

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL

**RADIOATIVIDADE E HIDROQUÍMICA EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO
MUNICÍPIO DE BOTUCATU - SP**

Carlos Alberto dos Santos

Rio Claro (SP)

2011

Carlos Alberto dos Santos

RADIOATIVIDADE E HIDROQUÍMICA EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO MUNICÍPIO DE BOTUCATU (SP)

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro (SP), da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto (orientador)
Prof. Dr. Edson Gomes de Oliveira
Eng. Ambiental Richard Clayton Tomasella

Rio Claro, 18 de Novembro de 2011.

Carlos Alberto dos Santos

Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto

551.49 Santos, Carlos Alberto dos
S237r Radioatividade e hidroquímica em águas subterrâneas do
município de Botucatu - SP / Carlos Alberto dos Santos. - Rio
Claro : [s.n.], 2011
43 f. : il., figs., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (licenciatura e
bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual
Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Daniel Marcos Bonotto

1. Águas subterrâneas. 2. Polônio 210. 3. Radioquímica. I.
Título.

*"A natureza é o único livro que
oferece um conteúdo valioso em todas as suas folhas"*

Johann Goethe

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Aparecida, por todo o amor e suporte durante toda a minha vida, especialmente durante esses cinco anos de faculdade, nos quais passei praticamente todo ele longe de casa.

Agradeço a minha irmã, Juliana, pelo carinho e por toda a ajuda que me deu para que pudesse estar finalizando o curso, pois sem a ajuda dela acredito que hoje não estaria aqui concluindo uma parte do sonho de ser engenheiro.

Agradeço aos meus primos Gisele e Lourenço por terem acreditado em mim e ter me dado todo o suporte para que pudesse estudar e entrar em uma universidade e me qualificar. À minha família em geral, tios, tias, principalmente as tias Jenny e Maria, por todo carinho e preocupação comigo e por sempre terem acreditado no meu potencial e, com isso, me ajudado a conquistar mais um objetivo em minha vida.

Não posso esquecer-me de uma pessoa muito querida, que hoje não está mais presente, mas que sempre está comigo e direciona meus caminhos, tia Eulália, a qual ajudou a me educar e fazer de mim a pessoa que sou hoje.

Agradeço ao Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto, meu orientador, por ter me acolhido e ter me orientado desde o segundo ano, por toda a confiança depositada em mim, pela orientação e por todas as boas oportunidades que me ofereceu. Agradeço ao Danilo Catalan, pela grande força no período inicial no LABIDRO, pelo tempo que dedicou a me ensinar e incentivar a desenvolver esse trabalho. Ao Bruce, pela ajuda incondicional no LABIDRO.

Agradeço a minha segunda família, que formei em Rio Claro, a todos da IV turma da Engenharia Ambiental da UNESP de Rio Claro, turma esta a qual me fez divertir e incentivar durante os cinco anos que passamos juntos. Vocês sempre estarão em meu coração.

A todos da República Sete anões, na qual passei dois anos de diversão. As discussões sobre futebol, os jogos de vídeo-game e lógico não posso deixar de questionar o que não entendo até hoje, porque eu era o zangado?

As duas irmãs que ganhei nesses cinco anos, Catita e Da Matta, quantas vezes não me diverti com vocês. Feioso, o que dizer de você, só agradecer pela força durante os cinco anos e pedir desculpa pelas suas noites mal dormidas devido as minhas noites barulhentas roncando. João Mijão, quantas caronas, quantas coletas no início do TCC, obrigado por tudo. Mineiro, que figura, sempre ocupado, mas aproveitamos boas festas, valeu por ser um companheiro durante esse tempo de convivência. Sertório, não poderia esquecer-se de você, quanta vez não estava meio para baixo e você conseguiu tirar um sorriso meu.

Agradeço à CNPq, pelas bolsas de iniciação científica concedida.

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi determinar a atividade do Po-210, Pb-210 e a radioatividade alfa e beta total em águas subterrâneas coletadas no município de Botucatu, estado de São Paulo, Brasil. As coletas foram realizadas em poços tubulares profundos para a realização das análises radioquímicas. A maioria dos poços são registrados junto ao Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE), Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) ou Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). A atividade do Polônio foi obtida através do método de espectrometria alfa, realizada no Laboratório de Isótopos e Hidroquímica (LABIDRO) da Universidade Estadual Paulista (UNESP) de Rio Claro. Todas as amostras analisadas apresentaram valores de radioatividade abaixo do valor máximo permitido pela Organização Mundial de Saúde (OMS), o qual para radioatividade alfa total é 0,5 Bq/L, radioatividade Beta total é 1,0 Bq/L, Po-210 é 0,2 Bq/L e Pb-210 é 0,1 Bq/L. Os resultados das análises hidroquímicas foram comparados com a Portaria 518 do Ministério da Saúde, sendo que todos os valores situam-se abaixo do valor máximo permitido. As análises hidroquímicas também permitiram realizar a classificação de acordo com o diagrama de Piper. As amostras AAB, Quinta do Manacás, Faz. 4 Irmãos, Sesi, Sítio São José e Ite são classificadas como bicarbonatas cálcicas; as amostras Caio e Staroup são potássicas; as amostras BTC e Banepa são bicarbonatadas e mistas quanto aos cátions dissolvidos; a amostra Sítio das Palmeiras é bicarbonata sódica; a amostra Faz. São Paulo é cloretada cálcica; a amostra Sítio Btu-Pardinho é cloretada e mista quanto aos cátions dissolvidos.

Palavras-chave: Hidroquímica, radioatividade, águas subterrâneas.

ABSTRACT

The main objective of this study is to determine the activity of Po-210, Pb-210 and gross alpha/beta radioactivity in groundwater collected in Botucatu, municipality of the São Paulo state, Brazil. Samples were collected in wells to perform the radiochemical analysis. Most wells are registered in DAEE, Sabesp or CPRM. The activity of polonium was obtained by the method of alpha spectrometry, held in LABIDRO at UNESP, Rio Claro. All samples showed radioactivity values below the maximum allowed by WHO, that are: gross alpha radioactivity = 0,5 Bq/L, gross beta radioactivity = 1,0 Bq/L, Po210 = 0,2 Bq/L and Pb210 = 0,1 Bq/L. The results of hydrochemical analysis were compared with the 1469 Ordinance of the Health Ministry, and all values are bellow the maximum allowed. The data also allowed obtain the samples classification using the Piper diagram. The samples AAB, Quinta do Manacás, Faz. Quatro Irmãs, Sesi, Sitio São José and ITE are classified as calcic bicarbonate; the samples Staroup and Caio are potassic; the samples Banessa and BTC are bicarbonate and mixed interms of dissolved cations; Sitio das Palmeiras sample is sodium bicarbonate; the sample Faz. São Paulo is chlorinated calcic; the sample Sítio Btu-Pardinho chlorinated and mixed interms of dissolved cations.

Key words: Hydrochemistry, radioactivity, groundwater.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades físicas do Polônio.....	20
Tabela 2: Propriedades da partícula alfa.....	21
Tabela 3: Resultados obtidos para as amostras analisadas.....	29
Tabela 4: Caracterização das águas segundo diagrama Piper	29
Tabela 5: Atividade do Polônio nas amostras de água subterrânea coletadas no município de Botucatu - SP.....	34
Tabela 6: Atividade inicial do Polônio 210 e estimativa do Pb-210	35
Tabela 7: Radioatividade alfa e beta total.....	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Decaimento do Urânio 238	20
Figura 2: Sistema de espectrometria gama.....	26
Figura 3: Inserção dos dados obtidos neste trabalho no diagrama de Piper.....	31
Figura 4: Espectrograma alfa obtido.	33

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE FIGURAS	10
1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO	12
2.1 Objetivo específico	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 Geologia regional	13
3.2 Estratigrafia	13
3.2.1 Super Grupo Tubarão	13
3.2.1.1 <i>Super Grupo Itararé</i>	13
3.2.1.2 <i>Formação Aquidauana</i>	14
3.2.1.3 <i>Formação Tatuí</i>	14
3.2.2 Grupo Passa Dois.....	14
3.2.2.1 <i>Formação Irati</i>	15
3.2.2.2 <i>Formação Corumbataí</i>	15
3.2.3 Grupo São Bento	15
3.2.3.1 <i>Formação Pirambóia</i>	16
3.2.3.2 <i>Formação Botucatu</i>	16
3.2.3.3 <i>Formação Serra Geral e Intrusivas Básicas Associadas</i>	17
3.2.4 Grupo Bauru	17
3.2.4.1 <i>Formação Caiuá</i>	17
3.2.4.2 <i>Formação Santo Anastácio</i>	17
3.2.4.3 <i>Formação Adamantina</i>	18
3.2.4.4 <i>Formação Marília</i>	18
3.4 Radionuclídeos e o Polônio-210	18
4. ÁREA DE ESTUDO	21
5. MATERIAL E MÉTODOS	21
5.1 Etapa de levantamento de dados	21
5.2 Etapa de coleta das amostras	22

5.3 Etapa de análises laboratoriais	23
5.3.1 Análise do polônio.....	23
5.3.2 Estimativa do Pb-210.....	24
5.3.3 Atividade alfa e beta total.....	25
5.3.3.1 <i>Espectrometria gama</i>	25
5.3.3.2 <i>Sistema espectrométrico gama utilizado</i>	27
5.3.4 Espectrometria alfa.....	27
5.3.4.1 <i>Sistema espectrométrico alfa utilizado</i>	28
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
7. CONCLUSÃO	36
8. RECOMENDAÇÕES.....	37
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
10. APÊNDICE.....	40
10.1 Poços tubulares profundos no município de Botucatu (SP).....	40

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a preocupação com o esgotamento dos recursos naturais tem feito com que legislações e as fiscalizações se tornem cada vez mais rigorosa. A falta de água superficial com qualidade para o uso humano tem gerado grande preocupação aos governos, cientistas e de toda a sociedade. A legislação mais rígida bem como as vantagens de empresas em preservar os recursos naturais tem direcionado a tomadas de decisões de modo a reverter a situação atual de poluição. Porém, a falta de água com qualidade aceitável em algumas regiões já tem direcionado pesquisas e a exploração dos recursos subterrâneos há algum tempo. Segundo Rebouças (2003), mesmo as cidades localizadas na Região Norte do País enfrentam crises de abastecimento.

Para tentar amenizar os problemas de disponibilidade de água, muitas pessoas buscam a utilização dos recursos subterrâneos.

A água subterrânea é responsável por 98% da água doce do planeta disponível para o consumo humano (CETESB, 2010). O Brasil é um país privilegiado, uma vez que possui 12% da reserva mundial de água doce, o que implica em uma disponibilidade hídrica de 40.732 m³/hab./ano (BRASIL, 2010).

A necessidade cada vez maior do uso das águas subterrâneas faz com que seja necessário um estudo amplo contemplando diversos elementos, inclusive radioativos, que podem interferir de alguma forma na saúde humana, uma vez que embora seja natural a sua ocorrência no ambiente, a concentração dos mesmos tem sido alterada em decorrência dos processos de mineração, utilização de fertilizantes fosfatados, testes nucleares, descargas de forma inadequada de efluentes, etc. Devido à crescente demanda pelo recurso subterrâneo e a crescente presença dos radionuclídeos no meio ambiente foram propostos valores limites de atividade dos radionuclídeos para a utilização dessas águas, inclusive o Po-210.

Os resultados obtidos para as amostras analisadas neste trabalho foram comparados com os valores de referência alfa total e beta total, que segundo a Portaria 518/04 do Ministério da Saúde que se trata da potabilidade das águas para consumo humano em território nacional são 0,1 e 1,0 Bq/L respectivamente. A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2004) estabeleceu os valores de 0,5 Bq/L e 1,0 Bq/L, respectivamente.

A Organização Mundial de Saúde (WHO, 2004) estabeleceu um nível de dose efetiva de referência expressa em sieverts (Sv) e correspondente a 0,1 mSv para o consumo humano anual de água tendo como referência a ingestão de 2 litros por dia, tendo em vista que a partir

de uma certa concentração no organismo, o polônio pode causar males à saúde dos rins, baço e outros órgãos humanos.

2. OBJETIVO

O objetivo principal desse trabalho foi levantar dados relativos à atividade do radionuclídeo Po-210, Pb-210 e das atividades alfa e beta total em águas subterrâneas provenientes de poços tubulares profundos, bem como compará-los com os valores propostos pela Organização Mundial da Saúde e pela Portaria 518 do Ministério da Saúde.

2.1 Objetivo específico

O objetivo específico foi realizar análises laboratoriais de alguns elementos químicos com a finalidade de apresentar e discutir resultados alusivos à caracterização hidroquímica das amostras coletadas bem como caracterizá-las segundo o diagrama de Piper.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A água subterrânea vem assumindo importância relevante como fonte de abastecimento doméstico, industrial e agrícola, no qual, segundo a Agência Nacional das Águas (BRASIL, 2010), mais da metade da água de abastecimento público no Brasil provém das reservas subterrâneas.

Do total de água doce utilizado para a manutenção da vida, 98% é proveniente de águas subterrâneas e os outros 2% de águas superficiais, as quais, em período de seca, são abastecidas pelos recursos subterrâneos. Ainda, de acordo com levantamento realizado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, atualmente, aproximadamente 72% dos municípios são total ou parcialmente abastecidos por águas subterrâneas, atendendo uma população de mais de 5,5 milhões habitantes (CETESB, 2010).

Sendo assim, se fazem necessários estudos específicos sobre a qualidade das águas, inclusive para se conhecer os efeitos da radioatividade sobre a saúde humana. Os efeitos da radiação ionizante nos seres humanos são sobejamente conhecidos para doses altas e intermediárias, ao passo que há muitas controvérsias sobre os efeitos de irradiações com baixa intensidade (ICRP, 1991). Os geneticistas das décadas de 40 e 50 realizaram estudos no qual

concluíram que poderia ocorrer uma relação linear entre a dose de irradiação e a taxa de incidência de mutações genéticas (SOLON et al., 1958).

Além disso, os acidentes envolvendo reatores nucleares, como o de Chernobyl, acabaram por mostrar a necessidade de se desenvolver métodos rápidos e confiáveis de se determinar contaminações ambientais (ICRU, 1994; SAITO et al., 1998).

3.1 Geologia Regional

A área de estudo encontra-se inserida no contexto geológico da Bacia do Paraná, que é uma bacia sedimentar intracratônica que evoluiu sobre a Plataforma Sul-Americana, sendo constituída por rochas sedimentares e vulcânicas, datadas entre o Ordoviciano e o Cretáceo (SANTOS, 2008).

3.2 Estratigrafia

Segundo Santos (2008), o registro litoestratigráfico, sedimentar e magmático da Bacia do Paraná abrange desde rochas neopaleozóicas do Supergrupo Tubarão (Grupo Itararé, Formação Aquidauana e Formação Tatuí), rochas de idade Permiana do Grupo Passa Dois (Formação Irati e Corumbataí), rochas Mesozóicas do Grupo São Bento (Formação Pirambóia, Botucatu e Serra Geral) até rochas Cretáceas da Superseqüência Bauru (Grupo Caiuá e Bauru).

3.2.1 Super Grupo Tubarão

Essa unidade foi introduzida na literatura para caracterizar o conjunto de rochas encontradas abaixo da Formação Irati na região de Cachoeira do Sul no Estado de Santa Catarina. No Estado de São Paulo o Supergrupo Tubarão encontra-se dividido em outras três subunidades: Grupo Itararé, Formação Aquidauana e Formação Tatuí (SANTOS, 2008).

3.2.1.1 Grupo Itararé

No Estado de São Paulo, esta unidade é constituída, principalmente, de sedimentos arenosos de granulometria variada (de fina a conglomerática). Ocorrem ainda pacotes expressivos de diamictitos e sedimentos pelíticos (siltitos, folhelhos e ritmitos) podendo conter seixos ou blocos erráticos; subordinadamente ocorrem camadas delgadas de carvão. A

espessura desta unidade pode ser de até 1400 metros no sudoeste do Estado, tornando mais delgada na porção nordeste, onde registra espessuras variando entre 600 a 1200 metros (SANTOS, 2008).

3.2.1.2 Formação Aquidauana

Ocorre nos flancos norte e oeste da bacia, estendendo-se até o nordeste de São Paulo. É constituída, predominantemente, por arenitos e siltitos de cores avermelhadas características com conglomerados, diamictitos, ritmitos e folhelhos da mesma cor a esverdeado. Arenitos grossos e conglomerados, com seixos do embasamento cristalino, intercalam-se na seqüência. Os arenitos, geralmente maciços, podem apresentar estratificações cruzadas. Os diamictitos presentes, também vermelhos, apresentam clastos dispersos, alguns com estrias que tem levado a admissão de uma origem glacial. A deposição desses sedimentos tem sido admitida como subaquosa dominada por influência glacial, representando os termos mais grosseiros, leques ou deltas marginais à bacia (SANTOS, 2008).

3.2.1.3 Formação Tatuí

É constituída por siltitos cinzentos a esverdeados, arenitos finos carbonáticos, com estratificação cruzada e plano-paralela, e localmente, camadas de calcário. Subordinadamente ocorrem camadas de arenitos, calcários, folhelhos e sílex. Representa o evento de transgressão marinha que afoga a Bacia do Paraná em um mar epinerítico no Permiano Superior. Na região nordeste da margem da bacia, ocorrem sedimentos conglomeráticos representativos de “fan-deltas” como o denominado de Fácies Ibicatu na região de Leme e Rio Claro, caracterizando a margem paulista como a mais ativa nesse período (SANTOS, 2008).

3.2.2 Grupo Passa Dois

O nome Grupo Passa Dois foi subdividido em outras duas unidades: Formação Irati e Formação Corumbataí (SANTOS, 2008).

3.2.2.1 Formação Irati

Consiste em folhelhos e argilitos e calcários associados. Divide-se no Membro Taquaral, na parte inferior, e Membro Assistência, na parte superior, em contato concordante com a Formação Corumbataí. O primeiro, de ocorrência generalizada no Estado, apresenta espessuras em torno de 10 a 20 metros de argilitos e siltitos, as quais indicam sedimentação em ambiente marinho de águas calmas, abaixo do nível de ação das ondas. O Membro Assistência, por sua vez, atinge espessuras da ordem de 30 metros, apresentando folhelhos (alguns pirobetuminosos) associados a calcários, por vezes dolomíticos, os quais indicam um ambiente deposicional marinho de águas rasas, derivado de condições ligadas a restrições da bacia, condições estas que proporcionaram até a formação de evaporitos (anidrita) em áreas plataformais, como em São Paulo (SANTOS, 2008).

3.2.2.2 Formação Corumbataí

As principais litologias desta unidade são os siltitos e argilitos cinza avermelhados e arroxeados (às vezes esverdeados) que se decompõem em pequenas pastilhas. Intercaladas a essas rochas mais finas, ocorrem também lentes de arenito muito fino (SANTOS, 2008).

As evidências sedimentológicas e paleontológicas apontam para ambientes marinhos costeiros pantanosos (planícies e canais de maré), pantanosos e eventualmente lacustres, onde se formaram a mais ou menos 250 milhões de anos, encerrando assim a Era Paleozóica. O clima da época deveria ser mais quente e seco que o clima da época da Formação Irati. Lateralmente à Formação Corumbataí, parcialmente interdigitando com esta, podem ser encontrados sedimentos ligeiramente diferentes (mais maciços e acinzentados), denominados Formação Serra Alta, na posição basal do Grupo Passa Dois (SANTOS, 2008).

3.2.3 Grupo São Bento

Este conjunto é formado por arenitos predominantemente vermelho sotoposto pelos basaltos da Formação Serra Geral. Este grupo é constituído pelas Formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral (SANTOS, 2008).

3.2.3.1 Formação Pirambóia

A Formação Pirambóia é uma das unidades de maior ocorrência no centroleste de São Paulo. Sua faixa de afloramento apresenta largura variável e estende-se desde a divisa com Minas Gerais até o Paraná. Sua espessura na parte central do Estado de São Paulo ultrapassa 300 metros, diminuindo gradativamente para o sul em direção ao Arco de Ponta Grossa e para nordeste rumo ao bordo da bacia (SANTOS, 2008).

O membro inferior possui fácies mais argilosa, predominam estratificações plano-paralela e cruzada acanalada de pequeno porte, sendo freqüentes as camadas de argilito, folhelhos arenosos e sílticos, apresentando predominantemente estratificações plano paralelas de pequeno porte. O membro superior é caracterizado pela disposição dos bancos de arenitos, pouco argilosos, com estratificação cruzada planar tangencial de médio a pequeno porte, sucedidos por bancos de arenitos muito argilosos, com estratificação plano-paralela, lamitos e argilitos arenosos, em repetição cíclica. A granulação é homogênea, variando entre muito fina e média, dominando as areias finas e apresentando uma pobre seleção de grãos (SANTOS 2008).

Trata-se de uma unidade depositada predominantemente por um sistema fluvial, cortado por rios efêmeros “wadis”, cujo registro é subordinado na unidade (SANTOS 2008).

3.2.3.2 Formação Botucatu

Esta unidade é caracterizada por um pacote de arenitos de granulação fina a média dominante, com estratificação cruzada de grande a médio porte, muito friável ou silicificados, apresentando na parte basal corpos de arenitos conglomeráticos e conglomerados. É admitida a existência de derrames basálticos nesta unidade (SANTOS, 2008).

Segundo Santos (2008) o pacote sedimentar desta formação constitui uma unidade genética depositada em ambiente desértico, representada por três fácies: torrencial, lacustre e eólica. Na parte superior, a Formação Botucatu encontra-se interdigitada com derrames basálticos da Formação Serra Geral. Derrames e fragmentos de basalto nos arenitos atestam a contemporaneidade (Neojurássico e Eocretáceo) da deposição eólica com vulcanismo basáltico.

A Formação Botucatu é resultado de uma deposição de total saturação em areia, levando à geração de dunas e interdunas (SANTOS, 2008).

3.2.3.3 Formação Serra Geral e Intrusivas Básicas Associadas

A Formação Serra Geral constitui uma designação proposta por White para o conjunto de basaltos formados por derrames em extenso vulcanismo de fissura. Tal evento foi iniciado quando ainda perduravam as condições desérticas de sedimentação da Formação Botucatu, fato atestado pela presença de inúmeros corpos arenosos de origem eólica na parte basal da Formação (SANTOS, 2008).

Dados geocronológicos demonstraram que o magmatismo teve início no término do Jurássico e desenvolveu-se no Cretáceo inferior. Essa unidade consiste em lavas basálticas, toleíticas, de textura afanítica, coloração cinza a negra, amigdaloidal no topo dos derrames e com grande desenvolvimento de juntas verticais e horizontais (SANTOS, 2008).

3.3.3 Grupo Bauru

O Grupo Bauru compreende a seqüência sedimentar cretácea, sendo subdividido em quatro formações: Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília.

3.3.3.1 Formação Caiuá

Esta Formação está constituída por arenitos finos a médios de cor arroxeadada a violeta e marrom escuro, com estratificações cruzadas de grande porte. Os grãos de quartzo estão cobertos por uma fina camada de óxidos de ferro. O contato com a Formação Santo Anastácio é transicional. Esta Formação só é visível nas margens dos rios Paraná e Paranapanema e nas de alguns afluentes desses rios. Verifica-se, pelo exame de testemunhos de poços, que se estende em subsuperfície pelos estados de São Paulo, Paraná e Mato Grosso do Sul. Quanto ao ambiente de deposição uns optam pelo aquoso e outros pelo eólico ou por um ambiente misto, por causa da presença de mica (muscovita), do estado da superfície dos grãos e ainda pela estratificação cruzada de grande porte no Cretáceo Inferior (SANTOS, 2008).

3.3.3.2 Formação Santo Anastácio

Composta por arenitos finos a médios, pobre em estruturas sedimentares e apresentando leitos de argilito de cor marrom de pequena espessura, bem como nódulos de arenito com cimento calcífero de formas irregulares, o ambiente de deposição deve ter sido

“um modelo fluvial meandrante de transicional para anastomosado essencialmente arenoso” (SANTOS, 2008).

3.3.3.3 Formação Adamantina

A sua ampla distribuição geográfica atribui-lhe grande diversidade litológica, cujas fácies sedimentares podem ser relacionadas aos sistemas deposicionais fluviais meandrante psamítico, meandrante pelítico e lacustrino. O primeiro é caracterizado por arenitos lenticulares com conspícuas estratificações cruzadas de pequeno e médio porte, associados a sedimentos cíclicos sílticos-argilosos. O sistema fluvial meandrante pelítico, associado à sedimentação lacustre, está restrito ao Estado de São Paulo, sendo constituído por arenitos argilosos e siltitos, apresentando localmente arenitos lenticulares com estratificações cruzadas de pequeno porte (SANTOS, 2008).

3.3.3.4 Formação Marília

Constituída por arenitos quartzosos de aspecto maciço, com intercalações subordinadas de conglomerados, com cimento e concreções carbonáticas o depósito teria ocorrido em condições de clima semi-árido, com sistemas de leques aluviais de regime torrencial (SANTOS, 2008).

3. 4 Radionuclídeos e o Polônio-210

Os radionuclídeos gerados na estratosfera ou troposfera têm sido utilizados como ferramentas em estudos de águas subterrâneas, como é o caso do H-3 ou C-14 (IVANOVICH & HARMON, 1982). Outros radionuclídeos podem ser originados por processos naturais como, por exemplo, a atividade vulcânica, ou, então, estarem presentes nas rochas, minerais e solos. Porém, ao longo do tempo os seres vivos foram se adaptando à radioatividade natural, passando a tolerar determinadas doses.

Os radionuclídeos com origem artificial são aqueles que são originados de reações nucleares, da fissão do urânio e também devido ao *fallout* diretamente relacionado às explosões nucleares na atmosfera (RAMOS, 2010). Os radionuclídeos são transportados aos ambientes estuarinos pelos rios, pelas águas subterrâneas e pela atmosfera, neste caso, na forma de gás ou aerossóis. Seu comportamento no ambiente estuarino pode ser dividido em

dois grandes grupos: aquele que se mantém dissolvido e o que é retirado da solução pelo material particulado, por processos químicos ou biológicos. Por exemplo, os isótopos do urânio são mais solúveis, mantendo-se, portanto, em solução. Já os do tório são menos solúveis, sendo mais facilmente arrastados para os sedimentos (IVANOVICH *apud* EMERSON & YOUNG, 1995).

Devido aos problemas que os radionuclídeos podem causar à saúde, há legislações na qual foi estipulado que a concentração média natural de radiação que cada ser humano recebe é de 2mSv ao ano, sendo ela 20% proveniente do próprio corpo, 30% de raios cósmicos, 40% do radônio presente nos solos e 10% de diagnósticos médicos (ATKINS, 2006). A legislação atual estabeleceu a dose de 0,1mSv para o consumo humano anual de água baseado na ingestão de 2 litros por dia (OMS, 2004).

Os isótopos de polônio de ocorrência natural são emissores alfa. Foram primeiramente descobertos por Marie Curie em 1898 através da purificação e separação deste elemento presente no mineral pitchblenda. Este elemento foi primeiramente batizado de rádio F e posteriormente recebeu o nome de polônio em homenagem à Polônia, terra natal de Marie Curie (RAMOS, 2010).

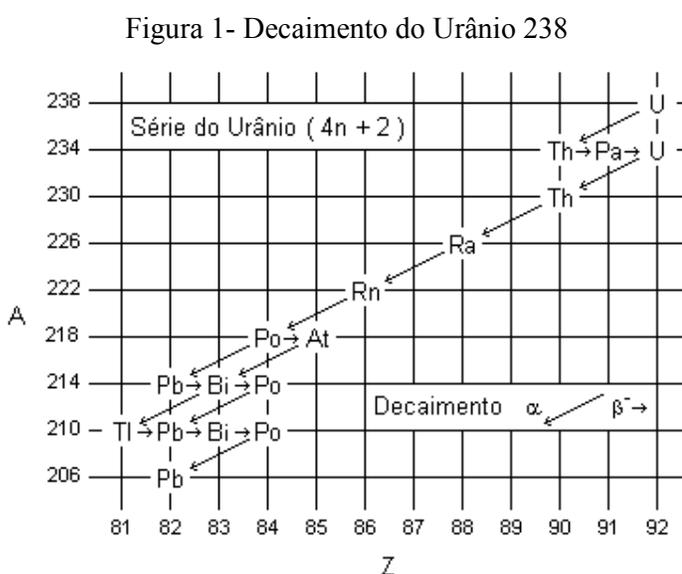
Com atividade específica muito mais alta do que os isótopos de urânio e tório, os isótopos de polônio podem ser muito mais problemáticos para a saúde humana do que o tório e o urânio quando em mesma concentração. Existem vinte e cinco isótopos conhecidos de polônio, todos radioativos. Dentre eles, estão o ^{208}Po (meia vida de 2.898 anos), ^{209}Po (meia vida de 102 anos) e ^{210}Po (meia vida de 138,376 dias) (NUDAT, 2011).

Normalmente este elemento ocorre na natureza em concentrações muito baixas. Como os demais radionuclídeos pode ser fonte de contaminação interna quando presente na água, alimento ou quando inalado. A deposição atmosférica de ^{210}Po em folhas de tabaco faz com que a fumaça do cigarro contenha quantidades maiores deste elemento do que as encontradas na natureza (RAMOS, 2010)

O polônio ingerido é eliminado nas fezes. A fração remanescente acumula-se preferencialmente nos rins e no baço em proporções maiores do que em outros tecidos humanos. Outro tecido que acumula polônio é o parênquima pulmonar, que pode sofrer deposição de formas insolúveis de polônio. Por este motivo notam-se concentrações maiores nos pulmões e arcos costais de fumantes. Segundo Argonne (2005) há um aumento de 30% na exposição óssea em fumantes em relação a não fumantes.

O ^{210}Po é um dos nuclídeos radioativos de maior importância para estudos ecotoxicológicos porque se acumula na cadeia alimentar. Este efeito bioacumulativo faz com que o consumo de alimentos com origem marinha seja uma fonte de aumento de dose em seres humanos (CHERRYL & SHANNON *apud* HERNANDEZ et al., 2002).

O ^{210}Po , focado neste trabalho é originado através da transmutação nuclear, a partir do decaimento do Urânio (U) na série $4n+2$ (Figura 1). Outras propriedades do Polônio-210 são apresentadas nas tabelas 1 e 2.



Fonte: <http://www.ufsm.br/gef/Nuclear09.htm>

Tabela 1 – Propriedades físicas do polônio, segundo Barbalace (2007).

Número atômico	84	Massa atômica média	208,9824
Grupo	16	Ponto de ebulição, K	1235
Período	6	Densidade a 300K, g/cm ³	9,3
Volume atômico, cm ³ /mol	22,23	Entalpia de atomização a 25°C, KJ/mol	134
Raio atômico, Å	1,53	Entalpia de vaporização, KJ/mol	60,3
Raio covalente, Å	1,46	Ponto de fusão, K	527
Raio iônico, Å	2,3	Volume molar, cm ³ /mol	22,73
Estado de oxidação	4,2	Calor específico, J/gK	0,12
Elétrons de valência	6s ² p ⁴	Estado físico a 20°C e 1atm	Sólido
Calor de fusão, KJ/mol	60,1		

Tabela 2 – Propriedades da partícula alfa (ATKINS, 2006)

Partícula	Grau de penetração	Velocidade	Íon	Número de massa	Carga
Alfa	Não penetrante	10% da velocidade da luz	He ²⁺	4	+2

4. ÁREA DE ESTUDO

O município de Botucatu no estado de São Paulo está inserido em três Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) diferentes. A UGRHI 05 localizada ao extremo norte do município, junto à represa Barra Bonita. A segunda UGRHI que o município está inserido é a UGRHI 10 que abrange praticamente metade do município (porção norte), entre a Represa Barra Bonita e a Cuesta Basáltica Serra Geral. A UGRHI 17 é a terceira na qual o município está inserido. A mesma abrange toda a porção sul de Botucatu. O município ainda é drenado por duas bacias hidrográficas, sendo a do Rio Tietê a norte e a do Rio Pardo ao sul, sendo que o mesmo encontra-se inserido na Bacia do Rio Paraná.

Para o trabalho, foram coletadas 13 amostras de águas subterrâneas cujo substrato correspondem às formaes Serra Geral, Santo Anastácio, Adamantina, Marília, Botucatu e Pirambóia. Embora esse número de amostras não contempla todos os poços perfurados na região, ele pode direcionar pesquisas futuras aos problemas de radioatividade, uma vez que foram coletadas em diferentes aqıferos ocorrendo no município.

As amostras foram coletadas nos poços tubulares profundos já perfurados, destinando-se em sua maioria ao abastecimento das populaes rurais. A gua é utilizada principalmente para consumo doméstico e industrial.

5. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia aplicada para realizar o trabalho foi dividida em três etapas distintas: levantamento de dados, coleta de amostras e análises laboratoriais.

5.1 Etapa de levantamento de dados

A primeira fase do trabalho consistiu em realizar um levantamento dos poços tubulares profundos perfurados no município de Botucatu (SP) junto aos rgos DAEE, SABESP e CPRM.

5.2 Etapa de coleta de amostras

A fase de coleta das amostras foi realizada em diferentes períodos, sendo que para cada poço profundo foi coletada uma amostra de 20 L de água.

5.3 Etapa de análises laboratoriais

Esta etapa foi realizada no LABIDRO do Departamento de Petrologia e Metalogenia da UNESP de Rio Claro. O pH das amostras foi determinado por potenciometria com eletrodo de vidro. As análises de K, Ca, Mg, SiO₂, SO₄²⁻, Cl⁻ e NO₃⁻ foram realizadas por colorimetria. As determinações de carbonato e bicarbonato foram conduzidos por titulometria, enquanto que as de Na por absorção atômica.

5.3.1 Análise do polônio

Quanto ao polônio, um extenso protocolo analítico foi empregado, o qual contemplou as seguintes etapas: filtração, decantação, centrifugação, concentração do particulado, dissolução em ácido clorídrico, separação do ferro e deposição do Po-210. Após essas etapas, foi realizada a mensuração da atividade do Po-210 por espectrometria alfa.

A filtração foi conduzida utilizando um kitassato acoplado a um compressor para auxiliar no processo, um funil de porcelana e papel de filtro.

A decantação foi realizada adicionando na amostra filtrada 5 mL de cloreto férrico, 0,2 mL do traçador (Po-209) e aproximadamente 80 mL de hidróxido de amônio (NH₄OH). Após a adição desses compostos, as amostras ficaram em repouso por um período de sete dias para ocorrer deposição de todos os elementos em suspensão.

A centrifugação foi realizada a uma velocidade de 2700 rpm por cerca de 5 minutos para que se obtivesse a recuperação da fase sólida. Após sua recuperação, o material foi transferido para um béquer de teflon utilizando HCL 8M.

A concentração do material particulado remanescente foi realizada levando-o para uma chapa à temperatura entre 200 e 250°C até que ocorresse a evaporação completa do ácido (2 horas na chapa).

A dissolução em ácido clorídrico foi realizada com 20 mL de HCL 8M.

A separação do ferro foi realizada adicionando na amostra 30 mL de éter etílico e em seguida, agitando-se o funil de separação contendo a mistura e retirando-se toda a pressão existente. A solução permaneceu em descanso por 5 minutos e separou-se a porção a ser utilizada daquela a ser descartada (éter + ferro).

Então, ajustou-se o pH para 2, utilizando NH_4OH ou HCL 8M, e em seguida adicionou-se ao béquer de teflon um disco de cobre e o agitador.

A deposição do Polônio foi realizada utilizando-se de uma chapa aquecedora mantida em agitação por um período de 2 horas a 80°C (LIMA, 2000). Em seguida, retirou-se o disco do béquer e lavou-se com água destilada, expondo-o posteriormente a luz infravermelho para que ocorresse sua secagem. Então, a amostra foi levada para o espectrômetro alfa via detector de Si (Au) para que fosse realizada a leitura.

A mensuração da atividade do Po-210 foi realizada através da relação com a atividade conhecida do Po-209. A razão para calcular a atividade do Po-210 foi a mesma utilizada por POET et al. (1972):

$$\text{Ativ.210} = (\text{taxa de contagem Po-210} \cdot \text{atividade Po-209}) / \text{taxa de contagem Po-209}$$

Para a espectrometria alfa conduzida neste trabalho foi utilizado um sistema espectrométrico instalado no laboratório, que emprega um semiconductor constituído por um cristal de silício do tipo N. Para a leitura utilizaram-se detectores de Si (Au) da Ortec. Esses detectores trabalharam sob polarização reversa, tendo sido inseridos em câmaras de formato cilíndrico com duas saídas distanciadas de 90° , as quais foram conectadas a vacuômetro e bomba a vácuo. A tampa de cada uma das câmaras possui uma abertura com rosca na qual se encaixou o conector BCN-Microdot. A câmara também possuía um porta amostra destinado a abrigar o disco contendo o material que foi analisado. A saída do conector BCN foi então ligada a um pré-amplificador, para a detecção dos pulsos negativos provenientes dos pares elétrons-lacunas criados pelas partículas que atingiram a junção PN do diodo. O detector foi polarizado por uma fonte de corrente contínua com controle de tensão; nas análises foram utilizados valores de 50 ou 130 Volts. Os pulsos provenientes do pré-amplificador, convertidos para um formato apropriado, foram conduzidos até o amplificador, onde foram amplificados até um nível requerido para o próximo estágio (BONOTTO, 1986), no caso, uma interface necessária ao acoplamento com um microcomputador, que emprega um *software* de análise, o MAESTRO. O MAESTRO é um simulador de multicanal (1024 canais), responsável pela aquisição de dados e a geração de espectros.

5.3.2 Estimativa do Pb-210

A partir dos dados obtidos para o Polônio, foi realizada uma estimativa da radioatividade inicial do Po-210, através da equação:

$$APo = APoi (\exp(-a.T1)) , \text{ onde:}$$

APo: Atividade do Polônio-210 no final da leitura por espectrometria alfa

APoi: Atividade inicial do Polônio-210

a: constante de decaimento do Polônio-210

T1: tempo entre o final de deposição e de leitura espectrométrica

Após levantar os dados da atividade inicial do Polônio, realizou-se a estimativa do Pb-210 através da equação a seguir:

$$APo(i) = APb - APb(\exp(-a.T2)), \text{ onde:}$$

APo(i) : Atividade inicial do Polônio

APb : Atividade estimada do Pb-210

T2: tempo entre a coleta e a deposição do Polônio-210

5.3.3 Atividade alfa e beta total

A determinação das radioatividades beta e alfa total foram realizadas utilizando-se a infra-estrutura disponível no LABIDRO.

Essas determinações foram realizadas usando-se a técnica da espectrometria nuclear, a qual visa a identificação e quantificação de elementos, e, em se tratando de elementos radioativos, a medida espectrométrica foi feita com base na propriedade da radioatividade. Esta metodologia é de fácil uso, altamente sensível e rápida, sendo aplicada rotineiramente com sucesso na solução de problemas analíticos em radioquímica (DUARTE, 1997).

Para a análise por espectrometria gama e alfa separaram-se inicialmente 1 litro de cada amostra. Os sistemas foram previamente calibrados para as determinações de interesse com o emprego de radionuclídeos de atividade conhecida, para que se assegurassem os resultados.

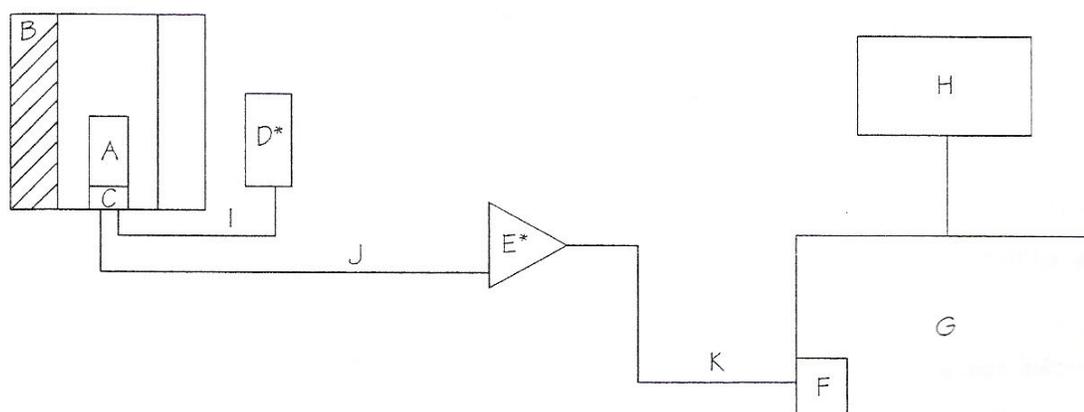
5.3.3.1 Espectrometria gama

A técnica empregada para a medida da atividade beta total foi baseada em emissões gama associadas aos núclídeos que sofrem decaimento beta. Por exemplo, o ^{40}K produz ^{40}Ca por intermédio de decaimento beta, mas também ^{40}Ar por intermédio de captura eletrônica.

Uma emissão gama de 1,46 MeV aparece durante a produção de ^{40}Ar , a qual pode fornecer informações sobre a presença de ^{40}K na amostra. Assim, a espectrometria gama pode ser utilizada para realizar medidas de atividade relacionada com núclídeos emissores de partículas beta.

A espectrometria gama, utilizando a análise da altura de picos, possibilita a determinação direta dos radionuclídeos em amostras que emitem radiação gama. Tais determinações, assim como a espectrometria alfa ou beta, são possíveis porque as transições nucleares relacionadas com a emissão gama tendem a ser específicas para cada radionuclídeo. Entretanto, a espectrometria gama tem algumas vantagens sobre os outros métodos, principalmente por causa da grande penetração dos raios gama se comparada com a das partículas alfa e beta (IVANOVICH & HARMON, 1982).

Para a quantificação da atividade, partiu-se de 1 litro de cada amostra, utilizando-se uma chapa aquecedora com temperatura em torno de 50°C para evaporar a amostra até um volume de aproximadamente 12 mL (resíduo evaporado). Este volume foi transferido para um recipiente de vidro próprio para inserção no sistema gama espectrométrico. Em cada espectro gama, foi utilizado um intervalo de canal de 400 a 1996.



- A - Cristal de NaI(Tl) 2"x 2"
- B - Blindagem de chumbo
- C - Pré-amplificador
- D - Fonte de alta tensão (1000V)
- E - Amplificador ORTEC (modelo 4B5)
- F - Placa ACE 2k ORTEC (modelo 916A)
- G - Microcomputador
- H - Impressora
- I, J, e K - Cabos
- * NIM BIN para polarizar unidades

Figura 2. Sistema de Espectrometria Gama. Duarte (1997).

5.3.3.2 Sistema espectrométrico gama utilizado

O sistema espectrométrico utilizado é formado por um sensor gama e circuitos eletrônicos que separam a radiação incidente num cristal de acordo com sua energia. (Figura 2).

Em decorrência da interação entre a radiação gama emitida por uma fonte radioativa e um cristal cintilador de NaI(Tl) foram produzidos pulsos de pequena amplitude no ânodo de uma fotomultiplicadora. Cada pulso foi pré-amplificado e dirigido a um amplificador, onde teve sua forma adequada para ser analisado no próximo estágio. A altura dos pulsos produzidos depende da energia das radiações, sendo posteriormente separados de acordo com suas alturas, fornecendo espectros relacionados com a energia da radiação gama emitida nas transições nucleares. O dispositivo que realizou esta separação foi o analisador de altura de pulsos (BONOTTO, 1990).

Esse sistema é blindado com uma estrutura de chumbo, na qual estão colocados o pré-amplificador e um cristal tipo poço de NaI(Tl), sendo que estes foram conectados a uma fonte de alta tensão. Nesse cristal, colocou-se a amostra, a qual encontrava-se acondicionada em um recipiente de vidro que comporta um volume aproximado de 12 mL. Do pré-amplificador partiu um cabo que conduziu o sinal ao amplificador, e deste para a placa ligada ao microcomputador que processou o sinal transformando-o em contagem. O processamento dos dados obtidos foi efetuado através do *software Maestro II*, da EG & G – ORTEC.

5.3.4 Espectrometria alfa

A espectrometria alfa baseia-se da análise da altura de picos para determinar os radionuclídeos em amostras que emitem partículas alfa. Tais determinações são possíveis porque as transições nucleares relacionadas com a emissão de partículas alfa tendem a ser específicas a cada radionuclídeo (IVANOVICH & HARMON, 1982).

A partir dos 12 mL utilizados para análise da espectrometria gama, evaporou-se essa amostra a 50 °C, de forma gradativa, até que um disco de alumínio restasse somente o resíduo seco.

Esse disco foi, então, inserido numa câmara de vácuo portadora de detector semicondutor, sendo posicionado a uma distância de alguns milímetros em direção frontal do detector, previamente calibrado em energia.

Os espectros alfa foram analisados no intervalo de canal de 90 a 1020.

5.3.4.1 Sistema espectrométrico alfa utilizado

O sistema de espectrometria alfa utilizado consiste de quatro conjuntos para realizar a medição de partículas alfa. Cada um deles é formado por um detector semicondutor que opera dentro de uma câmara de vácuo. Os detectores são constituídos por um cristal de Si (Au), criando-se nas vizinhanças da superfície do cristal uma junção abrupta, a barreira de superfície.

As emissões alfa foram captadas por um pré-amplificador, ligado à fonte de polarização, e posteriormente os pulsos foram amplificados por um determinado fator de ganho, apresentando alturas variáveis que dependem da energia associada às partículas alfa e sendo analisadas por um multicanal que efetuou a separação de acordo com suas alturas.

O analisador multicanal possuía um conversor analógico-digital que transformava a altura do pulso recebido num “trem” de pulsos, determinando o número de canal onde o sinal

foi registrado. Esses sinais foram contados e a informação foi armazenada em uma unidade que passou a conter o número de contagens realizadas por canal (BONOTTO, 1986).

Depois de amplificado, o sinal é conduzido a um espectro “Master”, que o decodifica e possibilita sua leitura pelo *software Maestro II* da EG & G - ORTEC.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 3 abaixo apresenta os resultados obtidos das análises hidroquímicas realizadas no LABIDRO.

Tabela 3 - Resultados obtidos para as amostras analisadas. (Com exceção do pH, todos os valores são em mg/L).

Amostra	Código	pH	K	Ca	Mg	SO₄²⁻	NO₃⁻¹	Cl⁻¹	SiO₂	Na	Carbonato	Bicarbonato
Staroup	K	6,62	3,97	3,27	0,3	0	2,4	24,5	34,4	2,4	0	44
ITE	J	6,53	0,75	4,17	0,54	1	3,5	9,5	23,8	0,5	0	28
Caio	C	7,03	4,09	3,39	0,23	0	2,4	5,7	19,4	2,1	0	42
BTC	E	7,18	1,07	3,51	0,34	3	3	9,6	17,6	3,8	0	44
Faz. 4 Irmãs	D	6,35	0,33	3,93	0,3	1	2,4	2,3	9,4	3,5	0	36
Sítio São José	I	6,43	0,72	4,53	0,36	2	3,4	11,7	9,4	0,6	0	32
AAB	A	6,52	0,65	4,65	0,56	1	3,7	3,5	15,2	0,6	0	22
SESI	H	7,75	1,88	4,68	0,59	0	2,7	9,9	18,7	1,2	0	50
Faz. São Paulo	G	6,42	0,36	4,05	0,16	3	3,4	6,5	14,4	1,9	0	4
Sítio das Palmeiras	F	7,05	2,01	4,41	0,02	1	2,4	2,7	26,3	6,4	0	108
Quinta do Manacás	B	7,12	0,95	4,47	0,73	1	0,6	1,8	6,8	1,6	0	150
Sítio Btu-Pardinho	L	4,79	2,85	3,18	0,94	1,0	2,2	1	4,2	0,8	0	2
Banespa	M	6,54	1,09	3,21	0,94	0	3,7	5,4	18,6	1,8	0	108

O cloreto é indicador de contaminação por esgoto sanitário e segundo a Portaria 518 do Ministério da Saúde, seu padrão de potabilidade é de 250mg/L, valor não atingido por nenhuma das amostras.

O pH tem como padrão de potabilidade para abastecimento valores entre 6,5 e 9,5 de acordo com a Portaria 518 do Ministério da Saúde. Das amostras coletadas, quatro não se situam nesse intervalo.

O potássio é encontrado em concentrações baixas nas águas naturais já que rochas contendo potássio são relativamente resistentes a ações intempéricas. Todas as amostras apresentaram valores abaixo do padrão de potabilidade que é de 10 mg/L.

O cálcio nas águas subterrâneas varia, de uma forma geral, de 10 a 100 mg/L, sendo que nas amostras os valores obtidos situam-se abaixo de 10 mg/L.

O magnésio em águas subterrâneas ocorre geralmente com teores entre 1 e 40 mg/L, sendo que o valor menor não foi ultrapassado em nenhuma amostra.

O limite estabelecido pela OMS para sódio nas águas potáveis é 200 mg/L, o qual não foi atingido por nenhuma amostra.

O limite máximo permitido para o nitrato é de 10 mg/L, pois, valores maiores que este apresentam riscos à saúde. As análises realizadas apresentaram valores abaixo do valor máximo de referência, os maiores obtidos para as amostras AAB e Banespa (3,7mg/L).

Utilizou-se o diagrama de Piper, figura 3, para a caracterização química de cada amostra de água coletada, conforme ilustrado na Figura 4. As amostras AAB (A), Quinta do Manacás (B), Faz. 4 Irmãs (D), Sesi (H), Sitio São José (I) e Ite (J) são classificadas como bicarbonatas cálcicas; as amostras Caio (C) e Staroup (k) são potássicas; as amostras BTC (E) e Banespa (M) são bicarbonatadas e mistas quanto aos cátions dissolvidos; a amostra Sitio das Palmeiras (F) é bicarbonata sódica; a amostra Faz. São Paulo (G) é cloretada cálcica; a amostra Sítio Btu-Pardinho (L) é cloretada e mista quanto aos cátions dissolvidos.

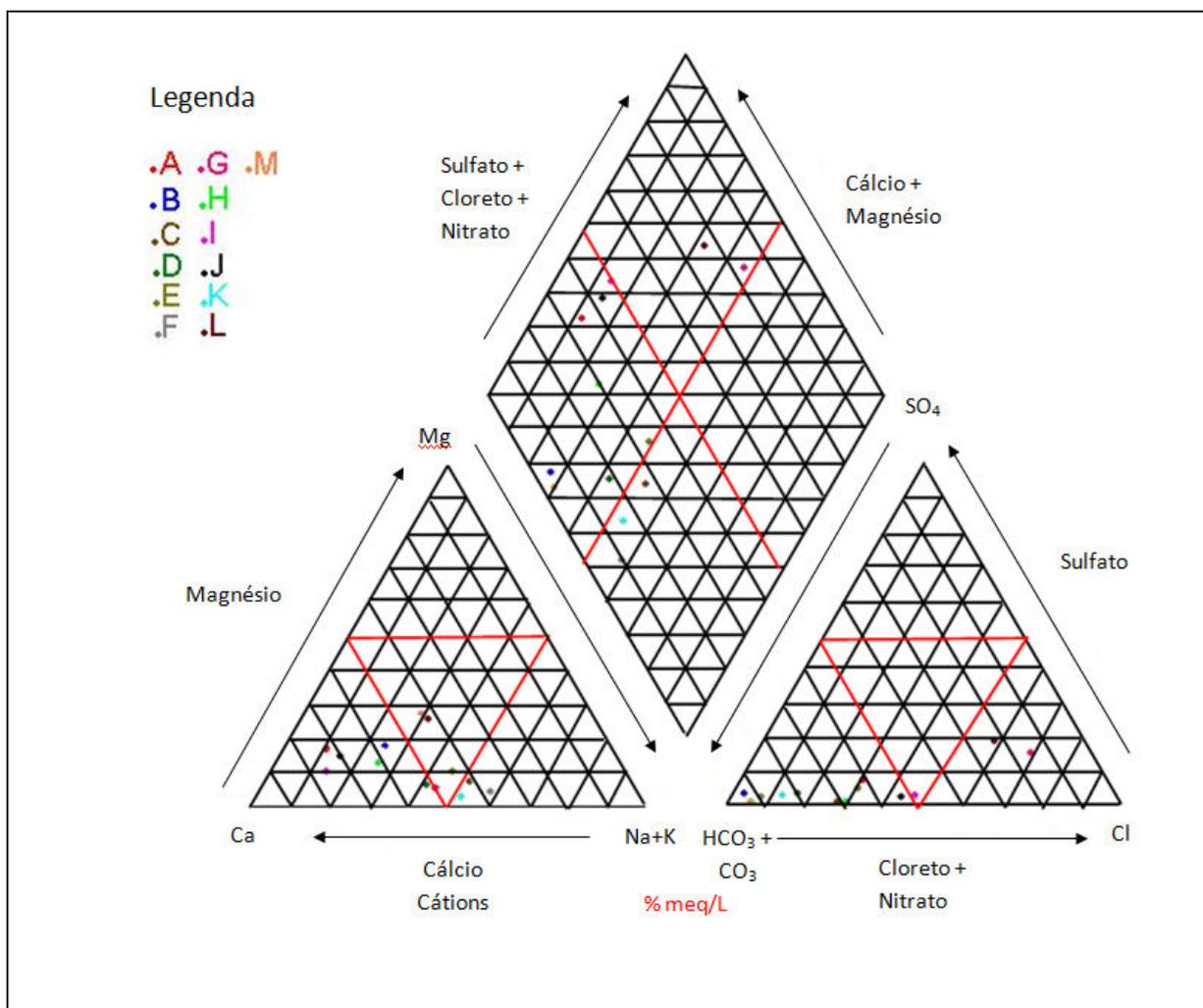


Figura 3. Inserção dos dados obtidos neste trabalho no diagrama de Piper

Tabela 4. Caracterização das águas segundo diagrama Piper

Legenda	Amostra	Caracterização	Formação
A	AAB	Bicarbonata Cálcica	-
B	Quinta do Manacás	Bicarbonata Cálcica	Botucatu/Pirambóia
C	Caio	Potássica	-
D	Faz. Quatroirmãs	Bicarbonata Cálcica	Serra Geral
E	BTC	Bicarbonatadas e mistas – cátions dissolvidos	Botucatu
F	Sítio das Palmeiras	Bicarbonata Cálcica	Marília/Adamantina
G	Faz. São Paulo	Cloretada Cálcica	Pirambóia
H	Sesi	Bicarbonata Cálcica	Botucatu
I	Sítio São José	Bicarbonata Cálcica	Serra Geral
J	ITE	Bicarbonata Cálcica	Adamantina
K	Staroup	Potássica	Santo Anastácio
L	Sítio Btu-Pardinho	Cloretada e mista - cátions dissolvidos	-
M	Banespa	Bicarbonatadas e mista – cátions dissolvidos	-

A figura 4, abaixo, ilustra o espectrograma alfa obtida para uma amostra analisada.

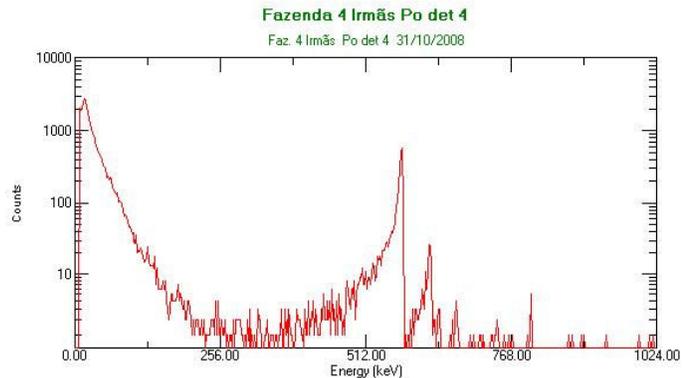


Figura 4. Espectrograma alfa obtido pelo *Software Maestro*.

A atividade do traçador (Po-209) adicionado a cada amostra correspondeu a 0,1332 Bq. A atividade do Polônio-210 foi calculada a partir da relação entre a taxa de contagem do Polônio-210 e a taxa de contagem do Polônio-209. Pelos cálculos, verifica-se que a amostra de maior atividade do Polônio 210 foi a do Sítio Btu-Pardinho (0,00205 Bq/L). A de menor atividade foi a do Sítio das Palmeiras (0,00038 Bq/L) que apresentou a captação de água na Formação Marília/Adamantina (ver Apêndice).

A maioria das amostras analisadas é utilizada para consumo humano e na agricultura. Os resultados obtidos indicam que nenhuma delas ultrapassou o valor máximo estabelecido para o Po-210 pela Organização Mundial da Saúde, que corresponde a 0,2 Bq/L (= 200 mBq/L), conforme tabela 4 abaixo.

Tabela 5 - Atividade do Polônio nas amostras de águas subterrâneas coletadas no Município de Botucatu-SP

Amostra	Nuclídeo	Tempo de Contagem (s)	Região (canal)	Contagem Total	Atividade A209 (Bq)	Atividade A210(Bq)	Atividade A210 Bq/L	T ₁ (dias)	T ₂ (dias)
Staroup	Po 209	264850,2	519-551	1622	0,1332			0,014	81
	Po 210		577-599	141		0,01158	0,00106		
Ite	Po 209	264883,7	492-534	687	0,1332			0,014	81
	Po 210		553-579	42		0,00814	0,00076		
BTC	Po 209	255025,5	499-585	2328	0,1332			0,014	31
	Po 210		602-650	190		0,01087	0,00094		
Faz. 4Irmãs	Po 209	234994,7	522-582	4051	0,1332			0,014	124
	Po 210		610-630	169		0,00556	0,00054		
São José	Po 209	170646,9	521-555	2029	0,1332			0,014	51
	Po 210		584-606	143		0,00939	0,00093		
Sesi	Po 209	234526,4	480-538	613	0,1332			0,014	51
	Po 210		563-583	45		0,00978	0,00088		
Faz. SP	Po 209	424837,8	480-550	313	0,1332			0,014	124
	Po 210		558-601	38		0,01618	0,00162		
Sítio das Palmeiras	Po 209	234548,7	513-559	1468	0,1332			0,014	12
	Po 210		588-604	44		0,00399	0,00038		
Quinta do Manacás	Po 209	85434,4	534-578	540	0,1332			0,014	33
	Po 210		598-628	31		0,00764	0,00076		
Sítio Btu-Pardinho	Po 209	85380,5	490-550	192	0,1332			0,014	17
	Po 210		571-601	31		0,0215	0,00205		
AAB	Po 209	234573,4	530-582	1497	0,1332			0,014	33
	Po 210		608-632	99		0,0088	0,00083		
Caio	Po 209	254998,8	501-553	1511	0,1332			0,014	31
	Po 210		577-603	255		0,0225	0,00195		
Banespa	Po 209	424816,3	488-549	1627	0,1332			0,014	47
	Po 210		558-592	203		0,00764	0,00076		

Quanto ao Pb-210, os valores situaram-se entre 0,00117 e 0,0251 Bq/L (Tabela 5).

O padrão estabelecido pela WHO (2004) é de no máximo 0,1 Bq/L de ^{210}Pb . Sendo assim nenhuma amostra excedeu esse valor, conforme tabela abaixo.

Tabela 6 – Atividade inicial do Po-210 e estimativa do Pb-210.

Amostra	Atividade Po-210 (Bq/L)	Atividade Inicial Po-210(Bq/L)	Pb-210 (Bq/L)
Staroup	0,00106	0,0175	0,00318
Ite	0,00076	0,0123	0,00228
BTC	0,00094	0,0130	0,00655
Faz. 4 Irmãs	0,00054	0,0106	0,00117
São José	0,00093	0,0122	0,00413
Sesi	0,00088	0,0129	0,00391
Faz. SP	0,00162	0,0316	0,00351
Sítio das Palmeiras	0,00038	0,0044	0,00653
Quinta do Manacás	0,00076	0,0093	0,00499
Sítio Btu-Pardinho	0,00205	0,0239	0,0251
AAB	0,00083	0,0107	0,00546
Caio	0,00195	0,0269	0,0136
Banespa	0,00076	0,0103	0,00363

A taxa de contagem beta variou de 0,032 a 0,082 cps, e a radioatividade beta total entre 0,121 e 0,310 Bq/L; as amostras apresentaram valores abaixo do limite indicado pela Organização Mundial da Saúde que é de no máximo 1,0 Bq/L. Quanto à taxa de contagem alfa, quando mensurada, situou-se entre 0,0010 e 0,0081 cps e a radioatividade alfa total entre 0,0038 e 0,0292 Bq/L, valores que estão abaixo do limite estabelecido pela Organização Mundial da Saúde, que é de 0,5 Bq/L.

Para a conversão de cps em Bq/L foram utilizados fatores diferentes para alfa total e beta total. Os fatores correspondem a 3,609 cps/Bq e 3,784 cps/Bq, respectivamente. Esses fatores foram determinados através de estudos e testes prévios realizados no LABIDRO.

Tabela 6 – Radioatividade alfa e beta total.

Amostra	Alfa Total				Beta Total			
	Tempo(s)	Contagem	Taxa de contagem (cps)	Atividade (Bq/L)	Tempo(s)	Contagem	Taxa de contagem (cps)	Atividade (Bq/L)
AAB	90062,6	976	0,001	0,0038	82839	100321	0,041	0,155
Banespa	89956,5	104	<Lc	<La	86645	106770	0,062	0,235
Caio	50712,6	56	<Lc	<La	84122	26103	0,040	0,151
Faz. 4 Irmãs	59691,9	83	<Lc	<La	50893	61692	0,042	0,159
Faz. SP	50713,5	428	0,0081	0,0292	91333	27103	0,039	0,148
ITE	82168,5	114	<Lc	<La	73307	91765	0,082	0,310
Quinta Manacás	50712,8	111	0,0012	0,0043	82401	101514	0,062	0,235
SESI	89995,2	481	0,0050	0,018	74846	90625	0,041	0,155
Sítio Btu-Pardinho	59722,5	401	0,0064	0,0231	42087	50583	0,032	0,121
Sítio das Palmeiras	59893,4	238	0,0037	0,0132	87703	107566	0,056	0,212
São José	59918,6	376	0,0053	0,0191	86745	106820	0,061	0,231
Staroup	90033,5	243	0,0017	0,0061	59408	72297	0,047	0,178
BTC	-	-	-	-	91914	18103	0,04	0,151

*Lc e La: limite de detecção, correspondendo a 0,0003 cps e a 0,001Bq/L, respectivamente.

cps: Contagem por segundo.

7. CONCLUSÃO

A escassez de água potável tem direcionado pesquisas para o estudo de como utilizar esse recurso de forma consciente de modo que se possa reutilizá-lo. Em paralelo ao problema do mau gerenciamento, existe a crescente demanda de água doce, fato esse que tem direcionado diversos estudos à exploração dos recursos hídricos subterrâneos. A falta de conhecimento da sociedade perante todos os estudos que devem ser realizados antes do uso de águas subterrâneas, resulta num consumo descontrolado por grande parte das pessoas que utilizam águas provenientes de poços profundos. A legislação brasileira determina como padrão para estudo da radioatividade em recursos hídricos o alfa global e o beta global, para posterior necessidade ou não de estudo específico de cada radionuclídeo. No presente trabalho o valor máximo de alfa total foi de 0,0292 Bq/L para a amostra coletada na Faz. São Paulo e beta total foi de 0,310 Bq/L para a amostra ITE, ou seja, foram valores abaixo dos máximos estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde. O valor máximo obtido para Po-210 foi o da amostra Sítio Btu-Pardinho (0,00205 Bq/L), o qual esteve abaixo do limite de referência que é de 0,2 Bq/L. Quanto ao Pb-210, o valor máximo foi de 0,0251 Bq/L, ou seja, menor que o máximo estabelecido pela Organização Mundial da Saúde (0,1 Bq/L). As demais análises hidroquímicas também apresentaram valores abaixo do máximo permitido pela Portaria 518 do Ministério da Saúde.

Dessa forma, quanto aos parâmetros analisados, as amostras enquadram-se nos padrões estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde e Portaria 518 do Ministério da Saúde, assim, não interferindo na saúde humana.

8. RECOMENDAÇÕES

Para que se possam evitar futuros problemas na exploração dos recursos hídricos provenientes de poços tubulares profundos é necessária uma análise periódica da qualidade das águas de acordo com as legislações vigentes, de maneira a se garantir o bem estar da população. Para tal controle é necessário o apoio das instituições, órgãos ambientais e usuários para criar um sistema eficiente de cadastro de todos os poços tubulares explorados, bem como realizar análises freqüentes para que se possa verificar o atendimento à legislação a fim de garantir o bem estar da sociedade, já que os elementos podem interferir na saúde.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARGONNE Radiological Fact Sheet. Argonne National Laboratory. 2005. Disponível em: http://www.evs.anl.gov/pub/doc/Anl_ContaminantFactsSheets_All_070418.pdf Acesso em: 14 out. 2011

ATKINS, P.W. 2006. Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 3º edição ed. Artmed, Porto Alegre.

BARBALACE, K.L. 2007. Periodic Table of Elements: Elements Polonium-Po. EnvironmentalChemistry.com 1995-2007.

BONOTTO, D. M. Aplicações Hidrogeoquímicas naturais das séries do U (4n+2) e Th (4n) no Morro do Ferro, Poços de Caldas (MG). 1986. 378f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

BONOTTO, D. *Espectrometria gama com detector de cintilação de NaI(Tl)*. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 1990. Apostila da disciplina Radioelementos no Ambiente.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional das Águas – ANA. *O aquífero Guarani*. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/guarani/sistema/descricao.htm> Acesso em: 21 set. 2010

CETESB (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO BÁSICO). *Importância das águas subterrâneas*. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/agua_sub/importancia.asp Acesso em: 21 set. 2010.

DUARTE, C. R. *Relações radiométricas e isotópicas na área do Projeto Rio Preto (GO)*. 1997. 119 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1997.

EMERSON, H.S.; YOUNG, A.K. Method development for the extraction of naturally occurring radionuclides in marine sediments. *The science of total environment*. V. 173/174, p.313-322. 1995.

HERNANDEZ, C.A., Asencio, M.D. Caravaca, A.M.; A.M; Morell, E.S.; Moreno, R.A. ¹³⁷Cs and ²¹⁰Po dose assessment from marine food in Cienfuegos Bay (CUBA). *Journal of environmental radioactivity*, v.61, p. 203-211, 2002.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the ICRP. *Annals of the ICRP*, Oxford, v. 21, n. 1/3, p. 1-92, 1991

ICRU – International Commission on Radiation Units and Measurements – REPORT 53, “Gamma Ray Spectrometry in the Environment”, ICRU Publications, Bethesda, Maryland, 1994.

IVANOVICH, M.; HARMON, R.S (Ed.). Uranium series disequilibrium: applications to earth, marine, and environmental sciences. Oxford: Clarendon Press, 1982. 909p.

LIMA, J. L. N., Hidroquímica pluvial e fluvial na Bacia do Rio Corumbataí (SP) e relações com o uso do Pb-210 como geocronômetro. 2000. 260 f. Tese (Doutorado em Geociência) Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2000.

NUDAT. Nudat database versão 2.5. Disponível em: <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/> Acesso em 14 de Outubro de 2011.

POET, S. E.; MOORE, H. E. & MARTELL, E.A., Lead 210, bismuth 210, and polonium 210 in the atmosphere: accurate radio measurement and application to aerosol residence time determination. *Journal of Geophysical Research*, Colorado, v.77, n. 33, p. 6515-6527, 1972.

RAMOS, G. F.; Determinação de isótopos de urânio e tório e polônio em perfis de sedimento da baixada santista, SP. 2010. 83p. Tese (Mestrado em Ciências em tecnologia nuclear) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

REBOUÇAS, A. O Paradoxo Brasileiro. *Revista Cadernos Le Monde Diplomatique*, São Paulo, n. 3, p. 38-41, 2003.

SAITO, K., Petoussi-Hens, N., Zankl, M., “Calculation of the Effective Dose and Its Variation From Environmental Gamma Ray Sources”, *Health Phys.* Vol.79, pp.698 – 709, 1998.

SANTOS, T. O.; Estudo sobre a radioatividade do radônio em parte das águas do Aquífero Guarani. 2008. 55p. Trabalho de Conclusão (Geologia) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2008.

SOLON, L.R. Lowder, W.M., A. V., Le Vine, H. D., Blatz, H., Eisenbud, M., “External Environmental Radiation Measurements in the United States”, U.S. Atomic Energy Commission, New York, EUA, 1958.

WHO (World Health Organization) Guidelines for drinking water quality: radiological aspects. 2002.

WHO. Guidelines for drinking-water quality: Recommendations. 3rd ed. Geneva, 2004 v.1, p. 197-209.

10. APÊNDICE

10.1 Poços tubulares profundos no município de Botucatu (SP).

Nome: Fischer S.A. Agropecuária.
Município: Botucatu-SP
Tipo/usuário: Irrigante
Razão/Sigla: Fazenda Quatro Irmãos
Atividade: Agricultura
Finalidade/uso: irrigação
Coordenada UTM N Km: 7458,95
Coordenada UTM L Km: 743,60
Coordenada UTM Mc: 51
Aquífero: Formação Serra Geral

Poço: Staroup S.A Indústria de Roupas
Município: Botucatu – SP
Finalidade/Uso: Sanitário/ Industrial
Tipo Usuário: Industrial
Coordenada UTMN KM: 7648,46
Coordenada UTML KM: 759,03
Coordenada UTM Mc: 51
Quantidade Agua m3/h: 2,67
Horas/dias: 20
Dias/mês: 30
Aquífero: Formação Santo Anastácio

Poço: Instituição Toledo de Ensino
Município: Botucatu - SP
Finalidade/Uso: Sanitário
Coordenada UTMN KM: 7462,17
Coordenada UTML KM: 759,78
Coordenada UTM Mc: 45
Quantidade Agua m3/h: 5,00
Horas/dias: 10
Aquífero: Formação Adamantina

Nome: Genny Ribeiro De Marchi
Município: Botucatu-SP
Tipo/usuário: Irrigante
Razão/Sigla: SITIO PALMEIRAS
Finalidade/uso: DESSED
Coordenada UTM N Km: 7470,31982421875
Coordenada UTM L Km: 753,840026855468
Coordenada UTM Mc: 51
Quantidade água: 2,0 m3/h
Horas/dia: 5
Aquífero: Formação Marília/ Adamantina

Nome: Tibire Alves De Rezende
Município: Botucatu-SP
Tipo/usuário: Irrigante
Razão/Sigla: SITIO SAO JOSE
Finalidade/uso: IRR/DES
Coordenada UTM N Km: 7464,68994140625
Coordenada UTM L Km: 760,559997558593
Coordenada UTM Mc: 45
Quantidade água: 8,0 m³/h
Horas/dia: 2
Aquífero: Formação Serra Geral

Nome: Osvaldo Paes de Almeida
Município: Botucatu-SP
Razão/Sigla: Quinta do Manacá
Atividade: Agricultura
Finalidade/uso: sanitário
Coordenada UTM N Km: 7469,4
Coordenada UTM L Km: 756,35
Coordenada UTM Mc: 51
Quantidade água: 3m³/h
Aquífero: Formação Botucatu - Pirambóia

Nome: Faz. São Paulo
Razão/Sigla: Fazenda São Paulo/estrada Bocaina
Município: Botucatu - SP
Finalidade/uso: Pecuária
Coordenada UTM N/S: 7468400
Coordenada UTM (Leste/Oeste): 772500
Latitude (GGMMSS): 225212
Longitude (GGMMSS): 482039
Bacia Hidrográfica: Rio Paraná
Subbacia Hidrográfica: 62 - Rios Parana, Tiete e outros
Profundidade final: 140m
Tipo de formação: Formação Piramboia
Vazão: 7,5m³/h

Nome: Botucatu Tênis Clube
Razão/Sigla: BTC
Município: Botucatu - SP
Finalidade/uso: Piscinas
Localidade: Rua Siqueira Campos, 444
Coordenada UTM N/S: 7467120
Coordenada UTM (Leste/Oeste): 762350
Latitude (GGMMSS): 225259
Longitude (GGMMSS): 482634
Bacia Hidrográfica: Rio Parana
Subbacia Hidrográfica: 62 - Rios Parana, Tiete e outros.
Profundidade final: 145m
Tipo de formação: de 0-40m --- Formação Bauru
40-110m – Formação Serra Geral
110 – 145m – Formação Botucatu
Captação: Aquífero Botucatu
Vazão: 7,0m³/h

Nome: SESI
Razão/Sigla: Serviço Social da Indústria
Município: Botucatu- SP
Finalidade/uso: sanitário
Localidade: Rodovia Marechal Rondon, Km 247,4
Bacia Hidrográfica: Rio Parana
Subbacia Hidrográfica: 62 - Rios Parana, Tiete e outros.
Profundidade final: 303m
Captação: 150m
Captação: Aquífero Botucatu

Nome: AAB
Razão/Sigla: Associação Atlética Botucatuense
Município: Botucatu-SP
Finalidade/uso: Piscinas/ Sanitário
Bacia Hidrográfica: Rio Parana
Subbacia Hidrográfica: 62 - Rios Parana, Tiete e outros.
Profundidade final: 45m

Nome: Caio
Razão/Sigla: Caio
Município: Botucatu-SP
Finalidade/uso: Processos industriais
Bacia Hidrográfica: Rio Parana
Subbacia Hidrográfica: 62 - Rios Parana, Tiete e outros.
Profundidade final: 190m
Nome: Clube de Campo Banespa
Razão/Sigla: Banespa
Município: Botucatu-SP

