

Mecanismos de Controle da Recarga em Aquíferos Sedimentares Livres Estudo na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, São Paulo (Brasil)

Marcos Mondin, Ricardo Hirata, Alexandra V. Suhogusoff e Luiz C. K. M. Ferrari

Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental – IG/USP

mondin@nickol-brasil.com.br, rhirata@usp.br, alexandra_vs@hotmail.com e lcFerrari@uol.com.br

Recebido: 20/04/04 revisado: 07/06/05 aceito: 12/07/06

RESUMO

A quantificação da recarga de um aquífero é um elemento chave para definir a sua exploração sustentável e para melhor compreender o modelo conceitual de circulação das águas subterrâneas. Tem-se verificado que a rápida recarga em aquíferos livres e rasos (nível d'água < 3 m) causa mudanças importantes no fluxo advectivo e nos movimentos de dispersão de plumas contaminantes. Uma porção de um aquífero livre e raso, na Bacia Sedimentar de São Paulo, localizada no Parque Ecológico do Tietê, Município de São Paulo, foi selecionada para este estudo. Nessa área, de aproximadamente 2500 m², foram instalados 67 poços com 3 m de profundidade para observar a influência da infiltração sobre as cargas hidráulicas. A quantificação da infiltração eficaz, responsável pela recarga, foi também realizada através de seis infiltrômetros. Notou-se que durante a estação chuvosa (dezembro a março) as precipitações de um dia antes das medidas de níveis d'água são as que mais influem na carga hidráulica, apesar de grupos específicos de poços apresentarem relações distintas com a precipitação e carga hidráulica por influência das árvores (interceptação e evapo-transpiração). A recarga potencial é de 46% das precipitações que ocorrem na área e 60% desta recarga potencial se constitui na recarga real ou efetiva.

Palavras-chave: Controle da recarga, aquíferos sedimentares.

INTRODUÇÃO

O intenso bombeamento de mais de 9 mil poços tubulares na Bacia do Alto Tietê (SP), que totalizam mais de 8 m³/s de água extraída dos aquíferos que a compõe (Hirata *et al.*, 2002), tem provocado a redução de sua capacidade produtiva, com sérios impactos sociais e econômicos. A quantificação da recarga de um aquífero é o parâmetro fundamental para determinar a sua exploração sustentável, assim como conceber meios de prevenção e remediação de impactos causados por contaminantes.

A avaliação dos mecanismos controladores de recarga em aquíferos livres e rasos (<3 m de zona não saturada), muito comum em planícies aluvionares, é particularmente importante quando se constata que várias cidades brasileiras foram construídas sobre esses reservatórios subterrâneos. A rápida dinâmica de infiltração nestes aquíferos provoca uma recarga que, quando analisada em detalhe, é complexa e de baixa previsibilidade temporal e espacial. A recarga nestes tipos de terreno altera também o movimento advectivo de plumas contaminantes devido ao novo padrão que se estabelece nos tubos de fluxo (Varnier e Hirata, 2002), dificultando

a interpretação de programas de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas.

Uma porção de um aquífero livre e raso, na Bacia Sedimentar de São Paulo, localizada no Parque Ecológico do Tietê (PET), Município de São Paulo, foi selecionada para o estudo da contaminação gerada por uma fossa séptica existente na área. Varnier & Hirata (2002) constataram:

- Grandes alterações temporal e espacial nas cargas hidráulicas dos poços de monitoramento. Além das variações sazonais nos níveis da superfície freática, já esperadas devido à alternância de períodos de estiagem (abril a outubro) e de chuvas (dezembro a março), observaram-se variações em intervalos de tempo de aproximadamente uma semana. Dentro desta variabilidade temporal das cargas, nota-se também um padrão complexo da distribuição espacial das mesmas.
- Comportamento errático dos poluentes em função do tempo. Alguns poços apresentaram grande diminuição e posteriormente novo aumento nas concentrações de nitrato e de cloreto num curto período de tempo

(um mês). Uma explicação para o fato seria a possibilidade de recargas intensas nos meses de chuva modificarem o traçado dos tubos de fluxo de água subterrânea.

Esse comportamento extremamente dinâmico da distribuição das cargas hidráulicas observadas evidencia que qualquer programa de monitoramento nesse tipo de aquífero deve ser precedido por uma formulação bastante detalhada de seu modelo conceitual de circulação de água subterrânea. Particularmente, o modo como ocorre a recarga na área deve ser bem avaliado. Este processo é complexo e qualquer método utilizado não irá satisfazer os requisitos exigidos para sua precisa qualificação (Lerner *et al.*, 1990). Existem diversos métodos para quantificar a recarga, no entanto, para a escolha do método mais adequado existem alguns fatores que devem ser considerados, tais como: escalas espacial e temporal, área estudada (clima, geologia, geomorfologia, atividades antrópicas), precisão exigida no contexto do projeto, além da facilidade de aplicação, custo envolvido e disponibilidade de dados. As incertezas associadas a cada método corroboram para a necessidade de aplicação de mais de um método distinto para aumentar a confiabilidade das estimativas obtidas (Scalon *et al.*, 2002; Lerner *et al.* 1990 e Lerner, 2002).

No Brasil, há poucos estudos que abordam essa temática, sobretudo na Bacia do Alto Tietê (BAT). Iritani (1993), por meio do método de aproximações darcynianas, estimou valores de recarga em torno de 250 mm/ano para o *campus* universitário da USP. Ainda para o município de São Paulo, Menegasse-Velázquez (1996) calculou, através do método de variação de nível d'água, uma recarga de 60 mm/ano em uma área residencial de classe média, com situação geológica semelhante à da USP, e Hirata *et al.* (2002) observaram uma recarga natural de 355 mm/ano através da análise de hidrogramas. Quando se trata ainda de uma análise comparativa de métodos de estimativa, mesmo os trabalhos em literatura estrangeira são escassos. A maior parte deles refere-se à quantificação de recarga direta através da precipitação por meio de técnicas como do balanço hídrico em que são realizadas aproximações numéricas dos parâmetros para sua estimativa. Tóth (1963, *in* Scanlon *et al.*, 2002), De Vries & Simmers (2002), Kafri & Ben Asher (1978) estudaram como a topografia poderia influenciar na recarga, enquanto que George *et al.* (1999) e Gee *et al.* (1994) mostraram a importância da cobertura vegetal. O presente trabalho, mais do que definir valores de recarga, procurou mostrar a relevância de de-

terminados fatores físicos envolvidos em sua estimativa, utilizando para tal correlações estatísticas entre os mesmos. Objetivou-se estabelecer como as variabilidades da recarga e da condutividade hidráulica relacionam-se ao fluxo de água subterrânea no PET, concebendo assim um modelo conceitual incorporando essas variações.

ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado nas dependências do Centro de Lazer Engenheiro Goulart – Parque Ecológico do Tietê que se situa na zona leste do Município de São Paulo. A área é de aproximadamente 2500 m², onde se encontram instalados 67 poços de monitoramento com cerca de 3 m de profundidade (Figura 1). Os poços, constituídos de tubos de PVC de 1,5" de diâmetro, foram instalados a partir da perfuração com trado manual com 4" de abertura, a uma profundidade média de 3 m e intervalo de filtro de 0,5 m. O espaço anular entre o tubo e o furo foi preenchido com pré-filtro tipo pérola na seção filtrante e depois com um bentonita e com o material do próprio furo, sendo o último 0,5 m completado com calda de cimento.

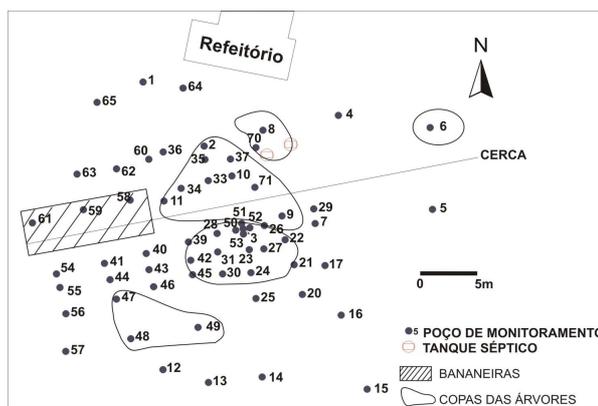


Figura 1 - Localização dos poços e da vegetação na área de estudo.

A área é constituída de sedimentos quaternários aluvionares associados ao rio Tietê, com uma espessura de 20 m indicados por sondagens SPT, constituindo um aquífero do tipo livre e raso (Figura 2). Esses sedimentos são compostos por lentes de argila e silte intercalados com camadas de areia fina a média não consolidada. Estas camadas de areia aparecem em média a partir dos 2 m, constituindo assim um aquífero livre e raso de porosidade primária, heterogêneo com condutividade hidráulica variando de 1×10^{-7} até 7×10^{-5} m/s (Varnier, 2001 e Var-

nier & Hirata, 2002). Esse aquífero apresenta baixo gradiente hidráulico, muito comum a zonas de planícies.

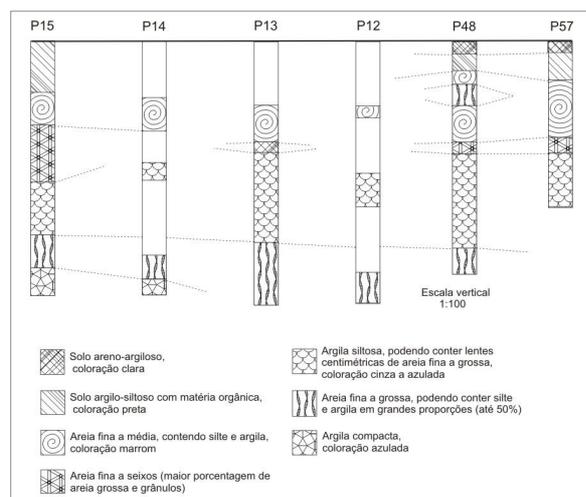


Figura 2 - Perfil geológico representativo da área.

A área de estudo dista cerca de 1000 m do Rio Tietê e 100 m de um lago no próprio Parque Ecológico. Estudos realizados por Ross (1991) mostraram que esse aquífero livre não sofre nenhuma ou muito pouca influência do rio nas estações seca e úmida, respectivamente. O sentido do fluxo de água subterrânea ocorre da área de estudo para o rio e o lago. Da mesma forma, a presença das fossas não implicou em variações observáveis nas cargas hidráulicas (recarga) dos poços de monitoramento instalados na área, pelo menos naqueles avaliados neste estudo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Coleta de dados

Realizaram-se 30 campanhas, no período de 1998 a 2001, obtendo-se um total de 817 medidas de nível d'água que foram tomadas através de um medidor elétrico. Os dados meteorológicos utilizados foram obtidos junto ao Instituto Astronômico e Geofísico da USP (IAG) na estação meteorológica 3, localizada na Água Funda, próxima à área de estudo. Foram identificadas 18 árvores com porte para interferir nas precipitações e nas cargas hidráulicas, através da interceptação das chuvas e da absorção da água infiltrada pelas raízes. Além de bananeiras, estão presentes espécies da Mata Atlântica em estado

avanzado de crescimento (altura até 3,5 m). Para cada uma dessas árvores, foi medido o diâmetro aproximado da copa e atribuído um valor numérico de acordo com o tamanho da árvore e de sua copa. Mediram-se, para cada poço, o número de árvores num raio de 3,5 m que porventura exerceriam influência e a distância desse poço até a árvore de porte mais próxima (Figura 1).

Tratamento dos dados

O tratamento dos dados teve por objetivo estudar as correlações entre as condutividades hidráulicas do aquífero e as cargas hidráulicas medidas em cada poço. Foi testada também a existência de relações entre as cargas hidráulicas e as precipitações ocorridas na área, em dias próximos ao da medição dessas cargas. Além dessas variáveis, foi calculado um fator de contraste de cota topográfica, a fim de entender como variações bem localizadas desse fator poderiam interferir nas cargas hidráulicas medidas.

Determinação do fator de contraste

Inicialmente, para cada um dos poços de monitoramento da área, procurou-se determinar os poços com vizinhos mais próximos de acordo com a metodologia abaixo:

- Foram selecionados três raios de influência, com 2,5 m; 3,0 m e 3,5 m; divididos em três setores de 120°;
- Para cada um dos raios e para cada poço, determinou-se o número de poços vizinhos, considerando para o cálculo dos fatores de contraste apenas os poços com ao menos um vizinho em cada setor.

Para cada poço com vizinhos suficientes, segundo o critério acima, foi calculado o fator de contraste topográfico, F_C , segundo a equação:

$$F_C = \frac{C - C^*}{C^*} \quad (1)$$

na qual,

$$C^* = \frac{\sum_{i=1}^{nv} C_i}{nv} \quad (2)$$

onde, C^* é a cota média dos poços vizinhos, sendo C_i o valor da cota de cada poço vizinho e nv , o número de vizinhos em questão.

Dessa forma, o valor de F_C de cada poço fornece uma medida do contraste entre sua cota e a cota média de seus vizinhos, para cada raio de influência. Portanto, o fator de contraste dos poços mostra o quanto o poço se assemelha ou difere dos seus vizinhos nesse parâmetro analisado. Através de F_C , é possível observar se estas diferenças ou semelhanças influenciam nas cargas hidráulicas.

Análise estatística

A partir dos dados coletados em campo, estabeleceram-se correlações estatísticas entre cota, carga hidráulica, condutividade hidráulica e o fator de contraste, observando-se a influência da vegetação. A carga hidráulica média foi calculada para cada uma das campanhas de campo. Os dados obtidos foram correlacionados com as precipitações ocorridas até cinco dias antes das campanhas.

Infiltrômetros

O equipamento empregado para a quantificação de infiltração eficaz foi o infiltrômetro, que consiste em um tubo de PVC de diâmetro interno de 102 mm e 4 mm de espessura, com comprimento de 300 mm, dentro do qual fica inserida amostra de solo indeformada do PET. Os infiltrômetros foram confeccionados e desenvolvidos propriamente para esse estudo. As amostras são obtidas pela cravação direta desses equipamentos no solo, coletando-se assim o material sem deformá-lo consideravelmente. Em sua extremidade inferior, situa-se uma tampa afunilada (*cap*) receptora da água que atravessa o perfil de solo e o frasco amostrador, conectado ao PVC por uma mangueira de borracha, em direção ao qual se destina a água infiltrada. A amostra é ainda sustentada por três hastes metálicas (Figura 3).

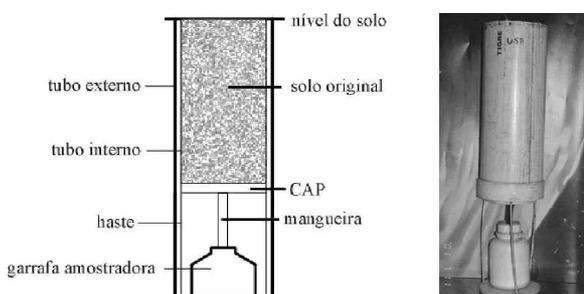


Figura 3 - Infiltrômetro.

O infiltrômetro é posicionado dentro de um PVC maior que se encontra cravado no solo, com diâmetro interno de 120 mm e comprimento em

torno de 500 mm. A finalidade desse procedimento consiste em resguardar o instrumento de forma a se poder retirá-lo para se fazer as medições desejadas. O PVC maior, ou externo, é colocado na cavidade ao nível da região gramada e o infiltrômetro é suspenso uns poucos milímetros por brita a fim de que se coloque em torno dos dois tubos um anel de plástico para evitar a entrada de água na fresta criada. Foi utilizado um conjunto de seis infiltrômetros contendo sedimentos da área de estudo.

As medições, realizadas diariamente durante quatro meses, correspondiam à quantificação de água drenada ao longo dos 30 cm de solo e à pesagem dos infiltrômetros, sem os frascos, para o acompanhamento da variação de armazenamento de água nos poros das amostras. Correlacionaram-se, mediante combinações estatísticas, os dados obtidos de infiltração eficaz e variação de massa com dados meteorológicos de precipitação com o objetivo de construir um modelo de estimativa de recarga.

RESULTADOS

Infiltrômetros

Correlação entre infiltração de cada infiltrômetro e precipitação

Correlacionaram-se a infiltração de cada infiltrômetro em cada dia de medida e as precipitações ocorridas no mesmo dia (PR0), no dia anterior (PR1) e assim sucessivamente até cinco dias antes da medição (PR2, PR3, PR4, PR5) e também as precipitações integradas (PR0123, por exemplo), correspondendo à influência da soma de determinadas precipitações frente às infiltrações.

Ao longo do período de todo o experimento, apenas as precipitações PR0, PR1 e PR2 exerciam influência sobre as infiltrações medidas, em todos os infiltrômetros, sem distinção. As precipitações PR3, PR4 e PR5, aparentemente, não interferiam na infiltração. Todavia, quando se integra a precipitação de vários dias, percebe-se que a soma das precipitações de até cinco dias antes da medição (PR12, PR123, PR1234 e PR12345) são correlacionadas às infiltrações. Em termos reais, isso significa que a chuva delonga-se até três dias para se transformar em infiltração eficaz nos infiltrômetros do Parque Ecológico do Tietê, identificados pela abreviação LP.

Embora essas observações tenham sido efetuadas para todo o período de vigência do estudo é ainda válido o fato de que a precipitação demora cerca de três dias para se infiltrar, o padrão de

infiltração não corresponde ao mesmo nas estações seca e úmida, o que confere a esse mecanismo um aspecto de sazonalidade.

Na estação úmida, os resultados são semelhantes aos da avaliação para todo o ano, devido a uma menor disponibilidade de água no solo na estação seca. Nesta estação, as precipitações PR0 e PR1 deixam de ser importantes e a infiltração parece ser dominada por PR2 e PR5. O fato de PR0 e PR1 perderem a importância na estação seca é um resultado esperado porque como chove menos nessa época, as precipitações que ocorrem próximas ao dia da medição podem não se tornar infiltração uma vez que mais dificilmente se alcança a capacidade de campo. As precipitações mais representativas de cada estação foram PR012, para a úmida, e PR2345, para a seca.

Relacionando-se a infiltração de cada infiltrômetro com as precipitações características de cada estação (Figuras 4 e 5) foi possível observar que há pelo menos dois infiltrômetros para cada estação que destoam do conjunto, o que não impede de vincular o comportamento de todos os LP basicamente em dois padrões, um para cada uma das estações.

Calculou-se a infiltração média dos infiltrômetros do Parque (IMLP) para cada dia de medição, testando-se a correlação entre estas médias e as precipitações PR012 (para a estação chuvosa) e PR2345 (para a estação seca). Certificada a correlação entre esses parâmetros, ajustaram-se curvas dos dados PR012 *versus* IMLP e PR2345 *versus* IMLP. Baseando-se nesses ajustes, concluiu-se que existem duas leis empíricas que relacionam precipitações e infiltrações médias, de acordo com as equações abaixo:

Estação seca

$$IMLP(mm) = 11112,9 \cdot PR2345(mm) - 7599,3 \quad (3)$$

Estação chuvosa

$$IMLP(mm) = 39058,7 \cdot PR012(mm) - 169635,8 \quad (4)$$

Correlação entre retenção e precipitação

Baseando-se na diferença de massas máxima e mínima de cada infiltrômetro, o que confere a variação de armazenamento, foi possível averiguar que há um padrão para cada estação, quando se correlacionam retenção e precipitação, diferindo daquele observado para a infiltração nos seguintes aspectos: na estação chuvosa, apenas as precipitações de um dia anterior e do mesmo dia influem na retenção, e, na estação seca, somente a precipitação

de 2 dias antes representam papel importante. As precipitações características podem ser consideradas as mesmas que para o caso de infiltração, sendo que correlações entre essas precipitações, para cada estação, e variações de massa dos infiltrômetros, corroboram a existência de dois padrões. Dessa forma, espera-se que a evapotranspiração e o escoamento superficial comportem-se semelhantemente ao que foi visto nas respostas quanto à infiltração e à retenção.

Relação entre os mecanismos controladores da recarga

Na área de estudo no PET, parece haver uma clara relação entre a precipitação, a topografia e a condutividade hidráulica do aquífero com a carga hidráulica medida nos poços de monitoramento. Observou-se também a influência das árvores nestas relações. Foram calculados os coeficientes de correlação para diversas combinações desses parâmetros e considerados como significantes aqueles em que se poderia rejeitar a hipótese de correlação nula entre os parâmetros com 5% de probabilidade de erro (Green e Margerison, 1978).

Precipitação versus carga hidráulica

Durante a estação seca parece não haver relação entre precipitação de até 5 dias antes (<PR5) das medidas de carga hidráulica dos poços de monitoramento e os valores médios de carga hidráulica (Tabela 1).

Tabela 1 - Correlação entre a carga média e as precipitações de até cinco dias antes da medida (PR0 até PR5, onde 0 é a precipitação do dia da medida de carga hidráulica) para a estação seca (Número de dados = 650).

	PR0	PR1	PR2	PR3	PR4	PR5
Correlação com Carga Média	0,16	0,10	-0,15	-0,22	-0,16	0,15

No entanto, a carga hidráulica média varia mês a mês na estação seca (Figura 6) e isso mostra que algumas precipitações ocorridas nesta estação devem gerar recargas. Isso não é observado na Tabela 1, uma vez que a maioria das precipitações durante a estação seca pode simplesmente não gerar recargas significativas, provavelmente porque a capacidade de campo não é alcançada, frente às chuvas.

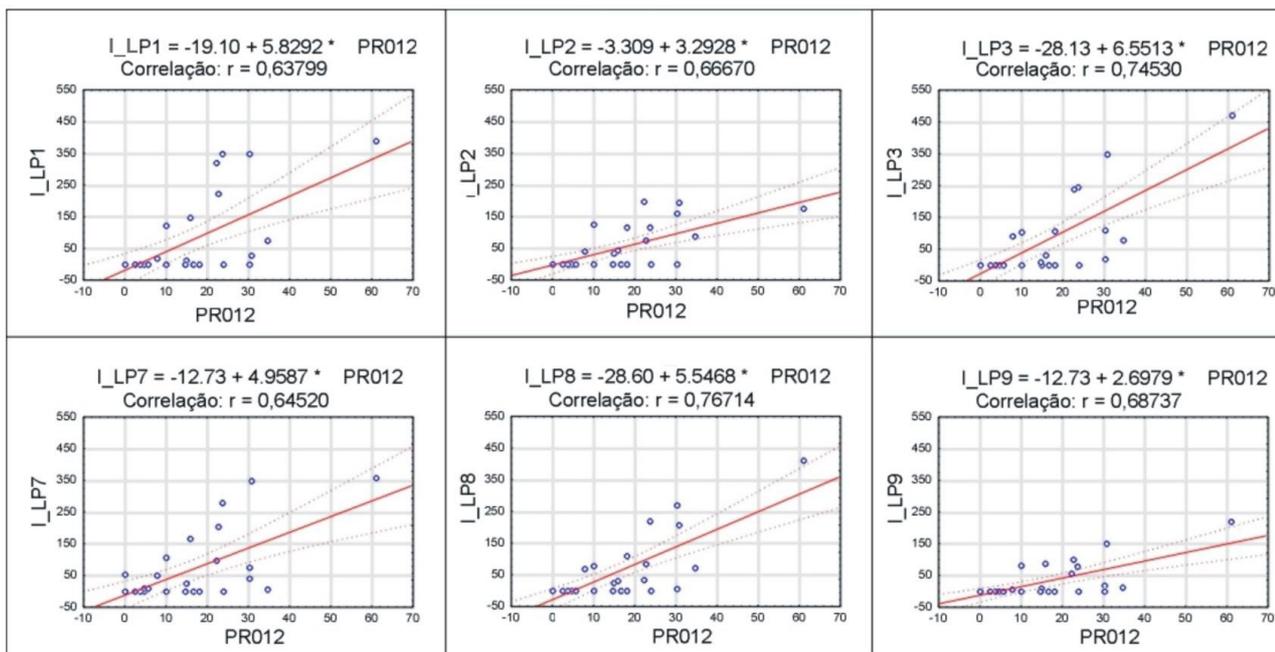


Figura 4 - Infiltração versus PR012 para cada infiltrômetro na estação chuvosa (infiltração em mL, P012 em mm). Intervalo de confiança com 95% de significância.

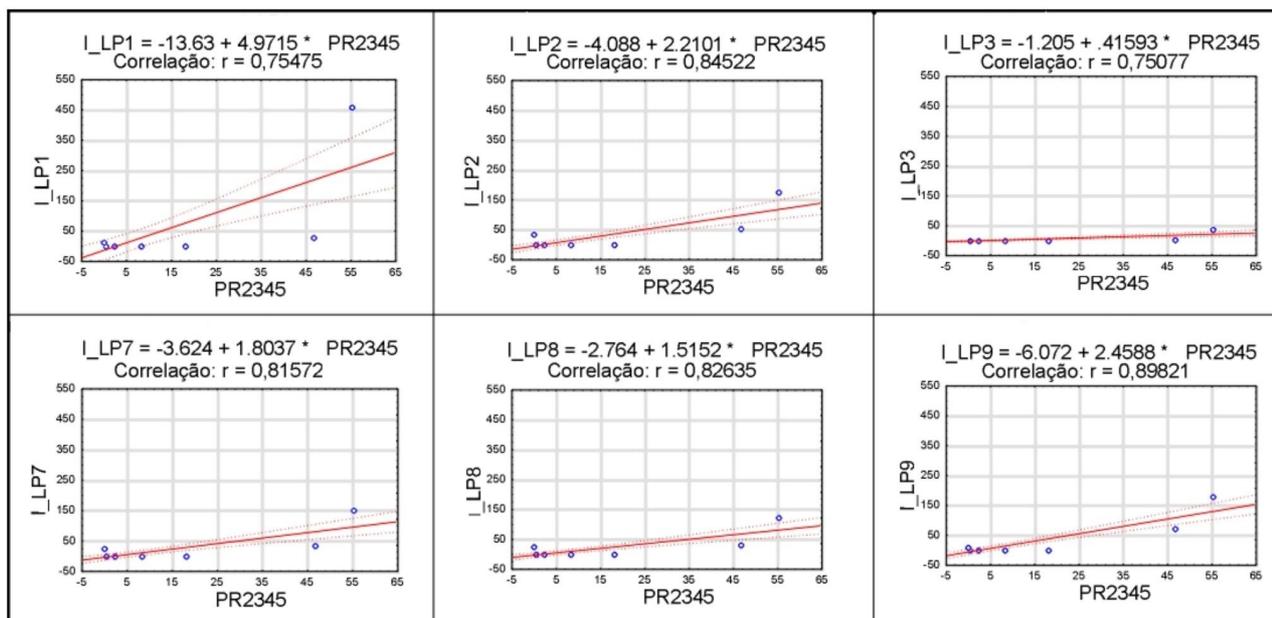


Figura 5 - Infiltração versus PR2345 para cada infiltrômetro na estação seca (infiltração em mL, P2345 em mm). Intervalo de confiança com 95% de significância.

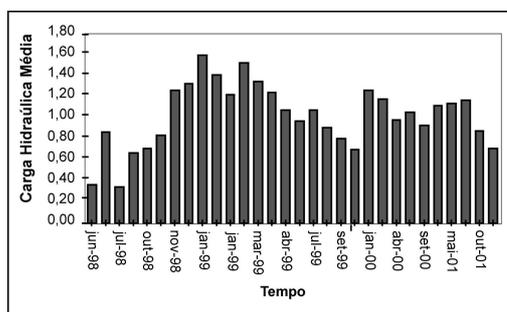


Figura 6 - Variação da carga hidráulica média (m) ao longo das campanhas realizadas nos meses em destaque.

As precipitações que ocorrem no dia anterior à medição de cargas hidráulicas influenciam o valor médio das cargas na estação chuvosa, como pode ser observado nas correlações entre precipitação e carga hidráulica (Tabela 2). Não foram encontradas relações significativas entre as cargas médias e as precipitações nos demais dias. Mas mesmo nesse caso, o gráfico de carga média *versus* precipitação do dia anterior (Figura 7) é bastante disperso, sugerindo que outros mecanismos atuam sobre as cargas além da precipitação, ou seja, a precipitação de um dia antes da medida influi sobre a carga média, mas não a governa.

As relações observadas na Tabela 2 correspondem a um padrão médio criado pela superposição de diversos padrões distintos e individuais dos poços. À medida que o efeito das precipitações sobre as cargas hidráulicas de cada poço é estudado separadamente, levando-se em consideração a presença das árvores, verifica-se a complexidade do fenômeno de recarga na área de estudo. É razoável pensar que em uma área heterogênea de ocupação (árvores e gramado) e de características hidráulicas do aquífero e do solo, cada poço possua uma relação distinta com a precipitação.

Tabela 2 - Correlação entre a carga média e as precipitações de até cinco dias antes da medida para a estação chuvosa (PR0 até PR5, onde 0 é a precipitação do dia da medida de carga hidráulica). Apenas o coeficiente em **negrito** representa uma correlação com significância estatística de 5% (Número de dados =137).

	PR0	PR1	PR2	PR3	PR4	PR5
Correlação com Carga Média	0,24	0,66	0,25	-0,14	0,09	-0,03

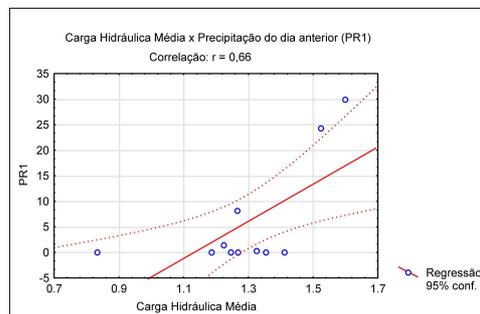


Figura 7 - Correlação entre a carga média, em metros, e a precipitação de um dia antes da medida, em milímetros.

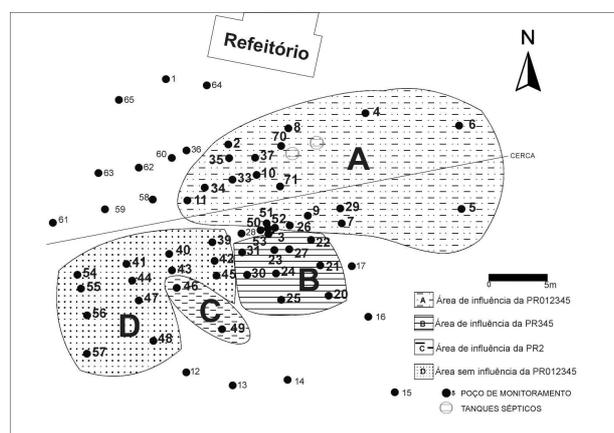


Figura 8 - Áreas onde os poços apresentam características semelhantes frente às precipitações.

Considerando-se a localização dos poços, a cobertura vegetal e as características do solo, surgem grupos de poços com comportamentos semelhantes frente às precipitações, como ilustra a Fig. 8. As árvores são analisadas quanto a sua capacidade de interceptação/evapotranspiração e as características do solo, quanto à facilidade de infiltração (a área “D” possui solo argiloso e as demais, solo siltoso). Na área “A”, onde existem 0,02 árvores/m², os poços refletem influência das precipitações que ocorrem no dia e até cinco dias antes da medição de nível (PR012345). Os poços localizados na área “B” refletem o efeito das precipitações ocorridas de três a cinco dias antes da medição (PR345), o que se deve à maior concentração de árvores (0,08 árvores/m²) nesta área cujas copas são bem fechadas apresentando uma grande capacidade de interceptação. Na área “C”, onde há 0,1 árvores/m², a influência da precipitação nas cargas hidráulicas ocorre depois de dois dias (PR2). Os poços da área “D” não exibem influência de precipitações ocorridas em cinco dias antes das medidas. No caso dessa área, essa não-

influência das precipitações foi relacionada ao solo que é mais argiloso, já que esta área não possui árvores. Este solo argiloso retarda o processo de infiltração, formando uma área alagada após a chuva. Para os demais poços, não foi observada nenhuma relação clara com o solo nem com as árvores ao redor.

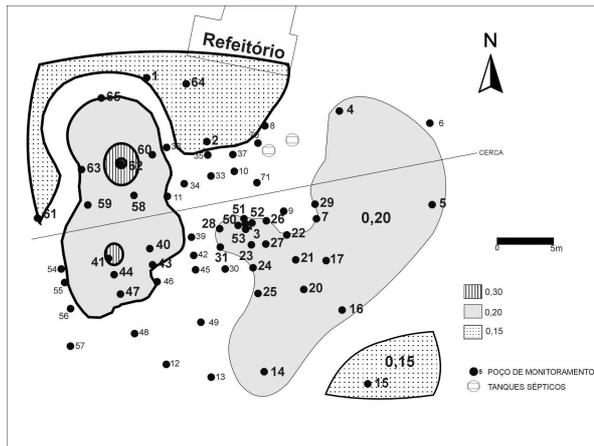


Figura 9 - Campos de desvios-padrão dos níveis d'água.

Uma outra relação surge com as árvores quando se analisa o desvio padrão dos níveis d'água ao longo das campanhas. A Fig. 9, na qual foram desenhadas as isolinhas de desvios padrão, mostra uma área homogênea com desvios-padrão próximos a 0,20, com exceção próxima ao poço 62. Uma hipótese para esses desvios maiores (poço 62) poderia ser a influência de duas grandes árvores e cerca de 40 bananeiras que na época de estiagem poderiam estar consumindo a água do aquífero refletindo na variação do nível d'água neste poço.

Topografia versus carga hidráulica

A topografia é dada pelos desníveis dos poços de monitoramento em relação ao poço 8, apresentando uma variação máxima de 1,085 m dada pela diferença entre as cotas dos poços 5 (1,42 m) e 58 (0,335 m) (Figura 10).

Tabela 3 - Correlação entre a cota topográfica dos poços e a carga hidráulica (CH), ambas medidas em metros. Os valores apresentam correlações com significância estatística de 5% (Número de dados = 483). Para Out/01, houve duas campanhas.

	abr/00	jul/00	set/00	abr/01	mai/01
Correlação Cota e CH	0,62	0,63	0,68	0,62	0,54
	ago/01	out/01	out/01		
Correlação Cota e CH	0,48	0,56	0,58		

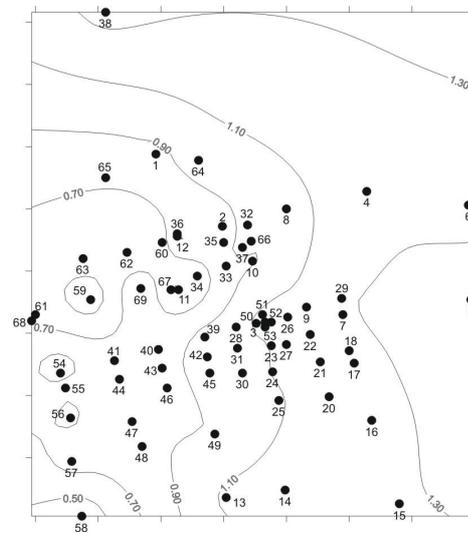


Figura 10 - Mapa topográfico para os poços da área de estudo (isolinhas em metros). Cotas normalizadas em relação ao poço 8 (1 m).

Os dados apresentados na Tabela 3 mostram que existe correlação entre a topografia e as cargas medidas. Essa correlação ocorre de modo que os poços de cota topográfica maior apresentam carga maior.

A Tabela 4 indica não haver relação entre os contrastes de topografia e as cargas hidráulicas, o que desmente a hipótese de vales e picos topográficos locais influenciarem significativamente a recarga, já que nenhum dos coeficientes de correlação calculados tem significância de 5%.

A topografia não controla a recarga através das depressões e elevações sub-centimétricas locais, isto é, não são as diferenças de escoamento superficial causadas por essas depressões, que poderiam induzir a maiores recargas pelo empoçamento de água no solo, ou elevações locais que poderiam atuar nas cargas hidráulicas.

Tabela 4 - Correlação entre o fator de contraste (FC) para os raios 2,5; 3,0 e 3,5 m, e a carga hidráulica (CH). Para Out/01, houve duas campanhas. (Número de dados = 483).

Correlação:	abr/00	jul/00	set/00	abr/01	mai/01
CH e FC (2,5)	0,07	0,09	0,13	-0,11	-0,01
CH e FC (3,0)	-0,16	-0,08	-0,21	-0,22	-0,03
CH e FC (3,5)	0,16	0,16	0,10	0,15	-0,12
	ago/01	out/01	out/01		
CH e FC (2,5)	0,10	0,19	0,13		
CH e FC (3,0)	-0,28	-0,21	-0,23		
CH e FC (3,5)	0,04	0,09	0,05		

Condutividade hidráulica versus carga hidráulica

Quando se analisam as relações entre condutividade hidráulica e carga hidráulica, a princípio não surgem relações significativas (Tabela 5), inclusive na estação seca, quando a recarga é menos atuante.

Tabela 5 - Correlação entre a condutividade hidráulica (K) e a carga hidráulica (CH). Para Out/01, houve duas campanhas. (Número de dados = 483).

	abr/00	jul/00	set/00	abr/01	mai/01
Correlação K e CH	-0,26	-0,17	-0,28	-0,41	-0,28
	ago/01	out/01	out/01		
Correlação K e CH	-0,11	-0,12	-0,12		

Foi observada, então, a relação entre a condutividade e carga hidráulicas retirando-se os poços que estavam a 1,5 m (Tabela 6) e depois a 2,0 m (Tabela 7) de uma árvore de porte significativo.

Tabela 6 - Correlação entre a condutividade hidráulica (K) e a carga hidráulica (CH) retirando-se as árvores a 1,5 m de distância. Para Out/01, houve duas campanhas. Os coeficientes em negrito representam correlações com significância estatística de 5%. (Número de dados = 270).

	abr/00	jul/00	set/00	abr/01	mai/01
Correlação K e CH	-0,34	-0,24	-0,42	-0,46	-0,37
	ago/01	out/01	out/01		
Correlação K e CH	-0,19	-0,2	-0,19		

Tabela 7 - Correlação entre a condutividade hidráulica (K) e a carga hidráulica (CH) retirando-se as árvores a 2,0 m de distância. Para Out/01, houve duas campanhas. Os coeficientes em negrito representam correlações com significância estatística de 5%. (Número de dados = 270).

	Carga Hidráulica				
	abr/00	jul/00	set/00	abr/01	mai/01
Correlação K e CH	-0,33	-0,24	-0,42	-0,46	-0,42
	ago/01	out/01	out/01		
Correlação K e CH	-0,22	-0,24	0,23		

Essas tabelas mostram que os efeitos da proximidade de árvores (até 2m) é um dos fatores que mascara as possíveis correlações entre condutividade hidráulica e carga hidráulica, indicando a influência da evapotranspiração dessas árvores.

Recarga

Para o método do balanço hídrico, foi calculada a evapotranspiração potencial através da fórmula de Penman – Monteith (Jensen *et al.*, 1989). A partir da relação entre precipitação e a evapotrans-

piração real, obtida pela relação proposta por Thornthwaite (1948 *in* CPRM, 1997), determinaram-se os valores da recarga potencial (Tabela 8). Nesse cálculo, o escoamento superficial foi desconsiderado devido à área apresentar um baixo gradiente topográfico (0,04%), não mostrando em campo evidências de escoamento significativo, mesmo em dias muito chuvosos.

A recarga, por este método ocorre nos períodos de janeiro, fevereiro e março. No ano de 2000, esta recarga representou, em média, 58% das precipitações ocorridas. Observou-se também que nos meses de janeiro e fevereiro, onde as precipitações foram acima de 300 mm, cerca de 70% das precipitações se converteram em recarga. Já no ano de 2001, a recarga potencial é em média 46% das precipitações.

Tabela 8 - Cálculos da recarga pelo método do balanço hídrico para o ano de 2000 e 2001 (os períodos de outubro a dezembro não foram calculados por falta de dados). EP: Evapotranspiração Potencial, P: Precipitação, AS: Variação do Armazenamento, ER: Evapotranspiração Real.

Parâmetro (mm)	Meses (2000)								
	janeiro	fevereiro	março	abril	maio	junho	julho	agosto	setembro
EP	96,06	97,12	112,67	136,49	118,25	105,48	91,44	47,76	14,75
P	363,5	317,4	163,2	6,4	10,4	20	58,3	70,4	105,7
P-EP	267,44	220,28	50,53	-130,09	-107,85	-85,48	-33,14	22,64	90,95
ΣNeg. (P-EP)	-	-	-	-130,09	-237,94	-323,42	-356,56	-	-
AS	300	300	300	43	18	9	7	29,64	120,59
AAS	0	0	0	-257	-25	-9	-2	22,64	90,95
ER	96,06	97,12	112,67	263,4	35,4	29	60,3	47,76	14,75
Recarga	267,44	220,28	50,53	-	-	-	-	-	-
Recarga (%)	73,5	69,3	31	-	-	-	-	-	-

Parâmetro (mm)	Meses (2001)								
	janeiro	fevereiro	março	abril	maio	junho	julho	agosto	setembro
EP	62,68	89,31	116,44	168,88	164,37	86,85	69,08	71,12	60,04
P	138,6	155,2	198,3	35,6	90,6	26,4	60,9	22,7	55,1
P-EP	75,92	65,89	81,86	-133,28	-73,77	-60,45	-8,18	-48,42	-4,94
ΣNeg. (P-EP)	-	-	-	-133,28	-207,05	-267,5	-275,68	-324,1	-329,04
AS	300	300	300	42	23	14	13	9	9
AAS	0	0	0	-258	-19	-9	-1	-4	0
ER	62,68	89,31	116,44	293,6	109,6	35,4	61,9	28,7	55,1
Recarga	75,92	65,89	81,86	-	-	-	-	-	-
Recarga (%)	54,8	42,5	41,3	-	-	-	-	-	-

O método da variação do nível potenciométrico apresentou valores de recarga compatíveis às precipitações ocorridas (Tabela 9). Nesses cálculos, foi desprezada a vazão subterrânea por ser pouco significativa e a porosidade total adotada foi de 0,25.

Tabela 9 - Cálculo da recarga pela variação do nível potenciométrico.

Ano	Período	Δh (m)	Recarga (mm)	Precipitação (mm)	Recarga (%)
1998	out-nov	0,025	25,0	63,7	39,2
1998-1999	nov-jan	0,330	82,5	381,5	21,6
2000	abr-ago	0,070	17,5	89,2	19,6

Por este método, os valores de recarga calculados representam, em média, 27% das precipitações ocorridas. Este valor é significativo em vista da

pequena espessura da zona não saturada, de cerca de 1,5 m, e que o processo de recarga é rápido, como foi observado pelos infiltrômetros e pelas correlações entre a carga hidráulica e as precipitações.

Comparativamente, o método da variação do nível potenciométrico apresentou valores mais compatíveis do que o método do balanço hídrico, no qual parece que houve uma superestimação dos valores de recarga. Isso era esperado, pois o método de balanço hídrico estima apenas o excedente hídrico que possa se converter em recarga. Este método também mostra que não houve recarga no período de abril a agosto de 2000, o que é desmentido pelo método da variação do nível potenciométrico, por meio do qual se observou que parte destas precipitações (20%) se converte em recarga.

No entanto, mesmo no método da variação do nível potenciométrico, os valores de recarga obtidos podem ter baixa precisão visto que a variação dos níveis potenciométricos ocorre em períodos curtos, necessitando-se de medições de níveis d'água semanais ou até mesmo diárias para um melhor resultado.

CONCLUSÕES

No aquífero livre e raso do Parque Ecológico do Tietê, os resultados dos infiltrômetros e das medições de carga hidráulica correlacionadas com as precipitações comprovaram a rápida velocidade do processo de recarga. Embora esse processo seja rápido, o regime de infiltração apresenta diferenças durante a estação seca e chuvosa. Estas diferenças estão associadas principalmente às quantidades e intensidades das precipitações, em cada estação, mas também devido a outros mecanismos que controlam a recarga, como a interceptação e evapotranspiração pelas árvores. Estas têm grande influência na área, seja na estação chuvosa, quando criam um padrão heterogêneo de recarga, seja na estação seca quando seu consumo de água é mais sentido nas cargas hidráulicas. Os pontos de intersecção negativos das regressões lineares nas equações obtidas com os experimentos dos infiltrômetros para as duas estações podem indicar uma forma de saída de água através da evapotranspiração, já que o escoamento superficial é pouco expressivo.

Quanto à quantificação da recarga, os métodos utilizados apresentaram baixa precisão. O método do balanço hídrico não é aconselhável para estimativa da recarga em área tão pequena, trabalhando-se com dados mensais. Há evidente recarga no aquífero que não é detectada durante a esta-

gem, bem como eventos diários de chuva, como atesta tanto o método de variação do nível potenciométrico e a experiência com infiltrômetros. Já o método da variação do nível potenciométrico apresentou valores mais compatíveis, mas mesmo neste método, para uma melhor precisão, seria necessário um monitoramento dos níveis d'água com frequência diária a semanal.

No caso do aquífero livre e raso do Parque Ecológico do Tietê, seria necessário, durante a estação chuvosa, um monitoramento dos níveis potenciométricos dos poços com frequência diária (até 5 dias), e na estação seca, um monitoramento semanal após chuvas e até mesmo a intervalos de 15 dias.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a FAPESP (processo 0014446-0), pelo auxílio financeiro para realização do projeto e concessão de bolsa de iniciação científica, e ao PIBIC-CNPq pela concessão de bolsa de iniciação científica. Agradecemos também ao Prof. Ricardo Camargo, do Departamento de Meteorologia do IAG – USP, pelo auxílio prestado quanto ao fornecimento dos dados meteorológicos e aos funcionários do Parque Ecológico do Tietê.

REFERÊNCIAS

- CPRM 1997. *Hidrogeologia conceitos e aplicações*. Coord. Feitosa, F. A. C.; Manoel Filho, J. Fortaleza, 412p.
- DE VRIES, J.J. & SIMMERS, I. 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, vol 10, n. 1, february 2002. Springer-Verlag, Berlin. p. 5-17.
- GEE, G. W.; WIERENGA, P. J.; ANDRASKI, B. J.; YOUNG, M. H.; FAYER, M. J.; ROCKHOLD, M. L. 1994. Variations in water balance and recharge potencial at tree western desert sites. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, p. 63-71.
- GEORGE, R. J., NULSEN, R. A., FERDOWSIAN, R., RAPER, G. P. 1999. Interactions between trees and groundwater in recharge and discharge areas - A survey of Western Australian sites. *Agricultural Water Management* 39, p 91 - 113.
- GREEN JR, & MARGERISON D. 1978. *Statistical treatment of experimental data*. Elsevier Science Publishing Company, New York, 382p.
- HIRATA, R.; FERRARI, L.; FERREIRA, L.; PEDE, M. 2002. La explotación de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica del Alto Tiete (São Paulo, Brasil): cróni-

- ca de una crisis anunciada. Boletín Geológico Minero. 113 (3):273-282.
- IRITANI, M.A. 1993. Potencial Hidrogeológico da Cidade de São Paulo. São Paulo, 108p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- JENSEN M. E., BURMAN R. D., ALLEN R. G. 1989. Evapotranspiration and irrigation water requirements. American Society of Civil Engineers. Committee on Irrigation Water Requirements. IV. Séries, 331p.
- KAFRI, U. & BEN ASHER, J. (1978). Computer estimates of natural recharge through soils in southern Arizona, U.S.A. Journal of Hydrology 38, p 125 - 138.
- LERNER, D. 2002. Identifying and quantifying urban recharge: a review. Hidrol. J. 10 (1), p143-152.
- LERNER, D.; ISSAR, A.; SIMMERS, I. 1990. Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. International Association of Hydrologists. Vol. 8. Heise. Hannover, 345p.
- MENEGASSE-VELÁSQUEZ, L. N. 1996. Efeitos da urbanização sobre o sistema hidrológico: aspectos da recarga no aquífero freático e o escoamento superficial. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. Tese de Doutorado. 124p.
- ROSS, S. D. 1991. Hydrological study of river connected aquifers in greater São Paulo, Brazil. Ontário, Canadá 187p. Dissertação (Mestrado) – University
- SCALON, B. R., HEALY, R. W., COOK, P. G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hidrol. J. 10 (1), p18-39.
- TOTH, J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins, J. of Geophysical Research, 68(16), 4795- 4812.
- VARNIER C. L. 2001. O efeito do nitrogênio proveniente de sistemas de saneamento in situ na qualidade das águas subterrâneas em aquíferos livres e rasos. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. Dissertação de Mestrado. 150p.
- VARNIER, C. & HIRATA, R. (2002) – Contaminação da Água Subterrânea por Nitrato no Parque Ecológico do Tietê - São Paulo, Brasil. Revista Águas Subterrâneas, n. 16, p. 77-82.

Recharge Control Mechanisms In The Study Of Unconfined Sedimentary Aquifers In The River Basin Of The Upper Tietê, São Paulo, Brazil

ABSTRACT

The quantification of groundwater recharge is a key element to determine sustainable exploration and understand the conceptual model of the groundwater circulation. It was observed that rapid recharge in shallow and unconfined aquifers causes important variations in the advective flux and the dispersive movements of a contaminant plume. A portion of the shallow (unsaturated zone <3 m of thickness) and unconfined aquifer (water level \cong 3m), in the São Paulo Sedimentary Basin, located in the municipality of São Paulo. 67 wells, 3 m deep, were installed in the area, covering approximately 2500 m², in order to investigate the influence of infiltration on hydraulic head. The quantification of the infiltration was also analyzed by six infiltrometers. It was concluded that, during the humid season (December to March), precipitations one day before the water level measurements exert the most influence on hydraulic head although in specific wells these parameters behave otherwise due to trees (interception and evapotranspiration) located in the area. The potential recharge corresponds to 46% of the precipitation and about 60% of this potential becomes effective recharge.

Key-words: Recharge control, sedimentary aquifers.

