

# GESTÃO DA QUALIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

Ricardo Hirata

Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo  
Rua do Lago, 562 - CEP: 05508-080. São Paulo (SP), Brasil.  
E-mail: [rhirata@usp.br](mailto:rhirata@usp.br)

## ***ABSTRACT***

From analysis of cases of groundwater contamination, it is possible to draw the following conclusions: a) aquifers highly contaminated by certain chemical compounds (for example, organochlorinated solvents) cannot be cleaned up completely, due to limitations regarding cost and available technology; b) millions of chemical compounds are sold, however, only a few hundred of these cause the most serious aquifer contamination problems; c) although there are many kinds of potentially contaminating anthropic activities, only a few are responsible for the majority of cases of contamination; d) it is not large-scale activities that bring about the most serious aquifer deterioration problems; and e) control of a potentially contaminating activity results in a significant reduction in the degree of impact on groundwater resources. These “lessons” allow one to draw the conclusion that the best way of protecting the quality of groundwater resources is prevention, and that in spite of the existence of a complex network of anthropic activities, there are ways of recognizing those where there is a need for increased focus on the environment.

In various countries, groundwater quality protection strategies are generally based on the control of soil use (i.e., restrictions regarding the way in which land is occupied), employing two kinds of zoning. The first focuses on the abstraction of water for public supply purposes, establishing protection limits around the water resource, where there will be more stringent restrictions in areas closest to the well or spring. The second, wider in scope, focuses on the aquifer, defining those areas that are vulnerable to pollution, based on the attenuation capacity of the soil and unsaturated zone. Historically, these two different kinds of zoning have been used in an independent manner. More recently, several authors have suggested protection strategies that are both more extensive and more efficient, based on the combined use of these two approaches. There have also been significant advances in the procedures used for classifying potentially contaminating activities, which, when cross-referenced with different kinds of zoning, allow for the determination of those activities posing the greatest

hazard of contamination (areas of high vulnerability occupied by an activity of high pollution loading potential). This kind of analysis allows for the ranking of existing activities, establishing those where there should be a greater degree of attention focused on the environment. In the same way, based on vulnerability maps, it is also possible to identify those activities that may be installed without restrictions, distinguishing them from others whose operations should be prohibited. Both vulnerability and protection limit tools are efficient in establishing guidelines for regulating soil use.

### ***RESUMO***

A partir de uma análise dos casos de contaminação das águas subterrâneas é possível concluir que: a) aquíferos muito contaminados por certos compostos químicos (por exemplo, os solventes organoclorados) não podem ser completamente limpos, devido às limitações de custo e tecnologia disponível; b) milhões de compostos químicos são comercializados, mas são algumas centenas que geram os maiores problemas de contaminação de aquíferos; c) embora existam muitos tipos de atividades antrópicas potencialmente contaminantes, poucas são responsáveis pela maioria dos casos de contaminação; d) grandes atividades não são as que geram os maiores problemas de deterioração de aquíferos; e e) o controle de uma atividade potencialmente contaminante gera uma forte redução dos impactos aos recursos hídricos subterrâneos. Estes aspectos permitem depreender que a melhor forma de proteger a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos é sua prevenção e que, muito embora haja grande complexidade envolvida nas atividades antrópicas, há formas de reconhecer aquelas em que a atenção ambiental deveria ser maior.

As estratégias de proteção da qualidade das águas subterrâneas em vários países são geralmente baseadas no controle do uso da terra (restrições na sua ocupação), a partir de dois tipos de zoneamento: um centrado na captação para abastecimento público, que estabelece, ao redor do manancial, perímetros de proteção, onde existirão maiores restrições em áreas mais próximas do poço, e o outro, mais amplo, dirigido ao aquífero, definindo áreas mais e menos vulneráveis à poluição, baseadas na capacidade depurativa do solo e da zona não saturada. Estas duas linhas de zoneamento vêm sendo utilizadas de forma independente. Mais recentemente, alguns autores têm sugerido estratégias de proteção mais amplas e mais eficazes, baseadas no uso conjunto destas duas linhas. Avanços notáveis vêm ocorrendo também nos procedimentos de classificação das atividades potencialmente contaminantes, que

permitem, quando cruzadas aos diferentes zoneamentos, o estabelecimento de atividades com maior perigo de contaminação (áreas de alta vulnerabilidade ocupada por uma atividade de elevada carga potencial). Este tipo de análise permite hierarquizar as atividades existentes. Da mesma forma, a partir de mapas de vulnerabilidade, é possível identificar aquelas atividades que poderiam ser introduzidas sem restrições, distinguindo-as de outras que deveriam ter o seu funcionamento proibido. Tanto as ferramentas de vulnerabilidade, como de perímetro de proteção, são eficazes na aplicação de diretrizes para o disciplinamento do uso do solo.

## ***INTRODUÇÃO***

Os recursos hídricos subterrâneos desempenham um papel importante, quando não fundamental, para o suprimento de água potável às populações. Estima-se que mais de 220 milhões de pessoas são abastecidas por este recurso na América Latina. No Brasil, com estatísticas igualmente pouco precisas, há concordância entre os técnicos de que as águas subterrâneas cobrem uma parcela de 35-40% da população. No Estado de São Paulo, 75% dos núcleos urbanos são dependentes total ou parcialmente das águas subterrâneas. Mesmo na Bacia do Alto Tietê (São Paulo), onde os aquíferos são pouco produtivos, há mais de 12 mil poços perfurados, dos quais 8 mil estavam em operação em 2000, extraindo mais de 7,8 m<sup>3</sup>/s.

A percepção e conscientização da sociedade frente a problemas de degradação da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos são fenômenos recentes em todo o mundo e particularmente na América Latina. Os estudos de detecção da contaminação de aquíferos são ainda limitados e o conhecimento real da extensão do problema é praticamente inexistente.

Tentar controlar todas as atividades potencialmente poluentes, estudar em detalhe os casos de contaminação ou mesmo remediar todas as áreas degradadas, é prática e economicamente impossível. Após a publicação do Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act (Superfund), na década de 1980, os Estados Unidos da América investiram muito dinheiro na limpeza de aquíferos fortemente contaminados em seu território. Seus resultados foram pouco efetivos. Com base em uma análise crítica, é possível deduzir que: a) as áreas de estudo dos aquíferos contaminados não eram as mais importantes para o abastecimento de água potável no país; b) as tentativas para remediar o dano, atingindo os níveis de potabilidade da água, não tiveram êxito; c) as novas tecnologias para limpeza de aquíferos contribuíram pouco para a redução de custos na reparação do dano; d) os custos dos estudos tanto para a remediação, como para sua própria prática, foram elevados; e e) a

legislação tem exigido a perfuração de milhões de poços de monitoramento em milhares de indústrias por todo o país.

A partir desta realidade, é urgente que os países latino-americanos iniciem um programa efetivo e sistemático de proteção dos recursos hídricos subterrâneos, sob pena de perdas do recurso e dos investimentos já realizados em obras de captação e adução. O custo envolvido na remediação, quando tecnicamente possível, mostra que, para uma administração ambientalmente segura do recurso hídrico, a melhor prática é a proteção. As experiências dos EUA denotam também que estes programas de proteção devem levar em consideração a importância, social e econômica, de tais recursos.

Uma análise das estratégias de proteção atualmente em uso em países europeus e norte americanos mostra que em vários deles têm-se adotado o controle do uso da terra a partir do zoneamento do terreno baseado no estabelecimento de perímetro de proteção de poços (PPP, Well Head Protection Area ou, SPA, Source Protection Area), ou na cartografia da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos. O primeiro tem como foco a proteção da captação ou do manancial, delimitando várias zonas ao redor do poço. O segundo, mais amplo e voltado ao aquífero, define a susceptibilidade do aquífero em ser degradado por um evento antrópico de contaminação. As práticas dos países têm sido o uso independente de uma ou outra técnica. Mais recentemente, alguns autores (Foster et al. 1998, Hirata & Rebouças 1999, Foster et al. 2002) vêm considerando o uso conjunto das duas técnicas, em uma tentativa de superar as deficiências de cada uma delas. Esse trabalho analisa essas duas técnicas de maneira integrada, levando em questão a perspectiva latino-americana.

### ***PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DOS POÇOS***

Restringir o uso do terreno que circunda uma captação de águas subterrâneas é uma das formas mais antigas de se proteger contra uma contaminação indesejada. Um PPP é o instrumento legal mais utilizado para proteger poços e mananciais de abastecimento público e privado. A definição desse perímetro é baseada no estabelecimento da zona de captura de poço (ZOC), ou seja, da área correspondente em superfície que contribuirá com a captação. Dentro da ZOC, é esperado que qualquer contaminante, que tenha concentração, persistência e mobilidade suficiente, atinja a captação. Portanto, a delimitação da ZOC é o resultado, em última instância, das condições hidrogeológicas e das vazões de bombeamento do poço a ser

protegido.

Há vários métodos para a definição da ZOC (Quadro 1). Alguns são bastante simples e exigem pouca informação, outros são mais elaborados e permitem simular a complexidade do meio geológico. Escolher uma ou outra técnica depende de um equilíbrio entre custo, importância do recurso e características hidrogeológicas.

Geralmente o traçado da ZOC, independente do método empregado, acaba gerando áreas de grandes dimensões, o que impossibilita a sua aplicação prática, em áreas já ocupadas. Desta forma, a partir de características como tempo de trânsito no aquífero (fluxo horizontal) ou distância ao poço, são estabelecidas zonas intermediárias. Normalmente, a ZOC é dividida em três ou quatro áreas menores e geralmente englobam: a) perímetro imediato do poço, que está associado à atividade de operação da própria captação. Esta área é cercada e nela a restrição é total; b) perímetro bacteriológico, que geralmente é definido como um tempo de trânsito no aquífero de 50 dias, tempo necessário para reduzir riscos causados por bactérias e vírus patogênicos; c) perímetro intermediário, que, em muitos países, relaciona-se com a degradação de compostos químicos mais persistentes e d) perímetro máximo, que engloba a totalidade da zona de captura. O perímetro intermediário, quando adotado, se relaciona em muitas bacias a um tempo de trânsito de 500 dias, chegando a 10 anos. Na antiga República Federativa Alemã, era adotada a distância de 2km.

### ***CARTOGRAFIA DE VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS***

Do ponto de vista técnico-científico, a vulnerabilidade é função das características hidrogeológicas e geoquímicas dos aquíferos. O aquífero que conta com mecanismos hidráulicos ou físico-químicos capazes de atenuar ou não permitir a chegada de uma carga contaminante antrópica que o degrade pode ser classificado como de baixa vulnerabilidade.

Embora a vulnerabilidade do aquífero seja um conceito de fácil compreensão, o mesmo não ocorre com a sua aplicação prática. Para que uma cartografia seja factível, a complexidade geológica obriga a uma simplificação de parâmetros hidráulicos e físico-químicos. Uma análise completa dos métodos de vulnerabilidade pode ser encontrada em Vrba & Zaporozec (1994) e Hirata & Rebouças (1999). Os dois métodos mais utilizados na América Latina são o DRASTIC (Aller et al. 1985) e GOD (Foster & Hirata 1988).

*Quadro 1. Diferentes métodos para determinar o perímetro de proteção de poços (Hirata &*

*Rebouças, 1999).*

MÉTODO	DESCRIÇÃO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Raio Fixo Arbitrário	Áreas circulares, de raios fixos, definidas por hidrogeólogo experiente.	Rápido, simples, baixo custo. Fácil convencimento do público comum.	Não incorpora condições hidrogeológicas. Grandes erros.
Raio Fixo Calculado	Áreas circulares, raio definido em função do volume extraído do poço de um cilindro, com porosidade estabelecida.	Rápido, simples, baixo custo.	Não incorpora condições hidrogeológicas. Pouco flexível. Muitas vezes gera áreas superestimadas.
Cartografia da Vulnerabilidade	Baseado em mapas hidrogeológicos e de solos. Áreas mais frágeis	Bastante flexível, usada em condições geológicas complexas.	Não delinea uma zona de captura específica. Resultados subjetivos.
Cartografia de Sistemas de Fluxo	Áreas definidas por mapas das condições de contorno do aquífero (divisor de drenagem, aquíferos) e do fluxo do aquífero (superfície potenciométrica)	Flexível e barato. Pode aproveitar muitos dados existentes.	Assume fluxo uniforme bidimensional. Pode gerar PPP grandes, quando utilizado só. Depende de dados de potencimetria precisos.
Fluxo Uniforme Analítico	Área definida com equação analítica de fluxo uniforme (Todd, 1980) a partir do mapa de fluxo do aquífero.	Simples, permite delinear uma zona de captura. Bastante robusto com relação à incerteza da informação.	Assume fluxo uniforme e bidimensional, ignorando recarga e heterogeneidade-anisotropia. Depende de potencimetria precisa.
Formato Simples Variável	Combinação do método de fluxo uniforme, tempo de trânsito e raio fixo calculado. Um hidrogeólogo define o formato que é aplicado sobre um poço	Simples e barato.	Não funciona em aquífero heterogêneo e onde aquíferos tenham características muito distintas. Método pouco flexível.
Sistemas de Fluxo com Equação do Tempo de Trânsito	Combinação do método de fluxo uniforme com lei de Darcy para cálculo de advecção	Usa conceitos de degradação do contaminante. Pode ser utilizado em conjunto com outros métodos.	Erros na estimação da porosidade efetiva e condutividade hidráulica podem causar grandes distorções. Exige razoável nível de dados.
Aproximação dos Tempos de Trânsito	Baseado em dados hidroquímicos e isotópicos para definir direção e fluxo, bem como idade das águas (tempo de trânsito).	Pode ser usado em qualquer dos meios. Utilizável com outras técnicas. Parte do conceito de tempo de trânsito para a degradação de contaminantes.	Interpretação de geoquímica precisa. Algumas vezes resultados ambíguos. Requer análise e pessoal especialista. Custos elevados
Numérico de Fluxo e Transporte	Modelação matemática.	Qualquer dos meios geológicos, inclusive heterogêneos e anisotrópicos. Método de maior precisão e aquitarde. Há muitos softwares disponíveis.	Necessita grande quantidade de informação, especialistas. É custoso.

A cartografia da vulnerabilidade de aquíferos deve analisar as características das zonas não saturada e saturada que: a) modifiquem o tempo de chegada de contaminantes ao aquífero (geometria do aquífero: tipo de aquífero, recarga-descarga e distância do nível de água – advecção e retardação); e b) reduzam a concentração do contaminante (dispersão e degradação). Os contaminantes devem ser analisados segundo a sua persistência, mobilidade

e toxicidade.

Dada a complexidade dos meios hidrogeológicos, muitos autores (Seller e Canter 1980, Le Grand 1983, Canter et al. 1987) defendem que somente mapas de vulnerabilidade específica para um determinado tipo de contaminante teriam significado técnico-científico e seriam suficientemente reais na previsão do comportamento de contaminantes. Outra forma seria o desenvolvimento de métodos que analisem um tipo de atividade contaminante (por exemplo, atividade agrícola, tanques de combustível enterrados). Tal procedimento, entretanto, encontra sérias limitações práticas associadas à carência de informação e dificuldade de manejo de série de mapas. Conseqüentemente, outros autores (Albinet e Margat, 1970; Haertlé, 1983; Aller et al., 1985; Foster e Hirata, 1988, Hirata et al. 1991) propõem o uso de sistemas menos refinados e mais gerais, tais como a construção de um mapa da vulnerabilidade universal, ou seja, para todos os contaminantes (Quadro 2). A confiança em tal carta estaria assegurada, desde que fique clara ao usuário a limitação associada ao método utilizado.

### ***A PROTEÇÃO DOS AQUIFEROS***

O estabelecimento da ZOC e, por extensão, do PPP é bastante dificultoso em aquíferos heterogêneos e anisotrópicos, tais como os associados a rochas fraturadas ou carstificadas, ou mesmo em ambientes complexos de sedimentação. Da mesma forma, os aquíferos explorados por um considerável número de poços em regime variável de bombeamento, em áreas de notável crescimento urbano, fazem com que a aplicação do PPP seja igualmente difícil, pois exigiria um grande investimento no uso de complexas técnicas para a definição da ZOC. Nestes casos, o mapeamento da vulnerabilidade, por ser mais flexível e manejar dados qualitativos, tem-se mostrado mais prático e eficiente, com geração de resultados mais confiáveis (Foster et al. 1992, Foster et al. 2002). Por outro lado, esta flexibilidade pode fazer com que muitos métodos de vulnerabilidade sejam pouco objetivos e precisos e, sendo função da experiência do hidrogeólogo, de difícil reprodutividade.

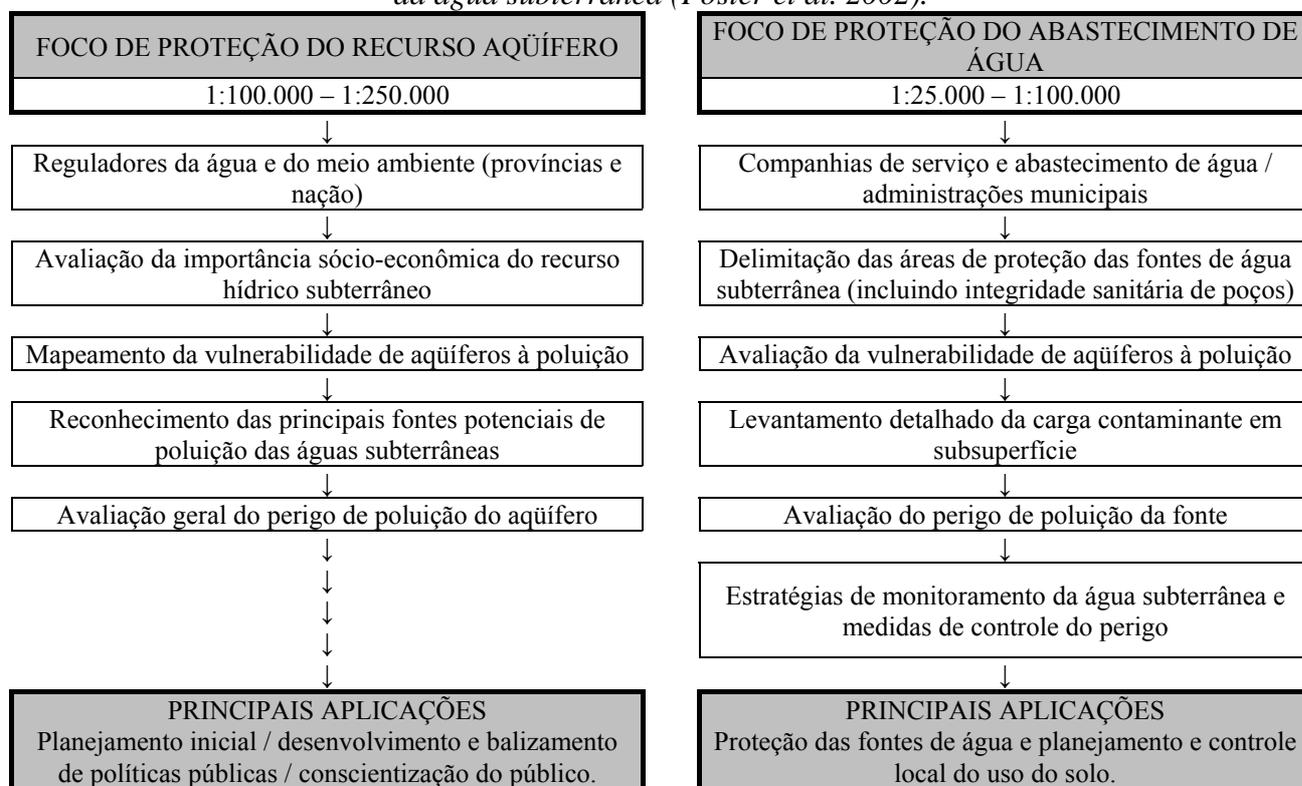
*Quadro 2. Principais métodos para a determinação da vulnerabilidade e perigo de contaminação de aquíferos (Hirata & Rebouças, 1999).*

MÉTODO	AValiação DE	FATORES ANALISADOS	REFERÊNCIA
Surface Impoundment Assessment	Sistemas de disposição de águas servidas. Avaliação de perigo.	zona não-saturada; importância do recurso; qualidade de águas subterrâneas; periculosidade do material.	Le Grand (1964)
Site Ranking System	Disposição de produtos químicos, novos e em operação. Avaliação de perigo.	solo; característica hidráulica, sorção e tamponamento químico; hidrodinâmica do aquífero; ar; população próxima.	Hagerty et al. (1973)
Poluição dos Lençóis Aquíferos	Vulnerabilidade geral.	geologia (litologia e estrutura).	Taltasse (1972)
Waste-Soil Interaction Matrix	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias. Avaliação de perigo.	efeitos na saúde; característica do produto químico; comportamento do produto; capacidade de atenuação do solo; hidrogeologia característica do local.	Philips et al. (1977)
Site Ranking Methodology	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias. Avaliação de perigo.	receptor-população/uso da água/uso local/ degradação ambiental; caminhos, nível e tipo de contaminação; profundidade do nível d'água; pluviometria; permeabilidade do solo; característica do resíduo - toxicidade, persistência; prática de manejo - aspectos operacionais e construtivos.	Kulfs et al. (1980)
Hazard Ranking System	Áreas prioritárias para limpeza do aquífero.	migração-característica do meio e resíduo; quantidade de produto; população próxima; explosão e fogo; contato direto.	Caldwell et al. (1981)
Brine Disposal Methodology	Águas de formação em campos de petróleo e gás Avaliação de perigo.	método de disposição; volume; geologia densidade de poços de petróleo; proximidade de poços de água.	Western Michigan University (1981)
Pesticide Index	Pesticidas, uso normal. Avaliação de perigo.	característica físico-química de pesticida; clima perfil do solo; cultura.	Rao et al. (1985)
Drastic	Vulnerabilidade geral.	D - profundidade da água subterrânea R - recarga A - meio aquífero S - solo T - topografia I - impacto no aquífero C - condutividade hidráulica	Aller et al. (1985)
God	Vulnerabilidade geral.	G - tipo de aquífero O - litologia zona não-saturada D - profundidade da água	Foster; Hirata (1988)
Groundwater Vulnerability Map For Nitrate	Potencial de lixiviação de nitrato. Vulnerabilidade a contaminante específico.	tipo de solo; característica hidráulica e litológica do aquífero.	Carter et al. (1987)
Sintacs	Vulnerabilidade geral.	igual ao DRASTIC, com pesos diferentes	Civita et al. (1990)
(Sem Nome)	Vulnerabilidade geral.	característica litológica e de permeabilidade; profundidade da água.	Adams & Foster (1992)
Vulfrac	Vulnerabilidade geral em meios fraturados.	intensidade de fraturamento profundidade do nível estático natureza da zona não-saturada	Fernandes; Hirata (em preparação)

Pelas características de uma ou de outra técnica de zoneamento de aquíferos, o mapa da vulnerabilidade é mais aplicável a estudos regionais e semi-regionais (1:250.000 e 1:100.000) e a técnica de PPP/ZOC é mais adequada a escalas detalhadas (1:100.000 e 1:25.000). Desta forma, a cartografia de vulnerabilidade, associada à determinação da carga contaminante potencial, prestar-se-iam mais às agências reguladoras nacionais e estaduais, aplicadas primariamente ao planejamento territorial, políticas de desenvolvimento e conscientização pública. Já a técnica de PPP/ZOC seria voltada às empresas de água e à administração municipal, tendo como objetivos a proteção das fontes de água e o planejamento municipal (Quadro 3).

Segundo o exposto, tanto as técnicas do PPP/ZOC como as de mapeamento da vulnerabilidade apresentam limitações. Portanto, a integração de ambas seria mais lógica e realista (Figura 1) e poderia ser utilizada de acordo com o histórico de ocupação do terreno (Hirata & Rebouças 1999).

*Quadro 3: Foco e aplicação de diferentes níveis (escalas) de avaliação de perigo à poluição da água subterrânea (Foster et al. 2002).*



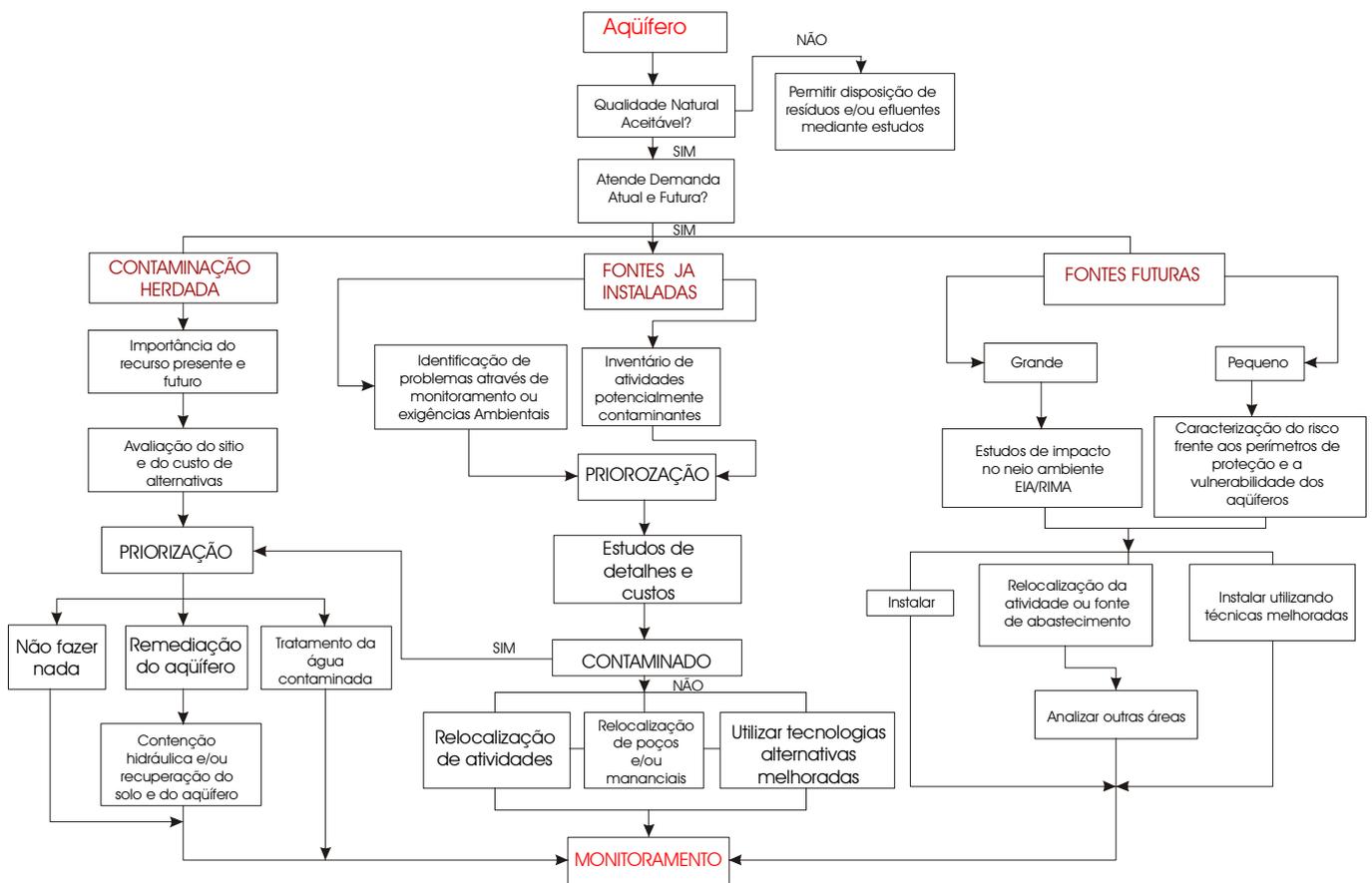


Figura 1. Estratégias de proteção do recurso hídrico subterrâneo frente a problemas de contaminação por fontes antrópicas (Hirata & Rebouças, 1999).

**Áreas de futura ocupação territorial (fontes futuras):** Com a delimitação de áreas mais susceptíveis, através de mapas de vulnerabilidade, é possível definir aquelas atividades que poderiam ou não serem instaladas ou mesmo aquelas que fossem condicionadas a mudanças no desenho da atividade. O propósito seria reduzir não somente os casos de contaminação, como também o grau de monitoramento e de cuidado ambiental necessários por parte do empreendedor. No caso de atividades de grande envergadura, os estudos de impacto ambiental (EIA) deveriam concentrar-se nas águas subterrâneas. Para selecionar áreas de instalação de uma atividade específica, poderiam ser empregados o mapa de vulnerabilidade natural de aquíferos e tabelas de permissividade (Quadro 4), que é uma lista na qual se indicam as atividades apropriadas ou não frente a diferentes classificações de vulnerabilidade do aquífero e de PPP/ZOC.

**Áreas já ocupadas (fontes potenciais existentes):** O grande problema que reside nesta situação é o de distinguir, entre milhares de atividades potencialmente contaminantes, aquelas

que apresentam maior perigo de contaminação do aquífero. Proceder a uma avaliação individual, caso a caso, seria pouco prático e extremamente custoso. Há necessidade, então, de se estabelecer prioridades. Para uma avaliação geral do aquífero, dever-se-ia iniciar com o mapeamento da vulnerabilidade à poluição antrópica, associado ao cadastro e classificação de cargas contaminantes potenciais, definindo-se atividades de maior perigo (interação entre vulnerabilidade e carga contaminante potencial, segundo Foster & Hirata 1988). Paralelamente a esta ação, deveriam ser identificados os poços ou mananciais de maior importância, segundo o seu uso. Nestes poços, seriam traçadas as ZOCs, onde se reconheceriam, a partir de cadastro de fontes potenciais de contaminação, aquelas que ofereceriam maior perigo à captação de água. Este procedimento permitiria que houvesse uma priorização de ações por parte do poder público no controle e na vigilância ambiental, destacando-se aquelas atividades em que se deveriam desenvolver os trabalhos detalhados, incluindo o monitoramento da água subterrânea. A carga contaminante, a exemplo da vulnerabilidade, pode ser classificada mediante métodos como o POSH (Foster & Hirata 1988). Fontes potenciais de contaminação importante são as áreas industriais abandonadas e antigos depósitos de materiais perigosos, que acabam sendo utilizados para outros fins (escolas, comércios, restaurantes, etc.). No caso da avaliação do perigo apontar para áreas ou atividades que mostrem um índice elevado de contaminação potencial, dever-se-ia tomar uma das três medidas: a) remoção da atividade; b) remoção da fonte de abastecimento de água; e c) melhora nas condições ambientais da atividade, reduzindo o potencial de geração de carga, pela introdução de tecnologias alternativas no tratamento e na disposição de contaminantes. Há muitas ações eficientes que redundam na diminuição ou eliminação da fonte potencial de contaminação dos solos e aquíferos (Foster et al. 2002).

**Áreas já contaminadas (fontes herdadas):** Após a identificação de áreas que tenham solo e/ou aquífero contaminados, dever-se-ia analisar a importância do recurso hídrico com relação: a) ao tipo de usuário e natureza da demanda (atual ou futura), b) à extensão do problema, c) à qualidade natural das águas e d) à produtividade do aquífero. Nas áreas de maior importância, identificar o risco (não perigo) a que está exposta uma população específica, frente à ingestão e ou ao contato com águas e solo contaminados. Esse tipo de avaliação de risco tem sido muito utilizado pela USEPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) e mesmo pela própria CETESB, em São Paulo, na análise de eventuais ações que seriam executadas para reduzir os problemas existentes de contaminação de aquíferos.

Normalmente, a remediação deve ser considerada sempre que o índice de risco, com nível de confiança de 95% na curva de probabilidades, incrementar em  $1 \times 10^{-4}$  caso na saúde humana. Quando o valor está entre este e  $1 \times 10^{-6}$ , são consideradas as avaliações de custo-benefício e definem-se as incertezas. Abaixo deste último valor, o Estado não deveria ter responsabilidades por casos adicionais de doenças que venham a ocorrer (Burmester & Leher, 1991). Com a detecção da contaminação, uma das seguintes alternativas poderia ser adotada: a) aceitação da contaminação do aquífero, buscando fontes alternativas e garantindo a não propagação da pluma (aplicação de barreiras hidráulicas e/ou físicas, por exemplo); e b) tratamento das águas do aquífero, após a extração do recurso.

**Áreas para novas captações de água:** Na área onde é planejada a construção de novas fontes de abastecimento de água, dever-se-ia priorizar o cadastro das atividades potencialmente contaminantes já existentes e traçar a zona de impacto (ZOI) de cada atividade (conceito análogo, mas inverso à ZOC, com o uso das mesmas técnicas – backward particles). Avaliar se as áreas situadas fora desses perímetros suprem as necessidades de água do usuário. Se necessário, avaliar os custos-benefícios da re-alocação da atividade potencialmente contaminante.

### **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Para a proteção das águas subterrâneas, torna-se necessário limitar o uso presente e futuro do terreno, as descargas de efluentes e as práticas de deposição de resíduos sólidos. Entretanto, um controle universal de uso do terreno, ou seja, que restrinja a ocupação indistintamente e que atue da mesma forma em toda a área, é pouco efetivo e apresenta altos custos econômicos e sociais. Desta forma, é importante utilizar a capacidade natural de proteção que oferece as camadas que recobrem a zona saturada do aquífero, para determinar o tipo de controle necessário para uma proteção apropriada. Métodos simples e robustos para o zoneamento do território (baseado na cartografia de vulnerabilidade e perímetros de proteção de poços) necessitam ser estabelecidos, conjuntamente com matrizes que indicam quais atividades podem ser ou não instaladas.

Quadro 4. Principais atividades permitidas e restringidas em cada uma das zonas de perímetro de proteção de poços e de vulnerabilidade do aquífero.

ATIVIDADES POTENCIALMENTE CONTAMINANTES	PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE POÇO				VULNERABILIDADE NATURAL DE AQUIFERO		
	I	II	III	IV	ALTA	MÉDIA	BAIXA
<b>Saneamento in situ</b>							
Unifamiliar	N	N	A	A	A	A	A
Edifícios, coletivos, públicos	N	N	PA	A	A	A	A
Posto de gasolina	N	N	PN	PA	PA	A	A
Aeropostos	N	N	PN	PA	PA	A	A
<b>Disposição de resíduos sólidos</b>							
Doméstico municipal	N	N	N	PN	PN	PA	A
Material de 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
Incineradores de resíduos sólidos	N	N	N	PN	N	PN	PA
<b>Minerações</b>							
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
<b>Indústrias (*)</b>							
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
<b>Lagoas de efluentes</b>							
Municipal/água resfriamento	N	N	PA	A	A	A	A
Industrial	N	N	N	N	PN	PA	PA
<b>Drenagem/infiltração/acidentes</b>							
Águas pluviais (tetos de casas)	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
<b>Infiltração de efluentes no solo</b>							
Indústria alimentícia	N	N	PN	PA	PA	A	A
Outras indústrias	N	N	N	N	PU	PA	A
Efluentes de deságüe	N	N	N	PN	PA	A	A
Lodo de deságüe	N	N	PN	PA	PA	A	A
Escorrimento de currais	N	N	PN	A	A	A	A
<b>Gado intensivo</b>							
Efluentes em lagoas	N	N	N	PN	PA	A	A
Deságüe de currais	N	N	PN	PA	PA	A	A
<b>Atividade agrícola</b>							
Uso de pesticidas	N	N	PN	A	PN	A	A
Uso não controlado de fertilizante ou disposição aberta	N	N	N	PN	PN	A	A
Armazenamento de 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 projetos especiais; A: aceitável, com projetos especiais; PA\*\*: desde que conectada à rede de esgoto; PA\*: com conexão à rede de esgoto; (\*): segundo classificação de indústrias de Foster; Hirata (1988); I: perímetro imediato de proteção

(poucos metros do poço); II: perímetro bacteriológico; III: perímetro de produtos químicos; IV: área de recarga do aquífero.

É imprescindível distinguir entre a contaminação da água subterrânea como recurso (ou seja, a que afeta ou pode afetar uma população ou um uso específico) e aquela em que a degradação abrange porções restritas do aquífero, sem uso presente ou futuro (ou seja, sem representar exatamente um risco, nem tampouco um prejuízo econômico grave). O primeiro caso é uma situação séria (e tratada neste texto). O segundo pode ser aceitável a partir de estudos prévios.

Finalmente, o meio físico tem condições para assimilar a carga contaminante aplicada. Da mesma forma, certas contaminações de aquíferos podem ser aceitas, desde que a pluma esteja restrita à área de desenvolvimento da atividade e que esta não faça uso da água subterrânea. A rigidez das medidas tomadas, em certos casos, tem gerado gastos excessivos, pois elas tem sido aplicadas com frequência, sem uma prioridade das atividades ou áreas mais importantes.

## ***BIBLIOGRAFIA***

- Adams, B. & Foster, S. 1992. Land-surface zoning for groundwater protection. Jour. Institution of Water and Environmental Management, n. 6, pp. 312-320.
- Albinet, M. & Margat, J. 1970. Cartographie da vulnérabilité a pollution des nappes d'eau souterraine. Bull. BRGM 2me. Serie: 3(4):13-22.
- Aller, L.; Bennet, T.; Leher, J.; Petty, R. 1985. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. USEPA Report 600/02-85/018.
- Burmester, D. & Leher, J. 1991. It's time to make risk assessment a science. GWMR, 11(3):5-15.
- Caldwell, S.; Barret, K; Chang, S. 1981. Ranking system for releases of hazardous substance. En: Conf. on Management of Uncontrolled Hazardous Waste Sites. Hazardous Materials Control Research Institute, Silver Spring, Maryland.. pp. 14-20.
- Carter, A.; Palmer, R.; Monkhouse, R. 1987. Mapping the vulnerability of groundwater to pollution from agriculture practice particularly in respect of nitrate. In: Inter. Conf. Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutant, Nordwijk, Proc...Nordwijk, Países Baixos. IHAS.
- Canter, L.; Knox, R.; Fairchild, D. 1987. Groundwater quality protection. Lewis Publishers, Inc. 562 pp.
- Civita, M.; Forti, P.; Marini, P.; Micheli, L.; Piccini, L.; Pranzini, G. 1990. Carta da vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi delle Alpi Apuane. Mem. explic, Monografia GNDCI. - CNR. n399, Firenze, 56 pp.
- Fernandez, A. & Hirata, R. 2003. Vulnerability of fractured aquifers: a case study of the

- application of Cenozoic tectonics (submetido). São Paulo, Brasil.
- Foster, S; Hirata, R.; Gomes, D.; D'Elia, M. e Paris, M. 2002. Groundwater Quality Protection: a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies. The World Bank. Washington, D. C., 103 pp.
- Foster, S; Adams, B.; Morales, M; Tenjo, S. 1993. Groundwater protection strategies: a guide towards implementation. UK ODA, CPR, WHO/PAHO – HPE Technical Manual. Lima, Peru. 88 pp.
- Foster, S; Adams, B.; Morales, M; Tenjo, S. 1992. Groundwater protection policy: a guide to requirements. CEPIS Tech. Report. (WHO-PAHO-CEPIS), Lima, Perú.
- Foster, S & Hirata, R. 1988. Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data. CEPIS Tech. Report. (WHO-PAHO-CEPIS), Lima, Perú.
- Haertlé, T. 1983. Method of working and employment of EDP during the preparation of groundwater vulnerability maps. En: Groundwater in water resources planning, UNESCO. INTER. SYMP, Proc...Koblenz, Alemanha, 1983, UNESCO/IAH/IAHS. vol II, 1073-1085 pp.
- Hargerty, D.; Pavoni, L. Heer, J. 1973. Solid water management. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Hirata, R; Bastos, C.; Rocha, G. Iritani, M.; Gomes, D. 1991. Groundwater pollution risk vulnerability map of the São Paulo State – Brazil. Water Science Tech. 24:236-246.
- Hirata, R. & Rebouças, A. 1999. La protección de los recursos hídricos subterráneos: una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos. Boletín. Geol. Minero. Vol. 110(4):423-436.
- Kufs, C. 1980. Rating the hazard potential on waste disposal facilities. En: Nat. Conf. on Management of Uncontrolled Hazardous Waste Sites. Proc. Silver Spring. Hazardous Material Control Research Institute. 30-41 pp.
- Le Grand, H. 1964. System for evaluating contamination potential of some waste sites. American Water Work Association Journal. Vol 56 (8):959-974
- Le Grand, H. 1983. A standardized system for evaluating waste disposal sites. NWWA, Worthington, OH: 49 pp.
- Philips, C.; Nathwani, J.; Mooij, H. 1977. Development of a soil-waste interaction matrix for assessing land disposal of industrial wastes. Wat. Research. (11):859-868.
- Rao, P.; Hornsby, A.; Jessup, R. 1985. Indices for ranking the potential for pesticide contamination of groundwater. En: Cong. Soil Crop Sciences Soc. of Florida. SCSSE. 44:1-8.
- Seller, L. & Canter, L. 1980. Summary of selected groundwater quality impact assessment methods. NCGWR Report. 80-3, Norman OK: 142 pp.
- Taltasse, P. 1972. Mapas da vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (SP). Universidade de São Paulo (IGc). Publ. Avulsa n.1.
- Vrba, J. & Zaporozec, A. 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Contributions to Hydrogeology, Volume 16, Hanover, Verlag Heinz Heise, 131 p.
- Western Michigan University. 1981. Hydrogeologic Atlas of Michigan. Dept. of Geology.

Kalamazoo, Michigan. Estados Unidos.