

TÉCNICAS PARA REMEDIAÇÃO DE AQUÍFEROS CONTAMINADOS POR VAZAMENTOS DE DERIVADOS DE PETRÓLEO EM POSTOS DE COMBUSTÍVEIS

Rômulo César Pinheiro Coutinho¹ & Carisia Carvalho Gomes²

RESUMO --- A contaminação dos recursos hídricos subterrâneos tem gerado preocupações expressivas nos últimos anos, principalmente os aquíferos contaminados pelos compostos BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno), que são os constituintes da gasolina mais tóxicos para o homem e o meio ambiente. Esta contaminação tem como uma das principais fontes os tanques de armazenamento dos postos de combustíveis que, ao vazarem, infiltram no solo e contaminam as zonas saturada e não saturada. Este trabalho mostra como se faz o gerenciamento de áreas contaminadas, onde as áreas estudadas podem ser classificadas em áreas suspeitas de contaminação (ASs), áreas potencialmente contaminadas (APs) e áreas contaminadas (ACs). No final do processo da identificação, as áreas que foram classificadas como contaminadas (ACs) passam por um processo de remediação e monitoramento e, em seguida, se tratadas, são retiradas do cadastro de áreas contaminadas. Fez-se um estudo das técnicas de remediação de solos e águas subterrâneas de um modo geral e, especificamente, as utilizadas nos dois casos de postos contaminados por derivados de petróleo no Estado do Pará, para comprovação da utilização com sucesso destas técnicas.

ABSTRACT --- The contamination of groundwater resources has generated concerns in the last years, mainly BTEX (Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylene) contaminated aquifers, that are constituents of gasoline most toxic for the human beings and the environment. This contamination has as one of the main sources the gasoline storage tanks that, when leaking, infiltrate in the ground and contaminate the saturated and non saturated zones. This work shows how to make the management of contaminated areas, where the studied areas can be classified in areas that have suspicion of contamination (ASs), areas potentially contaminated (APs) and contaminated areas (ACs). In the end of the identification process, the areas that had been classified as contaminated (ACs) pass for a remediation and management processes and, after that, they are treated, and removed from the contaminated areas register. A general study of remediation techniques of groundwater and soil and, specifically, of the ones used in the two cases of contaminated places by oil derivatives in the State of Pará, that have evidence of the use success using these techniques.

Palavras-chave: água subterrânea; derivados de petróleo; técnicas de remediação.

1) Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará, Rua Aramando Oliveira, 295, Parquelândia, Fortaleza, CE, cep 60.450-060-. e-mail: romuloceara2000@yahoo.com.br.

2) Professora Adjunta da Universidade Federal do Ceará. Rua Silva Jatahy. 400, apto 1101 – A, Meireles, Fortaleza CE, cep 60.165-070. email:carisia@ufc.br.

1 – INTRODUÇÃO

A água subterrânea representa, em termos globais, mais de 97% da água doce do mundo que está disponível para uso do homem, sendo de fundamental importância que se evite a poluição neste tipo de recurso hídrico. A poluição nos aquíferos encontra-se presente, principalmente, em lençóis mais rasos que ficam próximos de esgotos ou até mesmo lençóis próximos a postos de gasolina, devido aos tanques de combustíveis que, dependendo dos cuidados, podem vazar e contaminar as águas subterrâneas próximas.

Em um derramamento de gasolina, umas das principais preocupações é a contaminação de aquíferos que sejam utilizados para o abastecimento de consumo humano. Após atingir a água subterrânea os contaminantes, derivados do petróleo, são transportados como fase dissolvida e podem atingir os rios e as captações, através de poços rasos e profundos. Os compostos BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos) são os que primeiro atingem o lençol freático, pois são os constituintes que possuem maior solubilidade em água (CORSEUIL, 1992).

Os postos de combustíveis, mais concentrados nas zonas urbanas das cidades, são um importante causador da poluição dos recursos hídricos subterrâneos. A contaminação é gerada pela infiltração de contaminantes (soluto) derivados de petróleo, principalmente óleo diesel e gasolina, oriundos de tanques de armazenamento de combustível.

Uma vez ocorrido o vazamento de hidrocarbonetos de petróleo a partir de um Tanque de Armazenamento Subterrâneo de Combustível (TASC), as características físico-químicas destes contaminantes, bem como a sua interação com o material geológico, serão fatores determinantes para o seu comportamento no meio impactado (FETTER, 1994; LAGREGA et al., 1994).

O processo de remediação de aquíferos é uma tarefa complexa, dispendiosa e, na maioria das vezes, custosa sendo, esta complexidade, determinada pela mistura de processos, biológicos e geoquímicos, envolvidos a partir do momento em que o contaminante penetra no subsolo.

Dois fatores relevantes no sucesso da remediação são a experiência e qualificação de profissionais na realização do diagnóstico, de maneira que a escolha seja a melhor tecnologia de remediação para um determinado sítio contaminado. Assim, o conhecimento das atuais tecnologias de remediação, suas limitações, relações custo-benefício e aplicabilidade quanto às questões hidrogeológicas e de natureza dos contaminantes, são importantes no sucesso do programa de remediação.

O objetivo geral deste trabalho é apresentar as tecnologias mais utilizadas para remediação de aquíferos contaminados por postos de combustíveis como, também, os fatores necessários para classificação das áreas contaminadas, sendo necessário: definir os limites das plumas de contaminação de áreas contaminadas, reconhecendo as características hidrogeológicas dos

aquíferos; escolher as possíveis tecnologias conhecidas e utilizadas em outros estados ou países mais adaptáveis para o tipo de contaminação; apresentar os possíveis riscos que os contaminantes podem gerar para a população e o meio ambiente e apresentar as principais técnicas de remediação que podem ser utilizadas em caso de vazamentos de derivados de petróleo em postos de combustíveis.

2 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

2.1 - Identificação e classificação de áreas contaminadas

Visando minimizar os riscos a que estão sujeitos a população e o meio ambiente, procura-se fazer o gerenciamento de áreas contaminadas (ACs), por meio de um conjunto de medidas que asseguram o conhecimento das características e dos impactos causados por essas áreas, proporcionando os instrumentos necessários à tomada de decisões (CETESB, 2001).

Baseada em uma estratégia constituída por etapas sequenciais, onde a informação obtida em cada etapa é de importância fundamental para a execução da etapa posterior, a metodologia utilizada no gerenciamento de ACs tem como objetivo otimizar recursos técnicos e econômicos (CETESB, 2001).

As áreas estudadas podem ser classificadas em áreas potencialmente contaminadas (APs), áreas suspeitas de contaminação (ASs) ou em áreas contaminadas (ACs).

As áreas potencialmente contaminadas são aquelas onde estão sendo ou foram desenvolvidas atividades potencialmente contaminadoras, isto é, onde ocorre ou ocorreu o manejo de substâncias cujas características físico-químicas, biológicas e toxicológicas podem causar danos e/ou riscos aos bens a proteger (CETESB, 1999).

As áreas suspeitas de contaminação são aquelas nas quais, durante a realização da etapa de avaliação preliminar, foram observadas falhas no projeto, problemas na forma de construção, manutenção ou operação do empreendimento, indícios ou constatação de vazamentos e outros. Estas constatações induzem a suspeitar da presença de contaminação no solo e nas águas subterrâneas e/ou em outros compartimentos do meio ambiente (CETESB, 1999).

Uma área contaminada, conforme definição apresentada no manual da Cetesb, pode ser definida resumidamente como a área ou terreno onde há comprovadamente contaminação, confirmada por análises, que pode determinar danos e/ou riscos aos bens a proteger, localizados na própria área ou em seus arredores (CETESB, 1999).

Dois processos constituem a base do gerenciamento de Áreas Contaminadas, são eles: Processo de identificação de áreas contaminadas e Processo de recuperação de áreas contaminadas.

O processo de identificação, de áreas contaminadas, objetiva localizá-las, sendo constituído por quatro etapas: Definição da região de interesse; Identificação de áreas potencialmente contaminadas; Avaliação preliminar e Investigação confirmatória.

O projeto de remediação deve ser elaborado para ser utilizado como a base técnica para o órgão gerenciador ou órgão de controle ambiental avaliar a possibilidade de autorizar ou não a implantação e operação dos sistemas de remediação propostos.

O projeto deverá conter ainda: Planos detalhados de segurança dos trabalhadores e vizinhança; Plano detalhado de implantação e operação do sistema de remediação, contendo procedimentos, cronogramas detalhados e Plano de monitoramento da eficiência do sistema, com pontos de coleta de dados definidos, parâmetros a serem analisados, frequência de amostragem e os limites ou padrões definidos como objetivos a serem atingidos pela remediação para interpretação dos resultados.

Para verificar a real eficiência das técnicas utilizadas, deve-se, continuamente, avaliar os trabalhos de remediação das áreas contaminadas, além de se avaliar os possíveis impactos causados aos bens a proteger pelas ações de remediação.

Quando os níveis definidos no projeto de remediação forem atingidos e, após a anuência do órgão de controle ambiental, dá-se fim a este processo.

Durante as ações de remediação, a área deverá permanecer sob contínuo monitoramento, por período de tempo a ser definido pelo órgão de controle ambiental. Os resultados do monitoramento serão utilizados para verificar a eficiência da remediação, propiciando observar se os objetivos desta estão sendo atingidos ou não.

Após os resultados obtidos, a área poderá ser reclassificada. Uma área poderá ser excluída do Cadastro de ACs, caso o contaminante seja removido e não exista uma atividade potencialmente contaminadora na área.

2.2 – Processos de contaminação

Entre as principais fontes de contaminação do solo e das águas subterrâneas, pode-se citar os vazamentos em dutos e tanques de armazenamentos subterrâneos de combustível, atividades de mineração, uso de defensivos agrícolas e, também, esgotos que, nas cidades e nas regiões agrícolas, são lançados no solo diariamente em grande quantidade, poluindo rios, lagos e o lençol freático.

Levantamentos feitos por agências ambientais, nacionais dos estados e do governo federal, indicam que lençóis freáticos das áreas onde estão localizados os postos de combustíveis são, frequentemente, atingidos por vazamentos oriundos dos tanques dos postos de gasolina, enterrados a uma profundidade de até cinco metros. Como os vazamentos ocorrem, geralmente, em pequenas

quantidades, passam despercebidos pelos administradores dos postos, que só tomam providências quando há uma perda considerável de combustível.

Ocorre que são, justamente, os pequenos vazamentos os que mais causam problemas aos lençóis freáticos. Esses pequenos vazamentos vão, contínua e lentamente, infiltrando e encharcando o solo sem serem percebidos (FERNANDES, 1997; MILLER, 2001).

2.2.1 Contaminação por compostos BTEX

Os compostos BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno) são considerados, dos compostos da gasolina, os principais contaminantes de águas subterrâneas, uma vez que, devido a sua maior solubilidade e mobilidade em água, são os primeiros que atingem o lençol freático.

Por ser muito pouco solúvel em água, a gasolina derramada, contendo mais de uma centena de componentes, inicialmente, estará presente no subsolo como líquido de fase não aquosa (NAPL - Non-Aqueous Phase Liquid). Em contato com a água subterrânea a gasolina se dissolverá parcialmente. (CORSEUIL, 1992).

A Portaria 1.469/2000, do Ministério da Saúde, estabelece os seguintes limites permitidos para os hidrocarbonetos em água potável: 5 microgramas/L no caso do benzeno, 170 microgramas/L para o tolueno, 200 microgramas/L para o etilbenzeno e 300 microgramas/L para o xileno.

Os contaminantes BTEX são considerados substâncias perigosas por afetarem o sistema nervoso central, sendo o Benzeno o mais tóxico deles, chegando a causar leucemia. Em altas concentrações em curtos períodos (exposição aguda), podem levar à morte, no caso de ingestão ou inalação de Benzeno por uma pessoa.

O Quadro 1 mostra algumas particularidades dos compostos BTEX, como adsorção, volatilização e solubilidade.

Quadro 1 – Características dos compostos BTEX

COMPOSTO	ADSORÇÃO NAS PARTÍCULAS DO SOLO %	VOLATILIZAÇÃO %	FRAÇÃO SOLUBILIZADA NA ÁGUA SUBTERRÂNEA E NA SOLUÇÃO DO SOLO %
BENZENO	3	62	35
ETILBENZENO	21	59	20
TOLUENO	3	77	20
XILENOS	15	54	31

Fonte: TECNOHIDRO/2001

2.3 – Tecnologias de remediação de solos e águas subterrâneas

As alternativas que utilizam soluções mais naturais e com menores impactos no subsolo vêm ganhando maior destaque nos últimos anos. Porém, vale lembrar que, essas soluções, devido ao maior tempo requerido na remediação, nem sempre são suficientes para atingir os objetivos do projeto e devem, na maioria dos casos, ser aplicadas em complemento às tecnologias convencionais já existentes (NOBRE e NOBRE, 2005).

Algumas tecnologias de remediação de águas subterrâneas e solos são: Barreira hidráulica; *Pump-and-treat*; Extração multifásica; Oxidação química; Extração de vapores do solo; *Air sparging*; *Air stripping*; Biopilhas; Biorremediação; *Soil flushing*; *Bioventing*; Atenuação natural; *Biosparging*; Dessorção Térmica e Fitorremediação.

2.3.1 Extração multifásica – MPE

O Sistema de extração multifásica combina as técnicas de bioventilação e remoção de massa a vácuo, possibilitando a extração da fase livre, fase vapor, fase dissolvida na matriz do solo e estimulando o processo de biodegradação natural na zona não saturada (NOBRE et al., 2003; FURTADO, 2005).

A extração multifásica ocorre por meio da instalação de um sistema de ventilação a vácuo, onde os poços de extração ficam distribuídos na área de interesse. Através da aplicação do vácuo nos poços de extração, cria-se um gradiente de pressão dirigido para estes pontos, de onde são extraídas a fase livre, vapor e dissolvida do contaminante. O gradiente de pressão é diretamente proporcional ao vácuo aplicado, logo, a eficiência na extração das diferentes fases do contaminante será função do sistema a ser implantado. A mistura bombeada deve ser direcionada para uma caixa separadora de água e óleo, com o combustível recuperado armazenado em tambores e a água contaminada destinada para tratamento em filtro de carvão ativado para posterior reinjeção. O vapor extraído é direcionado para um sistema de carvão ativado e lançado na atmosfera (NOBRE et al., 2003; FURTADO, 2005).

O sistema possui um dispositivo de auto-operação a partir de *timers*, que devem ser ajustados para intervalos de tempo de operação que otimizem a extração do contaminante da zona não saturada.

2.3.2 *Air sparging*

É uma tecnologia *in situ*, que introduz ar no aquífero contaminado para produzir borbulhamento na água. Pode ser aplicado, em ambos horizontes: saturados e não saturados. O sistema de aeração *in situ* pode, também, favorecer a biodegradação aeróbica de determinados compostos por incrementar a quantidade de oxigênio dissolvido nas águas do aquífero

(*biosparging*). As bolhas de ar são atravessadas horizontalmente e verticalmente pela coluna de solo, criando uma aeração que remove os contaminantes por volatilização. Para um melhor rendimento, o *Air Sparging* poderá ser utilizado associado à Extração de Vapores (EVS). Esta tecnologia opera com altas taxas de fluxo de ar, a fim de se manter contato constante entre a água e o solo e propiciar maior aeração da água subterrânea. Os grupos-alvo de contaminantes do *Air Sparging* são os VOCs e combustíveis derivados de petróleo (NOBRE et al., 2003; FURTADO, 2005).

Os fatores que podem limitar a aplicabilidade e eficiência do processo são os seguintes: profundidade da contaminação e do nível d'água local; tipos litológicos pouco permeáveis impossibilitam a subida dos gases; a injeção de ar deve ser projetada para condições específicas e o fluxo de ar através da zona não saturada pode não ser uniforme, reduzindo a performance da técnica.

As principais características que determinam a eficiência do método são: a permeabilidade gasosa na zona não saturada, a taxa de fluxo de água, permeabilidade do aquífero, volatilidade do contaminante e a sua solubilidade. A Figura 1 demonstra o funcionamento do sistema *Air Sparging*.

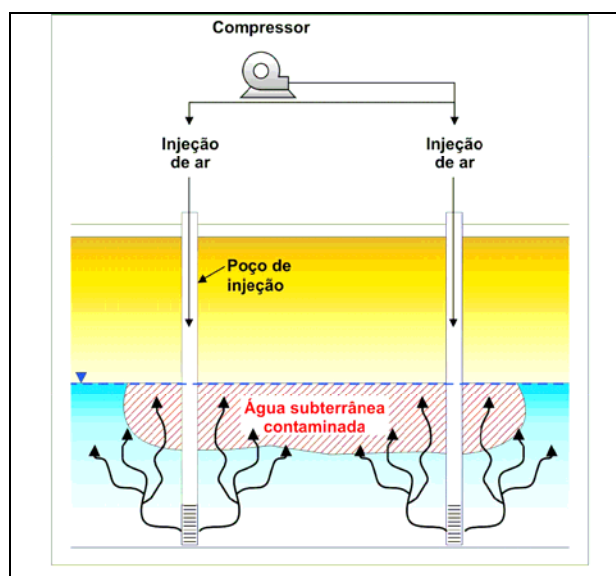


Figura 1 – Sistema de *Air Sparging*. Fonte: BECHARA (2004)

2.3.3 Biorremediação

Utiliza-se de técnicas naturais para promover a remediação de uma área impactada, através de microorganismos (bactérias e fungos) para degradar substâncias ou compostos perigosos aos seres humanos e transformá-los em substâncias com pouca ou nenhuma toxicidade (TECNOHIDRO, 2001).

Os microorganismos obtêm nutrientes e energia das substâncias orgânicas, os mesmos digerem essas substâncias, presentes em solos e águas subterrâneas, transformando-as,

principalmente, em dióxido de carbono e água. Deve-se ter um cuidado com esse tipo de remediação, pois os microorganismos podem gerar substâncias mais tóxicas, tanto para o homem como para o meio ambiente.

Microorganismos distintos, substâncias distintas. Alguns deles sobrevivem em condições extremamente adversas, porém outros, sob as mesmas condições, crescem muito lentamente ou morrem. Para que as condições ideais sejam alcançadas, eventualmente, faz-se necessária a adição de ar, nutrientes ou outras substâncias, além de quantidades extras de microorganismos (TECNOHIDRO, 2001).

O Quadro 2 faz um resumo das principais técnicas de remediação, assim como os possíveis compostos removidos.

Quadro 2 -- Tecnologias de remediação de solos e águas subterrâneas

TECNOLOGIA	DESCRIÇÃO	APLICAÇÃO/CONTAMINANTES
Extração de gás de solo (SVE)	Remove, fisicamente, compostos orgânicos voláteis da zona insaturada através da aplicação de um sistema de vácuo	CHCs, BTEXs
Bioaeração ou "bioventing"	Acelera a remoção de compostos orgânicos voláteis através da aeração na zona vadosa. Estimula a biorremediação in-situ.	CHCs, BTEXs
"Air Sparging" (AIS)	Remove, fisicamente, contaminantes voláteis e semi-voláteis através de processos de aeração do solo na zona saturada. Estimula a biorremediação in-situ.	CHCs, BTEXs, PAHs, MTBE
"Bio Sparging"	Acelera a biodegradação de compostos orgânicos por estimular a microflora nativa, através de processos físicos de aeração do solo na zona saturada	CHCs, , BTEXs, PAHs, MTBE
Contenção hidráulica e tratamento Pump and Treat	Processo físico de extração de águas contaminadas de zona saturada e tratamento ex-situ.	CHCs, BTEXs
Atenuação Natural Monitorada (ANM)	Monitoramento "inteligente" de parâmetros indicadores de atenuação natural para avaliar a estabilização ou redução de plumas dissolvidas.	CHCs, BTEXs, PAHs
Tecnologias Térmicas	Processos térmicos in-situ que destroem contaminantes ou possibilitam a aceleração de transferência de fase do contaminante no subsolo.	CHCs, BTEXs
Biorremediação Acelerada	Altera, artificialmente, as condições bioquímicas naturais do solo ou águas	CHCs, BTEXs

	subterrâneas para acelerar a degradação por microorganismos.	
Fitorremediação	Plantas apropriadas são utilizadas para promover a extração/ biodegradação de compostos orgânicos e metais do solo.	BTEXs ,CHCs, ,PAHs,PESTICIDAS, METAIS PESADOS
Lavagem de Solo/ Reinjeção/ Químicos Processos	A lavagem de solo através de fluido apropriado promove a estripagem e a biodegradação. Compostos químicos (p.e. surfactantes) podem ser adicionados para acelerar a transferência de fase dos contaminantes.	CHCs, BTEXs

OBS: CHCs: Compostos de hidrocarbonetos Clorados

BTEXs: Hidrocarbonetos do Petróleo (Benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos)

PAHs: Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

MTRE: Multifásica retirada

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução deste trabalho foram explorados artigos de revista, livros, internet, fazendo parte da pesquisa bibliográfica. Para facilitar a assimilação do conteúdo explorado foram feitos resumos, fichamentos e análises de estudos de casos que facilitaram a resolução do problema.

Foram realizadas também visitas a SEMACE (Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará) para coleta de dados.

Primeiramente, foi feita uma fundamentação teórica sobre as técnicas de remediação de solos e águas subterrâneas disponíveis na atualidade, após este estudo foi observado que algumas não poderiam resolver o problema, logo em seguida, foram separadas as técnicas que poderiam solucionar o problema de contaminação de solos e águas subterrâneas por vazamento de derivados de petróleo. (e águas subterrâneas por vazamento de derivados de petróleo)

utilização e eficiência de algumas das técnicas explicadas neste trabalho, além de serem exemplos reais de remediação de áreas contaminadas por vazamento de derivados de petróleo no Brasil.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a ilustração de como as tecnologias de remediação de solos e águas contaminadas podem ser utilizadas no auxílio da preservação de recursos naturais, especialmente o de águas subterrâneas, são apresentados dois estudos de casos de postos de combustível que representam casos reais de sucesso na remediação do problema. Os postos são o Posto Senador Lemos e Posto Braz de Aguiar, ambos localizados na cidade de Belém, no Estado do Pará, Brasil.

4.1 - Remediação – Posto Senador Lemos

O escopo de serviços oferecidos pela SERVIMAR (Ambiental/Engenharia) para o sistema de remediação no Posto Senador Lemos foi o seguinte: Implantação do sistema de remediação; *Start up*; Operação e monitoramento do sistema; Monitoramento analítico e Relatórios inicial, mensal e final.

Para a remediação da contaminação ambiental existente neste *site* foram adotadas as técnicas de remediação ativa MPE/AS (Extração Multifásica com *Air Sparging*) e Biorremediação. Teve como função remover da subsuperfície as alterações de qualidade observadas em termos de fase orgânica dissolvida e secundariamente as fases livres residuais e adsorvidas ao solo. O fluxograma simplificado da Tecnologia de remediação – MPE/AS é apresentado na Figura 2.

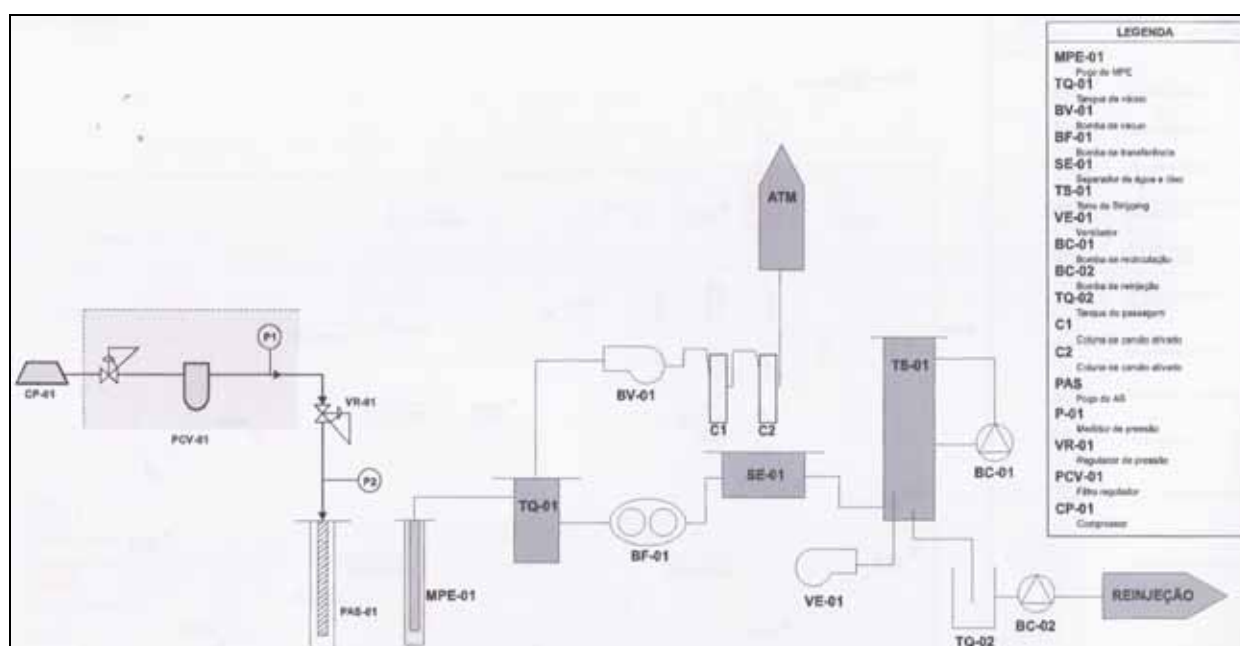


Figura 2 - Fluxograma MPE/AS. Fonte: SERVIMAR (2004)

A utilização de MPE/AS é bastante comum em diversos países. Seu funcionamento permite a extração dos diversos segmentos alterados na qualidade ambiental, sejam eles elementos dos solos ou das águas subterrâneas.

A base de funcionamento deste processo é o da extração a vácuo, tanto da fase dissolvida, como nos casos em que exista fase livre orgânica, simultaneamente, com a remoção dos vapores de hidrocarbonetos que estejam presentes em sub-superfície. Através deste sistema, cria-se um vácuo, o qual gera um gradiente de pressão dirigido ao poço de extração, conduzindo a ele as fases líquidas (aquosa e orgânicas) e a de vapor. A depressão de nível d'água para controlar a migração da fase dissolvida e aumentar a eficiência de extração de vapor.

A circulação de ar em zona não saturada favorece processos de volatilização de compostos que possam estar retidos por adsorção no solo, além de permitir maior oxigenação nesta região estimulando processos de atenuação intrínseca dos compostos orgânicos, em especial o processo de Biorremediação. Para acelerar este processo são adicionados no *site* nutrientes que propiciam maior eficiência da Biorremediação.

A Figura 3 apresenta o encaminhamento de tubulação e a localização do sistema de remediação.

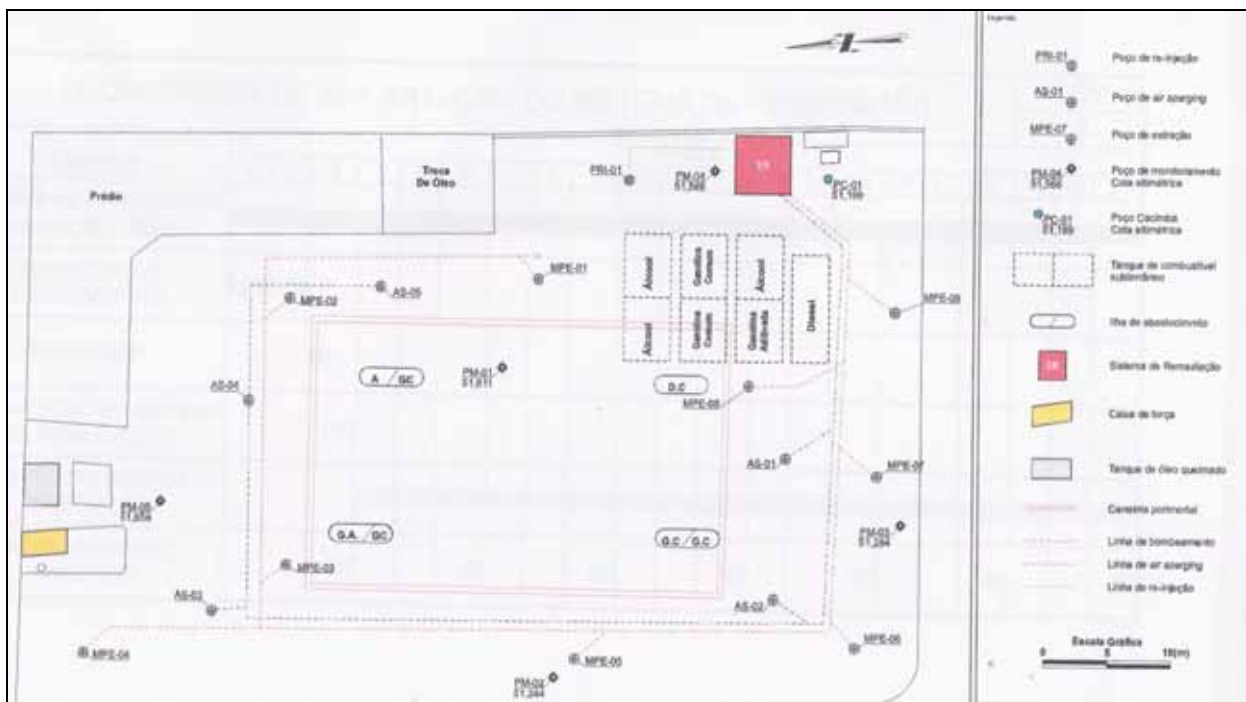


Figura 3 - Sistema de remediação - MPE/AS. Fonte: SERVIMAR (2004)

O sistema de Extração Multifásica consiste em extrair vapores na zona não saturada do solo e líquidos na zona saturada através de uma bomba de vácuo. A mistura gás/líquido é separada no tanque de vácuo. Os gases são tratados em colunas de carvão e posteriormente descartados para a atmosfera. O líquido é transferido para uma caixa separadora, onde ocorrerá a separação da fase livre e dissolvida.

A fase livre é retirada e acondicionada em tambores. O efluente é encaminhado para a torre de *stripping*, que é recirculada por uma bomba centrífuga e depois enviada para o tanque de transferência. Posteriormente, através de outra bomba centrífuga, a água é reinjetada no aquífero. O processo de *stripping* tem a função de arrastar os voláteis das águas subterrâneas.

Em seguida, no processo, são adicionados nutrientes que estimulam o processo de biorremediação. Em paralelo, não havendo fase livre orgânica, é adicionada, no *site*, ar por meio de poços de injeção. Este ar (*Air Sparging*) atua volatilizando os compostos orgânicos dissolvidos na água, além de torná-la mais rica em oxigênio dissolvido, fato que acelera o processo de biorremediação do *site*.

O Quadro 3 apresenta a descrição dos principais equipamentos utilizados no sistema de Extração Multifásica.

Quadro 3 - Relação dos equipamentos utilizados no sistema de MPE/AS

EQUIPAMENTO	FUNÇÃO	QUANTIDADE
Bomba de Vácuo	Gerar uma pressão negativa nos poços para extrair os vapores e líquidos.	1
Tanque de Vácuo	Separar a mistura gás/líquido.	1
Bomba de Fuso	Transferir a água do tanque de vácuo à caixa separadora.	1
Caixa Separadora	Separar a fase livre do efluente.	1
Torre de Stripping	Aerar o efluente e eliminar os compostos voláteis.	1
Compressor	Injeção de ar no aquífero.	1
Bomba de Recirculação	Recircular o efluente na torre de stripping.	1

Fonte: SERVIMAR/2004

O sistema de remediação por MPE/AS utilizado não gerou fase dissolvida, pois já contempla o tratamento e reinjeção da mesma. Com relação a fase livre orgânica (combustível) que eventualmente apareceu e foi captada pelo sistema, esta foi destinada ao tambor de 200 litros.

O resíduo sólido gerado (solo) que não estava contaminado foi destinado a aterro, e o contaminado foi devolvido a cava de origem, pois é importante salientar que a ação do sistema de remediação implantado fez secundariamente o tratamento de fases adsorvidas ao solo. Isso foi importante, pois reduziu a necessidade de adoção de processos de co-processamento ou incineração de material.

Juntamente com a fase de implantação do sistema de remediação, foi realizada uma amostragem inicial de água subterrânea. Onde foram coletadas 15 amostras de água para os parâmetros BTEX e PAH, além da análise de parâmetros físico-químicos *in situ* e 3 amostras de águas para os parâmetros de nutrientes e microbiológico.

Após o *start up* foi realizado monitoramento analítico mensal, onde foram coletadas 2 amostras de água, sendo uma na saída da caixa separadora e a outra na saída de torre de *stripping* para os parâmetros BTEX e PAH. Trimensalmente foram coletadas amostras para a averiguação da redução de massa de contaminantes no aquífero. Em cada campanha, foram coletadas 10 amostras de águas, onde foram analisados os parâmetros de BTEX e PAH e 3 amostras de água para os parâmetros de nutrientes e microbiológicos. Ao término da remediação foi realizado o monitoramento final, onde foram coletadas 15 amostras de água e 3 amostras de água para parâmetros de nutrientes e microbiológico.

O Quadro 4 apresenta as campanhas que foram realizadas durante a operação do sistema de remediação.

Quadro 4 - Campanhas de amostragem de água subterrânea

Campanhas	Águas Subterrâneas	Parâmetros
Inicial	15 amostras	BTEX e PAH
		Físico Químico
	03 amostras	Nutrientes e Microbiológicos
Mensal	02 amostras	BTEX e PAH
Trimestral	10 amostras	BTEX, PAH e Físico - Químico
	03 amostras	Nutrientes e Microbiológicos
Final	15 amostras	BTEX e PAH
	-	Físico - Químico
	03 amostras	Nutrientes e Microbiológicos

Fonte: Servmar/2004

As rotinas operacionais desempenhadas pela SERVIMAR consistiram em: Visitas quinzenais nos três meses iniciais; Medições físico-químicas de parâmetros de interesse ao processo e Manutenção preventiva e corretiva do sistema de remediação. Foi necessário um prazo de 18 meses de operação para que fosse removida a fase livre.

Ao final da implantação foi emitido o relatório técnico de implantação do sistema de remediação, operação e monitoramento. Após cada campanha mensal e trimestral do monitoramento analítico foi emitido um relatório técnico de avaliação do sistema, e ao final da remediação foi emitido, também, o relatório técnico de conclusão.

As informações obtidas ao longo do processo de monitoramento da remediação possibilitaram: o processo de acompanhamento da eficiência das atividades de remediação ambiental, fato que possibilitou propor adequações e melhorias inerentes à aplicação de técnicas ativas de adequação da qualidade ambiental de solos e águas subterrâneas; a verificação da remoção dos contaminantes; a constatação que os receptores foram, adequadamente, protegidos e a demonstração de que a pluma de contaminação regrediu.

O prazo para implantação do sistema de remediação foi de 90 dias e para a operação do sistema o prazo foi de 18 meses. A redução dos parâmetros BTEX/PAH a níveis compatíveis com a análise de risco feita para este *site* (RBCA – TIER 2 - RELATÓRIO SERVIMAR – MA/325/01/SAP) foi a base do cronograma proposto, sendo que este pode ser alterado, aumentando seu prazo de execução quando solicitado pelos órgãos ambientais competentes a utilização de diferentes ‘*targets*’ como Portaria 1469 e CONAMA 20/86 – Artigo 21, dado o caráter mais restritivo de valores dos mesmos.

Os custos relacionados à implantação da remediação estão especificados a seguir, e totalizaram R\$ 81.231,00 (março de 2004): Operação do sistema: R\$ 19.697,00; Campanha de amostragem das águas (trimestral): R\$ 10.992,00; Campanha de amostragem (inicial e final): R\$ 14.267,00; Instalação dos poços: R\$ 13.770,00 e Obras civis: R\$ 22.500,00.

4.2 - Remediação - Posto Braz de Aguiar

Em fevereiro de 2003 a Texaco Brasil Ltda solicitou a BfU do Brasil Serviços Ambientais Ltda. o desenvolvimento dos serviços de Investigação Ambiental e Análise de Risco Tier 1 na área do Posto Braz de Aguiar Ltda, localizado em Belém – PA.

Em dezembro de 2003 foi realizada pela BfU uma campanha de monitoramento hidroquímico, tendo sido detectada a presença de fase livre de gasolina nos poços PM 1 e PM 2, localizados na antiga área de abastecimento e a jusante desta (próximo à residências). Verificou-se também a presença de Xilenos e PAH (Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos) dissolvidos na água subterrânea.

Em fevereiro de 2004, a Texaco solicitou a BfU a elaboração de um projeto de remediação da fase livre para a área do referido Posto.

No período de 20/08/04 a 05/09/04 a BfU realizou uma investigação ambiental complementar na área do Posto, com instalação de quatro poços de monitoramento (PM 4, PM 5, PM 6 e PM 7), para identificação da abrangência da pluma de fase livre. Através desta investigação detectou-se a presença de fase livre de gasolina no poço de monitoramento PM 5, além dos poços PM 1 e PM 2 (identificada anteriormente).

Para remover a contaminação existente no *site*, em 04/09/04 entrou em operação na área um sistema de remediação do tipo Multifase com um sistema de poços de bombeamento.

Para a implementação do sistema a BfU instalou um poço de bombeamento (PB 1) e adaptou os poços de monitoramento pré-existent para poços de bombeamento (PM 1/ PB3, PM 2/ PB2, PM 5/ PB4). *Vide* área do posto com localização do sistema de remediação e poços de monitoramento na Figura 4.

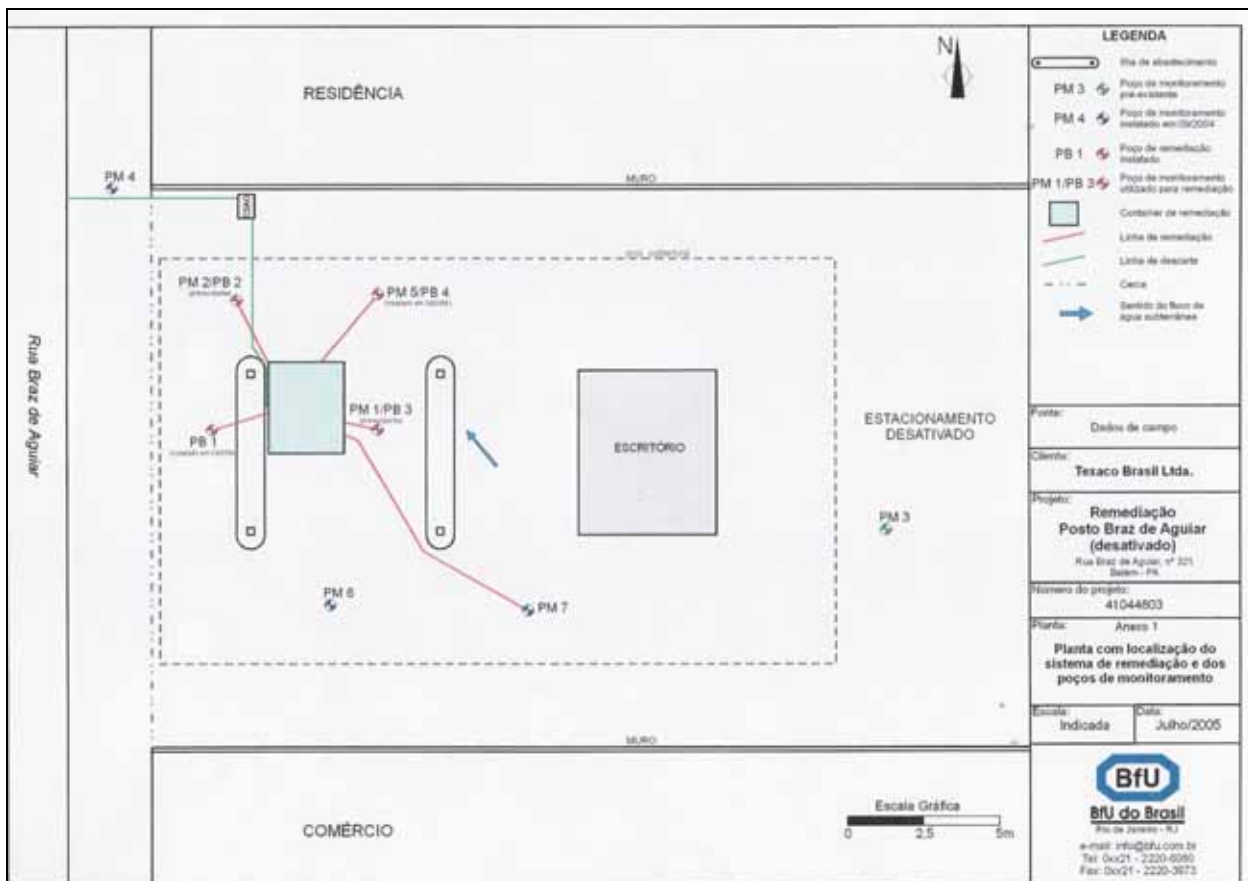


Figura 4 - Localização do sistema de remediação e dos poços de monitoramento

Fonte: BfU do BRASIL (2005)

Em dezembro de 2004 foi observada a presença de película do produto no poço de monitoramento PM 6 e presença de fase livre com espessura de 1,5 cm no poço PM 7. Para auxiliar o processo de remediação, o poço PM 6 foi drenado constantemente e no poço PM 7 foi instalada uma bomba para seu bombeamento contínuo, com o objetivo de eliminar o produto.

Para remover a contaminação existente na água subterrânea e atingir os níveis-alvo (RBSL) estabelecidos na área do Posto Braz de Aguiar, entrou em operação no dia 04/09/04 um sistema de remediação do tipo Multifase, instalado pela BfU, que consistiu no bombeamento da água subterrânea juntamente com o produto em fase livre, fase dissolvida e a extração de vapores do solo, através de quatro poços de bombeamento (PB 1 a PB 4) com um raio de influência adequado para formar uma barreira hidráulica e garantir a captação e o controle da pluma de contaminante.

O Sistema de Extração de Vapores (SEV) entrou em operação em 04/09/04 e foi desligado no dia 06/07/05. Durante aproximadamente 10 meses o sistema de remediação funcionou na área do Posto para a eliminação de voláteis, fase livre e fase dissolvida, alcançando os níveis-alvo (RBSL), calculados através da análise de risco. O sistema de remediação foi desligado em 06/07/05.

Durante seu período de funcionamento o sistema de remediação recuperou 221 litros de produto sob a forma de fase livre. O desempenho do sistema de remediação de água pode ser observado através do gráfico da Figura 5.

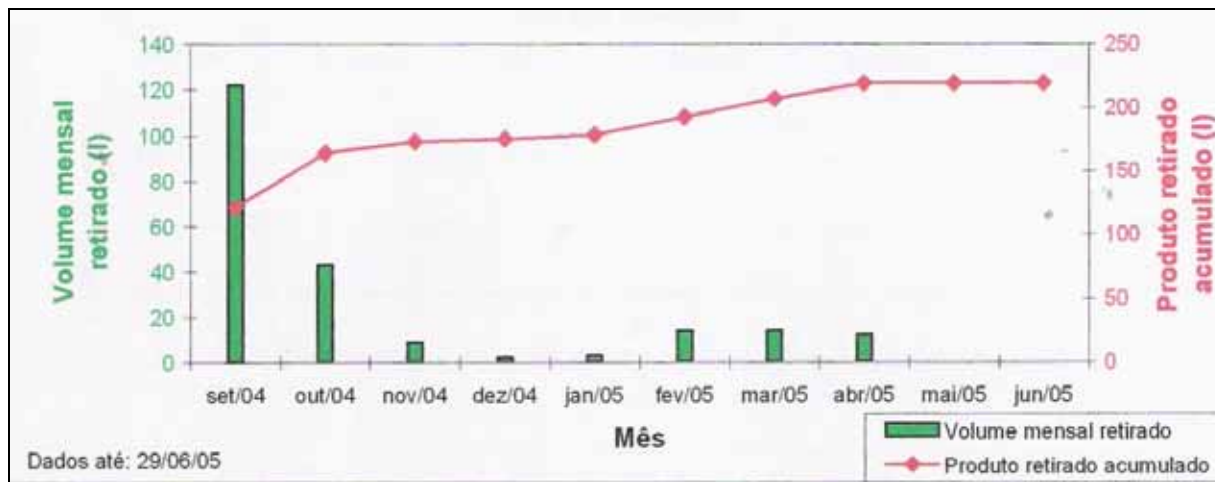


Figura 5 - Desempenho do sistema de remediação. Fonte: BfU do BRASIL (2005)

De acordo com o acompanhamento do funcionamento do sistema de extração de vapores, o valor de LIE (Limite Inferior de Explosividade) atingiu concentração máxima de 8 % em setembro de 2004. A partir de junho de 2005 esta concentração atingiu valor nulo e o sistema foi desligado no dia 06/07/05. A massa de compostos orgânicos voláteis (VOCs) retirada durante todo o período de funcionamento do sistema foi de 492 kg, aproximadamente.

Para o acompanhamento do processo de remediação foram utilizados os poços de monitoramento PM 3, PM 4, PM 6 e PM 7. Semanalmente foi realizado o monitoramento do funcionamento do sistema, através da verificação dos equipamentos e medições do comportamento da água subterrânea (nível d'água e espessura de fase livre nos poços de monitoramento).

Conforme previsto no projeto de remediação, a água subterrânea foi coletada três vezes durante o andamento da remediação, para a avaliação das concentrações de BTEX e PAH. Em 27/06/05 foi realizada a última amostragem visando a verificação do alcance das metas de remediação estabelecidas para o local. Todas as análises foram realizadas por Laboratório Görtler Analytical Services GmbH, na Alemanha.

De acordo com os resultados analíticos desta última campanha de amostragem, foram detectadas concentrações de compostos BTEX e de alguns compostos do grupo PAH nas amostragens de águas subterrâneas avaliadas. Entretanto, as concentrações identificadas encontram-se abaixo dos níveis – alvo (RBSL) calculados através de análise de risco. Cabe ressaltar que estes níveis – alvos constituem os limites de concentrações calculados para a eliminação do risco no *site*.

Os resultados analíticos obtidos através das análises da água subterrânea em conjunto com os dados do monitoramento da remediação comprovam que as medidas propostas pela BfU para remediar a área do Posto Braz de Aguiar foram eficientes no que diz respeito à contaminação prévia

para qual foram projetadas. As metas de remediação estabelecidas (remoção de fase livre e alcance dos RBSL) para a água subterrânea na área do Posto foram alcançadas e a remediação concluída.

5 – CONCLUSÕES

Algumas conclusões podem ser retiradas deste trabalho, dentre as mais importantes, têm-se as seguintes:

Existem diversas tecnologias disponíveis de remediação de água subterrânea, porém a tecnologia utilizada dependerá das características do aquífero, assim como dos contaminantes. Os estudos de casos dos dois postos estudados serviram para mostrar a possibilidade de remediação, com a utilização de dados de remediação de casos reais no Brasil.

O Brasil ainda está em um patamar inferior aos países desenvolvidos (primeiro mundo), vários fatores possibilitam a dificuldade de crescimento nessa área, como: alto custo dos processos de remediação; falta de conscientização, tanto por parte de empresários como por parte de governantes; além da falta de conhecimento e acesso às tecnologias, uma vez que não há um aprofundamento sobre o referido assunto na maioria das universidades do país, também não havendo muita literatura disponível no país.

Espera-se que, em breve, tenha-se um maior investimento do governo nesta área, além da criação de leis mais rígidas, de maneira que diminua o risco de contaminação de aquíferos, pois estes constituem umas das fontes de recursos hídricos mais importantes para a humanidade.

BIBLIOGRAFIA

- ASTM. (1995) Standard Guide for Risk-Based *Corrective Action Applied Petroleum*. Releas Sites.
- BECHARA. G. (2004) *Contaminação do solo e água subterrânea por compostos orgânicos*. Cetrel Lumina. Soluções Ambientais. Disponível em < <http://www.iq.usp.br>>. Acesso em: 13 nov. 2006.
- BfU (2005) BfU do Brasil Serviços Ambientais. Consultoria Ambiental – Investigação – Monitoramento – Remediação. Relatório Final. *Remediação na área do “Posto Braz de Aguiar Ltda”*. Belém – Pará.
- BRASIL. Ministério da saúde (2000) *Portaria n° 1.469 de 29 de dezembro de 2000*. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (2003) *Decênio Internacional para Ação Água, fonte de vida*. Disponível em <<http://www.ana.gov.br/Destaque253.asp>> Acesso em: 13/11/06.
- BORGUETTI, N.R.B; BORGUETTI, J.R.B E FILHO, E.F.R. (2004). *O Aquífero Guarani*, Curitiba, p.214.

- CETESB (1999). *Procedimentos a serem Adotados pela CETESB em Episódios Envolvendo Contaminações por Combustíveis decorrentes de Vazamentos em Postos de Serviço e outros Empreendimentos que utilizam Sistema de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis. Procedimento Interno*, São Paulo. 32 p.
- CETESB (2001) Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Índice e Padrões de Qualidade*, disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br>, acessada em abril de 2005.
- CORSEUIL, H.X (1992) *Enhanced Degradation of Monoaromatic Hydrocarbons in Sandy Aquifer Materials by Inoculation Using Biologically Active Carbon Reactors*. PhD dissertation, Ann Arbor, MI, EUA.
- EPA, U.S (1991) Environmental Protection Agency. *Site Characterization for Subsurface Remediation*. EPA/625/4-91/026, nov.
- FEENSTRAN, S.; MACKEY, D.M.; CHERRY, J.A (1991) – *A Method for Assessing Residual NAPL Based on Organic Chemical Concentrations in Soil Samples*. Groundwater Monitoring Review. v 11(2) : 128-136.
- FERNANDES, M. (1997) *Influência do etanol na solubilidade de hidrocarbonetos monoaromáticos em aquíferos contaminados com gasolina*. Dissertação (Mestrado)
- FERREIRA, S.B. (2000) *Estudos laboratoriais para avaliação do potencial de contaminação de água e de solo por gasolina oxigenada*. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- FETTER, C.W. Jr. (1994) *Applied Hydrogeology*. 3rd Edition. Macmillan Publishing Co., New York, New York, 691 pp.
- FURTADO, M. (2005) *Remediação de Solos. Para afastar o perigo que se esconde nos subterrâneos das grandes cidades, meios legais e econômicos devem fomentar obras de descontaminação*. Química e Derivados, p.26-45.
- HULING, S.G. and J.W. WEAVER. (1991) *Dense Nonaqueous Phase Liquids*. Ground Water Issue Paper, EPA/540/4-91-002. Office of Research and Development, Washington, D.C. 20460
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Indicadores. Disponível em < <http://www.ibge.gov.br> > Acesso em: 17/12/2006.
- LAGREGA ET AL., M.D.; BUCKINGHAM, P.L.; EVANS, J.C (1994) – *Hazardous waste management*. McGraw-Hill, Inc. USA. 1.146 p.
- MILLER, A.D. (2001) *Remediação de fase livre de gasolina por bombeamento duplo: estudo de caso*. 2001. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

- NICOLETTI, A. (2000). *Avaliação do uso da atenuação natural como alternativa de remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos de petróleo: o caso de dois postos de abastecimento de combustíveis*. Monografia de formatura - Instituto de Geociência, São Paulo.
- NOBRE et al. (2003) “*Remediação de Solos*”, Revista Química e Derivados, disponível em <http://www.quimicaederivados.htm> acessada em dezembro de 2006.
- NOBRE M. M. E NOBRE, C.M. (2005). *Remediação de Solos*. Técnicas alternativas melhoram desempenho. Química e Derivados, nº 417.
- OLIVEIRA, E. (1992) *Contaminação de aquíferos por hidrocarbonetos provenientes de vazamento subterrâneo*. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SERVMAR (2004) *Plano de Remediação Ambiental Senador Lemos*. Servamar Inst. e Assessoria Ambiental Ltda.
- SRACEK, O; ALEIDA, R. M.R. (2001). *Atenuação natural de compostos orgânicos*. Saneamento Ambiental, nº 79, P.29-37.
- TECNOHIDRO (2001) Tecnohidro Projetos Ambientais. *Plano de Gerenciamentos Ambiental*. São Paulo.
- TIBURTIUS, E. R. L.; ZAMORA, P. P.; LEAL, E. S. (2004) *Contaminação de águas por BTXs e processos utilizados na remediação de sítios contaminados*. Química Nova, 27, nº3, p.441-446.