

MECANISMOS DE CONTROLE DA RECARGA EM AQUÍFEROS SEDIMENTARES LIVRES. ESTUDO DE OCORRÊNCIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ, SÃO PAULO (BRASIL)

Luiz C. K. M. Ferrari, Ricardo C. A. Hirata, Marcos Mondin e Alexandra V. Suhogusoff
Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. Rua do Lago, 562 – Cidade Universitária CEP 05508-900 São Paulo (SP), Brasil. E-mails: lcferrar@uol.com.br, rhirata@usp.br, mrzeka@bol.com.br, alexandra_vs@hotmail.com.
Tel: (5511) 3091-4804/3091-4230. FAX (5511) 3091-4207.

Abstract. The quantification of groundwater recharge is a key element to determine the sustainable exploration and to understand the conceptual model of the groundwater circulation. It was observed that the rapid recharge in shallow and unconfined aquifers causes important variations in the advective flux and on the dispersive movements of a contaminant plume. A portion of the shallow and unconfined aquifer (water level $\leq 3m$), in São Paulo Sedimentary Basin, localized in the Tietê Ecological Park, São Paulo municipality, was selected for this study. 67 wells, 3 m deep, were installed in the area, with approximately $2500 m^2$, in order to investigate the influence of infiltration over hydraulic head. The quantification of the infiltration was also analysed through 6 infiltrometers. It was concluded that, during the humid season, the precipitations of one day before the water level measurements are the ones that most influence the 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 in effective recharge.

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 causa mudanças importantes no fluxo advectivo e nos movimentos de dispersão de plumas contaminantes. Uma porção de um aquífero livre e raso (nível d'água $\leq 3m$), 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 $2500 m^2$, foram instalados 67 poços com 3 m de profundidade para observar a influência da infiltração sobre as cargas hidráulicas. A quantificação da infiltração foi também realizada através de 6 infiltrômetros. Notou-se que durante a estação chuvosa 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 evapotranspiração). A recarga potencial é de cerca de 46% das precipitações que ocorrem na área e 60% desta recarga potencial se constitui na recarga real ou efetiva.

Keywords: recharge; shallow aquifer; unconfined aquifer; lisimeter

INTRODUÇÃO

O intenso bombeamento de mais 9000 poços tubulares, que totalizam mais de $8 m^3/s$ de água extraída dos aquíferos da Bacia do Alto Tietê (SP), 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.

Muito embora a maioria da exploração do recurso hídrico subterrâneo seja efetuada através de poços de maior profundidade ($>100m$), o estudo do fluxo de água subterrânea e do transporte de poluentes em aquíferos livres e rasos é especialmente importante quando se tem em vista a sua grande vulnerabilidade a poluentes, devido a pequena espessura de sua zona não saturada e a localização de suas ocorrências, geralmente em planícies aluvionares densamente povoadas. É possível avaliar a dimensão do problema de contaminação de aquíferos livres e rasos no País quando se combina essas características com dados

populacionais levantados em estudos censitários. Estima-se que no Brasil, 40% da população utilize fossas rudimentares ou não possua qualquer sistema de saneamento. Particularmente em favelas, onde é grande a concentração de fossas sépticas negras próximas a poços cacimba, avalia-se que vivam mais de 1,3 milhão de pessoas, apenas no Estado de São Paulo (IBGE, 1991).

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 o estudo da contaminação gerada por uma fossa séptica existente na área. Varnier & Hirata (2000) constataram:

- Grandes alterações temporal e espacial nos níveis estáticos dos poços de monitoramento. Além das variações sazonais nos níveis estáticos, já esperadas devido à alternância de períodos de estiagem (abril a outubro) e de chuvas (dezembro a março), observou-se variações em intervalos de tempo de aproximadamente uma semana. Dentro desta variabilidade temporal das cargas, é possível também observar um padrão complexo das equipotenciais, com pontos localizados tanto de maior quanto de menor potencial hidráulico.
- Comportamento errático dos poluentes em função do tempo: alguns poços apresentaram grande diminuição e posteriormente novo aumento em suas 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 do fluxo de água subterrânea.

Esse comportamento extremamente dinâmico da distribuição das cargas hidráulicas observadas evidencia que qualquer programa de monitoramento desse 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. Dessa forma, através desse projeto, procurou-se estabelecer como as variabilidades da recarga e da condutividade hidráulica se relacionam ao fluxo de água subterrânea no PET – EG, 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 de estudo é de aproximadamente 2500 m², onde se encontram instalados 67 poços de monitoramento com aproximadamente 3 m de profundidade (Figura 1).

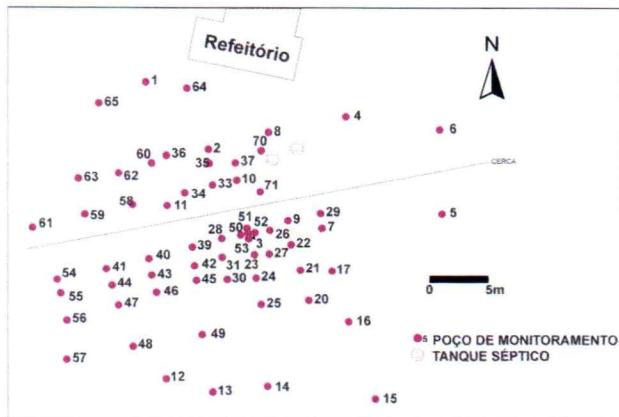


Figura 1: Localização dos poços na área de estudo.

A área é constituída de sedimentos quaternários aluvionares associados ao rio Tietê, com uma espessura de 20m indicados por sondagens SPT. Esses sedimentos são compostos por lentes de argila e silte intercaladas com camadas de areia fina a média não consolidada. Estas camadas de areia aparecem 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} (Varnier, 2001). Esse aquífero apresenta baixo gradiente hidráulico muito comum a zonas de planícies.

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. 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 3,5m que porventura exerçeriam influência e a distância desse poço até a árvore de porte mais próximo.

Tratamento dos dados

O tratamento dos dados teve por objetivo estudar as correlações entre as condutividades hidráulicas e a cota topográfica de cada poço com as cargas hidráulicas medidas. 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, foram calculados fatores de contraste de cota e de condutividade hidráulica, a fim de entender como variações bem localizadas desses fatores poderiam interferir nas cargas hidráulicas medidas.

Determinação dos fatores 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 3 raios de influência, com 2,5 m; 3,0 m; 3,5 m; divididos em 3 setores de 120°;
- Para cada um dos raios e para cada poço, foi determinado 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, foram calculados os fatores de contraste topográfico, F_C , e dois contrastes de condutividade hidráulica, F_K e F_{K2} , segundo as equações:

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

$$F_K = \frac{K - K^*}{K^*} \quad (2)$$

$$F_{K2} = \frac{K - K2^*}{K2^*} \quad (3)$$

nas quais

$$C^* = \frac{\sum_{i=1}^{nv} C_i}{nv} \quad (4)$$

$$K^* = \frac{\sum_{i=1}^{nv} K_i}{nv} \quad (5)$$

e

$$K2^* = e^{\frac{\sum_{i=1}^{nv} \ln K_i}{nv}} \quad (6)$$

onde, C^* é a cota média dos poços vizinhos, K^* e $K2^*$ são as condutividades hidráulicas médias dos poços vizinhos, sendo C_i e K_i , respectivamente, os valores da cota e da condutividade hidráulica de cada poço vizinho e nv , o número de vizinhos em questão.

Dessa forma, os valores de F_C , F_K e F_{K2} de cada poço fornecem uma medida do contraste entre sua cota e sua condutividade hidráulica e a cota e a condutividade hidráulica médias de seus vizinhos, para cada raio de influência. Portanto, os fatores de contraste dos poços mostram o quanto o poço se assemelha ou difere dos seus vizinhos nesses parâmetros analisados. Através desses fatores de contrastes é possível observar se estas diferenças ou semelhanças influenciam nas cargas hidráulicas.

Análise estatística

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

Lisímetros

O equipamento empregado para a quantificação de infiltração foi o lisímetro, que consiste em um tubo de PVC de diâmetro interno de cerca de 102 mm e 4 mm de espessura, com comprimento de 300 mm, dentro do qual estão inseridas amostras de solo indeformadas do PET - EG. 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 destina-se a água infiltrada. A amostra é ainda sustentada por três hastes metálicas (Figura 2).

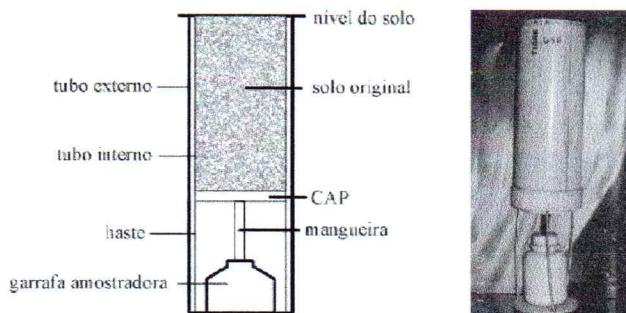


Figura 2: Lísímetro.

O lísímetro 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 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 lísímetro 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 6 lisímetros 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 lisímetros, sem os frascos, para o acompanhamento da variação de armazenamento de água nos poros das amostras. Procurou-se correlacionar, mediante combinações estatísticas, os dados obtidos de infiltração e variação de massa com dados meteorológicos de precipitação a fim de se poder construir um modelo de estimativa de recarga.

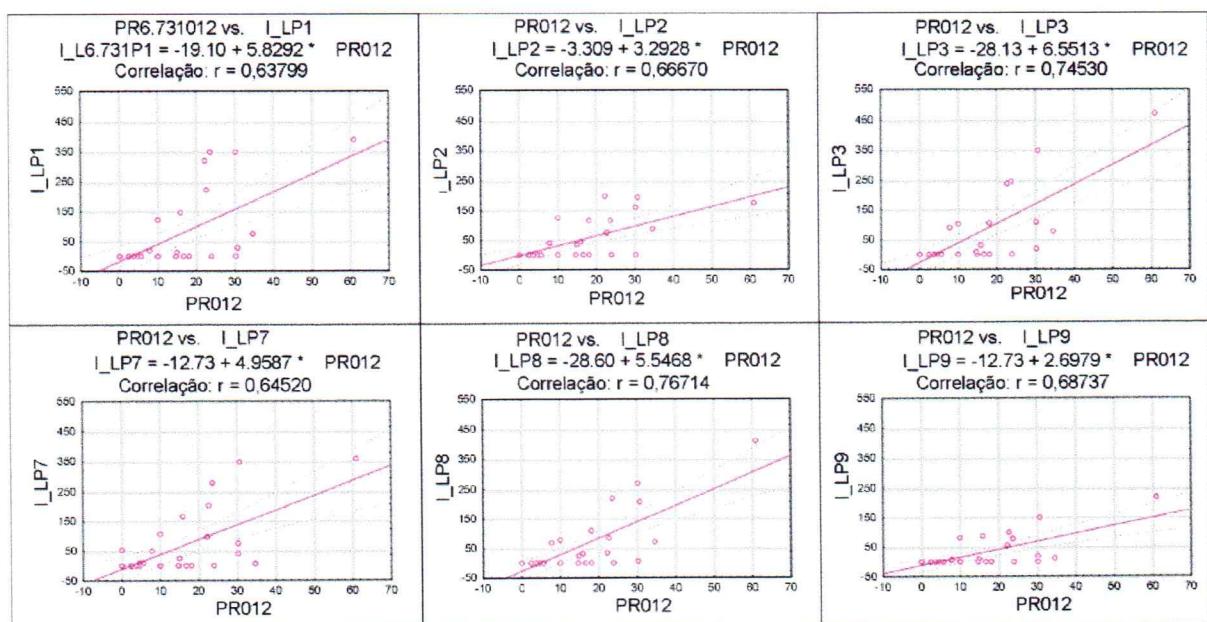


Figura 3: Infiltração versus PR012 para cada infiltrômetro na estação chuvosa (infiltração em ml, P012 em mm). Regressão com 95% de significância.

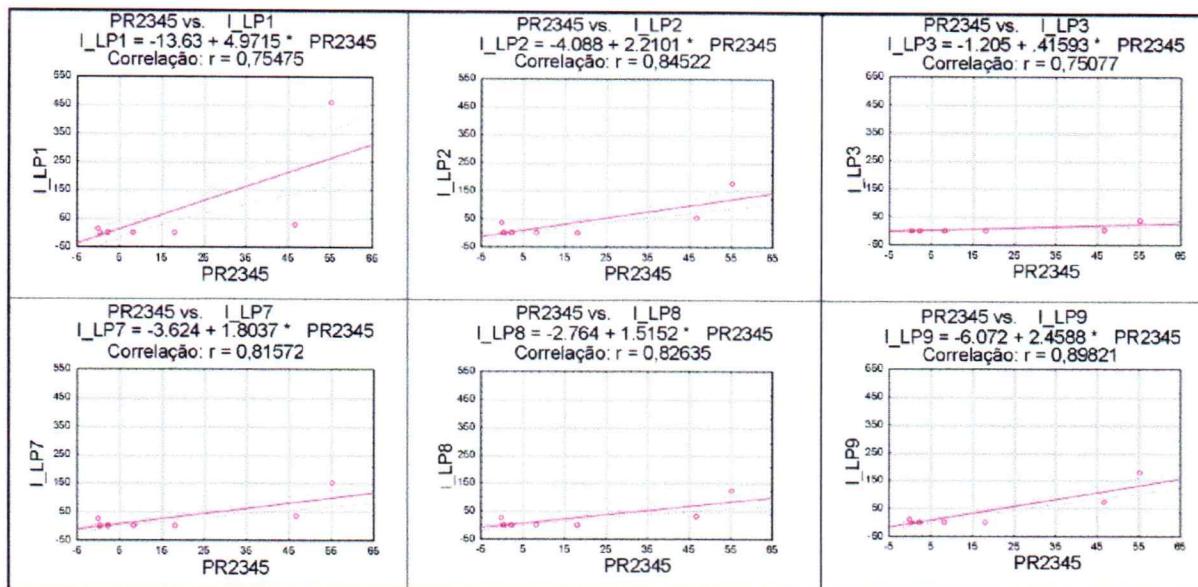


Figura 4: Infiltração versus PR2345 para cada infiltrômetro na estação seca (infiltração em ml, P2345 em mm). Regressão com 95% de significância.

RESULTADOS

Lisímetros

Correlação entre infiltração de cada lisímetro e precipitação

Através do programa Statistica (Statsoft, Inc. 1993), procurou-se correlacionar a infiltração de cada lisímetro 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 lisímetros do Parque Ecológico do Tietê, identificados pela abreviação LP.

Embora essas observações tenham sido efetuadas para todo o período de vigência do estudo e ainda válido o fato 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. A fim de se nomear a precipitação mais representativa de cada estação, optou-se pela PR012, para a úmida, e pela PR2345, para a seca.

Relacionando-se a infiltração de cada lisímetro com as precipitações características de cada estação (Figuras. 3 e 4) foi possível observar que há pelo menos dois lisímetros 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. Na estação chuvosa a intensidade das chuvas são maiores do que na estação seca.

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 mediante o programa Statistica, ajustaram-se, pelo programa Grapher, curvas dos dados PR012 X IMLP e PR2345 X 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

$$IMLP(mL) = 1,36PR2345(mm) - 0,93 \quad (7)$$

- #### - Estação chuvosa

$$IMLP(mL) = 4.78PR012(mm) - 20.76 \quad (8)$$

Correlação entre retenção e precipitação

Baseando-se na diferença de massas máxima e mínima de cada lisímetro, 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 representavam 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 lisímetros, corroboraram a existência de dois padrões. Dessa forma, espera-se que a evapotranspiração e o escoamento superficial se comportem 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 em 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 ($>PR5$) antes das medidas de carga hidráulica dos poços de monitoramento, e os valores médios de carga hidráulica (Tabela 1).

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

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).

No entanto, a carga hidráulica média varia mês a mês na estação seca (Figura 5) e isso mostra que algumas precipitações ocorridas nesta estação devem gerar recargas. Mas não se observa essa relação na Tabela 2, porque a maioria das precipitações durante a estação seca podem simplesmente não gerar recargas significativas, provavelmente porque a capacidade de campo não é alcançada, frente às chuvas.

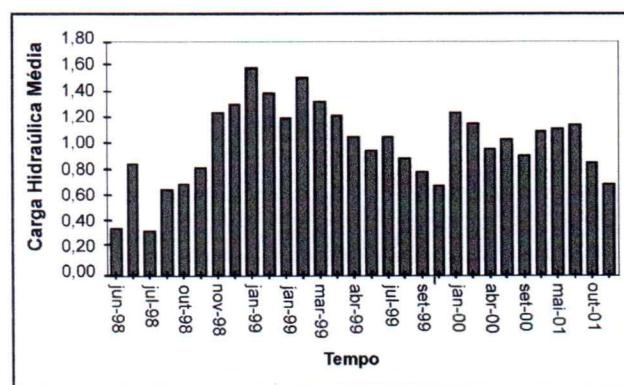


Figura 5: Variação da carga hidráulica média em função do tempo.

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 6) é bastante disperso, sugerindo que outros mecanismos atuam sobre as cargas além da precipitação, ou seja, a precipitação de um dia antes da medida influí sobre a carga média mas não a governa.

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

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).

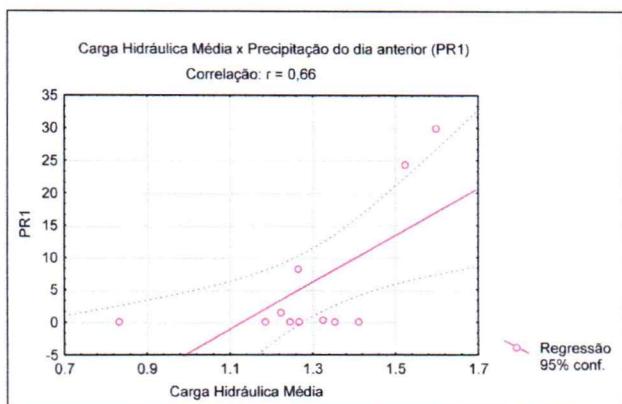


Figura 6: Correlação entre a carga média e a precipitação de um dia antes da medida.

As relações observadas na Tabela 3 são um padrão médio criado pela superposição de diversos padrões distintos e individuais dos poços, pois quando o efeito das precipitações sobre as cargas hidráulicas de cada poço é estudado separadamente, levando-se em consideração a presença das árvores, observa-se a complexidade do fenômeno de recarga na área de estudo, pois é razoável pensar que em uma área heterogênea de ocupação (árvores) e de características hidráulicas do aquífero e do solo, cada poço possua uma relação distinta com a precipitação.

Levando-se em consideração 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 Figura 7. As árvores são analisadas quanto a sua capacidade de interceptação/evapotranspiração e as características do solo, quanto a facilidade de infiltração (a área “D” possui solo argiloso e as demais áreas possuem 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 e que possuem as suas copas bem fechadas com uma grande capacidade de interceptação. Na área “C”, onde se tem 0,1 árvores/m², a influência da precipitação nas cargas hidráulicas ocorre depois de dois dias (PR2). Os poços da área marrom 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 posui 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.

Uma outra relação surge com as árvores quando se analisa o desvio padrão dos níveis d’água ao longo das campanhas. A Figura 8, na qual foram desenhadas as isolinhas de desvios padrão, mostra uma área homogênea com desvios padrão próximos a 0,20, com exceção próximo ao poço 62. Esses desvios maiores (poço 62) devem-se à influência de duas grandes árvores e cerca de 40 bananeiras que na época de estiagem poderiam estar consumindo água do aquífero.

Topografia versus carga hidráulica

A topografia é dada pelos desniveis dos poços de monitoramento em relação ao poço 8 apresentando uma variação máxima de 1,085 m.

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

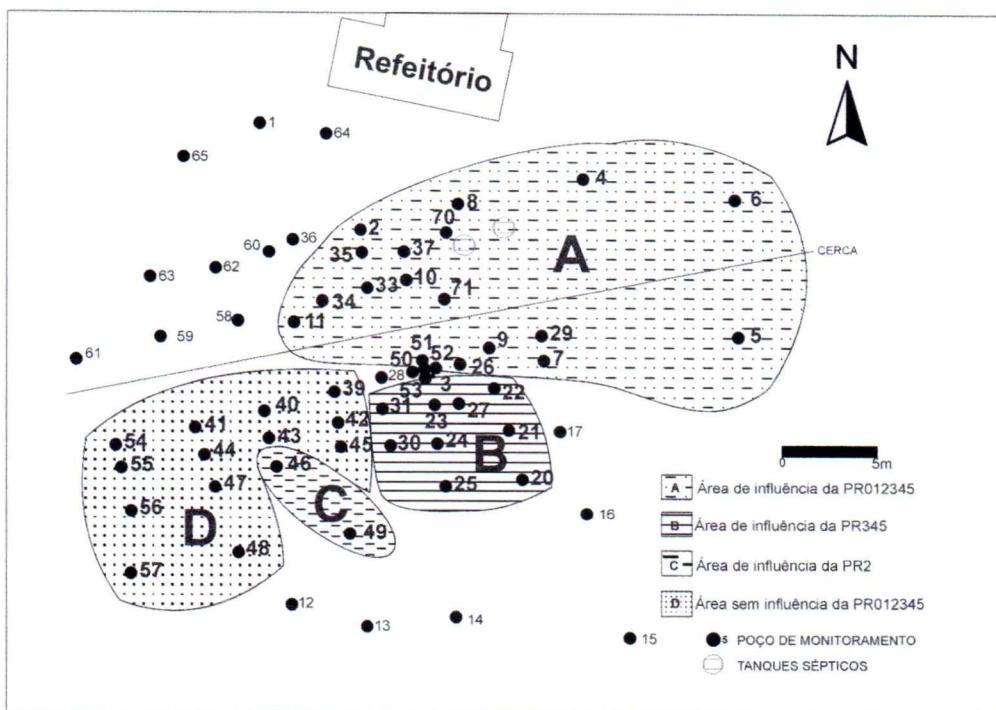


Figura 7: Áreas onde os poços apresentam características semelhantes frente às precipitações.

	Carga Abr/00	Carga Jul/00	Carga Set/00	Carga Abr/01	Carga Mai/01
Cota	0,62	0,63	0,68	0,62	0,54
Carga Ago/01					
Cota	0,48	0,56	0,58		

Tabela 3: Correlação entre a cota topográfica dos poços e a carga hidráulica, ambas medidas em metros.

Os coeficientes em negrito representam correlações com significância estatística de 5% (Número de dados = 483).

A Tabela 4 indica não haver relação entre os contrastes de topografia e as cargas, 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%.

Esse fato mostra que a topografia controla a recarga, mas não através das depressões e

elevações centimétricas locais, isto é, não são as diferenças de escoamento superficial causadas por essas depressões, que poderiam aparentemente induzir a maiores recargas pelo empoçamento de água no solo, ou elevações locais que atuam nas cargas hidráulicas.

	Carga Abr/00	Carga Jul/00	Carga Set/00	Carga Abr/01	Carga Mai/01
FC (2,5)	0,07	0,09	0,13	-0,11	-0,01
FC (3,0)	-0,16	-0,08	-0,21	-0,22	-0,03
FC (3,5)	0,16	0,16	0,10	0,15	-0,12
	Carga Ago/01	Carga Out/01	Carga Out/01		
FC (2,5)	0,10	0,19	0,13		
FC (3,0)	-0,28	-0,21	-0,23		
FC (3,5)	0,04	0,09	0,05		

Tabela 4: Correlação entre F_C para os raios 2,5; 3,0 e 3,5 m, e a carga hidráulica. (Número de dados = 483).

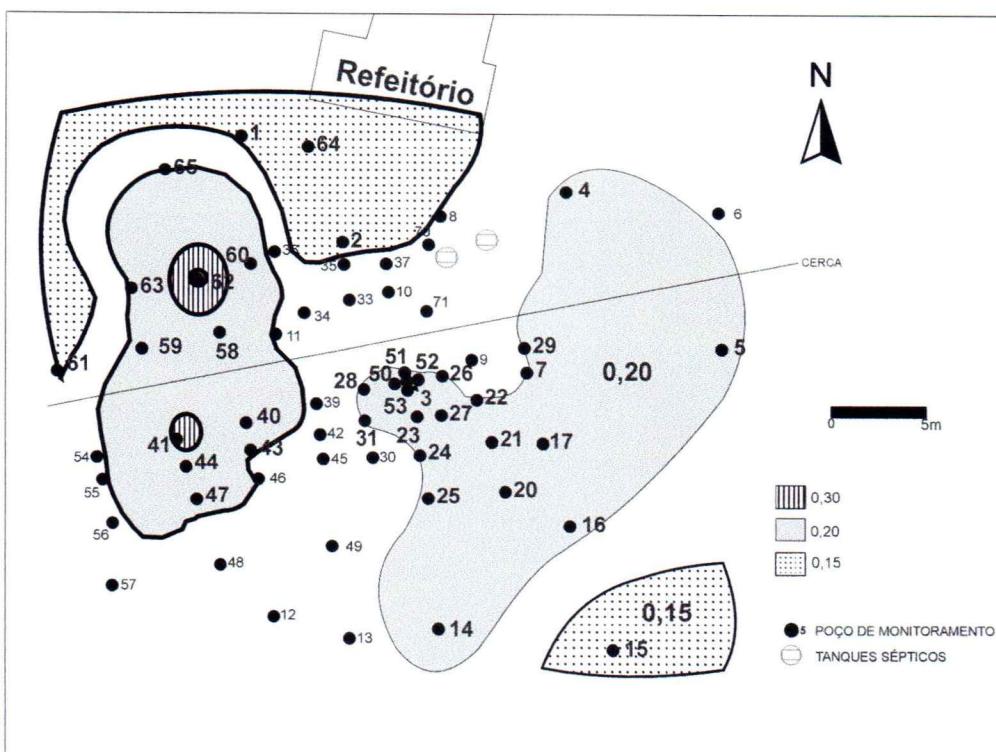


Figura 8: Campos de desvios-padrão dos níveis d'água.

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.

	Carga Abr/00	Carga Jul/00	Carga Set/00	Carga Abr/01	Carga Mai/01
Cond. Hidr.	-0.28	-0.17	-0.28	-0.41	-0.28
Carga Ago/01	Carga Out/01	Carga Out/01			
Cond. Hidr.	-0.11	-0.12	-0.12		

Tabela 5: Correlação entre a condutividade hidráulica (Cond. Hidr.) e a carga hidráulica (Número de dados = 483).

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

	Carga Abr/00	Carga Jul/00	Carga Set/00	Carga Abr/01	Carga Mai/01
Cond. Hidr.	-0.34	-0.24	-0.42	-0.46	-0.37
Carga Ago/01	Carga Out/01	Carga Out/01			
Cond. Hidr.	-0.19	-0.20	-0.19		

Tabela 6: Correlação entre a condutividade hidráulica (Cond. Hidr.) e a carga hidráulica retirando-se as árvores a 1,5m de distância. Os coeficientes em negrito representam correlações com significância estatística de 5% (Número de dados = 270).

	Carga Abr/00	Carga Jul/00	Carga Set/00	Carga Abr/01	Carga Mai/01
Cond. Hidr.	-0.33	-0.24	-0.42	-0.46	-0.42
Carga Ago/01	Carga Out/01	Carga Out/01			
Cond. Hidr.	-0.22	-0.24	0.23		

Tabela 7: Correlação entre a condutividade hidráulica (Cond. Hidr.) e a carga hidráulica retirando-se as árvores a 2,0m de distância. Os coeficientes em negrito representam correlações com significância estatística de 5% (Número de dados = 270).

Estas 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). Através da relação entre precipitação e a evapotranspiração real, obtida pela relação proposta por Thornthwaite (1948 apud CPRM, 1997), determinaram-se os valores da Recarga Potencial (Tabela 8). Nesse cálculo, o escoamento superficial foi desconsiderado devido à área ser muito plana, 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 300mm, cerca de 71% das precipitações se converteram em recarga. Já no ano de 2001, a recarga potencial é em média 46% das precipitações.

Parâmetro (mm)	Meses (2000)								
	janeiro	fevereiro	março	abril	<th>junho</th> <th>julho</th> <th>agosto</th> <th setembro<="" th=""></th>	junho	julho	agosto	
EP	96,06	97,12	112,67	136,49	118,25	105,48	91,44	47,76	14,75
P	383,50	317,40	163,20	6,40	10,40	20,00	58,30	70,40	105,70
P-EP	297,44	220,28	50,53	-130,09	-07,85	-85,46	-33,14	22,64	90,95
Δ Neg.(P-EP)	—	—	—	-130,09	-237,94	-323,42	-356,58	—	—
AS	300	300	300	43	18	9	7	29,64	120,59
Δ AS	0	0	0	-257	-25	-8	-2	22,64	90,95
ER	96,06	97,12	112,67	136,49	118,25	105,48	91,44	47,76	14,75
Recarga	297,44	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	166,88	164,37	96,85	69,08	71,12	60,04
P	138,60	155,20	198,30	35,60	90,80	26,40	60,90	22,70	55,10
P-EP	75,92	65,89	81,88	-133,28	-73,77	-80,45	-8,18	-48,42	-4,94
Δ Neg.(P-EP)	—	—	—	-133,28	-207,05	-267,5	-275,68	-324,1	-329,04
AS	300	300	300	42	23	14	13	9	9
Δ AS	0	0	0	-258	-19	-9	-1	-4	0
ER	62,68	89,31	116,44	293,60	109,6	35,4	61,9	28,70	55,10
Recarga	75,92	65,89	81,88	—	—	—	—	—	—
% Recarga	54,8	42,5	41,3	—	—	—	—	—	—

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).

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

Por este método os valores de recarga calculados representam, em média, 27% das precipitações ocorridas. Este valor é significativo levando-se em consideração a pequena espessura da zona não saturada, cerca de 1,5m, e que o processo de recarga é rápido, como foi observado pelos lisímetros e pelas correlações entre a carga hidráulica e as precipitações.

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

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

Comparativamente o método da variação do nível potenciométrico apresentou valores mais compatíveis do que o método do balanço hídrico, onde parece que houve uma superestimação dos valores de 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, onde observa-se que parte destas precipitações (20%) se convertem 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 ocorrem em períodos curtos, necessitando de medições de níveis d'água semanais ou até mesmo diárias para uma melhor precisão dos resultados.

CONCLUSÃO

No aquífero livre e raso do Parque Ecológico do Tietê os resultados dos lisímetros e das medições de carga hidráulica correlacionadas com as precipitações comprovaram o rápida velocidade do processo de recarga. Apesar desse processo ser rápido, o regime de infiltração apresenta diferenças durante a estação seca e chuvosa. Estas diferenças estão associadas principalmente as quantidades de precipitações, em cada estação, mas também tem a influência de outros mecanismos que controlam a recarga, como a interceptação e evapotranspiração das árvores. Estas tem grande influência na área, seja na estação chuvosa, quando criam um padrão heterogêneo de recarga, ou na estação seca quando seu consumo é mais sentido nas carga hidráulicas.

Quanto a quantificação da recarga os métodos utilizados apresentaram baixa precisão. O método do balanço hídrico não é aconselhável para estimativa da recarga na área trabalhando-se com dados mensais, pois variações semanais e até mesmo diárias dos dados utilizados podem influenciar os resultados. Já o método da variação do nível potenciométrico apresentou valores mais compatíveis, mas mesmo neste método, para uma melhor precisão, seria necessário um monitoramento com frequência diária a semanal.

Fica clara a importância da elaboração de um modelo conceitual de circulação de água em detalhe, quando se estudam aquíferos livres e rasos principalmente quando se pretende analisar o transporte de contaminantes visto que é necessário uma programação adequada da campanha de monitoramento, para uma obtenção de dados os mais próximos possíveis da realidade.

No caso do aquífero livre e raso do Parque Ecológico do Tietê seria necessário, durante a estação chuvosa, um monitoramento com frequência

MECANISMOS DE CONTROLE DA RECARGA EM AQÜÍFEROS SEDIMENTARES LIVRES. ESTUDO DE OCORRÊNCIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÉ, SÃO PAULO (BRASIL)

diária até 5 dias, e na estação seca, um monitoramento semanal após chuvas e até mesmo a cada 15 dias.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a FAPESP, 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 BIBLIOGRÁFICAS

CPRM. 1997 *Hidrogeologia conceitos e aplicações*. Coord. Feitosa, F. A. C.; Manoel Filho, J. Fortaleza, 412p.

Green JR, Margerison D. 1978. *Statistical treatment of experimental data*. Elsevier Science Publishing Company, New York, 382p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 1991. *Censo demográfico do Brasil*. Rio de Janeiro, FIBGE, v. 1. 94p.

Jensen ME, Burman RD, Allen RG. 1989. Evapotranspiration and irrigation water requirements. *American Society of Civil Engineers. Committee on Irrigation Water Requirements*. IV. Séries, 331p.

Varnier CL. 2001. O efeito do nitrogênio proveniente de sistemas de saneamento "in situ" na qualidade das águas subterrâneas em aquíferos livres e rasos. São Paulo, 150p. *Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo*.

Varnier CL, and Hirata R. 2000. Contaminação da água subterrânea por nitrato no Parque Ecológico do Tietê - São Paulo, Brasil. In: *Iº Congresso Mundial Integrado de Água Subterrânea*, Fortaleza, Brasil, 2000, 12p.