UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**“ESTUDO HIDROQUÍMICO E ISOTÓPICO DO
AQUÍFERO BAURU, SUDOESTE DO
ESTADO DE SÃO PAULO”.**

Rodrigo Octavio Coelho

Orientadora: Profa. Dra. Annkarin Aurelia Kimmelman e Silva

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
1996

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**"ESTUDO HIDROQUÍMICO E ISOTÓPICO DO
AQUÍFERO BAURU, SUDOESTE DO
ESTADO DE SÃO PAULO".**

Rodrigo Octavio Coelho

Orientadora: Profa. Dra. Annkarin Aurelia Kimmelman e Silva

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO JULGADORA

	nome	ass.
Presidente:	<u>Annkarin Aurelia Kimmelman e Silva</u>	<u>Al. Kimmelman</u>
Examinadores:	<u>Dora de Castro Rubio Poli</u>	<u>Dora de Castro Rubio Poli</u>
	<u>Aldo da Cunha Rebouças</u>	<u>Aldo da Cunha Rebouças</u>

SÃO PAULO
1996

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005529

**“ESTUDO HIDROQUÍMICO E ISOTÓPICO DO
AQUÍFERO BAURU, SUDOESTE DO
ESTADO DE SÃO PAULO”.**

Rodrigo Octavio Coelho

Orientadora: Profa. Dra. Annkarin Aurelia Kimmelman e Silva

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
1996

ÍNDICE

	pg
Agradecimentos	1
Resumo	2
Abstract	3
1. Introdução	4
1.1 Generalidades	4
1.2 Objetivos	4
2. Área de Estudo	5
2.1 Localização e Vias de Acesso	6
2.2 Aspectos Geográficos	6
3. Geologia da Área de Estudo	7
3.1 Introdução	7
3.2 Estratigrafia do Grupo Bauru	9
3.2.1 Formação Caiuá	9
3.2.2 Formação Santo Anastácio	11
3.2.3 Formação Adamantina	12
3.2.4 Formação Marília	12
4. Hidrogeologia da Área de Estudo	13
4.1 Introdução	13
4.2 O Sistema Aquífero Bauru	14
4.3 Qualidade das Águas Subterrâneas	16
4.4 Os Sistemas Aquíferos Serra Geral e Botucatu - Pirambóia	17
5. Aplicação de Isótopos nos Estudos de Águas Subterrâneas	18
5.1 Introdução	18
5.2 Isótopos de Hidrogênio e Oxigênio	19
5.3 Águas Atmosféricas	21
5.4 Águas Subterrâneas	23

5.5 Isótopos de Carbono	26
6. Metodologia	28
6.1 Metodologia de Campo - Amostragem	28
6.2 Procedimentos de Análise - Laboratório	32
7. Resultados	36
7.1 Hidroquímica	38
7.1.1 Íons Principais	41
7.1.2 Ocorrência de Fluoreto nas Águas Subterrâneas da Bacia do Paraná	53
7.1.3 Metais	55
7.2 Conteúdo Isotópico	56
7.2.1 Oxigênio 18 e Deutério	58
7.2.2 Isótopos de Carbono	59
7.2.3 Os poços profundos de Presidente Prudente	64
8. Conclusões	68
9. Referências Bibliográficas	72

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

	pg
Figura 1: Área de Estudo	5
Figura 2: Acesso Rodoviário à Área de Estudo	6
Figura 3: Esboço das principais unidades geológicas aflorantes na área de estudo	8
Figura 4: Distribuição dos sedimentos do Gp. Bauru no Estado de São Paulo	10
Figura 5: Representação gráfica dos valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ obtidos nas estações da AIEA	23

Figura 24: Relação entre $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para as águas do Sistema Aquífero Botucatu.....	62
Figura 25: Relação entre o $\delta^{18}\text{O}$ e o ^{14}C nas águas amostradas	64
Figura 26: Perfil geológico / Correlação estratigráfica entre os poços 16 e 24, em Presidente Prudente.....	66

ÍNDICE DE TABELAS

	pg
Tabela 1: Características hidrogeológicas dos poços amostrados	36
Tabela 2: Resultados das análises de campo	39
Tabela 3: Resultados das análises hidroquímicas.....	42
Tabela 4: Resultados das análises geoquímicas de CaO e MgO das amostras de sondagem do poço 24.....	52
Tabela 5: Resultados das análises de metais	56
Tabela 6: Resultados das análises isotópicas.....	57
Tabela 7: Resultados das análises geoquímicas de amostras de rocha do poço 24.....	65
Tabela 8: Valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ nas amostras de sondagem do poço 24	67

ÍNDICE DE ANEXOS

	pg
Anexo 1: Seção geológica simplificada da área de estudo	76
Anexo 2: Perfis construtivos dos poços amostrados.....	78
Anexo 3: Resultados das análises de íons principais (meq/L).....	101

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar os meus mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para que esse trabalho pudesse ser realizado. Dentre estas pessoas, agradeço especialmente:

à Prof^ª. Dr^ª. Annkarin Aurélia Kimmelman e Silva pela orientação, apoio e incentivo durante todo o curso do trabalho.

ao Prof. Dr. Uriel Duarte e pelo apoio e incentivo durante todo o trabalho, bem como pelas sugestões e críticas apresentadas.

ao Prof. Dr. Markus Forster pelas sugestões e críticas ao trabalho.

ao Prof. Dr. Koji Kawashita pelas sugestões e críticas apresentadas, durante o Exame de Qualificação.

ao CEPAS/USP, em especial ao Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças, na época Diretor, pelo apoio nas análises químicas e nos trabalhos de campo.

ao Geólogo João Carlos S. Souza, da SABESP, pela atenção dispensada e pelo grande auxílio na obtenção dos dados necessários ao trabalho.

ao Prof. Dr. Luiz Carlos Pessenda do Laboratório de Radiocarbono do CENA/USP pelas análises realizadas e pela atenção e amizade com que sempre nos recebeu.

aos Profs. Drs. Eiichi Matsui e Reinaldo Vitória do Laboratório de Isótopos Estáveis do CENA/USP pelas análises realizadas.

à Prof^ª. Dr^ª. Elisabeth de Oliveira do Instituto de Química da USP, pelas análises realizadas.

ao Instituto de Geociências pelo suporte oferecido, sobretudo na elaboração final da Dissertação.

ao CNPq pela bolsa oferecida

à Agência Internacional de Energia Atômica - Viena, pelo apoio oferecido.

a todos os meus colegas que, de alguma forma, contribuíram para a execução deste trabalho, com comentários, críticas e sugestões.

RESUMO

As águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru constituem uma das mais exploradas fontes de água potável do Estado de São Paulo, graças às suas características de ampla distribuição geográfica e pouca profundidade de exploração, acarretando menores investimentos. Além disto suas águas são, na sua maioria, de boa qualidade para consumo humano.

A área de estudo abrange a faixa do Estado de São Paulo que vai de São Manuel no centro do estado, seguindo num eixo rumo noroeste até Presidente Epitácio no extremo oeste do estado. Esta faixa tem cerca de 380 Km de extensão e segue aproximadamente a mesma orientação do Rio Paranapanema.

As características químicas e isotópicas das águas analisadas, associadas às características hidrogeológicas dos poços amostrados, nos permite estabelecer relações entre as águas provenientes destes três Sistemas Aquíferos, que são os mais importantes do estado.

O principal objetivo deste trabalho é caracterizar, do ponto de vista hidroquímico e isotópico, as águas subterrâneas amostradas, avaliando a relação entre as águas do Sistema Aquífero Bauru e as águas dos Sistemas Aquíferos Serra Geral e Botucatu, sotopostos. Essa caracterização permite conhecer melhor a origem e evolução das águas subterrâneas estudadas.

As análises hidroquímicas revelam que as águas do Sistema Aquífero Bauru são, de um modo geral, pouco mineralizadas, classificando-se principalmente como bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas.

Os resultados isotópicos de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mostram que todas as águas analisadas são de origem meteórica. Os resultados de $\delta^{13}\text{C}$ nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru estão coerentes com as características hidrogeológicas dessas águas. As pequenas diferenças observadas entre as regiões de Marília e Tupã podem ser explicadas por características litológicas distintas.

Os resultados de $\delta^{13}\text{C}$ e de ^{14}C nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Botucatu mostram alguns valores incompatíveis com as características hidrogeológicas dos poços amostrados, revelando assim possíveis misturas de águas mais jovens de outros aquíferos, causadas por problemas no revestimento dos poços.

ABSTRACT

The Bauru Aquifer System is highly exploited in the State of São Paulo due to its availability, low drilling price and good water quality.

The area of investigation includes the southwestern part of the State of São Paulo and follows a cross-section from the border of the Paraná Basin to its central part. In the east it covers the city of São Manuel and in the west it reaches the city of Presidente Epitácio. It has about 380 Km of length and follows the Paranapanema River Valley.

The aim of this study, carried out based on a combined hydrogeochemical and environmental isotope investigation, is the better understanding of the origin and flow process of these groundwaters and their hydrochemical behaviours. Hydrochemical results reveal that the Bauru groundwaters are weakly mineralized, mainly calcium and/or magnesium bicarbonated.

The $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ results show, that groundwaters are of meteoric origin. The ^{13}C content in the Bauru groundwaters show a concordance with their hydrogeological characteristics. The little differences observed between Marília and Tupã can be attributed to litological differences.

The $\delta^{13}\text{C}$ and ^{14}C results in deep Botucatu groundwaters reveal some incompatibilities with the hydrogeological characteristics of the sampled wells, indicating an admixture of young surface near groundwaters, due probably to casing problems.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

As águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru constituem uma das mais exploradas fontes de água potável do Estado de São Paulo, graças às suas características de ampla distribuição geográfica e pouca profundidade de exploração, acarretando menores investimentos. Além disto suas águas são, na sua maioria, de boa qualidade para consumo humano.

Na área de estudo, um grande número de poços tubulares profundos exploram não só este Sistema Aquífero, como também os Sistemas Aquíferos Serra Geral e Botucatu, situados imediatamente abaixo do Sistema Aquífero Bauru.

As características químicas e isotópicas das águas analisadas, associadas às características hidrogeológicas dos poços amostrados, nos permite estabelecer relações entre as águas provenientes destes três Sistemas Aquíferos, que são os mais importantes do estado.

Este trabalho de pesquisa foi realizado dentro do Projeto ARCAL XIII - RLA/8/014 da Agência Internacional de Energia Atômica - Viena, do Projeto Nº 43.89.0124.00 do FINEP/PADCT e com a colaboração da SABESP, Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

- caracterizar, do ponto de vista hidroquímico e isotópico, as águas subterrâneas amostradas.
- estudar a relação entre as águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru e as águas subterrâneas dos Sistemas Aquíferos Serra Geral e Botucatu, sotopostos.
- avaliar os processos de amostragem utilizados na coleta de amostras de água para análises isotópicas, sobretudo no caso do ^{13}C e ^{14}C .

- estudar, a partir dos métodos hidroquímicos e isotópicos, a origem e evolução das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru e dos Sistemas Aquífero Botucatu e Serra Geral.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange a faixa do Estado de São Paulo que vai de São Manuel no centro do estado, seguindo num eixo rumo noroeste até Presidente Epitácio no extremo oeste do estado. Esta faixa compreende cerca de 380 Km de extensão e segue aproximadamente a mesma orientação do Rio Paranapanema (Figura 1).

Figura 1: Área de Estudo

2.1 Localização e vias de acesso

O acesso a área pode ser feito, a partir de São Paulo, pela rodovia Presidente Castelo Branco (SP-280) até Botucatu, seguindo-se depois cerca de 20 km pela SP-300 até São Manuel. Pela mesma estrada chega-se a Bauru e segue-se pela SP-294 para Marília e Tupã, distantes respectivamente 105 km e 177 km de Bauru. Continuando-se em sentido oeste, toma-se a SP-425 com destino a Presidente Prudente e finalmente, através da SP-270 chega-se a Presidente Epitácio, no extremo oeste do estado (Figura 2).

Figura 2: Acesso Rodoviário à Área de Estudo

2.2 Aspectos Geográficos

A área de estudo situa-se totalmente no Domínio Morfoestrutural, conforme denominado por Ab'Saber em IBGE (1977), correspondente ao Planalto Ocidental Paulista, ocupando a porção centro-ocidental do Estado de São Paulo.

As feições morfológicas apresentadas por esta área mostram uma grande diversificação causada, entre outros fatores, pelas variações de espessura dos derrames basálticos,

restos de uma cobertura de sedimentos neo-mesozóicos na sua porção mais setentrional, variações de espessura ou inexistência de arenitos intercalados aos derrames basálticos e às disposições da drenagem, em grande parte superimposta (IBGE, 1977).

No Planalto Ocidental Paulista, as vastas extensões de baixos chapadões arenítico-basálticos, formados em estruturas triássicas e cretáceas, são interrompidas pelo alinhamento irregular das cuestas basálticas ou morros testemunho de arenito ou basalto, em fase de retalhamento e rebaixamento generalizado.

As cuestas arenítico-basálticas apresentam-se sinuosas e descontínuas. São linhas de escarpas esculpidas em estruturas monoclinaes, seccionadas por extensos rios conseqüentes e constituem os únicos acidentes de maior saliência no dorso ondulado do Planalto Meridional em São Paulo.

Os “fronts” das escarpas acentuados e dissimétricos estão voltados para o leste e seu reverso acompanha o mergulho geral das camadas mesozóicas para a calha do Rio Paraná.

Os reversos das cuestas arenítico-basálticas do interior paulista tomam, muitas vezes, o aspecto de vastas chapadas com flancos suavizados e front abrupto, com desnível de 250 a 300 metros, isto devido à insignificância das inclinações das camadas.

Constituem, pois, legítimas cuestas pela sua gênese e por seu entalhamento pela rede de drenagem.

Nas proximidades do Rio Paraná encontram-se colinas de aspecto tabular, esculpidas em camadas paleozóicas. Estas colinas estão em altitudes que vão de 275 a 300 metros.

3. GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Introdução

A área de estudo está situada ao longo da faixa do Estado de São Paulo denominada Alinhamento Paranapanema, sobre a zona de afloramento do chamado Grupo Bauru,

que ocupa toda a área central e oeste do estado. Pequenas porções da Formação Serra Geral e Botucatu também ocorrem na área, em seu extremo sudoeste.

O embasamento dos sedimentos que compõe o Grupo Bauru é constituído pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral. Trata-se de um embasamento topograficamente bastante irregular devido à efeitos tectônicos e erosivos (Campos, 1987).

A Figura 3 mostra a área de afloramento do Grupo Bauru no Estado de São Paulo, tendo em destaque a área de estudo, onde afloram também, em menor escala, as Formação Serra Geral e Botucatu.

Figura 3: Esboço das principais unidades geológicas aflorantes na área de estudo (modificado de IPT, 1981)

O início da sedimentação Bauru é caracterizado pelos arenitos da Formação Caiuá, com fácies fluvial e eólico, apresentando discordância erosiva em relação aos basaltos.

Progressivamente passamos para depósitos de ambiente fluvial meandrante a anastomosado, essencialmente arenoso, da Formação Santo Anastácio (Soares et al., 1980). Transacional e transgressivamente, processa-se a sedimentação da Formação Adamantina em ambiente flúvio lacustre bastante organizado (Campos, 1987). A área de ocorrência da Formação Adamantina ultrapassa os limites das unidades sotopostas, principalmente para nordeste. Interdigitando-se com as partes superiores da Formação Adamantina, ocorre a Formação Marília, caracterizada por leques aluviais de regime torrencial com instalação progressiva de clima semi árido, proporcionando a presença de cimentação carbonática.

3.2 Estratigrafia do Grupo Bauru

A Figura 4 apresenta o mapa de distribuição dos sedimentos do Grupo Bauru no Estado de São Paulo (IPT, 1981).

3.2.1. Formação Caiuá

A Formação Caiuá é constituída por arenitos de grãos finos, eólicos, uniformes, de cor vermelha escura na parte inferior e rosa na superior. Ela exhibe estratificação cruzada e não possui seixos ou material argiloso. Caracteriza-se também pela ausência de cimento calcífero, silicificação ou fósseis.

A partir de estruturas sedimentares singenéticas encontradas, Salamuni et al. (1981) concluem que o ambiente de deposição da Formação Caiuá é subaquático. Segundo os mesmos autores, o modelo que melhor se adapta é o de rios dirigindo-se no rumo geral E-W, para um corpo de água parada.

Segundo Riccomini et al. (1981) existem várias evidências que sugerem que a porção basal da Fm. Caiuá originou-se em ambiente aquoso e sua porção superior originou-se em ambiente ora eólico, ora aquoso.

Figura 4: Mapa de distribuição dos sedimentos do Grupo Bauru no Estado de São Paulo (IPT, 1981)

A Fm. Caiuá representa o início da deposição do Grupo Bauru, sendo constituída, predominantemente, por arenitos de coloração arroxeada com marcante estratificação cruzada de grande porte, tangencial na base, de granulação fina a média, bem selecionada ao longo do mesmo estrato, com grãos arredondados a subarredondados (IPT, 1981). Os arenitos são compostos por quartzo, feldspato, calcedônea e opacos, predominantemente quartzosos e ocasionalmente subarcoseanos. É comum observar-se matriz fina, sendo ocasional a presença de cimento carbonático ou silicoso. A espessura máxima conhecida da Formação no estado é de cerca de 200 metros (Landim & Soares, 1976).

3.2.2. Formação Santo Anastácio

Esta unidade é composta por um pacote de arenitos de origem fluvial, com espessura máxima de 80 metros, com seleção regular, boa maturidade textural e mineralógica, exibindo características cíclicas de deposição com alternância de depósitos de canal e de transbordamento, passando para arenitos imaturos (Landim & Soares, 1976).

Os arenitos desta Formação afloram nas cotas mais baixas dos vales dos afluentes do Rio Paraná, no oeste do Estado de São Paulo. O arenito Santo Anastácio é encontrado ora sobre a Fm. Caiuá, ora recobrimdo diretamente os derrames basálticos. A Fm. Santo Anastácio é composta por arenitos marrom avermelhados a arroxeados, de granulação fina média, seleção geralmente regular a ruim, com grãos arredondados a subarredondados, cobertos por uma película limonítica. São constituídos essencialmente de quartzo, ocorrendo também feldspato, calcedônea e opacos. O caráter subarcoseano é freqüente. Podem ocorrer cimento e nódulos carbonáticos. Predominam os bancos maciços com espessuras métricas e decimétricas, com incipiente estratificação plano-paralela ou cruzada (IPT, 1981).

Pelas suas características, pode-se afirmar que a Formação Santo Anastácio representa a transição entre o Arenito Caiuá sotoposto e a Formação Adamantina situada logo acima.

3.2.3. Formação Adamantina

A Formação Adamantina possui a mais ampla distribuição aflorante dentre as formações do Grupo Bauru no Estado de São Paulo. Proposta por Soares et al. (1980) como sendo um conjunto de fácies cuja principal característica é a presença de bancos de arenitos com espessura variando entre 2 e 20 metros, de granulação fina a muito fina, cor róseo a castanho, portando estratificação cruzada, alternados com bancos de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos, de cor castanho avermelhada a cinza castanho, maciços ou com acamamento plano paralelo grosseiro, freqüentemente com marcas de onda e micro estratificação cruzada.

Pode-se dizer, de um modo geral, que os depósitos da Fm. Adamantina são, relativamente à Fm. Santo Anastácio, melhor selecionados, mais finos, freqüentemente com mica e mais raramente feldspatos e opacos e exibem grande variedade de estruturas sedimentares (Almeida et al., 1980). Destas características podemos inferir uma maior maturidade textural e mineralógica além de uma área fonte diferenciada para a Fm. Adamantina, em relação à Fm. Santo Anastácio. Além disto deve-se imaginar um sistema flúvio-lacustre mais organizado que aquele da Fm. Santo Anastácio.

Estudos das variações faciológicas dentro da Fm. Adamantina têm sido realizados sem, contudo, chegar a um consenso sobre alguma subdivisão que possa ser aceita regionalmente já que as variações litológicas são, de um modo geral, localizadas.

As maiores espessuras observadas para esta formação estão nas suas porções ocidentais onde podem atingir 190 metros (Soares et al., 1980).

3.2.4. Formação Marília

Esta formação ocorre na parte centro sul do estado entre os médios vales dos rios Tietê e Paranapanema. Sua ocorrência é restrita quando comparada às demais formações do Grupo Bauru. A Formação Marília repousa geralmente sobre a Formação Adamantina e, mais para o leste, ocorre diretamente sobre os basaltos da Formação Serra Geral.

A Formação Marília depositou-se em um embaciamento localizado, desenvolvido na fase final da deposição do Grupo Bauru, em situação parcialmente marginal (Campos, 1987).

A Formação Marília é uma unidade composta por arenitos grosseiros a conglomeráticos com grãos angulosos, teor de matriz variável, seleção pobre, ricos em feldspatos, minerais pesados e minerais instáveis. Os arenitos ocorrem em bancos com espessura média entre 1 e 2 metros, maciços ou com acamamento incipiente sub-paralelo e descontínuo, raramente apresentando estratificação cruzada de médio porte com seixos concentrados nos estratos cruzados. Raras camadas descontínuas de lamitos vermelhos e calcários são encontradas.

O ambiente de deposição da Formação Marília é o de leques aluviais de regime torrencial. A transição do clima, passando de úmido para semi-árido, provoca o aparecimento de cimentação e nódulos carbonáticos.

A espessura máxima observada para esta formação é de 180 metros (Soares et al. 1980).

4. HIDROGEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 Introdução

O Grupo Bauru constitui um dos sistemas aquíferos mais intensamente explorados da Bacia do Paraná, devido a conjugação de diversos fatores, tais como: facilidade de captação de água por poços de pouca profundidade; grande extensão, recobrindo cerca de 104.000 km² no Estado de São Paulo e atendendo às mais variadas fontes de demanda como indústrias, agricultura e abastecimento público. O aumento da demanda por água potável, aliado às características acima citadas, nos permite prever um aumento acentuado na perfuração de poços nos próximos anos.

O Sistema Aquífero Bauru constitui uma importante alternativa para o aumento da demanda de água potável no interior do Estado de São Paulo, sobretudo nas pequenas

idades e nos locais onde a possibilidade de abastecimento por águas superficiais é restrita.

4.2 O Sistema Aquífero Bauru

Do ponto de vista hidrogeológico, Campos (1987) descreve o pacote sedimentar que constitui o Grupo Bauru como sendo um sistema aquífero livre por toda sua extensão, que está assentado sobre um substrato formado por derrames basálticos da Formação Serra Geral. Este substrato tem uma topografia bastante irregular devido não só a falhamentos como também a um ciclo erosivo pré-deposicional ao Bauru. A tendência geral de caimento deste substrato é de leste para oeste. O Anexo 1 apresenta uma seção geológica simplificada da área de estudo, ilustrando os principais sistemas aquíferos presentes.

A espessura saturada dos arenitos do Grupo Bauru varia em geral entre 100 e 150 metros. A variação desta espessura depende principalmente de dois fatores: A morfologia da superfície, que é dominante, e a morfologia do substrato basáltico. Na prática, isto significa que as maiores espessuras saturadas são observadas ao longo dos espigões e divisores de águas dos rios principais, atingindo valores da ordem de 200 metros. Nos vales, estes valores podem atingir 50 metros. Já o controle imposto pela forma do substrato revela-se em variações anômalas da espessura saturada do aquífero. Assim, nas zonas onde o substrato sofreu "embaciamento", os valores de espessura são da ordem de 200 metros igualando os espigões, sendo que o desnível altimétrico entre estas duas áreas ultrapassa os 100 metros. Já em zonas onde o substrato apresenta altos estruturais, temos um adelgaçamento na espessura do aquífero (DAEE, 1979).

Do ponto de vista hidráulico, vários autores têm apresentado dados concordantes a respeito da produtividade média dos poços que exploram o aquífero. Leinz & Sallentien (1962) verificaram que a porcentagem de poços improdutivos era pequena (1,8%); vazões entre 1 e 5 m³/h perfaziam 18,3%; vazões ente 5 e 10 m³/h eram as mais freqüentes (37,4%); a faixa entre 10 e 20 m³/h tinha 27,5% e vazões acima de 20 m³/h apareciam em 15% dos poços.

Diversos autores têm mostrado que as vazões obtidas neste aquífero situam-se entre 5 e 20 m³/h sendo que em casos excepcionais esses limites podem ser excedidos ou não atingidos.

Rocha et al. (1982), subdividiram o Sistema Aquífero Bauru em duas unidades distintas, em função dos diferentes litofácies, expressão geomorfológica e dos parâmetros hidráulicos e hidroquímicos a elas relacionadas. A unidade I corresponderia às Formações Marília e Adamantina e seria caracterizada por um potencial explorável médio a baixo, com águas relativamente mais salinizadas, fortemente bicarbonatadas cálcicas, potencialmente incrustantes ou corrosivas. A unidade II corresponderia às Formações Santo Anastácio e Caiuá e seria caracterizada por um potencial explorável médio a elevado, com águas com teores salinos muito baixos, bicarbonatadas calcio-magnesianas, potencialmente corrosivas.

Os estudos para determinação da porosidade e permeabilidade dos sedimentos do Grupo Bauru têm sido esparsos. Dentre eles destacam-se os de Barcha (1980) onde, a partir do estudo em laboratório de 350 amostras de 13 poços, chegou-se a índices bastante variáveis para a porosidade efetiva, com valores médios entre 16 e 26%.

Rocha et al. (1982) apresentaram um estudo da distribuição dos valores de permeabilidade média aparente (em m/dia) do Sistema Aquífero Bauru, segundo a relação do coeficiente de transmissividade e espessura saturada do aquífero, obtidos através de ensaios de bombeamento. Os valores de permeabilidade média aparente variam de 0,1 a 1 m/dia, sendo predominante o intervalo entre 0,1 e 0,3 m/dia.

Uma determinação dos parâmetros hidrodinâmicos (capacidade específica e transmissividade) a partir de ensaio de bombeamento em poços, foi feita pelo DAEE (1979).

Neste trabalho, os resultados obtidos para a região de Presidente Prudente e Marília mostram uma capacidade específica variando entre 0,1 e 1 m³/h/m, sendo dominante o intervalo de 0,3 a 0,4 m³/h/m. Os coeficientes de transmissividade predominantes para a área estão entre 10 e 30 m²/dia. Nos domínios das Formações Santo Anastácio e Caiuá esses parâmetros têm valores bem mais elevados com capacidade específica entre 1 e 4 m³/h/m e transmissividade entre 100 e 300 m²/dia.

Nas áreas das bacias dos rios Aguapeí, Peixe e Paranapanema, as condições de circulação da água subterrânea e o comportamento hidráulico do Aquífero Bauru, sugerem que a recarga natural se dá diretamente pelas chuvas que caem na região, e que a superfície potenciométrica está nitidamente associada a morfologia, com divisores de água subterrânea seguindo, aproximadamente, os divisores das bacias hidrográficas.

As linhas de fluxo convergem predominantemente para as calhas dos rios que têm caráter efluente. Os gradientes hidráulicos são elevados variando de 8 a 10 m/km nas áreas de montante das bacias hidrográficas e de 3 a 5 m/km, a jusante das mesmas.

A velocidade média aparente da água subterrânea, estimada com base no gradiente hidráulico, na permeabilidade e porosidade efetiva apresenta a seguinte variação na escala regional: 8 a 10 cm/dia nas formações Caiuá e Santo Anastácio e 4 cm/dia nas formações Adamantina e Marília.

De um modo geral, observa-se que a capacidade específica, transmissividade e permeabilidade aparente apresentam valores mais elevados na Formação Santo Anastácio e sobretudo na Formação Caiuá, ficando as Formações Adamantina e Marília com os valores mais baixos.

4.3 Qualidade das águas

Do ponto de vista hidroquímico, as águas do Sistema Aquífero Bauru nas regiões de Marília e Presidente Prudente pertencem aos seguintes grupos químicos principais (DAEE, 1979):

- águas fortemente bicarbonatadas, cálcicas e calco-magnesianas
- águas fracamente bicarbonatadas, calco-magnesianas
- águas bicarbonatadas sódicas
- águas cloro sulfatadas calco-magnesianas

Ainda segundo DAEE (1979), observa-se que as águas da Fm. Caiuá têm teores de sólidos totais dissolvidos menores e maior homogeneidade quando comparadas às demais águas do Sistema Aquífero Bauru.

De um modo geral as águas subterrâneas do Aquífero Bauru são de boa qualidade para consumo humano e animal. Análises de água com teor de algum constituinte acima do limite máximo permitido pela legislação em vigor, via de regra, refletem contaminação local, decorrente de uma má construção do poço e ausência de proteção sanitária, não significando qualquer deterioração do aquífero.

Para fins agrícolas, as águas em questão são consideradas excelentes em sua quase totalidade. Do ponto de vista industrial, é necessário um controle sobretudo quanto à dureza excessiva que torna a água inadequada à indústria têxtil, cortumes, indústrias de alimentos e caldeiras e ao pH que muitas vezes é inadequado principalmente às cervejarias.

A maioria dos poços que exploram o aquífero têm profundidades que variam principalmente entre 100 e 160 m de profundidade e apresentam vazões que estão entre 5 e 20 m³/h podendo chegar a valores mais elevados, principalmente quando exploram a Fm. Caiuá.

4.4 Os Sistemas Aquíferos Serra Geral e Botucatu - Pirambóia

Os Sistemas Aquíferos Serra Geral e Botucatu - Pirambóia constituem, juntamente com o Sistema Aquífero Bauru, os três principais sistemas aquíferos da Bacia do Paraná. O Anexo 1 apresenta uma seção esquemática da Bacia do Paraná, ilustrando essas unidades.

Sistema Aquífero Serra geral

Trata-se de um sistema aquífero fraturado, formado pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral e que apresenta características hidráulicas bastante heterogêneas. O pacote representado pelos derrames basálticos pode apresentar espessuras de até 2.000 metros, nas regiões centrais da bacia. Embora poucos poços explorem exclusivamente este sistema aquífero, são comuns poços que o exploram em conjunto com o Sistema Aquífero Bauru. Nestes casos, os poços penetram totalmente nos sedimentos do Grupo Bauru e parcialmente nos basaltos, recebendo assim, contribuição dessas águas.

Sistema Aquífero Botucatu - Pirambóia

Esse sistema aquífero é constituído pelas Formações Pirambóia e Botucatu. A Formação Pirambóia é composta por arenitos de origem fluvial enquanto a Formação Botucatu é composta por arenitos de origem eólica. Trata-se de um sistema aquífero predominantemente confinado pelos basaltos da Formação Serra Geral, sendo livre apenas em cerca de 10% da sua extensão. Sua recarga é proporcionada diretamente pela precipitação nas áreas de afloramento, próximas às bordas da Bacia do Paraná. Na área de estudo, mais precisamente em sua porção sudeste, afloram sedimentos das Formações Botucatu e Pirambóia. Os poços que exploram este Sistema Aquífero apresentam vazões elevadas, podendo atingir 1000 m³/h. Nos poços mais profundos é comum a ocorrência de águas termais.

5. APLICAÇÃO DE ISOTÓPOS NO ESTUDO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

5.1 Introdução

A composição dos átomos é descrita através da especificação do número de prótons e de nêutrons presentes no núcleo. O número de prótons é também chamado de "número atômico" e representado pela letra "Z", enquanto o "número de nêutrons" é representado pela letra "N". A soma do número de prótons e nêutrons do núcleo fornece o número de massa de um átomo, representado pela letra "A". Podemos representar a composição do núcleo de um átomo pela relação:

$$A = Z + N \quad (1)$$

Para se especificar a composição de um nuclídeo (átomo) utiliza-se o seu símbolo químico com o número de massa sobrescrito e o número atômico subscrito. Como o símbolo químico já implica no número atômico, normalmente este é omitido.

Os nuclídeos que possuem o mesmo número atômico (Z), mas diferentes valores do número de nêutrons (N) são chamados isótopos. Pelo fato de terem o mesmo Z, são átomos de um mesmo elemento químico e possuem propriedades químicas muito semelhantes, diferindo apenas nas suas massas.

Existem aproximadamente 1700 nuclídeos conhecidos. Deste total apenas 260 são estáveis. Os nuclídeos instáveis tendem a se decompor espontaneamente até atingir uma forma estável. Esse processo é chamado de decaimento radioativo. A estabilidade dos nuclídeos está ligada aos valores de N e Z. Somente os nuclídeos que apresentam valores próximos de N e Z são estáveis. Uma outra observação importante é o fato da maioria dos nuclídeos estáveis possuírem N e Z pares. Nuclídeos com N ou Z ímpares são muito menos comuns, podendo chegar a raros nos casos em que N e Z são ímpares (Faure, 1986).

5.2 Isótopos de Hidrogênio e Oxigênio

São os isótopos mais utilizados nos estudos de águas subterrâneas por fazerem parte da própria molécula da água. No entanto, por se tratarem de elementos de número atômico pequeno, possuem uma composição isotópica variável devido a efeitos de fracionamento isotópico que ocorrem durante os fenômenos físicos e químicos na natureza.

As propriedades termodinâmicas das moléculas dependem da massa dos átomos que as compõem, isto é, as moléculas formadas pelos isótopos mais pesados de um elemento terão comportamento diferente diante dos processos físico-químicos naturais. Para exemplificar, imaginemos um líquido formado por moléculas contendo diferentes isótopos de um elemento. O vapor originado deste líquido será certamente empobrecido em isótopos pesados em relação ao líquido original. Este fracionamento isotópico, como é chamado, pode ser expresso pelo fator α definido por:

$$\alpha = \frac{Ra}{Rb} \quad (2)$$

onde Ra é a relação entre isótopos pesados e leves na fase a e Rb é a mesma relação na fase b.

Este fracionamento isotópico ocorre com maior eficiência quando não há um equilíbrio entre as fases líquida e gasosa, isto é, quando a formação de vapor é contínua (Dixon & Chiswell, 1994).

Notação Delta (δ)

A quantidade absoluta de isótopos numa amostra não é usualmente medida. O que se determina na realidade é apenas a diferença na relação entre o isótopo pesado e o leve em comparação com um padrão. Esta diferença é designada pela letra grega delta (δ) e é definida por:

$$\delta = \frac{R_{amostra} - R_{padrão}}{R_{padrão}} \quad (3)$$

onde R é, no caso da água, a razão $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou $^2\text{H}/^1\text{H}$. Obviamente, valores positivos indicam amostras enriquecidas em isótopos pesados e valores negativos indicam amostras empobrecidas nestes isótopos. Como as diferenças entre as amostras e o padrão são normalmente muito pequenas, elas são expressas em unidades por mil (‰).

Padrão de Referência

Um dos maiores problemas na aplicação dos isótopos estáveis na hidrogeologia é a comparação de resultados obtidos por diferentes laboratórios. Atualmente esses resultados são sempre referidos a um padrão internacionalmente aceito. Portanto, é necessário que haja uma correta calibração das amostras padrão usadas pelos diferentes laboratórios do mundo em relação a um padrão internacional, a fim de permitir uma intercomparação dos resultados obtidos.

O padrão mais usado até hoje como referência para as variações dos isótopos estáveis de hidrogênio e oxigênio é o chamado SMOW (Standard Mean Ocean Water). Ele

corresponde a uma água hipotética contendo uma razão isotópica de oxigênio e hidrogênio igual à média da razão isotópica da água do mar, a qual foi avaliada por Craig (1961).

A escolha da média das águas dos oceanos pode parecer óbvia já que estes contém 98% da água do planeta e têm uma composição isotópica relativamente uniforme.

Entretanto, uma séria desvantagem do SMOW é a não existência de uma amostra real desta água que pudesse ser usada diretamente para calibrar os aparelhos de medição.

Uma tentativa para contornar este problema foi feita pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) por Craig (1966), da Universidade da Califórnia - EUA, que preparou uma grande amostra de água de composição isotópica mais próxima possível da definida pelo padrão SMOW.

Esta amostra foi obtida misturando-se águas destiladas do Oceano Pacífico com pequenas quantidades de outras águas para ajustar as razões isotópicas adequadamente. Esta amostra foi chamada de Vienna SMOW ou simplesmente V-SMOW e está disponível no AIEA em Viena para intercalibrações. Segundo Craig, os erros do V-SMOW em relação ao SMOW são de 0,02‰ para o ^{18}O e 0,2‰ para o ^2H .

5.3 Águas Atmosféricas

A maior parte das mudanças na composição isotópica das águas naturais ocorre na parte atmosférica do ciclo hidrológico e nas águas superficiais expostas à atmosfera. As águas subterrâneas "herdam" as características isotópicas das águas meteóricas e superficiais e dificilmente mudam, a não ser no caso de mistura de águas de diferentes composições.

A composição isotópica do vapor de água atmosférico e das chuvas pode ser muito variada. Desta forma, um único evento atmosférico afeta muito pouco o sistema hidrológico. Portanto, quando se pretende avaliar a recarga de algum sistema hidrológico, os estudos devem compreender um longo tempo (em relação ao tempo de residência da água no sistema estudado) para se obter uma média significativa da composição isotópica da precipitação. Para isto, a AIEA mantém uma série de estações de coleta de água de chuva e neve espalhadas pelo mundo com o objetivo de monitorar o conteúdo isotópico da precipitação.

A interpretação dos dados obtidos pela rede de estações do AIEA mostra que o grau de empobrecimento em isótopos pesados está relacionado a parâmetros geográficos tais como latitude, altitude, distância da costa e intensidade da chuva.

As estações localizadas em latitudes mais altas, tanto no hemisfério norte quanto no sul, têm valores mais negativos de $\delta^{18}\text{O}$ do que as localizadas próximas ao Equador.

Outro fator importante é a proximidade dos oceanos. A concentração média de ^{18}O e ^2H na chuva é geralmente mais baixa nas estações continentais do que nas estações costeiras e nas ilhas em latitudes comparáveis.

Também a altitude exerce grande influência na composição isotópica da água da chuva. Normalmente, as precipitações ocorridas nas altitudes mais elevadas têm valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ mais negativos do que próximas ao nível do mar. A magnitude deste fenômeno depende do clima local e da topografia, podendo chegar a gradientes entre 0,15 e 0,5 ‰/100 m para o $\delta^{18}\text{O}$ e entre 1,5 e 4,0 ‰/100 m para o $\delta^2\text{H}$.

A quantidade de chuva também pode ser um fator importante para a determinação da composição isotópica da precipitação. Normalmente, quanto maior a precipitação, mais negativos são os valores de $\delta^{18}\text{O}$.

Apesar de toda esta variação, existe uma correlação muito importante entre os dados de todas as estações do AIEA. Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ encontrados se aproximam muito da Reta Meteórica Mundial proposta por Craig (1961) e definida por

$$\delta^2\text{H}(\text{‰}) = 8 \delta^{18}\text{O}(\text{‰}) + 10 \quad (4)$$

A Figura 5 mostra o gráfico de $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ para as águas de chuva amostradas nas diversas estações de coleta mantidas pela AIEA em todo o mundo. Os valores obtidos se aproximam muito de uma reta, que pode ser expressa por uma equação muito próxima àquela vista em (4) e que corresponde à Reta Meteórica Mundial (Craig, 1961).

Figura 5: Representação gráfica dos valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ observados nas águas de chuva amostradas pelas estações da AIEA.

5.4 Água Subterrânea

O estudo das características e origem de águas subterrâneas está entre as mais bem sucedidas áreas de aplicação dos isótopos ambientais. Isto se dá pela natureza conservativa da composição dos isótopos estáveis no aquífero, o que torna possível caracterizar a origem das águas subterrâneas. Pode-se dizer que as águas subterrâneas guardam a composição isotópica da sua origem por longos períodos, da ordem de milhares de anos, desde que não sejam expostas a temperaturas superiores a 80°C (Gat, 1981).

Normalmente as águas subterrâneas podem ser divididas, quanto à sua origem, em:

Águas Meteoricas: são aquelas derivadas diretamente da precipitação ou de infiltração de água doce superficial, usualmente por recarga através de zona não saturada. A composição isotópica dessas águas é semelhante a da precipitação local, pelo menos em clima úmido. No caso de climas mais áridos, pode ocorrer um enriquecimento em isótopos pesados na água subterrânea como será discutido mais adiante.

“Paleoáguas”: definidas por Fontes (1981), que utilizou o termo “paleoáguas”, como sendo as águas originadas num passado mais distante, especialmente em períodos onde prevaleciam diferentes condições climáticas. A distinção entre esses dois grupos muitas vezes é arbitrária: É comum considerar-se águas com idades pleistocênicas (datadas pelo ^{14}C por exemplo) como sendo “paleoáguas” e em muitos casos a composição isotópica dessas águas difere da precipitação atual. Águas mais novas originadas em períodos de clima diferente podem vir a ser classificadas como “paleoáguas” enquanto águas com idades similares e mesma composição isotópica da precipitação atual são consideradas simplesmente águas meteóricas.

Águas Subterrâneas de Origem Meteórica

Em muitos casos a composição isotópica da água subterrânea reflete a média da composição isotópica da chuva na área de recarga. Por este motivo, as águas dos aquíferos freáticos são muitas vezes usadas para caracterizar o conteúdo isotópico da chuva de uma determinada região. Entretanto, a correlação entre a composição isotópica da chuva e a da água subterrânea derivada desta nem sempre é perfeita. Há casos onde a água subterrânea é mais enriquecida ou mais empobrecida em isótopos pesados. Esta distorção tende a tornar-se maior em climas mais áridos, normalmente no sentido de um enriquecimento em isótopos pesados

Nem toda precipitação atinge o aquífero, já que uma boa parte é perdida por escoamento superficial ou reevaporada do solo, principalmente pela ação das plantas (transpiração). Na medida em que esta perda é aleatória, não afeta a composição isotópica média. No entanto, quando a perda de água é caracterizada por uma composição isotópica diferenciada como, por exemplo, no caso de reevaporação de chuvas de verão, a composição isotópica da água de recarga pode diferir da média da precipitação. Este processo foi chamado de “seleção” por Gat & Truz (1967) em Gat (1981).

Outro exemplo de seleção é o caso onde a recarga seria feita preferencialmente por chuvas fortes. Como sabemos, estas chuvas tendem a ser mais empobrecidas em isótopos pesados do que a média, o que poderia tornar a água subterrânea mais empobrecida em isótopos pesados. Contudo, esta situação raramente ocorre, uma vez

que as precipitações mais intensas têm menor importância na recarga dos aquíferos quando comparadas às chuvas de menor intensidade, porém com maior duração.

Embora todos estes fenômenos que afetam a composição isotópica da água subterrânea ocorram freqüentemente na natureza, as variações provocadas por eles são relativamente pequenas. Via de regra, as águas de recarga dos aquíferos freáticos refletem bem a composição isotópica das chuvas. A variação da composição isotópica de um lugar em relação a outro é causada pela variabilidade geográfica do conteúdo isotópico da precipitação. Os fatores mais importantes para esta variabilidade são a altitude, latitude e proximidade do oceano. Além disto, a localização de áreas entre zonas de clima diferente, onde massas de ar provenientes de cada região produzem precipitações com propriedades distintas, contribui para aumentar a variabilidade da composição isotópica da precipitação.

“Paleoáguas”

As águas subterrâneas originadas em condições ambientais diferentes das presentes foram denominadas por Fontes (1981) como "paleoáguas". O conteúdo isotópico de águas de origem meteórica depende de fatores climáticos como origem da umidade do ar, temperatura de condensação, etc. Além disto, nas águas subterrâneas o conteúdo de ^2H e ^{18}O depende do mecanismo e do tempo de recarga e, principalmente, da distribuição da chuva com respeito à evapotranspiração. Numa escala plurianual é de se esperar que as águas subterrâneas representem a média local das condições climáticas. Entretanto, qualquer mudança climática significativa irá alterar a composição isotópica destas águas, modificando o $\delta^{18}\text{O}$ e o $\delta^2\text{H}$.

A água subterrânea constitui um verdadeiro "arquivo" contendo as características isotópicas das precipitações ocorridas no passado. Naturalmente, isso limita-se ao tempo de residência da água no aquífero, que em muitos casos pode chegar a milhares de anos. Outra limitação importante deste método é a própria datação da água que normalmente é feita medindo-se a porcentagem de radiocarbono da amostra. Como sabemos, este método pode ser usado com segurança até, no máximo, 30.000 anos.

A determinação do conteúdo isotópico em ^{18}O e ^2H de uma água subterrânea, bem como a sua “idade” relativa através da determinação da porcentagem de ^{14}C constitui

um importante artifício para a reconstituição paleoambiental de períodos até 30.000 anos b.p. (before present, i.e. antes do presente).

5.5 Isótopos de Carbono

Os isótopos de carbono (^{14}C e ^{13}C) também são muito utilizados nos estudos de águas subterrâneas, uma vez que estas águas normalmente apresentam carbono na forma de CO_2 dissolvido ou ainda sob a forma de HCO_3^- e CO_3^{2-} . Estes isótopos nos fornecem informações quanto a “idade” aparente e origem da água subterrânea estudada.

O ^{14}C é o método mais utilizado para se determinar o tempo de residência da água subterrânea. Sua faixa de atuação vai desde 1.000 até 30.000 anos b.p. Para águas mais jovens utiliza-se o método de ^3H que é capaz de determinar tempos de residência de até 50 anos (Kimmelman et al., 1986). A atividade do ^{14}C é expressa em porcentagem relativa ao ^{14}C das plantas de 1890, antes da entrada de grandes quantidades de CO_2 na atmosfera, provenientes da industrialização e das explosões termonucleares.

O isótopo radioativo do carbono é continuamente produzido na atmosfera terrestre através da reação entre a radiação cósmica secundária e átomos de nitrogênio (Libby, 1965). Os átomos de ^{14}C assim formados, são oxidados para constituir moléculas de $^{14}\text{CO}_2$ que se misturam ao dióxido de carbono presente na atmosfera e, posteriormente, chegam até a biosfera e hidrosfera.

Através de uma série de processos de troca ou assimilação desse radiocarbono, toda matéria orgânica viva passa a conter ^{14}C , assim como as conchas carbonáticas dos moluscos marinhos e terrestres. Este fato permite que os compostos carbonáticos possam ser datados através da medida do ^{14}C remanescente. Esta datação é feita detectando-se a emissão de partículas β^- , o que normalmente é feito utilizando-se contadores proporcionais ou de cintilação líquida.

No último século, o homem tem afetado a concentração natural do ^{14}C na atmosfera de duas maneiras: A queima de combustível fóssil, sem ^{14}C , reduziu o nível de ^{14}C na troposfera em cerca de 10% (Fritz e Fontes, 1980). Por outro lado, após 1963 observa-se um aumento no conteúdo de ^{14}C na atmosfera em decorrência das explosões nucleares. Após este aumento, o teor de ^{14}C tem apresentado uma redução gradativa, em direção

aos valores anteriormente observados em condições naturais. Este fato deve-se às trocas ocorridas entre a atmosfera e o oceano.

Como o teor de ^{14}C nas águas subterrâneas é determinado no Carbono Inorgânico Dissolvido (CID) e, admitindo-se que este carbono aquoso deverá ser influenciado por processos geoquímicos dentro do aquífero, é necessário se avaliar o conteúdo inicial de ^{14}C no momento da recarga. Para isto utiliza-se modelos que simulam a evolução geoquímica do conteúdo de ^{14}C durante o percurso da água subterrânea, desde o momento de recarga até o ponto de amostragem.

Os modelos são capazes de corrigir a interação entre o CID da água subterrânea e o carbono proveniente da rocha que compõe o aquífero. Como o carbonato desta rocha atua na evolução do CID da água subterrânea e este carbonato é normalmente isento em ^{14}C , é bastante comum ocorrer uma diluição no ^{14}C presente no CID. Entretanto, como o conteúdo de ^{13}C é sempre específico para a origem da água subterrânea, é muito importante a determinação dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ nas rochas que compõe o aquífero, já que este valor nos permite avaliar a evolução do CID da água subterrânea.

O ^{13}C é um isótopo estável que ocorre em todos os compostos de carbono e cuja abundância é expressa em relação a um padrão (PDB) em unidades por mil (‰). O aspecto mais importante da geoquímica do ^{13}C na maioria dos sistemas naturais é o fato de que os processos biológicos, sejam eles a fotossíntese ou a atividade das bactérias, podem causar efeitos de fracionamento isotópico, uma vez que existe uma utilização preferencial de um isótopo sobre o outro.

O ar atmosférico apresenta um $\delta^{13}\text{C}$ próximo a -7‰ enquanto a maioria das plantas apresenta valores entre -25 e -30‰ (Fritz, 1984). A água, ao percolar o solo, entrando assim em contato com o CO_2 empobrecido em ^{13}C , torna-se também empobrecida neste isótopo.

Quando a água percola rochas carbonáticas, considera-se que a contribuição de ^{13}C ocorre a partir do CO_2 e do carbonato aquoso que compõe a calcita. Os carbonatos marinhos apresentam $\delta^{13}\text{C}$ entre -2 e $+2\text{‰}$ enquanto que os carbonatos terrestres são mais empobrecidos em ^{13}C , uma vez que sua fonte de carbono também é mais empobrecida.

A percolação da água através do solo faz com que esta se torne saturada em CO_2 do solo, que apresenta uma pressão parcial muito maior do que o CO_2 atmosférico e tem $\delta^{13}\text{C}$ entre -20 e -24 ‰ (Fritz, 1984). Portanto, o conteúdo de ^{13}C no carbonato aquoso nas águas da zona não saturada é controlado pelo CO_2 biogênico do solo. Somente com a dissolução dos carbonatos das rochas é que ocorre o aporte de isótopos pesados na água subterrânea. Essa “mistura” aumentaria a quantidade de ^{13}C no carbonato aquoso e o $\delta^{13}\text{C}$ do Carbono Inorgânico Dissolvido da água mostraria então importantes aspectos da sua evolução geoquímica.

O estudo do conteúdo de ^{13}C e de suas variações pode contribuir muito para o conhecimento da evolução geoquímica da água.

6. METODOLOGIA

6.1 Metodologia de Campo - Amostragem

A coleta das amostras utilizadas no trabalho foi feita em 24 poços distribuídos por toda a área de estudo. A escolha destes poços foi feita em conjunto com a SABESP, não só em função da sua localização, como também da existência e confiabilidade dos dados construtivos. Foram priorizados os poços novos e os recém perfurados. Este cuidado foi tomado com o objetivo de nos assegurar da origem da água amostrada.

Outra condição importante na escolha destes poços foi o fato de estarem atualmente em uso, garantindo assim uma constante renovação da água, assegurando uma boa representatividade do aquífero.

A Figura 6 mostra a localização dos poços amostrados. O Anexo 2 apresenta o perfil construtivo desses poços.

No campo foram determinados os parâmetros físico-químicos tais como temperatura, condutividade elétrica, alcalinidade, pH e EH.

Figura 6: Localização dos poços amostrados

Para as análises físico-químicas a coleta das amostras foi feita conforme CETESB (1988).

A coleta das amostras de água para análises de ^2H e ^{18}O foi feita sem adição de qualquer preservativo, utilizando-se apenas frascos de polietileno de 20 ml, novos e descartáveis, enxaguados três vezes com a própria água a ser amostrada e cheios até a boca. A tampa utilizada, também de polietileno, era provida de batoque para a completa vedação do frasco.

As amostras para as análises de ^{13}C e ^{14}C foram obtidas utilizando-se dois métodos (Geyh & Wagner, 1979 e Kimmelmann, 1986). Ambos se baseiam na precipitação do carbonato dissolvido na água, na forma de carbonato de bário, pela adição de cloreto de bário em pH alcalino. No primeiro método, utiliza-se um recipiente de polietileno transparente com capacidade de 50 litros, no qual ocorre a precipitação do carbonato dissolvido na água (Figura 7). Para isto, elevou-se o pH até 12 através da adição de NaOH e acrescentou-se $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Após a precipitação de todo o carbonato e sulfato dissolvidos na água, retira-se a água sobrenatante através de uma torneira previamente

instalada no garrafão. Para se evitar a entrada de CO_2 atmosférico no recipiente, utiliza-se um tubo absorvente (Figura 8) constituído por quatro camadas: uma camada isolante (que pode ser de palha de aço), uma camada de amianto sodado (ascarita), outra camada isolante semelhante à primeira e uma camada de sílica gel.

Figura 7: Equipamento para amostragem de ^{13}C e ^{14}C , segundo o método de Geyh & Wagner, 1979 (Fonte: Kimmelman et al., 1986)

A seguir, o precipitado contendo o carbonato e o sulfato de bário é transferido para recipientes de polietileno de 2 litros (para análise do ^{14}C) ou 1 litro (para análise do ^{13}C) que são encaminhados ao laboratório. O processo todo pode levar até 48 horas, dependendo das características hidrogeoquímicas da água e do teor em bicarbonatos e carbonatos (Kimmelman et al., 1986). Este método é particularmente indicado nos casos em que não há muito tempo disponível para se ficar no local de coleta. Como a precipitação total pode demorar algum tempo, uma alternativa é transportar o recipiente cheio até o laboratório, permitindo-se assim que a precipitação se complete nos dias

subseqüentes. Só então retira-se o líquido sobrenatante e armazena-se o precipitado em frascos de 1 litro.

O segundo método de amostragem segue as instruções de Agência Internacional de Energia Atômica e utiliza um recipiente com capacidade para 60 litros, fornecido pela própria agência, elevado por um suporte metálico e dotado de uma válvula em sua parte inferior (vide Figura 9), na qual pode-se acoplar frascos de 1 litro destinados a receber o precipitado a medida em que este se forma. Depois de se calcular o volume de água necessário, acrescenta-se $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e NaOH para elevar o pH até 12. Como todo o processo tem que se passar no local de coleta, acrescenta-se um floculante (ex.: Praestrol) para acelerar a reação de precipitação do carbonato.

Figura 9: Amostrador para ^{13}C e ^{14}C (Kimmelman et al, 1986)

A medida que o precipitado se forma, vai passando para o frasco de 1 litro acoplado no fundo do garrafão. Quando o frasco de 1 litro está totalmente cheio, fecha-se a válvula e procede-se a troca do mesmo, permitindo-se assim que mais precipitado seja recolhido. Este método é rápido e dá bons resultados somente quando as águas têm altos teores de bicarbonato, levando a uma precipitação muito rápida. Para as água com baixo teor em bicarbonato, cuja precipitação leva muitas horas, o primeiro método é mais recomendável.

6.2 Procedimentos de Análise Utilizados em Laboratório

A análise dos principais íons foi realizada através de absorção atômica, no caso dos cátions, e cromatografia de íons no caso dos ânions. Os laboratórios responsáveis por este trabalho foram, respectivamente, o do Instituto de Química - USP e o do CEPAS - USP. As análises de ^2H , ^{18}O e ^{13}C foram feitas com a utilização de espectrômetro de massa, no Laboratório de Isótopos Estáveis do CENA - USP em Piracicaba. As análises de ^{14}C foram feitas com a utilização de detectores líquidos de cintilação no Laboratório de Isótopos Radioativos do CENA - USP em Piracicaba.

Íons Principais

- Cátions

A determinação dos principais cátions nas amostras de água subterrânea (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} e Fe total) foi feita através do método de absorção atômica. Este método também foi utilizado nas análises de metais das águas do Sistema Aquífero Bauru provenientes das regiões de Tupã e Marília.

Basicamente, um aparelho de absorção atômica (Figura 10) é composto por quatro partes principais: fonte de emissão, atomização, monocromador e detector-leitor. A fonte de emissão consiste em uma lâmpada especial que emite um feixe energético. Este feixe atravessa a amostra solubilizada e nebulizada na chama de um queimador alimentado por gases carburantes e comburentes. Este processo constitui a segunda etapa da absorção atômica e é conhecido por atomização. Após a chama, o feixe atinge o monocromador que nada mais é do que um dispositivo para eliminar as radiações parasitas (interferências) que podem ser emitidas pela chama. Finalmente o feixe chega

ao detector-leitor onde a radiação absorvida é detectada por um tubo fotomultiplicador que produz um sinal elétrico proporcional à intensidade luminosa recebida (Trescases, 1984).

Figura 10: Esquema genérico de um aparelho de absorção atômica (Trescases, 1984)

- Ânions

A determinação dos principais ânions presentes nas amostras de água subterrânea coletadas foi feita no Laboratório de Hidroquímica do CEPAS - USP, sempre utilizando-se um cromatógrafo de íons. Os principais ânions analisados foram F^- , Cl^- , NO_3^- e SO_4^{2-} .

A cromatografia de íons se baseia na análise de espécies iônicas em meio aquoso, através da separação destas espécies em colunas de resina de baixa capacidade de troca iônica.

A amostra é injetada sob pressão atmosférica no sistema e é carregada para a coluna de troca iônica, juntamente com o eluente (solução de hidróxido de sódio). Dentro da coluna, os ânions são separados de acordo com sua afinidade com a resina. O que determina a separação dos ânions e seus tempos de retenção é a força e composição do eluente, combinado com a resina de troca iônica. A detecção é feita através de uma célula de condutividade. Para se evitar que os cátions influam nos resultados, estes são retirados por uma coluna supressora. Os valores de condutividade são então registrados por picos, sempre em relação a um background. As concentrações dos elementos na

amostra são proporcionais a área destes picos e podem ser determinadas comparando-se o pico obtido com o de um padrão de concentração conhecida.

O cromatógrafo utilizado nas análises feitas é um Dionex 2010i,. A coluna separadora utilizada foi o modelo HPIC-AS 4. Os eluentes utilizados foram soluções de Na_2CO_3 (1,8 mM) e NaHCO_3 (1,7mM).

Os limites de detecção (em ppm) do método utilizado foram os seguintes: F^- : 0,016; Cl^- : 0,005; NO_3^- : 0,011; SO_4^{2-} : 0,02.

$\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ na água subterrânea

As análises de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ foram feitas no Laboratório de Isótopos Estáveis do CENA - USP em Piracicaba, SP. Para a determinação do $\delta^{18}\text{O}$ nas amostras de água, o método utilizado foi o do equilíbrio entre a amostra de água e o gás CO_2 . Este método foi desenvolvido por Matsui (1980) e consiste na adição, em uma seringa de vidro, de 3 ml de amostra, uma gota de ácido sulfúrico e 5 ml de CO_2 . Após agitação, as seringas são armazenadas à temperatura constante de 25°C por 24 horas para que ocorra a troca isotópica entre a água e o gás.

O gás assim obtido é introduzido numa linha de vácuo para que se possa extrair o CO_2 , que agora apresenta um conteúdo isotópico em ^{18}O diferente do CO_2 original. Na linha de vácuo, o gás injetado atravessa “armadilhas” gelo seco e nitrogênio líquido que removem o vapor de água por congelamento. O gás resultante deste processo (CO_2) é então expandido no espectrômetro de massa e o resultado apontado pelo aparelho é, então, comparado a outro resultado obtido pela passagem de um padrão de composição isotópica conhecida pelo mesmo espectrômetro de massa. O resultado final é sempre expresso em função de um padrão conhecido, no caso o SMOW.

Para a análise do deutério utiliza-se o H_2 proveniente da água, que é expandido no espectrômetro de massa, da mesma forma que no caso do ^{18}O . Na extração do H_2 presente na molécula da água, utiliza-se urânio aquecido a 650°C numa amostra de água de apenas 5µl, confinada em alto vácuo, dentro de um capilar de vidro. O resultado assim obtido é comparado a um padrão interno ou uma amostra de referência que é calibrada em função de um padrão internacional (SMOW).

^{13}C e ^{14}C na água subterrânea

As análises de ^{13}C e ^{14}C foram feitas no Laboratório de Isótopos Radioativos do CENA - USP em Piracicaba, utilizando-se a metodologia descrita por Pessenda et al. (1991). As amostras de carbonato de bário obtidas pela metodologia já descrita são tratadas com ácido fosfórico 85% para a obtenção do CO_2 em um sistema fechado, sob vácuo. O vapor de água originado nesta reação é retido por uma "armadilha" de gelo seco (-72°C) e álcool isopropílico. O CO_2 produzido é coletado em outra "armadilha" de nitrogênio líquido (-180°C) e armazenado em tanques de vidro. Neste estágio coleta-se uma alíquota desta amostra para análise de ^{13}C em espectrômetro de massa FINNEGAN-MAT, modelo delta E.

O CO_2 produzido é mantido em contato com lítio metálico previamente aquecido em câmara de reação (600 a 700°C) para a formação de carbeto de lítio. Após o término da reação, a câmara é resfriada e lentamente se adiciona água destilada ocorrendo a hidrólise do carbeto e produção de acetileno (C_2H_2). A síntese do benzeno ocorre pelo processo de trimerização do acetileno em contato com um catalizador de cromo-alumina, sendo que o benzeno assim formado é evaporado por aquecimento a 120°C por 2 horas, efetuando-se sua coleta com auxílio de uma "armadilha" resfriada a -72°C sob vácuo.

O benzeno assim formado é transferido com auxílio de micropipetas para frascos de contagem feitos de vidro com baixo teor de potássio. O volume utilizado é de 3 ml de benzeno, aos quais se adiciona 0,5 ml de solução cintiladora. A detecção do radiocarbono é feita em um espectrômetro de cintilação líquida de baixo nível de radiação de fundo, Tri-Carb Packard, modelo 1550. Antes de se iniciar o processo de contagem, a amostra é mantida em ambiente escuro por no mínimo 24 horas para se eliminar o efeito da fluorescência.

O resultado obtido em porcentagem de carbono moderno é comparado com o padrão (ácido oxálico NBS) para a determinação da "idade" radiocarbônica da amostra.

7. RESULTADOS

Os resultados obtidos encontram-se nas tabelas apresentadas a seguir. As características hidrogeológicas dos poços amostrados encontram-se na Tabela 1. A Figura 6 apresentada anteriormente mostra a localização dos poços amostrados. Os resultados obtidos nas análises realizadas no local da coleta encontram-se na Tabela 2. Os resultados obtidos nas análises hidroquímicas da água subterrânea amostrada encontram-se na Tabela 3. Os resultados das análises geoquímicas das amostras de sondagem do poço 24 encontram-se na Tabela 4. A Tabela 5 mostra os resultados das análises de metais realizados nas amostras de água subterrânea do Sistema Aquífero Bauru, das regiões de Tupã e Marília. Os resultados das análises isotópicas encontram-se na Tabela 6. As Tabelas 7 e 8 referem-se a análises geoquímicas e isotópicas de amostras de testemunhos de sondagens, obtidos durante a perfuração do poço 24 (Presidente Prudente P-2)

Os perfis construtivos dos poços amostrados, os dados geológicos, de cota da boca do poço e de profundidade foram obtidos nos Relatórios Finais de Poços existentes nos arquivos da SABESP. Os dados de vazão foram obtidos diretamente com os responsáveis pelos poços em cada localidade visitada, representando portanto, as vazões atuais.

Os poços escolhidos foram divididos em 4 regiões principais, conforme mostra a Figura 11. Na região de Avaré foram amostrados 8 poços, sendo que 4 exploram o Sistema Aquífero Botucatu/Pirambóia (13, 14, 15, 21), 3 exploram exclusivamente o Sistema Aquífero Serra Geral (19, 20, 22) e 1 explora principalmente o Sistema Aquífero Bauru com contribuição do Sistema Aquífero Serra Geral (23).

Na região de Marília foram amostrados 6 poços sendo que 4 exploram exclusivamente o Sistema Aquífero Bauru (02, 03, 04, 05) e 2 exploram o Sistema Aquífero Bauru com contribuição do Sistema Aquífero Serra Geral (01, 06). Na região de Tupã foram amostrados 6 poços (07, 08, 09, 10, 11, 12) sendo que todos exploram o Sistema Aquífero Bauru. Na região de Presidente Prudente foram amostrados 4 poços sendo que 3 exploram o Sistema Aquífero Botucatu/Pirambóia (16, 17, 24) e 1 explora o Sistema Aquífero Bauru (18).

Tabela 1: Características hidrogeológicas dos poços amostrados (dados fornecidos pela SABESP)

Amostra	Local	Sist. Aquífero	Tipo	Altitude (m)	Prof. (m)	Vazão (m ³ /h)
1	Ubirajara P-1	Bauru/S. Geral	Livre	490	160	38
2	Alvinlândia P-5	Bauru	Livre	540	197	15
3	Alvinlândia P-4	Bauru	Livre	540	160	10
4	Gália P-1	Bauru	Livre	520	220	48
5	Gália P-2	Bauru	Livre	560	250	18
6	Lucianópolis	Bauru/S. Geral	Livre	535	260	25
7	Arco-Íris	Bauru	Livre	440	142	3,5
8	Tupã-Pq. Univer.	Bauru	Livre	505	177	50
9	Tupã P-58	Bauru	Livre	510	235	100
10	Tupã	Bauru	Livre	520	240	100
11	Tupã P-25	Bauru	Livre	490	222	60
12	Tupã P-26	Bauru	Livre	500	212	70
13	Avaré P-5	Botucatu/Piram.	Confinado	760	420	120
14	Avaré P-6	Botucatu/Piram.	Confinado	775	422	110
15	Avaré P-7	Botucatu/Piram.	Confinado	780	430	65
16	P. Prudente P-1	Botucatu/Piram.	Confinado	407	1800	500
17	Pres. Epitácio	Botucatu/Piram.	Confinado	325	3953	900
18	Pres. Prudente P1a	Bauru	Livre	404	204	45
19	Ap. de S. Manuel P2	Serra Geral	Livre	680	120	34
20	Ap. de S. Manuel P1	Serra Geral	Livre	690	101	12
21	Areiópolis P-5	Botucatu	Confinado	610	355	75
22	Areiópolis P-1	Serra Geral	Livre	690	120	20
23	Pratânia	Bauru/S. Geral	Livre	670	60	24
24	Pres. Prudente	Botucatu	Confinado	408	1794	260

Nas regiões de Marília e Tupã as amostras obtidas são provenientes exclusivamente de aquíferos livres (Sistema Aquífero Bauru), enquanto que nas regiões de Avaré e Presidente Prudente as amostras são oriundas tanto de aquíferos livres como confinados.

Figura 11: Divisão dos poços amostrados segundo regiões geográficas principais

7.1. Hidroquímica

Os dados hidroquímicos apresentados nas Tabelas 2 e 3 mostram que as águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru são fracamente mineralizadas. Também os poços que apresentam contribuição do Sistema Aquífero Serra Geral e os poços que exploram o Sistema Aquífero Botucatu apresentam, em geral, águas pouco mineralizadas. Neste último caso, as exceções ficam por conta das águas termais da região de Presidente Prudente.

Tabela 2: Resultados obtidos nas análises de campo

Amostra	Local	Temp (°C)	pH	EH (mV)	Condutividade (µS/cm)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)
01	Ubirajara P-1	22,00	9,01	223,00	320,00	213,50
02	Alvinlândia P-5	22,00	7,16	272,00	350,00	201,30
03	Alvinlândia P-4	23,00	7,06	267,00	360,00	311,10
04	Gália P-1	21,50	6,06	315,00	310,00	176,90
05	Gália P-2	22,00	5,84	295,00	280,00	183,00
06	Lucianópolis	20,50	8,89	241,00	280,00	231,00
07	Arco-Íris	21,00	10,05	236,00	290,00	231,00
08	Tupã (Pq. Univer.)	21,50	7,03	314,00	190,00	128,10
09	Tupã P-58	22,00	6,90	353,00	170,00	115,90
10	Tupã	23,00	6,76	351,00	70,00	68,80
11	Tupã P-25	22,00	6,87	361,00	80,00	54,90
12	Tupã P-26	21,50	6,71	344,00	160,00	97,60
13	Avaré P-5	27,00	8,00	228,00	210,00	164,70
14	Avaré P-6	26,50	8,00	-	250,00	142,60
15	Avaré P-7	27,00	7,80	-	189,00	89,20
16	P. Prudente P-1	60,00	8,80	75,50	1.180,00	385,50
17	Pres. Epitácio	72,00	8,60	-89,00	820,00	506,30
18	Pres.Prudente P-1a	22,00	9,96	-	240,00	65,20
19	Ap.de S.Manuel P-2	24,00	6,60	340,00	103,00	73,20
20	Ap.de S.Manuel P-1	24,00	6,40	392,00	81,00	54,20
21	Areiópolis P-5	28,50	7,40	319,00	194,00	134,20
22	Areiópolis P-1	21,00	6,00	376,00	111,00	85,50
23	Pratânia	22,50	6,20	480,00	142,00	97,60
24	Pres. Prudente	70,00	8,80	207,00	1.430,00	506,30

- não analisado

De acordo com os resultados acima, as águas do Sistema Aquífero Bauru são fracamente mineralizadas, com Condutividade Elétrica (CE) sempre inferior a 360 µS/cm. Os poços que apresentam contribuição do Sistema Aquífero Serra Geral apresentam o mesmo comportamento.

Na região de Marília, os valores de CE estão na faixa entre 280 e 360 µS/cm. Os poços que apresentam contribuição do Sistema Aquífero Serra Geral também se mantiveram

neste intervalo, não apresentando qualquer mudança de comportamento em relação aos demais, que exploram somente o Sistema Aquífero Bauru. Na região de Tupã os valores foram um pouco mais baixos, entre 70 e 290 $\mu\text{S/cm}$.

As águas provenientes do Sistema Aquífero Botucatu - Pirambóia apresentaram valores de CE bem mais elevados, sobretudo na região de Presidente Prudente, onde o confinamento do aquífero é maior. Nesta região os valores de CE estão entre 820 e 1.430 $\mu\text{S/cm}$, bem acima dos valores para o Sistema Aquífero Bauru, indicando uma maior salinização destas águas. Na região de Avaré, mais próxima da zona de recarga do Sistema Aquífero Botucatu e onde o confinamento é menor, os valores de CE estão entre 189 e 250 $\mu\text{S/cm}$. Nesta mesma região, os poços que exploram os Sistemas Aquíferos Bauru e Serra Geral apresentam valores de CE entre 81 e 142 $\mu\text{S/cm}$.

O pH das águas amostradas provenientes do Sistema Aquífero Bauru situa-se entre 5,84 e 10,05. Na região de Marília os valores situam-se entre 5,84 e 9,01. Na região de Tupã, a maioria dos valores está entre 6,71 e 7,03, com uma única exceção (poço 7) que apresentou um pH de 10,05. Este valor não reflete o pH típico dessas águas, podendo ser provocado por algum problema de contaminação local. Na região de Presidente Prudente o único poço que explora o Sistema Aquífero Bauru apresentou pH de 9,96 enquanto que os demais poços, que exploram o Sistema Aquífero Botucatu, apresentaram valores de pH entre 8,60 e 8,80. Kimmelman et al. (1986) encontraram valores semelhantes para águas do Sistema Aquífero Botucatu confinado. Na região de Avaré os poços que exploram os Sistemas Aquíferos Bauru e Serra Geral têm valores de pH muito próximos, ocupando o intervalo entre 6,00 e 6,60. Os poços que exploram o Sistema Aquífero Botucatu - Pirambóia nesta região apresentam valores de pH entre 7,40 e 8,00.

Os valores de alcalinidade observados para as águas do Sistema Aquífero Bauru estão entre 54,9 e 311,1 mg/L. Na região de Marília esses valores estão entre 176,9 e 311,1 mg/L, diminuindo um pouco na região de Tupã, onde se observa valores entre 54,9 e 231,0 mg/L. Uma possível explicação para este fato pode ser a ocorrência, na região de Marília, da Formação Marília, que é rica em nódulos e matriz carbonática, provocando valores mais elevados de alcalinidade nas águas dessa região. Apesar desses valores serem, na sua grande maioria, inferiores ao limite de potabilidade normalmente

utilizado no Brasil (250 mg/L), algumas dessas águas são impróprias para uso em indústrias como cervejarias e cortumes..

Na região de Presidente Prudente as águas termais provenientes do Sistema Aquífero Botucatu apresentam valores de alcalinidade mais elevados (entre 385,5 e 506,3 mg/L). Esses valores ocorrem nos poços que exploram o Sistema Aquífero Botucatu confinado a grandes profundidades, onde as águas são significativamente mais mineralizadas.

7.1.1. Íons Principais

As análises químicas realizadas em laboratório mostraram que quase todas as águas subterrâneas amostradas são muito pouco mineralizadas. As exceções a esta regra são as águas subterrâneas termais provenientes do Sistema Aquífero Botucatu na região de Presidente Prudente. Neste local, o aquífero encontra-se a cerca de 1500 metros de profundidade e suas águas podem apresentar “idades” de até 30.000 anos (Silva, 1983).

O teor de sódio das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru amostradas está situado entre 0,6 e 73,3 mg/L. Na região de Marília este teor está entre 16,0 e 73,3 mg/L sendo que os valores mais altos ocorrem nos poços que apresentam contribuição do Sistema Aquífero Serra Geral. Na região de Tupã os valores estão entre 2,0 e 18,5 mg/L. As águas termais de Presidente Prudente têm teores de sódio bastante elevados, chegando a até 295,0 mg/L. O teor de cloreto dessas águas também é bastante elevado, chegando até 208,0 mg/L, contrastando com os baixos teores do Sistema Aquífero Bauru, que não excederam 1,50 mg/L. Os poços da região de Avaré, apesar de explorarem o Sistema Aquífero Botucatu, não apresentam os mesmos teores elevados de sódio e cloreto, o que se explica pelo menor confinamento do aquífero neste local, com águas mais novas em relação às de Presidente Prudente.

Tabela 3: Resultados obtidos nas análises químicas das águas amostradas

Amostra	Local	Cl ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	F ⁻ mg/L	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L
1	Ubirajara P-1	0,11	0,84	0,08	0,08	63,30	0,30	36,30	5,80
2	Alvinlândia P-5	0,16	2,16	0,49	0,10	24,50	1,80	32,30	5,80
3	Alvinlândia P-4	0,48	3,18	0,55	0,02	16,00	1,50	36,20	5,50
4	Gália P-1	0,19	20,50	0,76	0,04	26,00	3,10	36,30	6,70
5	Gália P-2	0,16	2,10	1,36	0,07	18,00	2,60	10,40	5,40
6	Lucianópolis	0,16	0,90	0,94	0,12	73,30	0,30	21,30	4,40
7	Arco-Íris	1,08	0,72	12,83	0,01	18,50	0,10	11,70	4,90
8	Tupã (Pq. Univer.)	0,07	1,63	0,17	0,04	3,50	2,50	11,90	4,70
9	Tupã P-58	0,19	1,63	0,12	0,05	2,70	2,80	17,80	4,50
10	Tupã	0,40	4,61	nd	0,03	2,00	3,70	13,40	2,00
11	Tupã P-25	2,08	9,80	nd	0,04	52,00	3,30	12,50	4,50
12	Tupã P-26	4,00	14,88	nd	0,03	3,80	4,10	19,50	3,40
13	Avaré P-5	0,40	0,10	0,50	0,23	15,00	0,90	7,30	1,20
14	Avaré P-6	2,40	0,20	0,90	0,23	10,00	0,30	9,20	1,30
15	Avaré P-7	1,70	0,00	1,30	0,25	7,00	0,50	12,30	2,30
16	Pres. Prudente P1	165,00	0,00	109,30	10,50	230,00	2,10	4,70	1,80
17	Pres. Epitácio	59,70	0,00	80,80	6,60	180,00	1,80	0,50	0,90
18	Pres. Prudente P1a	1,50	0,20	2,50	0,28	0,60	0,30	2,90	1,40
19	Ap. de S.Manuel P2	1,00	5,00	0,10	0,07	2,00	0,90	10,70	1,80
20	Ap. de S.Manuel P1	1,00	4,80	0,10	0,07	2,00	0,90	10,90	1,90
21	Areiópolis P-5	0,10	0,70	0,00	0,20	4,40	2,10	19,00	0,70
22	Areiópolis P-1	0,80	2,10	0,00	0,25	6,60	0,90	11,30	1,40
23	Pratânia	1,80	9,00	0,10	0,12	2,90	1,70	14,70	2,90
24	Pres. Pudente P-2	208,00	0,00	88,00	12,00	295,00	3,40	2,40	0,90

n.d. abaixo do limite de detecção

- não analisado

As Figuras 12 a 18 mostram a classificação de todas as águas amostradas, segundo o Diagrama de Piper. Os resultados estão divididos por regiões e por sistema aquífero. As tabelas com os dados de concentração em meq/L encontram-se no Anexo 3.

DIAGRAMA DE PIPER

Classificação das águas subterrâneas dos poços situados na região de Marília

Figura 12

DIAGRAMA DE PIPER

Classificação das águas subterrâneas dos poços situados na região de Tupã

Figura 13

DIAGRAMA DE PIPER

Classificação das águas subterrâneas dos poços situados na região de Avaré

Figura 14

DIAGRAMA DE PIPER

Classificação das águas subterrâneas dos poços
situados na região de Presidente Prudente

Figura 15

DIAGRAMA DE PIPER

Classificação das águas subterrâneas dos poços que exploram o Sistema Aquífero Bauru

Figura 16

DIAGRAMA DE PIPER

Classificação das águas subterrâneas dos poços que exploram o Sistema Aquífero Botucatu

Figura 17

DIAGRAMA DE PIPER

Classificação das águas subterrâneas dos poços que exploram o Sistema Aquífero Serra Geral

Figura 18

As águas provenientes do Sistema Aquífero Bauru são predominantemente bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e, eventualmente, bicarbonatadas sódicas. Estas últimas estão restritas a dois poços na região de Marília (01 e 06) e um na região de Tupã (11), que apresentaram teores de sódio em torno de 60 mg/L, bem acima da média (25,3 mg/L).

As águas provenientes do Sistema Aquífero Serra Geral são, na sua totalidade, bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas. No Sistema Aquífero Botucatu, as águas se dividem em dois grupos principais, sendo o primeiro representado pelas águas da região de Avaré, predominantemente bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e o segundo grupo representado pelas águas termais de Presidente Prudente, predominantemente bicarbonatadas sódicas ou cloro-sulfatadas sódicas.

Na região de Marília o teor de cálcio observado está entre 10,4 e 36,3 mg/L (média de 28,8 mg/L) e na região de Tupã este teor fica entre 11,7 e 19,5 mg/L (média de 14,5 mg/L). Os valores mais elevados na região de Marília podem estar relacionados à presença da Formação Marília que, como dito anteriormente, é rica em nódulos e matriz carbonática. Os poços que exploram o Sistema Aquífero Botucatu e Serra Geral apresentam um teor de cálcio bem menor se comparados às águas amostradas na região de Marília e Tupã.

De um modo geral, pode-se dizer que as águas provenientes do Sistema Aquífero Bauru são, em relação às águas dos Sistemas Aquíferos Botucatu e Serra Geral, mais mineralizadas em cálcio e magnésio. A Figura 19 mostra a relação entre esses dois elementos em cada uma das regiões amostradas.

De acordo com o gráfico da Figura 19, pode-se ver claramente que as águas subterrâneas provenientes do Sistema Aquífero Bauru (regiões de Marília e Tupã) têm teores mais altos de Ca^{2+} e Mg^{2+} , sobretudo na região de Marília. As águas subterrâneas dos Sistemas Aquíferos Botucatu/Pirambóia e Serra Geral têm teores menores desses elementos.

Figura 19 : Relação entre Ca^{2+} e Mg^{2+} nas águas amostradas

A comparação entre a relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ das águas subterrâneas com os valores de CaO e MgO obtidos nas análises geoquímicas das amostras de sondagem (Tabela 4) mostra que as águas subterrâneas termais da região de Presidente Prudente apresentam uma relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ entre 1,5 e 2,0, coincidindo com a relação CaO/MgO dos basaltos da Formação Serra Geral, indicando uma possível contribuição deste Sistema Aquífero nessas águas. Outras águas subterrâneas apresentam a mesma relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, porém são um pouco mais enriquecidas em cálcio.

Na Tabela 4 observamos que as Formações Botucatu e Pirambóia têm uma relação CaO/MgO próxima de 3,0. As águas dos poços 13, 14 e 15, situados na região de Avaré e que exploram o Sistema Aquífero Botucatu-Pirambóia, apresentam razões semelhantes nesses elementos, refletindo bem a composição do aquífero.

A maioria dos poços da região de Tupã também apresentou uma relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ próxima de 2,0 e, portanto, coincidente com os valores de CaO e MgO obtidos na análise geoquímica do Grupo Bauru. As águas provenientes do Sistema Aquífero Bauru na região de Marília não seguem esta relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, mostrando valores de cálcio superiores às demais águas amostradas. Esse excesso de cálcio possivelmente é

proveniente da Formação Marília que, como já foi dito, é rica em nódulos e matriz carbonática.

Tabela 4: Resultados das análises geoquímicas de CaO e MgO das amostras de sondagem do poço 24 (Presidente Prudente P-2)

Prof (m)	Formação / Rocha	CaO (%)	MgO (%)
152	Bauru / Arenito	3,38	1,66
852	Serra Geral / Basalto	10,30	4,92
1340	"Intertrapp" / Arenito	1,00	0,49
1574	Serra Geral / Basalto	6,84	3,22
1576	Serra Geral / Basalto	6,52	3,22
1604	Serra Geral / Basalto	7,52	4,85
1744	Botucatu / Arenito	0,66	0,23
1790	Pirambóia / Arenito	1,86	0,64

O potássio aparece em pequenos teores nas águas subterrâneas provenientes do Sistema Aquífero Bauru, tanto na região de Marília (entre 0,3 e 3,1 mg/L) como na de Tupã (entre 0,1 e 4,1 mg/L). Na região de Marília, observa-se que os teores mais baixos ocorrem nos poços que apresentam contribuição do Sistema Aquífero Serra Geral.

Dentre os poços que exploram o Sistema Aquífero Bauru, o sódio está presente em maior quantidade na região de Marília, com valores entre 16,0 e 73,3 mg/L. Na região de Tupã os valores são bem mais baixos, excetuando-se o poço 11, que apresenta 52,0 mg/L neste elemento. Nos demais poços amostrados, o teor de sódio só é elevado nos poços profundos da região de Presidente Prudente.

As águas dos poços que exploram o Sistema Aquífero Bauru, mas que apresentam contribuição do Sistema Aquífero Serra Geral apresentam teores de Na^+ levemente mais altos e teores de K^+ levemente mais baixo quando comparadas às águas dos poços que exploram somente o Sistema Aquífero Bauru.

As águas subterrâneas de todos os poços que exploram o Sistema Aquífero Bauru apresentam nitrato em sua composição, sendo que os teores medidos estão entre 0,72 e 20,50 mg/L. A presença do nitrato nestas águas está associada a problemas de contaminação do aquífero através de fossas ou do uso de fertilizantes. Esta contaminação ocorre pela alta vulnerabilidade do Sistema Aquífero Bauru, que é livre em toda sua extensão. Os poços que exploram o Sistema Aquífero Serra Geral também

apresentaram o mesmo problema, com teores variando entre 2,10 e 5,00 mg/l de NO_3^- , o que era de se esperar, já que este aquífero também é livre e comunica-se diretamente com o Sistema Aquífero Bauru.

Os teores de nitrato observados nos poços dos Sistemas Aquíferos Bauru e Serra Geral estão abaixo do limite máximo estabelecido pela Organização Mundial de Saúde, que é de 45 mg/L e, portanto, não oferecem risco à saúde da população abastecida por estas águas.

No Sistema Aquífero Botucatu os teores de nitrato, quando existem, são muito baixos, chegando ao máximo de 0,70 mg/L no poço 21. Os poços profundos da região de Presidente Prudente foram os únicos que não apresentaram nitrato em suas águas. O grande confinamento do aquífero neste local reduz bastante a vulnerabilidade à contaminantes superficiais.

7.1.2. Ocorrência de Fluoreto nas Águas Subterrâneas da Bacia do Paraná

Em diversos poços tubulares profundos que exploram as águas subterrâneas do Sistema Aquífero Botucatu - Pirambóia no estado de São Paulo têm sido observados teores de fluoreto acima dos limites de potabilidade. Os poços profundos da região de Presidente Prudente apresentam valores de até 12 mg/L. A portaria 56 do Ministério da Saúde estabelece que o limite máximo de fluoreto nas águas subterrâneas deve estar entre 0,6 e 1,7 mg/L, respectivamente para temperaturas máximas atmosféricas entre 31,5 e 10 °C.

Segundo Kimmelman e Silva et al.(1990) a origem desse fluoreto é ainda muito controvertida e uma hipótese para sua origem está ligada a sedimentos paleozóicos sotopostos dos Grupos Passa Dois e Tubarão.

Souza (comunicação oral, 1995) afirma que em alguns poços profundos da Bacia do Paraná que exploram somente o Aquífero Botucatu, os teores de fluoreto estão dentro dos limites de potabilidade. Nos poços que exploram também o Aquífero Pirambóia o teor de fluoreto aumenta muito, como é o caso dos poços da região de Lins.

O fluoreto presente nessas águas seria oriundo do fácies lagunar da Formação Pirambóia ou de sedimentos paleozóicos sotopostos. Sua presença em níveis superiores seria provocada pela ascensão de fluidos ricos em fluoretos, facilitada pela presença de falhamentos e fraturas (Fraga, 1992).

Nas águas do Sistema Aquífero Bauru o fluoreto está presente em pequenas quantidades, seja na região de Marília ou na de Tupã. Os valores obtidos estão entre 0,01 e 0,12 mg/L. No Sistema Aquífero Botucatu são conhecidas anomalias de fluoreto nos poços profundos que exploram o aquífero confinado, não só no estado de São Paulo, como também nos estados do Paraná e Rio Grande do Sul.

Ainda segundo Kimmelman e Silva et al. (1990), a presença de sódio na água subterrânea favoreceria uma maior concentração de fluoreto, através da troca de ânions entre a água e os sedimentos argilosos. A Figura 20 abaixo mostra um gráfico onde se relacionam os teores de Na^+ e F^- das águas do Sistema Aquífero Botucatu.

Figura 20: Relação entre fluoreto e sódio nas águas do Sistema Aquífero Botucatu

Embora a presença de fluoreto nas águas do Sistema Aquífero Bauru seja muito menor, o gráfico da Figura 21 mostra que existe relação entre o teor de Na^+ e F^- das águas

subterrâneas, já que as águas mais ricas em Na^+ apresentam, de um modo geral, teores mais elevados de F^- .

Figura 21: Relação entre fluoreto e sódio nas águas do Sistema Aquífero Bauru

7.1.3. Metais

As águas provenientes do Sistema Aquífero Bauru, nas regiões de Marília e Tupã, foram submetidas a análises de metais, conforme metodologia já descrita. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos.

Comparando-se os valores obtidos com os valores máximos estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde para águas potáveis, observa-se que praticamente todos os elementos estão com teores bem abaixo do limite máximo, e em alguns casos próximos a este.

A crescente industrialização desta região, somada à grande vulnerabilidade do Sistema Aquífero Bauru, que é livre por toda sua extensão, fazem com que os problemas de contaminação das águas subterrâneas por resíduos industriais seja uma preocupação

constante. Essa preocupação se torna ainda maior quando lembramos que as águas subterrâneas são recursos hídricos de difícil descontaminação, envolvendo processos caros, demorados e nem sempre eficazes.

Tabela 5: Resultados obtidos nas análises de metais (Sistema Aquífero Bauru)

Amostra	Al	Co	Fe	Mn	V	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Ba
1	0,062	0,081	0,110	0,019	0,081	0,049	0,009	0,024	0,002	0,012	2,99	0,015
2	0,061	0,083	0,074	0,008	0,125	0,057	0,008	0,028	0,003	0,013	2,60	0,023
3	0,066	0,085	0,082	0,012	0,085	0,061	0,010	0,024	0,003	0,015	2,02	0,024
4	0,059	0,081	0,116	0,013	0,139	0,048	0,011	0,021	0,003	0,015	2,42	0,032
5	0,056	0,083	0,157	0,015	0,088	0,057	0,013	0,022	0,004	0,015	2,37	0,036
6	0,052	0,084	0,175	0,016	0,095	0,040	0,012	0,022	0,002	0,016	2,44	0,020
7	0,043	0,085	0,213	0,012	0,083	0,048	0,014	0,024	0,002	0,013	1,84	0,054
8	0,041	0,087	0,134	0,012	0,088	0,067	0,012	0,026	0,003	0,014	2,58	0,014
9	0,062	0,087	0,361	0,020	0,094	0,046	0,012	0,022	0,002	0,012	2,38	0,029
10	0,055	0,071	0,242	0,012	0,098	0,038	0,012	0,024	0,002	0,013	2,37	0,016
11	0,068	0,083	0,156	0,011	0,088	0,050	0,014	0,025	0,002	0,014	2,11	0,032
12	0,056	0,082	0,137	0,022	0,084	0,052	0,015	0,025	0,002	0,016	2,47	0,022
MVP*	0,050	-	0,300	0,100	0,500	0,050	0,010	1,00	0,010	0,100	5,00	0,300

* Máximo valor permissível, segundo a Organização Mundial de Saúde

Valores em ppm

7.2. Conteúdo Isotópico

Os resultados das análises isotópicas estão apresentados na Tabela 6. Foram feitas análises de ^2H , ^{18}O em água, ^{13}C e ^{14}C no Carbono Inorgânico Dissolvido.

Por problemas técnicos nos laboratórios, as análises de ^2H das águas do Sistema Aquífero Bauru (Regiões de Marília e Tupã) não puderam ser realizadas. Na tentativa de solucionar esse problema, estas amostras foram enviadas para o laboratório da AIEA em Viena, mas até o momento os resultados não foram obtidos.

No caso do ^{14}C , o alto custo das análises e do processo de amostragem não permitiu que todos os poços fossem amostrados. Apenas nove amostragens foram feitas e os resultados das análises estão na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados obtidos nas análises isotópicas das águas amostradas

Amostra	Local	Temp (°C)	^2H (‰)	^{18}O (‰)	^{13}C (‰)	^{14}C (pmc)
1	Ubirajara P-1	22,00	*	-8,14	-11,61	25,19±0,31
2	Alvinlândia P-5	22,00	*	-8,14	-13,74	-
3	Alvinlândia P-4	23,00	*	-7,70	-12,31	-
4	Gália P-1	21,50	*	-9,25	-12,98	19,07±0,39
5	Gália P-2	22,00	*	-8,97	-12,15	-
6	Lucianópolis	20,50	*	-7,73	-12,08	-
7	Arco-Íris	21,00	*	-7,03	-14,16	-
8	Tupã (Pq. Univers.)	21,50	*	-7,36	-14,41	-
9	Tupã P-58	22,00	*	-6,57	-14,96	-
10	Tupã	23,00	*	-7,23	-12,59	-
11	Tupã P-25	22,00	*	-6,82	-13,77	-
12	Tupã P-26	21,50	*	-6,79	-12,55	-
13	Avaré P-5	27,00	-56,6	-7,81	-12,70	7,60±1,60
14	Avaré P-6	26,50	-51,2	-7,55	-16,30	46,72±0,61
15	Avaré P-7	27,00	-49,5	-8,36	-16,30	63,94±0,61
16	Pres. Prudente P-1	60,00	-43,1	-6,52	-5,23	15,00±1,40
17	Pres. Epitácio	72,00	-48,6	-6,94	-6,27	-
19	Ap. de S.Manuel P2	24,00	-45,8	-7,01	-18,90	104,00±5,00
20	Ap. de S.Manuel P1	24,00	-44,9	-6,92	-	-
21	Areiópolis P-5	28,50	-67,1	-9,87	-11,70	17,20±5,00
22	Areiópolis P-1	21,00	-46,3	-6,84	-	-
23	Pratânia	22,50	-46,4	-7,21	-	-
24	Pres. Prudente	70,00	-43,8	-6,26	-7,55	14,00±1,40

* análises ainda em andamento

- não analisado

7.2.1. Oxigênio 18 e Deutério

A Figura 22 apresenta uma comparação entre os resultados de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ (reta meteórica local) obtidos e a Reta Meteórica Mundial proposta por Craig (1961). De acordo com o gráfico, as águas analisadas se aproximam muito das demais águas meteóricas e, portanto, todas as águas subterrâneas amostradas, mesmo as provenientes de grandes profundidades são de origem meteórica.

Figura 22: Comparação entre os valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ e a Reta Meteórica Mundial

Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ obtidos para as águas do Sistema Aquífero Bauru situam-se no intervalo entre -6,57 e -9,25 ‰, sendo que a média para a região de Marília é de -8,30 ‰ e para a região de Tupã é de -6,96 ‰. Infelizmente, como já foi citado, por problemas técnicos, as análises de ^2H nas amostras de águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru não puderam ser realizadas em tempo.

De acordo com Martinez (1990), a precipitação média para a área de recarga do Sistema Aquífero Bauru, que é próxima a área de recarga dos Sistemas Aquíferos Serra Geral e Botucatu-Pirambóia, apresentou, durante um período de quatro anos, valores

para $\delta^{18}\text{O}$ de $-6 \pm 0,7 \text{ ‰}$. Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ obtidos para as águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru livre são mais negativos, sobretudo na região de Marília e, portanto, estão abaixo das precipitações médias para a região. Esta diferença pode ser devida a pequenas variações climáticas ocorridas no passado recente. As diferenças observadas entre as regiões de Marília e Tupã podem ser causadas por recarga seletiva, uma vez que essas duas regiões são relativamente próximas e não apresentam características geográficas (altitude, latitude, clima, etc.) suficientemente distintas para justificar diferenças no conteúdo isotópico da água de chuva.

Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ obtidos para as águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral estão entre $-6,84$ e $-7,01 \text{ ‰}$. Já para o Sistema Aquífero Botucatu, esses valores estão entre $-6,26$ e $-8,87 \text{ ‰}$, com valores mais negativos na região de Avaré e mais positivos na região de Presidente Prudente, onde o confinamento do aquífero é maior. Essas diferenças certamente são devidas a variações climáticas na época da recarga.

Os valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ obtidos para as águas dos Sistemas Aquíferos Serra Geral e Botucatu - Pirambóia estão de acordo com os resultados apresentados por outros autores, entre eles Silva (1982) e Kimmelman e Silva (1986).

7.2.2. Isótopos de Carbono

Os valores de ^{14}C obtidos para as águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru resumem-se ao poço 01 (25,19 pmc) e ao poço 04 (19,07 pmc). Para se calcular as idades aparentes destas águas, utiliza-se a lei do decaimento radioativo:

$$T = 8033 \ln \frac{A_0}{A} \quad (6)$$

Onde A_0 é a atividade inicial, neste caso admitida como sendo 100% de Carbono moderno. A é a atividade que foi medida na amostra.

Desta forma, as idades aparentes para as águas amostradas nos poços 01 e 04 são, respectivamente, 11.075 ± 150 e 13.300 ± 150 anos. Essas idades aparentes são muito antigas para águas de um aquífero livre como o Sistema Aquífero Bauru e podem

indicar contribuição de águas mais antigas dos Sistemas Aquíferos Sotopostos. Essa contribuição pode ser provocada por excesso de exploração nesses poços.

A única análise de ^{14}C feita em águas do Sistema Aquífero Serra Geral mostrou um valor de 104 pmc, o que significa uma água recente. Neste poço, o $\delta^{13}\text{C}$ encontrado foi de -18,90 portanto, bastante negativo e concordante com o ^{14}C encontrado. Pelos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e ^{14}C encontrados, estas águas certamente são bastante novas.

No caso das águas do Sistema Aquífero Botucatu - Pirambóia os valores de ^{14}C obtidos, quando comparados com Silva (1986), mostram-se mais elevados, indicando águas mais recentes. Isto ocorre nos poços 14 e 15 na região de Avaré e nos poços 16 e 24, na região de Presidente Prudente. Neste último caso, Silva (1986) encontrou valores de ^{14}C correspondentes a idades aparentes de cerca de 30.000 anos. Os valores atualmente encontrados para esta região estão entre 14,0 e 15,0 pmc, indicando idades aparentes de cerca de 15.000 anos.

Essas diferenças encontradas podem ser devidas a mistura de águas mais novas nas águas desses poços. Essa mistura pode ser provocada por problemas no revestimento desses poços, sobretudo na sua parte superior, que atravessa o Grupo Bauru. Além disso, a grande exploração de água que se faz através desses poços favoreceria essa mistura.

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ obtidos para as águas do Sistema Aquífero Bauru estão entre -12,74 e -20,97‰. Na região de Marília os valores estão entre -12,74 e -15,84 ‰. Na região de Tupã entre -16,05 e -20,97 ‰. De um modo geral, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ obtidos nos aquíferos livres é sempre mais negativo do que os obtidos no Sistema Aquífero Botucatu - Pirambóia confinado.

O $\delta^{13}\text{C}$ da água subterrânea é determinado, fundamentalmente, pelo $\delta^{13}\text{C}$ do CO_2 do solo, na época da recarga. Este $\delta^{13}\text{C}$ varia, de um modo geral, entre -20 e -24 ‰ (Fritz, 1984) e, portanto, ao atingir o aquífero, a água subterrânea apresenta um $\delta^{13}\text{C}$ próximo a esses valores. Uma vez no aquífero, a água passa a sofrer um aporte de CO_2 oriundo da dissolução dos calcários, o que provoca uma mudança no seu conteúdo isotópico em ^{13}C . Como o CO_2 proveniente dos calcários tem valores de $\delta^{13}\text{C}$ menos negativos,

ocorre um aumento do $\delta^{13}\text{C}$ da água subterrânea, que se torna menos negativo a medida que se distancia da zona de recarga.

As águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru amostradas nas regiões de Tupã e Marília apresentaram valores entre -11,61 e -14,96 ‰, sendo que os valores na região de Tupã (média de -12,47 ‰) são levemente menos negativos do que os observados na região de Marília (média de -13,74 ‰). Essa diferença não deveria ser observada em águas de regiões tão próximas e de “idades” semelhantes.

Uma possibilidade para esta diferença seria uma presença mais marcante, na região de Marília, dos carbonatos da Formação Marília, rica nestes compostos. Esses carbonatos seriam responsáveis por mudança no conteúdo isotópico das águas subterrâneas, através da adição de carbono com composição isotópica diferente do carbono adquirido na época da recarga.

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ nas águas subterrâneas podem ser relacionados com suas “idades aparentes” uma vez que esses valores tendem a se tornar menos negativos a medida que a água recebe carbono dissolvido dos minerais que compõe o aquífero.

No caso do $\delta^{18}\text{O}$, os valores obtidos para as águas do Sistema Aquífero Bauru, nas regiões de Marília e Tupã, mostram variações incomuns para águas de poços situados geograficamente próximos e que exploram o mesmo aquífero. Essas variações possivelmente são causadas por processos seletivos ocorridos durante a recarga, tais como reevaporação da precipitação ou recarga seletiva. Também devemos considerar a possibilidade de contribuição de águas de aquíferos sotopostos, comentada anteriormente, e que pode causar variações no $\delta^{18}\text{O}$.

Os gráficos das Figuras 23 e 24 mostram a relação entre o $\delta^{13}\text{C}$ e o $\delta^{18}\text{O}$ para as águas do Sistema Aquífero Bauru e Sistema Aquífero Botucatu - Pirambóia.

A Figura 24 sugere uma relação entre os teores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Botucatu, onde os poços profundos da região de Presidente Prudente mostraram valores menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$ e de $\delta^{18}\text{O}$ em comparação com os poços da região de Avaré. Este fato era de se esperar, uma vez que as águas amostradas na região de Presidente Prudente são mais antigas do que as da região de Avaré.

Figura 23: Relação entre o $\delta^{13}\text{C}$ e o $\delta^{18}\text{O}$ para as águas do Sistema Aquífero Bauru

Figura 24: Relação entre o $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para as águas do Sistema Aquífero Botucatu

Nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Botucatu confinado os valores de $\delta^{13}\text{C}$ estão entre -5,3 e -6,27 ‰. Entretanto, no poço 21 (Areiópolis P-5) este valor chega a

-11,7 ‰, mais negativo do que o esperado para aquíferos confinados. Tal fato pode ser explicado por um menor grau de confinamento na região em comparação a região de Presidente Prudente, ou por mistura desta água com águas mais novas, provenientes de aquíferos superiores.

Na região de Avaré, as águas subterrâneas dos poços 13, 14 e 15 apresentaram valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre -12,70 e -16,30 ‰, o que pode ser considerado muito negativo para um aquífero confinado. Este fato sugere mistura das águas do Sistema Aquífero Botucatu com águas mais novas. Também os valores de ^{14}C mostraram uma variação anormal, já que o poço 13 apresentou 7,60 pmc, o 14 46,72 pmc e o 15 63,94 pmc. Esses valores, muito discrepantes para poços relativamente próximos que exploram o mesmo Sistema Aquífero, indicam que realmente deve haver mistura dessas águas com águas mais jovens. Esta mistura pode ser causada por problemas de revestimento nesses poços ou ainda por excesso de exploração de água, o que causaria mudanças nos fluxos entre os aquíferos. Esse fluxo se daria originalmente no sentido ascendente devido às pressões maiores do Sistema Aquífero Botucatu - Pirambóia confinado. Com o excesso de bombeamento, esse fluxo poderia ser localmente invertido, provocando um contato de águas mais novas e superficiais com águas mais antigas e profundas.

A Figura 25 mostra a relação entre o $\delta^{18}\text{O}$ e o ^{14}C nas águas amostradas. As variações do $\delta^{18}\text{O}$ observadas são causadas por variações climáticas registradas nos últimos 30.000 anos. As grandes variações do $\delta^{18}\text{O}$ observadas nas águas do Sistema Aquífero Botucatu, na faixa entre 15 e 20 pmc, podem ser causadas por misturas dessas águas com águas mais novas, conforme já foi citado.

Figura 25: Relação entre o $\delta^{18}\text{O}$ e o ^{14}C nas águas amostradas

7.2.3 Os poços profundos de Presidente Prudente

Na cidade de Presidente Prudente foram amostrados dois poços tubulares profundos que abastecem a cidade. Esses poços (16 e 24) apresentam águas termais, bastante mineralizadas, com altos teores de fluoreto de até 12,0 mg/L, como pode-se ver na Tabela 3. Apesar de fornecerem altas vazões, esses poços acabam sendo subaproveitados, uma vez que suas água têm que ser misturadas com águas superficiais, para que o teor de fluoreto atinja níveis aceitáveis (cerca de 1,0 mg/L).

A grande profundidade destes poços e a espessura dos basaltos na região faz com que o investimento associado à construção de poços como estes seja muito alto. Neste sentido, julgamos ser necessário um maior aprofundamento no estudo desses poços para fornecer o máximo de informações possíveis, não só para se tentar compreender a origem do fluoreto, mas também para tentar evitar que esse problema atinja novos poços.

A partir dos testemunhos da perfuração do poço 24 foram obtidas amostras da rocha que compõe o aquífero, desde o Grupo Bauru até as Formações Serra Geral e Botucatu.

A Tabela 7 apresenta os resultados de análises geoquímicas de amostras do basalto da Fm. Serra Geral, em duas profundidades distintas. A Tabela 8 apresenta os resultados de análises isotópicas feitas em amostras de rocha de diversas profundidades, envolvendo os três principais Sistemas Aquíferos em estudo.

Tabela 7: Resultados das análises geoquímicas de amostras de rocha do poço 24

Composto	Profundidade 1576 m	Profundidade 1604 m
SiO ₂ (%)	61,400	55,100
Al ₂ O ₃ (%)	9,720	13,300
Fe ₂ O ₃ (%)	5,100	4,300
FeO (%)	7,020	7,680
CaO (%)	6,520	7,520
MgO (%)	3,220	4,850
Na ₂ O (%)	2,140	3,240
K ₂ O (%)	1,300	1,970
Li ₂ O (%)	0,005	0,003

Analisando os dados acima, observamos que os basaltos da Formação Serra Geral têm teores de Al₂O₃, FeO e Na₂O concordantes com os valores médios encontrados em basaltos. Os teores de SiO₂ e Fe₂O₃ são levemente mais elevados, enquanto os teores de K₂O, CaO e MgO são relativamente baixos. Essas variações podem ser observadas nas águas dos poços que exploram o Sistema Aquífero Serra Geral, que apresentam valores de K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ relativamente mais baixos.

A Figura 26 apresenta o perfil geológico dos poços 16 e 24, conforme informações obtidas na SABESP, e a correlação estratigráfica entre as unidades presente. O Grupo Bauru tem cerca de 220 metros de espessura, sendo que os poços são totalmente revestidos nesta extensão. Já a Formação Serra Geral chega a apresentar cerca de 1.400 metros de espessura, sendo que apenas o poço 24 é revestido nesta extensão. No poço 16, o basalto não é revestido. Esses dois poços exploram o Sistema Aquífero Botucatu - Pirambóia, penetrando nas duas unidades que o compõe.

Figura 26: Perfil geológico / Correlação estratigráfica dos poços 16 e 24 em Presidente Prudente

Tabela 8: Valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ nas amostras de sondagem do poço 24

Profundidades (m)	Rocha/Formação	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
146	Arenito Bauru	-0,32	-0,79
154	Arenito Bauru	-0,93	-1,55
450	Basalto Serra Geral	-6,42	-7,23
452	Basalto Serra Geral	-7,40	-5,99
848	Basalto Serra Geral	-11,36	-4,86
856	Basalto Serra Geral	-12,60	-7,31
1150	Basalto Serra Geral	-6,99	-8,33
1158	Basalto Serra Geral	-10,73	-8,73
1336	Basalto Serra Geral	-3,77	-10,65
1346	Basalto Serra Geral	-3,72	-10,51
1568	Basalto Serra Geral	-10,26	-10,79
1576	Basalto Serra Geral	-4,56	-10,19
1606	Basalto Serra Geral	-6,62	-11,70
1610	Arenito Botucatu	-3,39	-9,91
1616	Arenito Botucatu	-4,55	-9,87
1742	Arenito Botucatu	-3,14	-10,08
1752	Arenito Botucatu	-2,79	-10,44
1762	Arenito Botucatu	-3,22	-10,20
1782	Arenito Botucatu	-2,46	-10,63
1784	Arenito Botucatu	-2,37	-10,51
1786	Arenito Botucatu	-2,45	-10,44

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ nos basaltos da Formação Serra Geral são, em geral, mais negativos do que os mesmos valores nos arenitos do Grupo Bauru e da Formação Botucatu. De um modo geral, esses valores são menos negativos do que os valores obtidos nas análises das águas subterrâneas, sobretudo daquelas mais novas, procedentes do Sistema Aquífero Bauru. Nas águas termais dos poços profundos, os valores se aproximam mais do conteúdo isotópico das rochas que compõe o aquífero. Neste caso, o maior tempo de residência das águas permite que sua composição isotópica se aproxime mais da composição isotópica do aquífero, graças ao processo de adição de isótopos pesados por dissolução de calcários.

Como já foi dito, o $\delta^{13}\text{C}$ das águas subterrâneas é bastante negativo no momento da infiltração, por influência do CO_2 do solo. À medida que a água permanece em contato com o aquífero, a dissolução de minerais provoca um aporte de isótopos pesados, tornando o $\delta^{13}\text{C}$ da água subterrânea menos negativo. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ das águas subterrâneas e das amostras de rocha são concordantes com esse processo.

8. CONCLUSÕES

De acordo com a avaliação dos resultados obtidos nas análises hidrogeoquímicas e isotópicas das águas do Sistema Aquífero Bauru e dos Sistemas Aquíferos Serra Geral e Botucatu - Pirambóia, podemos concluir:

Hidroquímica e Qualidade das Águas

As águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru são, em geral, pouco mineralizadas e de boa qualidade para consumo humano. Em alguns casos essas águas podem apresentar problemas para alguns tipos de indústrias, no que diz respeito à alcalinidade excessiva e pH inadequado.

Essas águas são, do ponto de vista hidrogeoquímico, predominantemente bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e eventualmente bicarbonatadas sódicas. A presença de nitrato nessas águas é certamente consequência de contaminação externa, provocada principalmente por fossas ou fertilizantes. A vulnerabilidade do Sistema Aquífero Bauru, que é livre por toda sua extensão, permite que contaminantes infiltrados na superfície atinjam as águas subterrâneas com relativa facilidade.

Os teores de metais encontrados são quase sempre baixos, estando dentro dos padrões estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde. Apenas em alguns casos, esses teores são próximos ou superiores aos padrões citados. Como esses dados foram obtidos com apenas uma amostragem/análise por poço, não se pode afirmar que haja problemas de contaminação nessas águas. Para isso, seria necessário um programa de amostragem e análise, incluindo comparação entre os resultados de diversos laboratórios. Levando-

se em conta a alta toxicidade desses elementos e o uso dessas águas, é recomendável que sejam feitas novas análises, comprovando ou não essa contaminação.

As águas subterrâneas amostradas na região de Marília são mais mineralizadas do que as amostradas na região de Tupã, principalmente com relação aos teores de cálcio, sódio e bicarbonatos. Este fato é provocado pela presença, nesta região, da Formação Marília, cujos sedimentos são ricos em concreções e matriz carbonática.

A relação entre Ca^{+2} e Mg^{+2} nestas águas reflete bem a composição geoquímica do Sistema Aquífero Bauru, avaliada na região de Presidente Prudente. As águas subterrâneas da região de Marília não tem a mesma relação, apresentando teores de Ca^{+2} bem mais elevados. Como já foi dito, o Sistema Aquífero Bauru nesta região apresenta uma composição geoquímica diferenciada, pela presença da Formação Marília.

O teor de fluoreto nas águas do Sistema Aquífero Bauru é, de um modo geral, baixo, não revelando qualquer tipo de anomalia nem representando qualquer risco à potabilidade destas águas. Apesar disso, pode-se estabelecer uma relação direta entre os teores de fluoreto e os teores de sódio observados.

As águas dos Sistemas Aquíferos Serra Geral e Botucatu - Pirambóia são, em comparação com as águas do Sistema Aquífero Bauru, menos mineralizadas em praticamente todos os elementos analisados. As exceções ficam por conta das águas subterrâneas termais dos poços profundos da região de Presidente Prudente, que são significativamente mais salinizadas.

Essas águas são predominantemente bicarbonatadas sódicas e eventualmente clorosulfatadas sódicas ou bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas. No Sistema Aquífero Botucatu observa-se uma evolução hidroquímica das águas subterrâneas, que passam de bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas nas áreas menos confinadas, para bicarbonatadas sódicas e cloro-sulfatadas sódicas nas áreas de maior confinamento.

A presença de nitrato, ainda que em pequenas quantidades, nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral, indica que esse aquífero também apresenta problemas de vulnerabilidade, por se tratar de um sistema aquífero livre e diretamente ligado ao Sistema Aquífero Bauru. O Sistema Aquífero Botucatu - Pirambóia não apresentou esse problema, certamente devido ao seu grau de confinamento, normalmente elevado.

Composição Isotópica

Todas as águas estudadas são de origem meteórica, apresentando conteúdo de ^{18}O e ^2H compatíveis com a Reta Meteórica Mundial (Craig, 1961).

As diferenças entre os valores de $\delta^{18}\text{O}$ das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru e os valores das precipitações atuais, são devidas a variações climáticas ocorridas no passado. As diferenças observadas entre as regiões de Marília e Tupã são incomuns para regiões tão próximas, com climas muito semelhantes. Essas diferenças, provavelmente, são provocadas por recarga seletiva ou por mistura dessas águas com águas mais antigas. Essa mistura seria facilitada pelo excesso de exploração nesses poços.

A correlação entre os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e de ^{14}C mostra que houve uma variabilidade climática nos últimos 30.000 anos, concordando com diversos autores, entre eles Silva (1983) e Kimmelman et al. (1986). Essa correlação é limitada pelo pequeno número de análises de ^{14}C realizadas e pelas misturas entre águas de diferentes aquíferos provocadas principalmente por problemas de revestimento nos poços e que alteram o conteúdo de ^{14}C nas águas amostradas.

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ encontrados são mais negativos nas águas subterrâneas dos aquíferos livres e menos negativos nas águas oriundas dos aquíferos confinados. A utilização do ^{13}C na determinação da dinâmica dos principais Sistemas Aquíferos estudados se mostrou bastante eficiente, pois vários poços apresentaram valores de $\delta^{13}\text{C}$ incompatíveis com suas características hidrogeológicas, revelando assim mistura de águas mais jovens.

As águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ sempre bastante negativos (entre -11,61 e -14,96 ‰) devido ao fato deste ser um aquífero livre e, portanto, o conteúdo isotópico de ^{13}C ainda apresenta grande influência do conteúdo isotópico do CO_2 do solo.

No Sistema Aquífero Botucatu, os resultados obtidos mostram claramente a evolução do $\delta^{13}\text{C}$, passando de valores mais negativos na região de Avaré para valores menos negativos na região de Presidente Prudente, onde o confinamento é maior. Nesta região,

as águas são mais antigas e já receberam grande quantidade de ^{13}C proveniente da dissolução de minerais.

A pequena quantidade de análises de ^{14}C realizadas impediu um maior aprofundamento neste item. As grandes dificuldades de amostragem e de análise, além do seu alto custo, impediram que mais análises fossem feitas. Contudo, os resultados obtidos foram bastante coerentes com dados de outros estudos. Além disto, o ^{14}C usado em conjunto com o ^{13}C se mostraram importantes ferramentas na determinação da origem das águas subterrâneas estudadas.

Os resultados de ^{14}C encontrados nos poços de Avaré indicam águas mais jovens em comparação com os resultados de Silva (1982). Estas diferenças provavelmente são provocadas por misturas dessas águas com águas mais jovens, provocadas por corrosão do revestimento desses poços, ou por excesso de exploração dos mesmos.

Entre os poços de Avaré, a significativa diferença observada entre o poço 13 e os poços 14 e 15, com relação ao ^{13}C e ^{14}C , indica diferenças nas condições do revestimento desses poços. Certamente apenas o poço 13 não apresenta problemas em seu revestimento e suas águas são representativas do Sistema Aquífero Botucatu. Os poços 14 e 15 tem valores de $\delta^{13}\text{C}$ e ^{14}C incompatíveis com suas características hidrogeológicas e, provavelmente, apresentam mistura de águas mais jovens, causada por problemas de corrosão em seu revestimento.

Com relação às metodologias de amostragem, o método de Geyh e Wagner (1979) se mostrou mais indicado nos casos em que os teores de bicarbonato são muito baixos, tornando a reação muito lenta. Este método permite que a reação se complete no laboratório, não sendo necessário esperar longos períodos no campo. O único inconveniente é a necessidade de se transportar grandes volumes da água. O outro método, desenvolvido pela AIEA, facilita o transporte das amostras pois leva-se apenas o precipitado obtido em frascos de 1 litro. O inconveniente neste caso, é a necessidade de esperar que a reação ocorra totalmente no campo.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIEA (1981) *Stable Isotope Hydrology-Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle*. Technical Reports Series nº 210, Viena, 337p.
- AIEA (1984) *Muestreo de Águas para Analisis de ^{14}C* . 5p., Laboratório de Hidrologia Isotópica da AIEA, Viena.
- ALMEIDA, M.A.; STEIN, D.P.; MELO, M.S.; BISTRICHI, C.A.; PONÇANO, W.L.; HASUI, Y. & ALMEIDA, F.F.M. (1980) *Geologia do Oeste Paulista e Áreas Fronteiriças do Estado de Mato Grosso do Sul e Paraná*. In: 31º Congr. Bras. Geol., Camboriú, SC. Anais..SBG, 5: 2799-2812.
- BARÇA, S.F. (1980) *Aspectos Geológicos e Províncias Hidrogeológicas da Formação Bauru na Região Norte-Occidental do Estado de São Paulo, São José do Rio Preto*. Tese de Livre Docência, Inst. Bioc. Letr. Ciênc. Ex. - USP.
- CAMPOS, H.C.N.S. (1987) *Contribuição ao Estudo Hidrogeológico do Grupo Bauru no Estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado, IG-USP.
- CETESB (1988) *Guia de Coleta e Preservação de Amostras de Água*. 1ª ed. São Paulo. CETESB. 150p.
- CRAIG, H (1961) *Isotopic Variations in Meteoric Waters*. Science, 133: 1702-3.
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica (1979) *Estudo de Águas Subterrâneas; Regiões Administrativas 10 e 11 (Presidente Prudente e Marília)*, São Paulo, 3v.
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica (1984) *Caracterização dos Recursos Hídricos no Estado de São Paulo*. São Paulo, 2v.

- DRIMMIE R.J.; ARAVENA R. & WASSERNAR L.I. (1990) *Radiocarbon and stable isotopes in water and dissolved constituents, Milk River aquifer, Alberta, Canada*. Applied Geochemistry, Vol. 6, pp. 381-392.
- DIXON, W. & CHISWELL, B. (1994) *Isotopic Study of Alluvial Groundwaters, South-West Lockyer Valley, Queensland, Australia*. Hydrological Processes, vol. 8, 359-367.
- FAURE, G., (1986) *Principles of isotope geology*. New York, John Wiley & Sons.
- FONTES, J.Ch., (1981) *Palaeowaters*. In: Stable Isotope Hydrology, Deuterium and Oxigen-18 in Water Cycle. IAEA, Viena. capítulo 12:273-298.
- FRAGA, C.G. (1992) *Origem do fluoreto em águas subterrâneas dos Sistemas Aquíferos Botucatu e Serra Geral da Bacia do Paraná*. Tese de Doutorado Instituto de Geociências, USP. 178p.
- FRESENIUS, W, QUENTIN, K.E., SCHNEIDER, W (1988) *Water Analysis*. Springer-Verlag, Berlin. 803p.
- FRITZ, P (1984) *Environmental Isotope Hydrogeology*. Department of Earth Sciences. University of Waterloo. Waterloo, Ontario.
- FRITZ, P. & FONTES, J.Ch., (1980) *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Netherlands.
- GAT, J.R.,(1981) *Groundwaters*. In: Stable Isotope Hydrology, Deuterium and Oxigen-18 in Water Cycle. IAEA, Viena. capítulo 10:223-238.
- GEYH, M.A. & WAGNER, R.H. (1979) *Guideline for Grundwater Sampling for Isotope Analysis*. 4p., ^{14}C & ^3H Laboratory, Nieders. Landesamt f. Bodenf., Hannover.
- IBGE - Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1977) *Geografia do Brasil - Região Sudeste*. Rio de Janeiro, 667p.

- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1981) *Mapa Geológico do Estado de São Paulo (escala 1:500.000)*. São Paulo, 2v.
- KIMMELMANN E SILVA, A.A.; FORSTER, M.; COELHO, R.O. (1995) *Environmental Isotope and Hydrogeochemical Investigation of Bauru and Botucatu Aquifers, Paraná Basin, Brazil*. Estudos de Hidrologia Isotópica en América Latina. TECDOC 835, IAEA, Viena. pp. 57-74.
- KIMMELMANN E SILVA, A.A.; REBOUÇAS, A.C.; SOUZA, J.C.S.; REBOUÇAS, A.M.; BASTOS F., F.W.; HEINE, C.A. (1990) *Considerações Sobre as Anomalias de Fluoreto no Sistema Aquífero Botucatu - Pirambóia, na Bacia do Paraná*. 6º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Anais. Porto Alegre.
- KIMMELMANN E SILVA, A.A.; SILVA, R.B.G.; REBOUÇAS, A.C.; SANTIAGO, M.M.F. (1986) *Hidrologia Isotópica e Química do Aquífero Botucatu, Bacia do Paraná, Brasil*. 4º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Anais. Brasília.
- LANDIM, P.M.B. & SOARES, P.C. (1976) *Estratigrafia da Formação Caiuá*. In: 29º Congr. Bras. Geol., Ouro Preto. Anais..2:195-206.
- LEINZ, V. & SALLENTIEN, B. (1962) *Água Subterrânea no Estado de São Paulo e Regiões Limítrofes*. Bol. Soc. Bras. Geo., São Paulo, 11(1): 27-36.
- LIBBY, W.F. (1965) *Radiocarbon Dating*. University of Chicago Press, Chicago, Ill.
- MARTINEZ, J.C. (1990) *Relações entre os valores de oxigênio 18 em águas naturais de bacias hidrográficas*. Tese de Doutorado, UNESP, Botucatu.
- PESSENDA, L.C.R. & CAMARGO, P.B. (1991) *Datação radiocarbônica de amostras de interesse arqueológico e geológico por espectrometria de cintilação líquida de baixa radiação de fundo*. Química Nova, 14(2):98-103.
- RICCOMINI, C.; GIMENES FILHO, A.; PIRES NETO, A.G.; STEIN, D.P.; ALMEIDA, F.F.M.; DEHIRA, L.K.; MELO, M.S.; BRAGA, T.O.; PONÇANO, W.L. (1981) *Características da Porção Basal da Formação Caiuá no Noroeste do*

Paraná. In: 3º Simp. Reg. Geol., Curitiba. Atas. SBG, Núcleo de São Paulo, 2: 34-48.

ROCHA, G.A.; BERTACHINI, A.C.; CAMPOS, H.C.N.S.; CAIXETA, J.B. (1982) *Tentativa de Zoneamento das Características Hidráulicas e Hidroquímicas do Aquífero Bauru*. In: SBG & ABAS. Encontro de Geologia e Hidrogeologia, São Paulo.

SALAMUNI, K.; LANDIM, P.M.B.; SLONGO, T.T.; SOBREIRO NETO, A.F.; PAIVA FILHO, A. (1981) *Observações sobre o Ambiente de Deposição da Formação Caiuá no Nordeste do Estado do Paraná*. In: 3º Simp. Reg. Geol., Curitiba, Atas...2:25-33.

SILVA, R.B.G. (1983) *Estudo Hidroquímico e Isotópico das Águas Subterrâneas do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo*. Tese de Doutorado, USP-São Paulo, 133p.

SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B.; FÚLFARO, V.J.; SOBREIRO NETO, A.F. (1980) *Ensaio de Caracterização Estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo*. Rev. Bras. Geoc., 10:177.

SZIKSZAY, A.A.; KIMMELMANN, A.A.; HYPOLITO, R.; FIGUEIRA, R.M.; SAMESHIMA, R.H. (1990) *Evolution of the Chemical Composition of Water Passing Through the Unsaturated Zone to Groundwater at an Experimental Site at the University of São Paulo, Brazil*. Journal of Hydrology, 118 (1990): 175-190

TRESCASES, J.J. (1984) *Análise Química por Espectrometria de Absorção Atômica*. In: Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia. Edgard Blucher, São Paulo, pp 44-83.

ANEXO 1

**Seção geológica simplificada
da área de estudo**

Legenda

- Sistema Aquífero Bauru
- Sistema Aquífero Serra Geral
- Sistema Aquífero Botucatu Pirambóia
- Grupos Passa Dois e Tubarão
- Principais poços

Localização da Seção

0 40 80 km
Escala Horizontal Aproximada

Anexo 1: Seção geológica simplificada da Área de Estudo

ANEXO 2

**Perfis construtivos dos poços amostrados
(fornecidos pela SABESP)**

Relatório Final de Poço

Fonte: SABESP

79

Poço: 01	Cota nível estático: 453,38 m
Município: Ubirajara - SP	Cota nível dinâmico: 446,18 m
Cota da boca: 490,00 m	Vazão: 38 m ³ /h
Profundidade total: 160,00 m	

PROFUNDIDADE	PERFIL GEOLÓGICO		PERFIL TÉCNICO		VAR. NÍVEL D'ÁGUA	PERÍO. TRACÃO
		FORM. S.M.B.				
	Arenito avermelhado, grãos sub arredondados, selec. regular, semi-friável, texturalmente e mineralogicamente.			18,40m / 1 1/4"		
	Siltito marrom avermelhado, arenoso, semi-duro.					
	Arenito avermelhado, siltico, grãos subarredondados, semi-friável.					
	Arenito avermelhado, fino médio, grãos subarredondados, selec. regular a bom, semi-friável, portando minerais carbonáticos textural e mineralogicamente imaturos.	Adomantina				
	Argila cinza esverdeado, semi-duro, laminado.					
	Siltito marrom avermelhado, arenoso, semi-duro.					
	Argila avermelhada, grãos subarredondados, mal selecionado, friável, imaturo textural e mineralogicamente.	V V	107,20 m	104,38m / 12 1/4"		
	Arenito avermelhado, fino médio, grãos subarredondados, sub-angulares, mal selecionado, semi-friável, imaturo textural e mineralogicamente	V V		106,99m / 9 1/2"		
	Basalto amigdaloidal cinza chumbo, preenchidas por calcitas e quartzo.	Serra Geral	160,00 m	160m / 6"		

Poço: 02	Cota nível estático: 519,75 m
Município: Alvinlândia - SP	Cota nível dinâmico: 431,47 m
Cota da boca: 540,00 m	Vazão: 15 m³/h
Profundidade total: 197,50 m	

PROFUNDIDADE	07		PERFIL GEOLÓGICO		FORMAÇÃO	SÍMBOLO	08		PERFIL TÉCNICO		VARIACÃO NÍVEL D'ÁGUA	PENETRAÇÃO (m/A)	
			DESCRIÇÃO LITOLÓGICA										
2 m			solo arg. cinza, calcífero		GRUPO BAURU
12 m			arenito m.fino, argiloso, varve										
			arenito m.fino, médio, calcífero										
26 m			ro, marrom										
			arenito marrom, m.fino, argiloso										
48 m			arenito como 26 - 48 m										
58 m			arenito m.fino, marrom, silto argiloso, calcífero.										
72 m			arenito pouco argiloso, fino, / a muito fino.										
94 m			arenito argiloso, fino a muito fino										
120 m			arenito marrom, fino a médio, argiloso										
160 m			arenito marrom, fino a médio, argiloso										
176 m			basalto, cinza escuro, s/ duro.		S. GERAL								
197,5													

Relatório Final de Poço		Fonte: SABESP
Poço: 03	Cota nível estático: 511,50 m	
Município: Alvinlândia - SP	Cota nível dinâmico: 447,90 m	
Cota da boca: 540,00 m	Vazão: 10 m³/h	
Profundidade total: 160,00 m		

81

PROFUNDIDADE	07	PERFIL GEOLÓGICO		08	PERFIL TÉCNICO		VARIACÃO NÍVEL D'ÁGUA	USO DE LAMPA OU ÁGUA	PENETRAÇÃO (m/h)
		DESCRIÇÃO LITOLÓGICA	FORMAÇÃO SÍMBOLO						
14		Arenito argiloso, carbonático, com nódulos de calcedônia.	B A U R U				B E N T O N I T A	0,7	
34		Arenito creme, conglomerático, carbonático. Cimento carbonático.							
50		Arenito conglomerático, cor creme a castanho, seixos até 10mm.							
118		Arenito creme amarelado a avermelhado, fino, má seleção, argiloso, carbonático, e nódulos carbonáticos.							
130		Arenito siltico argiloso, avermelhado, carbonático.							
144		Argilito arenoso, vermelho.							
160		Arenito argiloso, avermelhado, muito fino, pouco carbonático.						1,2	

ESCALA
VERT. 1:1.000
HORIZ. 1mm=1"

ESCALA

VERT. 1:1.000

HORIZ. 1mm=1"

Relatório Final de Poço		Fonte: SABESP
Poço: 04	Cota nível estático: 520,40 m	
Município: Gália - SP	Cota nível dinâmico: 459,32 m	
Cota da boca: 520,00 m	Vazão: 48 m³/h	
Profundidade total: 220,00 m		

PROFUNDIDADE	PERFIL GEOLÓGICO		PERFIL TÉCNICO		VAR. NÍVEL D'ÁGUA	PENE. TRACÃO (m/h)
		FORM SÍMB				
	arenitos, bege a marrom médio intercalado com siltito argilo-arenoso, fino a muito fino, subangular, quartzoso.	Bauru		18m/18"		
		Grupo		Redução Ø 2" 6"		
210				151m/15"		
219	basaltos pouco alterado, esverdeado, pouco carbonático, duro, compacto.	S.		21m/10"		
		S.		212.99m/5 1/8"		

Relatório Final de Poço

Fonte: SABESP

83

Poço: 05	Cota nível estático: 547,00 m
Município: Gália - SP	Cota nível dinâmico: 441,99 m
Cota da boca: 560,00 m	Vazão: 18 m ³ /h
Profundidade total: 250,00 m	

PROFUN- DADE	PERFIL GEOLÓGICO		PERFIL TÉCNICO	VAR. NÍVEL D'ÁGUA	PENE- TRAÇÃO (m/h)
		FORMASIMB			
0-40	Arenito fino a médio, róseo-castanho a esbranq., bom arredond., seleção reg., matriz argilosa e mto. cim. carbonático			18 m	20"
40-86	Idem ao anterior, sendo menos cimentado e com boa porosidade aparente.				
86-122	Arenito fino a médio, amarronzado, pouca matriz argilosa, pco. cimento carbonático, boa arred., seleção regular e boa porosidade aparente.				
122-168	Idem ao anterior, c/pco. ar nenhum cimento.				
168A 228	Siltito denso e compacto c/ alternância de camadas esverdeadas e amarronzadas.			150 m	15"
228A 232	Arenito médio a grosso, amarronzado, boa seleção e arredondamento com porosidade aparente regular a boa.				
232A 242	Basalto alterado, textura granular c/qtzo. feldspato e máficas.				
242A 250	Rocha basáltica, sã, densa e compacta.				
		VV V		210 m	12 1/4"
				250 m	9 7/8"

Relatório Final de Poço

Fonte: SABESP

Poço: 06	Cota nível estático: 473,36 m
Município: Lucianópolis - SP	Cota nível dinâmico: 470,50 m
Cota da boca: 535,00 m	Vazão: 25 m ³ /h
Profundidade total: 260,00 m	

PROFUNDIDADE	07		PERFIL GEOLÓGICO		08		PERFIL TÉCNICO		VARIACÃO NÍVEL D'ÁGUA	PENETRAÇÃO (m/h)
			DESCRIÇÃO LITOLÓGICA	FORMAÇÃO	SÍMBOLO					
22 m			Amostras Perdidas	GRUPO BAURÓ						
34 m			Arenito fino/m.fino,marrom leve/te ' avermel.,friável,mole,bem selecionado							
46 m			Idem 22-34 m,semi-duro,compacto,C/ní- veis de concetração de carbonatos.							
58 m			Arenito fino a muito fino,regutarmen- te selecionado, mole, frável, compac- to, marrom avermelhado.							
72 m			Idem 46 - 48 m, c/ concetração de ' carbonatos em alguns níveis.							
80 m			Siltito argilo-arenoso, marrom aver- melhado, duro, compacto.							
88 m			Arenito marrom avermelhado, duro,com- pacto, fino a m.fino.							
103 m			Basalto marrom médio, amigdaloidal, ' preenchido de calcita e minerais ver- des, semi-duro à mole.	SERRA GERAL	AA A AA 					

Relatório Final de Poço		Fonte: SABESP
Poço: 07	Cota nível estático: 414,60 m	
Município: Tupã (Arco Iris) - SP	Cota nível dinâmico: 343,10 m	
Cota da boca: 440,00 m	Vazão: 3,5 m³/h	
Profundidade total: 142,00 m

Relatório Final de Poço		Fonte: SABESP
Poço: 08	Cota nível estático: - m	
Município: Tupã - SP (Pq. Universitário)	Cota nível dinâmico: - m	
Cota da boca: 505,00 m	Vazão: 50m ³ /h	
Profundidade total: 177,00 m

S/ESCALA

Relatório Final de Poço

Fonte: SABESP

Poço: 09	Cota nível estático: 447,14 m
Município: Tupã - SP	Cota nível dinâmico: 398,40 m
Cota da boca: 510,00 m	Vazão: 100 m ³ /h
Profundidade total: 235,00 m

Relatório Final de Poço

Fonte: SABESP

88

Poço: 10	Cota nível estático: 474,80 m
Município: Tupã - SP	Cota nível dinâmico: - m
Cota da boca: 520,00 m	Vazão: 100m ³ /h
Profundidade total: 240,00 m	

PROFUNDIDADE	07	PERFIL GEOLÓGICO	FORMAÇÃO	SÍMBOLO	08	PERFIL TÉCNICO	VARIACÃO NÍVEL D'ÁGUA	USO DE LAMIA OU ÁGUA	PENETRAÇÃO (m/h)
	DESCRIÇÃO LITOLÓGICA								
24	Solo marrom e arenito siltoso de granulação fina a grossa.					20m/26 "	20 m/20 "	B E N T O N I T A	
44	Arenito creme, siltoso, compacto, de granulação fina.								
68	Arenito marrom, argiloso, de granulação fina a média.								
74	Argilito marrom esverdeado.								
132	Arenito creme, compacto, de granulação fina a grossa, matriz silícea carbonática, com fragmento de argilito carbonático.								
184	Siltito argiloso arenoso, com pouco carbonato.					160m/17 1/2 "	150,7m/10 "		
208	Arenito branco, friável, de granulação fina a grossa.					212m/15 "	210 m/ 6 "		
238	Argilito marrom acastanhado a branco.								
240	Basalto alterado.					240m/ 8 1/2 "			
						ESCALA VERT. 1:1.250 HORIZ. 1m = 1"			

ESCALA
VERT. 1:1.250
HORIZ. 1mm = 1"

Relatório Final de Poço

Fonte: SABESP

89

Poço: 11	Cota nível estático: 470,36 m
Município: Tupã - SP	Cota nível dinâmico: 394,99 m
Cota da boca: 490,00 m	Vazão: 60 m ³ /h
Profundidade total: 222,00 m

Relatório Final de Poço		Fonte: SABESP
Poço: 13	Cota nível estático: 616,85 m	
Município: Avaré - SP	Cota nível dinâmico: 560,00 m	
Cota da boca: 760,00 m	Vazão: 120m ³ /h	
Profundidade total: 420,00 m		

MUNICÍPIO AVARÉ		DISTRITO sede	N. DO PROJ. E LUGAR SF222ZDIII-42	
prof.(m)	perfil litológico	símbolo	perfil construtivo	penetr.(m/h)
0	Solo areno-argiloso, marrom-averm.			
18	Basalto compacto			
26	Basalto vesicular			
34	Basalto cinza-escuro, compacto, às vezes apresentando grãos maiores de quartzo.			
90	Arenito argiloso.			
98	Basalto cinza-claro a escuro, compacto, às vezes com fragmentos de quartzo e calcedônia.			
180	Basalto vesicular			
198	Basalto cinza-claro, compacto.			
174	Arenito marrom-claro a avermelhado, granulometria de muito fino a médio, predominando finos, bem selecionado, grãos com bom grau de arredondamento e esfericidade.			
276	Arenito esbranquiçado, granulometria de muito fino a grossa, predominando finos e médios, seleção regular, grãos com bom grau de arredondamento e esfericidade, levemente carbonático.			
415	Argilito esbranquiçado a avermelhado, carbonático.			
420

Relatório Final de Poço		Fonte: SABESP
Poço: 14	Cota nível estático: 603,41 m	
Município: Avaré - SP	Cota nível dinâmico: 579,22 m	
Cota da boca: 775,00 m	Vazão: 110m ³ /h	
Profundidade total: 422,00 m

Relatório Final de Poço

Fonte: SABESP

93

Poço: 15	Cota nível estático: 602,10 m
Município: Avaré - SP	Cota nível dinâmico: 580,12 m
Cota da boca: 780,00 m	Vazão: 65m³/h
Profundidade total: 430,00 m	

PROFUN- DIDADE	PERFIL GEOLÓGICO	PERFIL TÉCNICO		VAR. NÍVEL D'ÁGUA	PEN- S- TRACÃO (m/h)
		FORMA	SIMB		
0 m	Basaltos cinza a cinza esverdeado e cinza acastanhado, normalmente são e compactos, com intervalos amigdaloidais pouco alterados a alterados e e também níveis fraturados.	GERAL	V V V V V V V V V	16,50m/ 18"	16,5m/ 24"
204	Arenito avermelhado, normalmente muito fino à fino localmente fino à médio bem selecionado a mal selecionado, c/ grãos arredondados, ocorrendo também níveis de argilito marrom.	BOTUCATU		209m/ 16"	
286	Arenito finos à muito finos argilosos, arenito creme/rosado/esverdeado muito fino também argiloso fino e muito argiloso, arenito arroxeado esverdeado muito fino à médio normalmente mui/fino/fino	PIRAMBOIA			
426	Siltito esverdeado localmente arroxeado.	BOTUCATU		430m/ 14 3/4"	

Relatório Final de Poço

Fonte: SABESP

94

Poço: 16	Cota nível estático: 395,50 m
Município: Presidente Prudente - SP	Cota nível dinâmico: 361,20 m
Cota da boca: 407,00 m	Vazão: 500 m ³ /h
Profundidade total: 1800,00 m

Relatório Final de Poço

Fonte: SABESP

95

Poço: 18	Cota nível estático: 344,20 m
Município: Presidente Prudente - SP	Cota nível dinâmico: 301,35 m
Cota da boca: 405,00 m	Vazão: 45 m ³ /h
Profundidade total: 204,00 m

Relatório Final de Poço

Fonte: SABESP

96

Poço: 19	Cota nível estático: 680,00 m
Município: Aparecida de São Manuel - SP	Cota nível dinâmico: 643,60 m
Cota da boca: 680,00 m	Vazão: 34 m ³ /h
Profundidade total: 120,00 m	

PROFUNDIDADE	07 PERFIL GEOLÓGICO		08 PERFIL TÉCNICO		VARIACÃO NÍVEL D'ÁGUA	USO DE LAMA OU ÁGUA	PENETRAÇÃO (m/h)
	DESCRIÇÃO LITOLÓGICA	FORMAÇÃO SÍMBOLO
4 m.	SOLO ORGANICO, CASTANHO ESCURO, ARGILOSO	ALUVIÃO	5,8 m. / 12"				
8 m.	ARGILA SILTICA CINZA CLARA						
	ARGILA CASTANHA POUCO SILTICA ARENOSA						
22 m.	BASALTO CINZA ESCURO, ALTERADO-S/ DURO-DURO AREIA BRANCA AMARELADA FINA BASALTO CINZA MEDIO, POUCO ALTERADO S/ DURO A DURO COM EPIDOTO e QUARTZO COMPACTO.	SERRA GERAL	30 m. / 6"	30 m. / 12"			
24 m.							
26 m.							
34 m.	BASALTO CINZA ESCURO, SEMI-ALTERADO COM OLIVINA e QUARTZO SEMI-DURO.						
44 m.	BASALTO PRETO, SÃO, C/QUARTZO e OLIVINA, MUITO COMPACTO.						
68 m.	BASALTO CINZA CLARO, DURO C/AMIGDALAS QUARTZO						
72 m.							
114 m.	BASALTO PRETO ACINZENTADO, DURO COMPACTO, ALGUMAS AMIGDALAS DE QUARTZO ENTRE 94 e 96 m.	BOTUCATU		100 m. / 8"			
120 m.	ARENITO MARROM ACINZENTADO MUITO FINO/ BEM SELECIONADO, SEMI FRIAVEL-FRIAVEL SUB ARRE- DONDADO ARGILOSO C/MINERAIS ESCUROS.						

ESCALA = VERTICAL 1:1000
HORIZONTAL 1" : 2 mm.

ESCALA *VERTICAL 1:1000
HORIZONTAL 1" : 2 mm.

Relatório Final de Poço

Fonte: SABESP

98

Poço: 21	Cota nível estático: 516,54 m
Município: Areiópolis - SP	Cota nível dinâmico: 497,38 m
Cota da boca: 610,00 m	Vazão: 75 m³/h
Profundidade total: 355,00 m	

PROFUNDIDADE	PERFIL GEOLÓGICO		PERFIL TÉCNICO		VAR. NÍVEL D'ÁGUA	PENE-TRACÃO (m/h)
		FORMAS				
4,5m	Solo marrom argiloso	solo	5m/18"	5m/24"		
	Basalto cinza a esverdeado compacto, pouco alterado, são, duro/m.duro.	GERAL				
		SERRA				
		PIRAMBOIA				
	Arenito avermelhado m. fino a médio, mal selecionado, matriz argilosa e carbonática.	BOTUCATU				
355,50	Viabásio cinza, são.		300m/12 1/4"			

Relatório Final de Poço		Fonte: SABESP	
Poço: 22		Cota nível estático: -	
Município: Areiópolis - SP		Cota nível dinâmico: -	
Cota da boca: 595,00 m		Vazão: 20m ³ /h	
Profundidade total: 120,00 m

Relatório Final de Poço		Fonte: SABESP
Poço: 24	Cota nível estático: 362,82 m	
Município: Presidente Prudente - SP	Cota nível dinâmico: 308,00 m	
Cota da boca: 408,00 m	Vazão: 260 m ³ /h	
Profundidade total: 1794,00 m		

PERFIL CONSTRUTIVO

Poço 04-PP-02-SP

ANEXO 3

**Resultados das Análises de
Íons Principais (meq/L)**

Amostra	Local	HCO ₃ ⁻ meq/L	CO ₃ ⁻² meq/L	Cl meq/L	SO ₄ ⁻² meq/L	Total	HCO ₃ ⁻ +CO ₃ ⁻² %	Cl%	SO ₄ ⁻² %
1	Ubirajara P-1	3,50	0,00	0,00	0,00	3,50	99,86	0,09	0,05
2	Alvinlândia P-5	3,30	0,11	0,00	0,01	3,42	99,57	0,13	0,30
3	Alvinlândia P-4	5,10	0,33	0,01	0,01	5,45	99,54	0,25	0,21
4	Gália P-1	2,90	0,11	0,01	0,02	3,03	99,30	0,18	0,52
5	Gália P-2	3,00	0,11	0,00	0,03	3,14	98,96	0,14	0,90
6	Lucianópolis	3,79	0,00	0,00	0,02	3,81	99,37	0,12	0,51
7	Arco-Íris	3,79	0,00	0,03	0,27	4,08	92,71	0,74	6,54
8	Tupã (Pq. Univer.)	2,10	0,18	0,00	0,00	2,29	99,76	0,09	0,15
9	Tupã P-58	1,90	0,37	0,01	0,00	2,27	99,65	0,24	0,11
10	Tupã	1,13	0,66	0,01	0,00	1,80	99,37	0,63	0,00
11	Tupã P-25	0,90	0,26	0,06	0,00	1,22	95,18	4,82	0,00
12	Tupã P-26	1,60	0,40	0,11	0,00	2,12	94,68	5,32	0,00
13	Avaré P-5	2,70	0,73	0,01	0,01	3,46	99,37	0,33	0,30
14	Avaré P-6	2,34	0,60	0,07	0,02	3,03	97,15	2,23	0,62
15	Avaré P-7	1,46	0,60	0,05	0,03	2,14	96,50	2,24	1,27
16	Pres. Prudente P-1	6,32	0,00	4,65	2,28	13,24	47,71	35,09	17,19
17	Pres. Epitácio	8,30	0,33	1,68	1,68	12,00	71,95	14,02	14,03
18	Pres. Prudente P-1a	1,07	0,83	0,04	0,05	2,00	95,27	2,12	2,61
19	Ap. de S. Manuel P-2	1,20	0,33	0,03	0,00	1,56	98,06	1,81	0,13
20	Ap. de S. Manuel P-1	0,89	0,55	0,03	0,00	1,47	97,94	1,92	0,14
21	Areiópolis P-5	2,20	0,18	0,00	0,00	2,39	99,88	0,12	0,00
22	Areiópolis P-1	1,40	0,33	0,02	0,00	1,75	98,72	1,28	0,00
23	Pratânia	1,60	0,51	0,05	0,00	2,17	97,56	2,34	0,10
24	Pres. Pudente P-2	8,30	0,00	5,86	1,83	15,99	51,90	36,64	11,46

Concentrações dos principais ânions em meq/L

Amostra	Local	Ca ²⁺ meq/L	Mg ²⁺ meq/L	Na ⁺ meq/L	K ⁺ meq/L	Total	Ca %	Mg%	Na+K%
1	Ubirajara P-1	1,82	0,48	2,75	0,01	5,06	35,88	9,56	54,56
2	Alvinlândia P-5	1,62	0,48	1,07	0,05	3,21	50,32	15,06	34,63
3	Alvinlândia P-4	1,81	0,46	0,70	0,04	3,00	60,28	15,27	24,45
4	Gália P-1	1,82	0,56	1,13	0,08	3,58	50,65	15,58	33,77
5	Gália P-2	0,52	0,45	0,78	0,07	1,82	28,58	24,74	46,68
6	Lucianópolis	1,07	0,37	3,19	0,01	4,63	23,02	7,93	69,05
7	Arco-Íris	0,59	0,41	0,80	0,00	1,80	32,50	22,68	44,82
8	Tupã (Pq. Univer.)	0,60	0,39	0,15	0,06	1,20	49,46	32,56	17,98
9	Tupã P-58	0,89	0,38	0,12	0,07	1,45	61,20	25,79	13,01
10	Tupã	0,67	0,17	0,09	0,09	1,02	65,78	16,36	17,85
11	Tupã P-25	0,63	0,38	2,26	0,08	3,35	18,68	11,21	70,11
12	Tupã P-26	0,98	0,28	0,17	0,11	1,53	63,78	18,53	17,68
13	Avaré P-5	0,37	0,10	0,65	0,02	1,14	32,01	8,77	59,22
14	Avaré P-6	0,46	0,11	0,43	0,01	1,01	45,51	10,72	43,77
15	Avaré P-7	0,62	0,19	0,30	0,01	1,12	54,72	17,05	28,22
16	Pres. Prudente P-1	0,24	0,15	10,00	0,05	10,44	2,25	1,44	96,31
17	Pres. Epitácio	0,03	0,08	7,83	0,05	7,97	0,31	0,94	98,75
18	Pres. Prudente P-1a	0,15	0,12	0,03	0,01	0,30	49,08	39,49	11,43
19	Ap. de S. Manuel P-2	0,54	0,15	0,09	0,02	0,80	67,29	18,87	13,84
20	Ap. de S. Manuel P-1	0,55	0,16	0,09	0,02	0,81	67,01	19,47	13,53
21	Areiópolis P-5	0,95	0,06	0,19	0,05	1,25	75,79	4,65	19,56
22	Areiópolis P-1	0,57	0,12	0,29	0,02	0,99	56,97	11,76	31,26
23	Pratânia	0,74	0,24	0,13	0,04	1,15	64,12	21,08	14,80
24	Pres. Pudente P-2	0,12	0,08	12,83	0,09	13,11	0,92	0,57	98,51

Concentrações dos cátions principais em meq/L