

## ESTUDO HIDROGEOLÓGICO E HIDROGEOQUÍMICO NA ZONA NÃO SATURADA

SZIKSZAY<sup>1</sup>, Mária; HYPOLITO<sup>1</sup>, Raphael; KIMMELMANN<sup>1</sup>, Annkarin Aurélio;  
FIGUEIRA<sup>2</sup>, Ronaldo Malheiros; ORLANDO<sup>2</sup>, Richard e SAMESHIMA<sup>2</sup>, H.  
Roberto.

### RESUMO

Com o objetivo de se estudar a dinâmica e a evolução da composição química da água na zona não saturada até, inclusive, o aquífero, instalou-se a Estação Experimental de Hidrogeoquímica na Cidade Universitária da USP.

As medidas da direção do movimento da água foram efetuadas através de tensiômetros e as amostras de água, destinadas a análises químicas, foram coletadas de cápsulas porosas. Instalaram-se também três piezômetros.

A monitoração foi semanal por um período de 28 meses para os tensiômetros e de 14 meses para as análises químicas.

Os resultados obtidos permitem concluir que a linha de evaporação se situa a uma profundidade de 0,5 - 1,5m e que a evolução da composição química, é regida pelo clima na parte superior da zona não saturada e em maiores profundidades pela litologia.

---

<sup>1</sup> Professores junto ao Instituto de Geociências da USP.

<sup>2</sup> Bolsistas de Iniciação Científica da FAPESP, São Paulo.

## INTRODUÇÃO

O estudo da dinâmica da água em zona não saturada, assim como sua composição química, traz valiosa contribuição, principalmente, aos campos da hidrogeologia, da agricultura e da ecologia.

Estes estudos têm sido possíveis graças a instalação pioneira da Estação Experimental da Cidade Universitária da Universidade de São Paulo.

É de importância relevante, por exemplo, o estudo da natureza das soluções nos processos de alteração e neoformação mineralógica em clima subtropical.

Também, não menos importante, para a agricultura, é o conhecimento da profundidade da linha de evaporação e composição química da água da zona não saturada que permitem a escolha da cultura a ser aplicada.

Finalmente, no que se refere a poluição, estes estudos servem como indicadores para escolha de locais para lixões, rejeitos industriais e radioativos, cemitérios, etc.

Trabalhos, com estes objetivos têm sido realizados, graças a instalação pioneira da Estação Experimental, Cidade Universitária de São Paulo.

## MÉTODOS E TÉCNICAS

Para a medida da direção do movimento da água na zona não saturada, foram instalados, a cada 0,5m, seis tensiômetros internos e sete externos. As medidas foram efetuadas durante 28 meses com monitoramentos semanais. Os dados obtidos foram utilizados nos cálculos para projeção de gráficos em programa de computador.

Foram instalados três piezômetros o que possibilitou, também, durante 28 meses, medidas de nível de água além de medidas em um poço já existente no local.

Para o estudo do comportamento químico da água, instalaram-se, a cada 0,5m de profundidade, 13 cápsulas porosas horizontais internas, 11 verticais internas e 5 verticais externas.

No instante da coleta mediram-se a condutividade elétrica ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$  -  $T = 25^{\circ}\text{C}$ ), as temperaturas do meio ambiente e da

água, os teores de oxigênio e gás carbônico dissolvidos e  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ .

Nas amostras foram analisadas os ânions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{F}^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$  (DIONEX) e os cátions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{tot}}$  por absorção atômica e  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  por fotometria de chama.

Coletaram-se do perfil, a cada 0,5m, amostras para estudo dos granulométricos. A permeabilidade foi determinada no local, por ocasião da coleta de amostras, e também no laboratório.

Os dados pluviométricos, por sua vez, foram fornecidos pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado (DAEE).

Na Figura 1 tem-se o perfil da Estação Experimental.

FIGURA 1

## RESULTADOS

### 1. Infiltração

Para os estudos de permeabilidade, realizados no laboratório, utilizaram-se amostras indeformadas, de carga constante, e obtiveram-se, para até 4,0m de profundidade, os seguintes resultados, (Szikszay et al., 1986):  $3,7 \cdot 10^{-3} \text{cm.s}^{-1}$  para camadas arenosas e até  $8,4 \cdot 10^{-6} \text{cm.s}^{-1}$  para camadas argilosas.

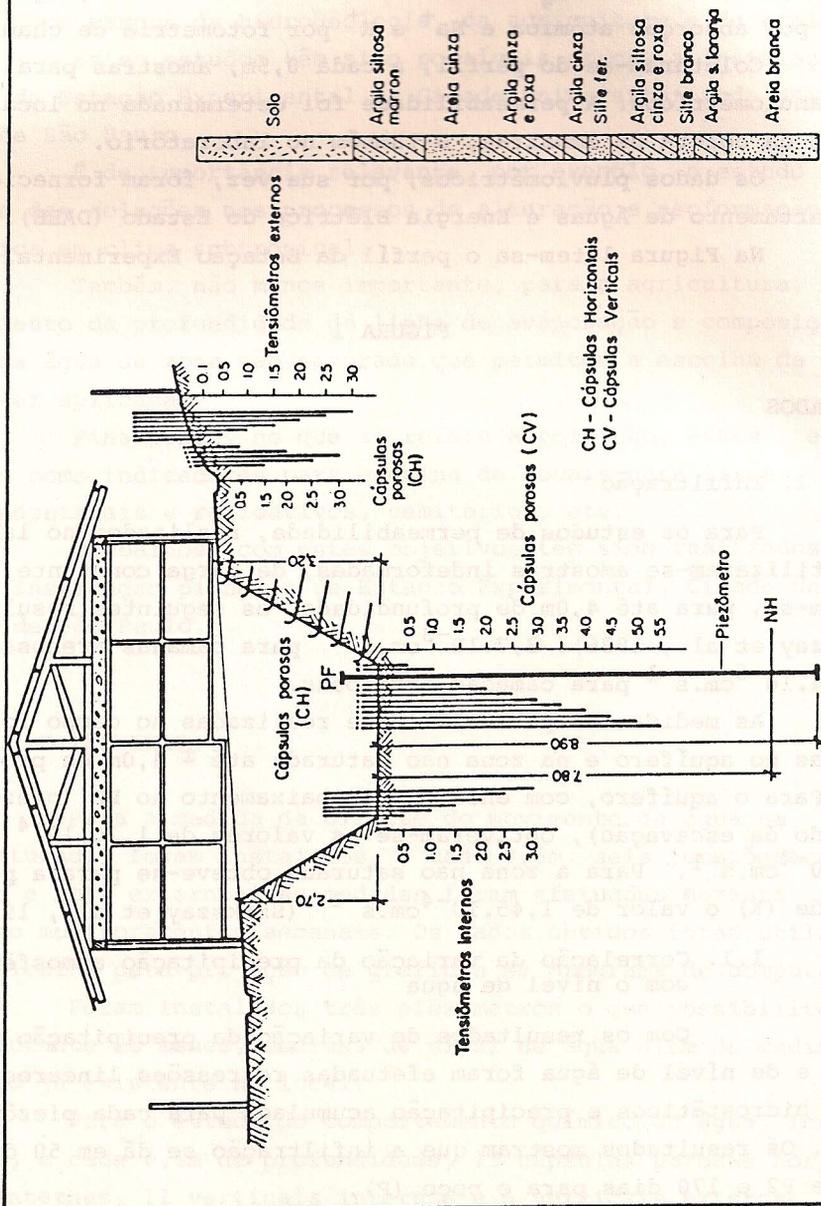
As medidas de permeabilidade realizadas no campo foram efetuadas no aquífero e na zona não saturada até  $\pm 4,0\text{m}$  de profundidade. Para o aquífero, com ensaio de rebaixamento no PF (piezômetro no fundo da escavação), obtiveram-se os valores de  $1,10 \cdot 10^{-4}$  a  $1,80 \cdot 10^{-4} \text{cm.s}^{-1}$ . Para a zona não saturada obteve-se para a permeabilidade (K) o valor de  $1,45 \cdot 10^{-4} \text{cm.s}^{-1}$  (Szikszay et al., 1987).

#### 1.1. Correlação da variação da precipitação atmosférica com o nível de água

Com os resultados de variação da precipitação atmosférica e de nível de água foram efetuadas regressões lineares entre níveis hidrostáticos e precipitação acumulada para cada piezômetro e poço. Os resultados mostram que a infiltração se dá em 50 dias para P1 e P2 e 170 dias para o poço (P).

Estudos com trítio ( $^3\text{H}$ ) mostram que, por este método, tem-se infiltração de 600mm de água em 5 meses.

Fig 1 - PERFIL DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL  
(Fonte: Szikszay et al, 1986)



## 2. Dinâmica

Para interpretar os resultados dos estudos com as medidas tensiométricas, os dados acima foram tratados pelo programa "PLOT SURF".

Nas Figuras 2a e 2b, tem-se a representação tridimensional dos tensiômetros externos e internos respectivamente, onde se integraram, num só gráfico, tempo, profundidade e carga hidráulica.

### FIGURAS 2a e 2b

Nestes gráficos verifica-se que, dependendo da estação, a linha de evaporação varia de 0,5 - 1,5m de profundidade.

Na Figura 2a, observa-se que a carga hidráulica é menor em todas as profundidades na estação de primavera e fim de inverno, correspondendo ao fenômeno de evaporação. Nos meses de janeiro - abril 1987, na época das chuvas, no entanto, a carga hidráulica aumenta, correspondendo a recarga do aquífero.

Na Figura 2b, tem-se o mesmo comportamento, com atraso provavelmente devido à cobertura da Estação.

Na Figura 3, encontram-se os resultados referentes aos tensiômetros externos. Este diagrama compreende a continuação dos dados de monitoração relativo ao período de 05.11.88 a 26.01.88.

### FIGURA 3

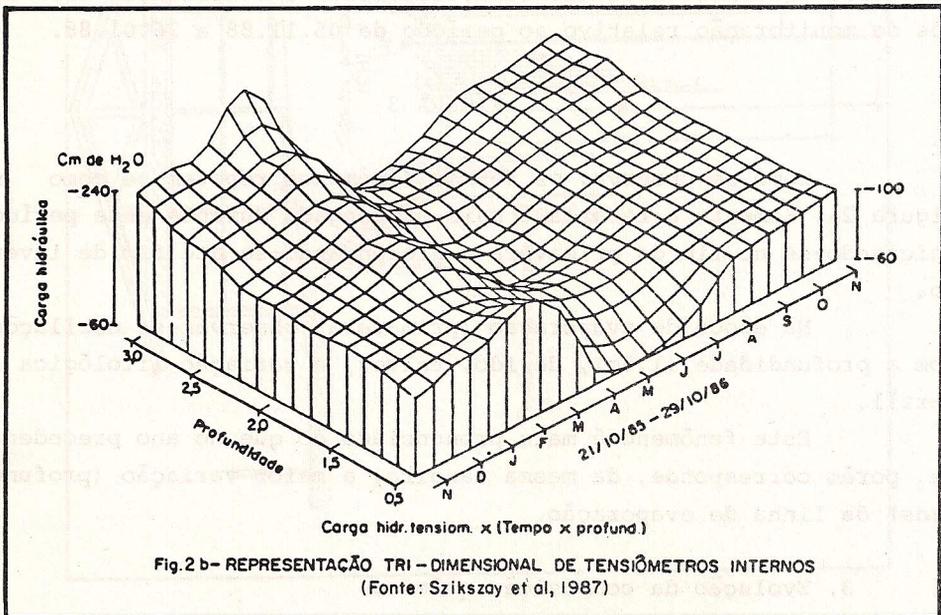
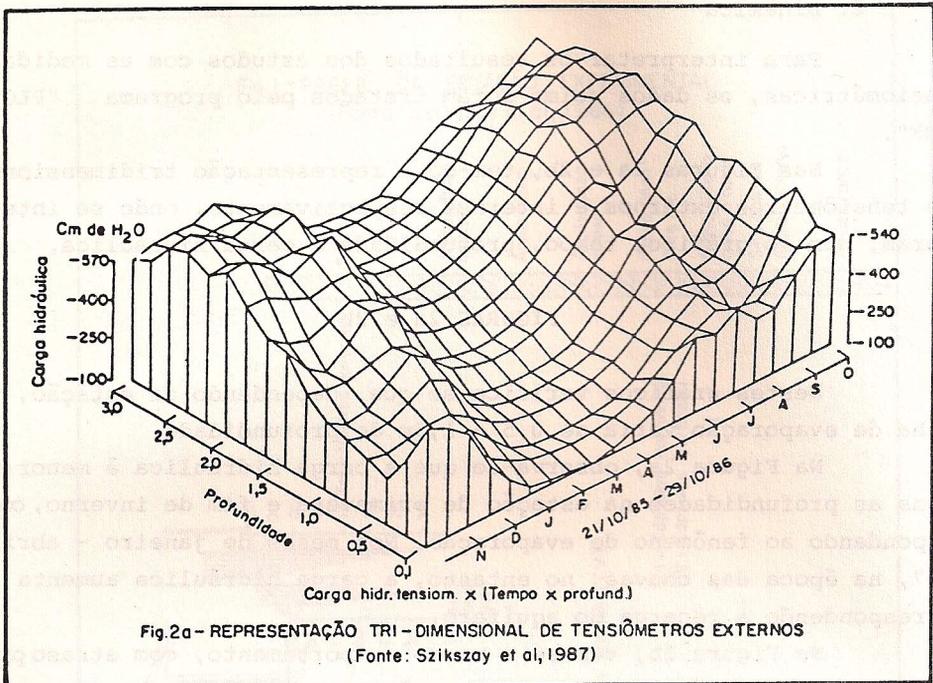
Como se observa, os mesmos fenômenos repetem-se como na Figura 2a. Somente a recarga é mais prolongada durante este período, iniciando-se no fim da primavera e prolongando-se até fim de inverno.

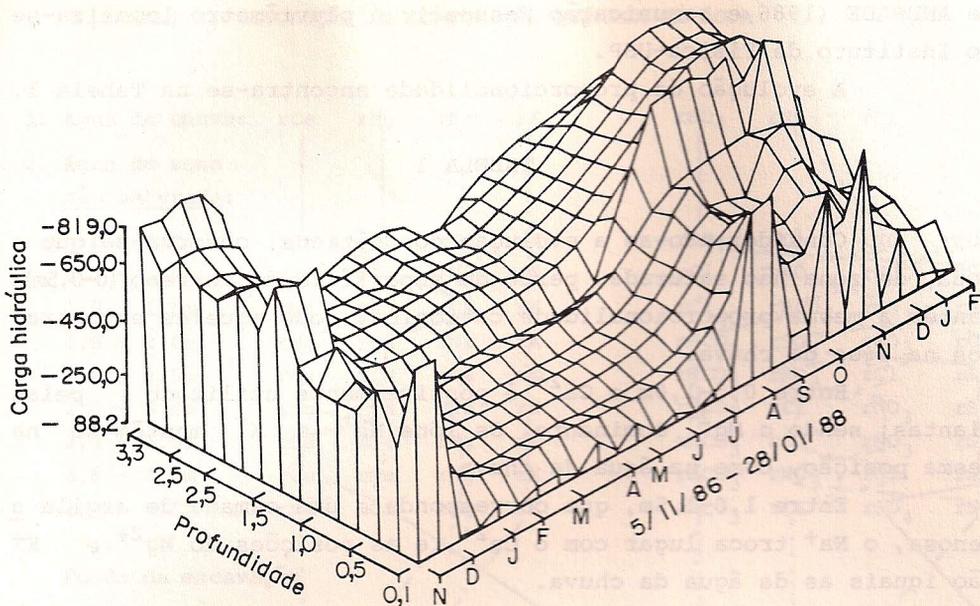
Na época de evaporação (primavera) observam-se oscilações com a profundidade (1,5m), devido, talvez, a variação litológica do perfil.

Este fenômeno é mais pronunciado do que no ano precedente, porém corresponde, da mesma maneira, a maior variação (profundidade) da linha de evaporação.

## 3. Evolução da composição química

As análises da água da chuva foram extraídas do trabalho





Carga hidr. tensiom. X (Tempo X profund.)

Fig. 3 - REPRESENTAÇÃO TRIDIMENSIONAL DE TENSÔMETROS EXTERNOS

de ANDRADE (1986 e comunicação pessoal); o pluviômetro localiza-se no Instituto de Física-USP.

A evolução da proporcionalidade encontra-se na Tabela 1.

TABELA 1

Considerando-se a evolução dos cátions, observa-se que a água, da zona não saturada, perto da superfície do terreno (0-0,5m), mantém a mesma proporcionalidade catiônica, como aqueles encontrados na água da chuva.

Entre 0,5-1,0m o  $\text{Ca}^{2+}$  é possivelmente utilizado pelas plantas, sendo o  $\text{Mg}^{2+}$  dominante. Os íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  mantêm-se na mesma posição, como na água da chuva.

Entre 1,0-1,5m, que corresponde a uma camada de argila arenosa, o  $\text{Na}^+$  troca lugar com o  $\text{Ca}^{2+}$ , e as posições do  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  são iguais as da água da chuva.

Entre 1,5-3,0m, onde ocorre intercalada uma camada de areia, tem-se a mesma proporcionalidade que entre 0,5-1,0m.

Entre 3,0-4,0m (argila arenosa) o  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Na}^+$  trocam posição com o  $\text{Mg}^{2+}$  sendo que o  $\text{Na}^+$  progride enquanto a posição do  $\text{K}^+$  mantém-se inalterada.

A partir de 4,0m o  $\text{Na}^+$  é predominante até o aquífero, indicando a predominância de camadas argilosas. O  $\text{Mg}^{2+}$  acompanha o  $\text{Na}^+$  até 5,5m mas, o  $\text{K}^+$ , a partir dessa profundidade, troca posição com o  $\text{Mg}^{2+}$  (contribuição de camadas argilosas). Esta proporcionalidade mantém-se de 5,5 até 10,5m de profundidade quando o  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocam posição.

No aquífero, novamente o valor do  $\text{Ca}^{2+}$  avança sobre o do  $\text{K}^+$  para que na jusante (P) passe a ser o cátion predominante.

Essas observações permitem concluir que a uma profundidade pequena, correspondendo a zona não saturada, a influência da água da chuva é evidente, constatando-se também uma influência maior da litologia na zona não saturada. No caso em estudo, como o perfil consiste predominantemente de camadas argilosas, o  $\text{Ca}^{2+}$  e o  $\text{Mg}^{2+}$ , que foram adquiridos pela água das camadas do solo, são trocados por  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , provenientes das camadas argilosas, refletindo, portanto a litologia.

Quanto aos ânions, nota-se na parte superior do solo, a modificação da posição do  $\text{Cl}^-$  e  $\text{NO}_3^-$ , uma vez que este último é re-

TABELA 1 - EVOLUÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ÁGUA

	rCa	rMg	rNa	rK	rSO <sub>4</sub>	rNO <sub>3</sub>	rCl	rHCO <sub>3</sub>
1. Água da chuva:	rCa	rMg	rNa	rK	rSO <sub>4</sub>	rNO <sub>3</sub>	rCl	
2. Água da zona não saturada:								
0 - 0,5m	rCa	rMg	rNa	rK	rSO <sub>4</sub>	rCl	rNO <sub>3</sub>	rHCO <sub>3</sub>
0,5 - 1,0m	rMg	rCa	rNa	rK	rCl	rNO <sub>3</sub>	rHCO <sub>3</sub>	rSO <sub>4</sub>
1,0 - 1,5m	rNa	rMg	rCa	rK	rCl	rHCO <sub>3</sub>	rNO <sub>3</sub>	rSO <sub>4</sub>
1,5 - 2,0m	rMg	rCa	rNa	rK	rHCO <sub>3</sub>	rSO <sub>4</sub>	rNO <sub>3</sub>	rCl
2,0 - 2,5m	rMg	rCa	rNa	rK	rHCO <sub>3</sub>	rNO <sub>3</sub>	rCl	rSO <sub>4</sub>
2,5 - 3,0m	rMg	rCa	rNa	rK	rHCO <sub>3</sub>	rCl	rNO <sub>3</sub>	rSO <sub>4</sub>
3,0 - 3,5m	rCa	rNa	rMg	rK	rHCO <sub>3</sub>	rCl	rNO <sub>3</sub>	rSO <sub>4</sub>
3,5 - 4,0m	rCa	rNa	rMg	rK	rHCO <sub>3</sub>	rNO <sub>3</sub>	rCl	rSO <sub>4</sub>
4,0 - 4,5m	rNa	rCa	rMg	rK	rHCO <sub>3</sub>	rCl	rSO <sub>4</sub>	rNO <sub>3</sub>
Fundo da escavação:								
4,5 - 5,5m	rNa	rMg	rK	rCa	rHCO <sub>3</sub>	rCl	rNO <sub>3</sub>	rSO <sub>4</sub>
5,5 - 6,0m	rNa	rK	rMg	rCa	rHCO <sub>3</sub>	rCl	rNO <sub>3</sub>	rSO <sub>4</sub>
6,0 - 6,5m	rNa	rK	rMg	rCa	rHCO <sub>3</sub>	rCl	rNO <sub>3</sub>	rSO <sub>4</sub>
6,5 - 7,0m	rNa	rK	rMg	rCa	rHCO <sub>3</sub>	rCl	rSO <sub>4</sub>	rNO <sub>3</sub>
7,0 - 7,5m	rNa	rK	rMg	rCa	rHCO <sub>3</sub>	rCl	rSO <sub>4</sub>	rNO <sub>3</sub>
7,5 - 8,0m	rNa	rK	rMg	rCa	rHCO <sub>3</sub>	rCl	rSO <sub>4</sub>	rNO <sub>3</sub>
8,0 - 8,5m	rNa	rK	rMg	rCa	rHCO <sub>3</sub>	rCl	rSO <sub>4</sub>	rNO <sub>3</sub>
8,5 - 9,0m	rNa	rK	rMg	rCa	rHCO <sub>3</sub>	rCl	rSO <sub>4</sub>	rNO <sub>3</sub>
9,0 - 9,5m	rNa	rK	rMg	rCa	rHCO <sub>3</sub>	rCl	rSO <sub>4</sub>	rNO <sub>3</sub>
9,5 - 10,0 m	rNa	rK	rMg	rCa	rHCO <sub>3</sub>	rCl	rSO <sub>4</sub>	rNO <sub>3</sub>
10,0 - 10,5 m	rNa	rK	rCa	rMg	rHCO <sub>3</sub>	rCl	rSO <sub>4</sub>	rNO <sub>3</sub>
3. Aquífero								
PF	rNa, rCa	rK	rMg	rHCO <sub>3</sub>	rCl	rSO <sub>4</sub>	rNO <sub>3</sub>	
P	rCa	rNa	rK	rMg	rHCO <sub>3</sub>	rCl	rSO <sub>4</sub>	rNO <sub>3</sub>

tirado pelas plantas. A caracterização da água do solo tem início com o aparecimento do  $\text{HCO}_3^-$ .

Entre 0,5-1,0m, a influência da chuva diminui com a mudança do  $\text{SO}_4^{2-}$ , porém o  $\text{Cl}^-$  é ainda predominante. O  $\text{NO}_3^-$  e o  $\text{HCO}_3^-$  indicam atividade bioquímica do solo sendo que a importância do  $\text{HCO}_3^-$  acentua-se.

Entre 1,0-1,5m, o  $\text{HCO}_3^-$  já é mais significativo que o  $\text{NO}_3^-$  e a partir de 2,0m o  $\text{HCO}_3^-$  é predominante até o aquífero, inclusive.

Nota-se modificações nas proporcionalidades de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  entre 2,0m e 4,5m, a partir do qual o  $\text{Cl}^-$  segue o  $\text{HCO}_3^-$  até o aquífero, inclusive. As variações de  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{NO}_3^-$  devem ser associadas às atividades e reações locais.

## CONCLUSÕES

Existe, como era de se esperar, uma correlação entre a precipitação atmosférica e o nível da água, sendo que a demora no processo de infiltração se deve, essencialmente, a permeabilidade ( $K = 1.10^{-4} \text{cm.s}^{-1}$ ), portanto a granulometria e litologia e a situação topográfica.

Quanto a direção do movimento da água, na zona não saturada, verifica-se que a linha de evaporação se situa entre 0,5-1,5m. A representação tridimensional mostra que a carga hidráulica é menor na primavera e fim de inverno, quando ocorre, principalmente, a evaporação e é maior nos meses de janeiro - abril (1986 - época das chuvas) correspondendo a recarga do aquífero. Este fenômeno se repete no ano seguinte com prolongamento do período da recarga do aquífero.

A composição química da zona não saturada tem importância somente local, sendo que as maiores concentrações de produtos solúveis na região próxima da superfície são regidas pela posição da linha de evaporação (0,5-1,5m). Na parte superior, os fatores que influem na evolução da composição química são predominantemente climáticos enquanto que em profundidade são os litológicos.

Finalmente, em se tratando de clima sub-tropical, não se constatou grandes variações na composição química com as estações.

## AGRADECIMENTOS

Nossos melhores agradecimentos a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela ajuda financeira. Também nossos agradecimentos aos químicos Sandra ANDRADE, Ricardo S. CARDEMETE e José Carlos CAMARGO.

## BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, M.F. - 1986 - Propriedades da matéria particulada do aerossol atmosférico de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física, USP, São Paulo.

SZIKSZAY, M.; CONSONI, A.J.; GUIGUER, N.; HASSUDA, S.; KIMMELMANN, A.A.; PARISOT, E.; SGAMBATO, R. e YOSHINAGA, S. - 1986 - Instalação de uma Estação Experimental para estudos da dinâmica e da evolução da composição química da água na zona não saturada - Revista Águas Subterrâneas - nº 10, p.5-20.

SZIKSZAY, M.; CONSONI, A.J.; YOKOTA, H.K.; ARAUJO, J.R.; DUARTE, U. e KANEHISA, M.S. - 1987 - Estudo preliminar da hidrodinâmica na zona não saturada da Estação Experimental (Cidade Universitária, São Paulo) - Revista Águas Subterrâneas, nº 11, p.33-62.