OS AQUÍFEROS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ: DISPONIBILIDADE HÍDRICA E VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO

RICARDO C. A. HIRATA¹ & LUCIANA M. R. FERREIRA²

ABSTRACT The Upper Tietê basin (BAT) is the most densely populated (17.5 million people) hydrologic unit in Brasil. Although superficial resources provide almost the totality of water for the public system, groundwater plays a key role for complementary and private water supply of the region. A coarse estimation has demonstrated that 9 thousand wells are exploiting more than 315 million cubic meters per year (Mm^3/a). The BAT involves: i) pre-Cambrian basement rocks (4238 km^2), corresponding to Embu Complex, São Roque and Serra do Itaberaba groups, and granitoids; and ii) Paleogen and Neogen sediments of the São Paulo sedimentary basin (1452 km^2), including Taubaté Group (Resende, Tremembé, São Paulo, and Itaquaquecetuba formations), and neo-Cenozoic deposits.

This geologic context defines the Crystalline (SAC) and Sedimentary (SAS) aquifer systems. In this work, four new units are suggested: *São Paulo* and *Resende* aquifers, associated to SAS, and *Granitoid Rock* and *Metasedimentary Rock* aquifers, associated to SAC. The SAS units are unconfined to locally semi-confined, isotropic, heterogeneous aquifer with granular porosity. The São Paulo and Resende aquifers present low ($Q/s=0.5 \text{ m}^3/\text{h/m}$) and low-medium ($Q/s=0.9 \text{ m}^3/\text{h/m}$) productivity respectively. The SAC units are unconfined, anisotropic, heterogeneous aquifers with fractured porosity. Due to limited areal expression, the Tremembé and Itaquaquecetuba formations are not considered in this study. The Granitoid Rock Aquifer is constituted by granitoid and gneiss and presents low productivity ($Q/s=0.2 \text{ m}^3/\text{h/m}$). The Metasedimentary Rock Aquifer includes quartzite, mica-schist, amphibolite and carbonated rock, with low-medium productivity ($Q/s=1.4 \text{ m}^3/\text{h/m}$). It is believed that the higher productivity is due to rock double-porosity.

A very extensive work to identify the groundwater pollution risk analyzed the interaction between the aquifer pollution vulnerability map and contaminant load that is, will be or might be applied on the subsurface as a result of human activity. The most dangerous activities were related to 449 industrial plants (mainly metal processing and mechanical engineering), 38 open dumps and 52 urban unsewered sanitation districts. 134 gas station presented underground fuel leakage.

Keywords: Aquifer overexploitation; aquifer pollution vulnerability; groundwater pollution hazard, Upper Tietê Watershed, São Paulo.

RESUMO A Bacia do Alto Tietê (BAT) é a mais populosa (17,5 milhões de pessoas) unidade hidrológica do País. A quase totalidade do abastecimento público é feito por água superficial, muito embora, o recurso subterrâneo desempenhe um papel importante no suprimento complementar privado. Estimativas mostram que 9 mil poços estão explorando mais de 315 milhões de metros cúbicos por ano (Mm^3/ano). A BAT engloba as rochas do embasamento pré-cambriano (4.238 km^2), correspondentes ao Complexo Embu, rochas granitóides e aos grupos São Roque e Serra do Itaberaba; e sedimentos terciários paleógenos e neógenos da Bacia de São Paulo (1.452 km^2), incluindo o Grupo Taubaté (formações Resende, Tremembé, São Paulo e Itaquaquecetuba), e depósitos neoceno-zóicos. Este contexto geológico define dois sistemas aquíferos, o Cristalino (SAC) e o Sedimentar (SAS). Neste trabalho, estes sistemas foram definidos em quatro unidades: aquíferos São Paulo e Resende, associados ao SAS e aquíferos de Rochas Granitóides e de Rochas Metasedimentares. As unidades do SAS são livres a localmente semi-confinadas, heterogêneas, isotrópicas e de porosidade primária granular. Os aquíferos São Paulo e Resende apresentam produtividade baixa (capacidade específica: $Q/s=0,5 \text{ m}^3/\text{h/m}$) e média-baixa ($Q/s=0,9 \text{ m}^3/\text{h/m}$), respectivamente. As formações Tremembé e Itaquaquecetuba não foram estudadas devido a pequena ocorrência. As unidades do SAC são do tipo livre, anisotrópico e heterogêneo e com porosidade por fraturação. O Aquífero de Rochas Granitóides é constituído de granitóides e gnaisses e apresenta produtividades baixas ($0,2 \text{ m}^3/\text{h/m}$). Já o Aquífero de Rochas Metasedimentares inclui quartzitos, micaxistos, anfíbolitos e rochas carbonáticas, com produções médias-baixas ($Q/s=1,4 \text{ m}^3/\text{h/m}$). O maior rendimento deste aquífero é atribuído à dupla porosidade da rocha.

Um extensivo trabalho de identificação de perigo de poluição dos aquíferos integrou o mapa de vulnerabilidade de aquíferos e a classificação da carga contaminante potencial. A maior probabilidade de geração de cargas contaminantes importantes ao aquífero está associada a 449 indústrias, com predominância para o processamento de metal e mecânica; 38 lixões e 52 distritos parcialmente sem esgotamento sanitário. 134 postos de serviço apresentaram vazamento de combustível.

Palavra-Chave: Super-exploração de aquíferos, vulnerabilidade à poluição de aquíferos, perigo de contaminação, Bacia Hidrográfica do Alto do Tietê, São Paulo.

INTRODUÇÃO Aproximadamente 17,5 milhões de pessoas vivem hoje na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BAT). Esta grande ocupação humana se reflete na forma complexa de uso e ocupação da terra e de aproveitamento dos recursos naturais. Muito embora o manancial superficial seja a principal fonte pública de abastecimento, o recurso subterrâneo tem contribuído de forma decisiva para o suprimento complementar de água para a região. Uma grande quantidade de indústrias, condomínios e empreendimentos isolados utilizam os aquíferos como fonte alternativa ou primária para suprirem suas necessidades diárias de água.

A despeito dessa importância não há ainda um programa de proteção e uso racional do recurso hídrico subterrâneo para a BAT. Como resultado, não é conhecida a totalidade dos poços existentes e em operação. Falta também a definição do perfil do usuário do recurso ou mesmo os volumes explorados. Estimativas iniciais têm mostrado que as extrações seriam superiores a 315 milhões de metros cúbicos por ano (Mm^3/ano), resultado do bombeamento de 9 mil poços em operação, a maioria no município de São Paulo.

Este trabalho apresenta uma nova compartimentação das unidades aquíferas que ocorrem na BAT, produto da subdivisão dos dois sistemas aquíferos existentes, o Cristalino e o Sedimentar. Complementar-

mente, são analisados os perigos de poluição dos aquíferos, através da confecção de um mapa de vulnerabilidade e da classificação das cargas contaminantes antrópicas potenciais.

SISTEMAS AQUÍFEROS DA BACIA DO ALTO TIETÊ A Bacia do Alto Tietê (BAT) é uma unidade hidrológica que engloba os domínios da Bacia Sedimentar de São Paulo (1.452 km^2) e as rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino (4.238 km^2) que a circundam. Os sedimentos preenchem um *hemi-graben* basculado para NNW, desenvolvido em terrenos cristalinos representados por granitos sin e pós-tectônicos e por rochas metamórficas, que incluem os migmatitos, gnaisses, xistos e metassedimentos em geral, relacionados ao Complexo Embu e aos grupos São Roque e Serra do Itaberaba (Juliani 1992). Por sua vez, os sedimentos, com espessuras médias de 100 m, pertencem ao Grupo Taubaté (Terciário, Paleógeno), subdividido nas formações Resende, Tremembé e São Paulo, superpostos pela Formação Itaquaquecetuba (Terciário, Neógeno) e por depósitos neoceno-zóicos (Riccomini *et al.* 1992).

Este contexto geológico define duas unidades aquíferas: o *Sistema Aquífero Cristalino* (SAC) e o *Sistema Aquífero Sedimentar* (SAS), que trabalhos anteriores tratavam como aquíferos Cristalino e Sedimentar (DAEE 1975).

1 Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental – Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Rua do Lago, 562. Cidade Universitária, CEP 05508-900. São Paulo (SP), Brasil. E-mail: rhirata@usp.br

2 Instituto Geológico – Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Av. Miguel Stéfano, 3900. Água Funda, CEP 04301-903. São Paulo (SP), Brasil. E-mail: lumartin@igeologico.sp.gov.br

O SAC ocorre nos domínios das rochas cristalinas do embasamento (Fig. 1a). Seus limites coincidem aproximadamente com os divisores de drenagem superficial, nas cotas de 800 a 1.000 m. Segundo o comportamento hidráulico das rochas é possível distinguir duas unidades neste sistema. O primeiro, relacionado às rochas intemperizadas, conforma um aquífero de porosidade granular bastante heterogêneo, de natureza livre, com espessuras médias de 50 m.

Sob o manto de intemperismo e, muitas vezes conectado hidráulicamente, ocorre o aquífero cristalino propriamente dito, onde as águas circulam por descontinuidades rúpteis da rocha (fraturas e falhas abertas). Esta unidade é de caráter livre a semi-livre e heterogêneo e anisotrópico.

Embora recobrindo apenas 25% da área da BAT, o SAS (Fig. 1b) é o mais intensamente explorado. As altitudes médias das colinas situam-se nas cotas 760 m com máximos de 840 m no espigão da Av. Paulista e mínimo de 710 m na soleira de Barueri, onde o sistema é hidráulicamente fechado (Rocha *et al.* 1989). Este sistema aquífero é livre a semi-confinado, de porosidade primária e bastante heterogêneo.

O modelo de circulação regional aceito para a BAT mostra que as águas das chuvas recarregam os aquíferos em toda a sua extensão não impermeabilizada. Outra importante recarga ocorre pelas fugas da rede pública de abastecimento de água e de coleta de esgoto. Uma vez ingressando no aquífero, as águas fluem em direção às drenagens superficiais, suas áreas de descarga. O rio Tietê representa, junto à soleira de Barueri, o ponto de menor potencial hidráulico do aquífero e onde todas as águas drenadas dos dois sistemas aquíferos finalmente fluem.

Características hidráulicas dos sistemas aquíferos

Neste estudo foi criado um novo cadastro de poços tubulares, incluindo os dados mais recentes (a partir da década de 80) do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e de estudos específicos, incluindo Bertolo (1996) e Sabesp-Cepas (1994). O cadastro desenvolvido não teve a pretensão de englobar todos os poços da área de estudo. Seu objetivo foi o de obter dados confiáveis da hidráulica dos sistemas aquíferos e correlacioná-los à nova estratigrafia da Bacia Sedimentar de São Paulo, proposto por Sabesp-Cepas (1994), estabelecendo a hidráulica de cada aquífero (Tabela 1). Neste trabalho quatro novas unidades hidrogeológicas foram propostas: Aquífero de Rochas Granitóides, Aquífero de Rochas Metamórficas, Aquífero Resende e Aquífero São Paulo. A representação cartográfica, em escala 1:100.000 (Hirata & Nunes da Silva 1999), está acessível e pode ser

Figura 1. Modelos conceituais de circulação de água nos sistemas aquíferos (a) Cristalino e (b) Sedimentar

obtida, através de *download*, no site <http://geotig.igc.usp.br>, no Banco de dados espaciais da Bacia do Alto Tietê.

O Sistema Aquífero Cristalino (SAC) apresenta características produtivas diferenciadas segundo o tipo de litologia dos aquíferos. É possível distinguir duas unidades, aquela associada às rochas granitóides e filitos (Aquífero de Rochas Granitóide), com capacidade específica (Q/s) média de $0,20 \text{ m}^3/\text{h/m}$ e aquela associada às rochas metamórficas, com Q/s de $1,35 \text{ m}^3/\text{h/m}$ (Aquífero de Rochas

Tabela 1. Potencial hídrico subterrâneo da Bacia do Alto Tietê

Sistema Aquífero	Aquíferos Propostos	Número de poços estudados	Profundidade média dos poços (m)	Vazão média (m^3/h)	Capacidade específica ($Q/s \text{ m}^3/\text{h/m}$)		
					média	mediana	desvio padrão
Sedimentar	São Paulo (Osp)	17	129	9,51	0,48	0,49	1,20
	Resende (Orl, Orf)	111	165,5	15,24	0,91	0,31	0,79
Cristalino	Rochas Granitóides (P _{ef} , P _{eg} , P _{ego} , P _{egn})	90	198,5	9,07	0,20	0,09	0,30
	Rochas Metassedimentares (P _{ea} , P _{eq} , P _{ex})	73	176,4	17,48	1,35	0,29	4,63

Osp – Predominantemente camadas de areia e cascalho

Orl – Predominância de lamitos arenosos a argilosos, com seixos e fragmentos de quartzo

Orf – Predominância de lamitos seixosos com lamitos arenosos subordinados

P_{ef} – Predominância de filitos ocorrendo subordinadamente xistos

P_{eg} – Rochas granitóides predominantemente maciças de granulação variada

P_{ego} – Rochas granitóides orientadas e/ou foliadas, de granulação variada, incluindo porções gnáissicas, migmatíticas e blastomiloníticas associadas

P_{egn} – Rochas predominantemente gnáissicas, incluindo, porções locais de rochas granitóides orientadas, xistos feldspatizados e milonitos diversos subordinados

P_{ea} – Anfibolitos

P_{eq} – Predominância de quartzitos, com ocorrências subordinadas de metassiltitos e xistos

P_{ex} – Predominância de micaxistos, com quartzitos e metassiltitos subordinados, localmente feldspatizados

Metamórficas). DAEE (1975), analisando indistintamente ambos os aquíferos, obteve transmissividades entre 0,4 e 14 m²/dia (valores indicativos, testes de bombeamento analisados segundo Cooper-Jacob). Sabesp-Cepas (1994) estabeleceram para o SAC uma porosidade eficaz (Sy) de 3%.

É certo que os poços localizados em áreas de maior fraturamento da rocha irão apresentar melhores vazões, porém não existe até o momento uma análise regional da produtividade de poços associados às estruturas geológicas na Bacia do Alto Tietê. As maiores vazões relacionadas às rochas metamórficas provavelmente estão associadas à dupla porosidade da rocha (primária e de fratura).

As características hidráulicas da porção intemperizada do SAC foram estudadas por Rebouças (1992), que mostra que a condutividade hidráulica é função do nível do perfil de alteração da rocha. As condutividades hidráulicas variam de muito baixas (1×10^{-6} a 1×10^{-7} m/s), no terço superior do perfil de alteração, a muito alta (1×10^{-3} a 1×10^{-4} m/s) na zona de transição entre a rocha relativamente alterada e a rocha sã.

No SAS foi possível identificar duas novas unidades: uma associada à Formação São Paulo, com Q/s médio de 0,48 m³/h/m e outra à Formação Resende, mais produtiva, com Q/s médio de 0,91 m³/h/m. Sabesp-Cepas (1994) atribuem para o SAS uma porosidade eficaz (Sy) média de 6%, e DAEE (1975) valores de transmissividade médios de 50 m²/dia, variando de 15 a 70 m²/dia. As formações neocenozóicas, Tremembé e Itaquaquecetuba, não definem unidades aquíferas devido a sua pequena expressão em área.

É certo que dentro de uma mesma unidade aquífera há uma grande variação na produtividade. Estudos de maior detalhamento serão necessários para estabelecer um zoneamento mais detalhado, incluindo um cadastro mais amplo dos poços em exploração na BAT. Neste estudo foi possível distinguir os municípios que se lhes associam as maiores produtividades aquíferas. Os municípios, cujos poços exploram o SAC e que apresentam as maiores produtividades, são: Cajamar (Q/s 2,79 m³/h/m, médio), Santana do Parnaíba (Q/s 2,20 m³/h/m), Santo André (Q/s 1,45 m³/h/m) e Pirapora do Bom Jesus (Q/s 1,10 m³/h/m). Já os que exploram o SAS são os municípios de São Paulo [zonas norte (Q/s 3,04 m³/h/m), leste e centro (Q/s 1,15 m³/h/m)] e de Guarulhos (Q/s 1,05 m³/h/m). No SAS as maiores produtividades estão associadas às áreas de maior espessura saturada e predominância da Formação Resende com relação à Formação São Paulo. No caso do SAC, a maior produtividade relaciona-se à ocorrência do Aquífero de Rochas Metamórficas.

A recarga dos sistemas aquíferos A recarga dos sistemas aquíferos é feita por dois mecanismos distintos: a natural, com águas da precipitação que infiltram no solo e atingem o aquífero, e a induzida, representada por águas provenientes de fugas das redes de água e esgoto.

Devido à interferência antrópica nos cursos de água superficiais, incluindo a construção de obras de regularização, reversão de cursos de água e intensa urbanização, há dificuldade na análise do regime hidrológico do Alto do Tietê (Rocha *et al.* 1989). Assim, o DAEE (1975) considerou uma área de 1.460 km², a montante de Itaquaquecetuba, no período de 1964 a 1975, para proceder a um balanço que se aproximasse das condições naturais da bacia.

Os resultados mostraram: i) pluviometria média de 1.520 mm/ano, com 20% de variabilidade; ii) evapotranspiração real média de 940 mm/ano, com 20% de variabilidade; iii) descarga média de 840 Mm³/ano ou 575 mm/ano, distribuídas em escoamento base de 520 Mm³/ano e escoamento superficial de 320 Mm³/ano (DAEE 1975).

Assim, a contribuição dos aquíferos à descarga do rio seria de 62%, que representariam 23% da precipitação total anual. Com base nesses dados, Rocha *et al.* (1989) definiram que há uma recarga garantida proveniente dos domínios aquíferos das rochas cristalinas alteradas, da ordem de 0,36 Mm³/km²/ano, ou seja, uma transferência de 1.500 Mm³/ano para os depósitos sedimentares e sua descarga junto aos rios. Os autores consideram portanto que a recarga do SAS é proveniente da área de afloramento do embasamento cristalino alterado, não levando em conta os mecanismos de recarga da área dos sedimentos da bacia. Acrescentam ainda que as recargas provenientes das perdas da rede de distribuição de água seriam da ordem de 15 m³/s ou cerca de 473 Mm³/ano (Rocha *et al.* 1989), totalizando 1.973 Mm³/ano para toda a BAT.

Iritani (1993) analisando os fluxos de água da Cidade Universitária

da Universidade de São Paulo, determinou uma recarga específica de 0,25 Mm³/km²/ano, considerando que a área apresentava pouca impermeabilização e afloramento de sedimentos relativamente permeáveis, em sua maior extensão.

Sabesp-Cepas (1994) adotaram o valor médio de recarga utilizado por Rocha *et al.* (1989) de 0,36 Mm³/km²/ano no estudo da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e complementaram que as fugas da rede da Sabesp para a mesma região somariam 27% dos 1.419 Mm³/ano, ou seja, 383 Mm³/ano (12,2 m³/s).

Menegasse-Velásquez (1996) apresentou um outro método de avaliação de recarga, baseado na flutuação dos níveis de água dos aquíferos sedimentares nos bairros de Sumaré e Pompéia (São Paulo). A autora encontrou valores médios de 0,06 Mm³/km²/ano (60 mm/ano), em áreas com índice de ocupação de 73%. Conclui finalmente que se não houvesse ocupação da área as recargas ascenderiam a 25% da precipitação, valor bastante próximo ao de Rocha *et al.* (1989).

USO DO RECURSO HÍDRICO SUBTERRÂNEO E DEMANDA

O número total de poços tubulares, cacimbas e mini-poços perfurados e em operação na BAT é desconhecido. O estudo desenvolvido por DAEE (1975) foi o único de abrangência até o momento que permitiu, na época, uma aproximação do número de poços. O estudo contabilizava 4.000 poços tubulares, com indicação de forte incremento, e outros 40.000 poços cacimba para a Região da Grande São Paulo. Rocha *et al.* (1989) propõem um número de 7.000 poços para a época, a partir de projeções do estudo do DAEE (1975). Sabesp-Cepas (1994) também estimaram a existência de mais de 7.000 poços e dezenas de milhares de poços do tipo cacimba. Este número foi baseado no cadastro desenvolvido em cinco empresas perfuradoras de São Paulo, que apresentou para o período de 1986 a 1992 a razão de 1.500 poços perfurados por ano. Complementarmente, Pacheco (1984), estudando a região centro-oeste do município de São Paulo notou que, onde o DAEE (1975) cadastrou pouco mais de uma centena de poços, o autor identificou 475 poços, ou seja, um incremento de 1:4,8 poços em 5 anos. O mesmo trabalho mostrou também que do total de 475 poços apenas 37% não estavam mais operando.

Existem mais de 37 empresas atuando na bacia, entre as registradas e não registradas, das quais 20 são aquelas que perfuram somente mini-poços. É possível, portanto, que existam hoje mais de 13.000 perfurados na BAT, dos quais 30% não se encontram mais em operação, restando aproximadamente 9.000, predominantemente em São Paulo e na região do ABCD e Guarulhos. É importante lembrar que com a difusão da perfuração por sistema roto-pneumático incrementou-se a velocidade de construção dos poços, quando comparada aos sistemas tradicionais de percussão. Hoje, é provável que estejam sendo perfurados 900 poços tubulares anualmente na BAT.

Quanto aos poços cacimbas acredita-se, ao contrário, que o número esteja diminuindo, devido a maior extensão da rede pública de água e à troca de poços cacimba por poços tubulares, mais confiáveis, de maior produção e mais protegidos de contaminantes.

Outro tipo de obra de captação é o mini-poço. Obra de pequeno diâmetro, até no máximo de 8 polegadas, revestido com tubos de PVC de 4 a 6 polegadas, de até 70 m de profundidade e que pode extrair até pouco mais de 1 m³/h. Este poço restringe-se às áreas de sedimentos e de rochas cristalinas alteradas. Devido ao baixo custo e ao método de perfuração que empregam, o número total deste tipo de poço está aumentando e a sua identificação é bastante difícil, sobretudo por que muitas das empresas de perfuração não possuem qualquer registro comercial. Uma avaliação expedita das empresas que trabalham com esse tipo de obra e que atuam na BAT mostrou que elas perfuram em média 100 poços/mês. Considerando que esse tipo de poço se popularizou nos últimos cinco anos é provável que existam hoje na BAT um total de 4.500 perfurados.

Estimativas de vazões exploradas por aquíferos podem ser feitas, de forma preliminar, a partir dos poucos dados existentes. Considerando-se que haja 9.000 poços na BAT em operação, com vazão média por poço de 123 m³/dia, a produção total explorada seria de 404 Mm³/ano (12,8 m³/s). A vazão média contínua de 123 m³/dia foi obtida a partir do estudo de Pacheco (1984), analisando 180 poços no município de São Paulo, muito embora vazões individuais, em caráter contínuo, de 4 m³/h sejam hoje consideradas mais próximas da realidade. Neste caso, as vazões totalizadas atingiriam a 315 Mm³/ano (10,0 m³/s). Considerando-se os 640 poços outorgados pelo DAEE na BAT (até julho de 1999), verifica-se, entretanto, que a vazão média por poço é

de 224 m³/dia. Esta vazão representa o valor máximo permitido de exploração, não indicando necessariamente que esta seja de operação. Baseando-se nesta vazão, o volume total explorado na BAT pelos 9.000 poços em operação seria de 736 Mm³/ano (23,3 m³/s), valor irreal para a bacia. A vazão total explorada pelos 4.500 minipoços não deve exceder a 1 Mm³/ano (0,03 m³/s).

O perfil do usuário do recurso hídrico na BAT também é desconhecido. Pacheco (1984) estudando o município de São Paulo mostrou que os poços tubulares eram distribuídos segundo usuários em: 75% industrial, 12% comercial, 10% domiciliar e 6% público. O cadastro desenvolvido para este estudo mostrou a predominância para o uso industrial (43%), seguido do domiciliar (23%), comércio de água (8%), público (5%), recreativo (4%) e outros (17%).

As águas subterrâneas representam um importante recurso no abastecimento público em alguns municípios da BAT. Santana do Parnaíba, Biritiba Mirim, Mairiporã e Salesópolis são parcialmente abastecidos por água subterrânea, enquanto que Cajamar e Pirapora do Bom Jesus são totalmente por ela supridos (Consórcio Hidroplan 1995).

RESERVAS PERMANENTES, REGULADORAS E EXPLORÁVEIS Para se determinar a disponibilidade de água de um aquífero para um uso qualquer é importante definir a suas reservas, ou seja, a quantidade de água armazenada no substrato rochoso ou no sedimento, passível de ser utilizada pelo bombeamento de um poço ou grupo de poços.

Novamente os poucos dados de campo disponíveis fazem com que as avaliações de reservas sejam somente indicativas, e estudos mais detalhados deverão ser conduzidos para uma melhor precisão dos resultados.

A Tabela 2 mostra os parâmetros básicos para a definição das reservas dos sistemas aquíferos da BAT.

Sabesp-Cepas (1994) estimaram um volume total de água subterrânea, ou reservas permanentes, de 6.357 Mm³ no domínio do Sistema Aquífero Cristalino e de 8.785 Mm³ no domínio do Sistema Aquífero Sedimentar, perfazendo um total de 15.142 Mm³ estocados na Bacia do Alto Tietê. Este volume alcança cifras de 18.700 Mm³ quando se considera a área da RMSP. Este cálculo foi definido a partir da multiplicação da área das unidades pela vazão específica (Sy) e a espessura aquífera saturada.

Tabela 2. Reservas permanente, reguladora e explorável dos aquíferos da Bacia do Alto Tietê

Sistema Aquífero	Área (km ²)	Espessura Média (m)	Vazão Específica Média (Sy)	Coefficiente de Armazenamento Médio (S)	Taxa de Recarga Média (mm/ano)
Cristalino (SAC)	4.238	50	0,03 ⁽¹⁾	-	355 ⁽²⁾
Sedimentar (SAS)	1.452	100	0,06 ⁽³⁾	0,001 ⁽³⁾	355 ⁽²⁾
Totais	5.690	-	-	-	60 ⁽⁴⁾

Sistema Aquífero	Reserva Permanente (Mm ³)	Reserva Reguladora (Mm ³ /ano)	Reserva Explorável ⁽⁴⁾ (Mm ³)
Cristalino (SAC)	6.357	sem/ocupação: 1.505 ⁽⁵⁾	752
Sedimentar (SAS)	semi-confinada: 73 ⁽⁶⁾ + porção livre: 8.712	sem ocupação: 515 ⁽⁴⁾ com ocupação: 87 ⁽⁴⁾ + 385 ⁽⁷⁾	257 236
Totais	15.142	sem ocupação: 2020 ⁽⁴⁾ com ocupação: 1977	sem ocupação: 1010 com ocupação: 988

⁽¹⁾ DAE (1975)

⁽²⁾ sem ocupação

⁽³⁾ Sabesp-Cepas (1994)

⁽⁴⁾ Menegasse-Velásquez (1996) considerando 73% da ocupação do terreno (60 Mm³/km²/ano)

⁽⁵⁾ Porção semi-confinada do aquífero (50% da área)

⁽⁶⁾ Recarga natural de 0,355 Mm³/km²/ano, sem ocupação

⁽⁷⁾ Fuga da rede pública (27%)

⁽⁸⁾ Considerando as reservas exploráveis como 50% das reservas reguladoras

As reservas reguladoras ou dinâmicas correspondem à parcela da água infiltrada no solo a partir das chuvas e que é restituída pelos aquíferos aos rios, alimentando suas vazões de base e correspondendo à recarga natural dos aquíferos. A este volume pode também ser acrescida a água infiltrada artificialmente ao solo a partir das perdas das redes de distribuição de águas e esgoto, cuja importância na recarga do Sistema Aquífero Sedimentar foi discutida por Giancuri & Lopes (1980) e Rebouças (1980).

Em uma situação de não ocupação, a recarga média é de 355 mm/ano (0,36 Mm³/km²/ano). Considerando-se as áreas dos sistemas aquíferos, chega-se às reservas reguladoras de 1.505 e 515 Mm³/ano, respectivamente para o SAC e SAS. Quando se admite que a maior

parte do SAS está ocupada e parcialmente impermeabilizada, a recarga se reduz a 0,06 Mm³/km²/ano (Menegasse-Velásquez 1996), totalizando 87 Mm³/ano para esse sistema. Entretanto, a urbanização induz uma recarga artificial que somam 385 Mm³/ano. Nesta situação, as reservas reguladoras para o SAS são de 472 Mm³/ano e para ambas as unidades, de 1.977 Mm³/ano. Em situação natural, sem ocupação, estas seriam de 2.020 Mm³/ano (Fig. 2). As reservas exploráveis ou a disponibilidade correspondem a uma fração de 50% das reservas reguladoras (Rebouças 1976). Considerando-se este valor limite, estas reservas seriam de 752 Mm³/ano para o SAC e 236 Mm³/ano para o

Figura 2. Balanço hídrico esquemático da Bacia do Alto Tietê

SAS, totalizando 988 Mm³/ano (31 m³/s).

Interferências entre poços tubulares e a exploração sustentável dos aquíferos O bombeamento contínuo de poços tem causado um sensível rebaixamento dos níveis de água de aquíferos, indicador de uma super-exploração ao aquífero ou a alta interferência de poços em bombeamento. Entende-se como super-exploração a extração de água subterrânea sem controle e que redunde em danos ao reservatório, dentro de um horizonte de tempo estabelecido.

Campos (1988) analisando o município de São Paulo, a partir da comparação dos níveis de água do SAS em dois períodos de tempo, nas décadas de 70 e 80, concluiu que há processos de abatimento contínuo dos níveis de água dos aquíferos, indicando processos de super-exploração. Na zona leste da cidade de São Paulo foram observadas perdas de até 50% da espessura saturada do aquífero e por conseguinte de suas reservas e disponibilidades hídricas.

Considerando-se que existam 9.000 poços tubulares na BAT em operação, com vazões médias contínuas de 96 m³/dia, pode-se chegar a uma extração total de 315 Mm³/ano, inferior às fugas da rede de distribuição de água potável, de 385 Mm³/ano. Caso seja utilizada a vazão média contínua dos poços outorgados (224 m³/dia), a extração total ascenderia a 981 Mm³/ano. Neste segundo caso, a extração se igualaria a reserva explorável dos dois sistemas aquíferos, de 988 Mm³/ano, mas dentro dos limites da reserva reguladora de 1.977 Mm³/ano.

Em um cálculo inverso, considerando-se as reservas exploráveis em 236 Mm³/ano e 752 Mm³/ano para as unidades SAS e SAC e a vazão média contínua de 96 m³/dia por poço, estas reservas seriam suficiente para 6.735 e 21.461 poços respectivamente. Considerando-se a vazão contínua de 9,3 m³/h, entretanto, o total se reduziria a 2.900 e 9.200 poços. Dentro desses valores, não são observados problemas de super-exploração. Entretanto, os poços não estão distribuídos homogeneamente nos dois sistemas aquíferos. Mesmo quando as extrações encontram-se dentro dos limites das reservas exploráveis de água, as características hidráulicas dos aquíferos mostram que, o adensamento de obras de captação pode provocar problemas localiza-

dos de forte rebaixamento dos níveis aquíferos, devido à interferência entre poços.

A Figura 3 ilustra as interferências prováveis entre dois poços explorando água do SAS, em função da distância e da vazão explorada. É possível notar que em alguns casos a interferência poderia ser maior que 70 m, inviabilizando a segunda captação.

A INFLUÊNCIA DAS ATIVIDADES ANTRÓPICAS NOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

A atividade humana na BAT é a mais complexa do País. Propor estudos de detalhe, que incluam a monitoração de todas elas, seria impraticável e mesmo pouco realista. Em qualquer programa de proteção da qualidade dos recursos hídricos é necessário diferenciar aquelas atividades que apresentam maiores perigos à contaminação dos aquíferos, daquelas que são, pelas suas dimensões ou características de processos, pouco perigosas. Para identificar essas atividades, adotou-se o conceito de perigo de poluição de aquíferos sugerido por Foster & Hirata (1988), que se define pela interação entre dois fatores: i) a carga contaminante potencial que está ou poderá vir a ser aplicada na superfície do solo, como resultado de uma atividade humana; e ii) a vulnerabilidade natural à poluição de aquíferos que é a susceptibilidade de um aquífero em ser degradado por produtos poluentes. A vulnerabilidade é resultado das características hidráulicas e físico-químicas do solo e/ou da rocha ou sedimento que compõe a zona não-saturada ou o aquitardo e que permite a retardação, dispersão e degradação da carga contaminante antrópica.

Desta forma, o conceito de perigo de contaminação de aquíferos pode ser entendido como a probabilidade de que as águas subterrâneas possam ser degradadas em concentrações acima dos padrões de qualidade de água potável, mas não necessariamente que venham a conta-

minar fontes de abastecimento (poços, p.ex.), uma vez que esta análise depende das características de transporte na zona saturada do aquífero.

Com base nesse esquema, é possível identificar situações de alta vulnerabilidade do aquífero, mas virtualmente baixo perigo de poluição das águas subterrâneas, quando a carga contaminante potencial é reduzida ou inexistente. De igual maneira, uma área será de baixo perigo quando a sua vulnerabilidade for baixa, mesmo que existam cargas contaminantes elevadas. O perigo extremo pode ocorrer quando ambas, carga e vulnerabilidade, forem elevadas.

Caracterização da vulnerabilidade à poluição de aquíferos

Um número considerável de aproximações e generalizações deve ser definido para uma cartografia de vulnerabilidade de aquíferos, uma vez que alguns dos dados não são disponíveis ou não são conhecidos para estudos regionais (Foster & Hirata 1988).

A vulnerabilidade de cada um dos quatro aquíferos foi definida a partir de suas características geológicas (tipo de rocha que compõe a zona não saturada) e hidráulicas (tipo de aquífero e sua geometria). Adicionalmente cada aquífero foi analisado em termos de sua produção relativa, que apresenta correspondência com sua permeabilidade. O mapa de vulnerabilidade de aquíferos à poluição pode ser visto e obtido no site: <http://geolig.igc.usp.br>, no Banco de dados espaciais da Bacia do Alto Tietê e os índices de classificação na Tabela 3.

A classificação em três níveis de vulnerabilidade, alto, médio e baixo, é relativa, muito embora entenda-se que um aquífero com alto índice é aquele passível de ser contaminado por quase todos os tipos de contaminantes, incluindo as bactérias, que apresentam baixa persistência. A média vulnerabilidade relaciona-se à aplicação de contaminantes com persistência e/ou mobilidade, como metais pesados e alguns produtos orgânicos sintéticos, incluindo os aromáticos, e a baixa vulnerabilidade associa-se a aquíferos susceptíveis apenas aos produtos muito persistentes e móveis, como solventes sintéticos, sais e nitrato.

Fontes potenciais de poluição As principais fontes potencialmente contaminantes foram cadastradas e analisadas neste trabalho, incluindo-se: atividade industrial, área de destinação final de resíduo sólido domiciliar e de outras origens; posto de serviço com estocagem subterrânea de combustível e área urbanizada sem rede de coleta de esgoto.

É importante assinalar que o órgão responsável pelo controle ambiental no Estado de São Paulo (CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental) tem mostrado pouca familiaridade com a identificação, o cadastro, a monitoração e o acompanhamento de atividades antrópicas potencialmente contaminantes para as águas subterrâneas. Desta forma, os dados secundários existentes, e utilizados neste estudo, muitas vezes são aqueles onde a ênfase se dirige à qualidade de ar ou água superficial.

ATIVIDADE INDUSTRIAL As atividades industriais, devido às altas concentrações de produtos químicos que manuseiam e algumas práticas de deposição de efluentes e produtos que empregam, são seguramente as que apresentam maior perigo para a água subterrânea. Há

Figura 3. Interferência média no ponto equidistante de dois poços tubulares explorando o Sistema Aquífero Sedimentar, em função da vazão e distância entre eles (não se considera as perdas de carga do poço)

Tabela 3. Índices de vulnerabilidade das unidades hidrogeológicas da Bacia do Alto Tietê

Aquífero	Zona Não-Saturada	Vulnerabilidade Intrínseca		Valor da Água		Classificação da Vulnerabilidade
		Acesso Hidráulico	Atenuação	Importância do recurso (densidade de usuários)	Potencialidade Hídrica	
Unidade Neo-Cenozóica Livre, porosidade primária	Predominantemente arenito-argilosas, subordinadamente com intercalações de cascalhos	*** Alta	*** Baixa	* Baixa	* Baixa	Alta vulnerabilidade (somente para captações rasas)
Aquífero Resende Livre a semi-confinado, porosidade primária	Predominância de lamitos arenosos a argilosos com seixos e intercalações de até 1 m de areias e cascalhos	*** Alto	** Média	*** Alta	** Média	Alta vulnerabilidade
Aquífero de Rochas Graníticas Livre e fraturado	Alteração de rochas metassedimentares, incluindo quartzitos, xistos, metassiltos, metacarbonáticas e suas correspondentes sãs em profundidade	** Médio	** Média	** Média	** Média	Média vulnerabilidade quando o manto de alteração for espesso (>20 m), caso contrário, alta. Em rochas metacarbonáticas, alta vulnerabilidade
Aquífero São Paulo Livre a semi-confinado, porosidade primária	Predominância de camadas de cascalhos e areias	** Médio	** Média	*** Alta	** Média	Média vulnerabilidade
Aquífero de Rochas Metassedimentares Livre e fraturado	Alteração de rochas ígneas e metamórficas, incluindo granitos, gnaisses e filitos e suas correspondentes sãs em profundidade	** Médio	*** Baixa	** Média	* Baixa	Média-baixa vulnerabilidade quando o manto de alteração for espesso (>20 m), caso contrário, alta

*** -> maior para menor influência na elevação do índice de vulnerabilidade de aquífero

também uma grande dificuldade em se estimar a carga contaminante que pode atingir o aquífero de forma simples e confiável.

Para este estudo, foi utilizado o cadastro de atividades industriais da CETESB na BAT, construído ao longo dos anos para auxiliar no controle das emissões atmosféricas, de efluentes líquidos e de resíduos sólidos. A classificação das atividades foi adaptada do método de Foster & Hirata (1988). Todas as atividades foram agrupadas em três conjuntos (elevada, moderada e reduzida probabilidade de geração de carga contaminante ao aquífero), a partir do ramo de atividade. Este método é uma primeira aproximação para a identificação do grau de perigo e da complexidade da área, sendo suficiente e adequado, quando for interpretado de forma relativa, dentro do universo de atividades analisadas (Johansson & Hirata 2000).

Das 958 indústrias cadastradas, 126 (13%) apresentam reduzido potencial de contaminação, 383 (40%) moderado e 449 (47%) elevado. O município de São Paulo concentra 53% (503 indústrias) das atividades analisadas, sendo que 57 (11,3%) apresentam potencial reduzido, 209 (41,6%) moderado e 237 (47,1%) elevado. Entre as atividades industriais que apresentam o maior perigo potencial estão principalmente as de processamento de metais (195 atividades) e mecânica (105). Com moderado potencial estão as indústrias têxteis (151) e de ferro e aço (114) e reduzido, as alimentícias e de bebidas (100).

POSTOS DE SERVIÇOS O vazamento dos postos de serviço está relacionado a dois momentos distintos: quando detectado logo após a instalação, normalmente relacionado a fugas pelas conexões entre tanque e bomba, e posteriormente, depois de alguns anos, quando o tanque apresenta vazamento, normalmente devido à corrosão. Existe também uma forte correlação entre idade dos tanques e o aumento dos casos de vazamentos. Tanques de material plástico e/ou aqueles de paredes duplas têm mostrado maior resistência à corrosão e são ambientalmente mais seguros.

Até 1994 foram registrados 137 postos com vazamento na BAT. Deste total, 87 encontram-se no município de São Paulo. O número de postos com vazamento comprovado representa somente 5,3% dos 2.585 postos existentes (CETESB 1997 *apud* Cunha 1997). Nos Estados Unidos, estima-se em torno de 50% (USEPA 1996). Transpondo

este valor para a BAT, isso significaria que cerca de 1.300 postos poderiam ter algum tipo de vazamento de combustíveis.

Para uma avaliação de perigo de poluição de aquíferos, foram identificados os postos com problemas de vazamento e relacionados à vulnerabilidade do aquífero. Desta forma, verifica-se que 41 estão em área de alta vulnerabilidade; 50 em média/alta; 8 em média; 34 em média/baixa e 1 em baixa vulnerabilidade. As atividades de maior perigo encontram-se localizadas nos municípios de São Paulo (33 postos de serviço); Embu (2); Osasco (2); São Bernardo do Campo (2), Santo André (1) e Mogi das Cruzes (1).

RESÍDUOS SÓLIDOS A destinação final dos resíduos sólidos domiciliares e industriais, incluindo lixões e aterros sanitários, é uma das atividades onde a ocorrência de contaminação é mais frequente. É quase possível afirmar que todos os lixões e a maioria dos aterros sanitários no País apresentam algum impacto nos aquíferos.

A Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, através da CETESB, realizou um inventário e classificação de todos os empreendimentos no Estado de São Paulo, incluindo aqueles localizados na BAT. Os dados foram disponibilizados na Resolução SMA 13, de 27 de fevereiro de 1998. Em cada localidade, 41 itens foram checados e divididos em três aspectos: características do local, infra-estrutura implantada e condições operacionais. Alguns destes itens apresentam interesse direto à água subterrânea, como profundidade do nível freático, permeabilidade do solo, recobrimento do lixo, monitoração do aquífero superficial, entre outros. A soma ponderada destes fatores definiu o Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos, o IQR. De acordo com a classificação, verifica-se que 65% dos municípios da bacia apresentam deposição inadequada de seus resíduos, seguidos por 29% controlada e 6% adequada. Analisando os volumes de resíduos, nota-se que 78% estão em situação controlada, 18% inadequada e 4% adequada. O trabalho entende como adequado os aterros e lixões que são seguros do ponto de vista ambiental e sanitário. Já o termo controlado significa deficiência no sistema e inadequado quando nenhum ou quase nenhum cuidado é tomado na deposição do resíduo, causando sérios impactos ao ambiente.

Hassuda (1997), utilizando-se dos dados do cadastro da CETESB

Figura 4. Aterros e lixões na Bacia do Alto Tietê (a partir dos dados da CETESB 1997)

(1997) analisou todas as 117 áreas de deposição de resíduos sólidos na RMSP. O trabalho definiu áreas críticas baseando-se em critérios de saúde e vida da população (28 localidades, com elevado perigo); abastecimento público de água (8 localidades); conflitos com outros usos da terra (4); impacto às águas subterrâneas e superficiais (8) e conflitos com a produção agropecuária (5). As áreas com possíveis impactos no abastecimento público de água estão localizadas em Diadema, Embu, Mauá, São Bernardo do Campo, Mogi das Cruzes, Salesópolis e São Paulo (2 localidades). As áreas onde se detectaram problemas com relação às águas superficial e subterrânea localizam-se nos municípios (em ordem decrescente): Diadema, São Paulo (2 localidades), São Bernardo do Campo, Mogi das Cruzes, Poá, Embu e Mauá.

Entre todos os 117 empreendimentos estudados, 27 estão localizados em áreas de alta; 9 em média/alta; 40 em média; 35 em média/baixa e 1 em baixa vulnerabilidade. Entre essas atividades identificam-se 94 lixões, 7 bota-foras, 12 aterros controlados, 3 aterros industriais e 1 aterro de entulhos (Fig. 4).

SANEAMENTO IN SITU Os sistemas de saneamento *in situ* (fossas negras e sépticas) são fontes importantes de contaminação das águas subterrâneas. As fossas sépticas, mesmo quando bem construídas e operadas, geram cargas de nitrogênio capazes de contaminar os aquíferos. Estes sistemas não causam problemas quando a densidade de fossas sépticas é baixa (< 50-100 hab/ha) e/ou quando localizadas em áreas de alta recarga do aquífero. Já as fossas negras, além do nitrato, também estão associadas à baixa remoção de organismos patogênicos, sendo bastante grave em áreas densamente ocupadas, onde o abastecimento de água é feito por poços cacimba.

A partir dos dados da população total dos distritos censitários dos municípios e o número de economias atendidas pela rede de coleta de esgoto, cadastradas no Censo de 1991 (FIBGE 1991), foi possível a definição das cargas contaminantes potenciais. O número de pessoas não atendidas pela rede foi calculado multiplicando-se as economias pelo número médio de 5 moradores. Para a determinação da carga contaminante potencial de saneamento *in situ* para a água subterrânea considerou-se o valor sugerido por Foster & Hirata (1988) de 4 kg/hab/ano de nitrato-potencial.

Os valores de carga foram agrupados em intervalos e classificados em elevado, moderado e reduzido potencial de geração de carga

contaminante, a partir dos seguintes valores de corte: reduzida carga <40.000 kg de nitrato/ano; elevada carga >100.000 kg de nitrato/ano e moderada entre os dois valores. Estes valores foram estabelecidos a partir da distribuição de cargas obtidas nos municípios e distritos estudados.

Como se desconhece a exata localização das áreas não saneadas, os índices foram aplicados em toda a área dos distritos (Fig. 5). De acordo com a classificação relativa, 74 distritos apresentam potencial reduzido de contaminação, 42 moderado e 42 elevado. Alguns municípios como Cajamar, Pirapora do Bom Jesus, Ribeirão Pires, Salesópolis e São Caetano do Sul apresentam potencial reduzido, enquanto que Biritiba Mirim, Caieiras, Embu-Guaçu, Jandira, Juquitiba, Mairiporã e Rio Grande da Serra mostram potencial moderado e Arujá, Diadema, Embu, Francisco Morato, potencial elevado. O município de São Paulo apresenta 20 distritos com potencial elevado, 25 moderado e 51 reduzido.

A interação do saneamento *in situ* com o mapa de vulnerabilidade permitiu definir áreas de maior perigo de contaminação da água subterrânea. Assim são classificados 52 distritos com alto perigo de contaminação, 55 com médio e 54 com baixo perigo.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES É proposta uma nova divisão para as unidades aquíferas da Bacia do Alto Tietê. Quatro novas unidades, associadas aos dois sistemas existentes, são sugeridas. Associadas ao Sistema Aquífero Cristalino (SAC): Aquífero de Rochas Metassedimentares e Aquífero de Rochas Granitoides; e as associadas ao Sistema Aquífero Sedimentar (SAS): Aquífero Resende e Aquífero São Paulo. Estas unidades hidroestratigráficas foram cartografadas na escala 1:100.000 e caracterizadas em suas capacidades produtivas e vulnerabilidade à poluição.

Embora a água subterrânea atue como uma fonte complementar para o abastecimento privado na Bacia do Alto Tietê não se conhece ainda o seu valor econômico ou a sua dimensão social. Estima-se que 9.000 poços tubulares extraíam aproximadamente 315 Mm³/ano (10,0 m³/s). Esta exploração encontra-se dentro dos limites aceitáveis de extração para a BAT, considerando-se os valores de recarga dos sistemas aquíferos. Deve ser ressaltado, entretanto, que o desconhecimento do usuário do recurso, da distribuição espacial dos poços, dos valores confiáveis de recarga do sistema e da densidade das obras de captação

Figura 5. Geração de carga contaminante potencial por saneamento *in situ* nos distritos municipais da Bacia do Alto Tietê

impõem incertezas que devem ser consideradas em um programa de gestão do recurso hídrico subterrâneo. Outro ponto a ser considerado é que a distribuição não homogênea dos poços na BAT pode causar problemas localizados de super-exploração ou mesmo de fortes interferências entre poços.

O perigo de poluição do recurso hídrico subterrâneo é presente. As atividades de maior potencial de geração de cargas contaminantes ao aquífero são 449 indústrias, com predomínio para as de metal e mecânica; 8 lixões; e 62 distritos censitários de elevada carga contaminante por falta de esgotamento sanitário (dos quais 52 definidas como de alto perigo) e pelo menos 134 postos de serviço que apresentaram vazamento de combustível. O cruzamento destas informações com o mapa de vulnerabilidade de aquíferos estabeleceu áreas e atividades com maior perigo de contaminação de aquíferos.

A BAT carece de um programa de gestão dos recursos hídricos subterrâneos, que deveria ser imediatamente implementado sob o risco de degradação irreversível dos aquíferos e perda do recurso. A base técnica para este trabalho deveria levar em consideração: cadastramento das obras de captação subterrânea; identificação do usuário do recurso; estabelecimento de zonas críticas de super-exploração do aquífero e um sistema de licença e outorga mais atuantes. Com relação à qualidade, os estudos até hoje implementados permitiram estabelecer as atividades com maior probabilidade de geração de carga contaminante. Junto a estas atividades deveriam ser iniciados trabalhos de detalhamento e identificação de riscos à população usuária do recurso hídrico subterrâneo.

AGRADECIMENTOS Os autores gostariam de agradecer à Dra. Célia Surita pelo auxílio no cadastro dos poços tubulares deste estudo.

Referências

- Bertolo, R. A. 1996. *Relações entre Rios e o Aquífero Sedimentar da Bacia de São Paulo em Área de Exploração Intensiva de Água Subterrânea*. São Paulo. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 118 p.
- Campos, J. E. 1988. Índices de Abatimento dos Níveis de Água Subterrânea da Bacia Sedimentar de São Paulo. In: ABAS, Cong. Bras. Águas Subterrâneas, 5, São Paulo, Anais, p.74-83.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). 1997. Cadastro de Áreas Contaminadas. Projeto Recuperação do Solo e das Águas Subterrâneas em Áreas de Disposição de Resíduos Industriais. GTZ/CETESB.
- Consórcio Hidroplan. 1995. *Águas Subterrâneas e Outros Usos. Plano Integrado de Aproveitamento e Controle de Recursos Hídricos das Bacias do Alto Tietê, Piracicaba e Baixada Santista*. São Paulo. Hidroplan, 7 vol.
- Cunha, R. C. A. 1997. *Avaliação de Risco em Áreas Contaminadas por Fontes Industriais Desativadas – Estudo de Caso*. São Paulo. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 152 p.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). 1975. *Estudo de Águas Subterrâneas, Região Administrativa I – Grande São Paulo*. São Paulo. SOMA, 3 vol.
- Foster, S. S. D. & Hirata, R. C. A. 1988. *Groundwater Pollution Risk Evaluation: the Methodology Using Available Data*. Lima: CEPIS/PAHO/WHO, 78 p.
- Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 1991. *Censo Demográfico do Brasil*. Rio de Janeiro. 20 vol.
- Giancursi, F. D. & Lopes, M. F. C. 1980. Aspectos Hidrogeológicos da Região da Grande São Paulo. In: SBG e ABGE, Mesa Redonda: Aspectos Geológicos e Geotécnicos da Bacia Sedimentar de São Paulo. Publ. Esp, p. 117 - 128.
- Hassuda, S. 1997. *Critério para a Gestão de Áreas Suspeitas ou Contaminadas por Resíduos Sólidos – Estudo de Caso na Região Metropolitana de São Paulo*. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 142p.
- Hirata, R. C. A. & Nunes da Silva, A. 1999. Mapa hidrogeológico da Bacia do Alto Tietê. In: Macedo, A. (coord). *Banco de Dados Espaciais da Bacia do Alto Tietê*. IIG-IGC-USP, São Paulo (disponível em meio digital, no site: <http://geolig.igc.usp.br>)
- Iritani, M. A. 1993. *Potencial Hidrogeológico da Cidade Universitária de São Paulo*. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 108 p.
- Juliani, C. 1992. O Embasamento Pré-Cambriano da Bacia de São Paulo. In: ABAS, ABGE, SBG/SP, Sem. Probl. Geol. e Geotécnicos na Região Metrop. de São Paulo. Atas...São Paulo. p.3-20.
- Johansson, P.-O. & Hirata, R.C.A. 2000. Rating and ranking of contamination sources. In: Zaporozec, A. (editor) *Groundwater Contaminant Inventory: a Methodological Guideline*. Unesco, Paris. 84-107p.
- Menegasse-Velásquez, L. N. 1996. *Efeitos da Urbanização Sobre o Sistema Hidrológico: Aspectos da Recarga no Aquífero Frático e o Escoamento Superficial*. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 124p.
- Pacheco, A. 1984. *Análise das Características Técnicas e da Legislação para Uso e Proteção das Águas Subterrâneas em Meio Urbano (Município de São Paulo)*. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, Tese de Doutorado, 174p.
- Rebouças, A. 1976. *Recursos Hídricos Subterrâneos da Bacia do Paraná*. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, Tese de Livre-Docência. 187p.
- Rebouças, A. 1980. Aspectos Hidrogeológicos no Planejamento da Ocupação Urbana da Grande São Paulo. In: SBG e ABGE, Mesa Redonda: Aspectos Geológicos e Geotécnicos da Bacia Sedimentar de São Paulo. Atas... São Paulo. Publ. Especial. p.129-138.
- Rebouças, A. 1992. Condições de Uso e Proteção das Águas Subterrâneas. In: ABAS, ABGE, SBG/SP, Sem. Probl. Geol. Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo. Atas... p.77-88.
- Riccomini, C.; Coimbra, A. M.; Takiya, H. 1992. Tectônica e Sedimentação na Bacia de São Paulo. In: ABAS, ABGE, SBG/SP, Sem. Probl. Geol. Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo. Atas... p.21-45.
- Rocha, G. A.; Gonçalves, V. G.; Rebouças, A.; Barreto, L. M. B. 1989. Hidrogeologia da Bacia de São Paulo. In: IGC/USP e SBG/SP, Workshop Geologia da Bacia de São Paulo. Atas... p.44-49.
- Sabesp/CEPAS/IGC-USP. 1994. *Diagnóstico Hidrogeológico da Região Metropolitana de São Paulo*. Diagnóstico Final. Convênio SABESP/CEPAS-IGC/USP. São Paulo. 115 p.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1996. *Soil Screening Guidance: Technical Background Document*. USEPA Report 9355.4-17A. Washington, 238 p.

Manuscrito A-1149

Recebido em 15 de março de 2000

Revisão dos autores em 10 de janeiro de 2001

Revisão aceita em 15 de janeiro de 2001