

A interferência antrópica nos padrões naturais de fluxo de água subterrânea: um estudo de caso na bacia de São Paulo, São Paulo, Brasil

P. Lojkasek-Lima⁽¹⁾, R.C. Hirata^(2*), R.A. Bertolo⁽¹⁾, J.B. Viviani⁽²⁾ e P. de T.A. Valle⁽³⁾

(1) ERM Brasil Ltda. Av. dos Carinás 635. Moema. São Paulo, SP. (Brasil).
E-mails: paulo.lojkasek@erm.com - reginaldo.bertolo@erm.com

(2) LAMO. Laboratório de Modelos Físicos. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP).
Rua do Lago 562. Cidade Universitária. CEP 05508-900. São Paulo, SP. (Brasil).
E-mails: rhirata@usp.br (*autor para correspondência) - jviviiani@usp.br

(3) ERM Belgium. Meersstraat 138D, 9000 Gent (Bélgica).
E-mail: paulo.valle@erm.com

RESUMO

Uma unidade industrial desativada, com área de 3.313 m², localizada no Município de São Paulo, tem sido monitorada à raiz de um problema de contaminação de solo e água subterrânea. Este monitoramento tem demonstrado que o fluxo regional da água subterrânea identificado é de leste para oeste. Localmente, observa-se que a porção superior do aquífero poroso apresenta uma inversão no sentido de fluxo em relação ao padrão regional. A construção de poços de monitoramento multiníveis demonstrou que tal inversão ocorre devido ao aumento do potencial hidráulico relacionado à existência de vazamentos em uma galeria esgoto e águas pluviais adjacente a uma camada de argila orgânica. A ocorrência de amônio relacionado à água subterrânea dos poços instalados nesta camada de argila e em suas proximidades confirmou a presença de vazamentos da rede de água e esgoto como fontes pontuais de recarga induzida associadas. A criação do modelo conceitual de fluxo da água subterrânea consistente só foi possível com o estudo em escala de detalhe, permitindo o estabelecimento da forte influência exercida pelas estruturas de drenagem urbana.

Palavras chave: amônio, assinatura química, hidrogeologia urbana, recarga induzida

The antropic influence on natural groundwater flow pattern: a case study in São Paulo basin, São Paulo, Brazil

ABSTRACT

An inactive industrial facility, with an area of 3.313 m², located in the Municipality of São Paulo, has been monitored due to a soil and water contamination problem. This survey has shown that the regional groundwater flow identified in the area is from east to west. Locally, there is a reversal of the flow direction, compared to the regional pattern. The construction of multilevel monitoring wells showed that this reversal occurs due to the increasing of the hydraulic head related to leakage from a sewage and stormwater system adjacent to a clay layer. The occurrence of ammonium related to the groundwater from the wells installed in the clay layer and its vicinity assured the presence of leakage on the sewage and stormwater system as punctual sources of artificial recharge. The creation of a consistent conceptual model for the groundwater flow was only possible because of the detailed-scale study, providing the understanding of the strong influence exerted by the urban drainage structures.

Key words: ammonium, artificial recharge, chemical signature, urban hydrogeology

Introdução

Nos últimos anos, uma série de estudos voltados ao monitoramento da qualidade da água subterrânea vem se desenvolvendo no campo da hidrogeologia,

principalmente em áreas urbanizadas e industrializadas. Estes trabalhos, na maioria das vezes, estão vinculados a problemas de contaminação de aquíferos. Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), por exemplo, são vários os casos de contaminação das

águas subterrâneas causados por atividades industriais. Grande parte das indústrias está situada em áreas de relevo baixo, em antigas áreas de várzea e planícies de inundação, geralmente associadas a aquíferos livres. Tais áreas são caracterizadas pela espessura reduzida da zona não saturada, apresentando, desta maneira, grande vulnerabilidade à contaminação.

O monitoramento da qualidade da água envolve a criação de modelos hidrogeológicos conceituais da área impactada. Tal processo nem sempre é tão simples, principalmente onde a interferência urbana causa modificações nos padrões naturais de circulação da água subterrânea. Tais modificações ocorrem especialmente devido à impermeabilização de terrenos e à presença de redes de drenagem artificiais (Lerner, 2002).

Um problema de contaminação de solo e água subterrânea em uma área industrial desativada de 3.313 m², localizada no Município de São Paulo, vem sendo monitorado desde 1997. Tal trabalho permitiu verificar uma rápida variação das cargas hidráulicas dos poços rasos ao longo do ano. Acreditava-se que esta variação estivesse relacionada à recarga natural

diferenciada associada aos variados tipos de cobertura do solo. O desenvolvimento do projeto, entretanto, com a instalação de poços de monitoramento, mostrou que o padrão de fluxo está basicamente relacionado a particularidades geológicas que, somadas à interferência urbana, que induzem recarga, geram variações nos níveis potenciométricos registrados nos poços e nos fluxos do aquífero livre e raso. A assinatura química da água auxiliou no reconhecimento da origem da recarga do aquífero.

O objetivo deste trabalho, portanto, foi o de criar um modelo conceitual de fluxo da água subterrânea, considerando os efeitos da interferência urbana nos processos naturais de circulação da água subterrânea, de forma a prever o comportamento do fluxo advectivo do contaminante na área.

Caracterização da área de estudo

A área estudada se localiza no Município de São Paulo (Figura 1), em uma planície aluvionar de inundação, caracterizada por superfícies planas e áreas de várzea, com altitude média de 726 msnm (metros

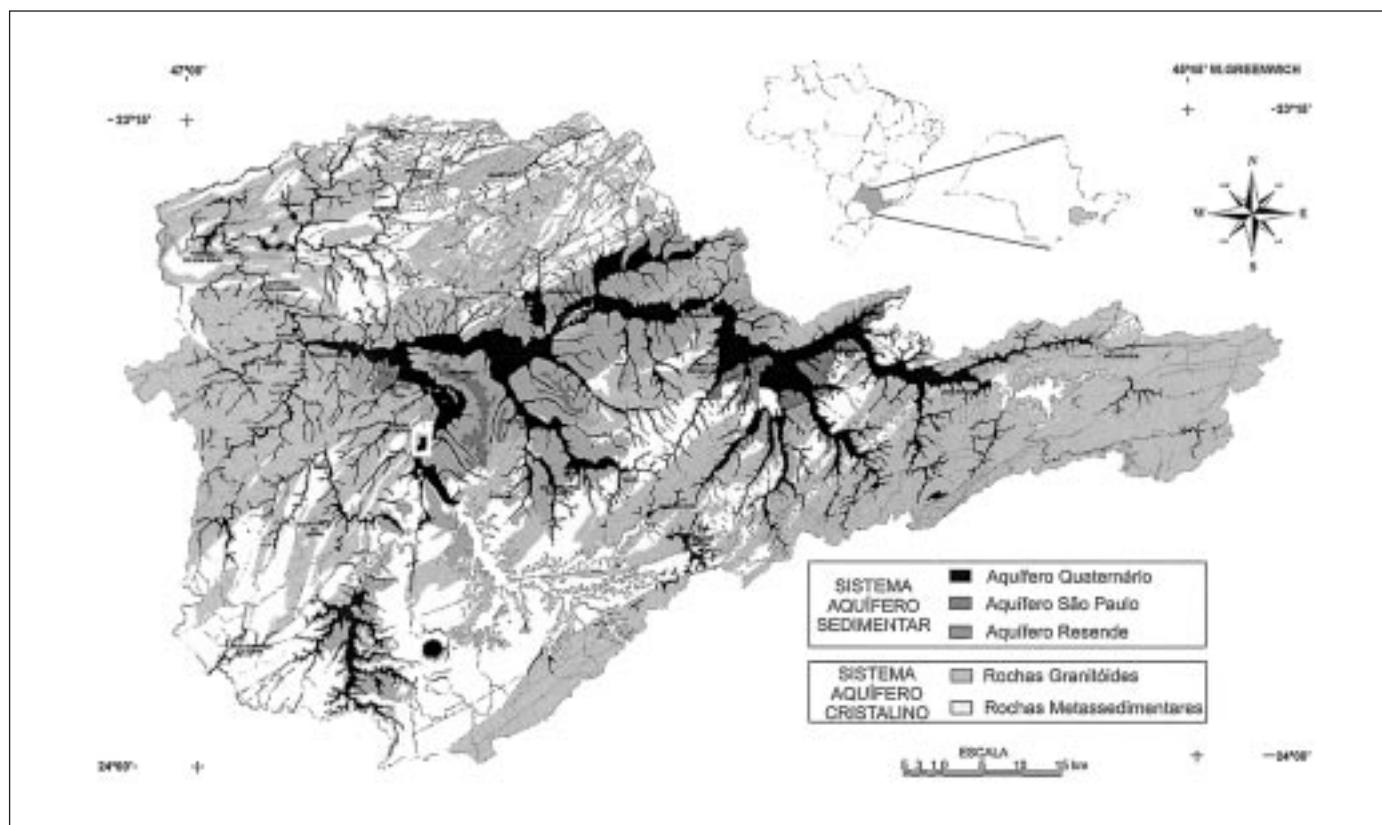


Fig. 1. Localização da área estudada (quadrado branco)
Fig. 1. Location of the studied area (white square)

sobre o nível do mar), estando regionalmente situada a 2 km a sudoeste do divisor de drenagem de águas superficiais, cerca de 1 km a leste de um rio de grande porte (devido à questão de confidencialidade, os nomes de localidades foram omitidos ou trocados) e a 0,5 km de seus afluentes.

Geologia e hidrogeologia regional

O Município de São Paulo abrange principalmente coberturas colúvio-aluvionares de idade quaternária, terrenos sedimentares terciários da Bacia de São Paulo e significativa extensão de terrenos cristalinos pré-cambrianos (DAEE, 1975).

O embasamento cristalino é composto basicamente por rochas metamórficas (granito-gnaiss, migmatito, milonito, xistos e quartzitos) relacionadas ao Complexo Embu e aos grupos São Roque e Serra do Itaberaba (Juliani, 1992) e granitos sin-pós tectônicos (Riccomini, 1989).

A Bacia Sedimentar de São Paulo integra o Rift Continental do Sudeste do Brasil, em conjunto com outras bacias tafrogênicas continentais. Os depósitos sedimentares terciários da Bacia de São Paulo compreendem, do ponto de vista litoestratigráfico, a uma seqüência constituída pelas Formações Resende, Tremembé e São Paulo, reunidas no Grupo Taubaté, superposto pela Formação Itaquaquacetuba (Riccomini, 1989).

Este contexto geológico sustenta a Bacia Hidrogeológica do Alto Tietê (BAT) (Figura 1), a qual possui duas unidades distintas (Hirata & Ferreira, 2001):

- Sistema Aquífero Cristalino (SAC), associado ao embasamento cristalino proterozóico. Este sistema é definido por duas unidades aquíferas: o Aquífero de Rochas Granitoides e o Aquífero de Rochas Metassedimentares. Os limites do SAC coincidem aproximadamente com os divisores de drenagem superficial, nas cotas de 800 a 1.000 msnm, possuindo distribuição em área de 4.238 km².
- Sistema Aquífero Sedimentar (SAS), formado pelos sedimentos terciários das formações São Paulo e Resende e pelos depósitos aluvionares quaternários constituintes de áreas de várzeas do rio Tietê e seus tributários. Este sistema é definido por duas unidades: o Aquífero Resende e o Aquífero São Paulo. O SAS possui distribuição em área de 1.452 km², com espessura média de 100 m, fortemente heterogêneo e anisotrópico, com porosidade intergranular, de caráter livre a semi-confinado.

A recarga dos sistemas aquíferos se dá pela percolação da infiltração das águas pluviais; e o induzido, representado pela infiltração proveniente das fugas da rede de água e esgoto e dos drenos pluviais (Hirata *et al.*, 2002). Segundo estes autores, a recarga média para a BAT é de 67 mm/ano para áreas ocupadas e 355 mm/ano para áreas não ocupadas. A recarga induzida é de cerca de 343 mm/ano.

Geologia e hidrogeologia local

A geologia é caracterizada por depósitos de sedimentos quaternários de origem fluvial sobrepostos por um aterro superficial de composição silto-arenosa com aproximadamente 1,5 m de espessura, assentados sobre o embasamento cristalino (Figura 2).

Os sedimentos quaternários, que possuem espessura de cerca de 6m, são caracterizados por diferentes horizontes geológicos:

- argila, com plasticidade média-alta, rica em matéria orgânica, de cor preta, com espessura variando de centímetros a 4 m, com ocorrência restrita à porção oeste da área.
- areia fina-média com matriz argilosa, bem selecionada, média plasticidade, cinza-bege, com espessura média de 3 m.
- lentes descontínuas de areia média-grossa com níveis de cascalhos centimétricos sub-arredondados.

Sotoposto ao pacote sedimentar, em contato erosivo, há um saprolito de espessura variando de 1 m a 10 m, coesão média-baixa, composto por material arenoso com caulim, fragmentos de quartzo, biotita e muscovita. Abaixo do pacote granular, ocorre o maciço de rocha gnáissica, de textura predominantemente grano-lepidoblástica, fina-média, pouco alterado, composto predominantemente por feldspato, quartzo, biotita e muscovita, com fraturas horizontais e subverticais.

Do ponto de vista hidrogeológico, há duas unidades aquíferas distintas na área:

- Aquífero Poroso Livre: composto por sedimentos aluvionares de porosidade primária e pelo manto de intemperismo da rocha cristalina, que localmente apresenta porosidade de fraturas. O aquífero é raso, com nível d'água médio em torno de 2,5 m de profundidade, com geometria definida com base na disposição das camadas geológicas e na profundidade do embasamento cristalino, apresentando espessura reduzida a leste (2 m em média) e aumentando rumo a oeste (10 m em média). A porosidade efetiva média para este

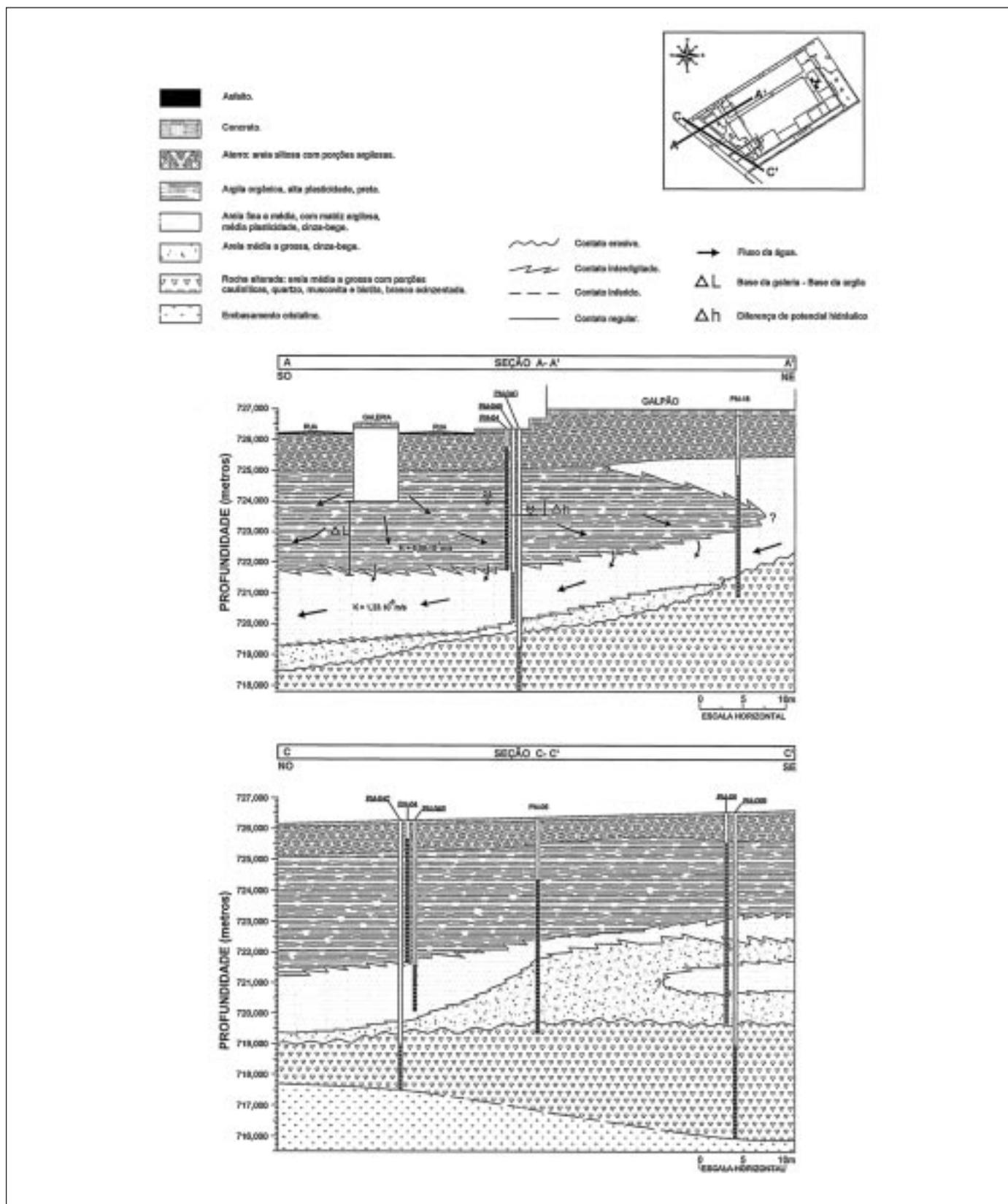


Fig. 2. Seções geológicas
Fig. 2. Geological cross-sections

aquífero é de 25% com gradiente hidráulico suave variando de 0,1% a 1,0%.

- Aquífero Cristalino: composto por rochas do embasamento cristalino, com porosidade de fraturas, abertas, com ou sem preenchimento. Este aquífero é heterogêneo, anisotrópico e está conectado hidráulicamente com a unidade anterior.

Materiais e métodos

Foi realizada a zonificação das áreas com diferentes potenciais de infiltração e de estruturas de canalização de redes de água, esgoto e elétrica, com base na análise integrada de mapas topográficos (escala 1:1500) e trabalhos de campo.

Na área de estudo havia 25 poços de monitoramento já instalados e adicionalmente foram construídos 3 poços rasos de até 10 m de profundidade (PM-04B, PM-04C, PM-06B).

Os poços rasos foram perfurados em 20 cm de diâmetro, utilizando o sistema *hollow steam auger*, e instalados com tubos geomecânicos com diâmetro de 5 cm e seções filtrantes ao longo de diferentes camadas geológicas que constituem o aquífero poroso livre da área. O espaço anelar entre o tubo e o furo foi preenchido com areia grossa tipo Jacaré servindo como pré-filtro. Acima deste foi colocado um selo de bentonita seguido de uma camada de concreto, com o objetivo de prevenir eventuais migrações verticais de contaminantes para o poço.

Para obtenção de valores de condutividade hidráulica foram realizados ensaios de recuperação nos poços, que consistem em provocar o rebaixamento da coluna de água e monitorar a recuperação do nível estático do aquífero freático através de leituras do nível d'água. Os dados obtidos durante os ensaios hidráulicos foram tratados com o software *Aquifer Test*, utilizado-se a solução de Bower & Rice (1976).

Um monitoramento mensal dos níveis de água dos poços permitiu a confecção de mapas potenciométricos e o cálculo da velocidade de fluxo da água subterrânea.

Complementarmente às análises químicas para as substâncias contaminantes, realizou-se uma campanha de amostragem da água subterrânea em 19 poços, utilizando-se do método de amostragem de baixa vazão (ASTM, 2002) para os parâmetros indicativos Cl (SM4110B), NO₃⁻ (SM4110B) e NH₄⁺ (SMEWW4500D). As amostras foram acondicionadas em frascos de polietileno fornecidos pelo laboratório, e mantidas em caixas térmicas a 4°C.

Resultados obtidos

Uso e ocupação do solo

Com base no mapeamento de uso e ocupação do solo (Figura 3), foram identificadas áreas com diferentes potenciais de infiltração associadas a possíveis vazamentos da rede pública de água e esgoto e tipo de pavimentação existente.

O empreendimento estudado compreende um galpão central (área coberta), com cerca de 1.890 m², e por corredores externos (área livre) com pavimento constituído por bloquetes e áreas cimentadas. No limite SSE da propriedade estudada há galpões que ocupam aproximadamente 2.500 m². Nas áreas circunvizinhas existe um campo de terra com vegetação do tipo gramínea.

O sistema de coleta de água pluvial e de esgoto no empreendimento é subterrâneo, sendo constituído por caixas de coleta e drenos que fluem para um sistema principal ao longo do corredor externo a noroeste do galpão, através de tubulações em cerâmica, com cerca de 15 cm de diâmetro. Este sistema deságua no sistema público de esgoto e de águas pluviais situado cerca de 10 m a sudoeste, ao longo de toda extensão da rua (Figura 3). A rede pública de esgoto e de águas pluviais é composta por uma galeria subterrânea de concreto, com profundidade média de 2,7 m. Na rede pública, as águas servidas e pluviais seguem rumo a noroeste. Observações realizadas junto aos pontos de visita da galeria subterrânea apontam que o concreto não recebeu nenhum tratamento preventivo à corrosão e apresenta porções erodidas ao longo de sua extensão, com forte índice de vazamento.

Hidrodinâmica e hidrogeoquímica

A tabela abaixo sumariza as características hidráulicas das diferentes unidades geológicas da área estudada:

Horizonte geológico	Espessura média (m)	K (m/s)
Argila orgânica	3	6,09.10 ⁻⁷
Areia fina-média com matriz argilosa	3	1,2.10 ⁻⁶
Alteração de rocha	1-10	1,0.10 ⁻⁵

Tabela 1. Características hidráulicas da área
Table 1. Hydraulic features of the area

Os primeiros mapas potenciométricos confeccionados, no mês de junho de 2002 (Figura 4a), mostram dois sentidos de fluxo da água subterrânea convergentes, com gradiente hidráulico suave e velocidades de escoamento da água subterrânea variando de 0,55 m/ano a 4,43 m/ano a oeste e 0,16 m/ano a 5,27 m/ano a leste. Tal sentido contradizia o padrão regional esperado, de leste para oeste, em direção à zona de descarga, junto ao maior rio da região. A princípio, acreditava-se que esta inversão estivesse relacionada a diferentes taxas de recarga natural ao longo da área, associada à diferença da impermeabilização existente (Figura 3). Desta forma, esperava-se que a infiltração da rua de terra batida ou área gramada seria superior a área de bloquetes e superior a cimentada. As análises químicas da água realizadas em todos os poços de monitoramento indicaram a pre-

sença de amônio mais elevada nos poços PM-04, PM-05, PM-06, em relação aos outros poços existentes na área (Tabela 02). Avaliou-se que as concentrações de amônio em água subterrânea estão nitidamente relacionadas com a emissão de águas provenientes de vazamentos da galeria subterrânea que se localiza na rua em frente à área de estudo. Essa observação permite estabelecer que o aumento da carga hidráulica nos poços supracitados estaria relacionado ao vazamento do sistema público de águas pluviais e esgoto, contíguo à camada de argila orgânica, criando, desta forma, uma inversão do fluxo subterrâneo sobre a argila orgânica.

O gradiente hidráulico existente entre a camada de argila orgânica e as camadas subjacentes mais permeáveis indica a existência de um pequeno fluxo vertical descendente (Figura 2). Tal fluxo é confirmado com a ocorrência de amônio também nos poços cuja seção filtrante está instalada abaixo da camada de argila (PM-04B e PM-06B, Tabela 2).

As elevadas concentrações de cloreto têm parte de sua origem associados à liberação do íon Cl no processo de degradação do contaminante de interesse (compostos organoclorados), não sendo considerado, desta forma, um parâmetro indicativo da recarga induzida pela rede pública de esgotamento sanitário.

A não detecção do nitrato em grande parte dos poços de monitoramento da área é um indicativo de ambiente predominante redutor, pouco favorável ao processo de nitrificação.

A Figura 2 representa uma seção em corte da porção oeste da área, mostrando as relações entre as seções filtrantes dos poços de monitoramento e as diferentes camadas geológicas. Neste contexto, nota-se a presença de uma lente de argila orgânica, com espessura variando de 2 a 4 m junto às seções filtrantes dos poços PM-04, PM-05 e PM-06. Esta camada, conforme citado anteriormente, possui baixa condutividade hidráulica ($6,09 \cdot 10^{-7}$ m/s) quando comparada à das camadas sotopostas ($1,23 \cdot 10^{-6}$ m/s).

Quando observados somente os valores de carga hidráulica dos poços PM-04B, PM-04C e PM-06B, instalados nas camadas geológicas subjacentes, mais permeáveis, nota-se que o fluxo da água subterrânea segue o padrão esperado regionalmente, de leste para oeste, com gradiente hidráulico mais suave predominantemente a leste, com velocidade de escoamento variando de 1,57 m/ano a 4,24 m/ano (Figura 4b).

Conclusões

Foi possível estabelecer um modelo conceitual de fluxo da água subterrânea por meio de um estudo

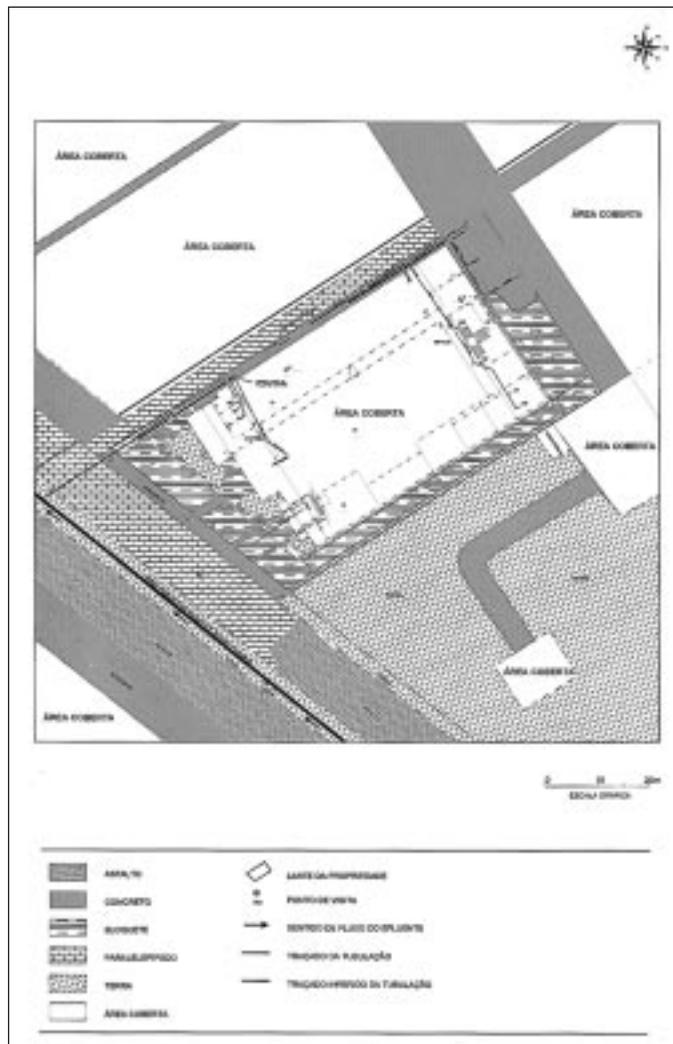


Fig. 3. Uso e ocupação do solo
Fig. 3. Land use

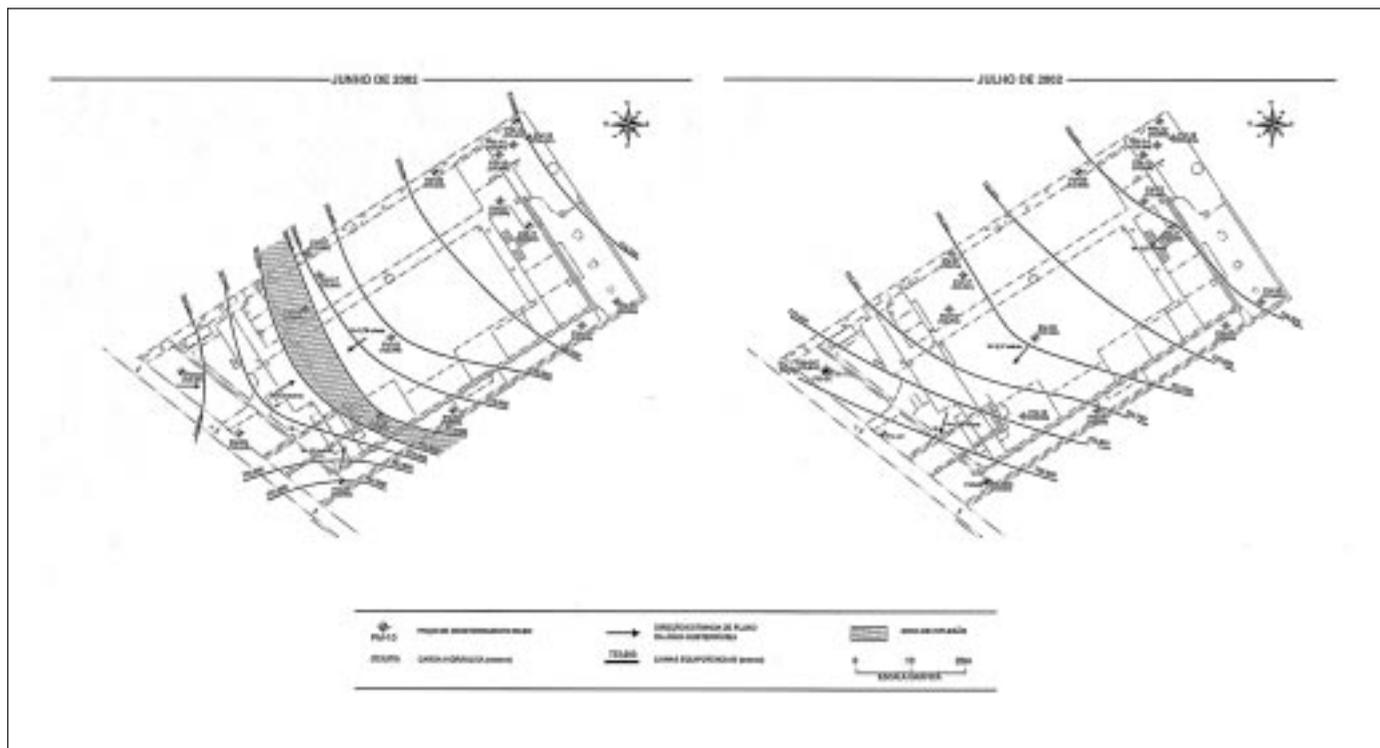


Fig. 4. Potenciometria da área (JUNHO: considerando os poços instalados na argila, JULHO: desconsiderando os poços instalados na argila)

Fig. 4. Potentiometry of the area (JUNHO: considering the wells installed in the clay layer, JULHO: without considering the wells installed in the clay layer)

Poço	Amônio (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (N-mg/L)
PM-02	1,1	65,6	<0,30
PM-03	1,1	39,8	<0,30
PM-04	11,5	76,3	<0,30
PM-04B	8,5	64,1	<0,30
PM-04C	0,2	46,8	<0,30
PM-05	10,3	11,7	<0,30
PM-06	17,0	27,6	0,6
PM-06B	5,1	26,7	0,6
PM-07	<0,20	15,9	3,9
PM-08	0,6	38,8	<0,30
PM-09	1,2	11,5	5,1
PM-10	3,4	105	0,3
PM-11	2,28	86,7	<0,30
PM-12	3,47	82,8	<0,30
PM-15	1,07	40,2	<0,30
PM-16	2,26	95,9	<0,30
PM-17	0,39	30,4	<0,30
PM-18	0,59	58,5	<0,30
PM-19	<0,20	24,3	<0,30

Tabela 2. Resultados das análises químicas
Table 2. Results of the chemical analysis

hidrogeológico de detalhe. Tal avaliação permitiu a determinação dos fluxos da água subterrânea e as influências que obras hidráulicas, como galerias subterrâneas, exercem neste fluxo.

O emprego de técnicas hidráulicas e químicas de investigação propiciou identificar a presença de vazamentos provenientes de tubulações subterrâneas, responsáveis pela recarga do aquífero e mudanças no fluxo das águas subterrâneas, juntamente com uma geometria particular de camadas menos permeáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem a empresa ERM BRASIL LTDA pela disponibilização dos dados e suporte e ao Paulo Casado pela ajuda na confecção das figuras.

Bibliografia

ASTM. 2002. *Designation D6771-02 Standard Practice for Low-Flow Purging and Sampling for Wells and Devices Used for Groundwater Quality Investigations.*

- Bower, H. y Rice, R.C. 1976. A Slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, 12 (3).
- DAEE. 1975. *Estudo de Águas Subterrâneas, Região Administrativa 1 - Grande São Paulo*. Departamento de Águas e Energia Elétrica. São Paulo, 3v.
- Hirata, R. y Ferreira, L.M.R. 2001. Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. *Revista Brasileira de Geociências*, 31 (1), 43-50.
- Hirata, R., Ferrari, L., Ferreira, L. y Pede, M. 2002. La explotación de las aguas subterráneas en la Cuenca Hidrográfica del ALTO TIETÊ (SÃO PAULO, BRASIL): crónica de una crisis anunciada. *Boletín Geológico Minero*, 113 (3), 273-282.
- Juliani, C. 1992. O embasamento pré-Cambriano da Bacia de São Paulo. In: ABAS, ABGE, SBG/SP. *Sem. Prob. Geológ. Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo*, São Paulo, 03-20.
- Lerner, D.N. 2002. Identifying and quantifying urban recharge: a review. *Hydrogeology Journal*, 10, 143-152.
- Riccomini, C. 1989. *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. São Paulo, 256p. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Recibido: junio 2004

Acceptado: agosto 2004