

# HIDROQUÍMICA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS MANTO DE INTEMPERISMO E MEIO FRATURADO NA REGIÃO DE ATIBAIA, ESTADO DE SÃO PAULO

*Itabaraci Nazareno Cavalcante (\*)  
Maria Marlucia F. Santiago (\*\*)  
Aldo da Cunha Rebouças (\*\*\*)*

## Resumo

*Este trabalho tem por objetivo mostrar a caracterização físico-química das águas subterrâneas na região de Atibaia, sudeste do Estado de São Paulo, observando a inter-relação entre as águas que percolam o manto de intemperismo e o meio fraturado. Os dados apresentados são oriundos da Dissertação de Mestrado de CAVALCANTE (1990) desenvolvida no âmbito do Projeto “Hidrogeologia de Rochas Fraturadas Pré-Cambrianas no Estado de São Paulo” realizado no Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas – CEPAS/USP com financiamento do FINEP/PADCT.*

*Foram cadastrados 236 poços (79 poços tubulares e 157 cacimbas) e realizadas em campo, 195 medidas de pH e condutividade elétrica, além de serem efetuadas diversas análises físico-químicas completas.*

*A condutividade e o pH crescem com a profundidade demonstrando uma relação direta com o aumento da concentração iônica. As águas das cacimbas, reflexo do manto de intemperismo, são bicarbonatadas cálcicas e as dos poços tubulares são mistas, passando para sódicas e cálcicas*

*A hidrólise dos feldspatos se constitui no principal processo químico para o enriquecimento iônico das águas subterrâneas, sendo que a caolinita e a montmorilonita-Ca representam os argilo-minerais que mais contribuem na liberação de íons para o meio aquoso.*

*Existe uma interligação entre os dois meios aquíferos, com o manto de intemperismo desenvolvendo a função de zona de recarga para o meio fraturado.*

## Introdução

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Projeto “Hidrogeologia de Rochas Fraturadas Pré-Cambrianas no Estado de São Paulo”, realizado no Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas – CEPAS/USP sob os auspícios da FINEP/PADCT.

Foram utilizadas análises físico-químicas, realizadas no CENA em Piracicaba-SP, das águas dos poços tubulares e poços escavados manualmente (cacimbas) localizados no manto de

---

(\*) Professor Adjunto do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará  
Doutor em Hidrogeologia

(\*\*) Professora Adjunto do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará  
Doutora em Física Isotópica

(\*\*\*) Professor Titular do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo Pós-doutorado em Hidrogeologia

intemperismo e meio fraturado, para se determinar a importância do primeiro como aquífero e meio de transferência de água para o meio fraturado e, conseqüentemente, a relação existente entre eles.

Foram cadastradas 79 fichas técnicas de poços tubulares, sendo que, em campo, somente 39 foram localizados, além de 157 cacimbas. Destes, foram amostrados águas de 11 tubulares e 8 escavados, sempre que possível situados próximos uns aos outros, o que facilitava a correlação direta entre os meios explorados.

## **Localização da Áreas**

A área de trabalho possui 590 km<sup>2</sup>, compreendendo parte da bacia hidrográfica do rio Atibaia, onde o manto de intemperismo possui uma espessura oscilando predominantemente entre 20 e 40 metros, localmente atingindo até 60 metros. Está localizada a 70 km a sudeste da Grande São Paulo, sendo limitada pelas coordenadas de 23° 00' a 23° 15' de Latitude Sul e 46° 30" a 46° 45' de Longitude Oeste.

## **Características Gerais**

A área pesquisada situa-se em uma região serrana denominada Planalto Atlântico e apresenta um clima tropical de altitude com temperaturas anuais oscilando de 22,80 a 13, 6°C, máxima e mínima respectivamente.

O balanço hídrico realizado por CARVALHO et al., (1975), considerando a capacidade total de armazenamento de água do solo igual a 100 mm, mostra que não existe deficiência de água na região, com uma precipitação média anual de 1384 mm e evapotranspiração média de 919 mm/ano, resultando em um excedente hídrico de 444 mm/ano.

Este elevado excedente constitui fator importantíssimo para a lixiviação de bases e, conseqüentemente, para a aceleração do processo de intemperismo químico nos litotipos, que associados as condições estruturais reinantes na região, favorece a formação de espessos pacotes de rochas alteradas.

A região apresenta três (3) tipos geomorfológicos: um relevo montanhoso com altitudes oscilando de 1000 a 1420 metros, fazendo parte dos primeiros contrafortes da Serra da Mantiqueira; colinas mamelonares caracterizadas por altitudes compreendidas entre 800 a 1000 metros, com uma configuração do tipo "mar de morros", com topos arredondados e; por último, um relevo composto por várzeas Tércio-Quaternárias em altitudes inferiores a 800 metros, sujeitas a inundações periódicas.

Litologicamente, a área possui os maciços graníticos de Atibaia e Socorro, o Complexo Gnáissico-Migmatítico de Amparo, Coberturas Tércio-Quaternárias e Aluviões (Figura 1).

O maciço granítico de Atibaia ocupa uma área de 52 km<sup>2</sup> e o Socorro de 136 km<sup>2</sup> sendo que o primeiro comporta rochas de granulação grossa, inequigranulares, compostas de quartzo, microclína, plagioclásio, biotita e hornblenda. O granito de Socorro é mais cataclásado do que o de Atibaia e seu tipo mais comum é o biotita-granito, sendo composto por quartzo, microclína, biotita, hornblenda e, esporadicamente, moscovita (CAVALCANTE & REBOUÇAS, 1990).

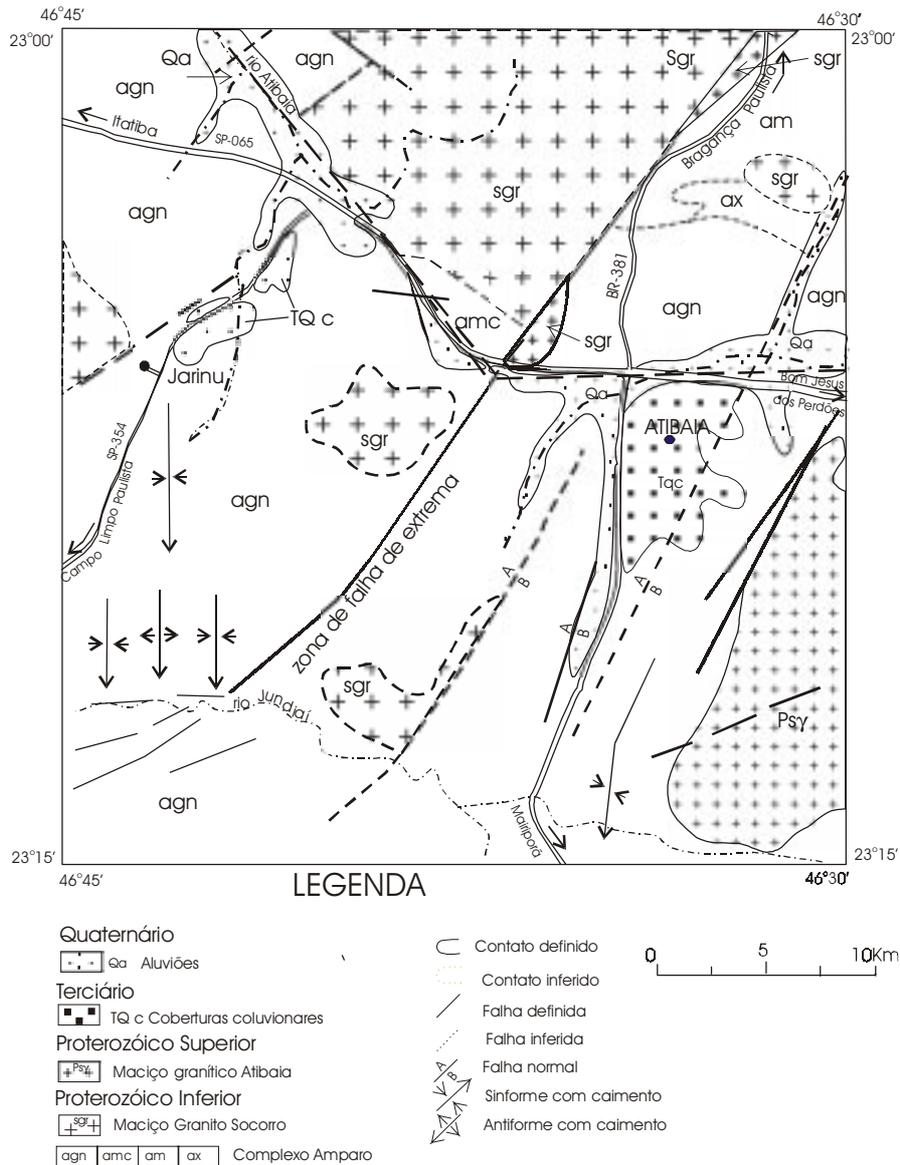


Figura 1 - Mapa esquemático das suites geológicas da Folha Atibaia (Modificado do Mapa Geológico da Quadrícula Atibaia, 1985 - UNESP-PROMINÉRIO)

O Complexo Amparo ocupa 325,5 km<sup>2</sup> e entre os gnaisses existe uma predominância dos quartzo-feldspáticos, granada-biotita gnaisses com ou sem silimanita, hornblenda-biotita gnaisses e tipos cálcio-silicatados. As rochas gnáissicas passam gradativamente, de oeste para leste, para migmatitos que aos poucos vão exibindo estruturas mais complexas. Apresentam coloração rósea e são constituídos por microclínio, oligoclásio, quartzo, biotita, hornblenda, granada e moscovita.

Estruturalmente existem falhas transcorrentes e normais, com direções preferenciais NE-SW, e sinformes e antiformes ao sul da área.

## Hidroquímica

Existem dois sistemas aquíferos na área de estudo: o manto de intemperismo e o meio fraturado. As vazões de 90% dos poços tubulares estão abaixo de 10 m<sup>3</sup>/h, sendo que destas, 55% encontram-se no intervalo de 0,3 a 5 m<sup>3</sup>/h., com a maior vazão registrada de 70 m<sup>3</sup>/h, no domínio do Complexo Gnáissico-Migmatítico (CAVALCANTE, 1990).

O nível estático, seja nas cacimbas ou poços tubulares, está aproximadamente na mesma profundidade sendo, respectivamente, de 0,4 a 9,0 metros (81%) e de 05, a 9,0 metros (50%).

As medidas de pH mostram que as águas das cacimbas, refletindo, portanto, as águas do manto de intemperismo, possuem valores entre 4,5 a 6,0 e as dos poços tubulares, entre 5,5 a 8,0 (Figura 2). As medidas de condutividade elétrica indicam para as primeiras, valores predominantemente inferiores a 80 μS/cm (80%) e, para as segundas, valores entre 80 e 210 μS/cm (74%), conforme pode ser visualizado na Figura 3.

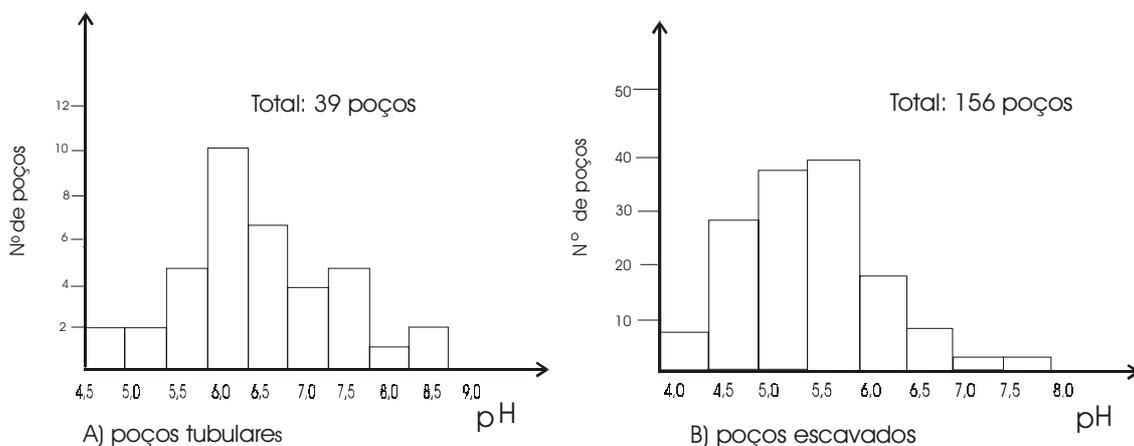


Figura 2 - Distribuição de frequência de pH "in situ" das águas subterrâneas

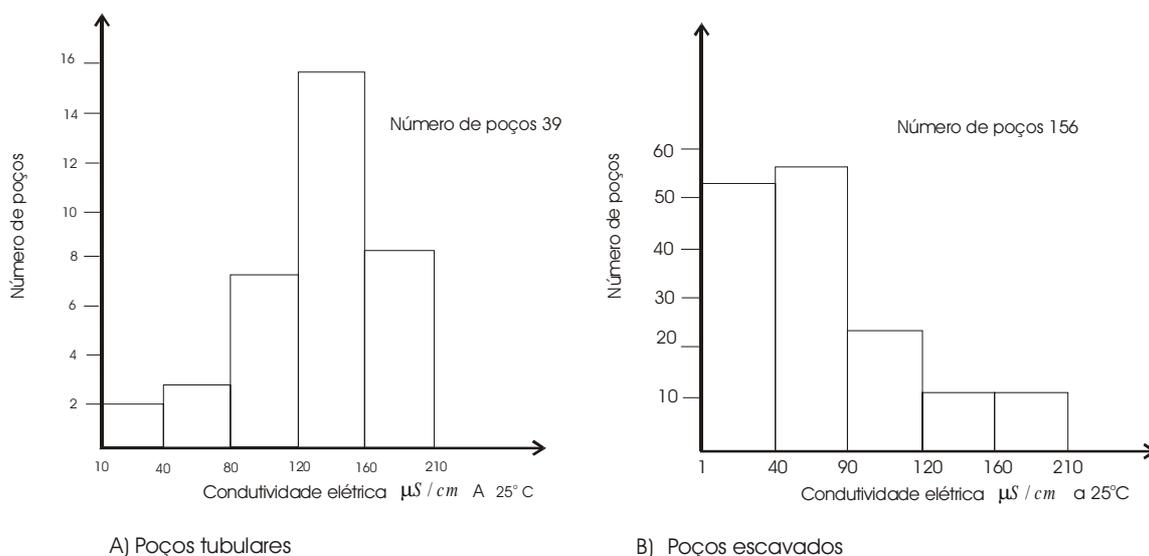


Figura - 3 - Distribuição da frequência das medidas de condutividade elétrica específica "in situ" das águas subterrâneas

Foram quantificados as concentrações de cálcio, magnésio, sódio, potássio, cloreto, sulfato, bicarbonato e nitrato, além de silício e 14 elementos traços (Tabela 1).

**Tabela 1** – Análises químicas, elementos maiores e CO<sub>2</sub> Livre - Atibaia (SP)

Amostra	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>2</sub> livre	Si	Zn	Fe	Ba	P
5C	6.2	0.7	1.9	1.3	2.0	<2.5	32.4	0.6	64.9	3.3	0.02	0.2	0.04	<0.1
6C	4.5	0.5	1.1	2.4	0.2	<2.5	27.2	0.1	30.8	7.8	<0.02	<0.02	0.03	<0.1
2C	18.5	0.9	1.0	4.1	0.3	<2.5	77.2	0.2	27.5	5.4	<0.02	<0.02	0.04	<0.1
10T	12.8	1.3	9.1	2.1	0.1	<2.5	92.1	0.1	20.9	17.6	0.3	<0.02	<0.02	<0.1
4C	8.1	3.4	0.7	3.5	1.8	<2.5	54.9	4.5	39.6	4.6	0.1	<0.02	0.2	<0.1
8T	14.3	3.3	6.6	4.0	0.5	<2.5	85.4	3.5	26.4	15.4	1.1	<0.02	<0.02	<0.1
3C	9.4	2.0	4.3	2.9	<0.1	<2.5	59.3	0.8	44.0	15.9	0.2	<0.02	0.04	0.3
7T	15.1	4.1	9.6	2.9	<0.1	<2.5	109.8	<0.01	31.9	14.8	0.7	<0.02	<0.02	<0.1
1C	22.9	1.4	1.0	4.7	0.9	<2.5	88.3	0.4	17.6	7.3	0.03	<0.02	0.08	0.2
12T	5.7	1.2	8.9	3.2	<0.1	<2.5	63.2	0.1	27.5	24.6	1.3	<0.02	0.02	0.3
13T	8.5	3.5	2.7	1.5	<0.1	<2.5	65.4	0.04	15.4	15.5	0.1	<0.02	<0.02	0.2
14T	6.9	0.9	9.8	1.1	0.2	<2.5	67.1	<0.01	16.5	18.4	0.02	<0.02	<0.02	<0.1
9T	10.6	1.2	16.5	1.6	0.1	<2.5	97.6	<0.01	15.4	13.8	<0.02	<0.02	<0.02	<0.1
15T	3.2	1.2	1.9	2.3	<0.1	<2.5	26.2	0.2	16.5	12.1	0.03	<0.02	0.02	<0.1
11T	6.6	2.1	5.2	3.4	1.0	<2.5	61.2	0.8	58.3	14.7	0.2	0.02	0.06	<0.1

T - Poço tubular C - Cacimba Concentração - mg/l

As concentrações da maior parte dos elementos traços estão abaixo dos limites de detecção do método, sendo elas (em mg/l): boro, cádmio e níquel (<0,02); prata e cromo (<0,05); manganês (<0,07) e, alumínio e chumbo (<0,10). O flúor aparece somente no poço 10T com uma concentração de 3 mg/L.

Os diagramas triangulares (Figura 4) mostram que as águas dos poços escavados são bicarbonatadas cálcicas e as dos tubulares são bicarbonatadas mistas, levemente cálcicas ou sódicas. As figuras 5 e 6 mostram, respectivamente, a condutividade elétrica e o pH em função das profundidades dos poços. Observa-se que existe a mesma tendência para ambos, ou seja, um crescimento com a profundidade. A dispersão observada para as águas dois poços tubulares pode ser explicada pelo fato de que nem sempre a profundidade do poço corresponde a profundidade da entrada d'água e, provavelmente, alguns destes poços poderiam ter uma menor profundidade de perfuração em função da localização mais rasa da entrada d'água. Algumas vezes, as águas que percolam as rochas alteradas influenciam diretamente na composição das águas mais profundas.

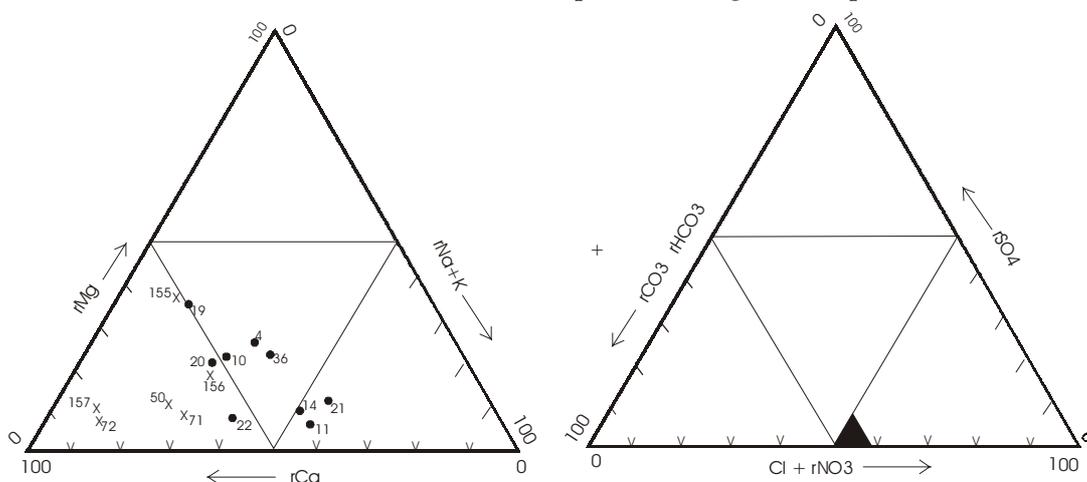


Figura 4- Diagrama triangular das águas subterrâneas da bacia do rio Atibaia - Folha Atibaia (SP)

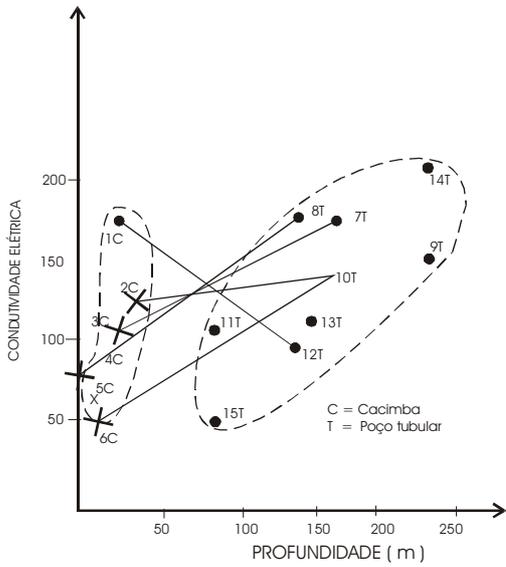


Figura 5 – Medidas de condutividade elétrica ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) em campo versus profundidade dos poços.

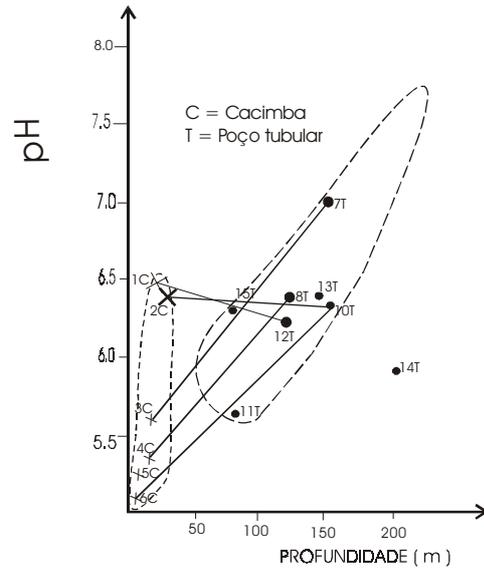


Figura 6 – Medidas de pH em campo versus profundidade dos poços.

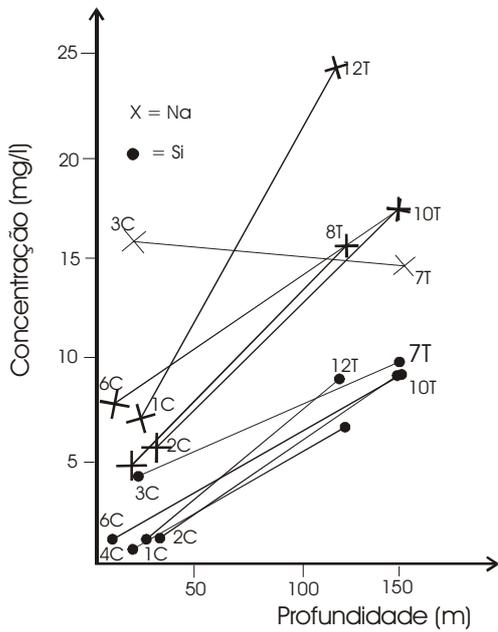


Figura 7 – Concentração de  $\text{Na}^{++}$  e Si versus profundidade dos poços de Atibaia-SP.

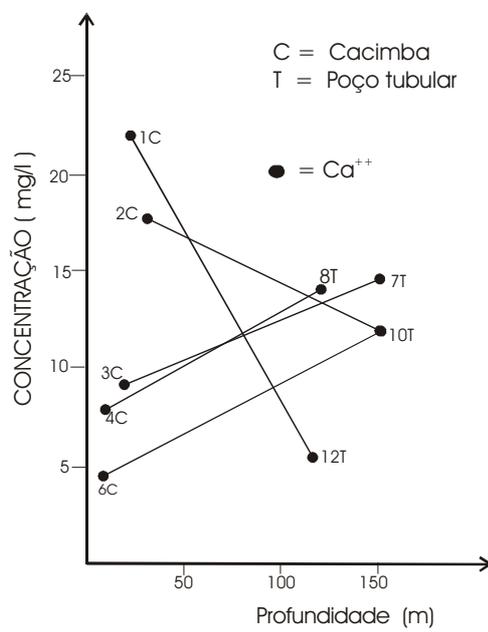


Figura 8 – Concentração de  $\text{Ca}^{++}$  versus profundidades dos poços de Atibaia-SP.

As concentrações de sílica e de sódio em função da profundidade são mostradas na figura 7. As linhas unem o poço escavado (cacimba) ao poço tubular mais próximo, conforme se pode observar na figura 1. Os resultados mostram um aumento de concentração à medida em que aumenta a profundidade.

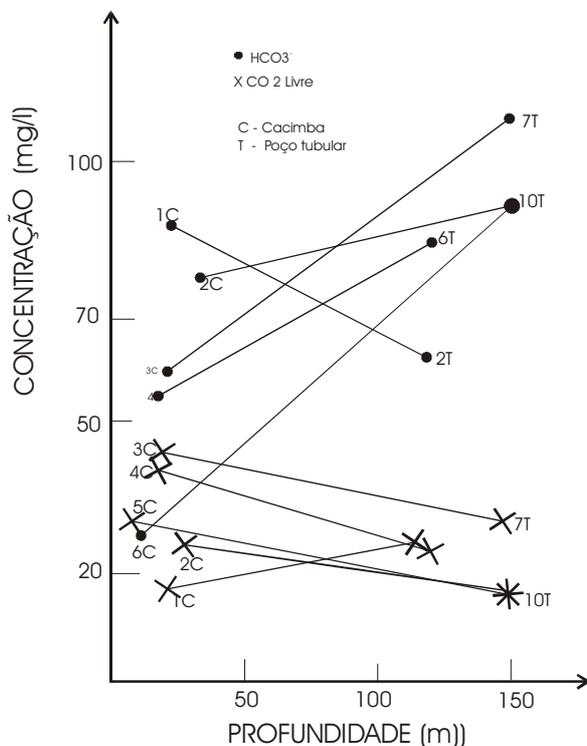
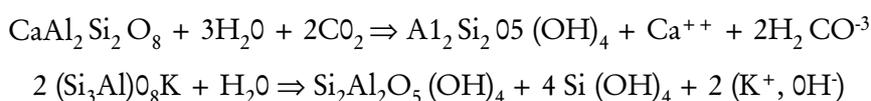


Figura 9 – Concentrações de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e CO<sub>2</sub> livre versus profundidade dos poços de Atibaia-SP.

A concentração de cálcio com a profundidade está apresentada na figura 8 e a do bicarbonato e CO<sub>2</sub> livre estão na figura 9. Os outros íons não foram relacionados por apresentarem concentrações muito baixas e sem variações significativas.

Comparando as últimas quatro figuras podemos distinguir diferentes comportamentos: a) O aumento de pH, cálcio, bicarbonato e sódio nos conjuntos de águas dos poços 3C-7T, 4C-8T e 6C-10T e b) diminuição do pH, e de cálcio e aumento de bicarbonato nos conjuntos 1C-12T e 2C-10T. Os valores de condutividade variando com a profundidade mostrados na figura 5, além de evidenciarem um crescimento com a profundidade, indicam claramente que as faixas de variação para os sistemas de poços escolhidos são semelhantes para os escavados e tubulares. Somente o conjunto 1C-T2T não apresentou um aumento de condutividade.

A concentração iônica das águas pode ser explicada pela hidrólise dos feldspatos que contribuem, como no caso da anortita, para enriquecer a água em cálcio e bicarbonato, e do ortoclásio, em sílica como se pode observar pelas reações:



Este enriquecimento iônico é confirmado pelo aumento da condutividade elétrica com a profundidade. Para as águas das cacimbas a variação é claramente linear, enquanto que para as águas dos poços tubulares existe uma dispersão que pode ser justificada pelo fato da profundidade dos poços nem sempre corresponder a profundidade da entrada d água, pois se sabe que o meio fraturado é heterogêneo e anisotrópico, onde o fluxo hídrico subterrâneo se processa nas fraturas abertas e interconectadas.

O diagrama de equilíbrio termodinâmico entre os feldspatos e seus produtos de alteração (Figura 10) mostra os campos de estabilidade de cada mineral. Nele observa-se que as águas das cacimbas estão no campo da caolinita e as dos tubulares estão, predominantemente, no campo da montmorilonita-Ca.

O aumento de cálcio, bicarbonato e sílica observado anteriormente, é produzido na formação da caolinita que evoluindo para a montmorilonita libera mais sílica e sódio. As concentrações de CO<sub>2</sub> e bicarbonato variam inversamente, dependendo do pH e satisfazendo o processo.

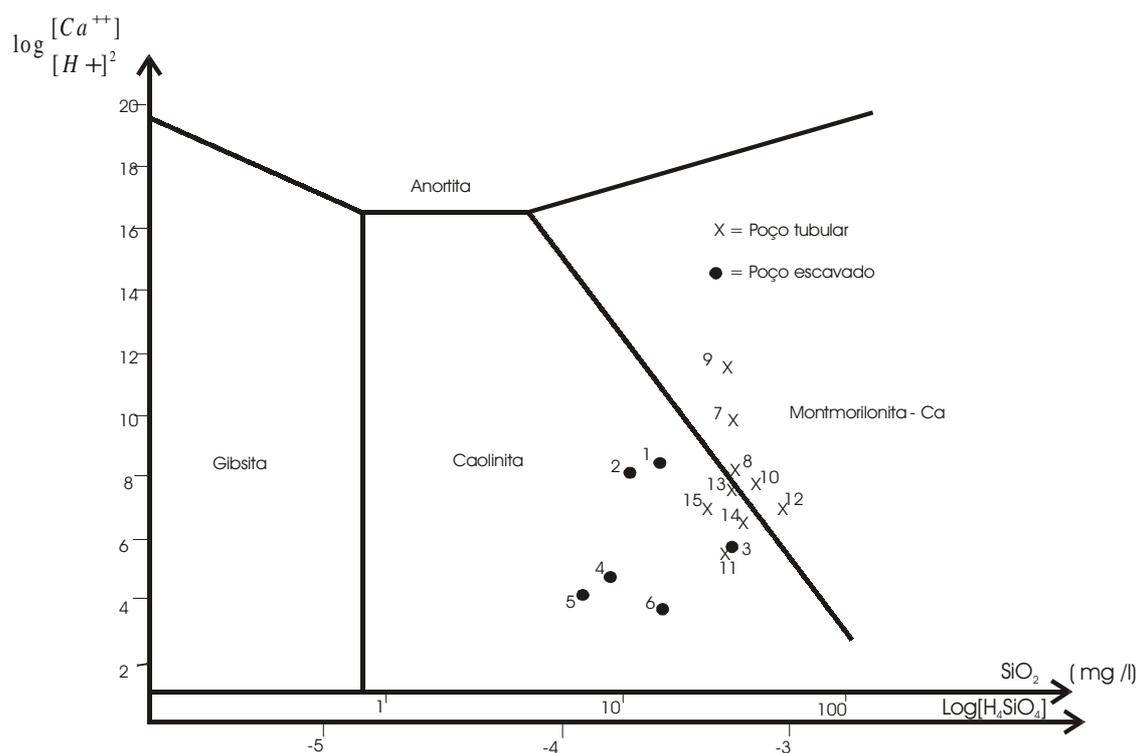


Figura 10 – Diagrama de estabilidade do sistema CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O à 25°C e 1 atm

## **Conclusões**

Reflexo do exposto e das discussões anteriores, conclui-se que o excedente hídrico é o responsável pelo intemperismo químico dos feldspatos e outras classes mineralógicas, através do processo de hidrólise, que irão ceder íons para o enriquecimento das águas subterrâneas. Como existe um aumento crescente da concentração iônica das águas das cacimbas, que estão no manto de intemperismo, para as dos poços tubulares, que alcançam o meio fraturado sem intemperismo, constata-se a interligação entre os dois sistemas aquíferos e o papel relevante do manto de intemperismo funcionando como zona de recarga para o fraturado.

Considerando tal constatação, através dos dados hidroquímicos, ressalta-se a necessidade maior de se observar as normas técnicas de construção de poços e os critérios de vulnerabilidade natural dos aquíferos, com relação a ocupação e uso do meio físico, que poderão vir a comprometer a qualidade natural das águas subterrâneas.

Apesar de possuir menores valores de condutividade hidráulica e porosidade eficaz, comparativamente as rochas sedimentares clásticas armazenadoras de águas subterrâneas, o manto de intemperismo é um aquífero de transferência, estratégico e explorável necessitando, portanto, de medidas de uso e proteção para as suas águas.

## **Referências Bibliográficas**

CARVALHO, R. A.; LEPSCH, I.F.; OLIVEIRA, J.B.; VALADARES, J. – 1975 – Levantamento pedológico semidetalhado do município de Atibaia, SP. BRAGANTINA. Tomo único. São Paulo. 34. 58p.

CAVALCANTE, I.N. & REBOUÇAS, A.C. – 1990 – Caracterização hidrogeológica de terrenos cristalinos com manto de alteração. Revista ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. N 13, São Paulo, SP. p 9-19.

CAVALCANTE, I.N. -1990- Estudo hidrogeológico de terreno cristalino com manto de intemperismo – Área Piloto de Atibaia (SP). Dissertação de Mestrado. Inédita. IG/USP. São Paulo-SP. 123p.