

# A PROTEÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS NO ESTADO DE SÃO PAULO

R. Hirata<sup>1</sup> & A. V. Suhogusoff<sup>2</sup>

**Resumo** - A proteção das águas subterrâneas paulistas ainda é matéria restrita aos estudos acadêmicos. Muito embora existam leis sobre o assunto, estas não são ainda aplicadas. Este trabalho apresenta as estratégias de proteção aos recursos hídricos subterrâneos a partir da premissa de que a exploração sustentável e consciente está alicerçada na prevenção à degradação do reservatório. Métodos tradicionais de proteção das águas subterrâneas geralmente limitam-se às obras de captação, definindo perímetros ao seu redor e restringindo o uso da terra às atividades potencialmente contaminantes. Sustenta-se aqui a necessidade do uso conjunto de técnicas de mapeamento de vulnerabilidade de aquíferos à contaminação e de perímetros de proteção de poços como forma de proteção das águas. Adicionalmente, vê-se a necessidade de implantar fóruns de discussão das estratégias de gestão dos recursos hídricos subterrâneos no Estado de São Paulo, dentro dos comitês de bacia hidrográfica.

**Abstract** - The protection of groundwater in São Paulo is still a matter restrict to the academic studies. Although there are laws about the subject, they have not had properly applied yet. This work presents the strategies for groundwater protection through the premises that the sustainable and conscious exploitation is based on the prevention of the aquifer degradation. Traditional methods are generally limited to delineation of wellhead protection areas for public (mains) water supplies, defining areas around wells or springs (capture zones) and restricting the land use from potentially contaminant activities. It is stated here the necessity of the combined use of contamination vulnerability mapping and the delineation of wellhead protection areas to take advantage of the bo techniques. Additionally, there is the necessity of the implementation of forums for the discussion of strategies for groundwater management in the State of São Paulo, at the watershed authority level.

**Palavras-Chave** - Perímetro de proteção de poços; Estado de São Paulo; vulnerabilidade à poluição de aquíferos.

---

<sup>1</sup>; <sup>2</sup> Laboratório de Modelos Físicos (LAMO) - Instituto de Geociências – USP. Rua do Lago, nº 562, CEP 05508-080, São Paulo, SP - Tel: 3091-4804, FAX: 3091-4207 - e-mails: [hirata@usp.br](mailto:hirata@usp.br) e [alexandra\\_vs@hotmail.com](mailto:alexandra_vs@hotmail.com)

## **INTRODUÇÃO**

A exploração da água subterrânea no Brasil, tanto para o abastecimento público, como privado, tem mostrado um forte incremento nas últimas décadas. Estima-se que 35% da população brasileira faça uso deste recurso para o atendimento de suas demandas domésticas. No Estado de São Paulo, um número superior a 60% dos núcleos urbanos são supridos total ou parcialmente por águas subterrâneas, através da rede pública, ao passo que, em algumas bacias no oeste do Estado, estes valores podem atingir cifras superiores a 85%.

A contaminação das águas subterrâneas por atividades antrópicas vem causando o abandono de muitos poços ou a perda de áreas importantes dos mananciais. A limpeza de aquíferos é procedimento caro, demorado e ainda com muitas restrições técnicas. Por estas razões, a forte degradação de um aquífero é considerada como irreversível, sobretudo em países de economias periféricas.

Desta forma, a lição que estudos de casos de contaminação e remediação de aquíferos têm mostrado em países de economias centrais é que a prevenção, através do disciplinamento de uso do solo e do controle das emissões de resíduos de atividades antrópicas, constitui a estratégia mais eficaz e sócio-economicamente mais viável para a proteção dos recursos hídricos subterrâneos.

Dentro desta filosofia, o Estado de São Paulo vem desenvolvendo, ao longo destas últimas décadas, esforços que visam à proteção dos recursos hídricos subterrâneos. É interessante lembrar que muitas vezes estes foram frutos de iniciativas isoladas, institucionais ou pessoais, sem uma coordenação ampla no âmbito estadual ou federal.

Este trabalho apresenta algumas bases teóricas para um programa sistemático de preservação dos recursos hídricos subterrâneos e faz uma retrospectiva das principais ações de órgãos do governo paulista. A partir da análise do quadro atual de proteção, são discutidas algumas atividades necessárias para se dar continuidade a este programa sistemático, incluindo o monitoramento da qualidade das águas subterrâneas.

## **BASES CONCEITUAIS PARA A PROTEÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

Em vista da complexidade dos fatores que afetam o transporte dos contaminantes nas águas subterrâneas, da importância potencial de aspectos muito detalhados e da singularidade de cada situação em campo ou na área de avaliação, seria mais lógico estudar individualmente cada atividade potencialmente contaminante em um ambiente hidrogeológico específico. Entretanto, os custos dos estudos hidrogeológicos e hidrogeoquímicos são altos, o que obriga que haja o estabelecimento de prioridades de ação, quando a área de interesse abrange extensas regiões ou quando estiver presente uma grande densidade de atividades antrópicas.

Segundo Foster & Hirata (1988)[1], esta priorização poderá se dar após uma avaliação de perigo de contaminação dos aquíferos à poluição. Os mesmos autores advogam que o conceito de perigo pode ser definido pela interação e associação entre a vulnerabilidade natural do aquífero e a carga contaminante aplicada no solo ou em sub-superfície. De acordo com este esquema, pode-se configurar uma situação de alta vulnerabilidade, porém sem perigo de poluição, pela ausência de carga contaminante significativa, ou vice-versa.

A vulnerabilidade de um aquífero à poluição significa sua maior ou menor susceptibilidade de ser afetado por uma carga contaminante imposta. A caracterização da vulnerabilidade do aquífero pode ser melhor expressa por meio dos seguintes fatores:

- acessibilidade da zona saturada à penetração de poluentes;
- capacidade de atenuação, resultante de retenção físico-química ou reações de poluentes.

Estes dois fatores naturais são passíveis de interação com os elementos característicos da carga poluidora, a saber:

- modo de disposição no solo ou em sub-superfície;
- mobilidade físico-química e a persistência do poluente.

A interação destes fatores permite avaliar o grau de perigo de poluição a que um aquífero está sujeito. Nesta avaliação, deve ser ponderada a essencialidade do recurso hídrico afetado.

Segundo Hirata (1994)<sup>[2]</sup>, dois instrumentos técnicos têm sido empregados em programas de proteção das águas subterrâneas em vários países do mundo, muitas vezes independentemente: mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos e perímetro de proteção de poço (PPP).

O PPP é a técnica mais antiga para a defesa da qualidade das águas em um poço definido. Basicamente, ele estabelece áreas de dimensões específicas ao redor do poço que se quer proteger, controlando o uso da terra nestas diferentes áreas. O tamanho destes perímetros é definido a partir do tempo de trânsito na zona saturada ou de uma distância específica. Este tamanho pode ser baseado ou não na zona de captura do poço (ZCP). É interessante estabelecer a diferença entre zona de captura e PPP. O primeiro é apenas a área onde um dado poço extrai suas águas e que pode ser utilizado na definição de PPP. Já os PPPs são áreas com conotação administrativa, definidos por um instrumento legal, onde se proíbem a instalação de atividades antrópicas específicas (Tabela 1).

Os vários programas de PPP existentes têm mostrado um número de três a quatro zonas, com diferentes dimensões e tempos de circulação das águas na zona saturada. Normalmente, o primeiro perímetro é aquele que circunscreve a área operativa do poço e tem o raio pouco maior que 10 m. Geralmente é cercado por grades. O segundo perímetro é definido pelo tempo de trânsito de 50 a 200 dias, e representa uma proteção bacteriológica. O perímetro subsequente é definido em alguns países como aquele onde a água levaria 500 dias de circulação. Em outras localidades, como a Alemanha, este tem uma dimensão de 2 km. A última zona, quando existente, pode ser delineada

como a totalidade da ZCP em estado estacionário, ou mesmo uma proporção da mesma, por exemplo 25% (Hirata, 1994)<sup>[2]</sup>.

O PPP constitui uma eficaz defesa contra a contaminação à medida que promove um tempo de residência em função do espaço resguardado suficiente para que os contaminantes se degradem ou caso estes não sejam degradáveis que pelo menos sejam diluídos até atingirem o poço de exploração. Contudo, há limitações técnicas e administrativas para o emprego correto do conceito de PPP.

No primeiro caso, muitas vezes o conhecimento hidrogeológico da área é insuficiente para se definir uma ZCP confiável, ou então um misto de complexidade geológica e de falta de recursos/pessoal técnico compromete as informações necessárias para se estabelecer a ZCP. Já a configuração da ZCP pode variar de acordo com o método utilizado: analítico, numérico ou mapa hidrogeológico. Torna-se difícil delimitá-la quando o aquífero em questão apresenta anisotropia e heterogeneidade ou mesmo ser multi-camadas (gradientes hidráulicos verticais conferindo o fluxo inter-unidades) e quando existem outros poços de exploração cujo período de atividade pode mudar a zona de captura do poço que se quer proteger.

As limitações administrativas correspondem à implementação do PPP no mundo real, sobretudo em países em desenvolvimento e pobres. Os problemas referem-se ao fato de não existir recursos ou pessoal especializado para o estudo do PPP; não haver um inventário do poço ou qualquer permissão legal para seu funcionamento; ou devido a problemas do próprio meio urbano, resultantes de processos complexos de recarga, números elevados de poços de extração para diferentes usos ou pela simples constatação de muitos PPPs já estarem definidos em áreas de desenvolvimento industrial e residencial.

Já a cartografia de vulnerabilidade, através de métodos como o GOD de Foster & Hirata (1988)<sup>[1]</sup>, permite definir basicamente três níveis de suscetibilidade: alta, média e baixa. Os autores entendem que este método é válido para a proteção das águas subterrâneas se estas áreas forem interpretadas como: alta vulnerabilidade, quando forem sensíveis a todos os contaminantes, inclusive microorganismos patogênicos; média vulnerabilidade, quando a contaminação ocorrer por compostos moderadamente móveis e persistentes, como alguns metais, solventes e nutrientes. A baixa vulnerabilidade indica que a área é vulnerável somente por compostos mais persistentes e móveis. É certo que todos os aquíferos de alguma forma são vulneráveis se contaminados por substâncias altamente móveis e persistentes, como sais e nitratos, por exemplo (Foster *et al.*, 2002)<sup>[3]</sup>.

Algumas experiências recentes têm tentado compatibilizar os dois instrumentos, PPP e a cartografia de vulnerabilidade. Tanto um como outro apresentam restrições básicas e usá-los conjuntamente seria uma forma de sanar suas próprias deficiências.

Programas de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas podem ser classificados em quatro tipos, segundo os objetivos propostos. O monitoramento ofensivo é aquele que controla a contaminação que poderá ocorrer a partir de uma atividade antrópica específica e se destina à manutenção da integridade ambiental do aquífero contíguo ao empreendimento. O monitoramento defensivo objetiva a proteção de poços importantes, aqueles que servem ao abastecimento público, por exemplo. Normalmente, compõe-se de poços de observação construídos entre as atividades potencialmente contaminantes e os poços que se quer proteger. O monitoramento de vigilância sanitária é aquele que observa alterações na qualidade das águas dos próprios poços, de forma rotineira. Este instrumento não permite a previsão antecipada de problemas, embora seja a forma mais comum de controle ambiental. O último tipo, monitoramento de pesquisa, destina-se ao estudo de um fenômeno, de forma investigativa (Foster & Gomes, 1991)<sup>[4]</sup>.

**Tabela 1** - Principais atividade proibidas e permitidas em cada uma das zonas de perímetro de proteção de poços e de vulnerabilidade de aquífero (Hirata, 1994)<sup>[2]</sup>.

ATIVIDADE POTENCIALMENTE CONTAMINANTE	PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE POÇO				VULNERABILIDADE NATURAL		
	I	II	III	IV	ALTA	MÉDIA	BAIXA
<i>Saneamento in situ</i>							
unifamiliar	N	N	A	A	A	A	A
edifício, coletivos, públicos	N	N	PA	A	A	A	A
posto de gasolina	N	N	PN	PA	PA	A	A
Aeroportos	N	N	PN	PA	PA	A	A
<i>Disposição de resíduos sólidos</i>							
doméstico municipal	N	N	N	PN	PN	PA	A
mat. construção (inerte)	N	N	PA	PA	A	A	A
resíduos perigosos	N	N	N	N	N	N	PA
industrial (classe I)	N	N	N	PN	PN	PA	A
industrial (classe II e III)	N	N	N	N	N	N	PA
cemitérios	N	N	PN	A	PA	A	A
incinerador de resíduos sólidos	N	N	N	PN	N	PN	PA
<i>Minerações</i>							
material construção	N	N	PN	PA	PA	PA	A
outros, incluindo petróleo e gás	N	N	N	N	N	PA	A
linhas de combustíveis	N	N	N	PN	N	PA	A
<i>Indústrias</i>							
classe I	N	N	PN	PA	PA	PA	A
classe II e III	N	N	N	N	PN/N	PA/N	PA/PN
instalações militares	N	N	N	N	PN	PA	PA
<i>Lagoas de efluentes</i>							
municipal/água resfriamento	N	N	PA	A	A	A	A
industrial	N	N	N	N	PN	PA	PA
<i>Drenagem/infiltração/Acidentes</i>							
águas pluviais (tetos)	PA	A	A	A	A	A	A
estradas principais	N	N	N	PN	PN	PA	A
estradas secundárias	N	PN	PA	PA	PA	A	A
áreas de recreação	N	PA	PA	A	A	A	A
garagens e estacionamentos	N	N	PN	PA	PA	A	A
áreas industriais	N	N	N	PN	PN*	PA	A
linhas férreas e aeroportos	N	N	N	PN	PN	PA	A
<i>Infiltração Efluentes no Solo</i>							
indústria alimentícia	N	N	PN	PA	PA	A	A
outras indústrias	N	N	N	N	PU	PA	A
efluentes de desague	N	N	N	PN	PA	A	A
lodo de desague	N	N	PN	PA	PA	A	A
escorrimento de currais	N	N	PN	A	A	A	A
<i>Gado intensivo</i>							
efluentes em lagoas	N	N	N	PN	PA	A	A
desague de currais	N	N	PN	PA	PA	A	A
<i>Atividade Agrícola</i>							
uso de pesticidas	N	N	PN	A	PN	A	A
uso não controlado de fertilizante	N	N	N	PN	PN	A	A
armazenamento pesticidas	N	N	PN	PA	PN	PA	A

N não aceitável em virtualmente todos os casos

PN provavelmente não aceitável, exceto em alguns casos com estudo detalhado e projetos especiais

PA provavelmente aceitável, sujeito a estudo e projeto especial

A aceitável, com projetos especiais (\*) PA, com conexões à rede interceptora

I perímetro imediato de proteção

II perímetro bacteriológico

III perímetro de produtos químicos

IV área de recarga do aquífero

## A HIDROGEOLOGIA NO ESTADO DE SÃO PAULO

Embora os primeiros trabalhos hidrogeológicos significativos enfocando o Estado de São Paulo datem dos anos 40 e 60, foram com os estudos regionais do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), da atual Secretaria de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento, que se iniciou, de forma sistemática, a caracterização dos recursos hídricos paulistas (DAEE 1972, 1974, 1975, 1976, 1977, 1979a, 1979b, 1981 e 1982) <sup>[5-13]</sup>. Em cada estudo, foram cadastrados os poços tubulares existentes em um extenso e intenso trabalho de campo e de escritório. Estes estudos foram, em um primeiro momento, assessorados pela Tahal Consulting Engineers (Israel) e contemplaram, além da caracterização e produtividade dos aquíferos, uma análise do balanço hídrico, englobando as águas superficiais e subterrâneas, através de modelação matemática. Desta forma, foi possível a definição do regime de fluxo regional dos aquíferos, bem como das estimativas de recarga e fluxos de base em várias bacias hidrográficas. Estes trabalhos mostraram também a necessidade de se atualizar as bases geológicas do Estado. Por iniciativa do DAEE, contratou-se, no ano de 1982, a Universidade Estadual Paulista (UNESP), para realizar um mapeamento geológico do Estado na escala 1:250.000 (São Paulo, 1982) <sup>[14]</sup>.

Cabe salientar que o cadastro de poços do DAEE é ainda o único banco de dados para todo o Estado. Embora esteja muito desatualizado, uma vez que os trabalhos de cadastramento cessaram em 1982, tendo em algumas regiões administrativas sido finalizados em 1972, é ainda consulta obrigatória para qualquer estudo hidrogeológico em território paulista. Ademais dos dados hidrogeológicos, as campanhas de cadastro de poços coletaram várias amostras de água subterrânea, o que permitiu compor um banco de dados de sua qualidade e caracterizar geoquimicamente os aquíferos.

O mapeamento hidrogeológico seria o momento oportuno para a síntese dos dados gerados nos relatórios regionais. Atualmente, há um esforço conjunto envolvendo o Instituto Geológico da Secretaria do Meio Ambiente, a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e o próprio DAEE, entretanto, por vários problemas, este trabalho não foi ainda finalizado.

Os relatórios regionais praticamente não analisaram problemas de contaminação das águas subterrâneas. Alguns deles, nas regiões administrativas 7, 8, 9, 10 e 11, assinalaram para incrementos nas concentrações de nitrato das águas do aquífero Bauru, mas não houve maiores repercussões.

Por iniciativa da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), preocupada com a poluição dos aquíferos, três importantes trabalhos foram desenvolvidos. Estes avaliaram a contaminação potencial no Vale do Paraíba (CETESB, 1977; Silva *et al.*, 1980) <sup>[15, 16]</sup>, na Região Administrativa de Ribeirão Preto (CETESB, 1980) <sup>[17]</sup> e na área de afloramento do aquífero Botucatu (CETESB, 1981) <sup>[18]</sup>. O estudo no Vale do Paraíba caracterizou a carga contaminante potencial de algumas atividades e definiu, a partir de um algoritmo simples, um mapa de vulnerabilidade dos aquíferos. Algumas indústrias, onde havia indícios de contaminação, tiveram

suas áreas simuladas com modelos matemáticos, na tentativa de previsão do impacto da pluma contaminante. Os estudos subseqüentes tiveram basicamente as mesmas etapas metodológicas.

Em 1987, durante uma reunião do Comitê do Programa de Prevenção e Controle da Contaminação das Águas Subterrâneas (PRECOCAS), coordenado pelo Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), da Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS-OMS), definiu-se a necessidade de um método para a caracterização do perigo de poluição de aquíferos, baseada numa cartografia de vulnerabilidade e análise da carga contaminante potencial, adequado para as condições latino-americanas (Foster & Hirata, 1988)[1].

Baseado neste método, o Instituto Geológico (IG), a CETESB, da Secretaria do Meio Ambiente do Estado, o DAEE e a Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA), do Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, cartografaram a vulnerabilidade de aquíferos e o perigo de poluição no Estado de São Paulo (Hirata et al., 1997[19], embora o estudo tenha se iniciado no ano de 1991). O mapa de vulnerabilidade, na escala 1:500.000, cobriu todas as unidades sedimentares da Bacia do Paraná, do Vale do Paraíba e do litoral. As cargas contaminantes analisadas incluíram as indústrias, as deposições de resíduos sólidos, o saneamento in situ, as atividades agrícolas e a mineração de metálicos. O cruzamento destas informações permitiu a definição de áreas críticas, onde o perigo de poluição era maior. O projeto, ademais destes resultados, identificou algumas áreas onde o conhecimento técnico hidrogeológico paulista era deficiente e necessitaria ser aprofundado.

As áreas críticas assinaladas pelo projeto começaram a ser detalhadas pelo IG, a partir de 1990. A instituição, nesses últimos anos, tem se dedicado a atuar em três áreas geográficas: Região de Sorocaba-Campinas, estendendo-se ao Vale do Rio Piracicaba; Vale do Paraíba e a Região Metropolitana de São Paulo. Atualmente, ela é a única instituição de governo que tem se preocupado em cadastrar poços tubulares e a cartografar hidrogeologicamente o Estado de São Paulo, de forma sistemática.

Os estudos hidrogeológicos do IG estão inseridos no Programa de Subsídios do Meio Físico Geológico para a Ocupação Territorial, que além de estudar a hidrogeologia, têm analisado, em semi-detalle (1:50.000), a geologia, a geomorfologia e os recursos minerais, incluindo aspectos de meio ambiente (IG, 1990, 1991, 1993 e 1996)<sup>[20-23]</sup>. Nos capítulos de recursos hídricos, tem-se atualizado o cadastro de poços dos municípios, analisado o perfil dos usuários do recurso e o seu crescimento. Outros aspectos incluem a cartografia da hidrogeologia, vulnerabilidade de aquíferos à poluição e de áreas mais produtivas do aquífero, a uma escala de 1:50.000.

Outra área crítica assinalada no Projeto de Vulnerabilidade foi a porção média do Rio Paraíba do Sul. Nesta região, observaram-se aquíferos de alta vulnerabilidade associados a fortes ocupações industrial e urbana, resultando em áreas de alto perigo à poluição das águas subterrâneas. São José

dos Campos foi o município escolhido para um estudo em 1992 (Hirata, 1994)[2]. O objetivo básico deste trabalho foi o de propor ações factíveis, em nível municipal e estadual, para a proteção dos recursos hídricos subterrâneos. Em outras palavras, tentou-se indicar o “o que fazer” nestas áreas críticas assinaladas no Projeto de Vulnerabilidade Regional.

Em São José dos Campos, além da caracterização dos aquíferos, da cartografia de vulnerabilidade em escala 1:10.000 e da própria ocupação presente e futura no município, foram possíveis de definir as zonas de capturas de poços (ZCP) públicos (em escala 1:10.000). O cadastro e a classificação das cargas contaminantes antrópicas, conjuntamente com as cartografias de vulnerabilidade e de ZCP, estabeleceram o perigo à poluição das atividades e das áreas municipais, nos cenários presente e futuro. Para a definição de ZCP, foram adotadas três técnicas diferentes: de raio fixo calculado, método analítico e método numérico (2D, aplicativo Flowpath).

Nesta mesma linha, o IG, conjuntamente com a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) e a Waterloo Hydrogeologic Inc (Canadá), desenvolveram no período de 1996 a 1998 o projeto *Improving the Environmental Quality in Brazil: Implementation of a Pilot Project for Groundwater Protection*. Este trabalho faz a modelação matemática em três dimensões (Modflow) do aquífero que abastece o município de Caçapava e define as zonas de captura dos poços municipais, operados pela SABESP. Como no projeto São José dos Campos, também foram analisadas as cargas contaminantes e a vulnerabilidade de aquíferos, na escala 1:10.000. Este projeto piloto pretende estender a sua experiência a outros municípios do Estado e do País (IG, SABESP & WHI, 1998)<sup>[24]</sup>.

Para a definição de ZCP, os estudos de São José dos Campos mostraram que em áreas de um bom nível de informações dos aquíferos, métodos numéricos são recomendados; entretanto, em áreas onde a complexidade geológica é grande ou a densidade de informações é restrita, técnicas mais simples são sugeridas, como o método analítico. A título ilustrativo, baseado nos parâmetros mais comuns dos aquíferos paulistas, foram traçadas ZCPs, para que as dimensões das mesmas fossem conhecidas (Tabela 2). Como é sabido, grandes ZCP são de difícil operação administrativa, uma vez que, cobrindo extensas áreas, permite pouca manobra do poder público para a re-locação de atividades ou mesmo um intenso controle dos empreendimentos localizados dentro das zonas de captura.

A cartografia de vulnerabilidade do Estado limitou-se às áreas das bacias sedimentares paulistas, não mapeando as unidades do embasamento cristalino, tampouco aquelas onde afloram os diabásios ou basaltos associados ao Grupo São Bento. O entendimento da circulação das águas subterrâneas em aquíferos fraturados é um dos seguimentos do conhecimento apontados como deficiente. Fernandes (1997)<sup>[25]</sup> estabeleceu que, para a Bacia do Rio Piracicaba e arredores, a tectônica cenozóica foi responsável pela maior produção de poços tubulares da área. Um método de cartografia de vulnerabilidade está sendo desenvolvido pela autora, baseado em conceitos de

densidade de fraturamentos e domínios tectônicos homogêneos. Anteriormente a este trabalho, Bertachini (1987)<sup>[26]</sup>, Menegasse (1991)<sup>[27]</sup> e Cavalcante (1990)<sup>[28]</sup> tentaram, através de outras ferramentas geológicas, definir a produção de poços tubulares em aquíferos cristalinos. O primeiro trabalho foi desenvolvido no DAEE e os outros dois pelo Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (CEPAS), da Universidade de São Paulo.

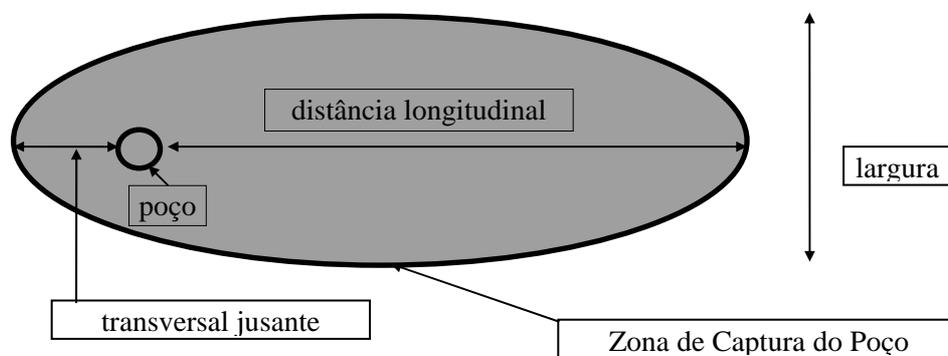
**Tabela 2** - Dimensões médias das Zonas de Captura de Poços em diferentes aquíferos no Estado de São Paulo (Hirata, 1994)<sup>[2]</sup>.

AQÜÍFEROS	DIMENSÕES MÁXIMAS DE ZONAS DE CAPTURA DE POÇOS (Segundo tempo de trânsito)		
	50 DIAS (m)***	365 DIAS (m)	1825 DIAS (m)
Bauru	< 20	60/50/40**	150/120/180
Caiuá	30	150/75/50	250/80/25
Serra Geral*	40	130/40/20	290/40/20
Botucatu/Pirambóia aflorante	40	180/50/40	310/100/40
Itararé	<20	40/35/30	75/70/60
Furnas	<40	50/35/30	80/75/70
Cristalino*	40	100/40/20	180/45/20

\* analisado como aquífero poroso

\*\* 1valor/2valor/3valor: maior distância longitudinal (montante), largura (borda a borda) e maior distância transversal (jusante), em metros, respectivamente.

\*\*\*formato circular



Quando parte do aquífero já se encontra contaminado, a limpeza é uma etapa a ser considerada pelos órgãos de controle ambiental. A recuperação ou mesmo a detalhada caracterização de todas estas áreas não deverá ser exigida da mesma forma. Novamente, seria necessário estabelecer prioridades baseadas em atividades de maior risco à saúde humana e à ecologia. Técnicas para este fim estão sendo utilizadas por algumas companhias privadas nacionais e pelo órgão de controle ambiental, para priorizar os futuros trabalhos de descontaminação.

Um dos projetos de maior envergadura nesta área é aquele desenvolvido pela CETESB, juntamente com o IG, tendo apoio técnico e financeiro da GTZ alemã. Este programa caracteriza

diversas áreas com fortes indícios de contaminação ambiental no município de São Paulo pela má deposição de resíduos sólidos ou em áreas industriais abandonadas. Em cada área, estão sendo considerados os riscos ambientais, bem como o impacto à população e aos recursos hídricos, sobretudo, o subterrâneo (Hassuda, 1997; Cunha, 1997)[29, 30].

Os resultados do Projeto de Vulnerabilidade estão também subsidiando a Secretaria do Meio Ambiente a delinear as ações nas Áreas de Proteção Ambiental (APA) do Pardo-Mogi. Esta unidade de preservação foi definida com o objetivo de proteger a área de recarga do sistema aquífero Botucatu/Pirambóia, o maior aquífero brasileiro e um dos mais vulneráveis e importantes.

A CETESB tem monitorado uma rede de poços tubulares de produção espalhados em diversos aquíferos no Estado de São Paulo desde 1990 (CETESB, 1994, 1997 e 2003)<sup>[31-33]</sup>. Esta rede conta atualmente com 162 poços e tem acompanhado parâmetros físico-químicos (temperatura, pH, condutividade elétrica, cálcio, ferro total, alumínio, cloretos, cromo, nitrato, amônio, alguns solventes orgânicos, etc.) e bacteriológicos (coliformes totais e fecais). Estes sistemas de monitoramento têm se mostrado pouco eficientes na identificação de problemas de contaminação antrópica, sobretudo associados a fontes pontuais. Redes de monitoramento em grandes áreas a partir de poços tubulares de produção não permitem identificar problemas de contaminação, exceto se eles ocorrerem muito próximos aos poços (algumas dezenas de metros). As plumas de contaminação são geralmente de pequena extensão, não ultrapassando muitas vezes a algumas centenas de metros do evento. Desta forma, para se ter uma noção da qualidade das águas subterrâneas, haveria a necessidade de uma rede extremamente densa de poços. De outro lado, poços tubulares são concebidos para produzir água e possuem os seus filtros fronteiros às camadas geológicas de maior permeabilidade. A contaminação de aquíferos normalmente ocorre na superfície e atinge as partes superficiais do reservatório. Assim, os poços acabam por diluir a contaminação, tornando algumas vezes não detectáveis.

## **AÇÕES FUTURAS PARA A PROTEÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS**

Os resultados do Projeto Vulnerabilidade, a atuação do órgão de controle ambiental e os estudos de empresas de consultoria privada têm permitido identificar áreas críticas à poluição no Estado de São Paulo. Em cada uma destas áreas, seria necessário o detalhamento das cargas contaminantes, bem como da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, baseado na importância e na essencialidade do recurso para a população. Zonas de captura de poços e posteriormente os PPPs deverão ser traçados, a exemplo dos projetos de São José dos Campos e Caçapava.

Duas estratégias básicas de monitoramento deveriam ser delineadas em continuação aos estudos de detalhe: uma voltada à proteção dos próprios poços de abastecimento públicos e a outra dirigida à

identificação da contaminação do aquífero pelas atividades antrópicas. No primeiro caso, o programa de monitoramento seria do tipo defensivo e/ou de vigilância sanitária. No segundo, seria um programa baseado em uma monitoração ofensiva, restrita à atividade potencialmente contaminante.

Tanto o programa de vigilância sanitária como o de monitoramento defensivo em poços importantes deveriam ser baseados nos resultados das análises de riscos da poluição de poços ocasionada pelas atividades englobadas nas zonas de capturas (ZCP) de poços específicos. A distância entre as atividades e os poços e as características de circulação dos aquíferos auxiliariam na equalização dos tempos e frequência de amostragem das águas subterrâneas. Os parâmetros analisados também poderiam ser escolhidos com base nas atividades potencialmente contaminantes presentes.

Da mesma forma, as atividades potencialmente contaminantes em áreas de alta vulnerabilidade deveriam ter programas próprios de monitoramento que objetivassem a identificação da degradação do aquífero que ocorre no local, causada pelo próprio empreendimento. Desta forma, seriam possíveis ações corretivas na área do acidente/incidente de poluição de forma que o problema não se estenda a outras áreas fora das atividades. Este tipo de monitoramento, do tipo defensivo, deve ser implementado pela própria empresa ou instituição, assistido pelo poder público.

A instalação de novas atividades potencialmente contaminantes também deveriam levar em consideração as restrições impostas pelo programa de PPP ou mesmo da vulnerabilidade de aquíferos. A tabela 1 poderia auxiliar neste planejamento de uso e ocupação do terreno. Para empreendimentos de maior porte, os estudos e relatórios de impacto de meio ambiente (EIA/RIMA) poderiam ser utilizados para uma avaliação dos níveis de degradação aos quais os aquíferos estariam sujeitos. Formas de correção ou de minimização dos impactos devem ser analisados nesta etapa.

É interessante que todas as análises químicas das águas dos aquíferos do Estado devam ser compiladas e organizadas, permitindo consultas futuras e o acompanhamento temporal da hidrogeoquímica. Sabe-se que muitos dados geológicos são perdidos logo após o término do projeto que os geraram. Os técnicos e administradores esquecem que assim como plástico e alumínio, as informações hidrogeológicas devem ser recicladas, ou seja, utilizadas em outros projetos. Elas serão novamente úteis somente se forem organizadas e armazenadas de forma dinâmica e acessíveis para os consultores.

Uma vez identificando-se a contaminação de um aquífero, a correção do problema que o originou é quase sempre uma das primeiras medidas a serem tomadas. A primeira medida é a eliminação ou redução da fonte de poluição das águas subterrâneas, como por exemplo estender a rede de esgoto, em oposição à deposição *in situ* de efluentes líquidos ou mesmo introduzir um sistema de tratamento de resíduos sólidos em vez da deposição/enterramento no solo. Algumas vezes, a correção do problema é impraticável do ponto de vista econômico e técnico, como a remoção de um grande aterro. Em casos restritos, é aceitável a contaminação do aquífero, exigindo-

se o tratamento de suas águas. Tal opção é razoável, apenas após estudos de viabilidade econômica de outras fontes alternativas ou mesmo da limpeza do aquífero. Em última instância deve ser considerada uma das opções:

- aceitação da contaminação do aquífero, buscando fontes alternativas e garantindo a não propagação da(s) pluma(s) de contaminação;
- tratamento das águas do aquífero, após sua extração;
- eliminação da fonte de contaminação e limpeza do aquífero e do solo.

Vários projetos de pesquisa desenvolvidos pelas universidades e os institutos estaduais de pesquisa vêm a somar às iniciativas do governo no estabelecimento de uma política de proteção da qualidade das águas subterrâneas. Entretanto, não existe ainda um fórum que tenha atuação efetiva e que congregue a iniciativa privada, os usuários e o governo e que discuta de forma pró-ativa os problemas dos recursos hídricos no Estado de São Paulo. Recém criados, os comitês de bacia hidrográfica estão iniciando seus trabalhos na gestão dos recursos hídricos, embora a atenção dedicada às águas subterrâneas seja ainda bastante limitada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Foster, S. & Hirata, R. 1988. Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data. CEPIS. Tech. Report. Lima. 78p.
- [2] Hirata, R. 1994. Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas. Estudo de casos no Estado de São Paulo. (Tese de Doutorado, IGc-USP).
- [3] Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M. and Paris, M. 2002. *Groundwater Quality Protection: a Guide for Water Utilities, Municipal Authorities and Environment Agencies*. World Bank Publication: Washington (D.C), 103p.
- [4] Foster, S. & Gomes, D. 1991. Monitoreo de la calidad de las águas subterrâneas: una evaluación de métodos y costos. CEPIS Tech. Report. Lima. 111p.
- [5] Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). 1972. Estudo de águas subterrâneas. Relatório Preliminar. São Paulo, 2v.
- [6] Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). 1974. Estudo de águas subterrâneas. Região Administrativa 6: Ribeirão Preto. São Paulo, 4v.
- [7] Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). 1975. Estudo de águas subterrâneas. Região Administrativa 1: São Paulo. São Paulo, 4v.
- [8] Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). 1976. Estudo de águas subterrâneas. Região Administrativa 7, 8 e 9: Bauru, São José do Rio Preto e Araçatuba. São Paulo, 4v.

- [9]Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). 1977. Estudo de águas subterrâneas. Região Administrativa 3: Vale do Paraíba. São Paulo, 4v.
- [10]Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). 1979a. Estudo de águas subterrâneas. Região Administrativa 10 e 11. Presidente Prudente e Marília. São Paulo, 3v.
- [11]Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). 1979b. Estudo de águas subterrâneas. Região Administrativa 2: Santos. São Paulo, 4v.
- [12]Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). 1981. Estudo de águas subterrâneas. Região Administrativa 5: Campinas. São Paulo, 2v.
- [13]Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). 1982. Estudo de águas subterrâneas. Região Administrativa 4: Sorocaba. São Paulo, 2v.
- [14]São Paulo. 1982. Mapa geológico do Estado de São Paulo, escala 1:250.000. Convênio UNESP e DAEE. 19 folhas. São Paulo.
- [15]Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). 1977. Poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo - Estudo Preliminar. São Paulo, Relatório Técnico, 88p.
- [16]Silva, C; Amir, Y.; Penna, Y. 1980. Controle da poluição das águas subterrâneas na região do Vale do Paraíba. In: CONG. BRAS. ÁGUAS SUBTERR., 1. Anais....Recife. ABAS, 2v.
- [17]Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). 1980. Projeto Ribeirão Preto. CETESB, ENCO, DAEE. 2v.
- [18]Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). 1981. Controle de poluição das águas subterrâneas na zona de recarga do aquífero Botucatu. Relatório de Andamento. São Paulo. 202p.
- [19]Hirata, R.; Bastos, C.; Rocha, G. (Coord.) 1997. Mapa de vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas do Estado de São Paulo. IG, CETESB, DAEE, São Paulo, 2v.
- [20]Instituto Geológico (IG). 1990. Subsídios do meio físico-geológico para o planejamento territorial do município de Sorocaba. IG SMA. Relatório Técnico 3v.
- [21]Instituto Geológico (IG). 1991. Subsídios do meio físico-geológico para o planejamento territorial do município de Itu. IG SMA. Relatório Técnico 3v.
- [22]Instituto Geológico (IG). 1993. Subsídios do meio físico-geológico para o planejamento territorial do município de Campinas. IG SMA. Relatório Técnico 3v.
- [23]Instituto Geológico (IG). 1996. Subsídios para o planejamento territorial e urbano do meio físico na porção média do rio Piracicaba, SP. São Paulo. IG SMA. Relatório Técnico 4v.
- [24]Instituto Geológico (IG), Companhia de Saneamento Ambiental (SABESP), Waterloo Hydrogeologic Inc. 1998. Improving the Environmental Quality in Brazil: Implementation of a Pilot Project for Groundwater Protection. Relatório Final. São Paulo.

- [25]Fernandes, A. 1997. Tectônica cenozóica na porção média da Bacia do Rio Piracicaba e sua aplicação à hidrogeologia. (Tese de Doutorado, IGc-USP)
- [26]Bertachini, A. 1987. Estudo das características hidrogeológicas dos terrenos cristalinos sob clima úmido, na Região de Jundiaí, em São Paulo. (Dissertação de Mestrado, IGc-USP).
- [27]Menegasse, L. 1991. Estudos hidrogeológicos das rochas metassedimentares do Grupo São Roque a NW da Grande São Paulo: critérios para locação de poços profundos. (Dissertação de Mestrado, IGc-USP).
- [28]Cavalcante, I. 1990. Estudo hidrogeológico de terreno cristalino com manto de intemperismo: área piloto de Atibaia (SP). (Dissertação de Mestrado, IGc-USP).
- [29]Hassuda, S. 1997. Critérios para gestão de áreas suspeitas ou contaminadas por resíduos sólidos - Estudo de caso na Região Metropolitana de São Paulo.(Tese de Doutorado, IGc-USP).
- [30]Cunha, R. 1997. Avaliação de risco em áreas contaminadas por fontes industriais desativadas - Estudo de caso. (Tese de Doutorado, IGc-USP).
- [31]Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). 1994. Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Relatório Técnico. São Paulo. 95p.
- [32]Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). 1997. Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Relatório Técnico. São Paulo. 106p.
- [33]Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). 2003. Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo 2001-2003. Relatório Técnico. São Paulo 211p.