cgee
Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Ciência, Tecnologia e Inovação

Anexo II-b

Prospecção Tecnológica
Recursos Hídricos

Qualidade da Água Subterrânea

Documento Final

Carlos Eduardo Morelli Tucci
Instituto de Pesquisas Hidráulicas
Departamento de Hidromecânica e Hidrologia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal do Pernambuco

Dezembro, 2003

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 4
2. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 5
2.1 ALGUMAS DEFINIÇÕES 5
2.2 SUSTENTABILIDADE QUANTITATIVA 11
2.3 DISTRIBUIÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO BRASIL 14
3. CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA 21
3.1 O DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E A QUALIDADE DA ÁGUA 21
3.2 FONTES DE CONTAMINAÇÃO 23
3.3 CARACTERÍSTICAS DA CONTAMINAÇÃO 28
3.4 AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO 31
3.5 CARACTERÍSTICAS E CONTAMINAÇÃO DOS AQÜÍFEROS BRASILEIROS 34
4. GERENCIAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 40
4.1 CARACTERÍSTICAS DO GERENCIAMENTO 40
4.2 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA 43
5. OPORTUNIDADES DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA 47
5.1 LINHAS DE PESQUISA 47
5.2.1 Regional 48
5.2.2 Fontes e Contaminação 51
5.2.4 Ferramentas e Produtos 54
5.2.5 Gestão 55
5.3 MECANISMOS DE INVESTIMENTOS 55
5.4 QUESTÕES UTILIZADAS NA DISCUSSÃO 56
6. CONCLUSÕES 57
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 58

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento urbano, agrícola e industrial brasileiro tem produzido grandes impactos sobre os mananciais superficiais e subterrâneos. Os impactos são do tipo quantitativo, quando o rebaixamento do nível d'água dos aqüíferos ocorre em face da super exploração do manancial e qualitativo quando o manancial é contaminado por poluentes.

Os mananciais superficiais estão extremamente comprometidos pela ação antrópica e existe uma forte pressão sobre o controle dos efluentes que poluem estes mananciais superficiais. Em face disto, uma das alternativas tem sido despejar parte destes efluentes no subsolo, utilizando o mesmo como filtro ou tratamento. Este processo, insustentável num longo período dificulta a fiscalização e relação causa-efeito devido principalmente a forma distribuída que ocorre. A regulação e a gestão dos impactos sobre a qualidade da água subterrânea devido a efluentes agrícolas, urbanos e industriais despejados diretamente nas águas subterrâneas é um dos principais problemas atuais em todo o mundo. Geralmente, esses impactos ocorrem em áreas onde parte da população retira água desses mananciais subterrâneos poluídos para seu uso, gerando riscos e impactos para a saúde.

A capacidade de avaliação desses processos e o seu próprio entendimento exigem uma combinação de conhecimentos sobre hidrogeologia, características de fluidos, composição química da água e suas reações no sistema físico e biológico. Dentro deste contexto é necessário identificar os gargalos de Ciência e Tecnologia que limitam o desenvolvimento de uma gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos tanto quantitativo quanto qualitativo.

Este documento propõe identificar as necessidades de desenvolvimento de conhecimento científico para uma abordagem integrada dos principais tipos de contaminação nas águas subterrâneas, encontrados na realidade brasileira. Na abordagem integrada, os aspectos quantitativos da água subterrânea e seu gerenciamento, também são levados em consideração.

Os objetivos deste documento são de avaliar os fatores determinantes do processo de poluição e contaminação de águas subterrâneas no Brasil e propor ações de Ciência, Tecnologia e Inovação que busquem auxiliar na mitigação desses problemas.

No capítulo seguinte são apresentadas as características quantitativas sobre as águas subterrâneas, no terceiro capítulo os aspectos de contaminação, no quarto capítulo são discutidos os elementos de gestão dos recursos hídricos subterrâneos e no capítulo 5 são identificados os principais aspectos de Ciência e Tecnologia relacionadas com a qualidade da água subterrânea e as questões propostas para discussão.

Este documento deve ser visto como preliminar, construído com base no conhecimento disponível na literatura, deste consultor e da contribuição de um grupo de pesquisadores consultados durante a sua elaboração.

2. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

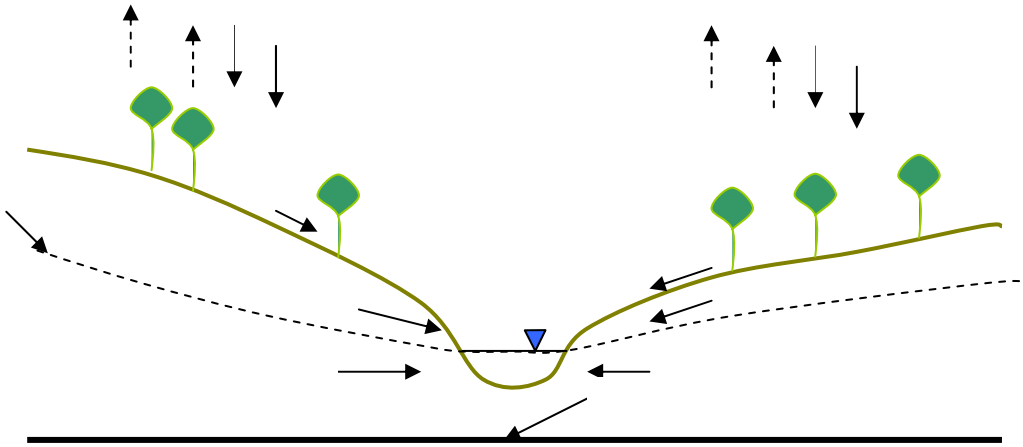
2.1 ALGUMAS DEFINIÇÕES

O escoamento dentro do solo ocorre em duas camadas principais chamadas de (Figura 2.1):

(a) meio não-saturado, próximo da superfície onde o solo não está saturado de água e a água escoa por percolação até o meio saturado (aqüífero não-confinado) ou de volta para a superfície. Este escoamento é geralmente denominado de escoamento sub-superficial;

(b) meio saturado: é a parcela do solo saturada de água que se encontra imediatamente abaixo da zona não saturada, ou que se encontra abaixo de algumas camadas de solo permeáveis ou semipermeáveis. O escoamento que ocorre neste sistema é denominado de escoamento subterrâneo e o volume saturado é chamado de aqüífero.

A camada não-saturada possui uma relação direta com os processos de curto prazo ligados ao escoamento superficial enquanto que os processos mais lentos estão relacionados com o escoamento subterrâneo. Devido a isto é que muitas vezes o escoamento não-saturado é muito mais estudado dentro do contexto do escoamento superficial do que do subterrâneo. No entanto, no que se refere à contaminação e à alimentação do aqüífero, é um componente ligado ao processo do escoamento subterrâneo.



P = precipitação; E = evapotranspiração; Q_s= escoamento superficial; Q_{ss} = escoamento subsuperficial; Q_b = escoamento subterrâneo.

Figura 2.1 - Sistemas do ciclo hidrológico terrestre.

O hidrograma resultante da precipitação sobre uma bacia hidrográfica representa o somatório dos efeitos dos escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo, como apresentado de forma esquemática na figura 2.2.

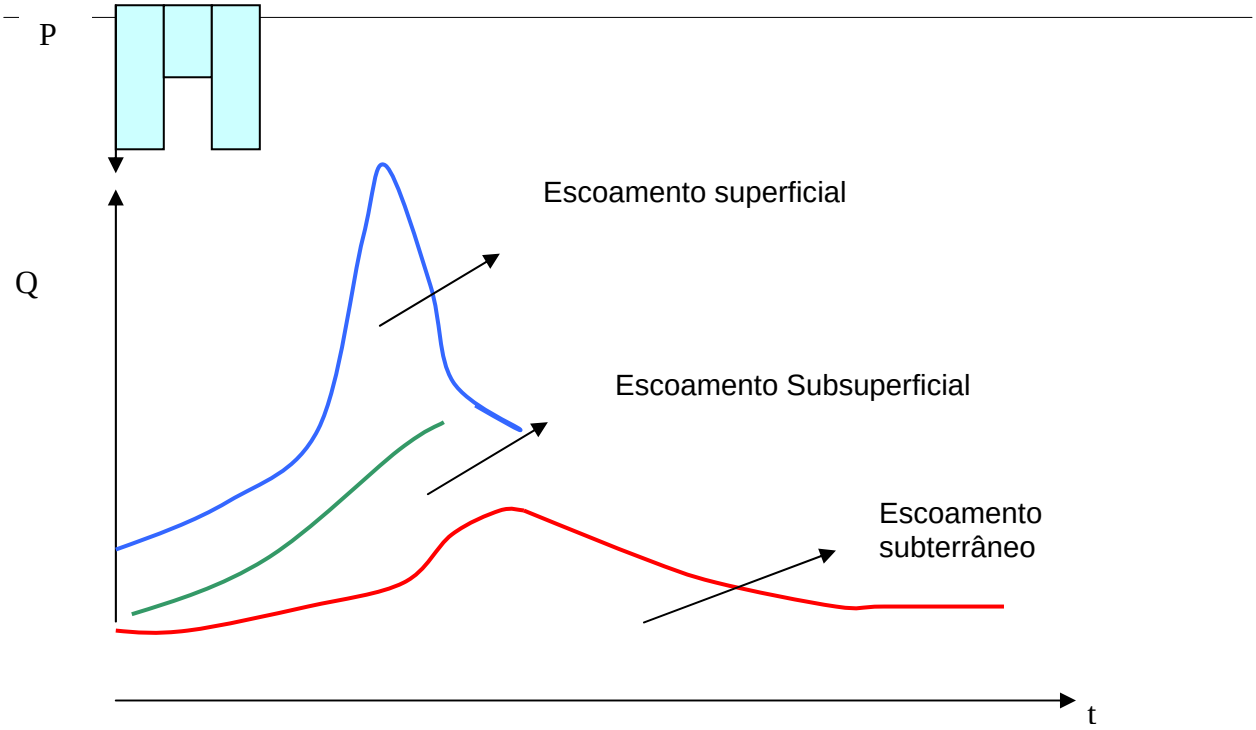


Figura 2.2 - Hidrograma e os escoamentos.

Um *aqüífero* é uma formação geológica capaz de armazenar e suprir com água poços e nascentes. Os aqüíferos possuem duas características fundamentais: capacidade de armazenamento e capacidade de escoamento da água subterrânea (Foster et al, 2003).

Os aqüíferos podem ser classificados de acordo com as características hidrodinâmicas ou de acordo com as características geológicas.

Quanto à primeira classificação (figura 2.3) os aqüíferos são considerados livres (não- confinados ou freáticos), suspenso, confinados e semi confinados (confinados drenantes) (Feitosa e Manoel Filho, 1997).

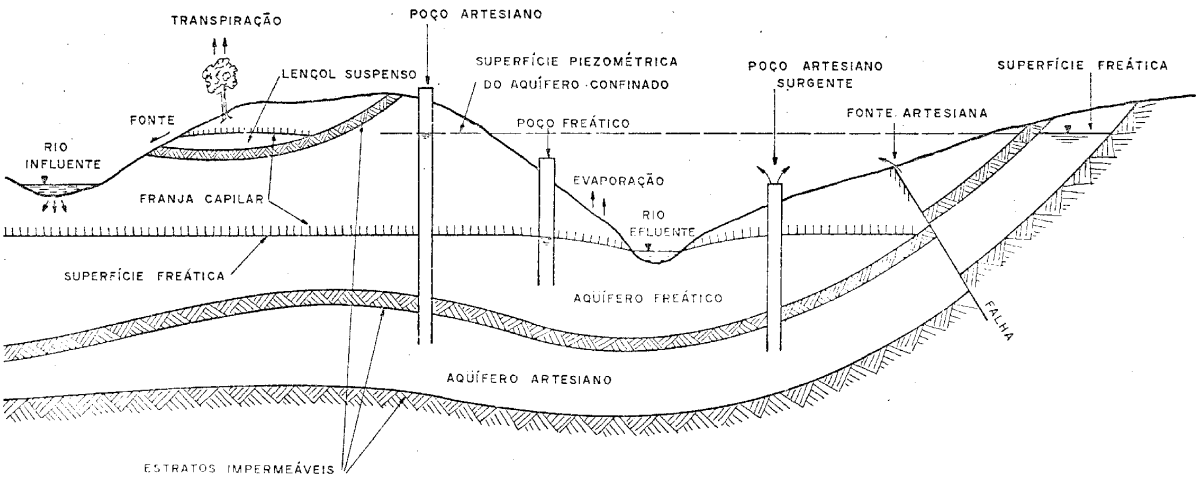


Figura 2.3 - Tipos de aqüíferos. Classificação feita de acordo com as características de escoamento da água.

Aqüífero livre é aquele que está submetido à pressão atmosférica. Seu limite superior é a superfície freática, na qual todos os pontos se encontram à pressão atmosférica. Geralmente nos aqüíferos livres a área de recarga é toda a área do aqüífero.

Aqüífero suspenso é um caso particular de aqüífero livre formado sobre uma camada impermeável ou semipermeável de extensão limitada.

Aqüífero confinado é aquele no qual a pressão no topo é maior do que a pressão atmosférica (Caicedo, 1993). Quando as camadas superior e inferior são impermeáveis o aqüífero é não-drenante. Se pelo menos uma das camadas limítrofes for semipermeável, o aqüífero é chamado de confinado drenante, permitindo a entrada ou saída de água pelo topo e/ou pela base por drenança vertical. Essa camada semipermeável é chamada de *aquitard*.

Ao ser perfurado um poço num aqüífero confinado o nível d'água se eleva até a superfície piezométrica (ou potenciométrica) do aqüífero. Se a cota piezométrica for superior ao nível do terreno, o aqüífero confinado é chamado de artesiano.

Num aqüífero confinado a área de descarga pode ficar geograficamente distante dos locais de captação. A proteção das áreas de recarga de um aqüífero é um dos principais aspectos na proteção do próprio aqüífero quanto à quantidade e qualidade da água.

Quanto às características geológicas, os aqüíferos podem ocorrer em camadas sedimentares ou em rochas ígneas ou metamórficas. A seguir são descritos os tipos mais comuns:

Aluvião

No caso de sedimentos não-consolidados destacam-se os aluviões e as dunas. Os depósitos de aluvião formados pelos sedimentos erodidos e transportados nas chuvas torrenciais localizam-se em locais favoráveis a recarga nos talvegues e nos leitos de rios, riachos e lagoas.

Dunas

As dunas são formadas por sedimentos como areia fina e silte que são transportados e depositados pelos ventos. É o caso das formações arenosas nas regiões costeiras, muito comuns no Rio Grande do Norte e no Ceará.

Os aqüíferos formados por sedimentos não-consolidados são fáceis de serem perfurados ou escavados, são pouco profundos, possuem alta capacidade de infiltração potencial e conseqüentemente são altamente vulneráveis.

Rocha sedimentar – arenito

As rochas sedimentares formadas pela compactação e cimentação de areias, os chamados arenitos, formam aqüíferos regionais que armazenam grandes quantidades de água potável.

A condutividade hidráulica dos arenitos em geral é grande, garantindo condições de um bom aqüífero. Se o arenito se apresentar fraturado, a contribuição das fraturas para o armazenamento e o transporte da água, aumentam suas propriedades aqüíferas.

Rochas carbonáticas

As rochas carbonáticas ocorrem nas formas de calcáreo ou dolomitas. As rochas carbonáticas apresentam significativa condutividade hidráulica produzida por fraturas resultantes de movimentos tectônicos, ao longo das quais a circulação de água subterrânea atua dissolvendo a calcita e a dolomita, formando os aqüíferos cársticos, com grandes vazios que acumulam bastante água. Os aqüíferos cársticos em geral são bastante heterogêneos e anisotrópicos.

Cristalino

As rochas ígneas e metamórficas apresentam porosidade primária extremamente baixa. No entanto, em regiões com rocha fraturada, o acúmulo de água é significativo formando o aqüífero fissural. O sucesso na locação de um poço, em região cristalina, depende de se conseguir localizar domínios fraturados. No cristalino do semi-árido brasileiro a produção dos poços é de ordem de 2m³/h. O cristalino, nas regiões úmidas do Sudeste brasileiro, apresenta-se recoberto por um manto de intemperismo e por conta de pluviosidade mais abundante e melhor distribuída, o manto de intemperismo e a zona fissurada são capazes de fornecer vazões bem maiores, com médias de 20m³/h (Feitosa e Manoel Filho, 1997).

No aqüífero cárstico e no aqüífero fissural, o estudo da propagação de contaminantes deve levar em consideração a existência de caminhos preferenciais que podem propagar plumas de poluentes rapidamente para dentro do aqüífero.

A figura 2.4 mostra uma representação simplificada do aqüífero sedimentar, aqüífero fissural e aqüífero cárstico.

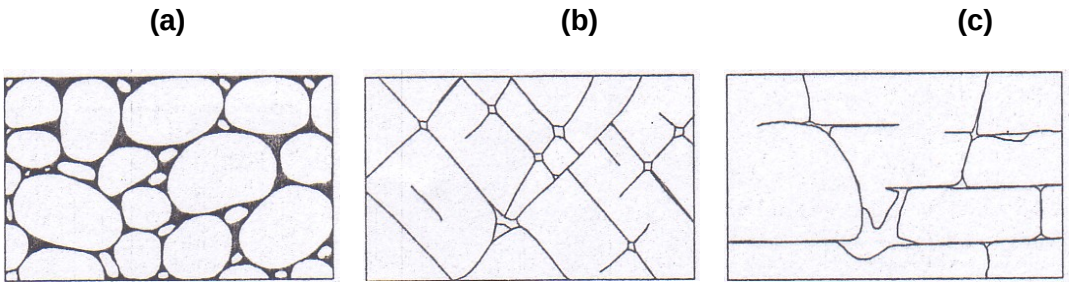


Figura 2.4 – Porosidade em diferentes tipos de aqüíferos: (a) rocha sedimentar de granulometria heterogênea; (b) rocha com porosidade secundária devido a fraturas; (c) rocha com porosidade secundária devido a dissolução (Meinzer, 1923 in Custódio & Llamas, 1983).

2.2 SUSTENTABILIDADE QUANTITATIVA

A sustentabilidade quantitativa de um aqüífero depende da exploração e da entrada natural de água do aqüífero. Como fonte de disponibilidade hídrica é importante entender a sua capacidade de armazenar água e a sua produção através da exploração de poços. Existe um balanço entre a entrada e saída de água no aqüífero onde existe uma sustentabilidade quantitativa de longo prazo. A retirada de água dentro de certos limites de exploração pode levar ao rebaixamento do mesmo, mas dentro de limites de sustentabilidade.

O maior bombeamento nos poços pode induzir recargas provenientes de outros aqüíferos ou de cursos d'água superficiais. Se o bombeamento for intensificado acima dos limites da recarga induzida pode levar o aqüífero a um insustentável cenário de longo prazo que eliminará esta fonte de disponibilidade hídrica (figura 2.5).

A água subterrânea geralmente é uma fonte de água mais segura e confiável que a água superficial. Possui um reservatório natural de regularização e permite a sua utilização e retirada de forma distribuída no espaço. No entanto, existem limites a sua exploração, relacionados diretamente com sua capacidade de recarga.

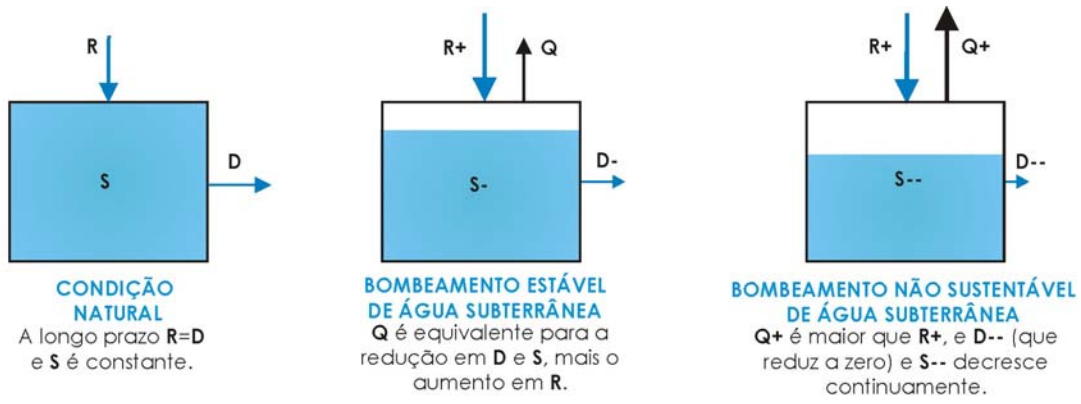


Figura 2.5 - Balanço dos sistemas subterrâneos (Foster et al, 2003)

Na figura 2.6 podem-se observar os hipotéticos estágios de exploração dos aqüíferos em função da gestão da água dos mesmos.

No ciclo hidrológico, a água subterrânea é o principal manancial de águas doce em volume no ambiente terrestre. Com raras exceções a água subterrânea é o reservatório natural de água de boa qualidade fundamental para regularizar a disponibilidade de água ao longo do tempo e distribuída espacialmente. Enquanto que a água superficial ocorre principalmente durante o período chuvoso, os aqüíferos, além de armazenarem a água em diferentes níveis sustenta a vazão dos rios ao longo do tempo tornando o fluxo perene em grande parte dos rios. Isto ocorre devido a baixa velocidade (1m/dia a 100 m/dia, Tainhoff, 2003) de movimento da água no solo entre diferentes camadas geológicas. Portanto, o tempo do ciclo da água subterrânea não é de dias ou meses, mas de dezenas ou milhares de anos. A diferença entre a água superficial e subterrânea também é devida ao meio físico e químico no qual os fluxos ocorrem e no qual a água é influenciada tanto na velocidade como na sua composição.

Geralmente, a delimitação das bacias hidrográficas, nas quais é realizado o gerenciamento dos recursos hídricos, é realizada tendo como base o escoamento superficial. A delimitação do fluxo e o armazenamento subterrâneo apresentam limites que podem estar fora dos limites superficiais da bacia em função dos condicionantes subterrâneos geológicos.

Nas questões relacionadas à outorga de recursos hídricos, é importante ressaltar a integração entre as águas superficiais e subterrâneas; um bombeamento,

extraindo grandes vazões, próximo de um curso d'água, induz uma recarga do aqüífero proveniente das águas do rio, acarretando uma diminuição das vazões mínimas do rio. No processo de outorga das águas superficiais e subterrâneas a análise deve ser feita de forma integrada.

Na figura 2.7, podem-se observar os cenários de interação da água subterrânea e superficial num rio: (a) cenários em que os rios são dependentes do escoamento subterrâneo para torná-lo perene; (b) cenários em que o rio alimenta o fluxo lateral subterrâneo e (c) o cenário ainda mais crítico para o aqüífero, onde a fonte de recarga é o rio.

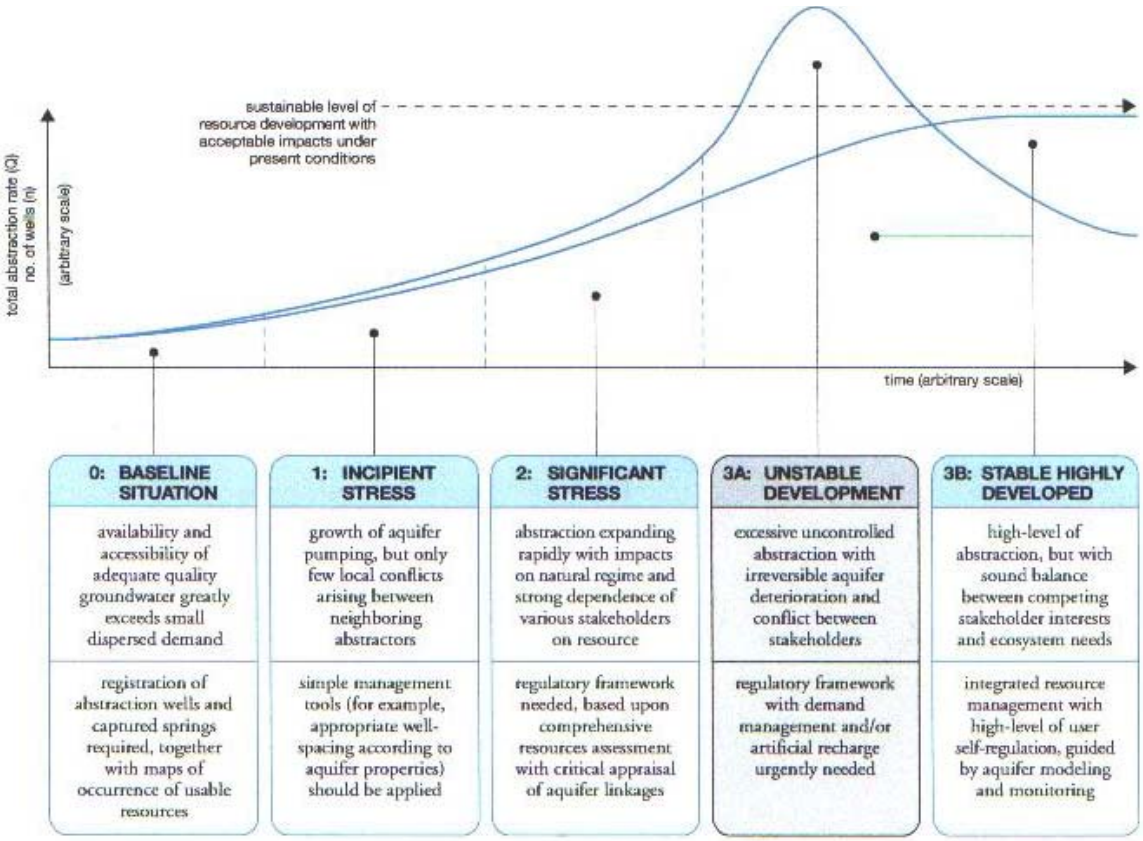


Figura 2.6 - Estágios hipotéticos de desenvolvimento de um aqüífero (Tainhof et al, 2003)

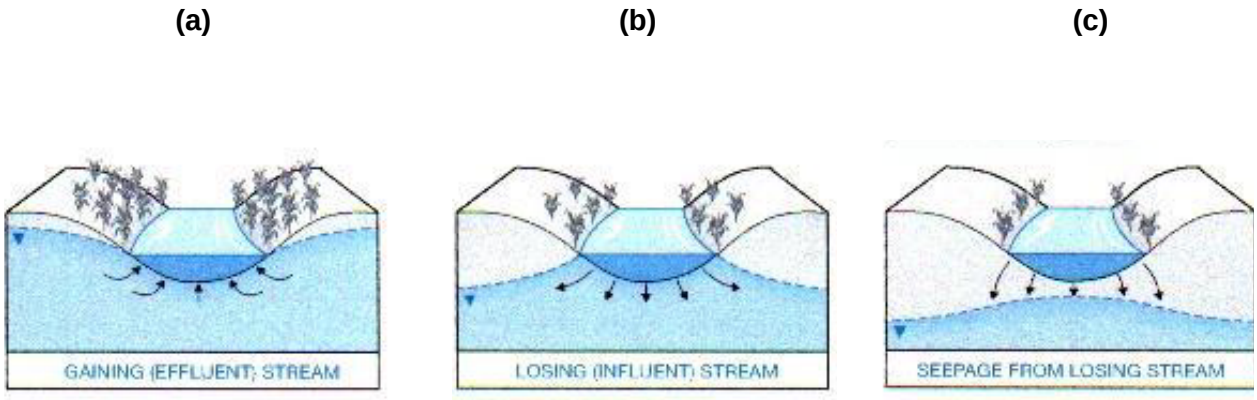


Figura 2.7 - Interações entre os rios e os aqüíferos (Tainhoff, 2003)

Na análise da sustentabilidade da exploração de um aqüífero em zonas urbanas, um ponto importante é a interferência entre poços. Nos bairros mais populosos, cada prédio de apartamento perfura o seu poço e os cones de rebaixamento se juntam, aumentando o rebaixamento total, reduzindo a vazão obtida em cada poço e gerando conflitos entre os usuários.

A ocorrência e disponibilidade hídrica subterrânea é uma combinação de fatores climáticos e geológicos numa determinada região. Formações rochosas pouco permeáveis geralmente possuem baixa capacidade de armazenamento e a disponibilidade ocorre principalmente nas fissuras. Neste cenário a disponibilidade é fortemente dependente do clima. Nas formações hidrogeológicas sedimentares a potencialidade de armazenamento da água é maior e o reservatório tem condições de regularizar a vazão e ficar menos dependente do clima local.

2.3 DISTRIBUIÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO BRASIL

Este item foi adaptado e reproduzido de MMA (2002). O Brasil pode ser dividido em 10 províncias hidrogeológicas (figura 2.8): Escudo Setentrional, Amazonas, Escudo Central, Parnaíba, São Francisco, Escudo Oriental (Nordeste e Sudeste), Paraná, Escudo Meridional, Centro-Oeste e Costeira. Na figura 2.9 são apresentados os aqüíferos que compõem estas províncias, além da delimitação das bacias brasileiras. Quanto a utilização das águas subterrâneas, a Província Hidrogeológica Escudo Oriental do Nordeste – onde está localizada a Região

Semi-Árida – tem pequena disponibilidade hídrica, devido à formação de rochas cristalinas. Nesta região é freqüente se observar o teor elevado de sais nas águas, o que restringe ou impossibilita seu uso. Na Província Hidrogeológica Costeira, os sistemas aqüíferos Dunas e Barreiras são utilizados para abastecimento humano nos Estados do Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte. O aqüífero Açu é intensamente explotado para atender ao abastecimento público, industrial e em projetos de irrigação (fruticultura) na região de Mossoró (RN). O aqüífero Beberibe é explotado na Região Metropolitana de Recife por 2 mil poços que atendem condomínios residenciais, hospitais e escolas. O crescimento desordenado do número de poços tem provocado significativos rebaixamentos do nível de água e problemas de salinização do aqüífero costeiro em Boa Viagem, no Recife.

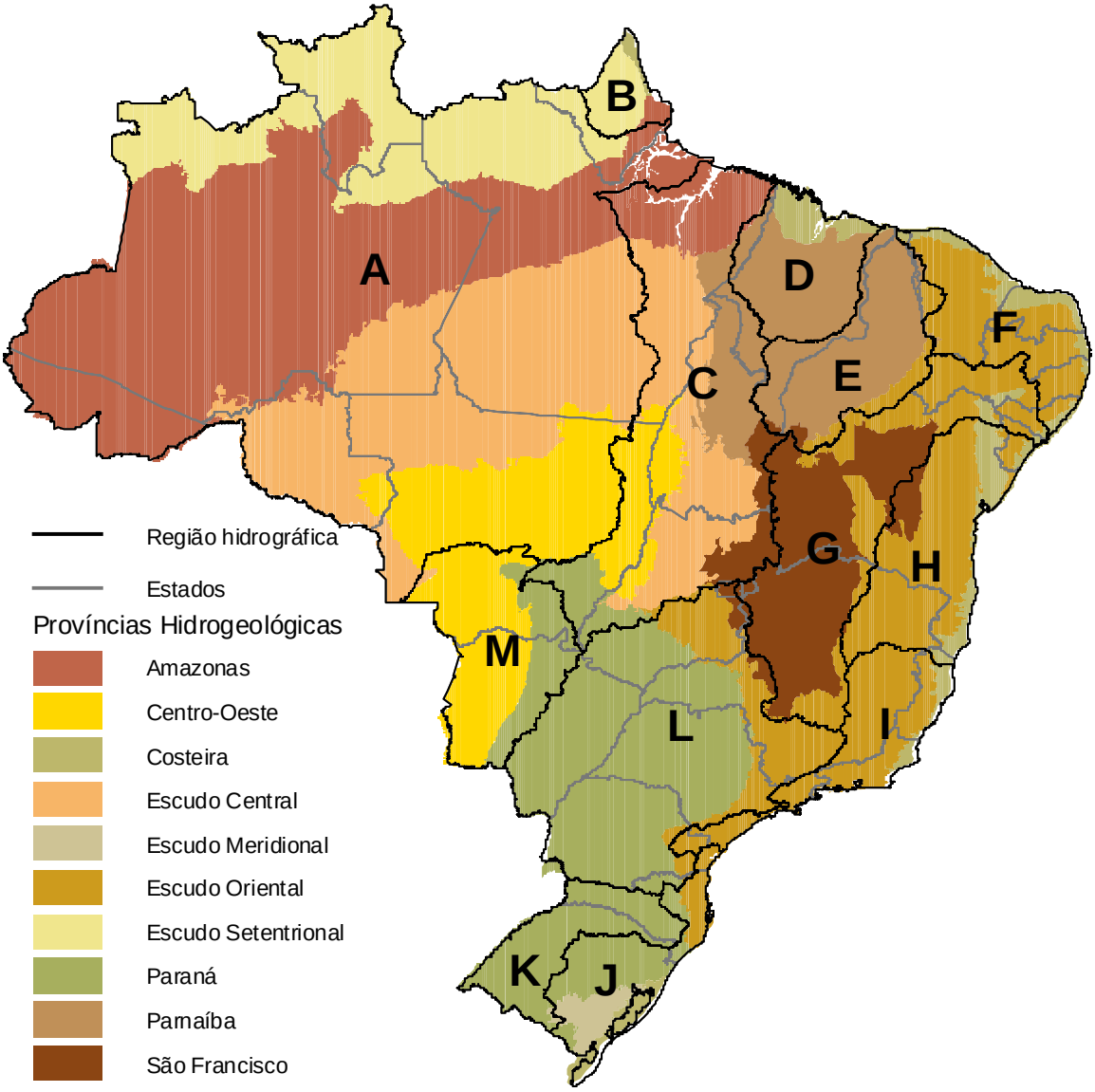


Figura 2.8 - Províncias hidrogeológicas do Brasil (MMA, 2002)

Na Província Hidrogeológica do Paraná, nas regiões hidrográficas do Paraná, Paraguai, Uruguai e Costeira do Sul, está situado o Guarani, um dos maiores sistemas aqüíferos do mundo, que apresenta uma área de 1,2 milhões de km^2 (840 mil km^2 em território brasileiro) e estende-se por quatro países (Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina). As reservas permanentes do aqüífero são da ordem de 45 mil km^3. As suas águas são utilizadas para abastecimento humano, como é o caso de Ribeirão Preto (SP), por indústrias e para o lazer (balneários). O aqüífero Guarani é objeto de estudos e elevados investimentos por parte dos

quatro países integrantes, que, com o apoio da Organização dos Estados Americanos e do Banco Mundial, estão implementando o Projeto de Proteção Ambiental e Gestão Sustentável Integrada do Sistema Aqüífero Guarani.

Figura 2.9 - Principais sistemas aqüíferos do Brasil (MMA, 2002)

O volume de água subterrânea no Brasil está estimado em 112 mil km^3 (Rebouças, 1988). Há cerca de 300 mil poços tubulares em operação, sendo perfurados mais de 10 mil poços por ano. Cerca de 15,6 % dos domicílios (26,5 milhões de habitantes) utilizam exclusivamente a água subterrânea de poços ou nascentes (IBGE, 2000), A tabela 2.1 mostra a profundidade, a vazão, o desvio padrão da vazão e a capacidade específica dos poços tubulares nos principais sistemas aqüíferos, agrupados pelas regiões hidrográficas dominantes. É notória a alta produtividade dos poços localizados nas regiões hidrográficas do Parnaíba

e do Paraná e, a baixa produtividade daqueles situados na região do cristalino semi-árido nordestino. Outro exemplo da variabilidade são as grandes vazões obtidas no aqüífero cárstico do Tocantins (135m³/s), enquanto no aqüífero fraturado, também na Região Norte, as vazões ficam na faixa de 5m³/s. As potencialidades são bastante variáveis, como se abstrai da verificação do desvio padrão, apresentado na tabela 2.1.

Deve-se ressaltar a importância estratégica dos recursos hídricos subterrâneos, geralmente com qualidades físico-química e biológica muito boas para todos os usos. A explotação de águas subterrâneas vem registrando um expressivo incremento nos últimos anos. Vários núcleos urbanos abastecem-se de água subterrânea de forma exclusiva ou complementar. Indústrias, propriedades rurais, escolas, hospitais e outros estabelecimentos utilizam, com freqüência, água de poços profundos. Importantes cidades do País dependem integral ou parcialmente da água subterrânea para abastecimento, como por exemplo: Ribeirão Preto (SP), Mossoró e Natal (RN), Maceió (AL), região metropolitana de Recife (PE), Barreiras (BA). No Maranhão, mais de 70% das cidades são abastecidas por águas subterrâneas. No Piauí, o percentual supera os 80%. As águas subterrâneas termais estimulam o turismo em cidades como Caldas Novas em Goiás, Araxá e Poços de Caldas em Minas Gerais. Além disso, a água mineral atualmente é amplamente usada pelas populações dos centros urbanos pela sua qualidade.

Região Hidrográfica Dominante	Sistema Aqüífero	Tipo de Aqüífero	Prof. (m)	Q (m^3/h)	s (m^3/h)	q ($m^3/h/m$)
Amazonas	Boa Vista	Poroso	36	33	23	1,82
	Alter do Chão	Poroso	133	54	65	1,89
	Solimões	Poroso	56	27	21	3,06
Costeira do Norte	Cristalino Norte	Fraturado	58	5	4	0,06
Tocantins	Barreiras	Poroso	25	18	15	5,35
	Pirabas	Cárstico	220	135	97	11,81
Tocantins/Paraguai	Ponta Grossa	Poroso	150	6	9	0,37
	Furnas	Poroso	124	17	13	1,56
Costeira do Nordeste Ocidental	Itapecuru	Poroso	91	12	13	1,86
Parnaíba	Poti-Piauí	Poroso	226	40	35	2,58
	Cabeças	Poroso	284	50	62	8,18
	Serra Grande	Poroso	172	15	14	2,41
Costeira do Nordeste Oriental	Dunas	Poroso	38	7	5	1,77
	Barreiras	Poroso	43	5	3	0,91
	Açu	Poroso	443	37	42	1,96
	Beberibe	Poroso	246	78	53	3,75
Costeira do Nordeste Oriental/ Costeira do Leste/ São Francisco	Cristalino Nordeste	Fraturado	51	2	3	0,10
São Francisco	Urucuia-Areado	Poroso	89	10	8	0,97
	Bambuí	Cárstico-fraturado	85	14	21	0,52
	Cristalino Centro	Fraturado	85	8	9	0,19
Costeira do Leste	Marizal	Poroso	141	15	10	2,00
	São Sebastião	Poroso	170	40	46	2,37
Costeira do Leste/Costeira do Sudeste/Paraná	Cristalino Sudeste	Fraturado	129	9	10	0,14
Paraguai	Cuiabá	Fraturado	136	19	24	0,57*
Paraná/Uruguai/Costeira do Sul	Bauru-Caiuá	Poroso	131	24	17	1,34
	Guarani	Poroso	263	54	59	2,52
	Serra Geral	Fraturado	123	23	24	3,34
Costeira do Sul	Cristalino Sul	Fraturado	83	8	12	0,12

Prof.: Profundidade média; Q: Vazão média; s: desvio padrão da vazão; q: capacidade específica média para aqüíferos porosos e capacidade específica mediana para aqüífero fraturados e cárstico-fraturados.

Fonte: DNPM/CPRM, 1983.

Tabela 2.1 - Parâmetros hidráulicos dos poços tubulares nos principais sistemas aqüíferos

No Brasil, a água subterrânea ainda tem, regra geral, uma boa qualidade para consumo humano, principalmente. Por sua vez, estima-se que a extração de apenas 25% das taxas anuais de recarga daria para ofertar cerca de 4.000m^3/ano, per capita, à sua população, estimada em 170 milhões de habitantes, Figura 2.10, (Rebouças, 2002).

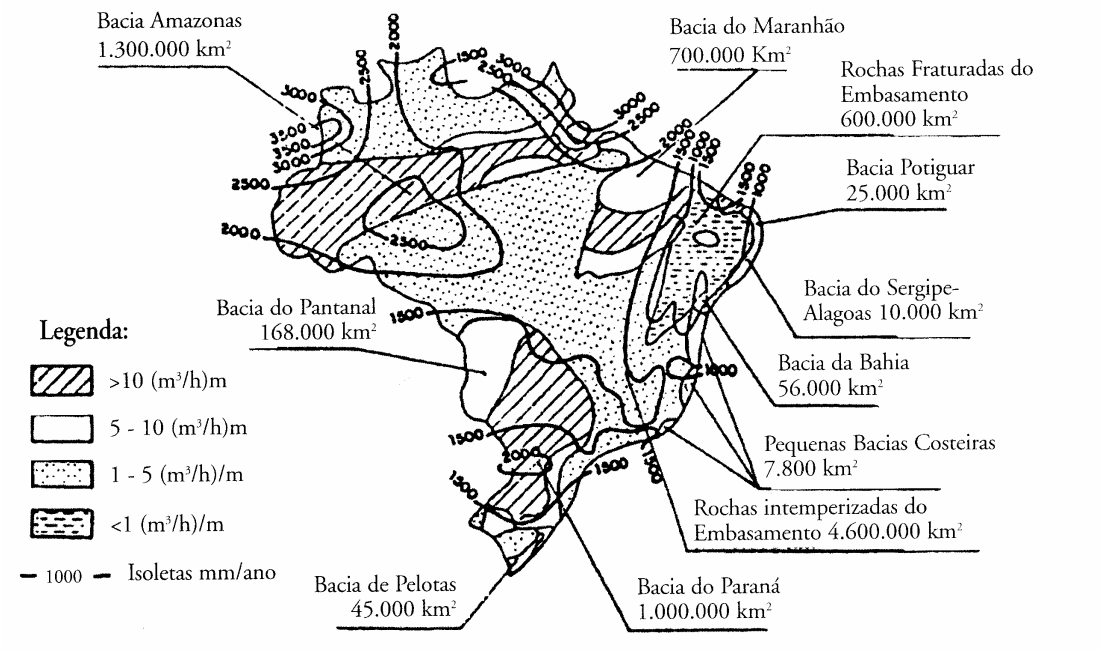


Figura 2.10 - Potenciais de água subterrânea no Brasil (Rebouças, 2002)

A potencialidade de água subterrânea no território nacional varia bastante. Nos aqüíferos porosos mais promissores, a capacidade específica pode ser superior a 10m³/h por metro de rebaixamento. Nestas áreas, a possibilidade de obtenção de vazões por poço é entre 250 e mais de 500 m^3/h, com o rebaixamento de 50 metros do respectivo nível estático ou nível d'água (NA). O volume produzido por poço, durante16 horas de operação por dia, seria suficiente para abastecer entre 20 mil e mais de 50 mil pessoas com uma taxa *per capita* de 200 litros/dia.

Nas rochas cristalinas, em regiões úmidas, com espesso manto de alteração, as capacidades específicas variam entre 1 e 5 $m^3/h.m^{-1}$, ou seja, as vazões explotáveis com até 50 metros de rebaixamento do NA do respectivo poço, durante 16 horas/dia de bombeamento, seriam suficientes para abastecer contingentes médios de até 10 mil habitantes.

Apenas no domínio de rochas cristalinas do Nordeste semi-árido, as capacidades específicas são inferiores a 1 $m^3/h.m^{-1}$. Todavia, a produção de 0,5 m^3/h, com rebaixamento do nível d'água no poço (NE) de 20 metros e operando 16 horas por dia, daria para abastecer contingentes de até 1.500 pessoas com uma taxa *per capita* de 100 litros/dia.

O Brasil apresenta uma deficiência séria no conhecimento do potencial hídrico de seus aqüíferos e do seu atual estágio de explotação. Os estudos regionais são escassos e encontram-se defasados. Mais recentemente, a identificação de aqüíferos contaminados tem estimulado o desenvolvimento de estudos mais detalhados em áreas freqüentemente pequenas. É imperativo ampliar o conhecimento a respeito das recargas e limites de explotação sustentável dos aqüíferos, além das ações necessárias com vistas à proteção dos mesmos. Para subsidiar o desenvolvimento de metodologias adequadas de gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

3. CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

3.1 O DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E A QUALIDADE DA ÁGUA

O desenvolvimento econômico da sociedade moderna tem levado à contaminação das águas superficiais, representada por rios, lagos e reservatórios; águas subterrâneas e o ambiente costeiro. Este processo ocorrido principalmente a partir da metade do século 20, em função do crescimento econômico do pós-guerra. Neste processo mais evidente, observou-se um grande impacto sobre as águas superficiais. Após algum tempo ocorreu a percepção pública que não era possível continuar poluindo as águas superficiais, quando na década de 70 apareceram as primeiras restrições ambientais nos países desenvolvidos, principalmente sobre as águas superficiais. As legislações ambientais passaram a cobrar resultados de tratamento dos efluentes domésticos e industriais (*poluição pontual*) lançada nos rios. Em função destas restrições, parte deste poluente, depois de tratado (muitas vezes sem tratamento) foi lançado nos aqüíferos. Como a resposta dos aqüíferos à sua contaminação tem um retardo (tabela 3.1) observou-se na década de 80 a 90, nos países desenvolvidos uma crescente avaliação (monitoramento) e busca de mitigação da contaminação na região não-saturada e saturada do solo.

Da mesma forma, o crescente aumento da população urbana tem levado ao somatório de contaminantes, lançado no aqüífero, relacionados com o homem urbano, como: fossas sépticas, óleos e graxas de postos de gasolina, depósitos de lixos urbanos, lançamento de resíduos industriais de forma geral. Outra tendência paralela a esta ocorreu na agricultura onde a expansão das fronteiras agrícolas, a produção anual crescentes de novos produtos químicos utilizados na agricultura criaram fontes crescentes e variadas de componentes que contaminam a água superficial e subterrânea. Este novo grupo de contaminados, geralmente de *poluição difusa*, produziu os seguintes problemas para sua avaliação e mitigação:

- Identificação das fontes poluidoras no tempo e no espaço;
- Medidas legais para atribuir ao poluidor a ação de reduzir a emissão de poluição sobre o sistema;
- A identificação da relação causa-efeito para reduzir impactos e atribuir ao culpado as penas e as cobranças devidas;
- A necessidade de transferir para toda a sociedade o ônus de mitigação de grande parte dos custos de avaliação e mitigação dos efeitos.

Na tabela 3.1 pode-se observar a relação temporal e espacial dos efeitos dos impactos ambientais sobre os sistemas hídricos e a capacidade de reversibilidade, de acordo com o tempo. Observa-se que os efeitos sobre a água subterrânea a nível local, nacional e continental ocorrem em períodos de poucos anos até acima de 100 anos, dentro de faixas de reversibilidade (quando em períodos de um a dez anos) e quase irreversibilidade dentro dos cenários de gestão.

A referida tabela mostra uma visão simplificada dos fatos. É verdade que os casos de contaminação são bastante variados e dependem do tipo de contaminante e da geologia da região. Por exemplo, poluição por solventes em aqüíferos profundos, mesmo em escala local, não são remediáveis.

Escala / Tempo de recuperação	Local	Nacional	Continental	Global	Reversibilidade
< 1 ano	Rios				Rápida recuperação
1 - 10 anos	Lagos e reservatórios		Acidificação		Reversível
10 - 100 anos	Águas subterrâneas		Transporte de poluente atmosférico de longo alcance		Reversibilidade limitada
> 100 anos	Grandes barragens				Irreversível

Tabela 3.1 - Representação esquemática da relação entre a escala de espaço dos problemas de qualidade de diferentes sistemas hídricos e o período para a sua recuperação (Chapman, 1996)

Chapman (1996) apresentou quatro fases relacionadas com o problema do desenvolvimento relacionado com a sustentabilidade (figura 3.1). A fase I é representada pela sociedade predominantemente agrícola, em que o nível de poluição cresce quase que linearmente; A fase II apresenta um aumento exponencial da poluição, com aumento do uso industrial e energético (quando a energia é baseada em carvão e óleo); a fase III representa a contenção da poluição por meio de medidas estratégicas (a tendência pode ser insustentável na alternativa de que estas medidas não sejam adotadas); A fase IV redução da poluição, principalmente na fonte, quando entram no foco da poluição difusa.

Neste processo teórico, o Brasil se encontra, infelizmente, na fase III, com tendência pouco sustentável, na medida que praticamente não controla seus efluentes básicos urbanos e industriais. Os efluentes industriais em algumas regiões do país possuem controle, mas para os efluentes urbanos praticamente não existe controle e pouco investimento é realizado na solução deste problema. Portanto, pode-se esperar uma tendência como D1 ou D2 da figura 3.1.

3.2 FONTES DE CONTAMINAÇÃO

Foi estimado (Pasture, 2003), nos Estados Unidos, que na área rural existem cerca de 181 mil lagoas de resíduos industriais; 16 mil aterros industriais com rejeito perigoso; 18.500 conhecidos aterros municipais; e 20 milhões de sistemas sépticos. Cada ano, 3,5 milhões dos 21 milhões de libras de pesticidas que chega

ao solo chega a água subterrânea ou superficial antes de degradar. Trinta e quatro Estados identificaram a carga agrícola não-pontual como a principal fonte de poluição que impediu atingir os objetivos das metas de qualidade da água estadual. Trinta e nove estados identificaram a carga pontual de água subterrânea como a principal fonte de poluição e os pesticidas e as fossas sépticas como a principal preocupação. Na metade dos anos 70, o elevado nível de nitrato atribuído aos fertilizantes infiltrados começou a ser detectado nas áreas rurais e nas águas subterrâneas. Os nitratos são, especialmente, um problema quando aplicados em solos arenosos e aqüíferos não-confinados. Nos anos 80, ocorreram vários incidentes de contaminação de água subterrânea resultante da aplicação de pesticidas. A agricultura tradicional tem produzido 46 diferentes tipos de resíduos de pesticidas na água subterrânea em 26 Estados americanos.

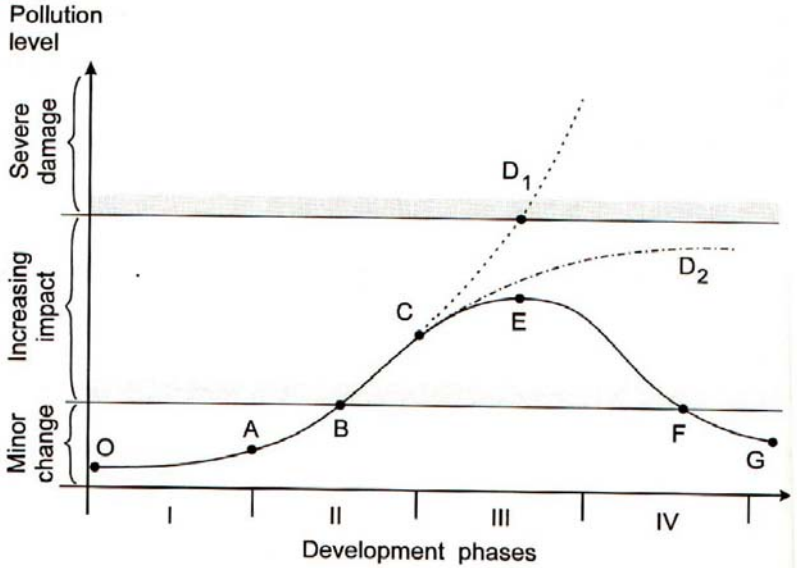


Figura 3.1 - Impacto de longo termo para controle de poluição de sistemas aquáticos (Chapman, 1996)

Dados recentes da EPA indicaram que, dos 45 mil poços, nos Estados Unidos, testados quanto a pesticidas, 5.500 apresentaram níveis acima do recomendado para pelo menos um pesticida, enquanto que 5.500 indicarão traços de 73 diferentes tipos de pesticidas em níveis dentro do recomendável. Destes grupos alguns causam câncer, afetam o nascimento e produzem problemas genéticos. Esta contaminação é mais séria para poços particulares. De acordo com o censo de 1980 sobre fontes de água para a população, mais de 50 milhões de pessoas,

nos Estados Unidos, dependem de água subterrânea para suas necessidades, sendo que 19 milhões retiram água de poços particulares. 65% destas pessoas vivem em áreas onde existe o potencial de contaminação por pesticidas.

Os sistemas de água subterrânea são bem mais resistentes à poluição dos que os de água superficial, pois a camada de solo sobrejacente atua como filtro físico, químico e biológico. No entanto, quando contaminada, tem um custo muito alto de recuperação além de existir também um tempo longo neste processo.

As fontes de contaminação podem ser *pontuais,* quando é possível identificar o local no qual a contaminação está penetrando no aqüífero. Alguns exemplos são: fossas de esgotos domésticos, aterros sanitários, vazamentos de depósitos de produtos químicos, reservatórios de efluentes domésticos e industriais. As contaminações *difusas* ocorrem quando a contaminação é distribuída por uma superfície extensa, onde não é possível identificar individualmente cada carga como, por exemplo, a da contaminação por pesticidas na agricultura, os vazamentos que ocorrem na rede cloacal e pluvial de uma cidade, entre outros (figura 3.2).

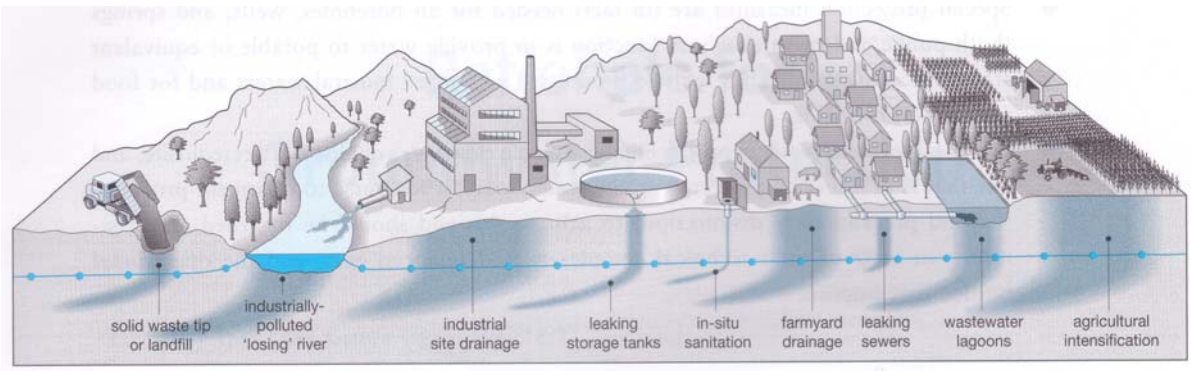


Figura 3.2 - Fontes de poluição (Foster, et al. 2003b)

Na tabela 3.2 são apresentados, de forma geral, as principais fontes de contaminação e o respectivo tipo de contaminante. A sociedade moderna tem cada vez mais se sofisticado na produção de componentes químicos para atendimento de suas necessidades, que geram efluentes. Muitos destes efluentes encontram o caminho dos reservatórios e águas subterrâneas, contaminando-os. Com a evidente poluição dos rios e as medidas mais duras para controle dos

efluentes, as indústrias e a própria sociedade urbana passaram a utilizar os mananciais subterrâneos como alternativa de dispor seus efluentes. O solo é utilizado como filtro dos efluentes *in natura* ou da carga residual resultante de tratamento de efluentes. O resultado deste processo é o retorno dos impactos, com uma defasagem de vários anos, quando o sistema perde sua capacidade de absorver a poluição e passa a transferir para os rios a poluição recebida.

A tabela 3.2 mostra que os principais poluentes são a a*gropecuária*, com a poluição difusa do plantio e uso de pesticidas agregado à água que se infiltra no solo, da produção de animais e a industrialização de alimentos; *no meio urbano,* os diferentes tipos de poluentes são transferidos para o subsolo por meio de vazamento no sistema da rede de esgoto, uso das fossas sépticas, depósitos de lixo e/ou rejeitos, postos de gasolina, entre outros. Esta contaminação se distribui por toda a cidade. Muitas cidades brasileiras utilizam a água subterrânea para seu abastecimento em diferentes camadas. Mesmo que a transmissibilidade seja pequena, após alguns anos é possível que a contaminação inviabilize também este manancial.

O desenvolvimento industrial é outra grande fonte de contaminação, mesmo que seu efluente seja tratado, o resíduo é disposto em lagoas ou no solo que contamina, ao longo do tempo, todo o sistema local de águas subterrâneas.

Fonte de poluição	Características	Tipo de contaminante
Agropecuária	*Cultivo* com: Agroquímicos, irrigação, efluentes de irrigação	Nitratos, amônia, pesticidas e organismos fecais
	Criação de animais e produção de alimento: lagoas de efluentes, disposição na terra.	
Meio urbano	Fossas sépticas e disposição no solo, aterros sanitários, lagoas de tratamento, vazamentos das redes de esgoto e outras, contaminação do escoamento pluvial, perfurações inadequadas de poços, postos de gasolina.	Benzeno, hidrocarbonetos, fenóis, organismos fecais, nitratos, metais.
Desenvolvimento industrial: indústrias de metais, madeira, alimentos, couro, produção de pesticidas, petroquímica	Lagoas de efluentes, infiltração de resíduos, aterros, disposição através de aspersão no solo e por poços, vazamento de sistemas de condutos.	Pentaclorofenol, hidrocarbonetos, benzeno, tricloretileno, tetracloretileno, zinco, ferro, cobre, fenóis, sulfato, acidez,etc.
Mineração	Efluente da mineração, lagos resultantes da mineração, aterros de rejeitos da mineração.	Acidez, metais, sulfatos, mercúrio, etc.
Manejo da água subterrânea	Intrusão salina, rebaixamento do aqüífero com baixa capacidade de diluição, barragem subterrânea.	Sais, aumento da concentração dos poluentes, acidez.

Tabela 3.2 - Fontes e tipos de contaminantes (Foster et al 2003b)

A contaminação industrial e na agropecuária é preocupante em virtude da diversidade e da periculosidade dos contaminantes. Alguns estados brasileiros dispõem de sistemas de fiscalização e monitoramento que ajudam a prevenir e detectar casos de contaminação, mas na maior parte dos Estados, a atuação do órgão ambiental ainda é muito incipiente.

A contaminação de água subterrânea nos centros urbanos ocorre com bastante intensidade em quase todos os Estados brasileiros. A falta de saneamento básico, vazamento de redes de esgoto, lixões e aterros sanitários contribuem para a poluição bacteriológica e físico-química: nitratos, metais e outros compostos. Vazamentos de postos de combustíveis contribuem com hidrocarbonetos em geral e com os chamados BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno, xileno).

A mineração, apesar de não ser a principal causa, é uma das fontes de impactos das águas superficiais e subterrâneas. A recuperação destes sistemas é um processo lento e de grandes custos. No Sul do Brasil, algumas áreas de

mineração em Santa Catarina, perto de Criciúma, depois de 10 anos de exploradas ainda apresentam alto nível de acidez, inviabilizando o seu uso.

O manejo da água subterrânea em áreas costeiras e no semi-árido são causas freqüentes de aumento de salinização de mananciais. A retirada excessiva de água nos sistemas costeiros permite a salinização por avanço da cunha salina, por transferência vertical, proveniente de aqüíferos salinizados, ou por infiltração em mangues e estuários. No semi-árido, a salinidade ocorre principalmente devido às excessivas taxas de evapotranspiração, em que a água, ao se transferir para a atmosfera em forma de vapor, deixa os sais no solo e nas águas subterrâneas, exigindo melhores técnicas de manejo para não intensificar os problemas.

Quando se analisam as condições para a exploração sustentável dos aqüíferos, uma outra preocupação é o risco de subsidência dos solos devido às altas taxas de bombeamento e rebaixamento excessivo do lençol. No caso de poços rasos próximos de fundações diretas de edifícios, o bombeamento pode carrear os finos do solo, reduzindo a capacidade de suporte do solo e causando danos estruturais nos prédios. No caso de poços profundos, o rebaixamento excessivo alivia a pressão da água, conseqüentemente aumentando a carga sobre os grãos do subsolo e acarretando um deslocamento vertical. Além disso, se o subsolo for formado de camadas intercaladas de areia e argila, o bombeamento nas camadas aqüíferas arenosas acarreta a lenta drenagem das argilas e sua compactação. Neste caso de rebaixamento devido ao bombeamento em poços profundos, a subsidência de solos ocorre lentamente ao longo de muitos anos e pode ocorrer em bairros inteiros. Em alguns países, tem sido observada subsidência de algumas dezenas de centímetros após anos de bombeamento.

3.3 CARACTERÍSTICAS DA CONTAMINAÇÃO

A combinação das características do meio físico, da biota e do tipo de contaminação e da interdependência entre os meios e processos faz de cada sistema uma realidade única que necessita muitas vezes de soluções combinadas

para a busca de sua sustentabilidade. Portanto, para melhor entender e buscar soluções é necessário conhecer cada um destes componentes.

Os condicionantes dos aqüíferos são os seguintes (Poluição, 2003):

(a) Tipo de aqüífero: os aqüíferos freáticos ou não-confinados são mais vulneráveis do que os confinados ou semi-confinados. Aqüíferos porosos são mais resistentes dos que os fissurais, e entre estes os mais vulneráveis são os cársticos;

(b) Profundidade do nível estático (espessura da zona de aeração): como esta zona atua como um reator físico-químico e biológico, sua espessura tem papel importante. Espessuras maiores permitirão maior tempo de filtragem, além do que aumentarão o tempo de exposição do poluente aos agentes oxidantes e adsorventes presentes na zona de aeração;

(c) Permeabilidade da zona de aeração e do aqüífero: a permeabilidade da zona de aeração é fundamental quando se pensa em poluição. Uma zona de aeração impermeável ou pouco permeável é uma barreira à penetração de poluentes no aqüífero. Aqüíferos extensos podem estar parcialmente recobertos por camadas impermeáveis em algumas áreas, enquanto em outras acontece o inverso. Estas áreas de maior permeabilidade atuam como zonas de recarga e têm uma importância fundamental em seu gerenciamento. Por outro lado, a alta permeabilidade permite uma rápida difusão da poluição. O avanço da mancha poluidora poderá ser acelerado pela exploração do aqüífero, na medida que aumenta a velocidade do fluxo subterrâneo em direção às áreas onde está havendo a retirada de água. No caso de aqüíferos litorâneos, a super exploração poderá levar à ruptura do frágil equilíbrio existente entre água doce e água salgada, produzindo o que se convencionou chamar de intrusão de água salgada;

(d) Componentes do solo e da contaminação: a lista de contaminantes da água subterrânea é longa. Alguns ocorrem naturalmente em algumas áreas, como o arsênico, o sal em grandes concentrações é um contaminante. A água subterrânea tende a ser mais salina que a água

superficial, mas não é necessariamente água salgada. Outros contaminantes naturais são o sódio, boro, nitrato, súlfur, magnésio e cálcio;

(e) Teor de matéria orgânica existente sobre o solo: a matéria orgânica tem grande capacidade de adsorver uma gama variada de metais pesados e moléculas orgânicas. O plantio direto, que produz aumento da infiltração e percolação, tem diminuído a quantidade de nitrato e sedimentos carregados para os cursos d'água;

(f) Tipo dos óxidos e minerais de argila existentes no solo: sabe-se que estes compostos, por suas cargas químicas superficiais, têm grande capacidade de reter uma série de elementos e compostos. Na contaminação de um solo por nitrato, o manejo de fertilizantes, com adição de gesso ao solo, facilita a reciclagem do nitrogênio pelos vegetais e a penetração do nitrato no solo é menor. Da mesma forma, a mobilidade dos íons nitratos é muito dependente do balanço de cargas. Solos com balanço positivo de cargas suportam mais nitrato;

(g) Reações químicas e biológicas: um poluente após atingir o solo, poderá passar por uma série de reações químicas, bioquímicas, fotoquímicas e inter-relações físicas com os constituintes do solo antes de atingir a água subterrânea. Estas reações poderão neutralizar, modificar ou retardar a ação poluente. Em muitas situações, a biotransformação e a decomposição ambiental dos compostos fitossanitários podem conduzir à formação de produtos com uma ação tóxica aguda mais intensa ou, então, possuidores de efeitos injuriosos não caracterizados nas moléculas precursoras. Exemplos: dimetoato, um organofosforado, degrada-se em dimetoxon, cerca de 75 a 100 vezes mais tóxico. O malation produz, por decomposição, o 0,0,0-trimetilfosforotioato, que apresenta uma ação direta extremamente injuriosa no sistema nervoso central e nos pulmões, provocando hipotermia e queda no ritmo respiratório;

(h) Os processos que agem sobre os poluentes que atingem o solo podem ser agrupados nas seguintes categorias: adsorção-desorção;

ácido-base, solução-precipitação, oxidação-redução, associação iônica (complexação), síntese celular microbiana, decaimento radioativo.

A poluição capaz de atingir as águas subterrâneas pode ter origem variada. Considerando que os aqüíferos são corpos tridimensionais, em geral extensos e profundos, diferentemente, portanto dos cursos d'água, a forma da fonte poluidora tem importância fundamental nos estudos de impacto ambiental.

3.4 AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO

O risco ou perigo da contaminação de um aqüífero tem sido baseado na vulnerabilidade do aqüífero e na existência de carga potencialmente poluidora (Foster, 2003) (vide terminologia apresentada na tabela 3.3). *A vulnerabilidade* é estabelecida pelas condições específicas do aqüífero, que poderá ou não estar contaminado. Um aqüífero que tenha alta vulnerabilidade deve ser preservado. Portanto, comparando com águas superficiais, a vulnerabilidade de um aqüífero é um conceito contrário ao da capacidade de absorção ou diluição de um rio.

Existem diversos métodos para avaliar a vulnerabilidade de um aqüífero (EPPNA, DRASTIC, GOD, AVI, SINTACS, IS) (LNEC, 2003). Entre estes métodos, os mais usados no Brasil são o método GOD (Foster, 1987) que se baseia na ocorrência de água subterrânea (Groundwater occurrence), na classificação do aqüífero (Overall aquifer class) e na profundidade do topo do aqüífero (Depth to groundwater table) e o método DRASTIC (Aller et al, 1987) que se baseia na profundidade do topo do aqüífero (Depth to water), na recarga do aqüífero (Net Recharge), no material do aqüífero (Aquifer media), no tipo de solo (Soil media), na topografia (Topography), na influência da zona não saturada (Impact of the unsaturated media), e na condutividade hidráulica do aqüífero (Hydraulic Conductivity of the aquifer). Nestes métodos, a cada parâmetro é atribuído um valor e o resultado do conjunto representa o índice de vulnerabilidade.

Por exemplo, a figura 3.3 apresenta o método GOD onde o índice de vulnerabilidade pode ser obtido pela análise das características hidráulicas de confinamento, do estrato rochoso e da profundidade do lençol freático, por meio do uso de geoprocessamento.

Em outro exemplo, a figura 3.4 mostra que a infiltração da contaminação da superfície pode transportar pelo aqüífero a concentração de poluente. Isto geralmente ocorre em função das condições de difusão e dispersão do fluxo subterrâneo e pode levar muito tempo até que ocorra, dependendo da distância e dos parâmetros das diferentes camadas do solo. Sobre estas áreas perigosas, geralmente, são tomadas medidas de gerenciamento para controle das fontes de poluição e recuperação da contaminação existente, principalmente quando o manancial é uma fonte de abastecimento.

O zoneamento das áreas em função das condições de contaminação e o uso da água correspondente dependem de ferramentas apropriadas para previsão e quantificação dos impactos e do monitoramento dos resultados ao longo do tempo.

Termo	**Definição**
Vulnerabilidade à poluição	Sensível à contaminação, determinado pelas características naturais do estrato geológico que forma o confinamento ou a zona vadosa do aqüífero.
Carga contaminante	Carga de poluição lançada no solo e/ou subsolo que poderá atingir o aqüífero.
Risco de poluição da água subterrânea	Probabilidade de que a água subterrânea será poluída com concentrações acima do recomendável, para padrões de água potável, quando a carga de um contaminante é lançada na superfície. O risco de poluição depende da vulnerabilidade do aqüífero e da existência de carga contaminante.

Tabela 3.3 - Terminologia de avaliação dos aqüíferos (Foster et al, 2003)

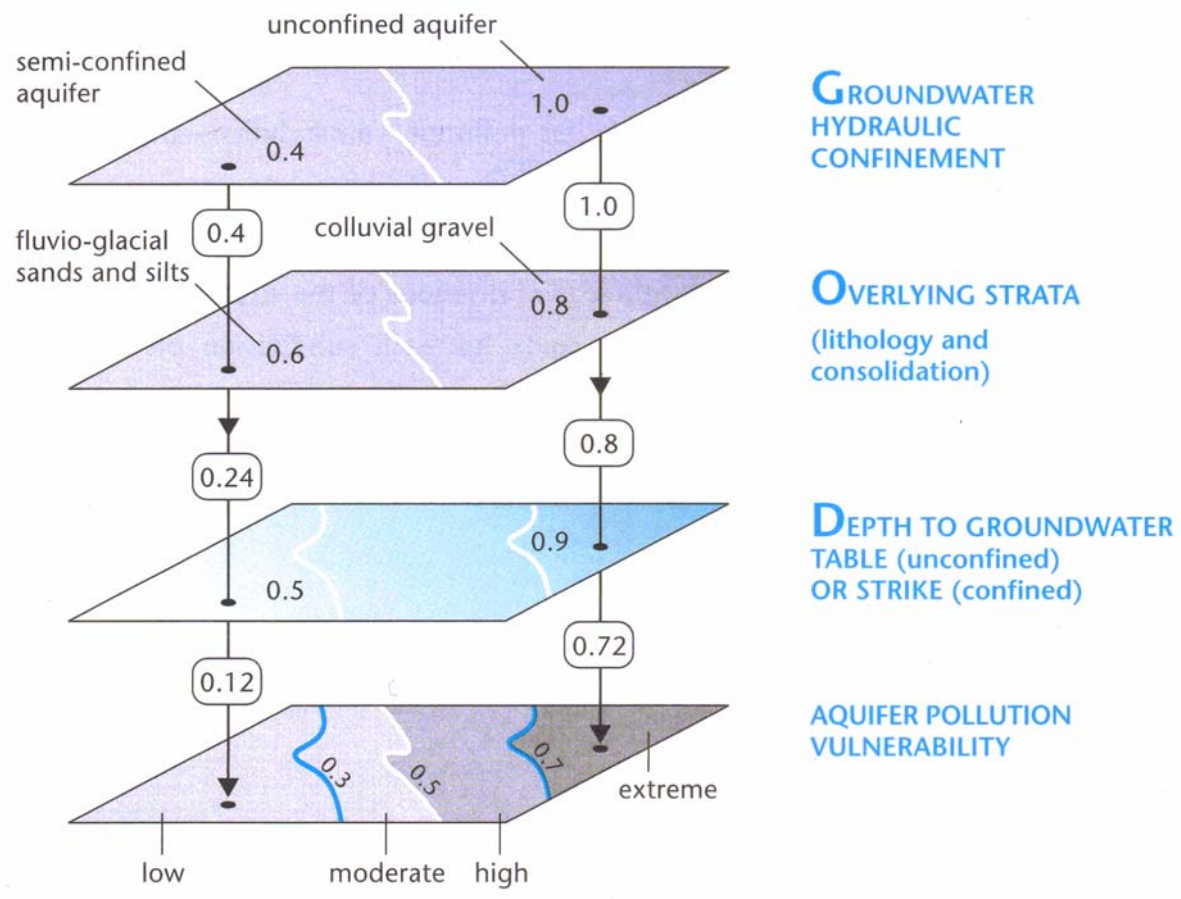


Figura 3.3 - Mapeamento de indicadores de vulnerabilidade (Foster et al 2003b)

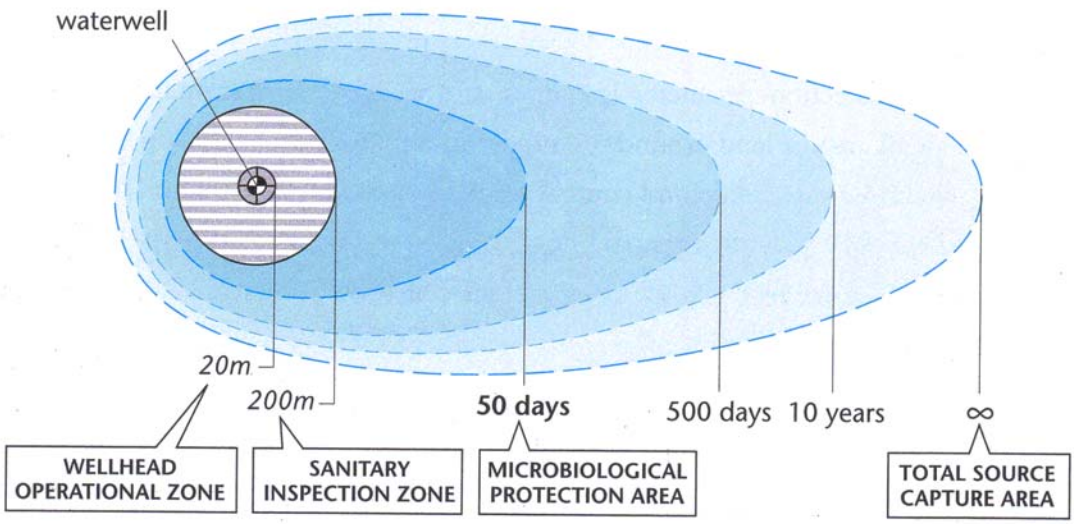


Figura 3.4 - Áreas de influência, monitoramento e controle (Foster et al, 2003b)

Além da proteção do aqüífero como um todo, é importante proteger as captações. Os perímetros de proteção das captações são bastante utilizados em todo o mundo, adotando a idéia de evitar os elevados custos e dificuldades associados para a remediação de aqüíferos. Existem diversos métodos de delimitação de perímetros de proteção de poços (LNEC, 2003), e os mais usados são os do Raio fixo, Raio fixo calculado, Método de Wyssling, Método de Krijgsman e Lobo Ferreira, Método numérico ASMWIN.

O conceito de perímetro de proteção é delimitar uma área de superfície e subsuperfície envolvendo um poço ou bateria de poços destinados ao abastecimento humano, onde atividades potencialmente perigosas de produzir poluição da água subterrânea são limitadas, proibidas ou regulamentadas de forma progressiva.

3.5 CARACTERÍSTICAS E CONTAMINAÇÃO DOS AQÜÍFEROS BRASILEIROS

Para caracterizar a contaminação, pode-se ordenar o tema com base nas fontes de contaminação ou nas características dos aqüíferos. No entanto os condicionantes problemáticos estão geralmente nas áreas vulneráveis, sujeitas às principais contaminações identificadas. Alguns dos principais sistemas são:

Aqüíferos urbanos: essa classificação, diferentemente das que vêm a seguir, não se refere às características geológicas e climáticas, mas se relaciona ao uso do aqüífero. Os aqüíferos existentes nas grandes cidades apesar de apresentarem características geológicas diferentes de um lugar para outro, apresentam entre si semelhança em diversos aspectos. O solo, em grande parte das cidades, encontra-se impermeabilizado, o que reduz a recarga direta por infiltração da chuva, mas em compensação ocorre recarga, devido às perdas na rede de distribuição de água, que muitas vezes supera a faixa dos 30% dos volumes aduzidos para as cidades. A super exploração e a interferência dos cones de rebaixamento dos poços são problemas comuns nos bairros de maior densidade demográfica nas cidades. De uma forma generalizada, as camadas superiores dos aqüíferos urbanos encontram-se contaminadas por vazamentos de esgotos

domésticos, lixiviados de depósitos de lixo e vazamentos de postos de combustíveis.

Aqüíferos costeiros: são aqueles situados em planícies próximas ao mar ou grandes lagos salgados. Os aqüíferos costeiros estão sujeitos a salinização por intrusão da cunha salina ou por outros processos, e a contaminação pela super exploração e pela contaminação das cidades, já que grande parte da população brasileira se encontra próxima da costa.

O escoamento subterrâneo de água doce que vem do continente encontra a água salgada que infiltra a partir do mar ou do lago. Devido à diferença de densidades entre os dois tipos de água, ocorre uma estratificação, ficando a água doce por cima e a salgada por baixo (figura 3.5). O gradiente do continente deve ser suficiente para evitar a penetração da água salgada. Quando sua carga é reduzida ocorre a penetração da água salgada tornando imprópria ao seu uso. Esta carga pode ser reduzida pela retirada excessiva de água por poços urbanos, o que acontece em cidades litorâneas, como Recife, que tem problema de abastecimento de água.

Somado à salinização, os aqüíferos costeiros sofrem forte impacto da grande concentração de população no litoral, em função da vulnerabilidade natural destes sistemas e pela pressão sobre o seguinte:

- Forte demanda de água, por perfuração de poços, que permite a intrusão salina, salinizando a água ou a contaminando em função de outras entradas de efluentes;
- Pela excessiva quantidade de cargas de poluição das cidades, tais como fossas sépticas, redes de esgotos, postos de gasolina, aterros sanitários, além da potencial de carga industrial de grandes centros junto ao mar.

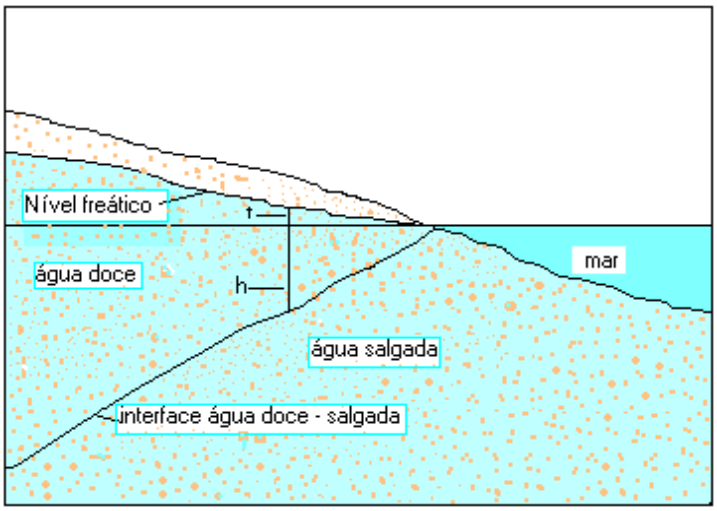


Figura 3.5 - Características dos aqüíferos costeiros (Costeiro, 2003)

Estes dois processos exigem uma gestão mais eficiente no controle para evitar que se tenha como manancial uma fonte fortemente contaminada. Várias cidades do litoral, como Maceió, Natal, Aracaju, entre outras, retiram água de mananciais subterrâneos para o seu abastecimento.

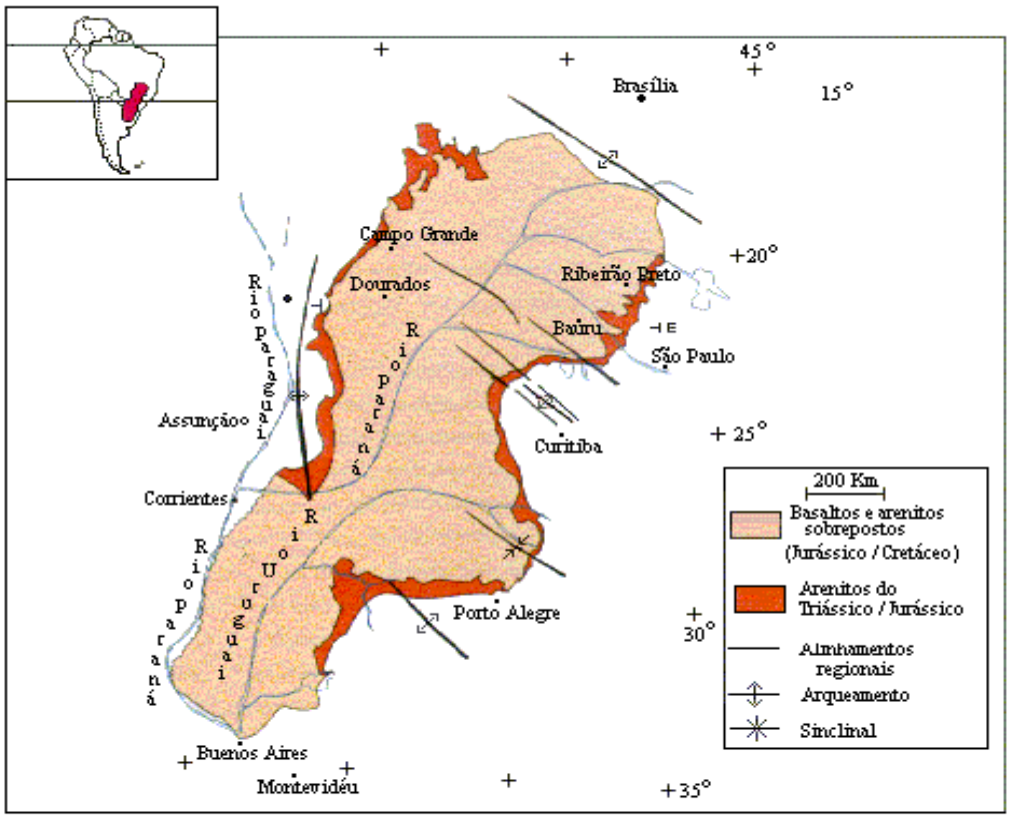
Sistema Aqüífero Guarani: O termo aqüífero Guarani foi utilizado como uma forma de unificar a nomenclatura de um sistema aqüífero comum a parte da América do Sul. O termo utilizado no Brasil era Botucatu e o nome Guarani foi utilizado em homenagem a tribo de índios Guaranis. Na figura 3.6 pode-se observar a distribuição do aqüífero que ocupa 1,4 milhões de km^2, sendo 80% em território brasileiro (Guarani, 2003).

O aqüífero é constituído de várias rochas sedimentares pertencentes à Bacia Sedimentar do Paraná. Das rochas que compõem o aqüífero, a mais importante é o arenito Botucatu, de idade triássico superior a jurássico inferior (190 milhões de anos atrás). Este arenito foi depositado em ambiente desértico, o que explica as características que fazem dele um ótimo reservatório de água: os grãos sedimentares que o constituem são de uma grande homogeneidade, havendo pouco material fino (matriz) entre os mesmos. Isto confere a este arenito alta porosidade e alta permeabilidade (fonte). Sua espessura média é de cerca de 100 metros, havendo locais onde chega a 130 metros. O arenito Botucatu está exposto à superfície nas regiões marginais da Bacia Sedimentar do Paraná. À

medida que caminhamos para as partes centrais desta Bacia, isto é, para o interior dos Estados do sul, este arenito vai ficando cada vez mais profundo, tendo a lhe recobrir espessas camadas de rochas vulcânicas basálticas, e outras camadas de arenitos mais recentes.

A região onde o arenito Botucatu aflora constitui os locais de recarga do aqüífero. Nas regiões onde o mesmo está recoberto pelas rochas vulcânicas, não há recarga e o sistema está confinado, ou seja, é artesiano, chegando a profundidades de até 1500 m. Apesar desta profundidade, como é um sistema confinado, nos poços que alcançam esta profundidade, a água sobe chegando a pouco menos de 100 metros da superfície, havendo locais onde a pressão é suficiente para que a água jorre espontaneamente pela boca do poço.

Este aqüífero é responsável por cerca de 80 % do total da água acumulada na Bacia sedimentar do Paraná. Os poços apresentam vazão que pode ultrapassar os 500 m^3/h, com um rebaixamento de somente 150 m.

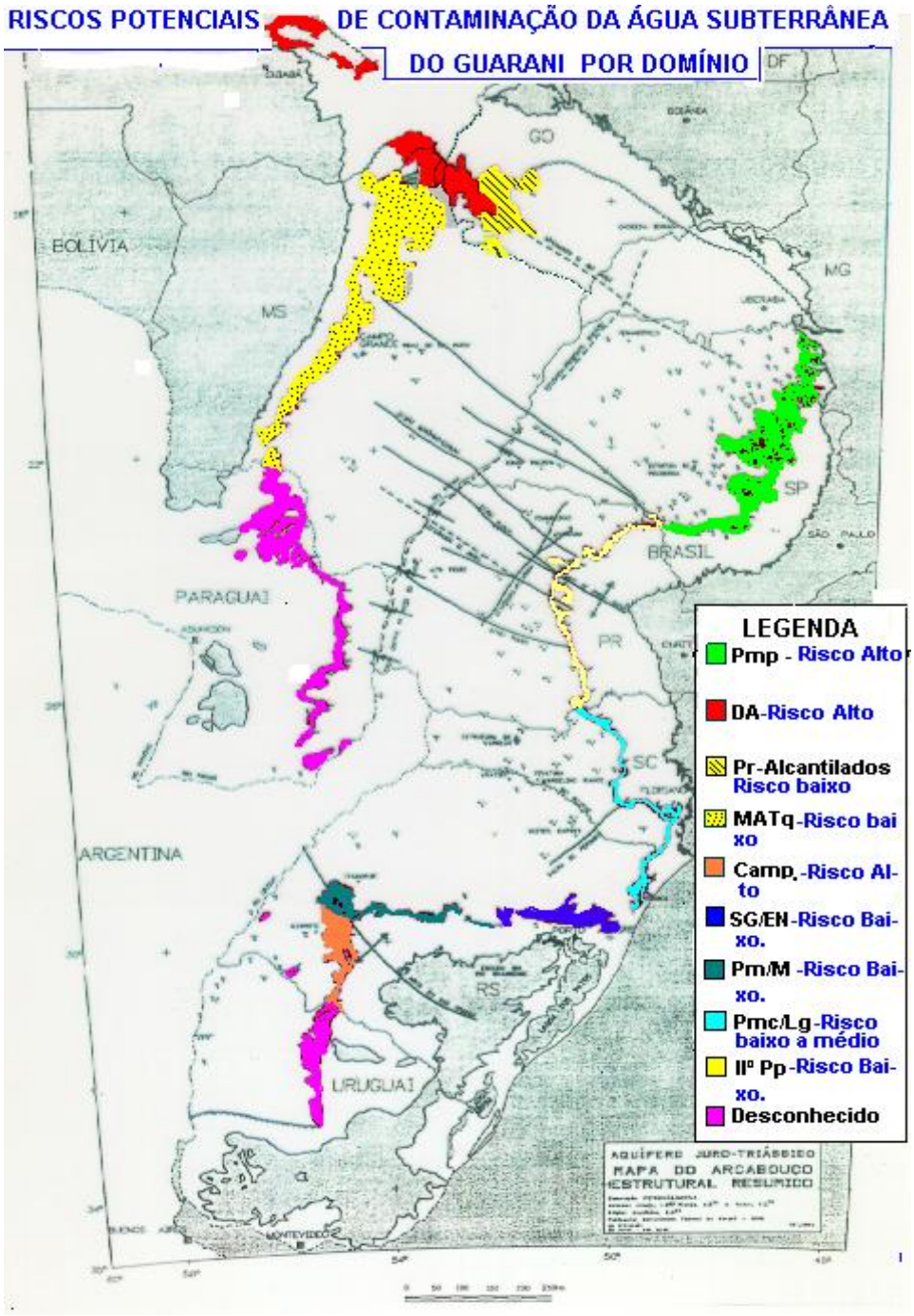


Localização e Geologia do Aqüífero Botucatu (Fonte: Rocha, G.A., Mega Reservatório de Água Subterrânea do Cone Sul, Seminário "Aqüífero Gigante do Mercosul", Maio / 1996.)

Figura 3.6 - Localização do aqüífero Guarani

O teor médio de sólidos totais dissolvidos está ao redor de 200 mg/L, boa para consumo humano. Contudo alguns poços perfurados no Estado do Paraná forneceram água com teor elevado de flúor (12 mg/L) o que a torna inviável para uso humano, mas tudo indica que esta não é a química predominante da água do aqüífero. Considerando que a área de recarga coincide com importantes áreas agrícolas brasileiras, onde se tem usado intensamente herbicidas, é de se esperar que são necessárias medidas de controle, monitoramento e redução da carga de agrotóxicos, sob pena de se vir a ter sérios problemas de poluição. Os potenciais impactos são: *uso descontrolado e excessivo*, *poços abandonados* e *vedação*.

A Embrapa (2002), a partir de estudos anteriores e da base disponível de informações, desenvolveu um mapa de vulnerabilidade apresentado na figura 3.7.



Pmp - Planalto médio paulista; **DA** - Depressão Araguaia; **Pr Alcantilados** - Planaltos rebaixados Alcantilados; **MATq** - Médio/Alto Taquarí; **Camp** - Campanha; **SG/EN** - Serra Gaucha/Encosta Nordeste; **Pm/M** - Planalto médio/Missões; **Pmc/Lg** - Planalto médio catarinense/Litoral gaúcho; **IIº Pp** - Segundo Planalto paranaense.

Figura 3.7 - Mapa de vulnerabilidade do aqüífero Guarani (Embrapa, 2002).

Aqüíferos no Semi-Árido Nordestino: é formado por sistemas sedimentares profundos, aluviões e cristalino. O primeiro tipo de aqüífero possui boa capacidade de armazenamento e produção de água, como por exemplo, a região de Mossoró (RN) e a região do Vale do Gurguéia (PI). Os aqüíferos de aluviões, formados por sedimentos recentes, são de menor potencial e em algumas regiões se encontram salinizados ou podem ser salinizados devido à gestão da água. O aqüífero do tipo cristalino possui baixa capacidade de produção de água, que ocorre principalmente no sistema de fratura. Isto limita seu uso e torna muito cara a exploração para a população.

O uso de barragem subterrânea de forma difusa em grande parte desta região permitiu o aumento da disponibilidade e regularização da água distribuída em pequenas quantidades para atendimento da população rural de baixa renda. No entanto, é necessário o manejo adequado deste tipo de sistema para evitar a salinização da reserva e em alguns casos evitar a contaminação a partir da agricultura e outras contaminações como, por exemplo, fossas rurais.

4. GERENCIAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

4.1 CARACTERÍSTICAS DO GERENCIAMENTO

A necessidade de gerenciamento da água subterrânea somente ocorre depois que o problema ocorre, ou seja, devido a um grande rebaixamento do aqüífero ou quando a sua água é contaminada. Se este processo continua, o impacto em quantidade e/ou qualidade será evidente (círculo vicioso, figura 4.1a).

O gerenciamento de um aqüífero é um processo mais amplo que envolve vários componentes relacionados como: avaliação e prognóstico (tecnológico); legal, gestão pública e privada, participação pública e gerenciamento do risco e avaliação econômica e ambiental (socioeconômico) (figura 4.1b).

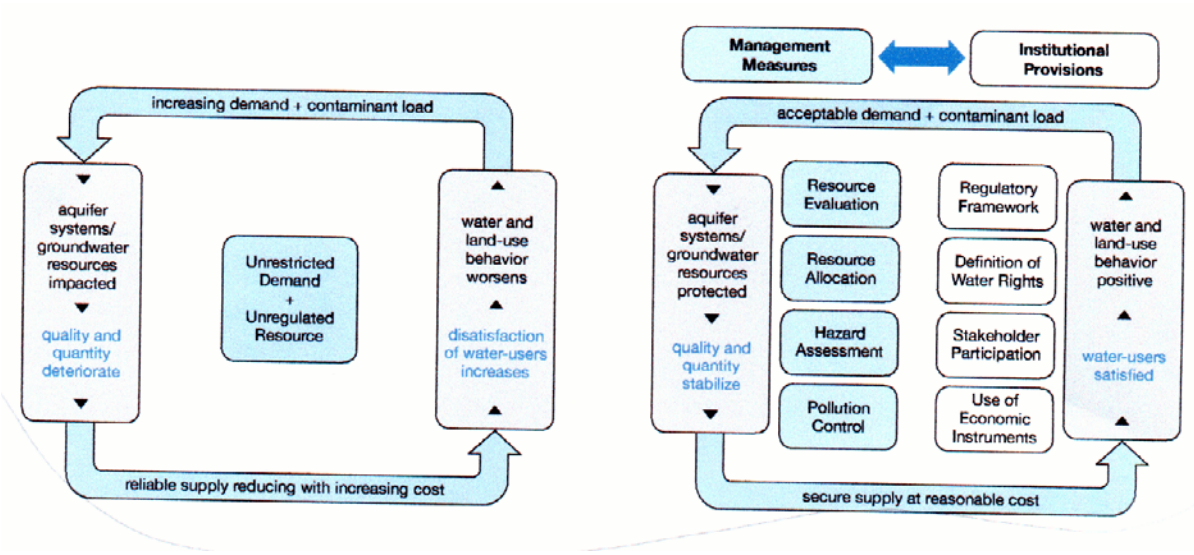


Figura 4.1 - Na figura da esquerda o processo de gestão é insustentável o que requer a gestão sustentável do fluxo da figura da direita.

O gerenciamento deste problema é muito mais o de atuar sobre as pessoas do que, essencialmente, um problema técnico. Os aspectos sócio-econômicos tornam-se fundamentais e devem ter uma forte integração com o conhecimento técnico de água subterrânea (figura 2.6, capítulo 2).

Na tabela 4.1 é apresentado um resumo das ferramentas, instrumentos institucionais e ações de gerenciamento recomendadas para cada um dos estágios observados na figura 2.6.

GROUNDWATER MANAGEMENT TOOLS & INSTRUMENTS	LEVEL OF DEVELOPMENT OF CORRESPONDING TOOL OR INSTRUMENT (according to hydraulic stress stage/see Figure 3)			
	0	1	2	3
TECHNICAL TOOLS				
Resource Assessment	basic knowledge of aquifer	conceptual model based on field data	numerical model(s) operational with simulation of different abstraction scenarios	models linked to decision-support and used for planning and management
Quality Evaluation	no quality constraints experienced	quality variability is issue in allocation	water quality processes understood	quality integrated in allocation plans
Aquifer Monitoring	no regular monitoring program	project monitoring, ad-hoc exchange of data	monitoring routines established	monitoring programs used for management decisions
INSTITUTIONAL INSTRUMENTS				
Water Rights	customary water rights	occasional local clarification of water rights (via court cases)	recognition that societal changes override customary water rights	dynamic rights based on management plans
Regulatory Provisions	only social regulation	restricted regulation (e.g. licensing of new wells, restrictions on drilling)	active regulation and enforcement by dedicated agency	facilitation and control of stakeholder self-regulation
Water Legislation	no water legislation	preparation of groundwater resource law discussed	legal provision for organization of groundwater users	full legal framework for aquifer management
Stakeholder Participation	little interaction between regulator and water users	reactive participation and development of user organizations	stakeholder organizations co-opted into management structure (e.g. aquifer councils)	stakeholders and regulator share responsibility for aquifer management
Awareness and Education	groundwater is considered an infinite and free resource	finite resource (campaigns for water conservation and protection)	economic good and part of an integrated system	effective interaction and communication between stakeholders
Economic Instruments	economic externalities hardly recognized (exploitation is widely subsidized)	only symbolic charges for water abstraction	recognition of economic value (reduction and targeting of fuel subsidies)	economic value recognized (adequate charging and increased possibility of reallocation)
MANAGEMENT ACTIONS				
Prevention of Side Effects	little concerns for side effects	recognition of (short- and long-term) side effects	preventive measures in recognition of *in-situ* value	mechanism to balance extractive uses and *in-situ* values
Resource Allocation	limited allocation constraints	competition between users	priorities defined for extractive use	equitable allocation of extractive uses and *in-situ* values
Pollution Control	few controls over land use and waste disposal	land surface zoning but no proactive controls	control over new point source pollution and/or siting of new wells in safe zones	control of all point and diffuse sources of pollution; mitigation of existing contamination

Tabela 4.1 - Gerenciamento da água subterrânea (Tainhof et. Al, 2003), dentro dos diversos estágios de exploração apresentados na figura 2.6 no capítulo 2.

4.2 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

Definições

Segundo a resolução 15 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos: *águas subterrâneas* são as águas que ocorrem naturalmente ou artificialmente no subsolo; *águas meteóricas* são as águas encontradas na atmosfera em quaisquer de seus estados físicos; *aqüífero* é o corpo hidrogeológico com capacidade de acumular e transmitir água através dos seus poros, fissuras ou espaços resultantes da dissolução e carreamento de materiais rochosos; *corpo hídrico subterrâne*o – volume de água armazenado no subsolo.

Legislação federal de águas

A Constituição Federal, art. 26, I, dispondo que são bens dos Estados, entre outros, as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes ou em depósito, exceto as decorrentes de obras da União.

O texto legal básico que criou a Política Nacional de Recursos Hídricos é a Lei n° 9433 de 8 de janeiro de 1997. Esta política se baseia nos princípios de Dublin, ou seja: (a) a água é um bem de domínio público; (b) a água é um recurso limitado, dotado de valor econômico; (c) estabelece a prioridade para o consumo humano; (d) prioriza o uso múltiplo dos recursos hídricos; (e) a bacia hidrográfica como a unidade de planejamento; (f) gestão descentralizada.

Os principais instrumentos da Política são os Planos, enquadramento dos rios em classes, outorga dos direitos de uso dos recursos hídricos e a cobrança pelo uso da água. Os Planos devem englobar os Planos Estaduais e os Planos de Bacias. Estes planos devem buscar uma visão de longo prazo, compatibilizando aspectos quantitativos e de qualidade da água. O enquadramento trata da definição da compatibilidade da qualidade da água e os usos da mesma, buscando a minimização dos impactos de qualidade da água. O processo de outorga trata de assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água. O sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos é composto pelo Conselho

Nacional de Recursos Hídricos, Conselhos Estaduais, Comitê de Bacias e Agências de Água.

A lei também estabelece que o mecanismo de gestão descentralizada ocorrerá por intermédio do Comitê de Bacia com o apoio de agência executiva. A Lei Federal n° 9984, de 17 de julho de 2000, dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas (ANA), entidade de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos. Algumas das principais atribuições da ANA são: outorgar o direito de uso dos recursos hídricos em rios de domínio da União; prevenção contra secas e estiagens; fiscalizar os usos de recursos hídricos em rios de domínio da União; estimular a criação de comitês de bacias. No que se refere à energia hidráulica, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) deverá promover junto à ANA, a prévia obtenção de declaração de reserva de disponibilidade hídrica.

A ANA está ligada ao Ministério de Meio Ambiente. Este ministério através da Secretaria de Recursos Hídricos (SRH) estabelece as políticas de recursos hídricos e ações como o Plano Nacional de Recursos Hídricos. O Conselho Nacional de Recursos Hídricos é o órgão deliberativo do setor em nível federal. Este Conselho é constituído por membros federais (em sua maioria), representantes dos Estados, ONGs, setores usuários da água e entidades de pesquisa.

A resolução n° 15, de 11 de janeiro de 2001, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, legisla sobre águas subterrâneas. A resolução estabelece alguns princípios de associação entre as águas superficiais e subterrâneas e promoção integrada dos recursos superficiais e subterrâneos. Também estabelece que os Planos Estaduais e de bacias devem contemplar alguns aspectos mínimos sobre as águas subterrâneas como: dados, enquadramento dos mananciais, cobrança pelo uso das águas e sobre o sistema de informações. Os planos e sistemas devem buscar a visão integrada, uso racional e normas para fiscalização e controle dos mananciais subterrâneos. Toda e qualquer interferência nestes sistemas deve ser precedido de avaliação ambiental, cadastramento das empresas de exploração de água subterrânea e apresentar informações sistemáticas. Os poços jorrantes deverão ser dotados de dispositivos de controle

para evitar desperdícios, sujeitos a sanções legais e os poços abandonados devem ser protegidos.

Outorga e cobrança

A outorga dos direitos de uso de recursos hídricos foi estabelecida na Lei 9.433, art. 14, em que se especifica que a mesma será efetivada por ato da autoridade competente do Poder Executivo Federal, dos Estados ou do Distrito Federal. No art. 12, a referida lei dispõe que estão sujeitos a outorga: (I) a derivação ou captação de água superficial ou subterrânea para consumo final, ou para insumo de processo produtivo; (II) o lançamento de esgotos resíduos líquidos e gasosos, tratados ou não, para fins de diluição, transporte ou disposição final; (III) o aproveitamento hidrelétrico das águas e qualquer outro uso das mesmas que altere o regime, quantidade ou qualidade das águas de um rio.

A outorga poderá ser suspensa, parcial ou totalmente, em definitivo ou por prazo determinado, quando não forem cumpridos pelo outorgado os seus termos. Estas condições são: ausência de uso por três anos consecutivos; necessidade premente de água para atendimento de condições adversas; manter a navegabilidade do rio. Esta outorga não poderá ser concedida por prazo que exceda 35 anos, mas passível de ser renovada. A outorga não implica a alienação das águas, mas o direito de uso.

A cobrança pelo uso da água na outorga foi prevista na Lei 9.433, art. 20. Os recursos resultantes da cobrança devem ser aplicados, prioritariamente, nas bacias hidrográficas em que foram gerados. Neste ano de 2003 o processo de cobrança foi iniciado no rio Paraíba do Sul mediante um processo de declaração dos usuários, quanto ao uso da água, cabendo, à fiscalização da ANA, a comprovação das declarações por meio de amostragem.

No âmbito de meio ambiente, a licença ambiental é definida pelo Estado, quando a parcela da bacia em estudo se encontra dentro do Estado e de outro lado. Quando parte da bacia ou do rio em questão se encontre em mais de um Estado, a licença é concedida pelo Ibama.

Existem tabelas com padrões de potabilidade vigentes no país e no exterior. A Cetesb fez um bom trabalho de compilação da legislação de outros países e elaborou um relatório orientador para análise da poluição de solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo (Cetesb, 2001). Nesse trabalho foram estabelecidos valores de referência, valores de alerta e valores de intervenção para uma série de compostos químicos contaminantes.

Na proteção de solos e águas subterrâneas, a publicação da Cetesb considera como valor de referência os valores de um solo limpo e da qualidade natural das águas subterrâneas. Para valores de alerta foram indicados limites a partir dos quais é necessário fazer monitoramento em caráter preventivo. Para valores de intervenção, foram indicados limites acima dos quais existe risco potencial à saúde humana e torna-se necessário interceptar as vias de exposição e atuar em caráter corretivo. Para valores de intervenção, a Cetesb, considera para as águas subterrâneas, os padrões de potabilidade da Portaria 36 de 1990, atualizados pela Portaria 1469 de 2000, ambas do Ministério da Saúde.

Padrões de qualidade da água

Os padrões de qualidade ambiental das águas visam fundamentalmente a proteção da saúde pública e o controle de substâncias potencialmente prejudiciais à saúde do homem, como microorganismos patogênicos, substâncias tóxicas ou venenosas e elementos radiativos.

Os exames de controle ambiental das águas são físicos, químicos, microbiológicos e bacteriológicos. Os limites máximos admissíveis para os parâmetros físicos, químicos, microbiológicos e bacteriológicos, em geral, são aperfeiçoados à medida em que as pesquisas e técnicas analíticas permitam que sejam estabelecidas formas mais precisas de controle ambiental.

A legislação brasileira de controle ambiental da qualidade da água baseia-se em usos da água e seus correspondentes limites de aceitação de poluição e/ou contaminação. Estes limites foram estabelecidos, na sua maioria, em países de características ambientais bem diferentes das nossas, o que pode levar a avaliações equívocas para alguns elementos em certos casos.

De acordo com a Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama) nº 20, as águas doces, segundo seus usos preponderantes, são classificadas em quatro classes destinadas ao abastecimento doméstico, que é onde as águas subterrâneas podem ser encaixadas.

5. OPORTUNIDADES DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

5.1 LINHAS DE PESQUISA

A contaminação das águas subterrâneas e a sustentabilidade deste manancial é um problema comum da sociedade moderna internacional. A combinação intrínseca entre as fontes de poluição, a vulnerabilidade dos aqüíferos e as ações de gestão são os fundamentos necessários para a busca de soluções que conservam estes mananciais. As oportunidades de CT&I se encontram justamente no aumento do conhecimento que melhor fundamente as ações gerenciais para atingir esses objetivos da sociedade.

As oportunidades de CT&I foram identificadas e são analisadas dentro do seguinte escopo:

Capacitação e infra-estrutura: é muito reduzido o número de profissionais que atuam na área de hidrogeologia e contaminação no Brasil. Observa-se que esta é uma área interdisciplinar em que profissionais com formação em geologia, química, biologia e engenharia atuam. O número de programas de pós-graduação que possui linhas de pesquisa dentro deste âmbito é reduzido e normalmente se resume a um professor por instituição. A infra-estrutura de laboratório para análise química e biológica é muito pequena e geralmente exige altos investimentos.

Caracterização e avaliação: o conhecimento do meio físico é essencial na tomada de decisões para o uso e proteção dos aqüíferos. É necessário continuar e aprofundar os estudos de caracterização dos aqüíferos brasileiros com pesquisas de campo, bem como avaliação de parâmetros hidrogeológicos, elementos

imprescindíveis para a análise quantitativa do comportamento de poluentes no subsolo.

Previsão e mitigação: o conhecimento dos sistemas naturais e antrópicos, relacionado com os sistemas de águas subterrâneas, é fundamental para melhor prever os impactos, gestão da água em quantidade e qualidade e a busca de mitigação dos efeitos. Dentro deste contexto, a busca de metodologias de monitoramento e quantificação dos processos torna-se fundamental.

Gestão integrada de aqüíferos: o desenvolvimento do conhecimento pode ser realizado de acordo com as fontes de contaminação, tipo de aqüífero, dentro do cenário brasileiro, condição climática como semi-árido e cerrado onde o abastecimento depende muito das reservas, usos dos recursos hídricos, técnicas ou áreas de conhecimento. Analisando, isoladamente, cada um destes componentes, não é possível obter produtos que atuem sobre o conjunto integrado deste tipo de sistema. Desse modo, o desenvolvimento do conhecimento deve buscar obter soluções específicas para uma visão integrada dos problemas da sociedade. A gestão integrada envolve, portanto, a definição legal, sistema de outorga e cobrança, participação pública, gestão pública e privada.

5.2 FOCOS DE PESQUISA

Os conjuntos de focos de pesquisa a seguir destacados procuram buscar objetivar a combinação dos aspectos acima identificados dentro da realidade brasileira:

5.2.1 Regional

i. *Gestão dos aqüíferos no semi-árido:* o sistema sedimentar e cristalino necessita de uma gestão sustentável que envolva: (a) exploração de quantidade; (b) preservação da qualidade quanto a salinização; (c)

recuperação pela dessalinização e disposição do rejeito dentro de um ambiente sustentável; (d) sustentabilidade de qualidade da água dos sistemas de cisternas e fossas das comunidades rurais; (e) desenvolvimento de experiências pilotos de uma visão integrada da água dentro da comunidade. Os elementos científicos e tecnológicos dentro deste componente são de avaliar os processos existentes, propor medidas mitigadoras e criar base de conhecimento para a tomada de decisão.

Alguns dos tópicos inter-relacionados com o tipo de geologia são:

- *Sistema Aquífero Cristalino (fissural):* Neste sistema, que ocupa cerca de 50% da Região Semi-Árida do Nordeste, o principal problema diz respeito à salinidade natural, que torna a água imprópria para o consumo humano e a irrigação. No âmbito dessa questão alguns dos focos de pesquisa são: (a) investigações sobre a composição química das águas do cristalino, fortemente relacionada à geologia local, de modo a se chegar a classificações regionalizadas, em função dos tipos e teores de sais, de possíveis usos das águas salobras e de tipos de tratamento que possam ser empregados; (b) pesquisa de métodos de atenuação da salinidade natural, seja através do uso de dessalinizadores de menor custo de aquisição e manutenção (pela substituição de componentes importados e diminuição do consumo de energia); seja através do manejo apropriado do aqüífero fissural, no que tange à circulação e à recarga (exploração intensiva e indução de recarga); c) pesquisa sobre métodos para locação de poços, identificando locais mais promissores em termos de quantidade e qualidade de água.

- *Sistema Aqüífero Aluvial (poroso):* A água desse sistema, geralmente apropriada à maioria dos usos, inclusive para o consumo humano, tende a ter sua qualidade afetada pelo manejo do aqüífero, principalmente para fins de irrigação. Este problema requer investigações nas seguintes direções: (a) Estudos da influência da construção e do manejo de barragens subterrâneas, no aumento da salinidade natural das águas subterrâneas aluviais; (b) Pesquisa dos efeitos poluidores da prática da agricultura irrigada estabelecida diretamente sobre o aqüífero aluvial, empregando ou não adubos e defensivos agrícolas. Estes estudos poderão envolver tanto a propagação de poluentes

no fluxo subterrâneo, métodos de atenuação e eliminação, como a capacidade de auto-depuração do meio.

- *Sistema Aqüífero Sedimentar (poroso, profundo):* Existe mapeamento hidrogeológico das áreas sedimentares no Nordeste. No entanto, é necessário detalhar a ocorrência de rochas sedimentares e avaliar melhor suas potencialidades. Alguns problemas destes aqüíferos são o desperdício de água no vale do Gurguéia, rebaixamentos acentuados na região de Mossoró e proteção das áreas de recarga.

ii. *Aqüíferos no cerrado:* A hidrogeologia do Cerrado brasileiro é pouco conhecida, considerando a climatologia regional com seis meses sem precipitação, a expansão econômica principalmente da agropecuária tende a impactar os mananciais superficiais e subterrâneos. A recomendação dentro desta linha é de buscar melhor definir os parâmetros de avaliação dos aqüíferos regionais para estimativa da vulnerabilidade e melhor identificar e estabelecer os riscos associados. Este componente está diretamente ligado as linhas de pesquisa para melhor identificar a contaminação dos aqüíferos a partir da agricultura.

iii. *Sistemas costeiros:* as cidades brasileiras na costa apresentam vários exemplos de sistemas vulneráveis e sujeitos a um forte risco de contaminação. Esta linha deve procurar estabelecer alguns projetos pilotos para permitir desenvolver ferramentas de avaliação (modelos de quantidade e qualidade), monitoramento, zoneamento, experiências sobre gestão e mitigação e procedimentos que apóiem a tomada de decisão. Alguns dos aspectos específicos são: (a) desenvolvimento de zoneamento de áreas de risco e vulneráveis para cidades costeiras; (b) desenvolvimento e aprimoramento de ferramentas para avaliação das condições de intrusão salina e das medidas de mitigação.

iv. *Aqüífero Guarani:* A região na qual se encontra este aqüífero é uma das mais desenvolvidas no país, apresenta forte demanda pela água e tem alto potencial de contaminação. Alguns dos aspectos importantes são: (a) a identificação das áreas de recargas e aprimoramento da avaliação de vulnerabilidade; (b) distribuição e potencialidade dentro de uma visão

espacial e sua integração com o desenvolvimento socioeconômico regional por meio de um zoneamento; (c) origem e distribuição do flúor no sistema; (d) outras características da qualidade da água; (e) interação entre seus limites e a Serra Geral; (f) mecanismos legais e institucionais de apoio à gestão de um aqüífero transfronteiriço. Existe um projeto internacional do Global Environment Facility (GEF), com a participação da ANA, em que existe um componente científico sobre este sistema hídrico.

v. *Aqüíferos na Região Norte:* Na Região Norte tem sido relatado casos de contaminação por nitratos nos aqüíferos em áreas urbanas. Um tema de pesquisa interessante na região são os processos de atenuação natural da poluição por esgotos domésticos, levando em conta a umidade e temperatura local e os microorganismos existentes nos solos e subsolos da região.

5.2.2 Fontes e Contaminação

i. *Contaminação de fertilizantes e pesticidas na agricultura:* o conhecimento sobre as características dos diferentes tipos de plantios e a contaminação da água subterrânea é ainda muito limitado no país. Desde 1994 existe uma grande expansão da área de plantio através do plantio direto que tem como característica reduzir o escoamento superficial, favorecendo a infiltração e o escoamento sub-superficial e subterrâneo. Em face disto, é razoável supor que os mananciais subterrâneos podem aumentar a sua contaminação a partir deste processo. Portanto, é recomendável que ocorram investimentos em monitoramento experimental, em projetos pilotos, que identifiquem o nível de contaminação, os tipos de compostos químicos, e sua reação com o meio, dentro de diferentes ambientes amostrais da realidade brasileira na agricultura como: tipo de geologia, clima e práticas agrícolas. Devem-se buscar também medidas de práticas agrícolas que busquem minimizar estes impactos dentro de uma visão

gerencial destes mananciais. No caso da indústria sucro-alcooleira, é recomendável analisar os efeitos da vinhaça utilizada na fertirrigação.

ii. *Contaminação devido à criação de animais* – suínos e aves: parte importante do país (Oeste de Santa Catarina, Paraná, Rio Grande do Sul, Mato Grosso do Sul e Goiás) possui criação de animais para o abate, em minifúndios terceirizados pelas indústrias de alimentos. É notório o aumento da poluição difusa resultante destas práticas. O que não se conhece é o grau de contaminação da água subterrânea regional. Dentro dos programas de investimentos, nas práticas de melhoria da qualidade da água superficial, é necessário incorporar o entendimento e a mitigação do impacto sobre as águas subterrâneas.

iii. *Mineração:* a mineração de carvão no Sul do Brasil tem produzido ambientes degradados que representam fortes passivos ambientais das águas superficiais e subterrâneas. Existe pouco conhecimento sobre a qualidade do sistema superficial-subterrâneo e medidas que permitam recuperar os lagos e os aqüíferos.

iv. *Aterros sanitários*: uma das importantes fontes de contaminação existente nas cidades brasileira é o aterro sanitário. Pesquisas sobre o processo de contaminação dos aqüíferos através do chorume e os diferentes níveis de contaminação considerando medidas de contaminação permitirão orientar melhor o projeto destes sistemas em diferentes realidades climáticas, geológicas, entre outros.

v. *Contaminação de pólos industriais e petroquímicos:* No país já existem vários pólos industriais com idade suficiente para permitir conhecer estas experiências quanto à contaminação das águas subterrâneas ao longo do tempo, considerando que os mesmos possuem monitoramento em função da fiscalização. A avaliação destes resultados poderá permitir aprimorar as ferramentas de previsão e aprimorar as medidas de controle utilizadas. Quais são as medidas de gestão de segurança que devem ser adotadas?

vi. *Contaminantes orgânicos não miscíveis (e.g. combustíveis*): transporte, ocorrência, forma de detecção e métodos de remediação desse tipo de

contaminação. Nesta classe estão os problemas de contaminação urbana devido a postos de gasolina, lagoas de rejeito e de tratamento de compostos orgânicos, entre outros.

vii. *Contaminação dos aqüíferos urbanos:* os aqüíferos urbanos geralmente são contaminados por fossas sépticas e vazamento de redes de esgoto. Como as cidades apresentam diferentes níveis de desenvolvimento de controle da qualidade da água é necessário conhecer os diferentes graus de contaminação como resultado de gestão dos efluentes urbanos. Da mesma forma estes elementos podem permitir a tomada de decisão de ações de controle que permitam a recuperação ou a mitigação dos efeitos, dentro do uso e conservação do manancial.

5.2.3 Proteção de Recarga e Captações

i. *Recarga de aqüíferos:* o reuso da água ou combinação de água urbana e rural permite a recarga de aqüíferos. No entanto, é necessário avaliar de forma adequada este processo para evitar que os mesmo sejam contaminados. Nos Estados da Califórnia, Arizona e Nevada, uma grande parte de esgotos domésticos é reutilizada, após tratamento adequado, para recarregar aqüíferos com os objetivos seguintes: (a) evitar a penetração de cunha salina em aqüíferos costeiros; (b) evitar a subsidência do solo quando se exerce uma grande demanda de aqüíferos com pequena capacidade de recarga natural; c) proporcionar tratamento adicional através da camada não-saturada acima do aqüífero e; (d) aumentar a disponibilidade de água. A recarga, muitas vezes, dependendo de condições logísticas locais e poderá eliminar a necessidade de adutoras para o transporte de água para distribuição. Israel, Holanda e França também utilizam recarga artificial para finalidades diversas. A recarga artificial pode ser efetuada através de poços de injeção direta ou por bacias ou quaisquer outros sistemas de infiltração. No caso de poços, os custos são bastante elevados, integrando os do próprio poço, mais o de

tratamento avançado, necessário para evitar a poluição do aqüífero. No Brasil, já iniciamos a metodologia de infiltração através de bacias de infiltração, que se beneficia do chamado Tratamento solo-aqüífero que utiliza a grande capacidade de remoção de poluentes da camada vadosa. Nesse caso os custos são menores, uma vez que se faz apenas um tratamento secundário permitindo que o solo exerça o tratamento complementar necessário.

ii. *Proteção de captações:* algumas vezes os próprios poços atuam como caminho de transporte dos poluentes, devido a falhas de projeto, falhas de execução, problemas de manutenção ou abandono dos poços. Temas de pesquisa podem ser: a delimitação de perímetros de proteção de poços adequados à realidade brasileira, melhoramento dos projetos de poços, materiais mais resistentes para o revestimento dos poços para não sofrer rompimento com o tempo.

5.2.4 Ferramentas e Produtos

- Técnicas de monitoramento, análise, avaliação e enquadramento dos aqüíferos e o meio não-saturado quanto à contaminação;
- Desenvolvimento de dessalinizadores econômicos, de uso local e fácil manutenção, especialmente em áreas de rochas cristalinas fraturadas;
- Aprimoramento e desenvolvimento de modelos matemáticos para simulação dos processos de quantidade e qualidade que permitam avaliar os cenários com e sem contaminação, com as medidas mitigadoras e permitam a tomada de decisão na gestão;
- Desenvolvimento, aprimoramento e avaliação de procedimentos para recuperação de aqüíferos;
- Uso e desenvolvimento de ferramentas de avaliação do impacto ambiental de aqüífero com base em análise de risco, dentro do mecanismo de tomada de decisão e gestão do sistema;

- Desenvolvimento de técnicas para avaliação da recarga natural, e para indução de recarga artificial;
- Desenvolvimento de técnicas para detecção, monitoramento e prevenção da subsidência de solos devido à exploração de água subterrânea.

5.2.5 Gestão

- Avaliação dos mecanismos legais de gestão pelo estado das águas subterrâneas que apóiem o sistema de outorga da água subterrânea;
- Avaliação dos elementos econômicos e de exploração das águas subterrâneas dentro do sistema de gestão quanto ao financiamento da gestão, monitoramento e cobrança pela poluição;
- Avaliação dos padrões de enquadramentos e medidas legais relacionadas, propostas alternativas de desenvolvimento de controle da qualidade da água e identificação de fontes e fiscalização;
- Mecanismos de gestão para proteção das áreas de recargas.

5.3 MECANISMOS DE INVESTIMENTOS

Considerando as limitações existentes quanto ao reduzido número de pesquisadores, infra-estrutura de laboratório na maioria do país recomenda-se o investimento nos seguintes mecanismos de financiamento:

- Redes de pesquisa voltadas para experiências pilotos em diferentes aqüíferos brasileiros em que existam pelo menos dois tipos principais de fontes contaminações. Os condicionantes básicos são: o grupo ser interdisciplinar, implementar laboratório e monitoramento associado ao experimento, mais de um centro de pesquisa com pelo menos um grupo

emergente, deve obrigatoriamente incorporar a formação de pesquisadores, deve possuir pelo menos uma contra-partida internacional.

- Editais sobre tópicos selecionados de pesquisa, dentro da priorização definida. Ao longo do tempo os editais devem cobrir os focos de pesquisa identificados. Este conjunto de investimento deve ser avaliado comparativamente ao primeiro grupo na forma de workshops especiais, onde poderão ser redefinidas as prioridades;
- Editais específicos sobre mecanismos de gestão com projetos definidos de interesse das agências de governo federal e estadual Estes produtos devem procurar atender o componente tecnológico das agencias governamentais.

5.4 QUESTÕES UTILIZADAS NA DISCUSSÃO

As seguintes questões foram utilizadas na discussão:

1. Existem outros aspectos que no seu entender são importantes para a pesquisa em contaminação das águas subterrâneas e que não foram abordados neste documento? Quais?
2. Entre os tópicos abordados neste documento, em quais você considera que existem abordagens inadequadas que devem ser alteradas ou que não estão suficientemente aprofundadas?
3. Quais são os cinco principais tópicos que você considera fundamentais para o investimento em pesquisa dos relacionados e dos que foram complementados pelo grupo? Favor comentar
4. Como você observa a capacitação e a infra-estrutura de pesquisa nacional e as necessidades de investimentos?
5. Quais os mecanismos que você considera mais importantes para serem utilizados no investimento de pesquisa deste componente?

6. CONCLUSÕES

Este documento, atualmente na versão 2.0, tem a finalidade de promover a discussão sobre o tema de qualidade das águas subterrâneas. É possível que não tenha abordado todos os aspectos relacionados com a contaminação de águas subterrâneas, com os quais os pesquisadores brasileiros estão preocupados. Esta análise procurou partir da visão dos problemas de sociedade para a busca de focos principais de pesquisa e desenvolvimento, como se baseou o documento de diretrizes estratégicas do CT-Hidro.

Os sistemas hídricos, que envolve as águas subterrâneas, tem sido uma das áreas de pouco investimento em pesquisa apesar do reconhecido impacto provocado pelo desenvolvimento econômico e social do país sobre este sistema. As dificuldades de priorizar os aspectos de contaminação deste sistema se devem ao seguinte: (a) os impactos não ficam evidentes para o decisor na medida que não são visíveis como nas águas superficiais; (b) o impacto tem um período de retardo e a determinação das relações causa-efeito muitas vezes é difícil pela forma difusa das fontes e fica sujeita a controvérsias. Estas dificuldades somente alimentam mais ainda a necessidade de desenvolvimento do conhecimento científico e tecnológico para obter ferramentas, meios de monitoramento e processos de gestão que tornem possível conservar esse sistema tão necessário à sustentabilidade humana.

Observa-se no cenário brasileiro que um dos grandes desafios está relacionado com a capacitação e a interdisciplinaridade do conhecimento. É marcante o reduzido número de pesquisadores nesta área em todas as regiões do país e a falta de uma gestão de pesquisa que permita elevar o conhecimento e a quantidade de pesquisadores qualificados através de parcerias nacionais e internacionais e entre centros de pesquisa. Também é necessário equipar laboratórios com equipamentos e recursos que permitam desenvolver, com permanência no tempo, uma pesquisa consistente com as necessidades levantadas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J.H., PETTY,R. J. E HACKETT,G. (1987) – DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings, Environmental Protection Agency, Report EPA/600/2-85/018.

CETESB, 2001, Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo, Cetesb.

CHAPMAN, Deborah. 1996. Water Quality Assessments. WHO UNEP 628p.

CUSTÓDIO, E., LLAMAS, M.R., 1983, Hidrologia Subterrânea, Barcelona, Ed Omega.

EMBRAPA, 2002. Uso agrícola das áreas de recarga do Aqüífero Botucatu (Guarani) e implicações na qualidade da água subterrânea. Embrapa Meio Ambiente. Jaguariúna, 2002. 38p. (Relatório Final).

FEITOSA, F. A. C., MANOEL FILHO, J., 1997, Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações, CPRM.

FOSTER, S. S. D. (1987), Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy, vulnerability of soil and groundwater to pollution, TNO Committee on hydrological research, Delft.

FOSTER, S.; TUINHOF. A; KEMPER, K; GARDUÑO, H.; NANNI, M. 2003a. Groundwater Management Strategies: facets of the integrated approach. GW-MATE Briefing Note n.3.

FOSTER, S.; GARDUÑO, H.; KEMPER, K; TUINHOF. A; NANNI, M.; DUNCAN, C. 2003b. Groundwater Quality Protection: defining strategy and setting priorities GW-MATE Briefing Note n.8.

LNEC, 2003, Valorização e proteção da zona costeira portuguesa: Avaliação e estudo da vulnerabilidade de sistemas aqüíferos costeiros, Lnec, Lisboa.

MMA, 2002. Plano Nacional de Recursos Hídricos. ANA SRH MMA.

REBOUÇAS, 2002. Águas Subterrâneas. In Águas Doces do Brasil. Escrituras.

TUINHOF. A.; DUMARS, C; FOSTER, S.;KEMPER, K; GARDUÑO, H.; NANNI, M. 2003. Groundwater Resource Management: an introduction to its scope and practice. GW-MATE Briefing Note n.1.

http://www.meioambiente.pro.br/agua/guia/poluicao.html, consultada em Novembro de 2003.

http://pasture.ecn.purdue.edu/~agenthml/agen521/epadir/grndwtr/contamination.html, consultada em Novembro de 2003.

http://www.meioambiente.pro.br/agua/guia/guarani.html, consultada em Novembro de 2003.

http://www.meioambiente.pro.br/agua/guia/costeiro.html, consultada em Novembro de 2003.