWWA, WPCF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington DC, American Public Health Association, 1268p. 1998.
- ANDREIS, R.R.; ROISENBERG, A.; VIERO, A.P. Inédito. **Os Depósitos Cenozóicos da área urbana de Porto Alegre, RS, Brasil**. 19f.
- DELANEY, P.J.V. **Fisiografia e geologia da superfície da planície costeira do Rio Grande do Sul**. Publicação especial da Escola de Geologia, UFRGS, Porto Alegre, 1965. 6:1-195.
- FREITAS, M.A. **Avaliação do Potencial hidrogeológico de terrenos cristalinos através de técnicas de geoprocessamento**. Porto Alegre. 1998. Dissertação de MSc Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande, 130f.
- FREITAS, M.A.; LISBOA, N.A. Aspectos da Qualidade das Águas Subterrâneas dos diferentes sistemas Aquíferos da Região de Porto Alegre – RS. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrânea. **Anais...** Salvador. 1996. 10f.
- MENEGAT, R.; PORTO, M.L.; CARRARO, C.C; FERNANDES, L.A.D. **Atlas Ambiental de Porto Alegre**. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS, 1998. 228 p. Várias escalas.
- MACHADO, J.L.F. Características Hidrolíticas dos Sistemas Aquíferos quaternário da Região Adjacente a Porto Alegre – RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEA. 1993. **Anais**. p.21-26. 1993.
- MACHADO, J.L.F. Mapa Hidrogeológico da Folha de Porto Alegre, escala 1:250.000. In: RAMGRAB, G.E.; WILDNER, W.; CAMOZZATO, E.; org. **Porto Alegre folha SH.22-Y-B**, Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CPRM. 1 mapa. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos, Brasília, 1997.144p.

- PHILIPP, R.P. 1995. Condições de posicionamento do plutonismo da Suíte Dom Feliciano na região de Porto Alegre, RS. In: V SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, Gramado – RS. SBG, **Bol. Res. Exp.**:p.207-209.
- PHILIPP, R.P. 1998. **A Evolução Geológica e Tectônica do Batólito Pelotas, RS**. São Paulo. 371p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo).
- PHILIPP, R.P.; REGO, I.T.S.F.; SIVIERO, R. 1994. Geologia das rochas granitóides da região de Porto Alegre, RS. In: XXXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Camboriú – SC. **Anais** 1:98-99.
- ROISENBERG, C. **Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Fraturado Pré-cambriano e qualidade das águas subterrâneas do Município de Porto Alegre- RS**. 2001. Dissertação de MSc, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 174f.
- ROISENBERG, C.; VIERO, A.P.; SCHWARZBACH, M.S.R.; ROISENBERG, A.; MORANTE, I.C. Caracterização geoquímica e gênese dos principais íons das águas subterrâneas de Porto Alegre, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v 8, n 4, p.137-147. 2003.
- SCHNEIDER, A.W.; LOSS, E.L.; PINTO, J.F. 1974. **Mapa geológico da folha Porto Alegre, RS**, escala 1:50.000, Porto Alegre, CNPq, mapa.
- TOMAZELLI, L.J, VILLWOCK, J.A., LOSS, E. L. Aspectos da geomorfologia costeira da região de Osório-Tramandaí, Rio Grande do Sul. In: Iº Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. **Publicação Especial nº 2**. Porto Alegre. 1987. p. 21.
- VÁSQUEZ, S.G. **Qualidade do ar e das chuvas em Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000. 81f.
- VILLWOCK, J A. **Contribuição a geologia do Holoceno da Província Costeira do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1972. Instituto de Geociências da UFRGS. Dissertação de Mestrado. Geociências. 133f.
- WOLERY, T.J. & DAVELER, S.A. EQ3/6, A Computer Program for Reaction Path Modeling of Aqueous Geochemical Systems: Theoretical Manual, User's Guide and Related Documentation (Version 7.0). California, Livermore Laboratory, University of California, 246p. 1992.

V. RESULTADOS E INTERPRETAÇÕES

- 5.1. Introdução, 50
 - 5.2. Propriedades Físicas das águas do SAGC, 52
 - 5.2.1. Temperatura da água, 52
 - 5.2.2. Cor, 52
 - 5.2.3. Odor, 52
 - 5.2.4. Turbidez, 53
 - 5.3. Propriedades Iônicas, 53
 - 5.3.1. Condutividade elétrica, 54
 - 5.3.2. Dureza, 55
 - 5.3.3. Alcalinidade, 56
 - 5.3.4. pH, 56
 - 5.3.5. Eh, 56
 - 5.3.6. Resíduos totais, filtrados e voláteis, 57
 - 5.4. Constituintes Iônicos Principais, 58
 - 5.4.1. Sódio, 58
 - 5.4.2. Potássio, 59
 - 5.4.3. Cálcio, 60
 - 5.4.4. Magnésio, 62
 - 5.4.5. Ferro e manganês, 63
 - 5.4.6. Cloreto, 65
 - 5.4.7. Sulfato, 68
 - 5.4.8. Bicarbonato, 69
 - 5.4.9. Nitrato, 70
 - 5.5. Constituintes Iônicos Secundários, 71
 - 5.5.1. Fosfato, 71
 - 5.5.2. Sílica, 72
 - 5.5.3. Zinco, chumbo e cádmio, 73
 - 5.5.4. Fluoreto, 73
 - 5.6. Constituintes menores, 74
 - 5.7. Análise bacteriológica, 75
 - 5.8. Modelamento Geoquímico, 76
 - 5.9. Tratamento estatístico dos dados químicos, 79
-

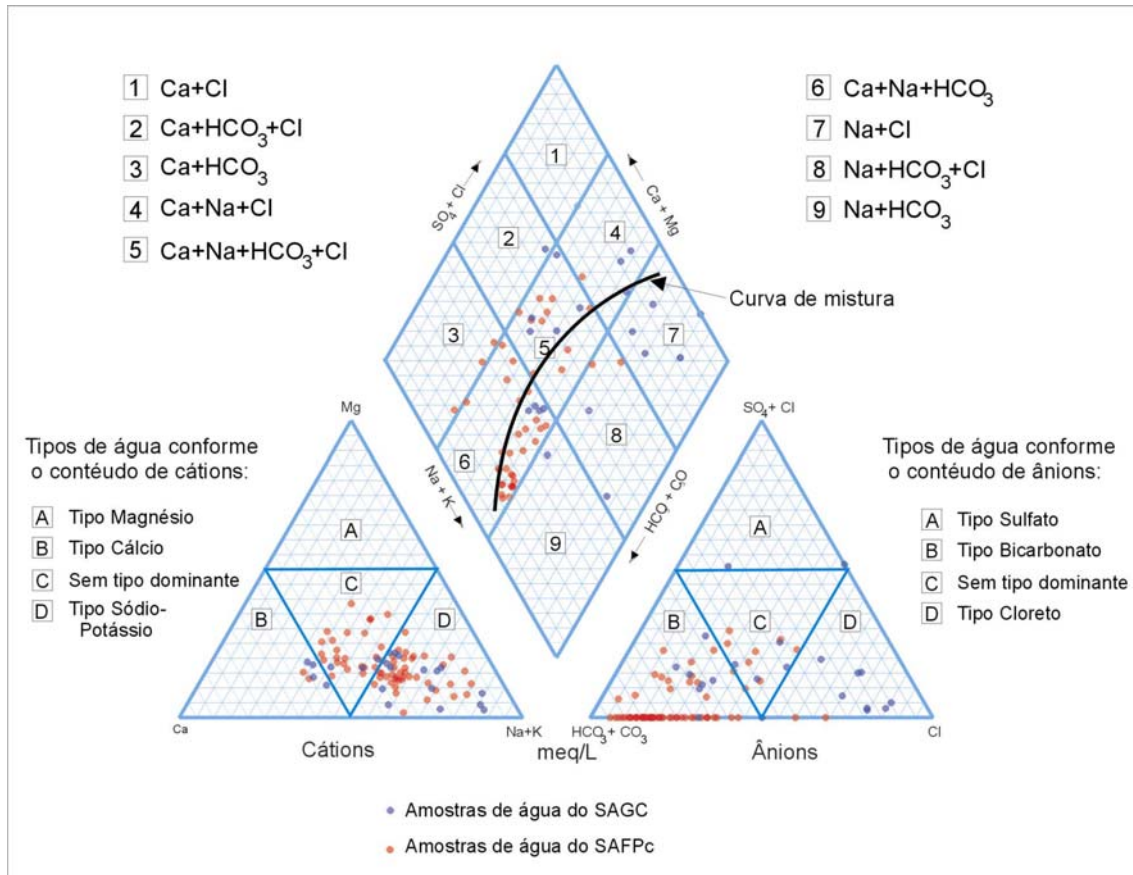
5.1. Introdução

Os resultados físico-químicos e bacteriológicos das águas do SAGC (ANEXO A e ANEXO B) são de fundamental importância para caracterizar e avaliar a qualidade em relação às propriedades minerais, presença de nutrientes e de elementos contaminantes.

A concentração dos elementos químicos dissolvidos nas águas é resultado de processos naturais de interação entre rocha-solo-água, da contribuição de águas meteóricas, da ação de organismos nos horizontes superficiais de solo e do aporte a partir de fontes antropogênicas. A mobilidade geoquímica dos elementos é correlacionada com a capacidade de trânsito no sistema litosfera-biosfera-hidrosfera-atmosfera e depende de vários fatores, como a capacidade do elemento participar de processos de troca iônica, de suas ligações com a litosfera e biosfera e da solubilidade, que depende do potencial iônico de cada íon (FENZL, 1986).

No Município de Porto Alegre existem dois sistemas aquíferos, hidraulicamente conectados, onde a química de um influencia o outro. A interpretação do diagrama trilinear de Piper (FIG. 1) sugere que as águas subterrâneas de Porto Alegre possuem fácies hidroquímicas distintas, sendo as amostras mais características do SAGC classificadas como sódico-cloretadas, como demonstrado neste capítulo, em contraste com as águas do SAFPC que são predominantemente cálcico-sódico-bicarbonatadas (ROISENBERG, 2001), gerando mistura de águas dos dois sistemas. Assim, a composição transiciona entre o campo das águas sódico-cloretadas, passando a cálcico-sódico-cloretadas, enquanto menor número tende a cálcico-sódico-bicarbonatadas-cloretadas, terminando no campo cálcico-sódico-bicarbonatadas, estas últimas representando maior influência do SAFPC.

FIGURA 1 – Diagrama trilinear de Piper e a classificação química das águas subterrâneas do SAGC e SAFPC (modificado de ROISENBERG, 2001).



A existência de diferentes fácies no mesmo sistema aquífero pode indicar processos químicos distintos atuantes sobre a composição química da água. Variações no conteúdo mineral do aquífero exercem, em alguns casos, significativo controle na química da água subterrânea. Assim, argilo-minerais com elevado CTC geram trocas com o meio aquoso, modificando a composição original das águas. O fluxo das águas subterrâneas, partindo-se das áreas de recarga em direção às áreas de descarga e a subsequente mistura de distintas fácies químicas, também pode influenciar na composição das águas.

5.2. Propriedades físicas das águas do SAGC

As propriedades físicas das águas subterrâneas são características de ordem estética e algumas podem imprimir sensações desagradáveis para consumo humano. Dentre as propriedades consideradas importantes devem ser apontadas a temperatura, cor, odor e turbidez.

5.2.1. Temperatura da água

A temperatura das águas subterrâneas independe da temperatura atmosférica, a não ser nos poços pouco profundos, nos quais pode haver influência das condições externas. Neste estudo é possível notar que a temperatura das águas subterrâneas sofre pouca variação com a estação climática do ano e, no caso das águas do SAGC, varia de 19°C a 26°C.

5.2.2. Cor

A cor é o resultado das substâncias dissolvidas na água. A Portaria n° 518 do Ministério da Saúde de 25 de março de 2004 estabelece como padrão de aceitação para consumo humano o limite de 15 uH (unidade Hazen - mg Pt-Co/L).

Nas amostras analisadas do SAGC foram obtidos valores máximos de 15 ppm Pt-Co, sendo portanto águas de baixa coloração, à exceção da amostra 13A, que apresenta coloração alaranjada devido ao elevado conteúdo de ferro.

5.2.3. Odor

O odor é um parâmetro organoléptico intimamente ligado ao sabor. O sabor depende do teor e do tipo de sais dissolvidos, além de outras substâncias em

solução ou suspensão. Apesar das águas do SAGC apresentarem alto conteúdo de sais, não foram detectados odores nas amostras analisadas. Trabalhos anteriores relatam que o odor das águas subterrâneas de Porto Alegre encontra-se em limites plenamente aceitáveis (COELHO, 1997).

5.2.4. Turbidez

Esta propriedade retrata a dificuldade da água em transmitir luz, o que é provocado por sólidos em suspensão (silte, argila, matéria orgânica, etc). As águas subterrâneas do SAGC apresentam valores relativamente baixos de turbidez, variáveis entre 0,14 e 5,64 UT, alcançando 14,8 a 22,4 UT em três amostras. As últimas encontram-se em patamar acima do padrão de aceitação para consumo humano (<5 UT), conferido pela Portaria nº 518 do Ministério da Saúde. A amostra PDU 80 (202 UT), localizada na zona Norte da cidade (CEASA) corresponde à entrada de água no nível de areia argilosa, intercalado em espessa camada de argila rica em matéria orgânica, que imprime níveis elevados de sólidos em suspensão, principalmente argilas e material coloidal.

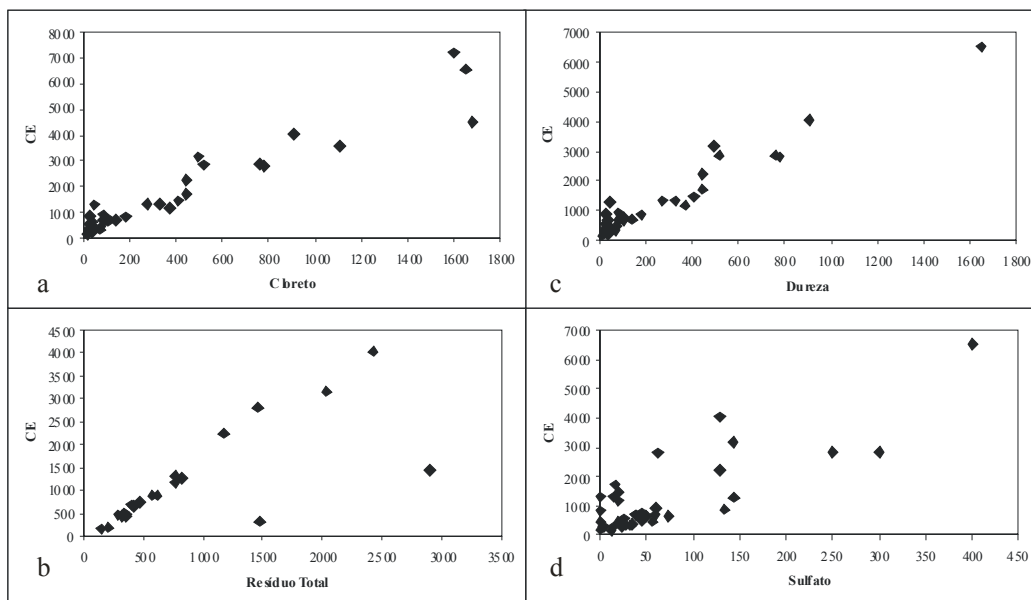
5.3. Propriedades Iônicas

Água pura não existe na natureza, sendo quimicamente ativa e com grande facilidade de incorporar, dissolver e reagir com outras substâncias. A água subterrânea, ao migrar através de solos e rochas, enriquece-se em sais, provenientes da dissolução de minerais. A partir do estudo das propriedades iônicas é possível caracterizar a assinatura hidroquímica da água.

5.3.1. Condutividade elétrica

A condutividade elétrica (CE), expressa em $\mu\text{S}/\text{cm}$ (microsiemens, 10^{-6} S), corresponde à habilidade de uma substância conduzir em corrente elétrica, estando diretamente ligada ao teor de sais dissolvidos sob forma de íons e ao conteúdo de sólidos em suspensão. Representa o valor da resistividade elétrica e varia com a temperatura, sendo importante referir a medida em relação ao padrão a 25°C . Nas águas do SAGC a CE varia entre 292 e 7220 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mostrando a grande maioria dos valores limitados a 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. É nítida a correlação positiva da CE com os conteúdos de cloreto, sólidos totais, dureza e sulfato (FIG. 2a, 2b, 2c e 2d). Os valores menores de CE e alto conteúdo de resíduos totais encontrados em dois poços (PDU 90 e PDU 91) que se dispersão da tendência da outras amostras indicam que existe influencia de outros parâmetros químicos.

FIGURA 2 - Gráficos binários das relações CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) versus (a) cloreto (mg/L); (b) resíduo total; (c) dureza (mg/L CaCO_3) e (d) sulfato (mg/L).



5.3.2. Dureza

Representa a capacidade da água neutralizar o sabão pela ação do cálcio e magnésio ou outros elementos como ferro, manganês, cobre, bário, zinco, etc. No presente estudo, a dureza é definida pelo teor de carbonato de cálcio e expressa em mg/L de CaCO₃.

Quase toda a dureza da água subterrânea provém do cálcio e do magnésio, cujos íons originam-se principalmente da dissolução de bicarbonatos, sulfatos, cloretos e nitratos dos mesmos cátions. O uso dos valores para enquadramento em escalas de dureza é questão ainda em aberto na literatura, porquanto o significado é relativo e depende da região enfocada. Em região caracteristicamente pobre em sais dissolvidos, uma água pode ser considerada dura com 50 mg/L, enquanto em outra, historicamente com elevado teor de sais, pode ser enquadrada como mole, mesmo contendo 100 mg/L de CaCO₃, por exemplo.

Tanto o Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos, quanto a Associação Brasileira de Normas Técnicas, permitem um limite máximo de 200 mg/L de CaCO₃ para a água potável. Neste estudo optou-se pela classificação das águas conforme critérios de Custódio & Llamas, 1983 (TAB. 1).

TABELA 1
Classificação das águas segundo a dureza em mg/L de CaCO₃.

Classificação	Teor de CaCO ₃ (mg/L).
Branda	< 50
Pouco dura	50-100
Dura	100-200
Muito dura	>200

A dureza das As águas do SAGC varia entre 24 e 1680 mg/L, sendo, em sua maioria, classificadas como duras a muito duras. Em poços onde há mistura com águas do SAFPC a dureza passa ao nível brando.

5.3.3. Alcalinidade

É definida como a capacidade da água em neutralizar ácidos, devido principalmente à presença de carbonatos e bicarbonatos, sendo expressa em mg/L de CaCO_3 . Outros constituintes que podem contribuir para a alcalinidade da água incluem silicatos, hidróxidos, boratos e alguns componentes orgânicos, (HEM, 1985). As águas do SAGC apresentam uma ampla variação de alcalinidade (22,6 a 418,9 mg/L CaCO_3), os menores valores correspondendo a misturas com águas do SAFPC.

5.3.4. pH

O pH apresenta uma relação linear e direta com o gás carbônico dissolvido e a alcalinidade. Por estar relacionado ao ambiente em que a água se encontra, os valores são facilmente alterados para números superiores, durante a amostragem ou o armazenamento. Por esta razão é de fundamental significado a medida de pH em campo, representando um índice de *status* de reações de equilíbrio na qual a água participa. O pH medido tem um papel muito importante na informação do equilíbrio geoquímico e, portanto, torna-se informação indispensável nos cálculos de modelamento geoquímico e de solubilidade dos compostos.

A maioria das águas subterrâneas possui pH entre 5,5 e 8,5, excepcionalmente podendo alcançar 3,0 e 11,0 a 25°C (FEITOSA; FILHO, 1997). Em amostras coletadas no SAGC os valores de pH estão compreendidos entre 5,4 e 8,3, com maior população compreendida entre 5,5 e 7,0.

5.3.5. Eh

O Eh (potencial redox), da mesma forma que o pH, é medido em campo, pois a armazenagem, em geral, altera sensivelmente os valores originais. Este parâmetro apresenta relação direta com o ambiente físico e físico-químico dominante no aquífero e a forma em que as espécies químicas estão presentes na água subterrânea.

O potencial redox positivo resulta na oxidação do sistema, enquanto o negativo indica redução. Para soluções que contem espécies iônicas oxidadas e reduzidas em equilíbrio, o Eh será fixado pela atividade de pares de espécies dominantes mais frequentes. As águas do SAGC possuem valores de Eh variáveis entre 2,17 e -0,25 volts.

5.3.6. Resíduos totais, filtrados e voláteis

Sólidos totais ou resíduos totais (RT) são calculados como o peso total dos constituintes minerais presentes na água por unidade de volume. O resíduo filtrado (RF) corresponde à carga sólida em suspensão (silte, argila, matéria orgânica, etc) retirada por filtração. Os resíduos voláteis (RV) representam o material dissolvido na água que foi volatilizado após a preparação da amostra. Neste estudo, foram usados as abreviaturas RT 105, RF 550, RV 550 e RF 105 (expressas em mg/L) em que 105 e 550 são as temperaturas de secagem (°C). Águas subterrâneas, em sua maioria, possuem pouco sólidos em suspensão.

Segundo classificação da CETESB, águas com concentrações elevadas de minerais dissolvidos são impróprias para determinados usos. Com menos de 500 mg/L é considerada, em geral, satisfatória para todos os usos; se possuir mais de 1.000 mg/L, certamente comporta minerais que conferem sabor desagradável, podendo torná-la quimicamente ativa ou mesmo corrosiva. Para o Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos, é permissível um limite de até 1.500 mg/L de sólidos totais para água potável.

O conteúdo de resíduos totais nas águas subterrâneas é influenciado pela solubilidade de diferentes minerais. Águas em contato com minerais facilmente solúveis contêm maior teor de RT do que águas em contato com minerais menos solúveis. A

quantidade de material carbonático e o tempo de residência também exercem um controle no conteúdo químico das águas subterrâneas. Em aquíferos que possuem fluxo de água subterrânea lento, as águas podem alcançar saturação química em relação à dissolução de solutos.

Argilo-minerais com elevada capacidade de troca de cátions podem influenciar na concentração dos diferentes cátions na água. A troca de sódio contido na argila por cálcio da água subterrânea resulta em níveis mais elevados do primeiro elemento em solução, havendo aumento no conteúdo de RT (FREEZE, CHERRY, 1979).

As águas do SAGC apresentam ampla variabilidade de RT 105 (147 a 2038 mg/L), RF105 (51 a 2906 mg/L) e RF550 (119 a 1976 mg/L).

5.4. Constituintes iônicos principais

Nas águas subterrâneas, a grande maioria das substâncias dissolvidas encontra-se no estado iônico. No presente estudo, são apresentados os principais constituintes iônicos encontrados no SAGC, e que representam quase a totalidade dos íons presentes (ANEXO A, ANEXO B).

5.4.1. Sódio

O sódio é um dos metais alcalinos mais importantes, sendo o sexto elemento em ordem de abundância nas águas naturais. Está presente nas águas em decorrência da ampla distribuição nos minerais sódicos, da baixa estabilidade química dos minerais que contém este cátion e da solubilidade elevada dos compostos químicos.

Nas rochas ígneas, o sódio ocorre nos feldspatos, feldspatóides (nefelina) e alguns silicatos ferromagnesianos alcalinos. O processo de hidrólise, atuante nos silicatos, libera o sódio para as águas, onde pode também formar complexos iônicos como NaCO_3^- , Na(H)CO_3 e NaSO_4^- , entre outros. Em sedimentos, o sódio pode ainda

estar presente como impureza no cimento de rochas clásticas ou sob forma de cloreto (halita) precipitado por águas marinhas.

Em geral, o sódio é relacionado diretamente ao aumento da salinidade das águas, mantendo, assim, correlação direta e positiva com o cloreto e sendo relacionado à provável dissolução de halita.

A concentração do sódio varia, em geral, entre 0,1 a 100 mg/L nas águas subterrâneas. Nas águas do SAGC a concentração de sódio está compreendida entre 41 e 752 mg/L, distribuindo-se em duas populações distintas (41 a 66 mg/L e de 297 a 752 mg/L). O Grupo 1, discriminado estatisticamente, apresenta o mais baixo conteúdo de sódio, o que é relacionado à influência das águas do SAFPC. Nas amostras próximas às rochas do embasamento granítico a concentração de sódio excede a de cloreto sugerindo que fontes adicionais de sódio podem estar presentes e que processos de troca de cátions em argilo-minerais podem ser atuantes.

Altos níveis de sódio em águas vem sendo associados a cardiopatias, sendo recomendável o consumo de águas com teores menores que 20 mg/L para pessoas que possuam predisposição genética à problemas cardiovasculares, inclusive pressão alta, e também por mulheres grávidas. Concentrações elevadas de sódio em águas de irrigação podem reduzir a permeabilidade do solo, influenciando o crescimento das plantas, em particular, se as concentrações de Ca e Mg são baixas.

5.4.2. Potássio

Apesar do potássio e o sódio pertencerem ao mesmo grupo de metais alcalinos, o comportamento dos dois elementos nos processos de solubilização é diferente, pois a hidrólise de silicatos ricos em potássio é mais lenta, o que explica as concentrações mais baixas deste elemento. Adicionalmente, o potássio é adsorvido mais eficazmente pelas argilas que o sódio, propiciando a neoformação de ilita. Ocorre principalmente na composição de feldspatos, micas e feldspatóides (leucita). Em sedimentos está igualmente presente em feldspatos de arenitos arcoseanos, micas e argilo-minerais (ilita). Depósitos evaporíticos possuem sais de potássio (silvita e

carnalita, entre outros) e constituem a principal fonte deste elemento em salmouras naturais.

Nas águas naturais a concentração de potássio comumente é 10 vezes menor que a concentração de sódio (DAVIS; DeWIEST, 1996). Os teores de potássio nas águas subterrâneas do SAGC são inferiores a 15 mg/L e, em sua grande maioria, estão compreendidos entre 1 a 5 mg/L.

Para os seres humanos, o potássio serve para regular batimentos cardíacos, controlar os impulsos nervosos e contrações musculares. Sua carência pode provocar fadiga, baixa taxa de açúcar no sangue e insônia, enquanto o excesso responsável por quadros de câimbras, fadiga, paralisia muscular e diarreia (FEITOSA; FILHO, 1997). O potássio é muito importante para o desenvolvimento dos vegetais, sendo adicionado ao solo como fertilizante.

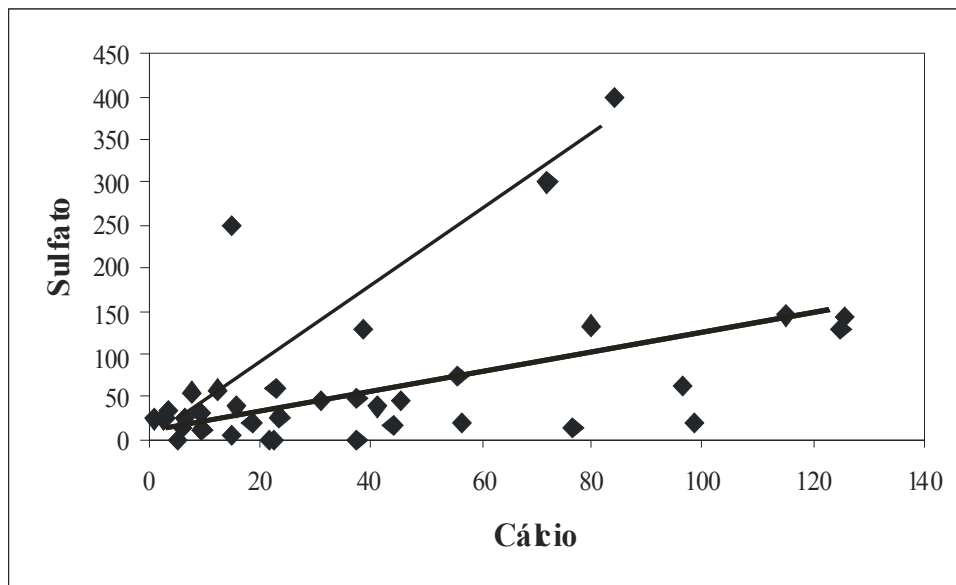
5.4.3. Cálcio

O cálcio é dos cátions mais abundantes nas águas subterrâneas, sendo considerado um dos principais constituintes da água e o principal responsável pela dureza. Tem como fontes mais comuns em rochas ígneas e metamórficas minerais como plagioclásio e silicatos ferromagnesianos (piroxênios, anfibólios, epidotos, etc), enquanto em rochas sedimentares e outras metamórficas (mármore) aparece como componente principal em carbonatos (calcita, aragonita e dolomita) e sulfatos (gipsita e anidrita). O cálcio ainda é componente da fluorita (fluoreto de cálcio) e de várias espécies de zeolitas.

A forma iônica mais comum de cálcio em águas subterrâneas é Ca^{2+} , mas também pode formar complexos como CaHCO_3^+ e CaSO_4 (aq). O fator limitante mais importante para a solubilidade do cálcio é o equilíbrio com os carbonatos. Assim, em sistemas Ca^{2+} - HCO_3^- a concentração de cálcio é inversamente correlacionada ao pH. Os sais de cálcio possuem solubilidade moderada a elevada, sendo comum a precipitação de carbonato de cálcio, em caso de supersaturação da solução. A solubilidade do bicarbonato de cálcio é aumentada em presença de Na^+ e K^+ .

As águas subterrâneas apresentam teores de cálcio que variam entre 10 e 100 mg/L. Em águas do SAGC o conteúdo é de até 125 mg/L e apresenta uma correlação positiva fraca com o sulfato (FIG.3).

FIGURA 3 – Gráfico binário das concentrações (mg/L) de cálcio *versus* sulfato, as retas indicam a existência de 2 linhas de tendências.



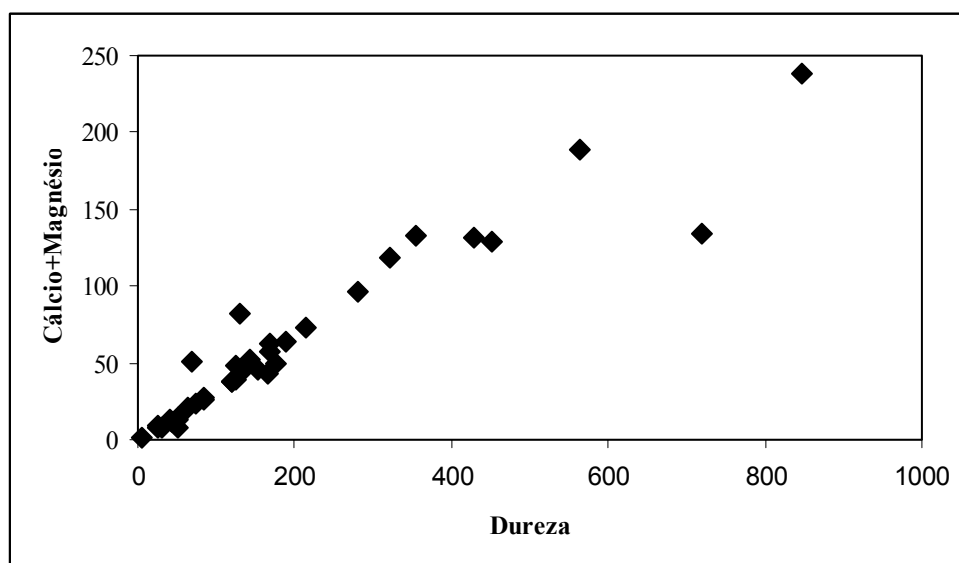
No corpo humano o cálcio tem a função de manter os ossos saudáveis, além de atuar no mecanismo de coagulação do sangue e controlar impulsos nervosos e contrações musculares. A carência provoca raquitismo e osteoporose e seu excesso é responsável por dores musculares, fraqueza, sede, desidratação, enjôo e cálculos renais.

É benéfico na agricultura, sendo essencial para o crescimento dos vegetais e sua abundância em águas para irrigação tende a favorecer a redução dos perigos da alta concentração de sódio nos solos.

5.4.4. Magnésio

O magnésio apresenta comportamento similar ao cálcio, embora seja mais solúvel e difícil de precipitar. Junto com o cálcio é diretamente responsável pela dureza das águas (FIG. 4) e pelo gosto salobro.

FIGURA 4 – Gráfico binário das concentrações (mg/L) de cálcio + magnésio (mg/L) versus dureza (CaCO₃ mg/L).



Os minerais-fonte de magnésio mais freqüentes são carbonatos (dolomita e magnesita), biotita, granadas, piroxênios e anfibólios, clorita e olivina.

Em águas naturais as concentrações são inferiores a 40 mg/L, sendo teores mais elevados geralmente vinculados à salinidade. As águas do SAGC apresentam, em média, concentrações no intervalo 1 e 40 mg/L, havendo cinco amostras que excedem o limite superior e alcançam 154 mg/L.

Nos seres humanos, o magnésio tem a função de converter o açúcar em energia, sendo necessário para o equilíbrio de nervos e músculos. A deficiência em magnésio causa nervosismo e tremores, enquanto o excesso pode provocar distúrbios intestinais, sendo um dos principais princípios ativos de medicamentos laxativos.

Dentro dos limites de tolerância é considerado benéfico na agricultura, por constituir uns dos principais componentes da clorofila.

5.4.5. Ferro e manganês

O ferro é elemento abundante e largamente distribuído em rochas e solos. É dos componentes principais de piroxênios, anfibólios, biotitas, magnetita e olivina, encontrados em rochas ígneas. Nas rochas sedimentares e, em especial, nos arenitos o material de cimentação pode ser constituído por óxidos, carbonatos e hidróxidos de ferro. Os processos de intemperismo liberam o ferro das rochas e o introduzem no ciclo geoquímico.

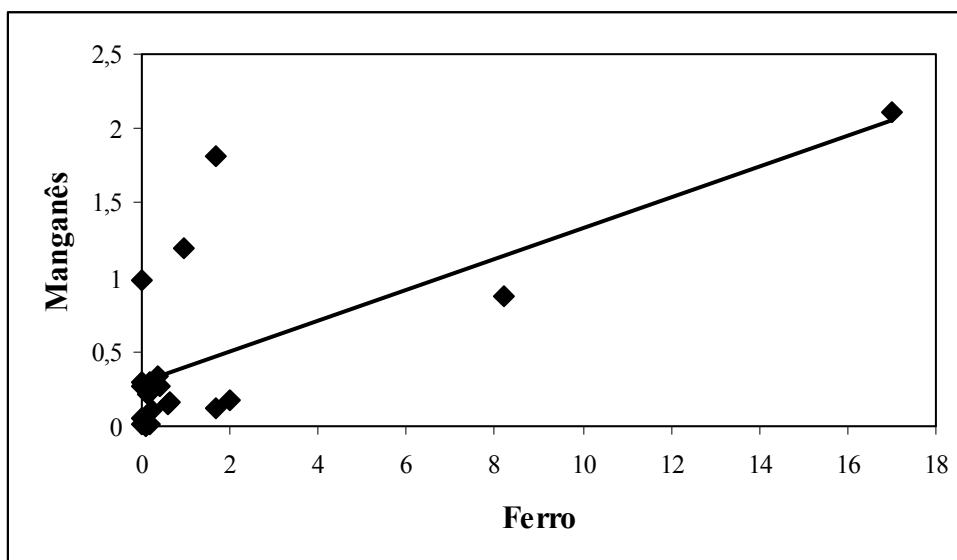
O ferro está presente, sob diversas espécies iônicas, em todas águas naturais com teores normalmente inferiores a 0,3 mg/L. Nas águas do SAGC os valores ferro total são relativamente elevados, em torno de 1,00 mg/L, tendo registrado a amostra do poço 13A registrado 57 mg/L, o que conferiu coloração alaranjada à água, pouco tempo após a coleta, indicando oxidação do ferro.

O comportamento químico do ferro e sua solubilidade em água dependem do estado de oxidação no sistema em que está presente. Ocorre principalmente sob a forma de hidróxido férrico (Fe^{+3}), mas também é verificado como hidróxido ferroso (Fe^{+2}), que é instável na presença do oxigênio do ar, passando para o estado férrico.

Entretanto, deve-se atentar que altos teores de ferro em água subterrânea também podem estar ligados à ocorrência de ferrobactérias, à corrosão do revestimento do poço ou à decomposição de vegetais concentradores do metal. Aumento no teor de ferro é ainda registrado por contaminação antropogênica, em zonas próximas a aterros sanitários ou depósitos de lixo orgânico decomposto.

Nas águas do SAGC, amostras com conteúdo maior que 1mg/L de ferro (PDU 6, PDU 54 e PDU 80) mostram nítida correlação positiva com os maiores valores de manganês, identificando o comportamento geoquímico semelhantes dos dois metais em meio aquoso (FIG. 5).

FIGURA 5 - Gráfico binário da relação ferro (mg/L) *versus* manganês (mg/L), mostrando correlação positiva entre os dois elementos.



A avaliação do ferro nas águas subterrâneas, para o consumo humano, dá-se em função das suas propriedades organolépticas, sendo o valor máximo para consumo humano de 0,3 mg/L conforme a Portaria nº 518 do Ministério da Saúde. Assim, as águas do SAGC, em sua maioria, extrapolam o limite de potabilidade, sendo inapropriadas para consumo.

O ferro é um elemento essencial para o metabolismo de plantas e animais. No corpo humano, o ferro atua na formação da hemoglobina e sua carência pode causar anemia, enquanto o consumo em excesso pode aumentar a incidência de problemas cardíacos e diabetes.

O manganês mostra comportamento químico semelhante ao ferro, sendo encontrado nos mesmos minerais e rochas, embora seja menos abundante que este elemento no meio ambiente e, conseqüentemente, possui concentração mais baixa nas águas naturais. Participa do ciclo biológico e é liberado durante a decomposição de plantas.

A principal espécie química de manganês em águas é Mn^{+2} , podendo também ser registrado como Mn^{+3} . Na forma mais reduzida (Mn^{+2}) é instável e em presença de oxigênio passa MnO . Óxidos de manganês podem se acumular em

sedimentos de rios, (HEM, 1985), que podem conter teores relativamente elevados deste metal, principalmente em águas subterrâneas associadas com ambientes paludais ou antigos canais.

Em águas subterrâneas em geral ocorre em teores baixos (<0,2 mg/L), embora possa alcançar dezenas de mg/L em águas associadas com depósitos petrolíferos ou águas térmicas altamente mineralizadas.

As águas do SAGC apresentam teores de manganês variáveis entre <0,003 mg/L (limite de detecção do método analítico utilizado) e 2,11 mg/L, com média de 0,46 mg/L, sendo a ampla maioria dos valores compreendidos até 0,335 mg/L.

5.4.6. Cloreto

O íon cloreto nas águas subterrâneas pode ter origem ligada a várias fontes, como dissolução de sais e minerais, água marinha trapeada nos sedimentos e fontes antropogênicas. Este ânion é muito solúvel e estável em solução, somente precipitando em condições de forte evaporação que proporciona supersaturação das águas. A solubilidade dos sais de cloro em geral não envolve reações tipo oxidação/redução, tornando este elemento um dos mais móveis no ciclo geoquímico.

Em aquíferos fraturados ígneos e metamórficos, comumente é proveniente da hidrólise de minerais ferromagnesianos, sendo presente nas águas sempre em baixos teores, o que é evidente no SAFFc (ROISENBERG, 2001; ROISENBERG *et al.*, 2003). Depósitos sedimentares de ambiente marinho ou desértico, em particular os evaporíticos, contém vários sais ricos em cloro, sendo a halita (NaCl) o mais importante, seguido de carnalita (KMgCl₃. 6H₂O), silvita (KCl) e outros (FETH, 1981).

O cloreto está presente em todas as águas naturais, sendo o limite máximo de aceitação para consumo humano de 250 mg/L (Portaria nº 518 do Ministério da Saúde). Poços contaminados por efluentes de aterros sanitários e lixões possuem altas concentrações de cloreto. O mesmo ocorre no caso de contaminação por fossas sépticas, considerando-se que a urina possui elevados teores de cloreto e outros sais.

Neste caso, as anomalias de cloreto são em geral associadas a altas concentrações de nitrato e bactérias.

Aqüíferos costeiros que sofrem ingressões marinhas apresentam altas concentrações de cloreto, às vezes superiores à da água do mar (18.000 e 21.000 mg/L), o que pode ser correlacionado com elevados tempos de residência e baixa velocidade de fluxo. Em salmouras naturais, como mares interiores ou lagos salgados em condições de forte evaporação, o teor de cloreto pode alcançar 220.000 mg/L.

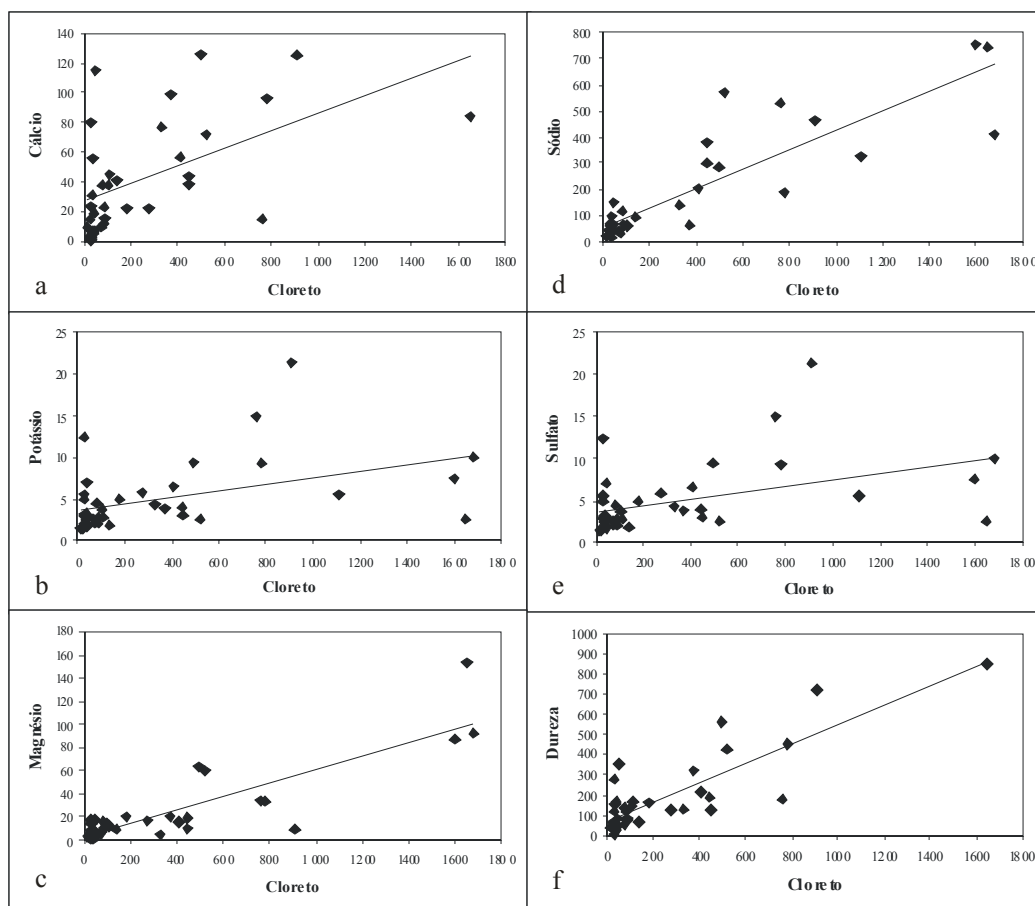
As águas subterrâneas geralmente possuem conteúdos de cloreto inferiores a 100 mg/L. No caso do SAGC, os teores situam-se entre 13,2 e 1650 mg/L, havendo tendência de aumento à medida que aumenta a distância de contato com o embasamento cristalino, sendo os maiores conteúdos registrados em poços próximos ao Lago Guaíba. Este fato parece refletir a influência das águas do SAFPC que ingressam através de fraturas no SAGC, dissipando-se o efeito com a distância.

Em áreas em que a mistura de águas é minimizada e os poços são perfurados somente nos sedimentos Cenozóicos, a geologia exerce um papel preponderante e o registro de sedimentos finos lamosos possui impacto no aumento do teor de cloreto. Em outros casos, como na área do Lami, verifica-se aumento do teor de cloretos a partir da profundidade de 14 metros, o que pode ser relacionado ao efeito de diluição com as águas meteóricas nos níveis superficiais e/ou registro de sedimentos finos em profundidade. Embora o cloreto seja um ânion determinante para a caracterização do SAGC, nem todas as amostras possuem cloreto elevado.

O cloreto apresenta correlação positiva com o cálcio, potássio, magnésio, sódio, sulfato, dureza. (FIG. 6)

A origem do íon cloreto no SAGC aparentemente possui relação direta com a dissolução de halita, como evidencia a correlação linear e positiva que apresenta com o sódio (FIG. 6d).

FIGURA 6 – Gráfico binário das concentrações (mg/L) cloreto *versus* cálcio (a), potássio (b), magnésio (c), sódio (d), sulfato (e), dureza (mg/L CaCO₃), mostrando nítida correlação positiva entre os elementos.



Teores de cloreto superiores a 300 mg/L são considerados tóxicos para a maioria dos vegetais, inibindo seu crescimento. No caso dos seres humanos o consumo de águas altamente cloretadas pode causar hipertensão arterial, sendo de 250 mg/L o limite de potabilidade da Portaria nº 518 do Ministério da Saúde, o que desqualifica parcela ponderável de poços do SAGC. Teores de cloreto superiores a 500 mg/l tornam a água corrosiva para filtros de poços tubulares.

5.4.7. Sulfato

Origina-se da oxidação de minerais sulfetados presentes nas rochas, como pirita e calcopirita, e da lixiviação de compostos sulfatados (gipsita e anidrita).

Em condições redutoras, o íon sulfeto (S^{-2}) é a forma dominante de enxofre nas águas subterrâneas, enquanto em meios oxidantes, sulfato(SO_4^{-2}) e sulfato ácido ($HSO_4\text{-aq}$) são as espécies estáveis. Os sais de sulfato são, em sua maioria, moderadamente solúveis a muito solúveis e, em água doce, o sulfato de cálcio ($CaSO_4$) satura a 1500 mg/L. O Oceano Atlântico apresenta, em média, 2810 mg/L de sulfato, que pode alcançar até 7200 mg/L em águas hipersalinas de mares interiores ou lagos salgados. Em meio redutor e com abundante matéria orgânica, este ânion pode sofrer redução bacteriana passando a S^{-2} . O sulfato ácido predomina nas águas muito ácidas ($pH < 2$), devido à dissociação incompleta do ácido sulfúrico (HEM, 1985).

As águas subterrâneas apresentam geralmente teores de sulfatos totais inferiores a 100 mg/L (HEM, 1985). Análises de enxofre nas águas do SAGC mostram valores inferiores aos limites de detecção do método analítico. As águas do SAGC apresentam teores variáveis de sulfato, a maioria situando-se entre 20 e 70 mg/L, com média próxima a 85 mg/L. Valores superiores podem alcançar até 500 mg/L (poço 4A). A correlação entre os teores de sulfato e o pH é negativa, havendo forte dispersão dos pontos. No caso do cálcio, FIG. 3, a correlação é positiva e sugere, como já assinalado, duas linhas de tendência, aparentemente relacionadas aos grupos estatisticamente determinados.

As relações com o cálcio determinam que a origem do sulfato nas águas do SAGC pode ser resultado da dissolução de gipsita, não havendo correlações com o ferro que justifiquem a oxidação de sulfetos. Águas meteóricas podem conter sulfato em sua composição, decorrente da poluição atmosférica, mas os valores médios registrados em Porto Alegre, da ordem de 2,3 a 6,1 mg/L (ZURITA; TOLFO, 1997) demonstram que esta é de menor importância. Neste estudo foi constatada a presença de gipsita em lente de sedimentos lamosos encontrada a mais de 6 metros de profundidade (poço 1A). Assim, a gipsita (e/ou anidrita) pode ter sido precipitada em ambientes subaquáticos abertos ou de circulação restrita, sob condições de clima seco a árido, como os que

prevaleceram durante parte do Quaternário (TOMAZELLI *et al.*, 2000), sendo posteriormente lixiviada.

A ingestão de águas subterrâneas com excesso de sulfato (> 400 mg/L) pode causar efeitos laxativos (BATALHA; PARLATORE, 1977) e na presença de magnésio e sódio pode provocar distúrbios gastrintestinais. O sulfato ferroso é de alta periculosidade se consumido na forma pura, podendo ser fatal se ingerido por crianças em quantidades superiores a 7,8 g.

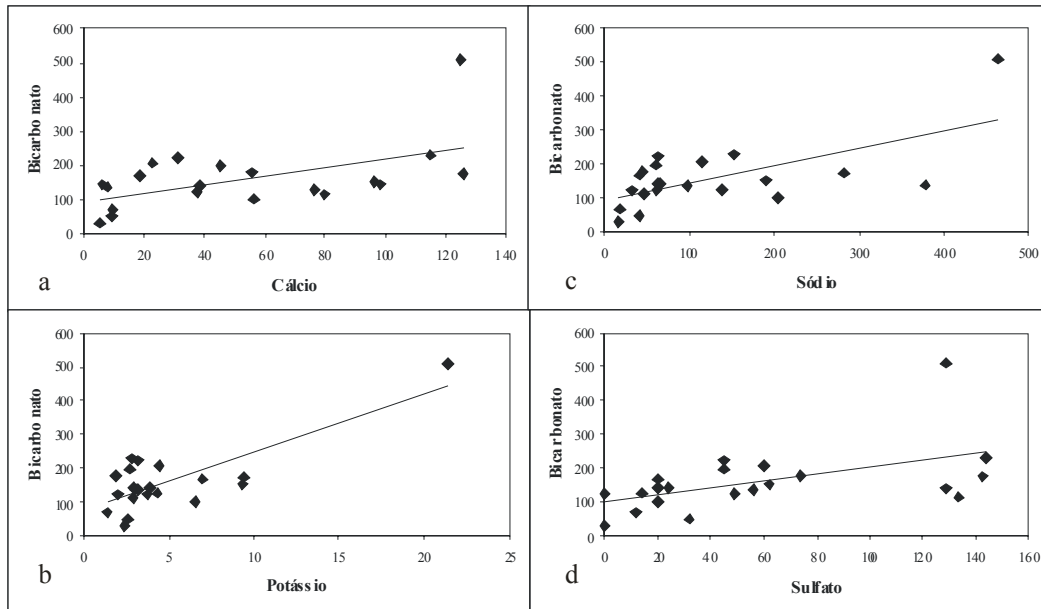
5.4.8. Bicarbonato

Este íon não sofre transformação por oxidação ou redução em águas naturais, podendo, porém, precipitar com relativa facilidade sob forma de carbonato de cálcio. Os valores de bicarbonato variam entre 50 e 350 mg/L em águas doces, enquanto a água do mar possui teores da ordem de 140 mg/L.

No SAGC os valores de bicarbonato oscilam entre 47,3 e 510,9 mg/L, sendo a média de 165,9 mg/L, embora exista um *gap* evidente de amostras entre 230 mg/L (PDU 6) e 510 mg/L (PDU 80), o que pode ser resultante de amostragem não representativa. Neste sistema, o bicarbonato mantém correlações positivas com o cálcio, potássio, sulfato (FIG.7).

A origem do bicarbonato, pelas correlações elementais obtidas, deve ser relacionada com a dissolução de calcita e com a influência dos eventos transgressivos marinhos na área recoberta pelos depósitos cenozóicos, sendo aparentemente menor o aporte por CO₂ atmosférico. O poço PDU 80 (CEASA) que representa o valor mais elevado de bicarbonato possui vários parâmetros deslocados da média e está localizado em área de sedimentos lamosos com elevado teor de matéria orgânica, e lentes de areia intercaladas.

FIGURA 7- Gráficos binários das relações bicarbonato (mg/L) versus (a) cálcio (mg/L); (b) potássio (mg/L); (c) sódio (mg/L) e (d) sulfato (mg/L).



5.4.9. Nitrato

Na presença de oxigênio, o nitrogênio biológico é sucessivamente oxidado para amônia, nitrito e finalmente nitrato, que é o produto final da oxidação da matéria orgânica. A água do mar possui teores em torno de 1 mg/L de nitrato.

Águas subterrâneas apresentam geralmente teores de nitrato no intervalo de 0,1 a 10 mg/L e considera-se que teores acima de 10 mg/L podem ser indicativos de contaminação por atividade antropogênica (esgotos, fossas sépticas, depósitos de lixo, cemitérios, adubos nitrogenados, etc). A contaminação, neste caso, pode elevar os teores de nitrato até 1000 mg/L.

As águas do SAGC possuem concentrações de nitrato variáveis entre < 0,04 mg/L, limite de detecção do método analítico utilizado, e 3,2 mg/L, sendo um único valor registrado como 19,26 mg/L, abaixo do valor máximo admitido pela Portaria nº 518 do Ministério da Saúde. Em Porto Alegre, foram verificados três poços do SAFPC com alto conteúdo de nitrato, correspondentes ao Ginásio da Brigada Militar

(77,69 mg/L), Hotel Umbu (47,89 mg/L) e Colégio Maria Imaculada Conceição (39,74 mg/L), em todos casos decorrentes de provável contaminação por precárias condições de saneamento, o que se confirma nas análises bacteriológicas.

Altas concentrações de nitrato podem produzir intoxicação em crianças ou levá-la à morte por metahemoglobinemia (cianose) em casos extremos. O nitrato também tem ação na produção de bactérias nitrosaminas no estômago, substâncias essas conhecidas como carcinogênicas. Embora seja prejudicial à saúde, o nitrogênio em sua forma oxidada é altamente benéfico na agricultura.

5.5. Constituintes Iônicos Secundários

Existem inúmeros constituintes iônicos secundários com concentrações inferiores a 1 %, neste estudo foram analisados os constituintes freqüentemente encontrados nas águas subterrâneas, ou que representam algum indicativo de contaminação antropogênica.

5.5.1. Fosfato

Em águas naturais a concentração de fosfato é geralmente inferior a 0,5 mg/L (MATHESS; HARVEY, 1982). Teores superiores a 1,0 mg/L, em sua maioria, decorrem de contaminação por fonte antropogênica, relacionada a despejo de efluentes domésticos contendo detergentes e, nas áreas rurais, pela aplicação de fertilizantes fosfatados, inseticidas e pesticidas.

A fonte primária de fósforo na natureza é o fosfato de cálcio, em suas diversas formas (fluorapatita, cloroapatita e hidroxiapatita), abundante, especialmente em rochas ígneas alcalinas e alguns depósitos sedimentares de origem orgânica (fosforitos). A decomposição de matéria orgânica pode ser responsável pela entrada de HPO_4^{2-} no ciclo geoquímico e nas águas subterrâneas.

O conteúdo de fosfato nas águas do SAGC está compreendido entre < 0,01 mg/L (limite de detecção do método analítico utilizado) e 0,58 mg/L. O poço PDU

80, localizado na CEASA, apresentou valor anômalo de 3,61 mg/L, o que pode ser explicável pela extensa urbanização da área em condições de saneamento precário.

5.5.2. Sílica

O elemento silício é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre e, combinado com o oxigênio, com o qual possui forte ligação iônica, dá origem a tetraedros de óxido de silício ou sílica (SiO_2).

Durante o intemperismo, entretanto, o silício geralmente aparece na forma hidratada, representada como H_4SiO_4 ou $\text{Si}(\text{OH})_4$, que possuem forte estabilidade química e baixa solubilidade, muitas vezes constituindo fases coloidais. A hidrólise de silicatos, neste caso, constitui a principal fonte de sílica das águas, embora outras fontes pontuais de origem orgânica ou endogênica possam ser apontadas, como a formação e acumulação de carapaças de organismos (algas e radiolários) e a precipitação de sílica em fontes termais. A precipitação de sílica a partir de águas subterrâneas também é registrada e é responsável pela cimentação de rochas sedimentares siliclásticas.

Nos oceanos os teores de sílica são baixos, em geral menores que 1 mg/L, enquanto as águas superficiais possuem 1 a 30 mg/L, havendo registros de até 100 mg/L em águas subterrâneas.

As concentrações de sílica nas águas do SAGC oscilam entre < 20 mg/L (limite de detecção do método analítico utilizado) e 97 mg/L, com média de 44 mg/L, registrando-se uma única amostra com 256 mg/L (PDU 54), que pode ser devido à presença de material coloidal, não retido durante a filtração. Este fato pode ser comprovado em outros poços nos quais, durante o tratamento de digestão ácida para análise de ferro, observou-se intensa precipitação de colóides.

A presença de sílica nas águas não é prejudicial à saúde, nem à agricultura, mas pode tornar sua utilização inapropriada para fins industriais, ao formar incrustações resistentes em caldeiras.

5.5.3. Zinco, chumbo e cádmio

Estes metais possuem comportamento similar no ciclo geoquímico. O zinco constitui o mais solúvel dos metais pesados e, em decorrência, é mais abundante no meio ambiente e nas águas. As principais fontes primárias naturais de chumbo, zinco e cádmio são os sulfetos, em especial a blenda (ZnS) e galena (PbS), que contém concentrações apreciáveis de todos os três metais, sendo encontrados em rochas ígneas, sedimentares e depósitos filoneanos. O zinco pode substituir diadolicamente o ferro e o magnésio em alguns silicatos e óxidos, sendo também presente em carbonatos.

Os três metais são ainda associados com hidrocarbonetos de petróleo e seus derivados, sendo esta uma das principais fontes de contaminação antropogênica de águas. Outras fontes de contaminação também devem ser registradas, em especial, produtos e processos metalúrgicos e galvânicos, resíduos de tintas e borrachas e outros.

As concentrações de zinco, cádmio e chumbo nas águas naturais é da ordem de 10 µg/L a 20 µg/L, ocasionalmente podendo atingir até 100µg/L de chumbo em águas de chuva, em áreas com poluição atmosférica por chumbo contido na gasolina.

Neste estudo, as amostras de águas do SAGC apresentam valores máximos de 3,1 mg/L, 0,005 mg/L e 0,06 mg/L, respectivamente para zinco, cádmio e chumbo. Estes valores são inferiores aos estabelecidos pela Portaria nº 518 do Ministério da Saúde, no caso do zinco e cádmio, este último com um único registro de 0,008 mg/L (PDU 21). No caso do chumbo, resultados analíticos de águas de chuva na área de Porto Alegre registram concentrações máximas de 0,21 mg/L (ZURITA; TOLFO, 2000), o que pode contribuir para o aumento deste metal nas águas subterrâneas do aquífero freático.

5.5.4. Fluoreto

A principal fonte de fluoreto na natureza é o fluoreto de cálcio (fluorita), sendo ainda importante o registro do fosfato de cálcio (fluorapatita), por constituir um acessório presente em quase todas rochas ígneas e metamórficas; e o fluoreto de sódio e

alumínio-criolita (Na_3AlF_6), este mais raro e restrito a associações magmáticas alcalinas. O fluoreto pode substituir a hidroxila (OH^-) em anfibólios e micas, cuja hidrólise também pode disponibilizar flúor para as águas.

O fluoreto ocorre em concentrações entre 0,1 e 1,5 mg/L em águas naturais, inclusive na água do mar, podendo alcançar teores anômalos de até 50 mg/L em águas subterrâneas muito sódicas e com pouco cálcio.

As águas do SAGC apresentam concentrações relativamente baixas de fluoreto, inferiores a 1,40 mg/L quando a captação é exclusivamente na seqüência sedimentar, isto é, não apresentam mistura com águas do SAFPC. Nos demais casos, o conteúdo de fluoreto varia entre 1,88 e 3,02 mg/L (7 amostras), enquanto 5 outras amostras apresentam valores superiores, que podem atingir 5,39 mg/L (PDU 81). Em Porto Alegre, os elevados teores de fluoreto nas águas subterrâneas são considerados como resultado da dissolução da fluorita no SAFPC (ROISENBERG, 2001; ROISENBERG *et al.*, 2003).

O fluoreto, em baixos teores ($< 1,0$ mg/L), é benéfico à saúde, prevenindo a cárie dentária em crianças na fase de crescimento. Em doses maiores, causa manchas ou mesmo perda de dentes (fluorose dentária), enquanto a ingestão continuada de águas com teores elevados de fluoreto ($> 6,0$ mg/L) pode levar a metabolização da doença com aparecimento de fluorose óssea.

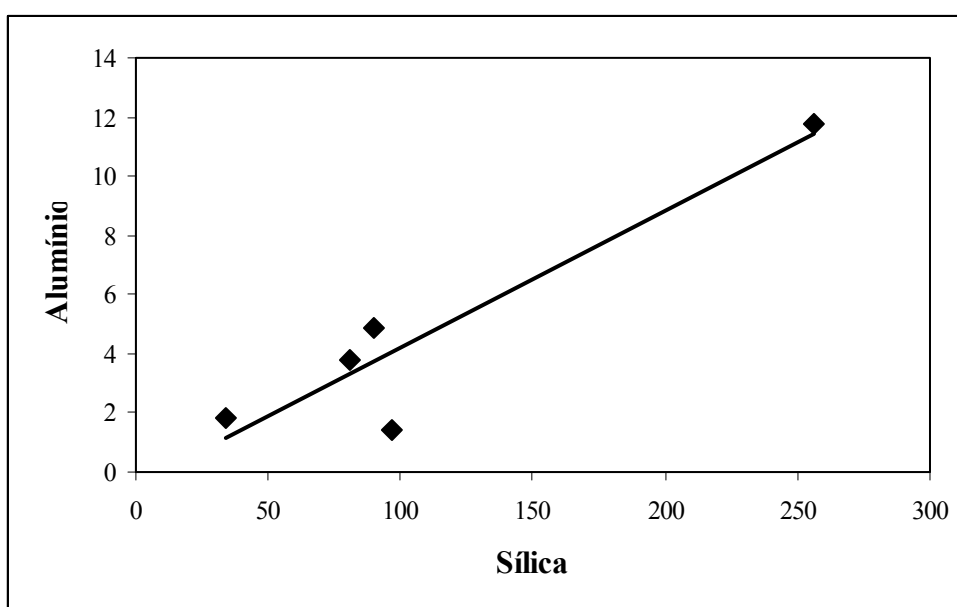
5.6. Constituintes menores

Além dos parâmetros anteriormente descritos foram analisados cianeto, nitrito, enxofre, alumínio, arsênio, bário, berílio, cobalto, cobre, cromo total, lítio, mercúrio, molibdênio, níquel, prata, selênio e vanádio, com a finalidade de avaliar a qualidade das águas do SAGC. Alquil Benzeno Sulfonato de Sódio (ABS), por se tratar de um surfactante, provém de águas que contém produtos de limpeza, como detergentes, existindo uma aparente relação com os resultados de fosfato.

Metais que podem apresentar caráter tóxico e cumulativo à saúde humana não foram detectados em níveis significativos nas águas do SAGC, à exceção

do alumínio. Este metal é registrado em concentrações superiores ao limite da Portaria nº 518 do Ministério da Saúde (0,2 mg/L) em cinco poços, em que se situa no intervalo 1,4 a 11,8 mg/L. Em todos casos em que o alumínio é elevado verifica-se que o teor de sílica é igualmente aumentado (FIG. 8), o que pode indicar que os dois elementos encontram-se combinados sob forma coloidal, como registrado anteriormente.

FIGURA 8 - Gráfico binário da relação sílica (mg/L) *versus* alumínio (mg/L), mostrando nítida correlação positiva entre os dois elementos.



5.7. Análise bacteriológica

Foram analisados os parâmetros coliformes totais, fecais e contagem de bactérias heterotróficas (CBH), a fim de determinar e caracterizar possíveis fontes de contaminação por fossas sépticas e outras fontes antropogênicas. Estes parâmetros visam fundamentalmente à proteção da saúde pública e o controle de microorganismos patogênicos potencialmente prejudiciais ao homem.

Coliformes são bacilos gram-negativos, aeróbios ou anaeróbios, não formadores de esporos, capazes de crescer na presença de componentes ativos de

superfície e que fermentam a lactose, podendo indicar a presença de bactérias patogênicas. O registro positivo de coliformes totais não necessariamente indica presença de bacilos patogênicos, pois coliformes fecais, estes patogênicos, podem não ser verificados, isto é, todas as bactérias do grupo coliformes totais podem ser encontradas em ambientes naturais.

Os coliformes fecais geralmente incluem a bactéria *Escherichia coli*, constituindo subgrupo dos coliformes totais que vivem no intestino humano e de animais. Encontrados em amostras de água indicam a presença de organismos potencialmente patogênicos, tornando a água imprópria para consumo humano.

Os resultados obtidos na análise bacteriológica das águas subterrâneas do SAGC demonstram que somente 2 poços possuem valores de coliformes totais expressivos de 770 e 2400 UFC, respectivamente PDU 80 e PDU 54, enquanto os demais se encontram em patamar inferior a 20 UFC. O poço PDU 80 é o único que apresenta registro de coliformes totais (3 UFC), devido às precárias condições de saneamento na área, desqualificando a água para consumo humano.

5.8. Modelamento geoquímico

A água subterrânea reage com rochas e minerais no aquífero e a extensão da reação depende da atividade química da solução, do quimismo dos minerais presentes no aquífero e do tempo de interação entre as duas fases. O estado de equilíbrio da água com a fase mineral pode ser calculado pelo índice de saturação (SI), utilizando os resultados analíticos. O índice de saturação é definido como logaritmo da razão da atividade dos íons dissolvidos pela constante de equilíbrio em temperatura de 25°C:

$$SI = \log Q/K \quad \text{onde:}$$

Q é o produto de atividade dos íons dissolvidos e K a constante de equilíbrio.

A supersaturação ($SI > 0$) indica que existe tendência para precipitar a fase mineral considerada. $SI = 0$ condiz com potencial em equilíbrio ou saturado, i.é, as condições são metaestáveis e não prevalece dissolução ou precipitação. Subsaturação

($SI < 0$) significa que as condições são favoráveis à dissolução da fase mineral considerada. Devido às incertezas nos resultados analíticos e nos dados termodinâmicos, valores de SI compreendidos entre $-0,1$ e $0,1$ são considerados como equivalentes a condição de saturação ou em equilíbrio.

O modelamento geoquímico foi executado através do código EQ3/6 (WOLLERY; DAVELER, 1992) para amostras de 3 dos quatro grupos hidroquímicos definidos pelo tratamento estatístico (TAB. 2). Amostras que não possuem todos os parâmetros físico-químicos necessários para o modelamento não foram incorporadas.

O modelamento geoquímico aponta forte supersaturação em fluorapatita ($SI = 3,33$ a $11,59$), sendo os maiores valores do índice de saturação correspondentes ao Grupo 2 de amostras. Vale notar que o valor máximo de SI corresponde ao poço PDU 80, em que condições de saneamento precário favorecem o aporte antropogênico de fosfato, como anteriormente assinalado. Elevada atividade do cálcio na água é um fator que também pode levar à supersaturação em fluorapatita, pois altera de modo significativo o equilíbrio químico (ROISENBERG, 2001). Em contraposição, ao consumo de flúor na formação de fluorapatita, o modelamento geoquímico aponta subsaturação em fluorita nos três grupos de amostras ($SI = -3,17$ a $-0,27$). Estes números indicam que a fluorita possui tendência à dissolução no aquífero e poderia ser uma fonte de flúor para o sistema, em particular se considerado que este mineral é presente no SAFPC e existe misturas de água dos dois sistemas.

Os carbonatos (calcita, aragonita e dolomita) no modelamento geoquímico mostram números condizentes com leve subsaturação no Grupo 1, tendendo ao equilíbrio ou mesmo pequena supersaturação nos grupos 2 e 3 (SI máximo $1,79$ para a dolomita). Assim, considerando-se que os carbonatos aumentam sua solubilidade em pH ácido, o que este não é o caso das águas do SAGC, pode-se afirmar que na interação água-rocha não se verifica dissolução ou precipitação significativa destas espécies minerais.

A gipsita, detectada nos sedimentos, por outro lado, apresenta índices de subsaturação significativos ($SI = -3,18$ a $-1,42$), apontando que processos de dissolução prevalecem nos três grupos hidroquímicos, o que pode justificar os elevados teores de sulfato em várias amostras do SAGC.

Com relação ao quartzo, os dados termodinâmicos obtidos no modelamento geoquímico sugerem leve supersaturação nos três grupos de águas (SI= 0,54 a 1,73), o que indica precipitação e justifica o registro de complexos coloidais silicosos nas amostras do SAGC.

Os valores de SI obtidos no modelamento geoquímico demonstram que gibsita e caolinita estão em franca supersaturação nas águas de dois grupos hidroquímicos (SI= 2,06 a 3,06 para gibsita e SI= 7,65 a 10,15 para caolinita). O terceiro grupo contém uma única amostra cuja análise não é completa para modelamento. Entretanto, as duas amostras que contém os maiores teores de alumínio são aquelas que possuem o maior índice de supersaturação de caolinita+gibsita, o que provavelmente significa que o SI não corresponde ao conteúdo iônico da água, mas o teor de alumínio é decorrente de filtragem inadequada da amostra.

A goethita apresenta igualmente índices de supersaturação significativos nos três grupos hidroquímicos (SI= 0,33 a 5,10). Este resultado é compatível com a distribuição de ferro nas amostras e aquelas com maior valor de SI possuem menor teor de ferro na água. Desta forma, admite-se a potencialidade de formação de precipitados coloidais de ferro, como observado em alguns casos.

A halita, por sua vez, possui valores de SI condizentes com condições de forte subsaturação nos três grupos hidroquímicos (SI= -7,33 a -1,59). A grande maioria das amostras possui SI entre -7,3 e -5,5, o que marca a eficiência dos processos de dissolução, compatibilizando com os teores relativamente elevados de cloreto e sódio em solução.

TABELA 2

Índice de saturação mineral (SI) de fases minerais na definição da carga iônica das águas do SAGC. Convenções: G1, G2, G3 Grupos hidroquímicos estatísticos; SI>0 supersaturação; SI=0 equilíbrio ou saturação; SI<0 subsaturação; ND teores de elementos constituintes não detectados pelo método analítico.

Poço PDU	Fluorita	Calcita	Aragonita	Dolomita	Gibsite	Caolinita	Goetita	Quartzo	Gipsita	Halita	Fluorapatita	
G1	17	-3,17	-3,11	-3,25	-5,16	2,54	8,34	0,33	1,29	ND	ND	ND
	34	-2,15	-1,39	-1,54	-1,70	ND	ND	0,28	1,03	-2,83	-7,33	4,98
	48	-1,62	-0,79	-0,94	-0,65	ND	ND	ND	0,63	-3,24	ND	ND
	54	-1,76	-0,52	-0,67	0,14	3,01	10,15	4,04	1,73	-2,38	-6,60	4,52
	65	-1,63	-0,71	-0,85	-0,35	ND	ND	ND	0,94	-2,33	-7,26	6,22
	68	-1,27	-1,31	-1,45	-1,43	3,04	9,13	3,00	1,17	-2,79	-6,98	6,36
	87	-2,56	-1,35	-1,49	-2,12	3,00	9,18	3,03	1,24	-3,18	-7,11	3,33
	90	-2,12	-1,26	-1,40	-1,69	ND	ND	1,27	0,89	-2,55	-5,70	ND
	91	ND	-2,69	-2,83	-4,26	ND	ND	0,05	1,08	-2,88	-7,08	ND

G2	21	-1,38	-0,30	-0,45	0,30	2,48	7,65	2,46	1,00	-1,93	-5,45	4,83
	8	-0,94	-0,23	-0,37	0,22	ND	ND	2,21	0,98	-1,52	ND	8,57
	13	-0,70	-0,04	-0,18	0,61	ND	ND	2,25	0,67	-2,31	-6,22	10,71
	6	-0,27	0,04	-0,10	0,66	ND	ND	3,02	0,54	-1,42	-6,76	8,24
	7	-0,47	0,22	0,08	0,95	ND	ND	3,71	0,81	-1,88	ND	11,59
	36	-0,83	0,41	0,26	1,62	3,06	8,44	4,07	0,81	-2,19	-6,76	8,53
	37	-0,55	0,35	0,21	1,79	2,06	ND	3,62	ND	-1,52	-5,48	7,10
	38	-0,82	0,14	0,00	1,23	ND	ND	ND	0,80	-2,22	-7,27	8,24
	81	-0,46	0,33	0,18	1,47	ND	ND	4,90	ND	-1,97	-5,39	8,19
	86	-0,27	0,42	0,28	1,09	ND	ND	4,29	0,66	-2,53	-5,94	8,22
	88	-0,99	0,47	0,32	1,67	ND	ND	5,10	0,84	ND	-7,19	9,62

G3	80	-2,79	0,13	0,00	0,54	ND	ND	3,30	0,93	-1,59	-1,59	11,59
----	----	-------	------	------	------	----	----	------	------	-------	-------	-------

5.9. Tratamento estatístico dos dados químicos

O tratamento estatístico, através de análises multivariantes, é uma técnica adequada e necessária para a interpretação de parâmetros analíticos variados em grupos

heterogêneos de amostras. Esta técnica considera simultaneamente a variabilidade das propriedades e o conjunto de amostras analisadas, racionalizando a visão global dos resultados.

Os resultados permitiram agrupar as amostras de águas subterrâneas, de acordo com os parâmetros que possuem maior correlação, no caso específico, cloreto, dureza, sulfato, condutividade, cálcio, magnésio, potássio e sódio. Os valores obtidos para o coeficiente de correlação linear do produto momento entre as variáveis acima especificadas apresentam valores positivos e de significância para 0,05 e 0,01, o que é considerado adequado para o tratamento estatístico (TAB. 3). Ao contrário do que é esperado, as correlações de pH são bem menores e, em alguns casos, negativas.

TABELA 3

Resultado da correlação entre as variáveis para 31 amostras de água subterrânea do SAGC.

** - Correlação é significativa ao nível de 0.01 (2-tailed).

* - Correlação é significativa ao nível de 0.05 (2-tailed).

		Cl	Dureza	SO ₄	CE	pH	Ca	Mg	K	Na
Cl	Pearson	1	,835**	,744**	,970**	-,212	,534**	,815**	,497**	,890**
	Sig.(2-tailed)	.	,000	,000	,000	,253	,002	,000	,004	,000
Dureza	Pearson	,835**	1	,721**	,902**	-,058	,834**	,773**	,490**	,738**
	Sig.(2-tailed)	,000	.	,000	,000	,757	,000	,000	,005	,000
SO ₄	Pearson	,744**	,721**	1	,829**	-,333	,425*	,836**	,247	,876**
	Sig.(2-tailed)	,000	,000	.	,000	,067	,017	,000	,181	,000
CE	Pearson	,970**	,902**	,829**	1	-,183	,622**	,849**	,501**	,922**
	Sig.(2-tailed)	,000	,000	,000	.	,324	,000	,000	,004	,000
pH	Pearson	-,212	-,058	-,333	-,183	1	,225	-,251	-,120	-,343
	Sig.(2-tailed)	,253	,757	,067	,324	.	,224	,173	,521	,059
Ca	Pearson	,534**	,834**	,425*	,622**	,225	1	,440*	,416*	,435*
	Sig.(2-tailed)	,002	,000	,017	,000	,224	.	,013	,020	,014
Mg	Pearson	,815**	,773**	,836**	,849**	-,251	,440*	1	,080	,762**
	Sig.(2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,173	,013	.	,667	,000
K	Pearson	,497**	,490**	,247	,501**	-,120	,416*	,080	1	,459**
	Sig.(2-tailed)	,004	,005	,181	,004	,521	,020	,667	.	,009
Na	Pearson	,890**	,738**	,876**	,922**	-,343	,435*	,762**	,459**	1
	Sig.(2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,059	,014	,000	,009	.

A análise fatorial aplicada para cada poço analisado resultou em valores de cargas, que foram utilizadas para analisar as correlações entre as funções dependentes e independentes (TAB. 4).

TABELA 4

Carga fatorial (F1 e F2) obtida em cada poço analisado.

Poço	F1	F2	Poço	F1	F2
PDU6	0,27023	0,86435	PDU86	-0,1816	1,24401
PDU7	-0,42945	0,61958	PDU87	-0,73722	-0,2873
PDU8	-0,06376	0,64508	PDU 88	-0,66984	1,01403
PDU13	0,0792	1,15257	PDU 90	0,10923	0,05817
PDU17	-0,8231	-0,89553	PDU 91	-0,67416	-0,91979
PDU21	0,91339	1,10967	3A	-0,80248	-0,62234
PDU34	-0,54777	-0,31321	8A	-0,47167	-0,13539
PDU36	-0,42446	0,79844	9A	-0,76814	-0,39203
PDU37	1,33971	1,56483	10A	3,54922	-1,4906

Poço	F1	F2	Poço	F1	F2
PDU38	-0,4423	0,71178	11A	1,51233	-1,90491
PDU48	-0,88871	0,18196	12A	1,24257	-1,54358
PDU54	-0,36664	0,01373	15A	-0,67981	-1,08033
PDU65	-0,45972	-0,16326	16A	-0,59214	-0,0511
PDU68	-0,62206	-0,37246	17A	-0,64846	-1,80448
PDU80	1,88014	2,02102	18A	0,15442	-0,45338
PDU81	0,24304	0,43045			

O relacionamento entre as amostras é expresso através de representação gráfica bidimensional do tipo dendograma (FIG. 9). Considerando o corte em coeficiente de distância da ordem de 7, é possível discriminar quatro grupos de amostras (TAB. 5).

TABELA 5

Grupos formados a partir do dendograma. Obs.:Poços que possuem parâmetros físico-químicos incompletos não são passíveis de correlação.

Grupo	Poços	Grupo	Poços	Grupo	Poços	Grupo	Poços
Grupo 1	PDU 68 PDU 87 9A 3A PDU 54 PDU65 8A 16A PDU 48 1A 2A PDU 34 PDU 17 PDU 91 6A 7A 15 ^a	Grupo 2	PDU 21 PDU 37 PDU 6 PDU 13 PDU 86 PDU 8 PDU 81 PDU 7 PDU 36 PDU 38 PDU 88 PDU 90	Grupo 3	5A 12A PDU 80	Grupo 4	10A 11A

Os quatro grupos discriminados apresentam uma distribuição espacial bem definida com limites paralelos ao embasamento cristalino (SAFPc), havendo concomitante aumento de espessura dos sedimentos em direção ao Lago Guaíba (CAP. IV, FIG. 1 e 2) . As amostras dos grupos 1 e 2 estão mais próximas do embasamento cristalino, seguido do Grupo 3, presente na zona Sul e Norte e do Grupo 4 restrito à área localizada mais ao Sul da cidade, que possui maior espessura de sedimentos.

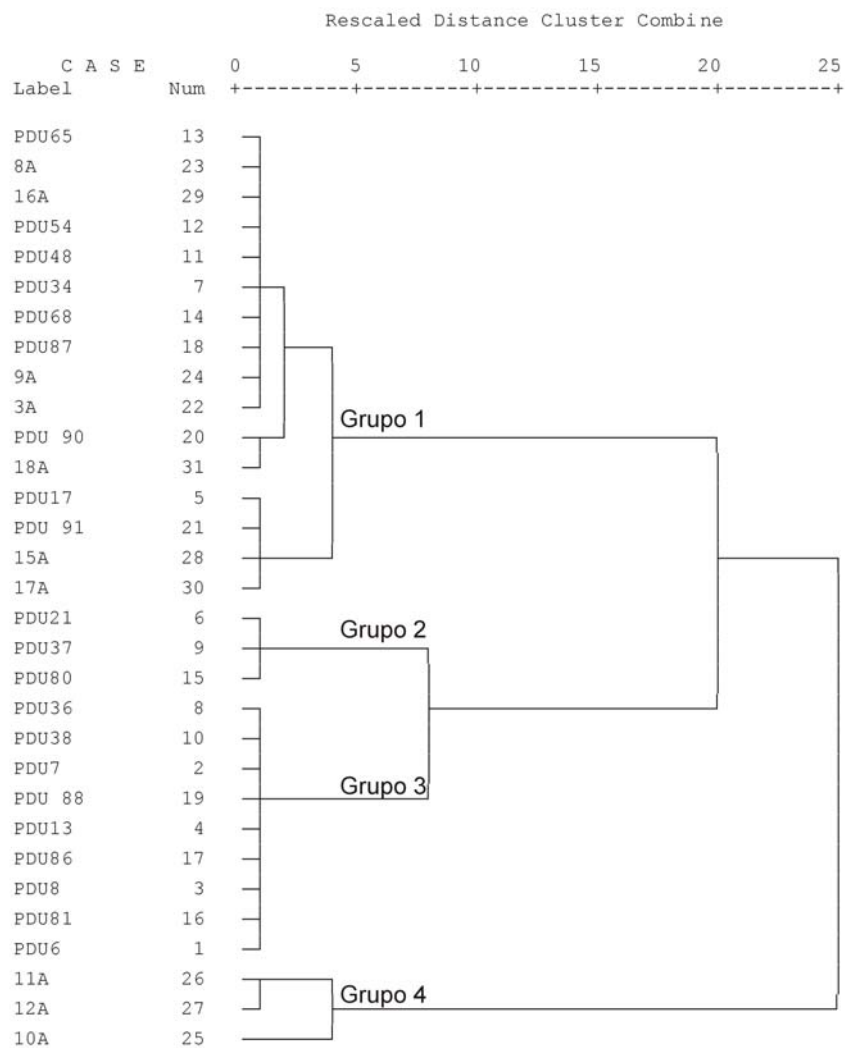
As águas do Grupo 1 possuem os menores valores correspondentes aos parâmetros físico-químicos discriminados no tratamento estatístico. Os grupos 3 e 4 apresentam águas com maior concentração iônica, devido à dissolução e lixiviação dos sais presentes nos sedimentos. O Grupo 2, predominante na área, contém valores intermediários entre os Grupos 1 e os grupos 3 e 4.

FIGURA 9 – Dendrograma extraído do programa estatístico SPSS 11.5.

Dendrogram

***** HIERARCHICAL CLUSTER ANALYSIS **

Dendrogram using Ward Method



VI – CONCLUSÕES

Informações geológicas e hidroquímicas indicam a existência de dois sistemas aquíferos na região de Porto Alegre, Sistema Aquífero Granular Cenozóico e Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano. O presente estudo demonstra a partir da coleta e análise de 39 poços perfurados na cobertura cenozóica que a química das águas dos dois sistemas é diferente e exclusiva, mas existe mútua influência e mistura em diferentes graus nos poços estudados.

O Sistema Aquífero Granular Cenozóico compreende um pacote de sedimentos inconsolidados constituído por areias médias a grossas de composição arcoseana depositadas em diferentes ambientes, intercaladas com lentes siltico-areno-argilosas com acentuado conteúdo de matéria orgânica. Os depósitos são influenciados por sucessivos episódios de transgressões e regressões marinhas ocorridos no Quaternário que deixam impresso carga de sais precipitados.

As águas do Sistema Aquífero Granular Cenozóico são sódico cloretadas, transicionando até cálcico-sódico-bicarbonatadas, composição que marca claramente misturas com águas do Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano pelo aumento do íon fluoreto. Os resultados analíticos demonstram que são elevados e característicos os valores de condutividade elétrica, dureza, sódio, cloreto, sulfato e cálcio.

O tratamento estatístico dos dados analíticos por análise fatorial e análise de agrupamento determina que as variáveis que apresentam maior correlação, além das anteriormente mencionadas são o magnésio e o potássio. A representação bidimensional do tipo dendograma permite estabelecer 4 grupos que reúnem amostras com afinidade química e que possuem uma organização espacial bem definida. Do Grupo 1 em direção ao Grupo 4, há um aumento nas concentrações dos íons principais, o que pode ser associado com maior espessura dos sedimentos e distanciamento em relação às rochas graníticas subjacentes.

O aumento desses elementos sugere que são espécies conservativas e indicadoras de paleoambientes, devido à dissolução de halita e gipsita. A quantidade de sólidos totais nas águas é elevada, o cloreto alcança valores de 909,7 mg/L e o

bicarbonato, 510,90 mg/L. A dissolução dos sais presentes nas camadas de material mais fino dos sedimentos, associada com condições hidrodinâmicas de baixa velocidade de fluxo e elevado tempo de residência, são fatores decisivos para salinização das águas deste aquífero. Observa-se influência de lentes de argila com matéria orgânica em vários locais da região de Porto Alegre, produzindo impacto no aumento do conteúdo iônico das águas.

O modelamento geoquímico demonstra que as águas subterrâneas são subsaturadas em halita, gipsita e fluorita em todas as amostras. O Grupo 1 também é subsaturado em relação à calcita, aragonita e dolomita, com tendência à saturação nas amostras dos grupos 2 e 3. Por outro lado, apresentam-se supersaturadas em gipsita, caolinita, goetita, quartzo e fluorapatita, indicando condições de precipitação.

Do conjunto de elementos analisados no Sistema Aquífero Granular Cenozóico, como arsênio, selênio, bário, cádmio, cobalto, cromo, mercúrio, chumbo, cobre, níquel e prata, que podem exercer efeito tóxico na água subterrânea de consumo público, não foram detectadas concentrações superiores às propostas pela legislação vigente. Entretanto, metais como ferro e manganês, que afetam propriedades estéticas e organolépticas, na grande maioria dos poços apresentam-se em teores elevados e inadequados.

Somente um poço apresentou coliformes fecais, mas condições precárias de saneamento básico, em particular na zona Norte da cidade, aparentemente afetam o aquífero.

Os elevados valores de dureza, cloreto e sulfato, na maioria dos poços, conferem ao manancial hídrico do Sistema Aquífero Granular Cenozóico, localizado ao longo da borda do Lago Guaíba, desde o Norte até o Sul do Município de Porto Alegre, qualidades impróprias para consumo humano, baseado na Portaria nº 518 de 25 de março de 2004, do Ministério da Saúde.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEY, W. **Regional Ground-water Quality**. New York; Van Nostrand Reinhold, 1993. 634p.

APHA, AWWA, WPCF (1998). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington DC, American Public Health Association, 1268 p.

APPELO, C.A.J., POSTMA, D. 1993. 536pp. **Geochemistry groundwater and pollution**. Balkema, Rotterdam.

AYALA, L. 1980. **Contribuição ao estudo da Formação Graxaim do Cenozóico da Planície Costeira do Rio Grande do Sul**. 1980. Dissertação para obtenção do título de Mestre. Instituto de Geociências. UFRGS. 89 p.

BATALHA, B.L; PARLATORE, A.C. 1977. **Controle de qualidade da água para consumo humano: bases conceituais e operacionais**. São Paulo, CETESB, 1977. 198p.

BRASIL. Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Diário Oficial da União, República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, de 26 mar. de 2004, Seção 1, p.266.

CARRARO, C.C.; GAMERMANN, N.; EICK, N.C.; BORTOLUZZI, C.A.; JOST, H.; PINTO, J.F. 1974. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – Brasil, mapa nº 8, 29p., escala 1:1.000.000.

COELHO, E.F. Qualidade da água subterrânea de Porto Alegre. In: **ECOS**. Departamento Municipal de Águas e Esgotos (DMAE) 1997. v. 4, nº 10. p.27.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Guia de Coleta e Preservação de amostras de água**. São Paulo: CETESB, 1988. 150p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Água Subterrânea e Poços Tubulares**. São Paulo. 1978. (Tradução da Edição do original norte-americana "Ground Water and Wells".)

CORDANI, U.; HALPERN, M.; BERENHOLC, M. 1974. Comentários sobre as determinações geocronológicas da Folha Porto Alegre. In: **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo**, texto explicativo das folhas de Porto Alegre e Lagoa Mirim, DNPM, Brasília, p. 70-77.

CUSTODIO, E., LLAMAS, R. 1983. **Hidrologia Subterrânea**. 2 ed . Barcelona: Omega. 2 v. 2359p.

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

DAVIS, S.D.; DeWIEST, R.J.M. **Hidrogeology**. USA: John Wiley, 1996. 366p.

DELANEY, P.J.C. 1965. **Fisiografia de superfície da planície Costeira do Rio Grande do Sul**. Pub. Esp. da escola de Geologia, UFRGS, Porto Alegre, 6:1-195.

DEUTSCH, W.J. **Groundwater Geochemistry: Fundamentals and applications to contamination**. New York: Lewis, 1997. 221p.

DILLENBURG, S.R. Evidências de Sedimentação Deltáica Pleistocênica no bordo da Plataforma Continental do Rio Grande do Sul. In: **1º Congresso ABEQUA**. Porto Alegre. 1987. p. 49-60.

DREVER, J.I. **The Geochemistry of Natural Waters**. USA: Prentice –Hall, 1982. 388p.

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

FENZL, N. **Introdução à Hidrogeoquímica**. Belém: Universidade Federal do Pará, 1988. 188p.

FETH, J.H. 1981. Chloride in Natural Continental Water – a review. **Geological Survey Water-Supply Paper** 2176. United States. p.30.

FRAGOSO CESAR, A.R; FIGUEREDO, M.C.H.; SOLIANI, Jr.,E.; FACCINI, U.F. 1986. O Batólito de Pelotas (Proterozóico Superior/Eo-paleozóico) no Escudo do Rio Grande do Sul. In: XXXIV CONG. BRAS. DE GEOLOGIA. **Anais ...** Goiânia, Goiás, v.3, p.1322-1343.

FREEZE, R.A., CHERRY, J.A. **Groundwater: New Jersey**. 1979. Ed. Prentice Hall. 604p.

FREITAS, M.A. 1998. **Avaliação do Potencial hidrogeológico de terrenos cristalinos através de técnicas de geoprocessamento**. Dissertação de MSc Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande, Porto Alegre.130f.

FREITAS, M.A., LISBOA, N.A. Aspectos da qualidade das águas subterrâneas dos diferentes sistemas aquíferos da região de Porto Alegre, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEA, 9. Salvador, 1996. **Anais...** Salvador: ABAS, 1996. 1 CD.

GOMES, C.B. **Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia**. Ed. Edgar Blücher. 1984. 218 p.

HAUSMAN, A. Circulação em rochas fraturadas – uma observação In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA, 3 Salvador, 1982. **Anais...** Salvador: ABAS, 1982 p. 135- 145

HEATH, R.C. Hidrologia básica de água subterrânea. United States **Geological Survey Water Supply Paper**, 2220. 1998 - 84 p.

HEM, J.D. **Study and interpretation of chemical characteristics of natural water**. Washington DC: USGS, 1985. 363p.

HIRATA, R. 2000. **Recursos Hídricos //In/**: Decifrando a Terra / organizadores: In: TEIXEIRA, Wilson; TOLEDO, Maria C.M.; FAIRCHILD, Thomas R.; TAIOLI, F. Oficina de Textos. São Paulo, p.421-443.

IBGE. **Estimativa da população 2004**. Resultados estimados a partir do CENSO 2000. Disponível em: <http://www.censo.ibge.gov.br/cidades> Acesso: em 10 nov.2004.

JOST, H. 1971. **O quaternário da região norte da Planície Costeira do Rio Grande do Sul – Brasil**. Porto Alegre. 80p. Tese de doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

JUSTUS, J.O.; MACHADO, M.L.A.; FRANCO, M.S. Geomorfologia. In: **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim. Rio de Janeiro: IBGE, 1986. p 313-404.

KNOPPERS, B.A., BIDONE, E.D., ABRÃO, J.J. 1999. **Geoquímica Ambiental de Sistemas Lagunares do Rio de Janeiro, Brasil**. Univ. Federal Fluminense, série geoquímica ambiental n°6, 210 p.

KRAUSKOPF, K.B. **Introduction to geochemistry**. USA: McGraw-Hill, 1967. 721p.

MACHADO, J.L.F. 1993. Características Hidrolíticas dos Sistemas Aquíferos quaternário da Região Adjacente a Porto Alegre – RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEA. 1993. **Anais...** p.21-26.

MACHADO, J.L.F. Mapa Hidrogeológico da Folha de Porto Alegre, escala 1:250.000. In: RAMGRAB, G.E.; WILDNER, W.; CAMOZZATO, E.; org. Porto Alegre folha SH.22-Y-B, Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CPRM. 1 mapa. **Programa de Levantamentos Geológicos Básicos**, Brasília, 1997.144p.

MATHESS, G.; HARVEY, J.C. **The properties of groundwater**. John Wiley & Sons, 1982, 406p.

MENEGAT, R.; PORTO, M.L.; CARRARO, C.C.; FERNANDES, L.A.D. **Atlas Ambiental de Porto Alegre**. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS, 1998. 228 p. Várias escalas.

MENEGAT, R.; KIRCHHEIM, R.E. **Lagos, rios e arroios: as doces águas da superfície**. In: Atlas Ambiental de Porto Alegre. Porto Alegre. Ed. da Universidade/UFRGS, 1998. p.35-38.

MOURA, S.; RUEDA, J.R.J. **Solo: a fina camada que sustenta a vida**. In: Atlas Ambiental de Porto Alegre. Porto Alegre. Ed. da Universidade/UFRGS, 1998. p.43-44.

PESQUISAS SOBRE SOLOS EM UM ATERRO EXPERIMENTAL. 1973. **Plano plurianual de pesquisas rodoviárias**. República Federativa do Brasil Ministério dos Transportes – Departamento Nacional de estradas de Rodagem. 112p

PHILIPP, R.P. 1995. Condições de posicionamento do plutonismo da Suíte Dom Feliciano na região de Porto Alegre, RS. In: V SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, Gramado – RS. SBG, **Bol. Res. Exp.**:p.207-209.

PHILIPP, R.P. 1998. **A Evolução Geológica e Tectônica do Batólito Pelotas, RS**. São Paulo. 371p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo).

PHILIPP, R.P.; NARDI, L.V.S.; MACHADO, R. 1998 – O magmatismo Granítico Neoproterozóico tardi a pós-colisional da região de Porto Alegre, RS – contribuição ao estudo Granitos e rochas correlatas- **Sociedade Brasileira de Geologia** – Núcleo Bahia-Segipe: p. 129 – 151.

PHILIPP, R.P.; REGO, I.T.S.F.; SIVIERO, R. 1994. Geologia das rochas granitóides da região de Porto Alegre, RS. In: XXXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Camboriú – SC. **Anais** 1:98-99.

PHILIPP, R.P. & VIERO, A.P. 1995. Interação entre o magmatismo ácido/básico nas rochas vulcânicas associadas aos granitóides da região de Porto Alegre, RS. In: VI SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Porto Alegre – RS, SBG, **Bol. de Res. Exp.**: p. 70-71.

PIPER, A.M. 1944. **Trans. Amer. Geophys. Union**, 25: 914-928.

ROISENBERG, A.; VIERO, A.P. (coord.). Caracterização da Qualidade das Águas Subterrâneas de Porto Alegre. **Relatório Técnico Final**. Convênio UFRGS e DMAE. 2002. 177f.

ROISENBERG, C. **Hidroquímica do Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano e Qualidade das Águas Subterrâneas do Município de Porto Alegre, RS**. Dissertação para obtenção do título de Mestre. Instituto de Geociências. UFRGS. 2001. 174 p.

ROISENBERG, C.; VIERO, A.P.; SCHWARZBACH, M.S.R.; ROISENBERG, A.; MORANTE, I.C. Caracterização geoquímica e gênese dos principais íons das águas subterrâneas de Porto Alegre, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v 8, n 4, p.137-147. 2003.

SCHNEIDER, A.W.; LOSS, E.L.; PINTO, J.F. 1974. **Mapa geológico da folha Porto Alegre, RS**, escala 1:50.000, Porto Alegre, CNPq, mapa.

SCHWARBACK, M.S.R. Qualidade das águas dos poços tubulares profundos do Município de Porto Alegre analisada em relação à potabilidade. In: Congresso Brasileiro de Água Subterrânea, 10. São Paulo. 1998. **Anais**. São Paulo: ABAS. 1998. 1 CD

TOMAZELLI, L.J.; DILLENBURG, S.R.; VILLWOCK, J.A. Late quaternary geological history of Rio Grande do Sul Coastal Plain, Southern Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, 30 (3): p. 474- 476, setembro de 2000.

TOMAZELLI, L.J, VILLWOCK, J.A., LOSS, E. L. Aspectos da geomorfologia costeira da região de Osório-Tramandaí, Rio Grande do Sul. In: Iº Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. 1987. **Publicação Especial nº 2**. Porto Alegre. 21p.

TOMAZELLI, L.J, VILLWOCK, J.A. 2000. O Cenozóico no Rio Grande do Sul: Geologia da Planície Costeira. In: **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CIGO/UFRGS, 2000. P. 375-406.: il.

VÁSQUEZ, S.G. **Qualidade do ar e das chuvas em Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000. 81f.

VILLWOCK, J.A. **Contribuição à Geologia do Holoceno da Província Costeira do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade federal do Rio Grande Sul. Porto Alegre, 1972. 133f.

VILLWOCK, J.A.; TOMAZELLI, L.J. Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. **Notas Técnicas**, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Porto Alegre, nº8, p. 1-45, 1995.

VILLWOCK, J.A.; TOMAZELLI, L.J.; LOSS, E.L.; DEHNHARDT, E.A.; HORN, N.O.; BACHI, F.A.; DEHNHARDT, B.A. 1986. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In: Rabassa, J. (ed.). **Quaternary of South America and Antarctic Peninsula**. A.A. Balkema, Rotterdam. 4:79-97.

WOLERY, T.J. & DAVELER, S.A. EQ3/6, **A Computer Program for Reaction Path Modeling of Aqueous Geochemical Systems**: Theoretical Manual, User's Guide and Related Documentation (Version 7.0). California, Livermore Laboratory, University of California, 1992. 246p.

WREGGE, L.L.M.; MOBUS, G. Análise de Agrupamento em Aquífero Fraturado. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas (7.: 1992: Belo Horizonte). **Anais**. Belo Horizonte: ABAS, 1992. p. 175-180.

ZURITA, M.L.L.; TOLFO, A.M. **A qualidade do ar em Porto Alegre**. Prefeitura Municipal de Porto Alegre, Secretaria Municipal de Meio Ambiente. 2000. 103 f.

ANEXOS

ANEXO A

Resultados físico-químicos e bacteriológicos das
águas subterrâneas do Município de Porto Alegre,
poços PDU

Parâmetros físico-químicos (mg/L) e bacteriológicos das águas subterrâneas do Município de Porto Alegre, informações hidrogeológicas e localização dos poços em UTM (metros). Unidades utilizadas: Prof. (profundidade metros); Temp. (temperatura °C); Cor (ppm Pt-Co); Dureza (mg/L de CaCO₃); CE (condutividade elétrica µS/cm); Turb. (turbidez medida em UNT); ABS (surfactantes); Coli tc (coliformes totais); Coli fecal (coliformes fecais); CBH (contagem de bactérias heterotróficas em 100 ml de amostra); ND (não detectado pelo método); < (menor que o limite de detecção); RT105 (resíduo sólido total a 105°C); RF 105 (resíduo sólido a 105°C de amostra filtrada); RF550 (resíduo sólido a 550°C de amostra filtrada); RV550 (resíduo volátil a 550°C); Alct (alcalinidade); NK (nitrogênio orgânico e amoniacal); - (parâmetro não realizado ou não determinado); coliformes medidos em UFC (unidades formadoras de colônia).

ESTAÇÃO	UTM		Data da coleta	Prof	Temp ar	Temp. água	Cor	Odor	RT105	RF550	RV550	RF105
	E	N										
POCO_ASSISBR164_PDU6	482183	6680615	05/08/1999	66	20,0	26,0	15	ND	823	717	106	823
POCO_PERNAMBUCO_PDU7	480790	6680215	05/08/1999	126	22,5	26,0	10	ND	412	387	25	412
POCO_SDUMON1147_PDU8	480418	6679610	05/08/1999	80	21,0	20,5	<5	ND	610	498	112	610
POCO_BELAS1948_PDU13	478067	6674974	26/08/1999	-	14,0	22,0	<5	ND	766	548	218	766
POCO_RANGEL823_PDU17	490658	6680535	02/09/1999	-	19,0	21,0	35	ND	211	195	16	209
POCO_JBATI8101_PDU21	482659	6660549	09/09/1999	-	20,0	21,0	10	ND	1460	1439	21	1452
POCO_FARRAP292_PDU34	479073	6678346	14/10/1999	50	19,5	23,0	<5	ND	329	288	41	329
POCO_SERTO6600_PDU36	486498	6681750	21/10/1999	86	25,0	21,5	5	ND	469	411	58	468
POCO_RENNER540_PDU37	481178	6682045	21/10/1999	108	23,0	21,5	5	ND	2038	1624	414	2037
POCO_AFPINT789_PDU38	478640	6676178	25/10/1999	96	22,5	21,0	5	ND	398	349	49	398
POCO_GKRAMER90_PDU48	485375	6680888	23/11/1999	90	24,0	22,5	<5	ND	147	119	28	147
POCO_CHSOL1800_PDU54	484389	6662512	02/12/1999	-	30,0	20,0	5	ND	581	520	61	541
POCOVPELOT360_PDU65	483772	6680436	11/05/2000	125	20,0	23,0	-	-	339	265	74	338
POCO_BOMFIM177_PDU68	488153	6681948	18/05/2000	80	19,0	22,0	-	-	355	109	38	51
POCO_FERNA1001_PDU80	484225	6683905	15/06/2000	-	24,5	21,8	-	-	2428	1976	452	2389
POCO_ESTAD2405_PDU81	483066	6683977	15/06/2000	202	24,7	24,3	-	-	1169	1140	29	1167
POCO_CANTAGAL1_PDU86	494578	6656207	06/07/2000	110	25,5	22,3	-	-	763	687	76	761
POCO_BOAVI2010_PDU87	486460	6653169	06/07/2000	80	22,8	21,4	-	-	365	315	50	339
Restinga Futebol Clu PDU 88	489727	6657521	13/07/2000	160	7,9	21,1	-	-	288	243	45	287
Lucindo Bertoletti PDU 90	490251	6656836	20/07/2000	52	11,0	22,0	-	-	2908	780	2128	2906
Lucindo Bertoletti PDU 91	490219	6656855	20/07/2000	31	11,0	20,0	-	-	1482	239	1243	1481

(continuação)

ESTAÇÃO	Alct	HCO₃	Cloreto	Dureza	Sílica	SO₄	NK	CE	Turb	ABS
POCO_ASSISBR164_PDU6	188,5	229,88	45,8	354	22	144	0,46	1276	2,44	<0,025
POCO_PERNAMBUCO_PDU7	146,9	178,99	39,3	168	41	74	0,25	646	3,01	0,031
POCO_SDUMON1147_PDU8	93,8	114,36	28,5	280	47	134	0,25	893	1,47	<0,025
POCO_BELAS1948_PDU13	117,0	142,65	372,0	321	25	20	0,82	1175	3,91	0,029
POCO_RANGEL823_PDU17	22,6	27,57	38,1	31	97	<10	0,20	193	14,80	0,028
POCO_JBATI8101_PDU21	124,9	152,32	781,0	451	53	62	1,67	2810	5,64	<0,025
POCO_FARRAP292_PDU34	136,5	166,51	41,2	85	60	20	0,24	447	0,14	<0,025
POCO_SERTO6600_PDU36	160,4	195,20	107,8	169	34	45	0,19	755	0,27	<0,025
POCO_RENNER540_PDU37	141,7	172,66	495,6	565	<20	143	3,53	3160	0,28	<0,025
POCO_AFPINT789_PDU38	101,7	123,76	103,9	142	33	49	1,04	671	0,27	<0,025
POCO_GKRAMER90_PDU48	54,6	66,51	13,2	42	23	12	0,81	161	0,64	<0,025
POCO_CHSOL1800_PDU54	170,0	207,27	82,2	120	256	60	1,60	901	1,91	<0,025
POCOVPELOT360_PDU65	182,6	222,72	32,1	152	50	45	0,32	526	0,39	-
POCO_BOMFIM177_PDU68	109,8	133,90	38,6	51	81	56	0,67	480	22,40	-
POCO_FERNA1001_PDU80	418,9	510,90	909,7	720	45	129	10,77	4030	202,00	-
POCO_ESTAD2405_PDU81	115,4	140,23	445,6	126	<20	129	0,77	2240	1,18	-
POCO_CANTAGAL1_PDU86	103,4	125,83	327,5	129	25	14	0,78	1324	0,93	-
POCO_BOAVI2010_PDU87	115,6	140,98	41,7	50	90	24	1,00	423	19,8	-
Restinga Futebol Clu PDU 88	100,7	122,24	72,7	136	36	<10	1,64	462	1,05	-
Lucindo Bertoletti PDU 90	83,1	101,37	406,6	214	42	20	2,86	1445	0,51	-
Lucindo Bertoletti PDU 91	38,8	47,33	69,2	51	58	32	2,25	335	1,83	-

(continuação)

ESTAÇÃO	Cn	F	PO ₄ t	NO ₂	NO ₃	pH	S	Al	As	Ba	Be
POCO_ASSISBR164_PDU6	<0,01	3,77	0,05	<0,003	<0,04	7,2	<0,1	<0,1	<0,03	0,08	0,007
POCO_PERNAMBUCO_PDU7	<0,01	3,91	0,33	0,015	<0,04	7,7	<0,1	<0,1	<0,03	0,07	0,001
POCO_SDUMON1147_PDU8	<0,01	1,88	0,08	<0,003	<0,04	7,4	<0,1	<0,1	<0,03	0,03	0,001
POCO_BELAS1948_PDU13	<0,01	2,33	0,3	0,004	0,18	7,4	<0,1	<0,1	<0,03	0,70	0,001
POCO_RANGEL823_PDU17	<0,01	0,72	<0,01	<0,003	0,14	6,4	<0,1	1,4	<0,03	0,13	0,003
POCO_JBATI8101_PDU21	0,01	1,19	0,01	0,025	0,18	7,2	<0,1	0,1	<0,03	0,21	0,001
POCO_FARRAP292_PDU34	<0,01	0,88	0,4	<0,003	3,2	6,7	<0,1	<0,1	<0,03	0,05	0,001
POCO_SERTO6600_PDU36	<0,01	2,76	0,03	<0,003	<0,04	8,0	<0,1	1,8	<0,03	0,14	ND
POCO_RENNER540_PDU37	<0,01	2,8	0,01	0,018	<0,04	7,7	<0,1	0,1	<0,03	0,21	ND
POCO_AFPINT789_PDU38	<0,01	3,02	0,03	<0,003	<0,04	8,0	<0,1	<0,1	<0,03	0,19	0,001
POCO_GKRAMER90_PDU48	<0,01	2,08	<0,01	0,026	2,01	7,8	<0,1	<0,1	<0,03	0,03	0,001
POCO_CHSOL1800_PDU54	<0,01	1,34	0,03	0,005	<0,04	7,4	<0,1	11,8	<0,03	0,23	0,001
POCOVPELOT360_PDU65	-	1,32	0,16	-	19,26	7,0	-	<0,1	-	0,12	-
POCO_BOMFIM177_PDU68	-	4,43	0,58	-	1,39	7,2	-	3,8	-	0,05	-
POCO_FERNA1001_PDU80	-	0,22	3,61	-	0,08	7,1	-	<0,1	-	0,47	-
POCO_ESTAD2405_PDU81	-	5,39	0,02	-	<0,04	8,2	-	<0,1	-	0,07	-
POCO_CANTAGAL1_PDU86	-	4,23	0,01	-	0,04	8,0	-	<0,1	-	0,08	-
POCO_BOAVI2010_PDU87	-	0,92	0,11	-	2,29	7,2	-	4,9	-	0,04	-
Restinga Futebol Clu PDU 88	-	2,34	0,04	-	0,09	8,3	-	<0,1	-	0,02	-
Lucindo Bertoletti PDU 90	-	0,62	<0,01	-	0,01	6,7	-	<0,1	-	0,13	-
Lucindo Bertoletti PDU 91	-	ND	0,07	-	1,02	6,4	-	<0,1	-	0,16	-

(continuação)

ESTAÇÃO	Cd	Ca	Pb	Co	Cu	Cr t	Fe t	Li	Mg	Mn t	Hg
POCO_ASSISBR164_PDU6	0,002	115,10	0,05	0,011	0,005	<0,005	1,66	0,125	17,52	1,810	<0,00010
POCO_PERNAMBUCO_PDU7	0,001	55,80	0,02	0,005	0,006	<0,005	0,24	0,092	7,17	0,111	0,00013
POCO_SDUMON1147_PDU8	ND	79,80	<0,01	<0,004	0,005	<0,005	<0,09	0,059	16,97	0,013	<0,00010
POCO_BELAS1948_PDU13	0,003	98,60	0,03	<0,004	0,004	0,007	<0,09	0,036	20,39	0,980	<0,00010
POCO_RANGEL823_PDU17	ND	5,29	<0,01	<0,004	<0,004	<0,005	0,57	0,024	2,50	0,149	<0,00010
POCO_JBATI8101_PDU21	0,008	96,20	0,06	0,011	0,019	0,008	0,63	0,058	33,00	0,159	<0,00010
POCO_FARRAP292_PDU34	0,001	18,70	0,02	0,01	0,005	<0,005	0,09	0,027	9,28	<0,003	<0,00010
POCO_SERTO6600_PDU36	0,001	45,30	0,03	0,014	<0,004	<0,005	0,14	0,048	12,06	0,214	<0,00010
POCO_RENNER540_PDU37	0,005	125,80	0,03	0,015	0,013	0,008	0,36	0,330	63,60	0,335	0,00013
POCO_AFPINT789_PDU38	0,003	37,60	0,01	0,007	<0,004	<0,005	<0,09	0,070	13,91	0,271	<0,00010
POCO_GKRAMER90_PDU48	0,001	9,78	<0,01	<0,004	0,007	<0,005	<0,09	0,022	3,56	0,300	<0,00010
POCO_CHSOL1800_PDU54	0,003	22,90	<0,01	0,016	0,307	0,008	8,22	0,002	15,41	0,870	<0,00010
POCOVPELOT360_PDU65	-	31,10	-	-	-	-	<0,09	0,055	14,90	0,060	-
POCO_BOMFIM177_PDU68	-	7,76	-	-	-	-	1,69	0,036	5,10	0,127	-
POCO_FERNA1001_PDU80	-	125,00	-	-	-	-	17,00	0,032	9,58	2,110	-
POCO_ESTAD2405_PDU81	-	38,60	-	-	-	-	0,18	0,117	10,10	0,019	-
POCO_CANTAGAL1_PDU86	-	76,70	-	-	-	-	0,17	0,064	5,42	0,289	-
POCO_BOAVI2010_PDU87	-	6,55	-	-	-	-	2,01	0,010	1,05	0,180	-
Restinga Futebol Clu PDU 88	-	37,70	-	-	-	-	0,20	0,036	8,25	0,230	-
Lucindo Bertoletti PDU 90	-	56,50	-	-	-	-	0,95	0,044	15,77	1,200	-
Lucindo Bertoletti PDU 91	-	9,42	-	-	-	-	0,39	0,023	5,31	0,260	-

-

(continuação)

ESTAÇÃO	Mo	Ni	K	Ag	Se	Na	V	Zn	Colitc	Colifecal	CBH
POCO_ASSISBR164_PDU6	0,02	0,008	2,84	0,003	<0,001	152,3	<0,03	0,410	<1	<1	60
POCO_PERNAMBUCO_PDU7	<0,02	<0,007	1,89	<0,003	<0,001	45,3	<0,03	0,022	<1	<1	10
POCO_SDUMON1147_PDU8	<0,02	<0,007	2,89	0,003	<0,001	46,3	<0,03	0,038	<1	<1	15
POCO_BELAS1948_PDU13	<0,02	0,01	3,89	<0,003	<0,001	62,9	<0,03	0,075	<1	<1	3
POCO_RANGEL823_PDU17	<0,02	<0,007	2,42	<0,003	<0,001	17,2	<0,03	1,840	<1	<1	370
POCO_JBATI8101_PDU21	<0,02	0,047	9,34	0,003	<0,001	191,0	<0,03	0,049	19	<1	290
POCO_FARRAP292_PDU34	<0,02	0,020	6,97	<0,003	<0,001	40,8	<0,03	0,014	<1	<1	100
POCO_SERTO6600_PDU36	<0,02	0,026	2,76	<0,003	<0,001	59,7	<0,03	0,017	1	<1	36
POCO_RENNER540_PDU37	<0,02	0,085	9,40	0,007	<0,001	282,0	<0,03	0,066	2	<1	34
POCO_AFPINT789_PDU38	<0,02	0,021	3,74	0,003	<0,001	61,9	<0,03	0,032	<1	<1	60
POCO_GKRAMER90_PDU48	<0,02	<0,007	1,40	<0,003	<0,001	18,2	<0,03	0,048	<1	<1	1
POCO_CHSOL1800_PDU54	<0,02	<0,007	4,45	<0,003	<0,001	115,1	0,03	3,100	2400	<1	31000
POCOVPELOT360_PDU65	-	-	3,20	-	-	62,9	-	0,013	<1	<1	20
POCO_BOMFIM177_PDU68	-	-	3,23	-	-	97,5	-	0,690	<1	<1	340
POCO_FERNA1001_PDU80	-	-	21,4	-	-	464,0	-	0,790	770	3	200
POCO_ESTAD2405_PDU81	-	-	3,07	-	-	378,0	-	0,015	5	<1	2900
POCO_CANTAGAL1_PDU86	-	-	4,30	-	-	137,8	-	0,062	<1	<1	700
POCO_BOAVI2010_PDU87	-	-	2,94	-	-	65,1	-	1,450	<1	<1	>6500
Restinga Futebol Clu PDU 88	-	-	2,05	-	-	31,4	-	0,065	2	0	460
Lucindo Bertoletti PDU 90	-	-	6,54	-	-	204,0	-	0,167	0	0	1900
Lucindo Bertoletti PDU 91	-	-	2,63	-	-	41,4	-	0,003	0	0	2

ANEXO B Principais resultados físico-químicos dos poços analisados na segunda etapa do estudo

Principais parâmetros físico-químicos dos poços analisados na segunda etapa do estudo. UTM (metros); Prof. (m); Temperatura (°C); ânions e cátions (mg/L), Dureza (mg/L de CaCO₃); Eh (volts); CE (µS/cm); Fe t – ferro total; * - resultado com interferência não sendo possível analisar; ND – não detectado.

ESTAÇÃO	UTM		Data da coleta	Prof.	Temp. ar	Temp. água	Cloreto	Dureza	SO ₄
	E	N							
1A- CAFF	477694	6676733	09/11/2000	30	30,1	23,1	165,0	180,0	ND
2A - CAFF	477692	6676729	09/11/2000	ND	27,4	22,7	124,0	272,5	*
3A - HORTENCIA	485446	6652109	22/11/2000	20	23,0	21,0	26,5	39,0	14
4A - NADIA	487092	6654748	22/11/2000	27	22,0	21,2	367*	1600,0	500
5A- HUGO	485791	6652677	27/11/2000	4	33,0	19,0	118,7	27,5	26
6A - DIRCEU MOURA	485865	6652149	27/11/2000	14	28,4	20,8	74,5	85,0	59
7A - DORALINO	486779	6655111	27/11/2000	30	32,1	21,4	25,0	27,5	23
8A- PG RAFAELI	484866	6663190	30/11/2000	40	25,9	21,7	68,0	137,0	38
9A-HARAS BOM GALLOP	488162	6658506	30/11/2000	20	25,4	22,5	62,6	24,0	4
10A- CANIL 1	487116	6654850	06/12/2000	18	28,6	21,5	846,0	1650,0	400
11A-CANIL 2	487125	6654862	06/12/2000	12 a 15	28,6	21,2	428,0	520,0	300
12A - SETEMBRINO	487820	6654585	13/12/2000	18	29,0	22,8	177,0	760,0	250
13A- ELEGÊ	484357	6682657	20/12/2000	40	26,7	23,9	*	1680,0	150
14A-DICO	480873	6681463	05/01/2001	85	33,8	23,1	*	1110,0	65
15A- HOTEL CONTINENTAL	479055	6678551	15/01/2001	42	26,8	24,1	5,5	26,5	25
16A-MENPHIS	489628	6683039	01/02/2001	180	29,2	24,7	84,0	87,0	38
17A- LUCINDO BERTOLETTI	490219	6656855	06/02/2001	31	25,9	21,9	43,9	29,7	35
18A-LUCINDO	490251	6656836	06/02/2001	52	25,9	23,6	190,0	445,0	16

(continuação)

ESTACAO	Eh	pH	CE	Ca	Fe t	Mg	K	Na
1A- CAFF	2,01	6,80	825	22,5	10,1	20,0	5,00	*
2A - CAFF	-1,47	6,52	1328	22,0	13,6	16,5	5,75	*
3A - HORTENCIA	1,50	6,86	292	6,0	1,09	3,0	1,70	46,22
4A - NADIA	0,80	6,29	7220	*	0,3	87,0	7,50	752,67
5A- HUGO	0,59	5,48	315	23,8	0,9	14,5	12,50	*
6A - DIRCEU MOURA	1,74	6,51	688	12,5	1,7	10,5	2,80	*
7A - DORALINO	2,17	5,44	292	3,0	1,7	4,5	5,60	*
8A- PG RAFAELI	0,80	7,06	696	41,0	2,8	10,0	1,80	*
9A-HARAS BOM GALLOP	-1,10	6,98	300	14,9	3,8	6,0	1,50	43,31
10A- CANIL 1	2,15	6,36	6540	84,0	1,6	154,0	2,50	740,27
11A-CANIL 2	-1,10	5,40	2830	72,0	0,9	60,0	2,50	570,77
12A - SETEMBRINO	0,70	5,85	2860	15,0	0,9	34,0	15,00	529,00
13A- ELEGÊ	-1,40	6,76	4520	*	57,0	92,0	10,00	410,00
14A-DICO	-1,09	7,20	3580	*	*	*	5,50	325,34
15A- HOTEL CONTINENTAL	0,81	6,19	559	0,96	*	0,8	5,00	66,11
16A-MENPHIS	-0,25	7,49	697	15,8	*	10,8	2,00	66,76
17A- LUCINDO BERTOLETTI	1,58	5,43	356	3,6	*	8,5	2,10	41,00
18A-LUCINDO	-0,54	6,54	1727	44,0	*	19,5	4,00	297,71

ANEXO C

Descrição mineralógica e textural de um perfil de sedimentos do SAGC

Descrição mineralógica e textural de um perfil de sedimentos do SAGC

A caracterização dos sedimentos que constituem o SAGC foi realizada a partir de amostras de calha em poço (1A) existente no Centro Administrativo do Estado, localizado na zona central da cidade. Embora o perfil de sondagem não possa ser extrapolado para toda a área estudada, constitui um registro de grande interesse, pois permite acessar e analisar materiais que constituem o aquífero, até profundidade da ordem de 24 metros.

O material do poço foi caracterizado em cada mudança significativa das propriedades texturais (especialmente granulometria), composição e cor. O perfil geológico, assim construído, identifica os seguintes horizontes granulométricos: (0 a 1 metro) - aterro; (1 a 4 metros) - areia média; (4 a 6 metros) - areia lamosa; (6 a 12 metros) - lama arenosa; (12 a 18 metros) - areia granulosa; (18 a 24 metros) - grânulo arenoso; rocha granítica (> 24 metros) (FIG.1 e 2). O aterro e a rocha granítica não constituem parte do presente estudo.

FIGURA 1– Perfil geológico do poço 1A

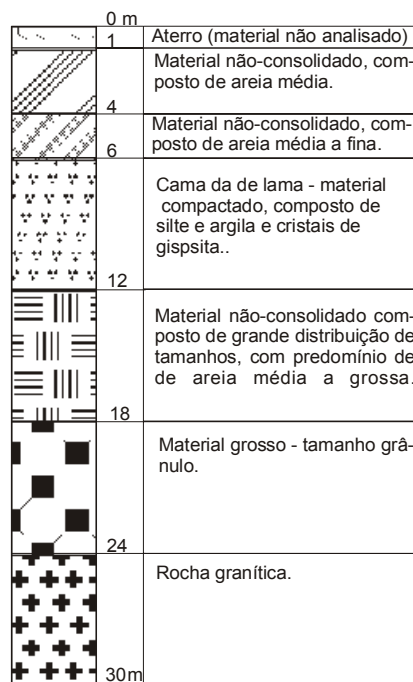
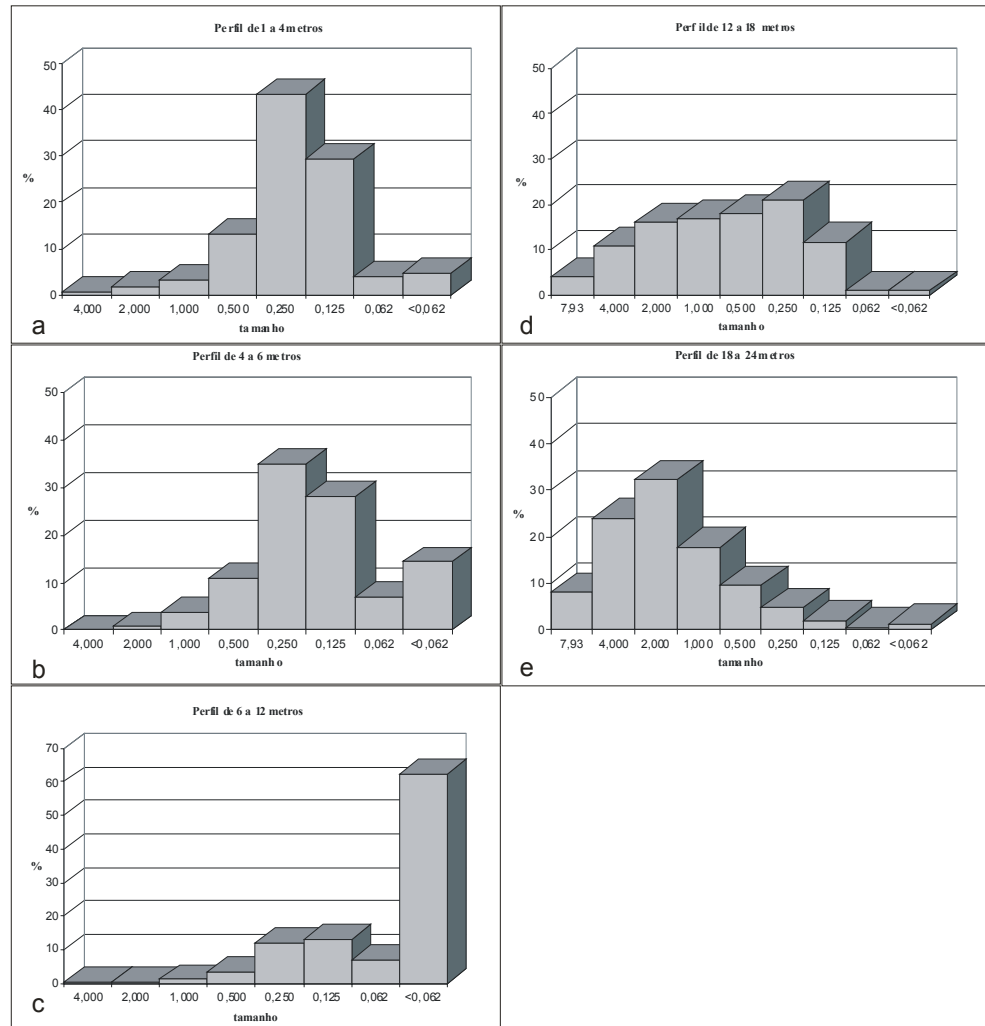


FIGURA 2 – Caracterização da frequência simples (%) *versus* granulometria (mm) dos sedimentos em cada horizonte do poço 1A. (a) horizonte 1 a 4 metros; (b) horizonte 4 a 6 metros; (c) horizonte 6 a 12 metros; (d) horizonte 12 a 18 metros; (e) horizonte 18 a 24 metros.



A análise do material em lupa binocular permitiu identificar as principais espécies minerais, em cada intervalo do perfil. A composição mineralógica dos níveis arenosos é arcoseana e compreende ampla dominância de quartzo, com proporções bem menores de feldspatos argilizados, enquanto fragmentos de conchas, restos vegetais mais ou menos carbonizados e piritizados e minerais pesados estão presentes (TAB.1). Sob o ponto de vista morfológico, as frações de tamanho areia fina e areia média (0,125 a 0,50 mm) são constituídas por mistura de grãos subangulosos de quartzo mamelonado a sacaróide, o que identifica, juntamente com a mineralogia, que o material é

composicionalmente imaturo e as áreas de proveniência encontram-se relativamente próximas.

No horizonte compreendido entre 6 e 12 metros (camada lamosa) foram registradas abundantes espículas e diatomáceas silicosas. Estes materiais também são reconhecidos, embora raros, na fração fina dos níveis mais rasos. As análises de difração de raio-x da fração argila identificou presença de caolinita e montmorilonita.

Estudos ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) no horizonte lamoso permite identificação de freqüentes cristais de gipsita bem formados (FIG. 3A e 3D), fragmentos de concha (FIG. 3B), fragmentos silicosos não identificados, provavelmente de radiolários (FIG. 3C) e fragmentos de diatomáceas (FIG. 3E).

Em profundidades maiores que 12 metros os sedimentos arenosos são notadamente mais grossos e as características conferem com as da Formação Graxaim, que também possui composição arcoseana (DELANEY, 1965). A textura predominante dos grãos de quartzo é sacaróide e a forma sub-angulosa, evidenciando áreas-fonte relativamente próximas.

TABELA 1

Descrição mineralógica e textural da fração areia do poço 1A em cada horizonte, descrito por fração granulométrica.

Fração (mm)	Composição mineralógica média (horizonte 1 a 4 metros)
4,00 – 0,062	80% grãos subangulosos de quartzo leitoso sacaróide a mamelonado, com superfície lisa a fosca; raros grãos de quartzo facetado e microcristalino. Frações mais grossas constituídas essencialmente de quartzo leitoso. 15% grãos de feldspatos amarelados, rosados ou esbranquiçados com fraca argilização. Grau de alteração aumenta nas frações mais finas. 5% muscovita, minerais metálicos e outros pesados, limonita, fragmentos de calcedônia. Nos níveis mais finos (< 0,250 mm) presença de matéria orgânica piritizada e fragmentos de concha. Obs.: A proporção de feldspatos, micas e minerais metálicos tende a decrescer nas frações mais finas, com conseqüente aumento de quartzo.
Fração (mm)	Composição mineralógica média (horizonte 4 a 6 metros)
2,00 – 0,062	75% grãos subangulosos a subarredondados de quartzo leitoso, sacaróide e mamelonado, com superfície lisa a fosca; raros grãos de quartzo facetado e microcristalino. 20% grãos de feldspatos amarelados, rosados ou esbranquiçados com fraca argilização. Grau de alteração aumenta nas frações mais finas. 5% muscovita, minerais metálicos, turmalina, agregados de matéria orgânica piritizada, rara calcedônia. Obs.: A proporção de feldspatos, micas e minerais metálicos tende a decrescer nas frações mais finas, com conseqüente aumento de quartzo.

Fração (mm)	Composição mineralógica média (horizonte 6 a 12 metros)
4,00 – 0,062	<p>75% grãos subangulosos de quartzo leitoso sacaróide a mamelonado, com superfície lisa a fosca; raros grãos de quartzo facetado e microcristalino. Frações mais grossas constituídas essencialmente de quartzo leitoso sacaróide microfraturado. Na fração < 0,500 mistura de quartzo sacaróide a mamelonado (dominante) com quartzo liso (subordinado)</p> <p>20% grãos de feldspatos amarelados, rosados ou esbranquiçados com fraca argilização. Grau de alteração aumenta nas frações mais finas.</p> <p>5% muscovita e biotita, fragmentos de ágata, matéria orgânica piritizada, limonita, minerais metálicos, carapaças de diatomáceas (crescem em volume nas frações mais finas), raras espículas de radiolários.</p> <p>Obs.: Presença de fraca cimentação de carbonato de cor branca. A proporção de feldspatos, micas e minerais metálicos tende a decrescer nas frações mais finas, com conseqüente aumento de quartzo.</p>
Fração (mm)	Composição mineralógica média (horizonte 12 a 18 metros)
7,93 – 4,00	<p>Raros grânulos subangulosos de quartzo fosco leitoso, predominando em relação à fração feldspática. O quartzo é essencialmente sacaróide, com microfraturas preenchidas por óxidos de ferro.</p>
2,00 – 0,062	<p>70% grãos subangulosos de quartzo leitoso sacaróide a mamelonado, com superfície lisa a fosca; raros grãos de quartzo facetado e microcristalino. Na fração < 0,500 mistura de quartzo sacaróide a mamelonado (dominante) com quartzo liso e arredondado (subordinado)</p> <p>20% grãos de feldspatos amarelados, avermelhados ou esbranquiçados com fraca a moderada alteração. Grau de alteração aumenta nas frações mais finas.</p> <p>5% Mica preta, minerais metálicos, turmalina, zircão, fragmentos de concha.</p> <p>Obs.: A proporção de feldspatos e micas tende a decrescer nas frações mais finas, com conseqüente aumento de quartzo e minerais pesados.</p>
Fração (mm)	Composição mineralógica média (horizonte 18 a 24 metros)
7,93 – 4,00	<p>Raros fragmentos de microgranito e grânulos subangulosos de quartzo fosco leitoso, predominando em relação à fração feldspática mais fina. O quartzo é essencialmente sacaróide, com microfraturas preenchidas por óxidos de ferro. Presença rara de placas de biotita.</p>
2,00 – 0,062	<p>65% grãos subangulosos de quartzo leitoso sacaróide a mamelonado, com superfície fosca; raros grãos de quartzo facetado e microcristalino. Frações mais grossas constituídas essencialmente de quartzo leitoso sacaróide microfraturado. Na fração < 0,500 mistura de quartzo sacaróide a mamelonado (dominante) com quartzo liso (subordinado)</p> <p>30% grãos de feldspatos amarelados, rosados ou esbranquiçados com fraca argilização. Grau de alteração aumenta nas frações mais finas.</p> <p>5% fragmentos de filito, microgranito, muscovita e biotita, zircão, fragmentos de diatomáceas, limonita, fragmentos de concha.</p> <p>Obs.: A proporção de feldspatos, muscovita e diatomáceas cresce em volume nas frações mais finas, com conseqüente diminuição de quartzo.</p>

FIGURA 3 - Imagens obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) em sedimentos do poço 1A. (A) Cristais de gipsita. (B) Fragmentos de concha. (C) Fragmentos de material silicoso não identificado (radiolários?). (D) Cristais de gipsita. (E) Material silicoso (fragmentos de diatomácea). Convenção: GP – Gipsita; AM – argilo-mineral; CH – conchas; SI – material silicoso não identificado; DT – diatomáceas. Aumento 500x.

