

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM GESTÃO AMBIENTAL

EDSON SANTOS

HELIO CESAR NASCIMENTO UNGARI

MATILDE BARGA DOS SANTOS

PRINCIPAIS TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO E GERENCIAMENTO
DE ÁREAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS NO
ESTADO DE SÃO PAULO

CAMPINAS - SP

2008

EDSON SANTOS

HELIO CESAR NASCIMENTO UNGARI

MATILDE BARGA DOS SANTOS

**PRINCIPAIS TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO E GERENCIAMENTO
DE ÁREAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS NO
ESTADO DE SÃO PAULO**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização de Gestão Ambiental da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP e Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB, como requisito parcial para obtenção do título de especialista em gestão ambiental.

CAMPINAS - SP

2008

RESUMO

A Resolução CONAMA 273, publicada em 08.01.2001, estabeleceu a obrigatoriedade do licenciamento ambiental para postos revendedores, postos de abastecimento, instalações de sistemas retalhistas e postos flutuantes de combustíveis. Segundo essa Resolução, a localização, a construção, a instalação, as modificações, as ampliações e a operação desses estabelecimentos dependerão do prévio licenciamento ambiental por parte do órgão ambiental competente, a ser conduzido por meio das seguintes licenças ambientais: licença prévia, licença de instalação e licença de operação/funcionamento, para cuja emissão define exigências mínimas necessárias.

No Estado de São Paulo, o órgão ambiental Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB contemplou no licenciamento dos postos e sistemas retalhistas de combustíveis a investigação de passivo ambiental. A Agência Ambiental Paulista vem aperfeiçoando o procedimento para gerenciamento de áreas contaminadas, com o objetivo de agilizar a implementação das medidas de intervenção. Atualmente, os procedimentos foram consolidados pela Diretoria da CETESB por meio da Decisão de Diretoria 103/C/E. (CETESB, 2008a)

Tendo em vista o problema de áreas contaminadas por hidrocarbonetos, este trabalho visa descrever algumas técnicas de remediação e apresentar os principais sistemas utilizados para remediação no Estado de São Paulo, que conforme dados da CETESB são: o bombeamento e tratamento, a recuperação de fase livre e extração multifásica para o tratamento das águas subterrâneas e a extração de vapores e a remoção de solo/resíduo para os solos.

Um instrumento de gestão ambiental utilizado na definição da escolha de um sistema de remediação é a Avaliação de Risco a Saúde Humana, o qual, além de possibilitar o conhecimento dos níveis riscos ou dos índices de perigo a que um receptor, ou grupo de receptores, estaria sujeito, permitindo assim a tomada de decisão quanto a necessidade de intervenção na área de estudo, possibilita também a definição das concentrações dos compostos químicos de interesse no meio físico, que garantam índices de perigo ou níveis de risco à saúde humana aceitáveis, caso ocorra uma situação de exposição de um indivíduo ou uma população. Estas concentrações aceitáveis são chamadas Metas de Remediação com Base em Risco - MRBR.

Em função das técnicas mais utilizadas para remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos, conforme os dados existentes na CETESB, o trabalho apresenta dois casos reais de remediação que utilizaram a técnica de extração multifásica e extração de vapores.

O presente trabalho visa, também, destacar a gestão proativa da CETESB de promover agilidade ao processo de licenciamento ambiental dos postos e sistemas retalhistas de combustíveis, em consenso com as sugestões apresentadas pela Câmara Ambiental do Comércio de Derivados de Petróleo, fórum que congrega técnicos da CETESB e representantes do setor de combustíveis, da indústria de equipamentos e das empresas de consultoria ambiental, que vem modificando e aprimorando a gestão e a implementação de sistemas de remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos.

PALAVRAS-CHAVES:

Áreas contaminadas, tecnologias de remediação, hidrocarbonetos, postos de combustíveis, gerenciamento de áreas contaminadas.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Área contaminada
ACBR	Ações Corretivas Baseadas em Risco
AI	Área contaminada sob Investigação
AMR	Área em Processo de Monitoramento para Reabilitação
ANM	Atenuação Natural Monitorada
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AP	Área com Potencial de Contaminação
AR	Área Reabilitada para o Uso Declarado
AS	Área suspeita de contaminação
ART	Anotação de Responsabilidade Técnica
BRPs	Barreiras Reativas Permeáveis
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno
C	Carbono
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DNAPL	<i>Dense Nonaqueous Phase Liquids</i> ou líquidos não solúveis mais densos que a água
E	Exclusão
Eh	<i>Potencial Redox</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>

EUGRIS	<i>European Groundwater and Contaminated Land Information System</i>
FL	Fase Livre
FRTR	<i>Federal Remediation Technologies Roundtable</i>
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
H	Hidrogênio
H ₂ S	Gás Sulfídrico
HDP	Hidrocarboneto de Petróleo
LNAPL	<i>Light Nonaqueous Phase Liquids</i> ou fase líquida imiscível
MCE	Medidas de Controle de Engenharia
MCI	Medidas de controle institucional
MPE	Extração Multifásica
MRBR	Metas de Remediação com Base em Risco
N	Nitrogênio
NA	Nível d'água
NABR	Níveis Aceitáveis Baseados em Risco
NAPL	Nonaqueous Phase Liquids
O ₂	Oxigênio
OD	Oxigênio Dissolvido
PAHs	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
pH	Potencial de Hidrogênio
PL 368	Projeto de Lei
PLAs	Padrões Legais Aplicáveis
POA	Processos Oxidativos Avançados
ppm	Parte por milhão
R _f D	Doses de referência

RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
S	Enxofre
SAO	Separadora de Água e Óleo
SASC	Sistema de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis
SF	Fatores de carcinogenicidade
SMA	Secretaria de Estado do Meio Ambiente
SSTLs	<i>Specific Site Target Levels</i>
SVE	Sistema de Extração de Vapores no Solo
TAC	Termo de ajustamento de Conduta
TPH	<i>Total Petroleum Hydrocarbon</i> ou Hidrocarbonetos Totais de Petróleo
VI	Valor de Intervenção
VOC	Compostos Orgânicos Voláteis
VP	Valor de Prevenção
VRQ	Valores de Referência de Qualidade

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Áreas contaminadas por atividade no Estado de São Paulo	15
Figura 2	Grupo de contaminantes no Estado de São Paulo	16
Figura 3	Situação dos sistemas de remediação no Estado de São Paulo	18
Figura 4	Situação dos sistemas de remediação dos postos de gasolina no Estado de São Paulo	19
Figura 5	Procedimento para gerenciamento de áreas contaminadas relacionadas a postos e sistemas retalhistas de combustíveis	31
Figura 6	Fluxograma de decisão quanto à tecnologia de remediação a ser escolhida	36
Figura 7	Sistemas de remediação implantados no Estado de São Paulo	53
Figura 8	Custos do processo de remediação em função da avaliação do risco	68
Figura 9	Caso 1 - Croqui de localização das linhas de bombeamento e extração de vapores e lay out	81
Figura 10	Caso 1 - Fluxograma do sistema de remediação implantado (MPE)	83
Figura 11	Caso 2 - Croqui de localização dos poços e do sistema de remediação instalado	94
Figura 12	Caso 2 - Potenciometria local (abril/2006)	98
Figura 13	Caso 2 - Potenciometria local (junho/2006)	99
Figura 14	Caso 2 - Pluma de fase livre e fase dissolvida de benzeno (janeiro/2005)	106
Figura 15	Caso 2 - Pluma de fase livre e fase dissolvida de benzeno (julho/2005)	107
Figura 16	Caso 2 - Pluma de fase livre e fase dissolvida de benzeno (janeiro/2006)	108
Figura 17	Caso 2 - Pluma de fase livre e fase dissolvida de benzeno (2006)	109

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Caso 1 - Evolução dos níveis da água nos poços de monitoramento	84
Gráfico 2	Caso 1 - Evolução das espessuras de fase livre nos poços de monitoramento e extração	85
Gráfico 3	Caso 1 - Concentrações de VOC nos poços de monitoramento e extração	86
Gráfico 4	Caso 1 - Concentrações de benzeno na água dos poços de monitoramento	87
Gráfico 5	Caso 1 - Evolução dos níveis de água nos poços de monitoramento e extração	88
Gráfico 6	Caso 1 - Concentração de VOC nos poços de monitoramento e extração	89
Gráfico 7	Caso 1 - Evolução das concentrações de benzeno nos poços de monitoramento	90
Gráfico 8	Caso 2 - Variação do nível d'água médio e precipitação acumulada mensal	96
Gráfico 9	Caso 2 - Variação Média de VOC	100
Gráfico 10	Caso 2 - Variação Média de O ₂ e CO ₂	101
Gráfico 11	Caso 2 - Variação Média de OD, Eh e Condutividade Elétrica	103
Gráfico 12	Caso 2 - Variação de OD	112
Gráfico 13	Caso 2 - Variação da Condutividade Elétrica	113
Gráfico 14	Caso 2 - Variação do Eh	114
Gráfico 15	Caso 2 - Variação de VOC	114
Gráfico 16	Caso 2 - Variação de O ₂	115
Gráfico 17	Caso 2 - Variação de CO ₂	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Áreas contaminadas por região no Estado de São Paulo	17
Tabela 2	Vantagens e desvantagens das Biopilhas	65
Tabela 3	Custos de tecnologias para remediação de áreas contaminadas	70
Tabela 4	Caso 2 - Resultados das medidas dos parâmetros físico-químicos na água subterrânea	102
Tabela 5	Caso 2 - Resultados geoquímicos e microbiológicos da água subterrânea	111
Tabela 6	Caso 2 - Resultados analíticos do sistema de remediação	116

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo	14
1.2	Justificativa	14
1.3	Metodologia	20
2.	CONCEITOS E DEFINIÇÕES	21
2.1	Hidrocarboneto	23
2.2	Degradação	24
2.3	Impacto ambiental	25
2.4	Remediação	26
2.5	Áreas contaminadas	27
3.	REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS	29
3.1	Procedimento	29
4.	METODOLOGIAS QUE PRECEDEM A REMEDIAÇÃO	34
5.	AVALIAÇÃO DE RISCO E ESTABELECIMENTO DE METAS DE REMEDIAÇÃO BASEADAS EM RISCO	39
5.1	Valores de concentração nos pontos de exposição	40
5.2	Estimativa do risco	41
5.3	Metas de remediação baseadas em risco	42
5.4	Exigências técnicas ou quesitos a serem atendidos	45
6.	TECNOLOGIAS EMPREGADAS NA REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS COM HIDROCARBONETOS	51
6.1	Barreira hidráulica	54
6.2	Biorremediação	55
6.3	Escavação, remoção e destinação do solo	56
6.4	Bombeamento e tratamento	56
6.5	Extração multi-fásica	57
6.6	Extração de vapores no solo	59
6.7	Injeção de ar (<i>Air Sparing</i>)	61
6.8	Barreiras reativas permeáveis	62
6.9	Estabilização	62

		10
6.10	Tecnologias térmicas (<i>Thermal Enhance</i>)	62
6.11	Oxidação química	63
6.12	Atenuação natural monitorada	63
6.13	Biopilhas	64
7.	CUSTOS PARA REMEDIAÇÃO	67
8.	INSTRUMENTOS DE GESTÃO DA CETESB PARA O LICENCIAMENTO DE POSTOS DE COMBUSTÍVEIS	71
9.	ESTUDO DE CASOS	78
9.1	Estudo de caso 1 - Auto Posto Eliane Ltda	78
9.1.1	Informações e histórico	79
9.1.2	Descrição e operação do sistema de remediação	80
9.1.3	Resultados da remediação ambiental	84
9.1.4	Monitoramento após o encerramento das operações de remediação	87
9.1.5	Comparação dos resultados analíticos	89
9.1.6	Comentários	90
9.2	Estudo de caso 2 - Luchini Auto Posto Ltda	91
9.2.1	Informações e histórico	92
9.2.2	Monitoramento	95
9.2.2.1	Monitoramento do nível d'água e presença de fase livre	95
9.2.2.2	Potenciometria	97
9.2.2.3	Monitoramento do VOC, O ₂ , CO ₂ , H ₂ S e Pressão	100
9.2.2.4	Monitoramento dos parâmetros físico-químicos	102
9.2.2.5	Amostragem e análises laboratoriais da água subterrânea	103
9.2.2.5.1	Parâmetros químicos	104
9.2.2.5.2	Parâmetros geoquímicos e microbiológicos	110
9.2.3	Monitoramento do sistema MPE	112
9.2.3.1	Amostragem e análises químicas do sistema de remediação	116
9.2.4	Comentários	117
10.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
11.	REFERÊNCIAS	121

1. INTRODUÇÃO

Desde que se configurou a Revolução Industrial, os problemas ambientais passaram a se agravar com maior intensidade, refletindo a industrialização decorrente deste processo.

O estímulo permanente ao consumo, base do sistema capitalista foi, e continua sendo altamente impactante para o meio ambiente e à sociedade como um todo. Mas, o que se propõe hoje é a busca por um novo desenvolvimento ecologicamente sustentável, objetivando menos danos ao meio físico.

Tal desafio tornou-se urgente, com a ocorrência de desastres ambientais, constatados a partir da década de 30, quando as questões que afetam sobremaneira o meio natural, foi mundialmente e efetivamente colocada em destaque, ao mesmo tempo em que se iniciaram algumas discussões internacionais, sobre a problemática decorrente, numa tentativa de entender o que estava acontecendo e ao mesmo tempo, buscar soluções e ações mais concretas.

Em meados do século XIX, a necessidade de combustível para iluminação (querosene) levou ao desenvolvimento da indústria do petróleo e na segunda metade do século o crescimento do transporte motorizado fez com que a demanda de combustível crescesse muito rapidamente.

A década de 30 (trinta) foi o marco inicial do crescimento da indústria do petróleo, período em que houve a descoberta de novos campos, aperfeiçoamento das explorações submarinas, inauguração dos terminais de carga e descarga de petróleo e derivados, e, conseqüentemente, liberação veloz do petróleo e seus derivados ao meio ambiente.

O petróleo fornece grande parte da energia mundial utilizada no transporte e é a principal fonte de energia para muitas outras finalidades. O petróleo tornou-se fonte de inúmeros de produtos petroquímicos, como combustíveis, óleos e massas lubrificantes, asfaltos, tintas até plásticos.

Este setor apresenta muitas vantagens sócio-econômicas, no entanto oferece grande risco ambiental, dessa forma todas as atividades relacionadas a esta área são alvo de grandes preocupações.

Muitos acidentes ocorrem em alguma etapa da produção da indústria petroleira, que levam à contaminação do solo por hidrocarbonetos, atingindo rios, oceanos e águas subterrâneas. Os derrames acontecem por meio do transporte por dutos, ferrovias, marítimo, fluvial e rodoviário, como também em etapas de extração e refino. Existe ainda a contaminação causada por vazamento nos postos de combustíveis que contaminam o solo e a água subterrânea e neste contexto, é o enfoque principal deste trabalho.

No Brasil, como acontece em diversos outros países, compostos como etanol, álcool etílico e metil tetra-butil-éter são adicionados aos combustíveis derivados do petróleo, com a finalidade de diminuir a emissão de monóxido de carbono. Mas, tal composição gera um efeito co-solvente, que provoca o aumento da concentração dos hidrocarbonetos, em casos de vazamento. (FERREIRA, 2000)

Os hidrocarbonetos, quando liberados no ambiente, têm sua composição alterada por causa da biodegradação, a dissolução em água e a volatilização, devendo-se levar em consideração o impacto do tempo destes derivados. Em geral, a mistura torna-se menos solúvel em água e menos volátil com o tempo, pois mudam, em função da taxa pela qual os componentes mais solúveis e voláteis lixiviam e evaporam do solo. (POTTER E SIMMONS, 1998, p. 102)

A contaminação do solo por combustíveis tem efeitos nocivos além de alterar as propriedades das áreas, impossibilitando a existência de vida e possibilitando a ocorrência de fogo e explosões. (AEHS, 1999)

O problema de contaminação de áreas por hidrocarboneto, derivado do petróleo é um grande impacto causado ao meio, sendo necessária a remediação dos locais atingidos.

A remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos depende de uma série de fatores específicos dos meios atingidos, como a extensão da contaminação, as características específicas dos meios atingidos e do próprio sistema de remediação implantado.

No entanto, a maioria dos estados brasileiros sofre com a falta de uma estrutura legal ambiental eficiente para a regulamentação de projetos que envolvem a remediação de solos e áreas contaminadas, pois não existe uma política nacional que regulamente os níveis necessários para uma remediação de área contaminada com hidrocarbonetos de petróleo ou compostos orgânicos voláteis, desencadeando conseqüências indesejáveis sobre estes projetos.

No Estado de São Paulo, o órgão ambiental Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB vem aperfeiçoando o procedimento para gerenciamento de áreas contaminadas, definido inicialmente em 2000, com o objetivo de agilizar a implementação das medidas de intervenção. Atualmente, os procedimentos foram consolidados pela Diretoria da CETESB por meio da Decisão de Diretoria 103/C/E. (CETESB, 2008a)

Os postos revendedores de combustíveis e afins passaram a ser fontes de poluição passíveis de licenciamento ambiental, com o advento da Resolução CONAMA 273, de 29.11.2000, republicada em 08.01.2001. Com a alteração introduzida pelo Decreto Estadual 47397, de 04.12.2002, que alterou dispositivos do Regulamento da Lei Estadual 997, de 31.05.1997, aprovado pelo Decreto Estadual 8468, de 08.09.1976, a obrigatoriedade de ser efetuado o licenciamento dessas atividades pela CETESB foi incorporada na legislação ambiental paulista.

Dessa forma, a concessão das licenças prévia e de instalação, pela CETESB, aos empreendimentos existentes na data da publicação das Resoluções CONAMA 273/2000 e SMA 05/2001, que após a realização da investigação de passivos ambientais identificassem a existência de contaminação a ser saneada, ficava condicionada à formalização de Termo de Ajustamento de Conduta - TAC. A celebração de tal instrumento objetivava a concessão de prazos para cumprimento das etapas para remediação da área contaminada, de forma que, o estabelecimento poderia obter as Licenças Prévia e de Instalação, em conformidade com o disposto no artigo 58 e seguintes do Regulamento da Lei Estadual 997/76, aprovado pelo Decreto Estadual 8468/76 e suas alterações. Após a obtenção das Licenças Prévia e de Instalação, o empreendimento deve solicitar a Licença de Operação.

Deve-se destacar que nas últimas décadas, a gestão ambiental passou a incorporar assuntos ecológicos e de meio ambiente no cotidiano das empresas, por exigência dos órgãos fiscalizadores, pressão da comunidade, da mídia e órgãos de preservação internacional.

A mudança de postura da sociedade foi impulsionada pela promulgação da Constituição Federal de 1988, consolidando a Lei 6938/81, que estabeleceu responsabilidade objetiva ao poluidor. Houve um grande progresso das políticas ambientais em que estados e municípios passaram a ser influenciados pela Carta Magna, pois até a década de 70, havia pouco controle do meio ambiente.

Diante desse quadro, o trabalho tem por objetivo reunir informações que possam colaborar para a solução do problema de áreas contaminadas por hidrocarboneto e como proceder a remediação destas áreas, sendo que, os avanços tecnológicos da remediação, com certeza, vão possibilitar a eficiência e o controle que reduzam níveis de degradação.

O presente e o futuro requerem medidas efetivas para orientar o gerenciamento das áreas contaminadas, portanto, destacam-se as iniciativas da CETESB com os procedimentos referentes a áreas contaminadas já validados por ações objetivas e de gestão que visam orientar o assunto em tela.

1.1. Objetivo

A finalidade deste trabalho é apresentar as técnicas existentes de remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos, proveniente dos vazamentos em postos de combustíveis, que vem sendo aplicadas no Estado de São Paulo e os benefícios da atuação da agência ambiental do estado, a CETESB na gestão ambiental destas áreas contaminadas.

Não é objeto deste trabalho eleger a melhor técnica de remediação, pois, a escolha de uma tecnologia de remediação deve-se considerar a geologia, hidrogeologia, hidrogeoquímica, características físicas e químicas dos contaminantes, aspectos regionais, como custos de energia, preço de mão-de-obra e aspectos políticos, bem como o tempo e recursos disponíveis.(STIER, 2004;LOPES *et al*, 2001)

Com o propósito de operacionalizar o licenciamento dos postos e sistemas retalhistas de combustíveis, a CETESB estabeleceu procedimentos e critérios necessários, sendo que, devido à dinâmica que envolve a questão, a agência ambiental vem alterando estes procedimentos para oferecer mais agilidade ao processo de licenciamento e remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos. O aperfeiçoamento destas alterações é objeto de comentários no presente trabalho.

1.2. Justificativa

A relevância deste trabalho se deve ao interesse pessoal dos autores em expor as tecnologias de remediação utilizadas em áreas contaminadas por hidrocarboneto. Vale ressaltar que o presente trabalho visa apresentar reflexões e resultados decorrentes dos

métodos disponíveis para a descontaminação no Brasil, principalmente no Estado de São Paulo.

O Estado de São Paulo possui 2272 áreas contaminadas de acordo com dados da CETESB (2007). A figura 01 demonstra a percentagem de áreas contaminadas por atividade no Estado de São Paulo.

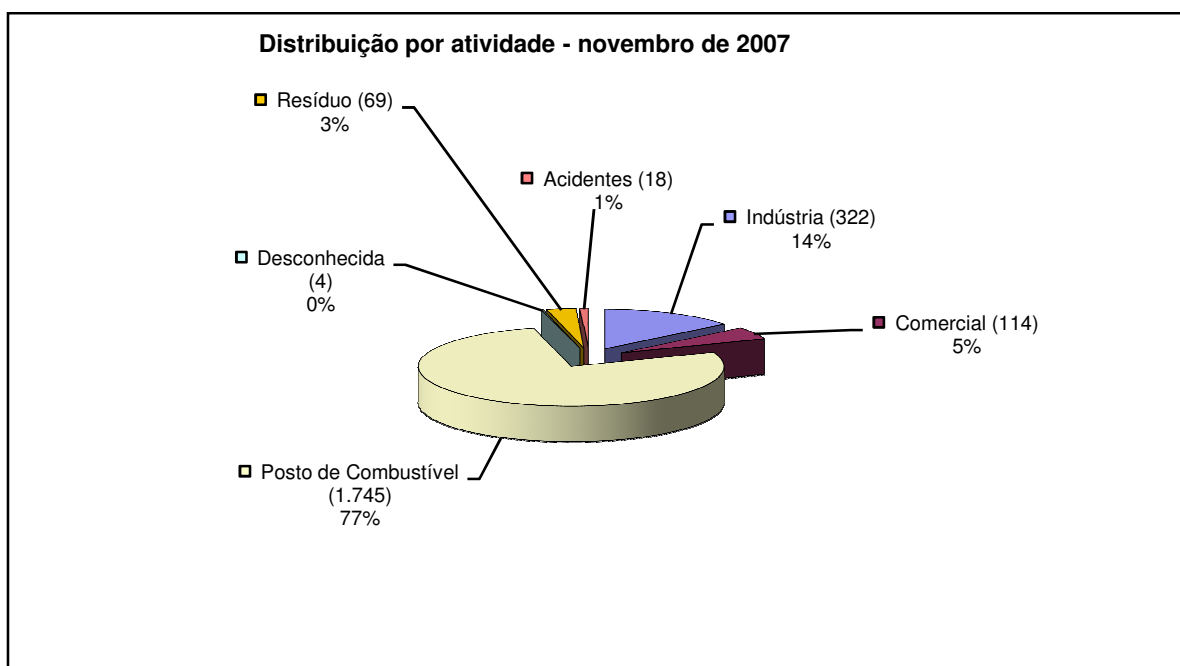


Figura 1 – Áreas contaminadas por atividade no Estado de São Paulo

Fonte: CETESB, novembro de 2007

O trabalho enfocou áreas contaminadas por hidrocarboneto de petróleo, com base nas políticas ambientais recentes.

O solo foi o destino final de muitos resíduos ao longo do tempo e as conseqüências desse comportamento desprovido de conhecimento são áreas comprometidas em função da presença potencial de substâncias perigosas, poluentes ou contaminantes.

O “Procedimento para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas”, iniciativa da CETESB, propõe-se descrever em etapas, quais os procedimentos adequados para identificar e recuperar áreas que representem risco. O procedimento descreve a investigação para remediação, cuja meta é selecionar entre as opções técnicas existentes, aquelas que são apropriadas para cada área contaminada.

No cadastro de áreas contaminadas da CETESB, a contribuição de 77 % refere-se aos postos de combustíveis e os principais grupos de contaminantes encontrados nestas

áreas foram: solventes aromáticos, combustíveis líquidos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs), metais e solventes halogenados, conforme pode ser observado na figura 2.

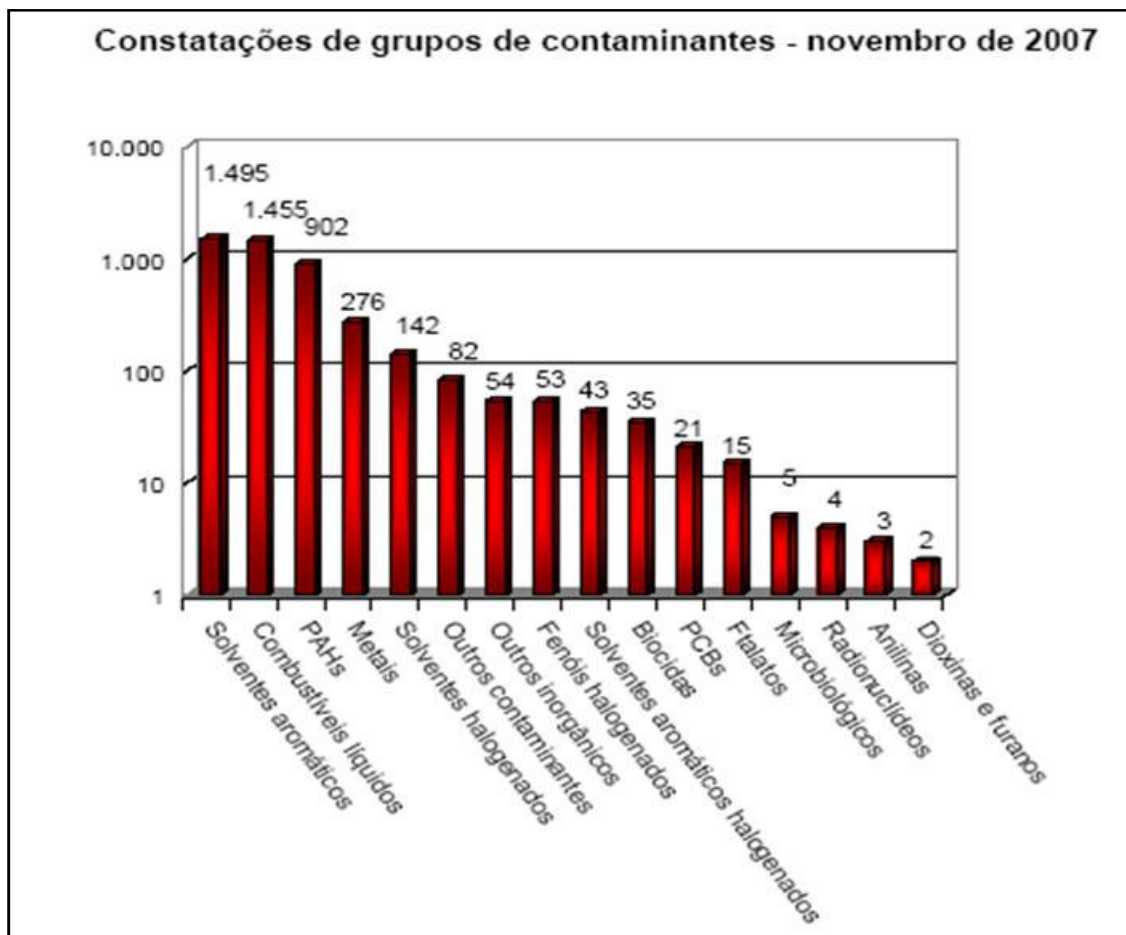


Figura 2 – Grupo de contaminantes no Estado de São Paulo

Fonte: CETESB, novembro de 2007

Este trabalho aborda a contaminação nos solos por combustíveis, o que corresponde segundo dados da CETESB (2007) a 77% das áreas contaminadas existentes no Estado de São Paulo. Complementando a figura 01, a tabela 1 ilustra a distribuição das áreas contaminadas por região do Estado de São Paulo.

Tabela 1: Áreas Contaminadas por região no Estado de São Paulo

Áreas Contaminadas no Estado de São Paulo - novembro de 2007						
Região	Atividade					Total
	Comercial	Industrial	Resíduos	Postos de combustíveis	Acidentes/ Desconhecida	
São Paulo	32	66	22	621	2	743
RMSP - outros	17	87	12	322	4	442
Interior	49	110	23	591	13	786
Litoral	14	32	12	93	2	153
Vale do Paraíba	2	27	0	118	1	148
Total	114	322	69	1.745	22	2.272

Fonte: CETESB, novembro de 2007

NOTA: Para a distribuição das áreas contaminadas, foram consideradas as seguintes regiões:

- a) São Paulo: Capital do Estado;
- b) RMSP - outros: 38 municípios da Região Metropolitana de São Paulo, excluindo-se a Capital;
- c) Litoral: municípios do Litoral Sul, Baixada Santista, Litoral Norte e Vale do Ribeira;
- d) Vale do Paraíba: municípios do Vale do Paraíba e da Mantiqueira;
- e) Interior: Os municípios não relacionados anteriormente.

Em decorrência das proporções atingidas pelas áreas contaminadas, considerou-se de suma importância elucidar questões práticas da remediação e sobre os questionamentos abrangentes, para os possíveis investimentos.

A CETESB foi pioneira no Brasil na busca de soluções para problemas ambientais e a propor sistemáticas para o gerenciamento de remediações em áreas contaminadas.

A contaminação ocorre em diversas atividades industriais, na etapa do processamento das matérias primas e disposição dos efluentes e resíduos gerados, os quais contêm altas concentrações de poluentes. Face a grande diversidade de atividades, existe muita dificuldade em estimar a carga poluidora de forma simples e confiável.

A necessidade de encontrar soluções fáceis para os projetos de remediação é diretamente proporcional aos riscos. Após a fase de identificação da área contaminada, os projetos de remediação demonstram a necessidade de viabilizar mecanismos legais e econômicos. O alto investimento para realizar a descontaminação requer que os resultados sejam efetivos, essa visão se aplica a todas as partes interessadas, de especialistas do setor, à indústria, ao Poder Público e à sociedade civil. A discussão acontece não apenas em

razão dos altos custos das obras de remediação, mas principalmente porque as contaminações, em regiões urbanas muitas vezes estão sob os pés da população, seja em áreas comerciais, em condomínios residenciais, postos de combustíveis, representando dessa forma um risco iminente à saúde e à integridade da população.

A solução dos problemas causados pelas áreas contaminadas é um desafio para toda a sociedade e conforme as informações da CETESB (2007), no Estado de São Paulo das 2272 áreas contaminadas cadastradas, 1124 encontram-se com proposta de remediação ou remediação em andamento ou remediação concluída, sendo que esta situação é ilustrada na figura 3.

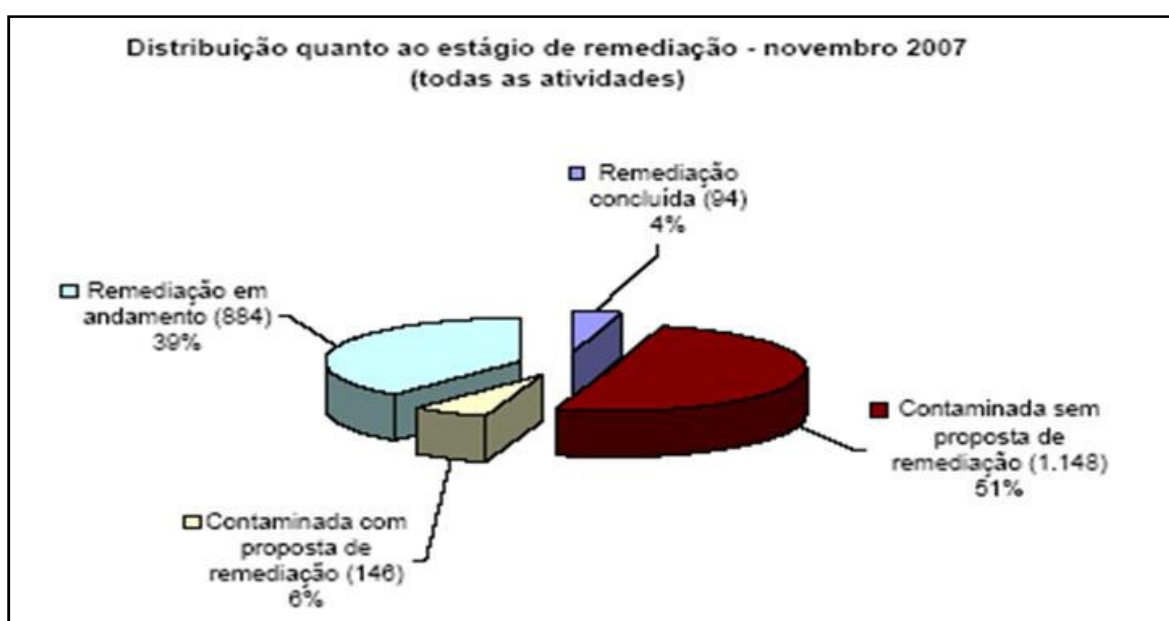


Figura 3 – Situação dos sistemas de remediação no Estado de São Paulo

Fonte: CETESB, novembro de 2007

No Estado de São Paulo, das 1745 áreas contaminadas referentes à atividade dos postos de combustíveis, o estágio de remediação está ilustrado na figura 4.

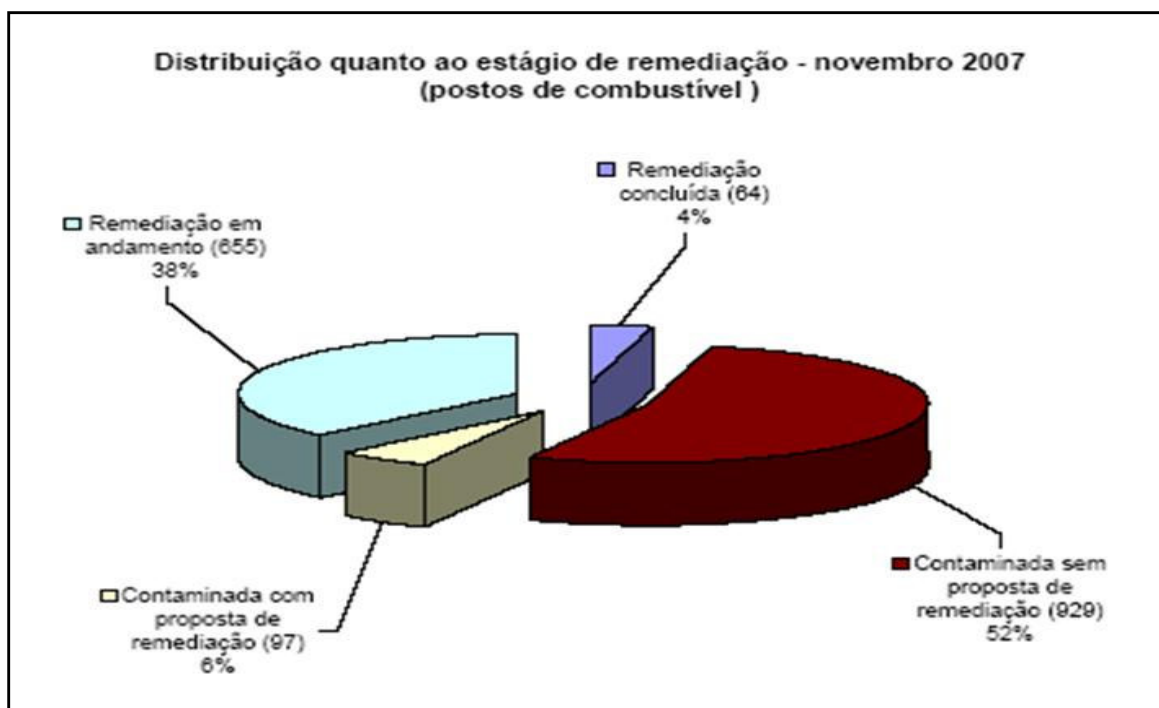


Figura 4 – Situação dos sistemas de remediação dos postos de gasolina no estado de São Paulo

Fonte: CETESB, novembro de 2007

Em cidades como São Paulo, por exemplo, que deixaram de ser, nas últimas décadas, essencialmente industriais e passaram a contar com atividades intensas de comércio e serviços, possuem inúmeras áreas contaminadas. O perigo que ameaça as áreas subterrâneas paulistas, consequência de vazamentos, infiltrações e disposições inadequadas de resíduos em quase doze mil áreas de risco em potencial, segundo dados da CETESB, que só pode ser enfrentado com políticas e legislações específicas.

Em função do encerramento de atividades industriais, disponibilizando áreas significativas para implantação de condomínios residencial e comercial, shopping center, etc. e com o propósito de obrigar os novos empreendimentos imobiliários a procederem uma investigação ambiental no terreno antes de iniciar a construção de imóveis, a Câmara Ambiental da Indústria da Construção, sob a coordenação técnica da CETESB, idealizou e geriu o “Guia para Avaliação do Potencial de Contaminação em Imóveis”, disponível na página da CETESB na Internet <http://www.cetesb.sp.gov.br>.

O governo paulista preparou um projeto de lei (PL 368) e o enviou para a Assembléia Legislativa em junho de 2005, com o fim de regulamentar a proteção da qualidade do solo e o gerenciamento de áreas contaminadas do Estado. Ganha destaque no

PL 368 a criação de um fundo público estadual de recursos para financiamento de remediações sem responsáveis identificados, denominado Fundo Estadual para Prevenção e Remediação de Áreas Contaminadas - FEPRAC.

Assim, este estudo presta sua colaboração para o assunto em questão, abordando áreas contaminadas e as tecnologias de remediação mais aplicadas atualmente, envolvendo a contaminação por hidrocarbonetos.

1.3. Metodologia

O presente trabalho foi realizado de acordo com as normas vigentes adotadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, que configura monografias científicas.

Pesquisas bibliográficas foram realizadas por meio da literatura afim, sites de agências ambientais, artigos técnicos, consultas às normas e legislação, informações consistentes e atualizadas da CETESB e informações de trabalhos monográficos de relevância para o tema escolhido, confrontando dados e evidências sobre o assunto Remediação de Áreas Contaminadas por Hidrocarboneto.

As técnicas de remediação foram relacionadas e o trabalho foi desenvolvido com a finalidade de reunir informações sobre o tema e a partir destas colaborar com a definição da técnica a ser aplicada visando minimizar os impactos ambientais, causados pela contaminação das áreas.

O desenvolvimento temático baseou-se na questão da contaminação de áreas por hidrocarboneto e às tecnologias utilizadas para promover a descontaminação destas áreas, e ainda, discorre sobre relevância da CETESB neste problema, bem como, suas contribuições de promover e divulgar as etapas detalhadas do processo de gerenciamento de áreas contaminadas, iniciadas na década dos anos 1990, e aprimoradas continuamente com revisões dos procedimentos, visando uma gestão proativa e consensual com o setor de combustíveis, da indústria de equipamentos e das empresas de consultoria ambiental.

2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES

O petróleo é considerado uma fonte de energia não renovável, de origem fóssil e é matéria prima da indústria petrolífera e petroquímica. O petróleo bruto possui em sua composição uma cadeia de hidrocarbonetos, cujas frações leves formam os gases e as frações pesadas o óleo cru. A distribuição destes percentuais de hidrocarbonetos é que define os diversos tipos de petróleo existentes no mundo.

Os solventes, óleos combustíveis, gasolina, óleo diesel, querosene, gasolina de aviação, lubrificantes, asfalto, plástico entre outros são os principais produtos obtidos a partir do petróleo. (AMBIENTE BRASIL, 2008)

De acordo com Ambiente Brasil (2008) o petróleo é classificado segundo a predominância dos hidrocarbonetos encontrados no óleo cru, em:

a) Parafínicos

Quando existe predominância de hidrocarbonetos parafínicos. Este tipo de petróleo produz subprodutos com as seguintes propriedades:

- Gasolina de baixo índice de octanagem.
- Querosene de alta qualidade.
- Óleo diesel com boas características de combustão.
- Óleos lubrificantes de alto índice de viscosidade, elevada estabilidade química e alto ponto de fluidez.
- Resíduos de refinação com elevada percentagem de parafina.
- Possuem cadeias retilíneas.

b) Naftênicos

Quando existe predominância de hidrocarbonetos naftênicos. O petróleo do tipo naftênico produz subprodutos com as seguintes propriedades principais:

- Gasolina de alto índice de octonagem.
- Óleos lubrificantes de baixo resíduo de carbono.
- Resíduos asfálticos na refinação.

- Possuem cadeias em forma de anel.

c) Mistos

Quando possuem misturas de hidrocarbonetos parafínicos e naftênicos, com propriedades intermediárias, de acordo com maior ou menor percentagem de hidrocarbonetos parafínicos e naftênicos.

d) Aromáticos

Quando existe predominância de hidrocarbonetos aromáticos. Este tipo de petróleo é raro, produzindo solventes de excelente qualidade e gasolina de alto índice de octonagem. Não se utiliza este tipo de petróleo para a fabricação de lubrificantes.

Após a seleção do tipo desejável de óleo cru, os mesmos são refinados por meio de processos que permitem a obtenção de óleos básicos de alta qualidade, livres de impurezas e componentes indesejáveis.

O petróleo cru ao chegar às refinarias é caracterizado e são definidos os processos aos quais será submetido para obtenção dos subprodutos de interesse.

Normalmente, as refinarias adquirem petróleos dentro de determinadas especificações. A separação das frações é baseada no ponto de ebulição dos hidrocarbonetos.

Os principais produtos provenientes da refinação são:

- gás combustível
- GLP
- gasolina
- nafta
- querosene
- óleo diesel
- óleos lubrificantes
- óleos combustíveis
- matéria-prima para fabricar asfalto e parafina.

2.1. Hidrocarboneto

Os hidrocarbonetos naturais são compostos químicos constituídos de átomos de carbono (C) e de hidrogênio (H), aos quais se podem juntar átomos de oxigênios (O), azoto ou nitrogênio (N) e enxofre (S) dando origem a diferentes compostos de outros grupos funcionais. (FELTRE, 2004)

As moléculas de hidrocarbonetos, sobretudo as mais complexas, possuem alta estabilidade termodinâmica e apenas o metano, que é a molécula mais simples (CH_4), pode se formar em condições de pressão e temperaturas mais baixas. Os demais hidrocarbonetos não são formados espontaneamente nas camadas superficiais da terra.

Todos os hidrocarbonetos apresentam uma propriedade comum, ou seja, oxidam-se com facilidade, liberando calor.

Segundo Feltre (2004) os hidrocarbonetos naturais formam-se a grandes pressões no interior da terra (abaixo de 150 km de profundidade) e são trazidos para zonas de menor pressão por meio de processos geológicos, onde podem formar acumulações comerciais (petróleo, gás natural, entre outros).

Hidrocarbonetos líquidos geologicamente extraídos são chamados de petróleo ou óleo mineral, enquanto hidrocarbonetos geológicos gasosos são chamados de gás natural e todos são importantes fontes de combustível. Hidrocarbonetos são de grande importância para a economia porque constituem a maioria dos combustíveis minerais, como carvão, petróleo, gás natural, entre outros, e biocombustíveis como os plásticos, ceras, solvente e óleos.

De acordo com Feltre (2004) quanto à forma das cadeias carbônicas, os hidrocarbonetos podem ser divididos em:

- a) Hidrocarbonetos alifáticos, em que a cadeia carbônica é acíclica, ou aberta, sendo subdividido em alcanos, alcenos, alcinos, alcadienos.
- b) Hidrocarbonetos cíclicos, que pelo menos uma cadeia carbônica fechada, subdivididos em cicloalcanos ou ciclanos, cicloalcenos ou ciclenos, aromáticos, que possuem pelo menos um anel aromático – anel benzênico – além de suas outras ligações.

Os principais tipos de hidrocarbonetos presentes no petróleo são os alcanos, alcenos, alcinos e aromáticos.

O tipo de ligação entre os carbonos define que os hidrocarbonetos podem ser divididos, didaticamente em:

- a) Hidrocarbonetos saturados, englobando alcanos e cicloalcanos que não possuem ligações duplas, triplas ou aromáticas.
- b) Hidrocarbonetos insaturados, que possuem uma ou mais ligações dupla ou tripla entre átomos de carbono – entre eles os alcenos, alcadienos e cicloalcenos – com ligação dupla; alcinos – com ligações triplas e aromáticas.

2.2. Degradação

Degradação quer dizer “ocorrência de alterações negativas das suas propriedades físicas” (CETESB, 2001). Por esta razão é importante avaliar os impactos causados pelos contaminantes, utilizando-se a ferramenta de Avaliação de Risco, a qual considera a concentração do contaminante em questão, os mecanismos de exposição e os riscos que o mesmo oferece ao meio ambiente.

No que tange à concentração do contaminante é realizada consultas a tabelas de referência que indicam valores ou níveis acima dos quais é preciso intervir. A intervenção é feita utilizando contenção ou isolamento da área degradada, por meio de tratamentos de remediação para que o solo possa adquirir novamente níveis aceitáveis.

A CETESB criou a tabela de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas, baseada nos padrões de potabilidade e em análises toxicológicas. A tabela indica Valores de Referência de Qualidade - VRQ que se referem à concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea, que define um solo como normal ou a qualidade natural da água subterrânea (CETESB, 2005).

Valor de Prevenção - VP é a concentração de determinada substância, acima da qual podem ocorrer alterações prejudiciais à qualidade do solo e da água. Este valor indica se o solo é capaz de sustentar as suas funções primárias, com a proteção dos receptores ecológicos (CETESB, 2005).

Valor de Intervenção - VI é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea, acima da qual existem riscos à saúde. Para o solo, foi calculado, por

meio da utilização de procedimentos de avaliação de risco à saúde humana (CETESB, 2005).

De acordo com os riscos, observa-se a relação com a toxicidade, fator consideravelmente variante, em função das propriedades físico-químicas dos contaminantes. Alguns são conhecidos pelas características carcinogênicas, tais sejam, o benzeno e os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos - PAHs (EUGRIS, 2008).

Na questão risco é preciso considerar o potencial de propagação do contaminante. Os receptores potenciais são os seres humanos, as edificações, os reservatórios subterrâneos, entre outros. Alguns contaminantes apresentam maior mobilidade, o que passa a ser um parâmetro chave para a avaliação de risco.

De acordo com os mecanismos de exposição, os contaminantes mais críticos são os voláteis ou solúveis em água, pois são transportados sem atenuação, como o benzeno e aqueles que tenham elevada toxicidade, como os metais pesados. (EUGRIS, 2008)

Deve-se esclarecer que podem existir mais de um contaminante, mais de um meio de propagação e mais de um receptor, sendo necessário identificar, entender e gerenciar cada um dos identificados.

O Procedimento de Gerenciamento de Áreas Contaminadas da CETESB (2007) propõe um processo de recuperação de áreas contaminadas, após a identificação, composto de investigação detalhada, avaliação de risco, investigação para remediação, projeto de remediação, remediação propriamente dita e monitoramento.

2.3. Impacto ambiental

Segundo o Prossiga (2008) impacto ambiental é considerado como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetem: (a) a saúde, a segurança e o bem-estar da população; (b) as atividades sociais e econômicas; (c) a biota; (d) as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; (e) a qualidade dos recursos ambientais.

De maneira mais genérica, a ISO 14.001, considera impacto ambiental qualquer modificação do meio ambiente, adversa ou benéfica, que resulte, no todo ou em parte, das atividades, produtos ou serviços de uma organização. (FERREIRA, 1985)

Cada conceito apresentado sobre impacto ambiental, traz sempre a idéia de “alteração” advinda de produtos e subprodutos, que de maneira negativa agridem a qualidade do ambiente, resultando em danos às características naturais do ar, da água, do solo.

Os efeitos malévolos causados por derramamento, vazamento ou outro tipo de agressão de poluentes derivados do petróleo, são os mais recentes a serem projetados na sociedade, decorrentes das intensas atividades industriais, que pedem métodos de remediação das áreas degradadas.

A imensidão dos impactos resultantes da contaminação do meio são conseqüências da forma produtiva e do consumo adotados, gerando resíduos que ameaçam a capacidade de suporte dos solos.

2.4. Remediação

O EUGRIS (2008) define a remediação como aplicação de tecnologias direcionadas à imobilização dos poluentes ou à redução dos poluentes para níveis aceitáveis, tais técnicas podem ser aplicadas sozinhas ou concomitantemente.

A remediação pode ocorrer *in-situ* ou *ex-situ*. Em determinadas circunstâncias é necessário lançar mão de tecnologias *ex-situ*, que podem ser aplicadas no próprio local da contaminação (*on-site*), ou em instalações especializadas (*off-site*).

De acordo com Furtado (2008) a tendência da tecnologia de remediação de áreas contaminadas é resolver problemas no local, *in-situ*, em oposição às tecnologias *ex-situ*, que podem ser desde a simples remoção do solo para destruição/aterramento ou da água para tratamento até o uso de biopilhas, onde se removem e empilham solos contaminados, misturados com matérias orgânicas, instalando-se tubulações para aeração e injetando nutrientes para incentivar a biodegradação. Nos meios técnicos, é inquestionável que a melhor opção tecnologia tanto em custos, como em eficiência, será sempre a remediação *in-situ*.

As tecnologias de remediação existentes no mundo são de domínio, pelo menos teórico, das empresas nacionais do segmento, o que não significa que elas tenham sido empregadas no país. Tanto é assim, que das 2272 áreas contaminadas no Estado de São Paulo, apenas 39% delas estão com remediação em andamento e somente 4,14% conta com o projeto concluído, de acordo com informações recentes da CETESB (2007).

As remediações implantadas, em sua maioria, são em postos de gasolina e utilizam tecnologias mais básicas, o bombeamento e tratamento, a recuperação de fase livre e extração multifásica para o tratamento das águas subterrâneas, e a extração de vapores e a remoção de solo/resíduo destacam-se como as técnicas mais utilizadas para os solos.

2.5.Áreas contaminadas

CETESB (2001) define de forma abrangente área contaminada como: “Uma área, local ou terreno onde há comprovadamente poluição, ou contaminação causada pela introdução de quaisquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido armazenados, infiltrados ou enterrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural [...]”

Poder considerar uma área degradada é um fator importante, pois propicia a utilização da legislação federal existente nos casos de adoção de medidas de remediação de áreas contaminadas. A Lei 6.938 (BRASIL, 1981), regulamentada pelo Decreto 99.274/90, sobre Política Nacional do Meio Ambiente, que introduz instrumentos de planejamento ambiental e determina a responsabilidade e penalidades para casos de poluição em seus artigos 2º e 4º apresenta como objetivo dessa lei a “recuperação de áreas degradadas e ao poluidor, obrigação de recuperar e/ou indenizar os danos causados’.”

Segundo a Política Nacional do Meio Ambiente - Lei Federal 6.938/81 os bens a proteger são: a saúde e o bem-estar da população; a fauna e a flora; a qualidade do solo, das águas, do ar; os interesses de proteção à natureza; a ordenação territorial e planejamento regional e urbano; a segurança e a ordem pública.

Os contaminantes ou poluentes podem ser propagados por vias diferentes como ar, solo, águas subterrâneas e superficiais, alterando suas características naturais de qualidade e determinando impactos negativos e riscos sobre os bens a proteger, localizados na própria área ou em seus arredores.

O conceito de áreas contaminadas são áreas que contêm substâncias em níveis acima do normal, tais substâncias podem ser micronutrientes, compostos orgânicos, gases como dióxido de carbono e metano ou mesmo nutrientes vegetais como nitrogênio e fósforo. Do ponto de vista ambiental, é necessária uma atitude renovada dos meios administrativos, políticos, tecnológicos que devem passar a considerar o meio ambiente em todas as suas decisões, para contribuir e ampliar a capacidade de suporte sustentável. Espera-se que empresas deixem de apresentar problemas e passem a apresentar soluções e estratégias para minimizar problemas que podem comprometer de forma definitiva os recursos naturais.

Áreas contaminadas, seja qual for o tipo de dano, são áreas de risco eminente, com conseqüências sérias e toda iniciativa no sentido de reverter este processo é importante e se faz necessário para promover a melhoria da qualidade de vida da sociedade.

Dessa forma, entende-se que os responsáveis por estas áreas contaminadas não podem negligenciá-las, pois dessa forma podem perder credibilidade junto à população e sofrer conseqüências econômicas e jurídicas.

3. REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS

A urgência de remediar as áreas contaminadas é proporcional à pressão que as empresas receberão para agir sobre seus passivos. No tocante aos custos da remediação dessas áreas contaminadas, as empresas arcam com esses valores vultosos. A morosidade da remediação dessas áreas não está intimamente ligada à falta de tecnologia e sim aos altos custos que as empresas têm de desembolsar para a remediação.

Não há consenso quando se trata do fator econômico, principalmente no que tange às tecnologias de remediação, que são muito onerosas.

A edição do Decreto Estadual 47397 (SÃO PAULO, 2002) que dispõe sobre o licenciamento ambiental renovável no âmbito do Estado de São Paulo, além de manter conformidade com a legislação federal, vem para reforçar a tendência empresarial mundial de adoção de práticas econômicas e de mercado, com a adoção de contínuas melhorias.

A remediação de áreas contaminadas é um grande desafio para os órgãos ambientais, inclusive para a CETESB, pioneira neste setor. Em 22 de junho de 2007 a CETESB aprovou o novo procedimento para gerenciamento de áreas contaminadas descrito no documento Decisão de Diretoria n.º 103/2007/C/E intitulado “Procedimento para gerenciamento de áreas contaminadas” (CETESB, 2008a).

As áreas contaminadas provenientes de postos e sistemas retalhistas de combustíveis apresentam características que possibilitam a adoção de procedimento específico de investigação e intervenção. O referido procedimento apresenta a forma para gerenciamento de áreas contaminadas relacionadas, exclusivamente, aos empreendimentos contemplados pela Resolução CONAMA 273 (BRASIL, 2000) e Resolução SMA 05 (SÃO PAULO, 2001).

O procedimento para postos e sistemas retalhistas de combustível unifica as etapas de investigação detalhada, avaliação de risco, concepção da remediação e projeto de remediação, denominada investigação detalhada e elaboração de plano de intervenção.

3.1 Procedimento

De acordo com D’Agostinho e Flues (2006) o procedimento desenvolvido especificamente para processos de contaminação ambiental associados a Hidrocarboneto

de Petróleo - HDP e outros combustíveis líquidos, integram métodos de avaliação de exposição de risco e modelos matemáticos de transporte de contaminantes fornecendo subsídios ao processo de tomada de decisão, relacionada à alocação de recursos à urgência de ações corretivas à necessidade de remediação, aos níveis aceitáveis de remediação e alternativas tecnológicas aplicáveis.

A figura 5 demonstra o processo de gerenciamento de áreas contaminadas por hidrocarbonetos provenientes de postos e sistemas retalhistas de combustíveis no Estado de São Paulo.

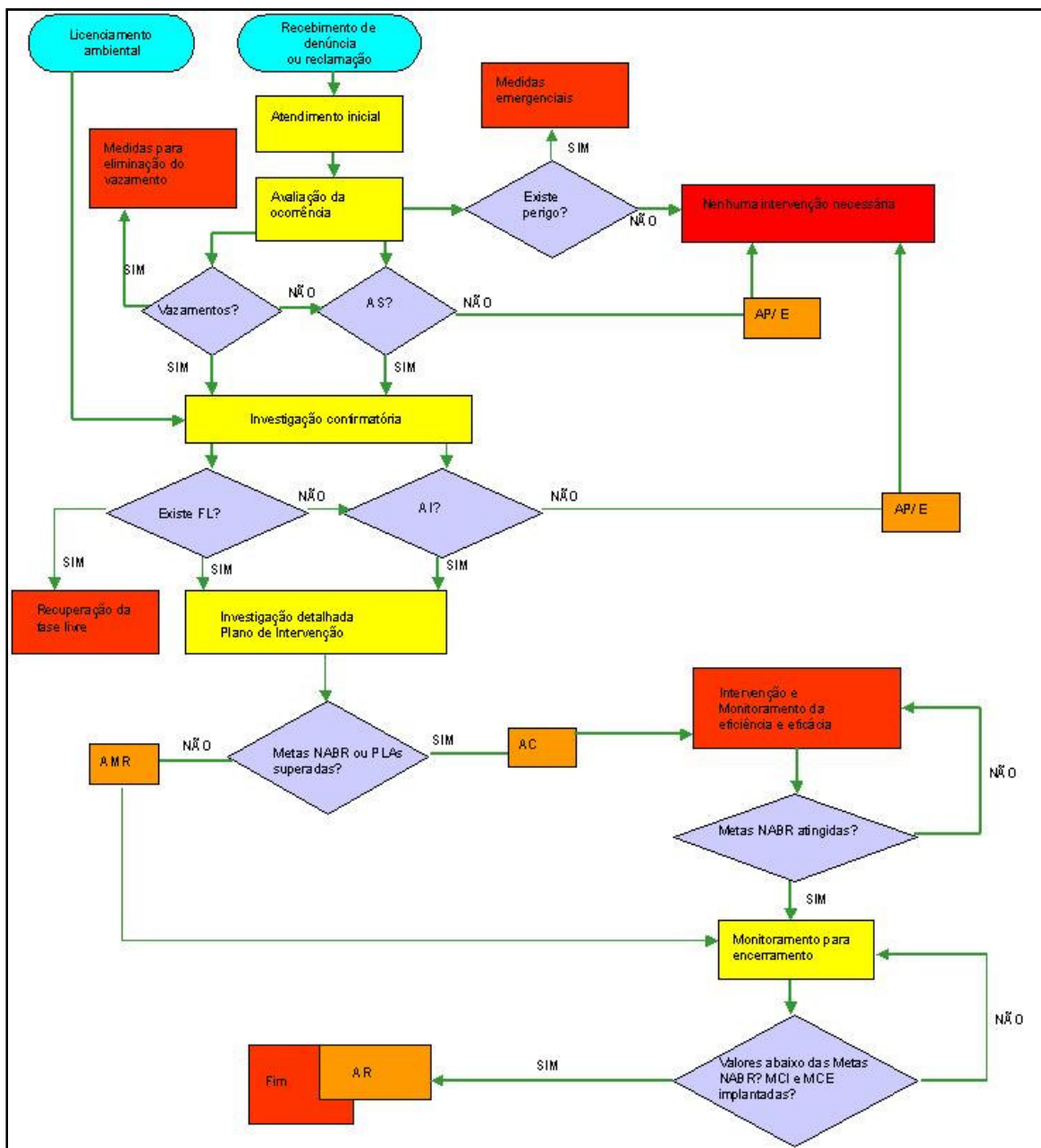


Figura 5: Procedimento para gerenciamento de áreas contaminadas relacionadas a postos e sistemas retalhistas de combustíveis

Fonte: CETESB, novembro de 2007

Nota: as siglas utilizadas na figura significam:

AP: área com potencial de contaminação

AS: área suspeita de contaminação

AI: área contaminada sob investigação

AC: área contaminada

AMR: área em processo de monitoramento para reabilitação

AR: área reabilitada para o uso declarado

E: exclusão

FL: fase livre

MCE: medidas de controle de engenharia

MCI: medidas de controle institucional

NABR: níveis aceitáveis baseados em risco

PLAs: padrões legais aplicáveis

O procedimento visa contribuir no gerenciamento da contaminação em postos de abastecimento, postos revendedores, sistemas retalhistas, bases de distribuição de combustíveis e terminais onde sejam manipulados e armazenados compostos derivados do refino de petróleo, com o objetivo de adaptação ao meio físico e estabelecer tabelas de referência, considerando a proteção à saúde humana e parâmetros adequados, levando-se em conta o estabelecimento de metas de remediação, realizadas por meio da integração das características dos contaminantes (mobilidade, solubilidade, volatilização, etc.) do meio impactado (porosidade, gradiente hidráulico, condutividade hidráulica, entre outros), dos meios de transporte (água subterrânea, solo superficial, subsuperficial, ar) das vias de ingresso (ingestão, inalação e cutânea) e das populações potencialmente receptoras.

Após a investigação confirmatória é necessário realizar a investigação detalhada e a elaboração do plano de intervenção que definem os limites das plumas de contaminação, determinam as concentrações das substâncias ou contaminantes de interesse, caracterizam o meio físico, avaliam a necessidade de adoção de medidas de intervenção, determinam as formas de intervenção a serem adotadas e fixam as metas de remediação a serem atingidas, visando a reabilitação da área para o uso declarado.

Para a elaboração do plano de intervenção deverão ser considerados como metas de remediação, a serem atingidas nos pontos de conformidade, os valores de concentração relacionados nas tabelas Níveis Aceitáveis Baseados em Risco – NABR, aprovadas pela CETESB por meio da Decisão de Diretoria 010/2006/C, publicada no Diário Oficial do Estado de São Paulo de 11.02.2006. Estes valores também poderão ser utilizados para o cálculo das metas de remediação a serem atingidas junto às fontes de contaminação. Os padrões legais aplicáveis, quando existentes, poderão ser considerados na definição das metas de remediação a serem atingidas nos pontos de conformidade.

A implementação das medidas de remediação, deverá observar as características dos contaminantes, do meio físico e do uso e ocupação do solo com a finalidade de demonstrar que as metas de remediação estabelecidas para o caso poderão ser atingidas e por meio de monitoramento da eficiência e eficácia o sistema de remediação poderá ser desativado, mantendo-se o monitoramento para encerramento.

Há possibilidade, após a adoção de medidas de controle institucional, sendo que órgão ambiental poderá acatá-la desde que a considere eficiente para o controle de uma situação de risco à saúde. Esta medida será comunicada ao órgão com atuação na área

correspondente à medida adotada (Prefeitura Municipal, as Secretarias de Saúde Estadual e Municipal ou o Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE, além das outras entidades competentes, como por exemplo, as empresas concessionárias dos serviços públicos), por meio de correspondência ou troca de informações utilizando-se de sistema informatizado. A proposta de medida de controle institucional será válida, salvo manifestação contrária do órgão responsável pela sua implantação.

Caso seja caracterizada a inviabilidade de implantação das medidas de controle institucional pretendidas, deverá ser proposta outra medida de intervenção em substituição à rejeitada, com a implantação de medidas de remediação ou de controle de engenharia, em conjunto ou isoladamente.

Após a implantação das medidas destinadas à remediação, atingidas as metas de remediação definidas para a área e, se for o caso, implantadas as medidas de controle institucional ou de controle de engenharia, o sistema de remediação poderá ser desativado e iniciando o monitoramento para encerramento.

4. METODOLOGIAS QUE PRECEDEM A REMEDIAÇÃO

Conforme Trovão (2006), quando é percebido um vazamento, este já se encontra bastante avançado, tornando-se difícil a quantificação de contaminante. Muitos autores apresentaram trabalhos no sentido de quantificar o volume vazado retido por capilaridade na zona saturada e não-saturada. Lenhard e Parker (1990), Busby *et al.* (1995), Farr *et al.* (1990), Ferreira (2003) entre outros, utilizaram as curvas de saturação do solo. Já Huntley *et al.* (1994), relaciona as diferentes espessuras encontradas nos poços de monitoramento às granulometrias heterogêneas existentes no solo ao redor.

Os mecanismos de transferências de massa do contaminante de uma fase para a outra ocorrem de forma dinâmica. As quantidades de produto presente em cada fase podem alterar-se tanto devido à biodegradabilidade como por transferência de massa da fase livre, para fase vapor, ou da fase vapor para adsorvida, ou de fase livre para dissolvida e assim por diante. Esta situação induz a erros significativos associados à quantificação de combustível presente na subsuperfície. (LAGREGA, 1994; FERREIRA, 2000)

Por meio do mapeamento da pluma de contaminação em fase livre e adsorvida, é possível estimar-se a concentração do contaminante no solo e no vapor deste, desde que seja conhecida a massa inicial de contaminantes que, neste momento, distribui-se nas diversas fases (FERREIRA, 2003). Segundo a EPA (1991), a fase vapor pode espalhar os contaminantes numa área maior do aquífero numa velocidade até 10.000 vezes maior do que através do movimento da água subterrânea.

Segundo Pereira (2000), apud Trovão (2006), as alterações na granulometria, teor de umidade e heterogeneidade do solo, causam variações na retenção capilar. Estas variações são responsáveis pelas diferenças de espessura encontradas quando se associa a fase livre existente no poço de monitoramento à fase livre que existe sobre o nível d'água. Nos locais com efeitos capilares maiores, como argilas e siltes, esta diferença exagerada é mais notada.

O Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas, Lopes *et al.* (2001) explica as diferenças entre remediação ou recuperação de uma determinada área contaminada e divide as medidas de remediação em dois tipos:

- a) medidas de contenção ou isolamento da contaminação e
- b) medidas para o tratamento dos meios contaminados visando a eliminação ou

redução dos níveis de contaminação a níveis aceitáveis ou previamente definidos.

Assim, neste estudo, considera-se recuperação como sendo remediação (contenção e tratamento) e compatibilização ao uso atual ou futuro da área.

Para o estudo de passivo ambiental, os poços de monitoramento são muito importantes, uma vez que é através deles que são feitas as investigações para delimitação da pluma de contaminação. As análises químicas de solo e água, informações sobre litologia e potenciometria local, anisotropia do terreno, partem destes poços.

O volume de combustível presente na contaminação, muitas vezes também é estimado através das análises realizadas nestes poços de monitoramento. Alguns autores – Oliveira (1997), Pereira (2000), Ferreira (2003), entre outros - realizaram estudos com o intuito de encontrar técnicas para que, através da altura de fase livre seja possível mensurar o volume de combustível contido no solo. A informação incorreta quanto à quantidade de combustível pode levar a uma escolha errada de técnica de remediação, o que implicaria em um custo super ou subestimado.

Segundo a EPA (1991) a implantação dos poços de monitoramento, através dos quais é realizado o mapeamento da pluma de fase livre, é um processo de tentativa e erro. A abertura de um poço em um determinado local é baseada nos resultados das análises do poço que o precedeu. Para a investigação de LNAPL, na construção dos poços de monitoramento, deve-se cuidar para que os filtros estendam-se desde acima da franja capilar até abaixo do nível d'água.

Segundo Miller (2001), algumas técnicas de remediação utilizam água do próprio aquífero para promover a expulsão do combustível da zona não saturada, no entanto, esta situação pode causar um enclausuramento do líquido não-molhante, o que causaria um agravamento no quadro da contaminação ao invés de uma remediação. Os combustíveis presentes no solo devido à contaminação apresentam certa geometria. Esta geometria quando é quebrada devido à infiltração de água, faz com que o contaminante desça, chegando mais rapidamente em contato com a água subterrânea modificando e aumentando o quadro de contaminação local.

Neste cenário, encontram-se inúmeras tecnologias que podem ser utilizadas para remediação destas áreas contaminadas com hidrocarbonetos. Até 28 de outubro de 2003, o Banco de Dados de Tecnologia de Remediação e Caracterização da Agência de Proteção

Ambiental dos Estados Unidos da América (EPA REACH IT - *US Environmental Protection Agency Remediation and Characterization Technology Database*) relacionaram 1.294 tecnologias de remediação (STIER, 2004). Devido, principalmente a esta variedade de tratamentos encontrados atualmente, é necessário que o tratamento seja cuidadosamente escolhido, uma vez que se pode incorrer no erro de escolher-se uma tecnologia inovadora mas que não atenda ao tipo de remediação necessária para o caso em si.

Conforme Stier (2004), para que uma tecnologia de remediação seja escolhida com acerto, deve-se considerar a geologia, hidrogeologia, hidrogeoquímica, características físicas e químicas dos contaminantes, aspectos regionais (custos de energia, preço de mão-de-obra) e aspectos políticos. Lopes *et al.* (2001) acrescenta ainda o tempo e recursos disponíveis.

A Figura 6 mostra um fluxograma de decisão quanto à tecnologia de remediação a ser escolhida. Nele, estão incluídos os principais envolvidos na questão: os proprietários, os consultores e as autoridades.

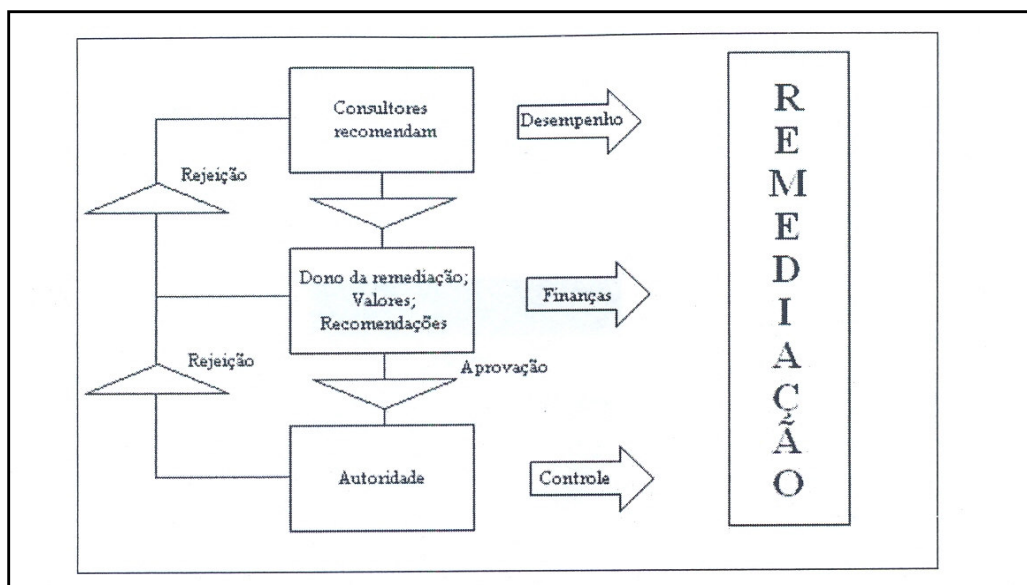


Figura 6 – Fluxograma de decisão quanto à tecnologia de remediação a ser escolhida

Fonte: adaptado de Stier, 2004

Normalmente, a decisão é tomada pelo proprietário da área contaminada. Como nem sempre o proprietário tem experiência ou conhecimento sobre o assunto, esta decisão deve estar baseada na recomendação de um consultor e supervisionada pela autoridade competente (STIER, 2004).

Stier (2004) afirma que normalmente, o processo de remediação tende a responder a um questionamento:

- a) a área contaminada justifica a pesquisa?
- b) a área contaminada requer uma ação de remediação?
- c) qual ação de remediação é necessária?
- d) a ação de remediação, uma vez concluída, atingiu sua meta?

Para amparar as decisões nas necessidades das ações de remediação, utiliza-se a análise de risco. Segundo o mesmo autor, ela deve ser utilizada em todas as fases de remediação, pois, quando aplicada holisticamente, a análise de risco subsidia as decisões do gerenciamento do risco tornando mais eficiente o uso dos recursos para proteger a saúde pública e o meio ambiente, como apresentado a seguir.

O gerenciamento de áreas contaminadas visa reduzir, para níveis aceitáveis, os riscos a que estão sujeitos a população e o meio ambiente em decorrência de exposição às substâncias provenientes das áreas contaminadas, por meio de um conjunto de medidas que assegurem o conhecimento das características dessas áreas e dos impactos decorrentes da contaminação, proporcionando os instrumentos necessários à tomada de decisão quanto às formas de intervenção mais adequadas.

Com o objetivo de otimizar recursos técnicos e econômicos, a metodologia de gerenciamento de áreas contaminadas baseia-se em uma estratégia constituída por etapas sequenciais, onde a informação obtida em cada etapa é a base para a execução da etapa posterior. Trata-se de procedimento para a identificação, priorização e investigação destas áreas e de procedimento para o cadastramento das informações coletadas. Essas informações visam subsidiar a definição do planejamento e da implantação de medidas de remediação, de controle institucional, de engenharia ou emergenciais.

Nos casos em que o proprietário propuser no relatório de avaliação de risco a adoção de medidas de controle institucional, o órgão ambiental poderá acatá-la, desde que a considere eficiente para o controle de uma situação de risco à saúde. Esta medida deve ser comunicada ao órgão com atuação na área corresponde à medida adotada (Prefeitura Municipal, as Secretarias de Saúde estadual e municipal ou o DAEE, além das outras entidades competentes, como por exemplo, as empresas concessionárias dos serviços públicos), por meio de correspondência ou troca de informações utilizando-se de sistema

informatizado. A proposta de medida de controle institucional será válida, salvo manifestação contrária do órgão responsável pela sua implantação.

Caso seja caracterizada a inviabilidade de implantação das medidas de controle institucional pretendidas, o proprietário deve propor outra medida de intervenção em substituição à rejeitada.

Medidas de controle de engenharia compreendem a adoção de técnicas utilizadas normalmente pelo setor da construção civil, voltadas adicionalmente à interrupção da exposição dos receptores aos contaminantes presentes em uma área contaminada. Dentre essas medidas pode ser citada a impermeabilização da superfície do solo, de modo a evitar o contato de receptores com o meio contaminado. Estas medidas poderão ser implementadas em substituição ou complementarmente à aplicação das técnicas de remediação.

Nos casos em que as medidas de controle de engenharia forem adotadas, o proprietário deve assegurar sua manutenção para o fim a que se destinam enquanto permanecer o uso proposto para a área ou a contaminação detectada.

No processo de escolha das formas de intervenção a serem adotadas o proprietário deve considerar as metas de remediação a serem atingidas, estabelecidas a partir da avaliação de risco, bem como os padrões legais aplicáveis, por exemplo, os padrões de potabilidade, os padrões de qualidade da água de corpos superficiais, os padrões de lançamento de efluentes em corpos d'água, os padrões de qualidade do ar e os padrões de emissão para a atmosfera.

Nos casos em que existirem dois ou mais usos do solo sob a influência da fonte primária ou da fonte secundária de contaminação, a meta de remediação deverá ser estabelecida para o cenário de uso do solo mais sensível.

Os padrões legais aplicáveis deverão ser considerados no estabelecimento de medidas de controle institucional e na definição de metas de remediação sempre que houver a possibilidade de alteração da qualidade de recursos que devam ser protegidos por esses dispositivos legais.

5. AVALIAÇÃO DE RISCO E ESTABELECIMENTO DE METAS DE REMEDIAÇÃO BASEADAS EM RISCO

De acordo com o setor de apoio técnico em áreas contaminadas da CETESB (2006), a elaboração de um bom cenário teórico de exposição é fundamental para o êxito da avaliação de risco. É nesse cenário que será possível considerar as variáveis que independem da vontade ou determinação do poluidor, como por exemplo, os usos legais atuais e futuros da área fonte e de seus entornos, e os usos atuais e futuros das águas subterrâneas. Não é praxe entre nós que os analistas de risco considerem que os gestores desses recursos podem ser levados a alterar os usos atuais por pressão pública ou por demandas não previstas no planejamento. Também se deve considerar que o poluidor não é o detentor da posse dos terrenos vizinhos e que a imposição de restrições quanto ao usufruto de propriedade de terceiros pode constituir-se em um grave entrave na tomada de decisão quanto aos níveis de remediação que serão aceitos. Também, sempre que a imposição de restrições quanto ao uso e ocupação do solo ou quanto a captação e consumo de águas subterrâneas for imperativa, em face da contaminação existente, a autoridade pública competente deverá dispor de todos os dados que permitam o embasamento técnico de suas decisões, até porque muitas delas serão questionadas judicialmente pelas partes que se sentirem prejudicadas.

Assim, recomenda-se que todas as plumas de contaminação do solo e das águas subterrâneas sejam mapeadas espacialmente (em plantas e cortes) até os níveis considerados aceitáveis e que pelo menos um dos cenários teóricos de exposição reflita sempre aquele de pior caso, mesmo sabendo-se que possa ser improvável. Por outro lado, qualquer alteração de uso das propriedades não prevista no cenário teórico conceitual pode alterar substancialmente as conclusões da avaliação de risco realizada.

Não existem garantias prévias de que as restrições institucionais, necessárias para validar um cenário teórico de exposição, venham ou possam ser impostas pelas autoridades públicas competentes, devido às diversas outras condicionantes de planejamento, interesses administrativos ou políticos, etc. que devem ser também ponderadas para possibilitar a tomada dessa decisão. Nos casos onde essa imposição de restrição não puder ser implementada, por interesse próprio da autoridade ou por falta de informações sobre sua tipologia e abrangência, ações de remediação deverão ser implementadas pela entidade causadora da contaminação.

5.1. Valores de Concentração nos Pontos de Exposição

O uso direto de dados de monitoramento para indicar a concentração de compostos químicos de interesse em pontos de exposição normalmente acontece quando a exposição envolve o contato direto com o meio monitorado (ex. contato direto com o solo superficial contaminado), ou quando o monitoramento ocorre diretamente no ponto de exposição (ex. monitoramento no poço cacimba de água para consumo humano localizado numa residência). Para as situações acima, sugere-se a utilização de dados de monitoramento direto para quantificação das doses de ingresso.

Entretanto, embora os dados de monitoramento permitam o conhecimento das concentrações reais e instantâneas em um determinado ponto, o analista ou a autoridade pública deve ter ciência de que essas concentrações podem variar ao longo do tempo de maneira substancial, além de ser sempre possível a presença de interferentes que podem mascarar os resultados encontrados. Assim, sugere-se que sempre seja feita uma avaliação para assegurar que as concentrações medidas representam a realidade e, mais, que estas serão as máximas observáveis ao longo do tempo. Caso pelo menos uma dessas condicionantes não puder ser assegurada, será mais conveniente a utilização de dados derivados do modelamento matemático.

Existem diversos modelos matemáticos disponíveis para cálculo das concentrações nos pontos de exposição. Esses modelos, usualmente calculam a distribuição de massa (ou concentração) entre os meios físicos considerados. Para tal, necessitam de um conjunto de dados relacionados com as características físicas e físico-químicas desses meios e dos contaminantes. Muitos dos modelos dispõem como condição padrão (default) conjuntos de dados padronizados, os quais podem ser diferentes de modelo para modelo dependendo da fonte primária onde esses dados foram obtidos, sobre as propriedades físicas e físico-químicas das substâncias de interesse e, muitas vezes, sobre os parâmetros de exposição e características populacionais.

Quanto aos dados relativos aos meios, estes normalmente são obtidos em publicações estrangeiras, com pouco ou nada a ver com as condicionantes nacionais. Estes fatos levam a obtenção de resultados muitas vezes díspares que podem dar uma parcial ou falsa idéia de segurança. Assim, seria conveniente que os dados característicos dos meios físicos fossem obtidos em campo ou em laboratório e representassem as condições reais existentes nas zonas ou camadas onde esses fenômenos irão se desenvolver. Quanto aos

demais dados, sugere-se que sejam obtidos em uma única fonte de informações, por exemplo, na listagem “*EPA Region 9 PRGs InterCalc Tables: Phys-Chem Data*”, disponível no site <http://www.epa.gov/region09>.

Alternativamente, outra abordagem seria considerar a maior concentração do composto químico de interesse para um determinado meio como sendo a concentração no ponto de exposição para as rotas de exposição associados a este meio. Neste caso a Dose de Ingresso a ser quantificada refletirá um cenário de máxima exposição possível para um tempo médio de avaliação, portanto mais conservadora.

5.2. Estimativa do Risco

Em termos simplificados, o risco estará relacionado com as quantidades de contaminantes que conseguem ter ingresso no corpo humano, por inalação, ingestão ou absorção pela pele e mucosas.

Assim, nas avaliações será determinante estimar essas quantidades e compará-las com os resultados dos estudos de dose-resposta disponíveis na literatura.

O cálculo do ingresso corresponde à quantificação das concentrações dos compostos químicos de interesse que potencialmente ingressaram no organismo exposto por uma via de ingresso determinada, considerando cada rota de exposição identificada. O resultado desse cálculo, conhecido como Doses de Ingresso, são expressos em termos de massa do composto que está em contato com o corpo por unidade de tempo (por exemplo: mg de cianeto por kg do corpo por dia – mg/kg-dia).

No sentido de que esses resultados sejam minimamente comparáveis, será conveniente que se adote alguma padronização e se recomenda a utilização dos parâmetros de exposição ou parâmetros populacionais estabelecidos pela CETESB - Ações Corretivas Baseadas em Risco (ACBR) Aplicadas a Áreas Contaminadas com Hidrocarbonetos Derivados de Petróleo e Outros Combustíveis Líquidos – Procedimentos (CETESB, 2008b); ou no Relatório de Estabelecimento de Valores de Referência de Qualidade e de Intervenção para Solo e Água Subterrânea no Estado de São Paulo. (CETESB, 2001)

De outra parte, as doses de referência (R_fD) e os fatores de carcinogenicidade (SF) são obtidos a partir de estudos científicos e freqüentemente atualizados. Nas diferentes

bases de dados disponíveis na literatura, observa-se, entretanto variações nos valores tabulados e variados períodos de atualização. Essas diferenças levam a cálculos de risco ou de quocientes de perigo muitas vezes díspares para uma mesma situação ou para situações semelhantes. Assim, recomenda-se que esses dados sejam obtidos de uma fonte única e acreditada e sugere-se a utilização do banco de dados *IRIS*, disponível no site <http://www.epa.gov/iris>, ou na listagem “*EPA Region 9 PRGs Table*”, disponível no site <http://www.epa.gov/region09>.

Os procedimentos acima descritos permitiram ao analista calcular um risco de câncer ou um coeficiente de perigo para cada substância e para cada receptor considerado. Entretanto, essa estimativa não reflete com exatidão os casos onde existam mais do que uma substância tóxica ou cancerígena, ou o receptor se enquadre em mais do que uma situação de exposição, por exemplo, o indivíduo é um trabalhador na área contaminada e simultaneamente é um morador em um ponto de exposição, ou morou desde sua infância nesse local.

Essas circunstâncias levam à necessidade de que os riscos carcinogênicos, devidos a cada uma das substâncias, sejam somados para se obter um risco carcinogênico total. Por outro lado, os cocientes de perigo estimados para cada substância tóxica com efeito sobre um determinado órgão deverão ser somados para se quantificar o cociente total de perigo para esse órgão. Da mesma forma, se um indivíduo morou toda sua vida em ponto de exposição e se o modelo de avaliação de risco divide esses riscos em função da idade (infantil e adulta) e tempo de exposição, esses valores também deverão ser somados para que reflitam a situação de fato verificada. Estes serão os valores a serem considerados no estudo de avaliação de risco.

5.3. Metas de Remediação Baseadas em Risco

O processo de Avaliação de Risco a Saúde Humana, além de possibilitar o conhecimento dos níveis riscos ou dos índices de perigo a que um receptor, ou grupo de receptores, estaria sujeito, permitindo assim a tomada de decisão quanto a necessidade de intervenção na área de estudo, possibilita também a definição das concentrações dos compostos químicos de interesse no meio físico, que garantam índices de perigo ou níveis de risco à saúde humana aceitáveis, caso ocorra uma situação de exposição de um

indivíduo ou uma população. Estas concentrações aceitáveis são chamadas Metas de Remediação com Base em Risco -MRBR.

O primeiro problema a ser equacionado, na definição dessas metas, está relacionado com quais níveis de risco e índices de perigo serão considerados aceitáveis pela sociedade. A resposta a esta questão é eminentemente política, pois quanto menor for esse nível de risco ou índice de perigo, maiores serão os custos de uma eventual remediação e maiores serão as restrições impostas sobre o usufruto das propriedades e das águas subterrâneas impactadas.

No que se refere aos índices de perigo, parece ser posição consensual de que estes devem ser sempre menores do que 1. Isto é facilmente explicável e técnica e politicamente justificável, pois um índice maior do que a unidade significa que um dano a saúde é possível.

Já para os níveis de risco carcinogênico, este consenso não é tão aparente. Neste caso, não existe uma dose mínima considerada segura, isto é, por menor que seja a dose, sempre existirá uma probabilidade adicional, diferente de zero, de que o receptor desenvolva a doença ao longo de sua vida. As probabilidades mais comumente utilizadas em avaliações de risco variam entre um caso adicional de câncer para uma população exposta de 10000 indivíduos (10^{-4}) e um caso adicional para uma população exposta de 1000000 indivíduos (10^{-6}). Estes números se enquadram dentro dos riscos normais de câncer observados para populações vivendo em ambientes urbanos, devido aos seus hábitos alimentares e de consumo aliados ao simples fato de respirar ar contendo agentes cancerígenos oriundos de veículos e demais atividades industriais. Assim, parece ser justificável adotar um risco aceitável igual aos riscos decorrentes da própria vida em ambientes urbanos, ou seja, um risco carcinogênico menor ou igual a 10^{-5} parece ser aceitável.

O segundo problema para chegar às Metas de Remediação Baseadas em Risco se concentra em estabelecer ou calcular as concentrações máximas nos diferentes meios que assegurem riscos aceitáveis para um receptor, caso ocorra um evento de exposição. Frequentemente os receptores estão situados a alguma distância das fontes primárias ou secundárias (por exemplo: indivíduo utilizando água subterrânea contaminada devido a um depósito de resíduos situado a montante). Em princípio poder-se-ia estabelecer apenas uma concentração máxima do contaminante nas águas subterrâneas, entretanto caso não haja

uma atuação junto as fontes primárias e secundárias (o próprio depósito e o subsolo contaminado), as garantias de que essa concentração limite seja mantida ao longo do tempo serão mínimas. A constatação desse fato obriga, na realidade, que se proceda, utilizando-se dos modelos de transporte de massa, à quantificação das concentrações máximas nas fontes primárias e secundárias, as quais serão então entendidas como metas de remediação e, além disso, garantirão que as concentrações desejadas nos pontos de exposição não sejam ultrapassadas.

Isso levanta outro ponto de reflexão para os analistas correlacionando com as concentrações de contaminantes nos pontos de exposição utilizadas para as quantificações de risco. Essas concentrações, como já foram mencionadas nos itens anteriores, pode ser obtida, e deve ser obtida em algumas situações, por meio de dados de monitoramento direto nos meios de interesse e, se uma modelagem de transporte de massa não foi realizada ou não atinge esse ponto de exposição, não será possível estabelecer metas de remediação para as fontes primárias e secundárias, até pela impossibilidade matemática de calculá-las.

Em virtude desses pontos, e também objetivando o embasamento científico, normalmente as Metas de Remediação Baseadas em Risco devem ser calculadas considerando a etapa de avaliação de exposição e o modelamento matemático de transporte a atenuação natural de contaminantes.

Além disso, recomenda-se que as metas baseadas em risco sejam sempre calculadas, mesmo nos casos onde a avaliação de risco não indica necessidade de remediação, pois estas servirão como parâmetros de controle para os programas de monitoramento de médio e longo prazo, os quais serão obrigatórios nessas circunstâncias.

É importante também ressaltar que o estabelecimento de metas baseadas em risco não substitui a quantificação dos riscos. Dependendo do modelo matemático utilizado para calcular essas metas, os resultados são apresentados por via de contato ou exposição e por contaminante, isto é: uma MRBR calculada para um contaminante específico e para a via, por exemplo, de volatilização para ambientes fechados a partir do solo contaminado indicará a maior concentração daquele contaminante no solo que implicaria em um nível de risco menor ou igual a aquele convencionado como aceitável. Da mesma forma, se considerar como via a volatilização para ambientes fechados a partir da água subterrânea contaminada, o resultado do modelo indicaria a maior concentração possível do

contaminante considerado naquele meio para que o limite de risco aceitável não fosse superado, e assim sucessivamente.

Essa forma de cálculo de metas de remediação trás consigo um problema conceitual importante que não pode ser negligenciado. Sob o ponto de vista de um receptor colocado em um determinado ponto de exposição, por exemplo, em um ambiente fechado, o que importa não é o risco calculado individualmente para um contaminante e para uma via específica, mas sim o risco total a que estaria exposto, considerando todas as vias e todos os contaminantes. Obviamente, o cálculo desse risco “total” não é corriqueiro ou muito menos imediato, mas esse fato não pode ser alegado para que este risco não seja minimamente avaliado. Por exemplo, considerando o benzeno como contaminante de interesse em uma situação de exposição em ambiente fechado onde tanto o solo quanto a água subterrânea estejam contaminadas, nesse caso pode existir uma situação onde as concentrações medidas no solo e nas águas subterrâneas estejam abaixo das MRBR, o que a primeira vista indicaria que não seria necessária a adoção de medidas de remediação. Nesse caso particular tomado como exemplo, sabe-se que o benzeno tem efeitos tóxicos e carcinogênicos, sabe-se também que a via de exposição (inalação) é a mesma independentemente do ponto de origem (solo ou água contaminada), portanto os níveis de risco para o mesmo receptor devem ser somados. Se isso for feito, é fácil demonstrar que as MRBR anteriormente calculadas não mais garantirão níveis riscos aceitáveis.

Finalmente cabe ressaltar enfaticamente que, nas oportunidades em que forem apresentadas metas de remediação, os analistas deverão fundamentá-las calculando em item específico a totalização dos riscos decorrentes dessas metas por receptor.

5.4. Exigências Técnicas ou Quesitos a Serem Atendidos

Portanto, sempre que for solicitada ou executada uma avaliação de risco, esta deverá ser desenvolvida de modo a atender os seguintes quesitos ou exigências técnicas:

- a) Informações Geradas na Etapa de Investigação Detalhada e Necessárias para a Avaliação de Risco.

Caso estas informações não tenham sido convenientemente apresentadas, as exigências abaixo serão válidas.

a1) Executar mapeamento espacial (plantas e cortes) das plumas de contaminação individualmente para cada um dos contaminantes identificados, em todos os meios afetados (ar do solo, solo, águas subterrâneas e produtos em fase, se existirem);

a2) Demarcar em planta as plumas acima mapeadas, contendo a demarcação dos lotes lindeiros, em escala 1:100 ou 1:500;

a3) Os limites de concentração mínimos a serem plotados nesse mapeamento, para solos e águas subterrâneas, serão:

- Valores orientadores de intervenção para o cenário agrícola ou de proteção máxima, no caso de solos;
- Valores orientadores de intervenção e padrões de potabilidade, as águas subterrâneas; e
- No caso dos solos, poder-se-á utilizar os valores Metas de Remediação desde que todas as vias de contato e todas as restrições de uso e tenham sido consideradas.

a4) Investigar e plotar, na planta acima referenciada, todos os poços rasos e profundos existentes em um raio de pelo menos 500 m a contar do centro de massa das plumas identificadas, mesmo no caso da área e seu entorno serem servidos pela rede pública de abastecimento. O levantamento de poços cadastrados no DAEE deve ser considerado apenas como indicativo, pois nem todos os poços têm outorga;

a5) Modelar o desenvolvimento espacial e temporal dessas plumas para um período mínimo de 10 anos ou até que se atinja um estado estacionário de transporte de massa;

b) Condicionantes Necessárias para o Desenvolvimento da Avaliação de Risco.

b1) Considerar como cenário de pior caso para população externa a colocação de um receptor hipotético nos limites de propriedade da área da fonte, sobre o ponto esperado de maior concentração de cada uma das plumas de contaminação e consumindo água subterrânea;

b2) Considerar sempre a possível via de contato com águas subterrâneas. A alegação de que a área e seu entorno são servidos por rede pública de abastecimento de

água e que, por isso, os receptores não fazem uso das águas subterrâneas não será considerada;

b3) A utilização de dados de monitoramento somente será considerada se os pontos de coleta de amostras forem coincidentes com os pontos de exposição, quando isso não acontecer, calcular as concentrações de contaminantes nos pontos de contato através de modelagem matemática;

b4) Utilizar, quando da modelagem matemática de fluxo e transporte de massa, os dados reais obtidos em campo ou em laboratório para os meios físicos considerados. Dados bibliográficos só serão aceitos se forem de trabalhos relacionados com a área em estudo;

b5) Avaliar tecnicamente e justificar, quando da utilização de dados de monitoramento para determinação das concentrações de contaminantes nos pontos de exposição, que estas concentrações serão as máximas observáveis;

b6) Na realização dos estudos para a avaliação de risco deverão ser adotados os "parâmetros de exposição" ou "parâmetros populacionais" estabelecidos no Documento: Ações Corretivas Baseadas em Risco (ACBR) Aplicadas a Áreas Contaminadas com Hidrocarbonetos Derivados de Petróleo e Outros Combustíveis Líquidos – Procedimentos (CETESB, 2008b), ou no relatório "Estabelecimento de Valores de Referência de Qualidade e de Intervenção para Solo e Água Subterrânea no Estado de São Paulo. (CETESB, 2001)

b7) Os dados relativos às características físico-químicas dos diferentes contaminantes devem ser obtidos na listagem "*EPA Region 9 PRGs InterCalc Tables: Phys-Chem Data*", disponível no site <http://www.epa.gov/region09>;

b8) Os dados toxicológicos dos diferentes contaminantes devem ser obtidos no banco de dados *IRIS*, <http://www.epa.gov/iris>, ou na listagem da "*EPA Region 9 PRGs Table*", disponível no site <http://www.epa.gov/region09>;

b9) Apresentar planilhas contendo os dados de entrada, os dados utilizados de "default" e os dados de saídas do modelo matemático utilizado;

b10) Os resultados relativos aos riscos carcinogênicos calculados, para cada uma das substâncias, devem ser somados quando se referirem a um mesmo receptor;

b11) Os resultados relativos aos cocientes de perigo calculados, para cada uma das substâncias devem ser somados para um dado receptor;

b12) Considerar como risco máximo aceitável para contaminantes cancerígenos a probabilidade de 10^{-5} e como coeficiente de perigo para contaminantes não cancerígenos o valor da unidade (1);

b13) Apresentar planilha relacionando os riscos carcinogênicos calculados por substância, assim como o risco total, para cada um dos receptores identificados;

b14) Apresentar planilha relacionando os coeficientes de perigo calculados por substância e por órgão afetado, assim como o coeficiente de perigo total, para cada um dos receptores identificados;

b15) Estabelecer as metas de remediação, mesmo no caso da avaliação de risco não indicar a necessidade de remediação, sempre através da utilização de modelagem matemática para que estes valores sirvam como referência para o monitoramento futuro e eventual tomada de decisão futura;

c) Restrições Institucionais.

Sempre que os cenários teóricos de exposição considerar a necessidade de imposição de restrições institucionais para garantia de riscos aceitáveis, as exigências abaixo serão válidas:

c1) Apresentar claramente, em item específico, todas as restrições que deverão ser impostas quanto à utilização das águas subterrâneas e quanto ao uso e ocupação do solo na área fonte (entendida como a área de propriedade da interessada) para validação dos modelos teóricos de exposição;

c2) Apresentar claramente, em item específico, todas as restrições que deverão ser impostas quanto à utilização das águas subterrâneas e quanto ao uso e ocupação do solo nos terrenos lindeiros à área fonte (entendida como a área de propriedade da interessada) para validação dos modelos teóricos de exposição;

c3) Apresentar claramente, em item específico, todas as restrições que deverão ser impostas aos trabalhadores de obras que eventualmente venham a ser realizadas na área fonte (entendida como a área de propriedade da interessada), nos terrenos lindeiros e nas vias públicas do entorno do empreendimento;

c4) Apresentar claramente, em item específico, quais restrições de obras construtivas (tais como: construção de porões, profundidade de fundações, construção de garagens subterrâneas, etc.) deverão ser impostas aos terrenos lindeiros à área fonte (entendida como a área de propriedade da interessada) para garantir que as premissas consideradas no modelo teórico de exposição sejam atendidas a médio e longo prazos;

c5) Apresentar planta caracterizando todos os lotes lindeiros sobre os quais deverão ser impostas restrições de construção, de utilização das águas subterrâneas e de uso e ocupação do solo, especificando-as para cada um deles;

c6) Apresentar planta caracterizando todas as vias públicas sobre as quais deverão ser impostas restrições quanto à execução e manutenção de obras e instalações, e quanto à obrigatoriedade da utilização de EPI's por trabalhadores;

c7) Apresentar estimativas tecnicamente fundamentadas sobre os períodos máximos de tempo para que as restrições necessárias à validação do modelo teórico de exposição decorrente das exigências técnicas c1, c2, c3 e c4 possam ser levantadas;

c8) Apresentar os dados e tabelas de quantificação de risco, conforme exigências b13 e b14, casos se optem por calcular as metas de remediação baseadas em risco e utilizá-las como metas de conformidade para tomada de decisão quanto à necessidade de remediação ou como meta a ser atingida em projetos de remediação;

d) Quanto às Propostas de Remediação Decorrentes da Avaliação de Risco.

Uma ação de remediação será sempre necessária nos casos onde os riscos calculados foram inaceitáveis. Será necessária também uma ação de remediação quando, para garantia de riscos aceitáveis, a imposição das eventuais restrições institucionais não for formalmente imposta pelas Autoridades Públicas Competentes.

d1) Apresentar e implantar, caso exista comprovação de fase livre, projeto executivo das medidas de remoção de produtos em fase, considerando um prazo máximo de remoção de 120 dias;

d2) Apresentar projeto executivo, caso necessário, incluindo cronograma de execução, das medidas de remediação que serão implementadas para garantir que as metas de remediação serão atingidas na intensidade e nos tempos previstos;

d3) Implantar o projeto acima, de acordo com o cronograma apresentado e acordado;

d4) Propor e implementar sistema de avaliação de eficiência e eficácia das medidas de remediação propostas sobre as concentrações calculadas nos pontos de exposição, e

d5) Apresentar projeto de medidas de contingência (medidas complementares de remediação) que deverão ser tomadas caso a eficiência e eficácia das medidas previamente acordadas não atendam àquelas previstas nos projetos aprovados.

6. TECNOLOGIAS EMPREGADAS NA REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS COM HIDROCARBONETOS

Conforme EUGRIS (2008), as tecnologias de remediação podem ser categorizadas em:

a) **Tratamentos biológicos:** processos nos quais os contaminantes são transformados em substâncias como dióxido de carbono, água, biomassa em função da ação de microorganismos. Em geral estes processos são de baixo custo e não há necessidade de tratamento residual, mas requer tempo e é difícil verificar se os contaminantes foram destruídos por completo.

b) **Tratamentos físico-químicos:** aqueles que usam as propriedades físicas e/ou químicas e/ou elétricas do contaminante e/ou do meio contaminado para destruir (conversão química), separar ou conter a contaminação. Nos processos químicos, a estrutura e o comportamento químico das substâncias são alterados por meio de reações químicas a fim de produzir compostos menos tóxicos. Tais tratamentos apresentam boa relação custo-benefício e, se comparados aos processos biológicos, são rápidos.

c) **Processos térmicos:** aqueles que usam o calor para aumentar a volatilidade, queimar, decompor, destruir ou dissolver os contaminantes. Embora sejam uma alternativa rápida são, em geral, os mais caros.

A Agência Ambiental do Reino Unido, (ENVIRONMENT AGENCY UK, 2002) categoria de maneira diferente as opções de remediação:

a) **Sistemas de Contenção:** aqueles que fisicamente impedem o transporte dos contaminantes. Exemplos: fendas, cobertura e barreiras.

b) **Processos biológicos:** a eliminação, atenuação ou transformação dos contaminantes usando processos biológicos. Exemplo: biopilhas.

c) **Processos químicos:** a transformação, destruição ou concentração de contaminantes por meio de reagentes químicos. Exemplo: oxidação química.

d) **Solidificação/Estabilização:** fixação de contaminantes e/ou encapsulamento físico para diminuir a disponibilidade e mobilidade dos contaminantes. Exemplos: solidificação e encapsulamento.

e) Processos físicos: separação e/ou concentração de contaminantes fazendo uso das diferentes propriedades físico-químicas dos contaminantes e do solo e/ou água. Exemplos: extração de vapor, lavagem e barreiras permeáveis reativas.

f) Processos térmicos: visam destruir ou concentrar contaminantes via aquecimento do solo ou água. Exemplo: incineração.

g) Outros: esta categoria inclui técnicas para remoção de solos e/ou águas contaminadas do local contaminado e mecanismos para controle de receptores.

O controle e a redução dos riscos podem ser realizados de várias maneiras, todas com suas vantagens e limitações de acordo com o caso. Assim, todos os fatores que se relacionam ao local a ser gerenciado devem ser levados em consideração na determinação de qual opção ou conjunto seja mais adequado.

Segundo Nunes e Corseuil (2007) para a remediação de solos e águas subterrâneas impactadas com hidrocarbonetos de petróleo são utilizadas diversas tecnologias que podem ser classificadas em tecnologias ativas e passivas.

Dentre os métodos de remediação as autoras destacam: a Biorremediação; Escavação, Remoção e Destinação do solo; Bombeamento e Tratamento das água subterrânea (*Pump and Treat*); Recuperação de Fase Livre; Extração Multifásica (*Biosplurping e MPE*); Extração de Vapores do Solo; Injeção de Ar (*Air Sparging*); Atenuação Natural Monitorada; Barreira Hidráulica; Barreiras Reativas Permeáveis (*BRP's*); Estabilização; Biopilha; Tecnologias Térmicas (*Thermal Enhanced*); Oxidação Química, entre outras.

No Estado de São Paulo, conforme dados da CETESB, as técnicas mais utilizadas para remediação de áreas contaminadas são: o bombeamento e tratamento, a recuperação de fase livre e extração multifásica para o tratamento das águas subterrâneas e a extração de vapores e a remoção de solo/resíduo para os solos. As demais técnicas empregadas podem ser visualizadas na figura 7.

A figura 7 demonstra as técnicas mais utilizadas para remediação de áreas contaminadas no Estado de São Paulo, conforme dados da CETESB.



Figura 7 – Sistemas de remediação implantados no Estado de São Paulo

Fonte: CETESB, novembro de 2007

O método a ser empregado dependerá de fatores físicos, geológicos, hidrogeológicos, bioquímicos e espaço físico para seu desenvolvimento. Além de fatores socio-econômicos, tais como riscos a saúde humana, viabilidade econômica e legislações ambientais vigentes. (PUJOL, 2007)

Cabe aqui ressaltar que, independente da solução adotada, ela deve ser aplicada conforme as condições intrínsecas e singulares a cada sítio contaminado. Dessa forma, as técnicas de remediação devem atender não somente às características físico-químicas dos contaminantes envolvidos como também à aplicabilidade dos mesmos nas condições

hidrogeológicas específicas do sítio impactado. E isso dentro de objetivos que atendam a legislação ambiental e que sejam compatíveis com o risco que a contaminação representa. (NOBRE, NOBRE, 2008)

6.1. Barreira hidráulica

A utilização de barreiras hidráulicas para contenção de plumas de contaminação é historicamente uma das primeiras formas de remediação que foram utilizadas. Uma barreira hidráulica consiste na instalação de uma seqüência de poços de bombeamento de forma a interceptar a pluma de contaminação, assegurando que não haja progresso da contaminação além do limite estabelecido pela barreira. (OLIVEIRA, 2008)

Os poços de extração de água subterrânea são situados na região compreendida pela água subterrânea contaminada, de tal forma que o cone de rebaixamento do nível freático originário do processo de extração atinja toda a extensão da pluma e inverta o fluxo local, evitando assim que ela continue a ser transportada na direção geral de fluxo da água subterrânea. (TECNOHIDRO, 2008)

A aplicação do vácuo nos poços de extração cria um gradiente de pressão dirigido para os pontos dos quais a água subterrânea é extraída. O gradiente de pressão é diretamente proporcional ao vácuo aplicado. Assim, a eficiência na extração das diferentes fases do contaminante será função do sistema a ser implantado. (TECNOHIDRO, 2008)

Esta é uma técnica de contenção da evolução da pluma, funcionando também como remediação, uma vez que a água produzida deve ser tratada em superfície.

Segundo Oliveira (2008) a remediação da contaminação de solo e água subterrânea pela utilização da barreira hidráulica foi denominada em inglês de 'pump-and-treat', bombeamento e tratamento. A experiência mostrou que o nome deveria ser alterado para 'pump-pump-pump-pump-pump-and-treat', uma vez que os processos de transferência de massa do contaminante para água subterrânea são muito lentos, a quantidade de água que deve ser bombeada é muito grande, e o tempo de operação pode facilmente chegar às dezenas de anos. Esta perspectiva, embora extremamente agradável para os consultores, não soa tão bem aos ouvidos dos responsáveis pelo pagamento da remediação. Em inúmeros casos a barreira hidráulica é a única forma de remediação que se pode utilizar, devido a dificuldades de acesso ao contaminante, como profundidade do aquífero

contaminado, por exemplo. Em vários outros casos, a utilização da barreira hidráulica serve como uma técnica acessória, permitindo que a remediação das áreas-fonte seja realizada de forma segura, enquanto a barreira garante que o contaminante em fase dissolvida não evolua e atinja eventuais receptores potenciais a jusante da área impactada.

A utilização adequada desta técnica é de importância vital no planejamento da remediação, uma vez que a água subterrânea trazida para a superfície passa a ser tratada como efluente, devendo ter seu tratamento e destino adequados, implicando em custos de ampliação ou instalação de estação de tratamento específico. Além disso há situações não incomuns em indústrias químicas, como a presença de corpos d'água nas proximidades da área contaminada. Como a barreira hidráulica baseia-se no rebaixamento do nível d'água, é possível que ocorra uma inversão de fluxo suficiente para que seja bombeada água do corpo superficial para a barreira. Uma barreira colocada ao longo de um córrego ou rio, por exemplo, pode trazer água deste para si. Caso a água do corpo superficial seja de má qualidade, corre-se o risco de ter que se tratar água superficial em conjunto com a contaminação. É importante salientar que esta tecnologia bem empregada ainda representa um dos grandes triunfos do conhecimento de hidráulica subterrânea. (OLIVEIRA, 2008)

6.2. Biorremediação

A Biorremediação consiste na utilização de seres vivos ou seus componentes na recuperação de áreas contaminadas e geralmente são processos que empregam microorganismos ou suas enzimas para degradar compostos poluentes. A Biorremediação pode ser empregada para atacar contaminantes específicos no solo e águas subterrâneas, tais como a degradação de hidrocarbonetos do petróleo e compostos orgânicos clorados pelas bactérias. (TRINDADE, 2002)

No processo de biorremediação, os microorganismos digerem substâncias orgânicas presentes no solo ou na água subterrânea, transformando-as principalmente em dióxido de carbono e água, sendo que fatores como temperatura, quantidade de nutrientes e oxigênio, devem estar em condições ideais para possibilitar o desenvolvimento dos microorganismos.

As tecnologias de Biorremediação podem geralmente ser classificadas como *in-situ* ou *ex-situ*. A Biorremediação *in-situ* envolve tratar o material contaminado no próprio local, enquanto a *ex-situ* consiste na remoção do material contaminado para tratamento em

local externo ao de sua origem. Entretanto, nem todos os contaminantes são facilmente tratados pela biorremediação. Por exemplo, os metais pesados tais como o cádmio e o chumbo não são absorvidos nem capturados prontamente pelos microorganismos, porém, podem ser transformados em compostos menos perigosos. A assimilação dos metais tais como o mercúrio na cadeia alimentar pode agravar o caso. A Fitorremediação é útil nestas circunstâncias, pois muitas plantas são capazes de bioacumular estas toxinas em suas partes acima da superfície, que são colhidas então para a remoção. (TECNOHIDRO, 2008)

Por ser um processo natural promove um tratamento adequado ao meio, seu custo é relativamente baixo quando comparado à outras alternativas convencionais de tratamento de resíduos sólidos. Não obstante, para se obter elevado rendimento no processo, é necessário se determinar quais são as condições que favorecem a atividade microbiana, como por exemplo: meio anóxico, teor de nutrientes elevado, tempo de retenção, atividade enzimática, temperatura, pH, e inóculo aclimatado ao meio tóxico, sendo assim capaz de tratá-lo adequadamente. (TECNOHIDRO, 2008)

6.3. Escavação, remoção e destinação do solo

A escavação, remoção e destinação do solo consiste na substituição de solo contaminado por solo limpo, que é escavado e destinado para tratamento adequado. Como forma de destinação adequada podemos citar co-processamento, disposição final em aterro industrial, incineração entre outras.

6.4. Bombeamento e tratamento

Conforme afirmam NOBRE e NOBRE (2008), os sistemas de contenção hidráulica convencionais – *Pump & Treat* – são ainda utilizados na maioria dos sítios contaminados e utiliza sistema provido de bombas, elétrica ou pneumáticas, para captação das águas subterrâneas impactadas com tratamento adequado para os compostos de interesse. O bombeamento e tratamento também pode ser utilizado como espécie de barreira de contenção (linha de poços de bombeamento conhecida como barreira hidráulica), que altera as condições hidrológicas do local e impedindo que a contaminação siga o fluxo subterrâneo natural.

Apesar da necessidade de remover grandes volumes de água do subsolo, de forma a extrair os contaminantes, essa metodologia pode ser uma medida eficiente de remediação, em certas condições, devido às lentas taxas de desorção e dissolução dos compostos. (NOBRE, NOBRE, 2008)

Os sistemas de bombeamento de águas subterrâneas bem executados podem controlar a migração da pluma para regiões mais afastadas, permitindo a remoção de fontes secundárias da contaminação, além de ser uma necessidade indiscutível antes da implementação da maioria das tecnologias de remediação, em áreas que apresentam fase livre de contaminante.

6.5. Extração multi-fásica

A Extração Multi-fásica (MPE), tecnologia de remediação no local também conhecida como extração de fase dupla ou *bislurping*, segundo Roche (2006), consiste no bombeamento para a remoção de produto em fase livre, água subterrânea com compostos dissolvidos e vapor do solo. É um tecnologia eficiente quanto à redução da concentração de hidrocarbonetos na zona não saturada do solo.

O Sistema de Extração Multi-fásica ocorre por meio da instalação de um sistema de ventilação a vácuo em poços de extração distribuídos na área de interesse, visando criar uma zona de influência do sistema em toda a extensão da pluma de contaminação e 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. (TECNOHIDRO, 2008)

Por meio 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.

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. (TECNOHIDRO, 2008)

A aplicabilidade deste método de remediação implica em altos benefícios para o local contaminado, desde que o trabalho esteja dentro da faixa hidrogeológica indicada e das propriedades do contaminante.

Quando o nível da água subterrânea atinge profundidade superior a 10 m, recomenda-se a utilização de um sistema que combine a extração de vapores por vácuo com o bombeamento convencional do produto em fase livre e da água subterrânea. O sistema de duas bombas submersas pode ser empregado para resolver a limitação de profundidade, permitindo o aumento do fluido e recuperação do local.

Ackermanm (2004) afirma que esta tecnologia de remediação apresenta uma vantagem sobre o bombeamento simples, pois esta permanece operacional mesmo se a superfície das águas subterrâneas estiver abaixo do ponto de sucção e o ar entrar no tubo de sucção.

No Sistema de Extração Multi-fásica promove-se o acompanhamento da performance de extração da fase livre e da fase vapor na área em estudo, tomando como base a velocidade de extração; vazão e volume de água; pressão; Compostos Orgânicos Voláteis (VOC); pH; potencial de oxiredução; condutividade; volume recuperado de fase livre; nível d'água dos poços de monitoramento; espessura de fase livre. (TECNOHIDRO, 2008)

Os custos da remediação multi-fásica comparados à remediação tradicional são superiores, isso se deve aos equipamentos e acessórios complementares que este tipo de tratamento requer. A utilização da bomba de vácuo ou ventilação e a válvula que dá suporte ao coletor de vácuo são alguns dos instrumentos que encarece o método. O tratamento da fase de vapor pode ser por carbono ativado ou destruição catalítica ou térmica, pode ser necessário para tratar o vapor recuperado do solo. Algumas bombas de vácuo podem emulsificar NAPL na camada líquida, o produto emulsificado deve ser separado da camada de líquido por separação gravimétrica ou outras formas de processo de tratamento. A partida do sistema e seus períodos de ajustes podem ser longos devido à necessidade de otimizar o fluxo, pressão do vácuo e o rebaixamento do lençol freático realizado em todo o local a ser recuperado e deve atender às exigências do monitoramento.

A maior limitação da técnica de extração multifásica é a profundidade das configurações, como *bioslurping*, que são usados para recuperação LNAPL.

6.6. Extração de vapores do solo

O Sistema de Extração de Vapores no Solo (SVE) é uma tecnologia de remediação aplicada para a zona não saturada (TECNOHIDRO, 2008). Essa tecnologia consiste na aplicação de vácuo com o objetivo de induzir o fluxo de ar a remover contaminantes voláteis e semivoláteis do solo.

O gás retirado pela extração de vapores do solo deve passar por uma unidade de tratamento de vapores. Extrações verticais são utilizadas em profundidades que variam de 1,5 a 90 m. Extrações horizontais (instalações em trincheiras ou furos horizontais) podem ser instaladas para aumentar a segurança, dependendo da geometria da pluma e outras especificidades, e ainda, o fato de o processo envolver fluxo contínuo de ar no solo promove biodegradação *in situ* dos compostos de baixa volatilidade que podem estar presentes. (TECNOHIDRO, 2008)

O rebaixamento do lençol freático pode ser utilizado para reduzir a elevação do nível d'água no poço induzido pelo vácuo ou aumentar a faixa de zona não saturada. A injeção de ar é efetiva para facilitar a extração de contaminantes em profundidades com baixa permeabilidade e em zona saturada. (TECNOHIDRO, 2008)

A extração de vapores é um método viável para a remediação de determinado site por dois parâmetros chaves como: permeabilidade do solo contaminado por combustíveis, que determina a taxa pela qual os vapores podem ser extraídos e pela volatilidade dos contaminantes, que determina a taxa e o grau pelo qual os contaminantes passam do estado de vapor no solo.

Para aplicação desta tecnologia é necessário dados que incluem a profundidade e área de extensão da contaminação, a concentração de contaminantes, a profundidade de nível d'água, o tipo de solo e as propriedades do mesmo (estrutura, textura, permeabilidade e umidade). Ensaio piloto devem ser realizados para obter informações de desenho, incluindo raio de influência dos poços de extração, taxas de fluxo de gás, vácuo ótimo aplicado e taxas de remoção de contaminantes.

Segundo EUGRIS (2008), EPA (2004), são inúmeras as vantagens deste método de remediação:

- a) O equipamento requer pouca atenção durante a operação.
- b) Pouca chance de vazamento durante a aplicação da técnica, pois os contaminantes estão sob vácuo.
- c) Tecnologia conhecida e aplicada e facilmente combinada com outros métodos (biorremediação).
- d) Disponibilidade de equipamento, fácil instalação e tempo de tratamento curto (de 6 meses a 2 anos).
- e) Competitividade de custos.
- f) Pode ser utilizada sob edificações e outros locais que não podem ser escavados.

Ainda segundo EUGRIS (2008), EPA (2004) as desvantagens do método SVE podem ser assim consideradas:

- a) Altas concentrações de matéria orgânica que limitam a volatilização, podendo requerer tratamentos custosos para a liberação dos vapores na atmosfera.
- b) Solos com alta porcentagem de saturação requerem vácuos mais altos, aumentando o custo e dificultando a operação "*in-situ*".
- c) Redução de concentrações para níveis inferiores a 90%, que são dificilmente atingíveis.
- d) Efetividade incerta quando aplicados a solos com baixa permeabilidade e estratificados.
- e) Aplicável somente a zonas não saturadas do solo.

Segundo Ackermanm (2004), a extração de vapores do solo (SVE) não deve ser utilizada em solos densos, pois é necessário que ocorra uma ventilação eficiente nos poros. Outro fator que limita a eficiência das operações de SVE é a subpressão.

De acordo com a Tecnohidro (2008) existem ainda outros fatores limitantes da utilização desta tecnologia

- a) Os solos com permeabilidades variáveis podem resultar em envio de fluxo de gás para regiões não contaminadas, uma vez que grandes intervalos de filtro são necessários nos poços de extração;
- b) Os solos com alto índice de matéria orgânica ou extremamente secos apresentam alta capacidade de absorção de VOC, o que resulta em redução de taxas de remoção;
- c) O controle da emissão gasosa pode ser necessário para eliminar possíveis danos ao público e ao meio ambiente;
- d) O resultado da produção de efluentes gasosos, líquidos residuais e resíduos, poderá requerer tratamento com carvão ativado; e
- e) O SVE não é efetivo em zona saturada. Porém, pode-se conjugar o rebaixamento do lençol freático para ocorrer maior exposição de zona não saturada.

Apesar das limitações, esta tecnologia é de baixo custo e pode ser resumida em: escavação de solo, pilha de solo escavado envolta em plástico, instalação de poços de SVE na pilha e extração de gás (ACKERMANM, 2004).

6.7. Injeção de ar (*air sparging*)

Air sparging e biosparging – ambas as tecnologias *in situ* que utilizam a injeção de ar na água subterrânea (zona saturada). O air sparging introduz ar no aquífero contaminado, produzindo borbulhamento da água, que provoca por arraste a remoção dos contaminantes da água subterrânea por volatilização. O biosparging injeta ar em menor quantidade, produzindo a volatilização dos compostos em menor escala. O principal objetivo é aumentar a biodegradação dos hidrocarbonetos dissolvidos na água subterrânea. (ROCHE, 2008)

O Air Sparging deverá ser utilizado em conjunto com um Sistema de Extração de Vapores (SVE), para onde os contaminantes são carregados. 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 VOC e combustíveis derivados de petróleo. (TECNOHIDRO, 2008)

Segundo a Tecnohidro (2008) os fatores que podem limitar a aplicabilidade e eficiência do processo são os seguintes:

- a) Profundidade da contaminação e do nível d'água local;
- b) Tipos litológicos pouco permeáveis;
- c) A injeção de ar deve ser projetada para condições específicas;
- d) 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, taxa de fluxo d'água, permeabilidade do aquífero, volatilidade do contaminante e a sua solubilidade.

6.8. Barreiras reativas permeáveis (*brps*)

As barreiras reativas permeáveis são utilizadas na área da remediação de solos uma vez que possibilitam a degradação *in-situ* dos contaminantes e consiste na criação de barreira física a jusante da pluma de contaminação que têm como objetivo que durante o deslocamento da pluma por intermédio de porções reativas construídas na própria barreira física, com permeabilidades mais elevadas, como parte do sistema “*funnel and gate*” e promovem o tratamento por meio de reações químicas e/ou biológicas.(NOBRE, NOBRE,2008)

6.9. Estabilização

Utiliza a adição de compostos químicos ao solo e água subterrânea que por meio de reações químicas estabilizam ou modificam quimicamente os contaminantes tornando-os menos perigosos a saúde humana. (PUJOL, 2008)

6.10. Tecnologias térmicas (*thermal enhanced*)

Utiliza o calor como forma de remediar compostos orgânicos persistentes ao meio, como borras de óleo e compostos clorados de difícil biodegradação. O calor utilizado

objetiva a redução da pressão de vapor dos contaminantes, redução da viscosidade, tensão superficial e aumento da solubilidade da maioria dos compostos, além de acelerar o processo de Biorremediação. Esta técnica geralmente é empregada concomitante a outras tecnologias para captação dos contaminantes desprendidos no aquecimento tais como Extração Multifásica, Extração de Vapores e Bombeamento e Tratamento. As formas mais conhecidas que utilizam o emprego do calor no solo e água subterrânea são: a Injeção de Vapor de Água, Injeção de Ar Quente, Aquecimento por Radio-frequência; Aquecimento por Eletrodos e por Resistência Elétrica. (PUJOL, 2008)

6.11. Oxidação química

As tecnologias de oxidação química utilizam compostos químicos para transformar os contaminantes *in-situ*, sendo uma das técnicas mais inovadoras e emergentes para remediação de áreas contaminadas, que utiliza compostos químicos altamente oxidantes, como Peróxido de Hidrogênio, Permanganato de Potássio entre outros. A sua aplicação no solo e água subterrânea promove reação química de oxi-redução dos compostos orgânicos transformando-os em formas não tóxicas na maioria dos casos. (TECNOHIDRO, 2008)

Conforme Furtado (2005) em solos muito argilosos, onde é difícil a injeção de nutrientes utiliza-se, comumente, Processos Oxidativos Avançados - POA, utilizando agente "Fenton" (peróxido de hidrogênio + catalisador). Normalmente, é utilizado o ferro como agente catalisador, o que gera radicais hidroxilas livres, que oxidam os compostos orgânicos presentes no meio. O peróxido de hidrogênio residual decompõe-se em água e oxigênio e o ferro sofre precipitação. Essa inserção é um processo mais rápido, que deve ser aplicado quando não há fase livre contaminante. (TECNOHIDRO, 2008)

6.12. Atenuação natural monitorada

A Atenuação Natural Monitorada – ANM é considerada uma estratégia de remediação passiva, isto é, sem a intervenção do homem (CORSEUIL *et al*, 1996). Esta tecnologia está baseada na atenuação natural (redução de massa, concentração e mobilidade dos contaminantes na água subterrânea ao longo do tempo e distância do local de derramamento) devido a processos físico-químicos e biológicos naturais.

O processo de ANM em águas subterrâneas, baseada nos princípios naturais de degradação *in-situ*, resulta da interação de uma série de mecanismos no subsolo que são classificados como “destrutivos” ou “não-destrutivos”. Com diversas denominações – atenuação natural, bioatenuação, biorremediação intrínseca, remediação natural e atenuação natural monitorada – essa tecnologia de remediação vem ganhando popularidade e se solidificando no mercado como uma alternativa viável para os casos em que são confirmadas as condições biogeoquímicas favoráveis à ocorrência das reações naturais. (NOBRE, NOBRE, 2008)

A biodegradação aeróbica ou anaeróbica é considerada o processo mais relevante para a redução da massa de contaminantes no subsolo. Processos de atenuação não-destrutivos, por outro lado, incluem a dispersão, diluição (por recarga), volatilização e adsorção nas partículas do solo. Embora seja uma alternativa adicional para o tratamento de aquíferos contaminados, essa tecnologia normalmente demanda um maior período de tempo para atingir os critérios de tratamento estabelecidos para o sítio. (NOBRE *et.al*, 2002)

6.13. Biopilhas

A tendência da tecnologia de remediação de solo é resolver os problemas no local, “*in-situ*”, contudo as tecnologias opostas, “*ex-situ*”, que vão de simples remoção do solo para destruição e aterramento, ou da água para tratamento, até o uso de biopilhas. Essa tecnologia pode ser implementada “*on-site*” ou “*off-site*”, na qual o tratamento da área contaminada ocorre após a escavação.

O solo é colocado em camadas ou pilhas construídas a fim de promover a degradação de contaminantes orgânicos por meio do aumento da atividade microbiana aeróbica, obtido com a adição de oxigênio, nutrientes e umidade às pilhas, resultando na degradação de hidrocarbonetos adsorvidos nas partículas de solo por meio da respiração microbiana, principalmente a bacteriana. O tratamento é conhecido como biocélulas, pilhas de compostos ou biopilhas, o qual é utilizado também para reduzir a concentração dos constituintes de petróleo.

A remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos utilizando o método de biopilhas é muito semelhante ao landfarming, porém o que os diferencia é a forma de aeração que no caso do primeiro tratamento a aeração é forçada, injetada na pilha.

O método de biopilhas promove a remoção e empilhamento de solos contaminados, os quais são misturados com matéria orgânica, instalando-se tubulações para aeração e injetando nutrientes para incentivar a biodegradação.

Segundo a EPA (2004), a tecnologia de biopilhas é específica para reduzir a concentração de constituintes de petróleo em áreas contaminadas em função de vazamentos de dutos e tanques de armazenamento subterrâneo, com ressalva à gasolina, que por ser mais volátil, tem a tendência de evaporar durante a aeração.

Tabela 2: Vantagens e Desvantagens das Biopilhas

Vantagens	Desvantagens
<p>Projeto e implementação relativamente simples;</p> <p>Tempo de tratamento curto, em média de 06 meses a 02 anos;</p> <p>Custo competitivo;</p> <p>Eficiência dos constituintes orgânicos com baixo índice de biodegradação;</p> <p>Requer área menor que o processo de landfarming;</p> <p>Pode ser desenvolvido em locais fechados e é possível controlar as emissões dos gases;</p> <p>Pode ser projetado para ter maior eficiência de acordo com a combinação realizada de solo e produtos do petróleo a serem degradados.</p>	<p>Redução da concentração > 95% e concentração dos constituintes < 0,1 ppm são difíceis de realizar;</p> <p>Pode ser ineficiente diante de constituintes de alta concentração (> 50.000 ppm de hidrocarboneto de petróleo total);</p> <p>Presença significativa de metais pesados (>2.500 ppm) pode inibir o crescimento bacteriano;</p> <p>Constituintes voláteis têm tendência a evaporar mais que em um processo de biodegradação normal;</p> <p>Requer grande área para o tratamento do solo contaminado, porém inferior à necessária ao tratamento de landfarming;</p> <p>A geração de vapores gerados durante a aeração do solo contaminado pode alterar a qualidade do ar;</p> <p>Pode requerer proteção na linha de fundo se houver lixiviação no processo.</p>

Fonte: Elaborada pelos autores com dados da EPA(2004)

De acordo com a agência ambiental do Reino Unido (ENVIRONMENT AGENCY UK, 2002), este tipo de tecnologia tem sido eficiente nas áreas contaminadas por: BTEX

(benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos) – hidrocarbonetos monoaromáticos, presentes nos combustíveis.

O construção da biopilha considera o local a ser desenvolvido o tratamento do solo contaminado, deve ter a altura máxima de 2,4 m, segundo a orientação do Reino Unido e até 3,0m, de acordo com a EPA, a forma de injeção de ar e o tratamento dos vapores a serem liberados, a extração dos vapores contaminados, a quantidade de nutrientes a ser fornecida para as bactérias, a faixa de pH e temperatura ideais, o controle da umidade e deve considerar se há necessidade e condições de abrigar a biopilha das agressões naturais, como chuva e vento, fornecer acesso adequado para manutenção do processo e monitoramento da área contaminada.

O sistema operacional e de monitoramento da biopilha deve ser planejado e deve conter a frequência da aeração, da adição de nutrientes e da adição de umidade ao solo. O planejamento deve ser específico para todas as estações do ano e os procedimentos devem estar determinados para períodos chuvosos, de seca e se necessário neve, dependendo da região. O controle da temperatura, pH, umidade, textura, nutrientes, toxicidade, volatilização dos compostos, chorume, lençol freático e a resposta do solo ao tratamento devem ser constantemente monitorados. Os resultados do monitoramento são avaliados e a partir deles, se necessário, é possível realizar ajustes na frequência da aeração, na quantidade de nutrientes fornecidos, na quantidade e frequência da adição de umidade e no pH do solo, a fim de obter o máximo de biodegradação da área contaminada.

O tempo de tratamento varia entre seis meses e dois anos, dependendo do nível de remediação estabelecido, de acordo com a EPA (2004).

7. CUSTOS PARA REMEDIAÇÃO

Os custos para remediação de uma área contaminada será efetuado com base no cálculo de custo/benefício, levando em consideração os valores experimentais, pedidos de orçamentos sem compromisso e literatura técnica, medidas remediadoras comparáveis, após a avaliação técnica dos cenários de remediação.

Os custos podem ser divididos nos seguintes itens: investigação confirmatória, investigação detalhada, avaliação de risco, concepção da remediação e projeto de remediação, plano de intervenção, serviços de acompanhamento e manutenção da obra de implantação, operação do sistema de remediação, despesas com pessoal, análises e tratamento dos resíduos, monitoramento na operação do sistema e serviços futuros, principalmente medidas de autocontrole após conclusão das ações de remediação, contenção e restrição.

Entre as despesas adicionais não se deve computar as verbas para imprevistos, as quais devem ser contabilizadas separadamente. Todos os itens devem ser acompanhados com comentários pertinentes sobre a verba despendida, visando permitir a compreensão dos serviços envolvidos no cenário.

Nos serviços preliminares serão incluídos os custos relativos aos desembolsos com planejamento e supervisão da obra, perito, coordenador do projeto e monitoração terceirizada.

Os principais custos envolvem os serviços de construção e de processo para as correspondentes ações de descontaminação e/ou de contenção/ isolamento.

Os custos dos serviços de acompanhamento e manutenção da obra de implantação, operação do sistema de remediação, também podem compreender a proteção do trabalho e contra emissões, terraplenagem, vedações, demolição, escoamento de água, reaproveitamento e disposição de resíduos, análises e medições.

Deve-se ressaltar que os custos futuros são despesas envolvendo o pós-tratamento e operações de longo prazo (por exemplo, depuração de água subterrânea, extração de vapores do solo, contenção/isolamento), pois poderá ocorrer a operação contínua de máquinas e equipamentos, que implica na conservação, manutenção e renovação parcial de construções, equipamentos, dispositivos de medição e controle, monitoramento das vias de exposição e vigilância por períodos de tempo razoáveis.

É recomendável, dependendo da área contaminada, incluir os custos de investimento de capital, depreciações/amortizações, e ainda, acrescentar os valores em função dos usos legais futuros da área fonte e de seus entornos, após a remediação, mais interessante financeiramente.

A figura 8 ilustra que os custos do processo de remediação estão diretamente envolvidos com a concentração de poluentes e o cenário teórico de exposição na avaliação de risco.

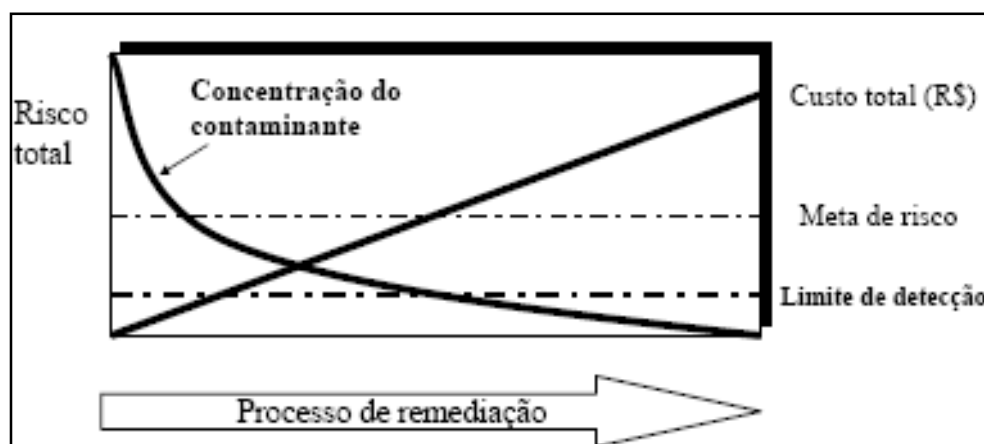


Figura 8 – Custos do processo de remediação em função da avaliação do risco

Fonte: adaptado de Maximiano, 2006

A título de exemplo, são apresentados a seguir alguns custos, no entanto, a exemplificação não envolve a totalidade das etapas que compõe o processo total de remediação de uma área contaminada por hidrocarboneto. Os valores apresentados são referentes a setembro/2007 e fornecidos pela Petrobras Distribuidora S.A.

a) Teste de estanqueidade:

De R\$ 220,00 a R\$ 280,00 por Sistema de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis - SASC (01 tanque de 15 ou 30 m³ e suas respectivas tubulações).

NOTA: Tanques de mais de um compartimento são cobrados à parte e mobilização variável em função da distância.

b) Levantamento de passivo ambiental:

- Aquíferos freáticos rasos (< 7 m):

De R\$ 11000,00 a R\$ 15000,00.

- Aquíferos freáticos profundos (> 7 m):

De R\$ 15000,00 a R\$ 26000,00.

NOTA: varia em função da área do posto, número de tanques e profundidade do aquífero freático e mobilização variável em função da distância.

- Investigação ambiental detalhada/confirmatória:

De R\$ 4000,00 a R\$ 13000,00.

NOTA: idem ao item anterior para variações.

c) Análise de risco:

- Tier 2 - R\$ 2000,00 a R\$ 4000,00 (incluindo coleta de amostra indeformada para avaliação de parâmetros físicos);

- Tier 3 - maior que R\$ 50000,00 (varia principalmente em função da área do posto, profundidade e espessura do aquífero freático).

d) Destinação de resíduos sólidos:

De R\$ 800,00 a R\$ 1500,00 por tambor de 200 litros.

e) Destinação de líquidos:

De R\$ 300,00 a R\$ 900,00 por tambor de 200 litros.

f) Remediação de fase livre:

De R\$ 10000,00 a R\$ 100000,00 - variável em função da área da pluma de fase livre e espessura da lâmina.

g) Remediação de fase dissolvida:

De R\$ 50000,00 a R\$ 500000,00 - pode ser mais alto caso haja outros contaminantes além de hidrocarbonetos.

NOTA: A presença de DNAPL, por exemplo, pode elevar os custos para mais de R\$ 1000000,00.

h) Monitoramento Analítico de Água Subterrânea:

De R\$ 300,00 a R\$ 550,00 por poço de monitoramento, para os parâmetros BTEX e PAHs.

NOTA: Para a inclusão do parâmetro Etanol, multiplicar o valor total por 1,3 e mobilização à parte e variável em função da distância.

i) Relatórios:

De R\$ 200,00 a R\$ 1000,00 por relatório.

NOTA (6): Relatórios especialmente complexos (revalidações de análises de risco, alterações de operação de sistemas de remediação podem custar até o triplo).

Com a finalidade de comparar os custos de um sistema de remediação, pesquisou-se junto as empresas consultorias os custos para as principais tecnologias de remediação utilizadas na recuperação de áreas contaminadas por hidrocarboneto. Na tabela 3 são apresentados os custos das tecnologias de remediação utilizadas em site's industriais e em postos de combustíveis.

Tabela 3: Custos de tecnologias para remediação de áreas contaminadas

Tecnologia de Remediação	Empreendimento	Projeto R\$	Implantação R\$	Operação R\$
Barreira Hidráulica	Indústria	45.000,00	130.000,00	5.000,00
Biorremediação	Posto	15.000,00	25.000,00	20.000,00 por campanha quadrimestral
Escavação, remoção e destinação do solo	Posto	15.000,00	20.000,00	450,00 ton
Bombeamento e tratamento	Posto	15.000,00	40.000,00	3.500,00
Extração Multi-fásica	Posto	15.000,00	40.000,00	6.500,00
Extração de vapores no solo	Posto	15.000,00	40.000,00	7.000,00
Injeção de ar (<i>Air Sparing</i>)	Posto	15.000,00	40.000,00	7.000,00
Barreiras reativas permeáveis	Indústria	40.000,00	120.000,00	4.000,00
Estabilização	Indústria	30.000,00	50.000,00	4.000,00
Tecnologias térmicas (<i>Thermal Enhance</i>)	Indústria	120.000,00	250.000,00	
Oxidação química	Indústria	55.000,00	150.000,00	100.000,00 por campanha quadrimestral
Atenuação natural monitorada	Posto	15.000,00	20.000,00	20.000,00 por campanha quadrimestral
Biopilhas	Indústria	25.000,00	200,00 ton	5000,00 ton

Fonte: Tecnohidro – Outubro (2008)

8. INSTRUMENTOS DE GESTÃO DA CETESB PARA O LICENCIAMENTO DE POSTOS DE COMBUSTÍVEIS

Na década de 70 houve um aumento considerável no número de postos varejistas de combustíveis implantados no país. Os equipamentos, bem como as tubulações das referidas instalações, apresentavam tempo de vida útil estimada de 25 anos (FERREIRA, 200). Isto posto, é natural que estes empreendimentos sejam considerados potencialmente poluidores, podendo ser geradores de acidentes ambientais (PENNER,2000).

Conforme dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), no Brasil existem cerca de 55600 postos de distribuição de combustíveis, sendo que, no Estado de São Paulo estão cadastrados mais de 12954 postos (ANP, 2008).

A Resolução CONAMA 273, publicada em 08.01.2001, estabeleceu a obrigatoriedade do licenciamento ambiental para postos revendedores, postos de abastecimento, instalações de sistemas retalhistas e postos flutuantes de combustíveis. Segundo essa Resolução, a localização, a construção, a instalação, as modificações, as ampliações e a operação desses estabelecimentos dependerão do prévio licenciamento ambiental por parte do órgão ambiental competente, a ser conduzido por meio das seguintes licenças ambientais: licença prévia, licença de instalação e licença de operação, sendo a emissão com exigências técnicas mínimas necessárias.

O Secretário de Estado do Meio Ambiente, considerando as determinações da Resolução CONAMA 273 e as competências atribuídas à CETESB pelas Leis Estaduais 118/73 e 997/76, editou a Resolução SMA 05/2001, atribuindo à CETESB a responsabilidade pelo licenciamento ambiental de postos revendedores, postos de abastecimento, instalações de sistemas retalhistas e postos flutuantes de combustíveis, bem como pelo estabelecimento de procedimentos técnicos, administrativos e financeiros para a sua aplicação.

A Resolução CONAMA 273 estabeleceu, também, a obrigatoriedade do cadastramento dos estabelecimentos que se encontram em funcionamento, tendo sido definido o prazo de seis meses, contados a partir de sua publicação, para que fosse concluído o cadastramento. Posteriormente, com a publicação da Resolução CONAMA 276, esse prazo foi prorrogado por mais seis meses, findo os quais o órgão ambiental deveria definir, num prazo de seis meses após a conclusão do cadastramento, a agenda e os

critérios para o licenciamento ambiental. Esses critérios seriam resultantes da atribuição de prioridades, definidas com base nas informações cadastrais a serem obtidas.

Com a finalidade de operacionalizar o licenciamento dos estabelecimentos considerados nas Resoluções CONAMA 273 e SMA 05/01, a CETESB estabeleceu os procedimentos e critérios necessários, dividindo-se em dois grupos: os empreendimentos em operação na data de publicação da Resolução SMA 5, de 28.03.2001, e os estabelecimentos instalados, ampliados ou reformados depois dessa data.

Entre julho de 2002 e abril de 2008, a CETESB realizou oito convocações para o licenciamento ambiental, incluindo cerca de 10000 empreendimentos cadastrados e não cadastrados. A priorização das convocações baseou-se nas informações cadastrais referentes às características das instalações e equipamentos, à proximidade de corpos d'água e à ocupação do entorno, além de registros de ocorrência de eventos de contaminação do solo ou das águas subterrâneas e obedeceram as seguintes categorias:

Reforma Completa: os empreendimentos que devem necessariamente substituir todos os seus tanques subterrâneos de armazenamento de combustíveis, por terem atingido a idade de 15 (quinze) anos ou por terem apresentado vazamentos, de acordo com as informações constantes no cadastro da CETESB.

Adequação às condições Mínimas de Operação: Os estabelecimentos referentes às instalações e equipamentos sem que seja necessária a substituição de algum dos seus tanques subterrâneos de armazenamento de combustíveis que, de acordo com as informações constantes no cadastro da CETESB, não atingiram a idade de 15 (quinze) anos.

Condição Intermediária: Os estabelecimentos que dentre outras exigências técnicas referentes às instalações e equipamentos, devem necessariamente substituir os seus tanques subterrâneos de armazenamento de combustíveis que atingiram a idade de 15 (quinze) anos ou que apresentaram vazamentos, de acordo com as informações constantes no cadastro da CETESB.

Tanques Aéreos: Os estabelecimentos que possuem Tanques Aéreos de armazenamento de combustíveis são classificados nas seguintes categorias:

- **Reforma completa:** quando todos os tanques forem reprovados nos ensaios de requalificação;

- **Condição intermediária:** quando pelo menos um dos tanques aéreos não for aprovado nos ensaios de requalificação e
- **Adequação às condições mínimas de operação:** quando todos os tanques aéreos forem aprovados nos ensaios de requalificação.

Conforme exposto anteriormente, em atenção às determinações das publicações das Resoluções CONAMA 273/00 e SMA 05/01, a CETESB estabeleceu os procedimentos técnicos e administrativos, e entre as exigências técnicas, a investigação de passivos ambientais tornou-se obrigatória para os empreendimentos que se encontravam em funcionamento quando as referidas resoluções foram publicadas.

Os estabelecimentos cujas investigações de passivo ambiental indicavam a existência de contaminação foram convocados para firmarem um Termo de Ajustamento de Conduta -TAC com a CETESB, no qual são estabelecidas as ações e fixados os prazos para que sejam adotadas as medidas necessárias a remediação do local e a adequação das instalações, visando a obtenção das devidas licenças ambientais.

Devido ao elevado número de estabelecimentos convocados para assinatura de TAC, que necessitavam de uma avaliação pela CETESB, provocou uma morosidade ao processo de licenciamento, prejudicando o cumprimento dos prazos fixados pela CETESB para o licenciamento ambiental de postos e sistemas retalhistas de combustíveis.

Em dezembro/2004, com o objetivo de agilizar o licenciamento de postos e sistemas retalhistas de combustíveis e outros empreendimentos que utilizem armazenamento subterrâneo de combustíveis, a CETESB como alternativa alterou o processo de assinatura de TAC para ações administrativas adequadas, com a adoção de medidas necessárias à remediação do passível ambiental de responsabilidade dos empreendedores.

Desde o início do processo de licenciamento ambiental dos Postos e Sistemas Retalhistas de Combustíveis, a CETESB em consonância com as sugestões apresentadas pela Câmara Ambiental do Comércio de Derivados de Petróleo, fórum que congrega técnicos da CETESB e representantes do setor de combustíveis, da indústria de equipamentos e das empresas de consultoria ambiental, vem modificando o processo de licenciamento com a finalidade de oferecer mais agilidade ao empreendedor.

Em junho/2007, a CETESB altera os procedimentos exigidos dos responsáveis por áreas contaminadas na condução do gerenciamento deste passivo ambiental, tendo como base a metodologia de gerenciamento apresentada no “Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas”, disponível na página da CETESB na Internet (<http://www.cetesb.sp.gov.br>). Esta alteração considerou a legislação ambiental pertinente, especialmente a Lei 6.938/81, denominada Política Nacional do Meio Ambiente, a Lei Estadual 997/76 e seu Regulamento aprovado pelo Decreto 8468/76 e suas alterações.

O gerenciamento de áreas contaminadas é otimizado neste procedimento, no sentido de reduzir as etapas sujeitas à aprovação prévia por parte da CETESB, com o objetivo de agilizar a implementação das medidas de intervenção, sem que a CETESB deixe de exercer o devido controle. Em consonância com o artigo 69-A da Lei Federal 9605, de 12 de fevereiro de 1998 (Lei de Crimes Ambientais), também foram instituídos neste procedimento os responsáveis legais e técnicos, definidos como segue:

Responsável Legal: pessoa(s) física(s) ou jurídica(s), de direito público ou privado, responsável(is), direta ou indiretamente, pela contaminação, ou pela propriedade potencial ou efetivamente contaminada e, conseqüentemente, pelos estudos necessários a sua identificação, investigação, avaliação de risco e pela implementação da intervenção, visando a reabilitação da área para o uso declarado.

Responsável Técnico: pessoa física ou jurídica contratada por um dos *Responsáveis Legais* para a elaboração ou apresentação de laudos, estudos, relatórios ou informações relacionadas às diferentes etapas do processo de gerenciamento de uma determinada área.

No desempenho de seu poder de polícia, uma das ferramentas que a CETESB utiliza para a fiscalização do cumprimento das exigências previstas neste procedimento é a auditoria, avaliando, além dos processos administrativos, o atendimento a todas as etapas pertinentes e os documentos/estudos técnicos competentes, podendo, inclusive, requisitar outras informações, coletar amostras e gerar resultados analíticos para comparação com aqueles apresentados.

Outro aspecto importante nesta alteração, refere-se à definição do risco aceitável para exposição humana a substâncias cancerígenas e do quociente de risco para as substâncias não cancerígenas, fundamentais no processo de avaliação de risco à saúde, que

constitui a base para a tomada de decisão quanto às medidas de intervenção a serem implementadas e as metas a serem atingidas na remediação de áreas contaminadas.

Com o objetivo de padronizar e otimizar a execução do estudo de avaliação de risco, foram estabelecidas regras para a quantificação do risco à saúde. No caso das áreas envolvendo os postos e sistemas retalhistas de combustíveis e outros empreendimentos que utilizem armazenamento subterrâneo de combustíveis, tornou-se obrigatório, para a definição das metas de remediação, a adoção das tabelas de metas de remediação elaboradas com base no documento “Ações Corretivas Baseadas em Risco (ACBR) aplicadas a Áreas Contaminadas com Hidrocarbonetos Derivados de Petróleo e Outros Combustíveis Líquidos – Procedimentos”, publicado em 11.02.2006, no Diário Oficial do Estado de São Paulo.

Desde o início do processo convocatório dos postos de combustíveis para o licenciamento ambiental, no período de junho/2002 a agosto/2008, a CETESB aplicou 10476 sanções, sendo:

- 7602 autos de infração imposição de penalidade de advertência;
- 3728 autos de infração imposição de penalidade de multa;
- 69 autos de infração imposição de penalidade de multa diária; e
- 77 autos de infração imposição de penalidade de interdição.

A experiência da CETESB no gerenciamento de áreas contaminadas consideradas críticas fez com que criasse um grupo gestor dessas áreas, com a finalidade de tomada de decisões sejam respaldadas institucionalmente e tecnicamente em consonância com as diretrizes de governo e com as demais entidades envolvidas, durante o gerenciamento de áreas contaminadas críticas.

Em relação às áreas eleitas como críticas, o grupo coordena as relações interinstitucionais e é responsável pela gestão da informação e pelo estabelecimento de estratégia de comunicação do risco e das ações desenvolvidas nessas áreas, e ainda, coordena as ações ou decisões que a CETESB tomará na definição do tipo de intervenção a ser adotada na área contaminada crítica.

Sobre a publicidade das áreas contaminadas, em cumprimento à decisão com caráter normativo CG N. 167/2005 - Capital, da Corregedoria Geral da Justiça, publicada no Diário Oficial do Estado de 12.06.2006, a CETESB providencia que a contaminação das respectivas áreas seja averbada à margem do competente registro imobiliário. A CETESB também emite o competente “Termo de Reabilitação da Área para Uso Declarado”, para ser averbado no registro imobiliário pelo *Responsável Legal* ou por terceiro interessado. Com isso, o potencial adquirente/possuidor do imóvel, obrigatoriamente, tomará conhecimento da contaminação atual ou pretérita da área.

Conforme dados da CETESB (2008), foram convocados cerca de 10000 postos de combustíveis (inclusive não cadastrados) para o licenciamento ambiental, sendo que foram emitidas até agosto/2008 as seguintes licenças:

- Licença Prévia = 4.609
- Licença de Instalação = 4.453
- Licença de Operação à Título Precário = 906
- Licença de Operação = 3.086

Total geral = 13.054

Considerando que grande parte dos postos e sistemas retalhistas de combustíveis ainda não obteve a licença de operação da CETESB, em fevereiro/2008, a Câmara Ambiental do Comércio de Derivados de Petróleo aprovou uma nova forma de financiamento, para ser utilizada na viabilização das obras necessárias para obtenção de licenças de operação dos postos de combustíveis. A forma de financiamento foi a constituição de grupos de consórcio, o que implicou na necessidade de ser estabelecido procedimento específico para esse tipo de financiamento e revisão dos prazos estabelecidos pela CETESB para que os empreendimentos obtenham as licenças de operação.

Em função da dinâmica que envolve a questão de licenciamento dos postos e sistemas retalhistas de combustíveis, a CETESB entendeu que a forma de financiamento ou outras fontes de recursos financeiros, com a comprovação da efetiva obtenção dos recursos, era pertinente, podendo resultar na diminuição da inadimplência no atendimento ao licenciamento, motivo pelo qual, em julho/2008, aprovou a concessão de prazos mediante a comprovação da adesão a consórcio ou da contratação de financiamento para

viabilização das obras necessárias para obtenção de licenças de operação destes empreendimentos e não contemplou neste procedimento a prorrogação de prazo para as ações de controle voltadas à recuperação de passivo ambiental.

Para os casos de empreendimentos que obtiverem o benefício da prorrogação de prazo para execução de obras, vinculados a consórcio ou a outras formas de aporte de recursos, a Licença de Operação somente é emitida se comprovado que as ações para correção de eventual passivo ambiental estão de acordo com as diretrizes da CETESB.

Os procedimentos operacionais deste expediente estão disponíveis na página da CETESB na Internet (<http://www.cetesb.sp.gov.br>).

9. ESTUDO DE CASOS

Considerando o número de trabalhos de remediações de áreas contaminadas por hidrocarbonetos provenientes de vazamentos em instalações de postos de gasolina, bem como as metodologias usadas nas remediações atualmente existentes, serviram como motivação para exemplificação de casos neste trabalho.

Como citado anteriormente, no Cadastro de Áreas Contaminadas da CETESB (novembro/2007), estão relacionados 1745 casos de contaminação por postos de combustíveis no Estado de São Paulo e com a finalidade de comentar a eficiência do sistema de remediação de extração multi-fásica -MPE, escolheu dois casos do cadastro, que concluíram a remediação e foi objeto dos processos de licenciamento ambiental existentes na CETESB.

É importante frisar que não é pretensão deste trabalho de fazer uma crítica as análises realizadas pela equipe técnica da CETESB, mas apresentar a eficiência do sistema de remediação, baseando-se nos dados relativos à investigação das áreas contaminadas por hidrocarbonetos provenientes de vazamentos em instalações de postos de gasolina.

Segundo Lopes et al. (2001), quando, por meio da análise de risco é constatada que a população está exposta ao risco, faz-se necessário o desenvolvimento de um plano de remediação. Para que a escolha dos processos de remediação seja mais correta possível é necessário que a investigação da área contaminada e avaliação de risco tenham sido efetivadas cuidadosamente e apresentem exatamente a situação do local.

Na seqüência descrevem-se um breve relato de cada um dos postos selecionados e a evolução de suas contaminações e/ou remediação, assim como, as discussões a respeito de cada caso. Os dois estabelecimentos serão denominados: Caso 1 e Caso 2.

9.1. Estudo de caso 1 - Auto Posto Eliane Ltda.

O presente caso apresenta os resultados da operação do sistema de remediação ambiental implantado no Auto Posto Eliane Ltda., localizado na Rua Fradique Coutinho, 1284 no Bairro Vila Madalena no município de São Paulo - SP. O início dos trabalhos de remediação no local data de 26 de novembro de 2004 e o seu desligamento deu-se em 23 de novembro de 2005. (ECOTEST, 2006)

A partir do cenário da contaminação verificado na área, foi elaborado um Plano de Remediação Ambiental, selecionando a técnica mais adequada para as condições encontradas. Neste contexto foi implantado um sistema MPE, com o objetivo de eliminar a fase livre de combustíveis e reduzir as concentrações de hidrocarbonetos dissolvidos em água que excediam os limites estabelecidos na análise de risco.

Durante todo o processo de remediação no Auto Postos Eliane, foram realizados monitoramentos periódicos de nível de água, espessura de fase livre e concentração de VOC nos poços instalados na área. Além disso, realizaram-se cinco campanhas de monitoramento analítico das águas subterrâneas com o objetivo de avaliar a evolução do processo de remediação, bem como o comportamento dos contaminantes presentes no local.

Com base nos resultados obtidos nos monitoramentos e principalmente com os resultados analíticos que indicaram a redução nas concentrações dos contaminantes até níveis inferiores aos limites calculados pela análise de risco, houve necessidade de confirmar os resultados obtidos além de avaliar as concentrações presentes na zona não saturada do solo.

De acordo com os resultados encontrados, concluiu-se que os objetivos estabelecidos no Plano de Remediação Ambiental foram plenamente atingidos. Após o encerramento do caso foi realizado o acompanhamento de um ciclo hidrogeológico, com campanhas analíticas trimestrais dos poços de monitoramento.

9.1.1. Informações e histórico

Em abril de 2003 foi realizado um estudo de passivos ambientais, o qual não identificou presença de fase livre de produto nos poços de monitoramento, no entanto todos os poços de monitoramento da área, na ocasião, apresentaram concentrações dos compostos do grupo BTEX e de Naftaleno acima do limite de intervenção estabelecido na "Lista de Valores Orientadores" da CETESB, disponível na página da CETESB na Internet <http://www.cetesb.sp.gov.br>.

Em razão do evento constatado realizou em janeiro de 2004 uma Investigação Ambiental que resultou no "Relatório de Investigação Ambiental para Delimitação de Pluma de Contaminação de Solo e Água Subterrânea", que identificou concentrações

elevadas de contaminantes BTEX e TPH em poços de monitoramento instalados no local.

Em julho de 2004, foi realizada uma Análise de Risco onde se concluiu que a contaminação no Auto Posto Eliane apresentava risco a saúde e segurança da população local, sendo necessária a implantação de medidas de remediação para o site até serem atingidas as metas de remediação estabelecidas na análise de risco. Nesse contexto, foi elaborado um "Plano de Remediação Ambiental" para o Auto Posto Eliane Ltda, sendo que, o start-up do sistema ocorreu em 26 de novembro de 2004 e desde então foram realizados monitoramentos periódicos a fim de avaliar a eficiência do processo de remediação.

9.1.2. Descrição e operação do sistema de remediação

A técnica instalada no local foi um sistema do tipo MPE e conforme mencionado no item 4, o sistema MPE é uma técnica de remediação de solo e águas subterrâneas, que consiste na aplicação de vácuo para extração dos vapores dos poços de extração, juntamente com o bombeamento de líquido (produto e água) por bomba submersível pneumática.

A localização dos poços de extração instalados, dos poços de monitoramento previamente existentes, da localização das linhas de bombeamento e extração de vapores e o *layout* do posto podem ser observados na figura 9.

O sistema foi dimensionado de forma a abranger a área entre as porções central e sudeste do posto onde se concentra a pluma de fase dissolvida de hidrocarbonetos de petróleo. Região esta onde também foi constatada, nos poços de monitoramento S-O1/PM, S-02/PM e S04/PM, pluma de fase livre.

As bombas pneumáticas, instaladas nos poços de bombeamento, são responsáveis por recuperar o produto em fase livre e as águas subterrâneas impactadas. Sua operação promove o rebaixamento do nível d'água, levando a formação de um cone de rebaixamento. A área sob influência direta deste cone é conhecida como área de influência ou e o raio da circunferência promovida por este rebaixamento é conhecido por raio de influência do bombeamento.

Já o sistema de vácuo é responsável pela extração dos VOC presentes no solo, criando um gradiente de pressão negativa na região de influência que promove a migração da contaminação através do arraste para os poços de extração, acelerando o processo de remoção dos contaminantes. Essa técnica de remediação proporciona ainda a circulação de ar forçada no meio, promovendo o enriquecimento do solo com oxigênio e conseqüentemente estimulando as atividades bacterianas aeróbias, por sua vez acelerando o processo de biodegradação dos hidrocarbonetos presente na zona não saturada do solo.

Os vapores extraídos são tratados em um sistema de filtros na superfície, constituído de três torres de carvão ativado conectadas em série. O carvão ativado promoveu a adsorção física dos VOC por meio das forças de atração entre as moléculas na superfície do carvão e as moléculas dos VOC.

A fase líquida bombeada por sua vez, é enviada diretamente a uma caixa Separadora de Água e Óleo - SAO, a caixa promove a segregação da fase livre, através da diferença de densidade entre a água e o combustível. O resíduo líquido proveniente da segregação é então retirado da caixa e armazenado em um tambor próprio. A água separada passa por um filtro constituído por um vaso de carvão ativado, o qual atua na remoção da fase dissolvida porventura ainda presente na água, seu princípio de funcionamento é semelhante ao do filtro de carvão para vapores. A água é então descartada na caixa separadora do posto.

A figura 10 mostra o Fluxograma do Processo e detalha melhor o sistema de remediação empregado neste caso.

9.1.3. Resultados da remediação ambiental

Durante todo o processo de remediação foram realizadas medições de nível d'água, espessura de fase livre, concentrações de VOC e vácuo nos poços de monitoramento e de extração e parâmetros de funcionamento do sistema, utilizando-se de medidores de interface água e óleo, amostradores descartáveis, ionizador de chama GASTECH e monovacômetros.

No período de remediação da área do Auto Posto Eliane, o nível d'água nos poços de monitoramento mantiveram-se entre 6,0 metros e 9,5 metros, como pode ser observado no gráfico 1 que apresenta a evolução dos níveis d'água nos poços de monitoramento e de extração.

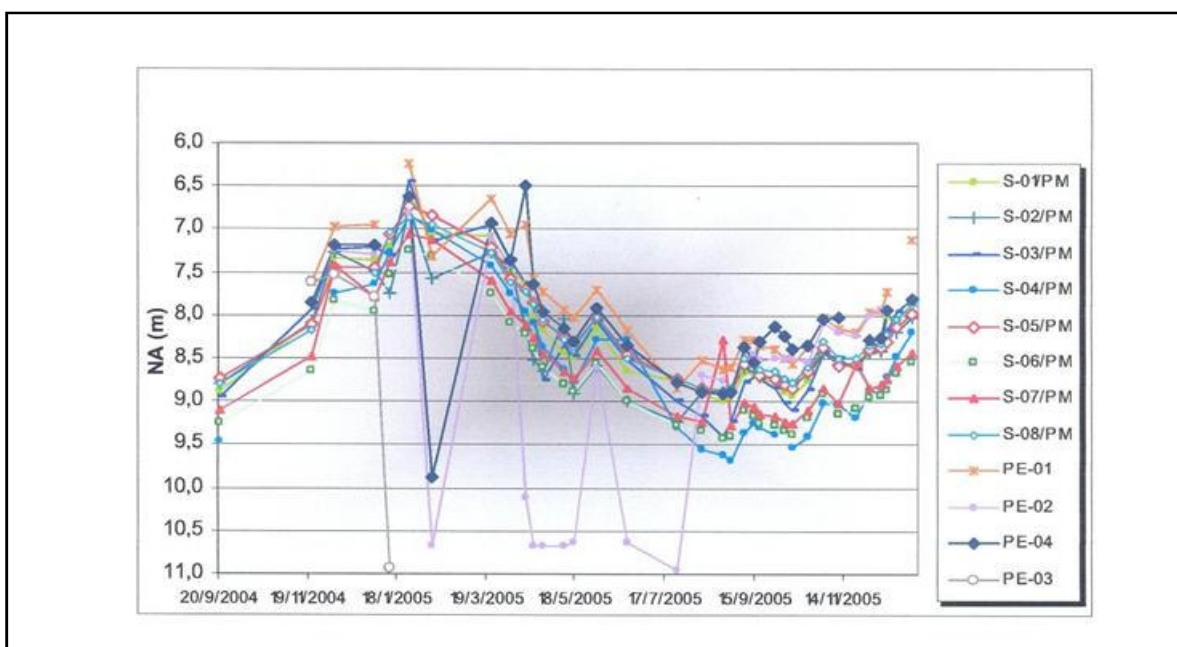


Gráfico 1: Caso 1 - Evolução dos níveis da água nos poços de monitoramento

Fonte: Ecotest (2006)

No início dos trabalhos de implantação do sistema de remediação (21.09.2004), foi constatada presença fase livre em dois poços de monitoramento, S-02/PM e S-03/PM, com espessuras de 15 cm e 0,5 cm respectivamente. Com o start-up do sistema de remediação, a fase livre destes poços foi eliminada. No entanto, em 21.07.2005 houve um novo aporte de produto no poço S-03/PM, com 3,0 cm e em 26.08.2005 chegou apresentar 21,0 cm, este novo aporte ocorreu devido ao efeito do raio de influência gerado pelo poço de extração PE-03, que promoveu o arraste dos contaminantes para o poço de monitoramento. Com a

continuidade da operação do sistema este novo aporte de produto foi removido de forma que em 16.09.2005 já não podia ser constatada. O Gráfico 02 apresenta a evolução das espessuras de fase livre constatadas nos poços de monitoramento durante os trabalhos realizados no posto.

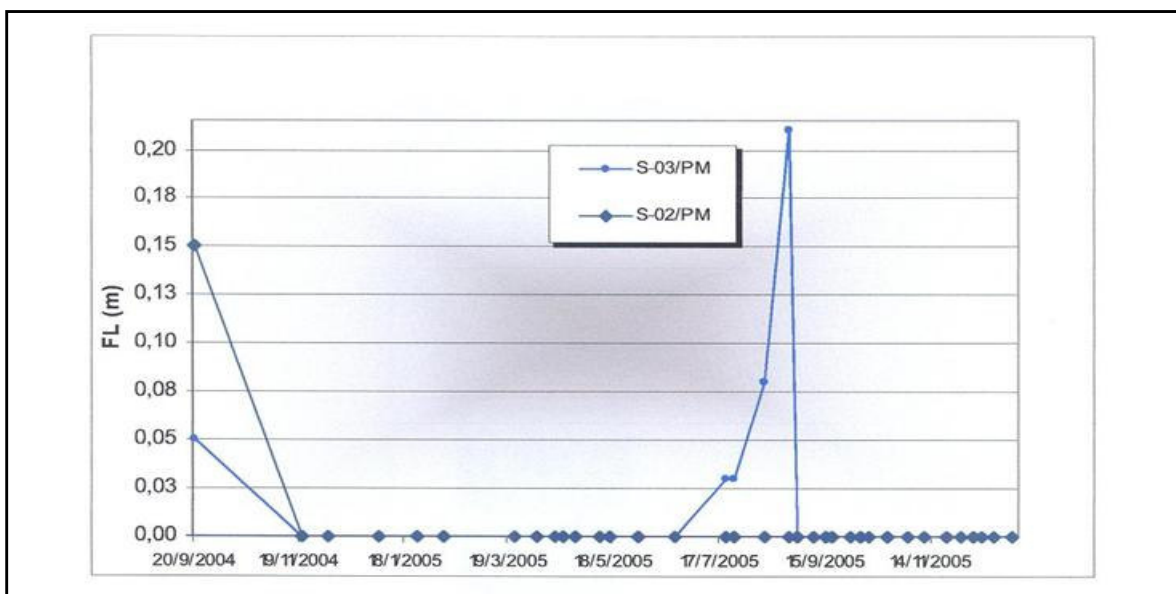


Gráfico 2: Caso 1 - Evolução das espessuras de fase livre nos poços de monitoramento e extração

Fonte: Ecotest (2006)

O Gráfico 3 apresenta os resultados das medições de concentração de VOC realizadas nos poços de monitoramento e de extração. Neste gráfico pode ser observado um decréscimo nas concentrações de vapores presentes nos poços, tendo como destaque os poços S-02/PM e PE-02 que no início dos trabalhos na área (21.09.2004), apresentaram concentrações de 14.000 ppm (100% LEL) e que em monitoramento realizado em 30.12.2005 apresentaram concentrações de 320 ppm e 0 ppm respectivamente. Nesta data o poço que apresentou maior concentração de compostos orgânicos voláteis foi o poço, S-01/PM que apresentou 1260 ppm, entre os outros poços de monitoramento nenhum apresentou concentrações superiores a 1000 ppm. Durante o período de remediação ambiental foi extraído e tratado um volume aproximado de 1.579.882 m³ de ar contaminado com vapores orgânicos provenientes da porção não saturado do solo por meio do sistema de remediação.

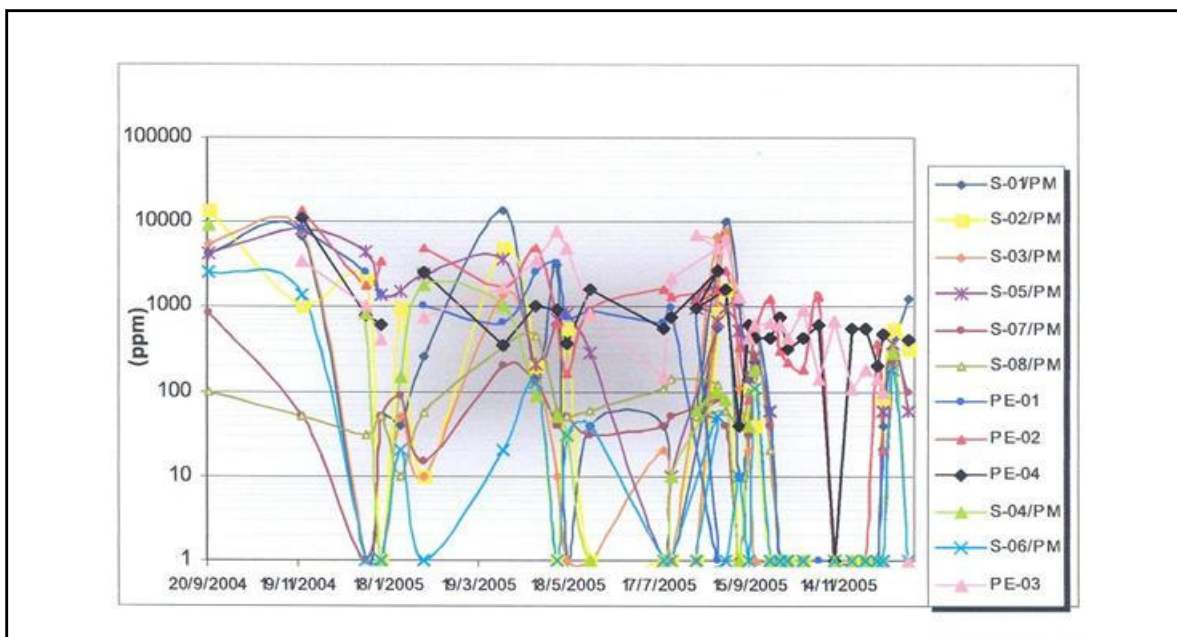


Gráfico 3: Caso 1 - Concentrações de VOC nos poços de monitoramento e extração

Fonte: Ecotest (2006)

Durante o processo de remediação no local, foram realizadas cinco campanhas de monitoramento analítico contemplando os parâmetros BTEX, de modo que fornecesse dados para avaliar com precisão a eficiência do sistema de tratamento ambiental e adaptá-lo as novas condições da contaminação do *site*.

Em todas as campanhas de monitoramento analítico realizadas trimestralmente para os parâmetros de interesse em água subterrânea, os compostos analisados estiveram abaixo das metas de remediação. O sistema de remediação mostrou-se eficiente na redução da fase dissolvida em água, visto que os poços S-02/PM e S-03/PM em junho de 2004 apresentaram para o parâmetro Benzeno respectivamente 4,050 mg/L e 4,735 mg/L, em outubro de 2005 apresentaram 0,052 mg/L e 1,175 mg/L, sendo este último a maior concentração constatada no *site*, valor inferior ao *SSTL* considerado para este parâmetro de 2,7 mg/L.

Para melhor visualização da evolução da presença de fase dissolvida na área dos poços de monitoramento, pode-se observar no Gráfico 4 a variação das concentrações do composto Benzeno nos poços de monitoramento localizados dentro da área do Auto Posto Eliane

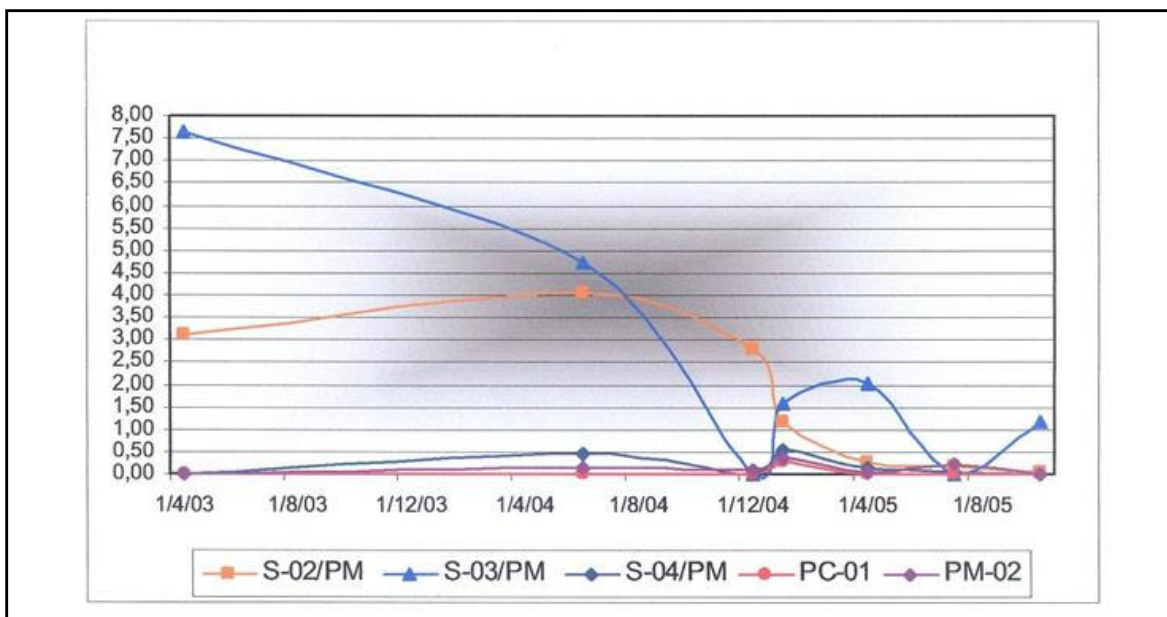


Gráfico 4: Caso 1 - Concentrações de benzeno na água dos poços de monitoramento

Fonte: Ecotest (2006)

Depois de constatado que as metas de remediação haviam sido atingidas, foi realizada uma campanha de amostragem comprobatória, para avaliação da qualidade das águas subterrâneas e solo no *site*. Esta avaliação consistiu na amostragem de água subterrânea em todos os poços de monitoramento, e também a realização de um ponto de sondagem visando a coleta de amostra de solo da zona não saturada. Os resultados desta avaliação confirmaram que as concentrações dos compostos de interesse, BTEX e PAHs, encontram-se abaixo dos valores de risco calculados para os cenários verificados no *site*, tanto para águas subterrâneas quanto para o solo.

9.1.4. Monitoramento após o encerramento das operações de remediação

Após o encerramento das operações de remediação, foi realizada uma campanha de monitoramento analítico como parte do escopo de acompanhamento da área por um ciclo hidrogeológico e correspondente a última etapa, com quatro campanhas de amostragem realizadas trimestralmente, de acordo com a data de encerramento das operações de remediação.

A campanha de amostragem das águas subterrâneas constituiu-se nas coletadas de amostras dos poços de monitoramento existentes na área do posto para análise dos parâmetros BTEX e PAHs. A localização dos poços de monitoramento e o layout do posto podem ser observados na figura 9.

Foi realizado o monitoramento *in-situ* na rede de poços de monitoramento da área do empreendimento, sendo realizadas medições de nível d'água e das concentrações de VOC, além da operação de purga dos poços de monitoramento para coleta de amostras de água subterrânea.

Durante o monitoramento não foi encontrado indícios de fase livre em nenhum dos poços da área do posto. Os resultados do monitoramento de nível d'água, juntamente com o histórico de medições realizadas desde o início do processo de remediação ambiental bem como as concentrações de VOC podem ser observados nos gráficos 5 e 6.

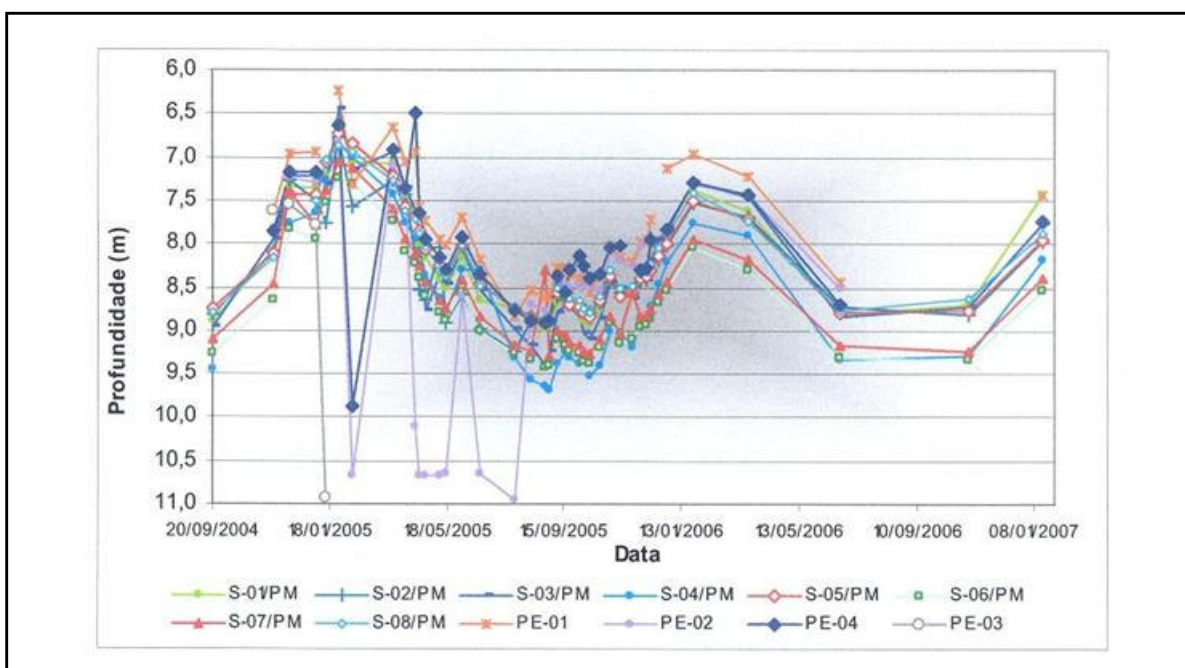


Gráfico 5: Caso 1 - Evolução dos níveis de água nos poços de monitoramento e extração

Fonte: Ecotest (2006)

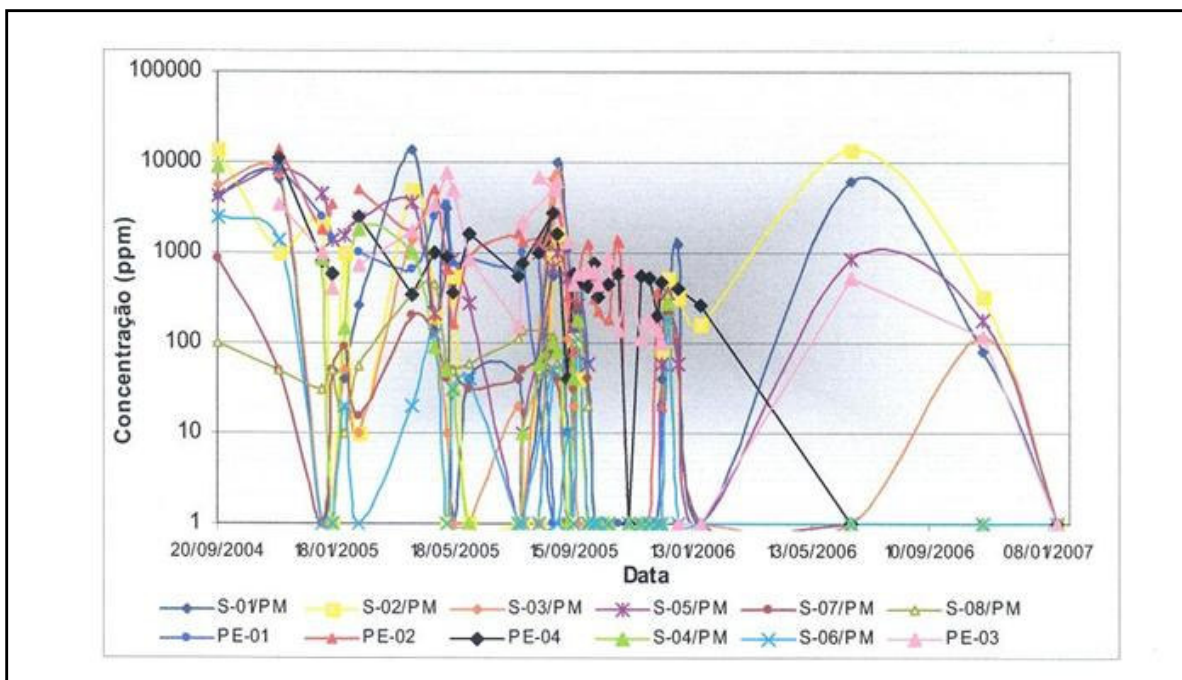


Gráfico 6: Caso 1 - Concentração de VOC nos poços de monitoramento e extração

Fonte: Ecotest (2006)

9.1.5. Comparação dos resultados analíticos

Os resultados obtidos nesta campanha de monitoramento analítico foram comparados com valores da campanha anterior, sendo que esta comparação indicou uma redução das concentrações do composto Benzeno na maioria dos poços de monitoramento, destacando-se o poço S-05/PM, que apresentou redução mais significativa, apresentando uma redução de 0,992 mg/L na amostragem anterior para concentrações não detectáveis na última amostragem das águas subterrâneas.

As maiores concentração de Benzeno constatadas pelo monitoramento analítico ocorreram nos poços S-03/PM e S-01/PM com 0,278 e 0,083 mg/L, respectivamente. Todos os valores dos compostos de interesse analisados apresentaram concentrações inferiores aos índices *SSTL's* calculados para o *site* pela análise de risco. O gráfico 07, apresenta a evolução das concentrações do composto Benzeno dissolvido em água subterrânea nos poços de monitoramento da área.

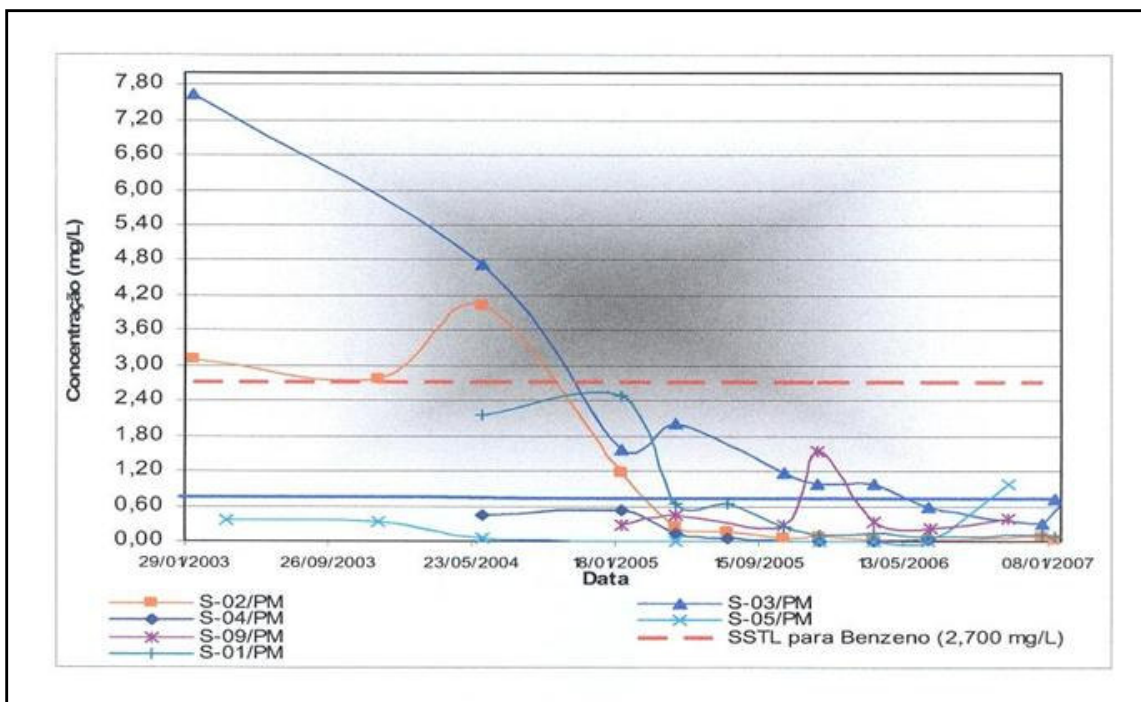


Gráfico 7: Caso 1 - Evolução das concentrações de benzeno nos poços de monitoramento

Fonte: Ecotest (2006)

9.1.6. Comentários

O sistema de remediação implantado no Auto Posto Eliane Ltda., eliminou por completo a presença de fase livre verificada nos poços de monitoramento e de extração do *site* no início dos trabalhos. As concentrações para os compostos do grupo BTEX e do grupo PAHs foram reduzidas a níveis inferiores aos limites estabelecidos para as metas de remediação resultantes da análise de risco tanto para água quanto para solo em todas as vias de exposição consideradas.

A campanha de monitoramento analítico realizada no ciclo de um ano de amostragens trimestrais após o encerramento da remediação comprovou que as concentrações para os compostos BTEX e PAHs em água e solo se encontram abaixo dos limites estabelecidos para todos os pontos analisados.

Baseando-se nos dados obtidos nos monitoramentos e reportados neste relatório, conclui-se que as concentrações dos compostos analisados não apresentam risco para os cenários considerados na análise de risco.

9.2. Estudo de caso 2 - Luchini Auto Posto Ltda

Este caso apresenta os resultados da operação do sistema de remediação ambiental implantado no Luchini Auto Posto Ltda., localizado na Av. Nove de Julho, 1400 no Bairro Chácara Urbana no município de Jundiaí - SP. O início da operação do sistema de remediação no local data de 19 de dezembro de 2004 e o seu desligamento deu-se em 19 de outubro de 2006. (SERVMAR, 2007)

Os serviços iniciais realizados na área do posto ocorreram em fevereiro de 2003, com a campanha de Diagnóstico Ambiental indicando presença de fase livre de óleo diesel no poço de monitoramento, localizado a jusante dos tanques de óleo diesel e gasolina comum, bolhas no poço situado a jusante dos tanques de gasolina comum e de álcool, e no poço localizado a jusante do tanque de óleo diesel desativado.

Em dezembro de 2003 em complementação ao diagnóstico realizado anteriormente, foi realizada outra campanha de análises químicas da água subterrânea que indicou presença de fase livre de óleo diesel nos poços de monitoramento e detectada fase dissolvida. As concentrações de benzeno das amostras de água subterrânea provenientes dos poços ultrapassaram os valores orientadores da CETESB. Com relação aos valores do NABR obtido para este composto, apenas num poço ultrapassou tais valores.

A partir do cenário da contaminação verificado na área, foi instalado um sistema de extração multifásica (MPE) para remediação da fase dissolvida, pois esta a técnica foi considerada mais adequada para as condições encontradas.

O MPE foi o sistema de remediação apropriado para recuperação do óleo diesel, pois pelos os relatórios de Diagnóstico Ambiental, a área do posto possuía as seguintes características que atendiam a implantação da técnica:

- Fase livre de hidrocarbonetos variando entre iridescência e 0,08 m de óleo diesel;
- Condutividade hidráulica igual a $1,51 \times 10^{-5}$ cm/s, a qual favorece a mobilidade dos contaminantes; e
- Geologia formada por horizontes argilosos e argilo-arenosos, que apresentam uma continuidade lateral, formando um pacote homogêneo em toda a área do posto.

Após o encerramento da remediação foram realizadas quatro campanhas de amostragem e análises de água subterrânea, referentes aos meses de outubro de 2006, janeiro, abril e julho de 2007. Os resultados das quatro campanhas indicaram a presença de contaminantes nas amostras de água subterrânea em concentrações inferiores aos valores de NABR referentes à inalação de vapores em ambientes fechados por receptores residenciais.

9.2.1. Informações e histórico

O Luchini Auto Posto Ltda funciona na área desde 1986 num terreno de várzea, desocupado até sua instalação. Atualmente, o posto opera com gasolina comum e aditivada, álcool e óleo diesel aditivado.

Desde a inauguração, o posto sofreu reformas as quais inclui, em 1999, rotação das ilhas de abastecimento com troca das bombas, desativação da ilha de abastecimento e remoção das bombas localizada no extremo noroeste do posto; dezembro/2002, desativação do tanque de óleo diesel devido à constatação da não estanqueidade, apesar de não ser constatada perda de produto; em janeiro de 2003 foram instaladas duas bombas de abastecimento com *sump* para comercialização de gasolina aditivada.

Em fevereiro de 2003, a campanha de Diagnóstico Ambiental indicou presença de fase livre de óleo diesel no poço de monitoramento PM-01 (0,02 m de espessura), localizado a jusante dos tanques de óleo diesel e gasolina comum, bolhas no poço PM-03, situado a jusante dos tanques de gasolina comum e de álcool, e no poço PM-05, localizado a jusante do tanque de óleo diesel desativado.

Ainda desta campanha, os resultados das análises químicas das amostras de água subterrânea revelaram que as maiores concentrações de BTXE e PAHs ocorreram nos poços PM-04 e PM-06 com Benzeno e Xilenos em teores superiores ao limite estabelecido pela lista da CETESB (5,0 µg/L) e lista Holandesa para (70,0 µg/L), respectivamente. Pela lista Holandesa (30,0 µg/L), somente a amostra do poço PM-06 ultrapassou o limite estabelecido para Benzeno.

Em dezembro de 2003, a campanha de Diagnóstico Ambiental Complementar indicou presença de fase livre de óleo diesel com espessura de 0,08 e 0,04 m nos poços de monitoramento PM-05 e PM-09, respectivamente, iridescência no PM-01 e película de fase

livre de no PM-03.

Desta campanha, foi detectada fase dissolvida, determinada pelas análises químicas da água subterrânea, localizada nas imediações dos tanques de diesel aditivado e gasolina comum, como também próxima aos tanques de gasolina aditivada. As concentrações de Benzeno das amostras de água subterrânea provenientes dos poços PM-04 e PM-06 (na área de tancagem) ultrapassaram os valores orientadores da CETESB. Para os valores do NABR obtido para este composto, apenas no PM-06.

Devido à presença de fase livre de óleo diesel, foi instalado em junho de 2003 um sistema de bombeamento, que consistia em uma bomba tipo *AutoPump* associada à caixa separadora de água e óleo, no poço PM-01. A água isenta de fase livre proveniente da caixa separadora era direcionada para o poço PM-08. O sistema foi desativado em 28 de junho de 2003 por não haver recuperação de produto em fase livre.

Diante deste quadro, instalaram-se os poços referentes ao sistema de remediação MPE sendo a operação iniciada de 15 de dezembro de 2004.

A figura 11 apresenta as instalações do posto, a localização dos poços e do sistema de remediação instalado.

9.2.2. Monitoramento

Após a implantação do sistema de MPE, foram realizados monitoramentos periódicos objetivando comprovar a remoção dos contaminantes existentes na área, bem como demonstrar a redução nas dimensões das plumas de contaminação de fase livre e dissolvida.

As campanhas de monitoramento foram realizadas com periodicidade mensal e trimestral, nos poços de monitoramento e nos equipamentos que compõe o sistema de MPE. As análises dos resultados obtidos *in situ* e em laboratório também possibilitaram avaliar a eficiência da técnica de remediação.

As campanhas mensais envolveram a medição do nível d'água e a verificação de fase livre utilizando um medidor eletrônico de interface água/óleo, monitoramento dos parâmetros físico-químicos, pH, condutividade elétrica, OD (oxigênio dissolvido), temperatura, VOC, Oxigênio, Dióxido de Carbono, Sulfeto de Hidrogênio.

Trimestralmente a água subterrânea foi analisada para os parâmetros BTEX e PAHs. A partir de novembro de 2005, em função da recuperação da fase livre, foram selecionadas três amostras para análises dos parâmetros geoquímicos (Ferro bivalente, Ferro total, Manganês bivalente, Manganês total, Fosfato, Nitrogênio Amoniacal, Nitrogênio Kjeldahal, Nitrito, Nitrato, Potássio e Sulfato) e microbiológicos (bactérias e fungos).

9.2.2.1. Monitoramento do nível d'água e presença de fase livre

O monitoramento ambiental consistiu na medição do nível d'água e na verificação de presença de fase livre em todos os poços existentes dentro da área do posto. Além da presença de contaminação sobrenadante, estes acompanhamentos forneceram informações quanto à variação potenciométrica dentro do ciclo hidrogeológico do período monitorado.

Conforme citado anteriormente, um dos princípios da técnica de extração multifásica (MPE) é a remoção de hidrocarbonetos por migração laminar do produto na franja capilar e interface contaminante/água. Assim, para o pleno funcionamento do sistema é essencial o acompanhamento da variação do nível d'água (N.A.) de modo que o conduto de vácuo (*drop tube*) seja ajustado de acordo estes níveis, possibilitando a atuação

do sistema nas quatro fases (vapor, residual/adsorvida, livre e dissolvida).

Além disso, as variações potenciométricas afetam a espessura de fase livre medidas nos poços de monitoramento (Blake and Hall, 1984; Kemblowski and Chang, 1990; Yaniga, 1984). Segundo a API (*American Petroleum Institute, 1989*), o rebaixamento do nível d'água resulta em um aumento do volume de hidrocarbonetos móveis, aumentando assim a espessura aparente de hidrocarbonetos drenados da zona não saturada. Em períodos de elevação do N.A. pode ocorrer o aprisionamento de hidrocarbonetos, reduzindo o volume de contaminantes móveis, o que promove a redução da espessura aparente da fase livre (Blake and Hall, 1984; Yaniga, 1984). Com relação a fase dissolvida, tem-se o comportamento contrario uma vez que ocorrendo a elevação do nível d'água a concentração dos compostos contaminantes aumenta devido maior dissolução e contato com porções adsorvidas no solo, fator esse que varia temporalmente conforme a granulometria e comportamento condutivo do meio.

O gráfico 8 ilustra a variação média do nível d'água nos poços de monitoramento e o índice pluviométrico acumulado local (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC) ao longo do período de funcionamento do sistema MPE.

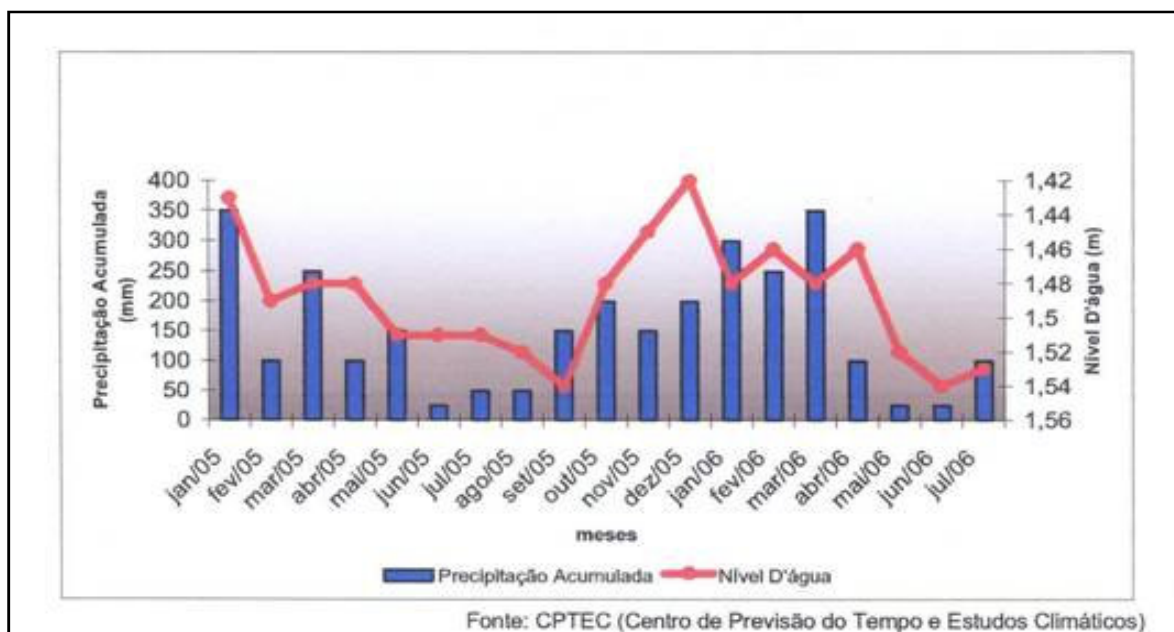


Gráfico 8: Caso 2 - Variação do nível d'água médio e precipitação acumulada mensal

Fonte: Servmar (2007)

Durante todo o período monitorado observou-se um comportamento concordante do nível d'água subterrâneo e da precipitação acumulada mensal, onde os períodos de

recarga ocorreram junto as maiores precipitações acumuladas e os rebaixamentos do nível d'água nos períodos de estiagem regional.

Nos meses de maio a julho de 2006, tem-se um rebaixamento máximo de 0,05 m (PM-04) reflexo do período de baixa precipitação acumulada mensal, ou seja, da estiagem regional verificada nesse período.

9.2.2.2. Potenciometria

A potenciometria local foi elaborada a partir das medições de nível d'água, nivelamento topográfico relativo, calculo das cargas hidráulicas e interpolação dessas para a geração do mapa potenciométrico local.

As figuras 12 e 13 apresentam as potenciometrias locais referentes aos meses de abril e julho de 2006, onde é possível observar que o fluxo da água subterrânea possui sentido preferencial de sudeste para noroeste.

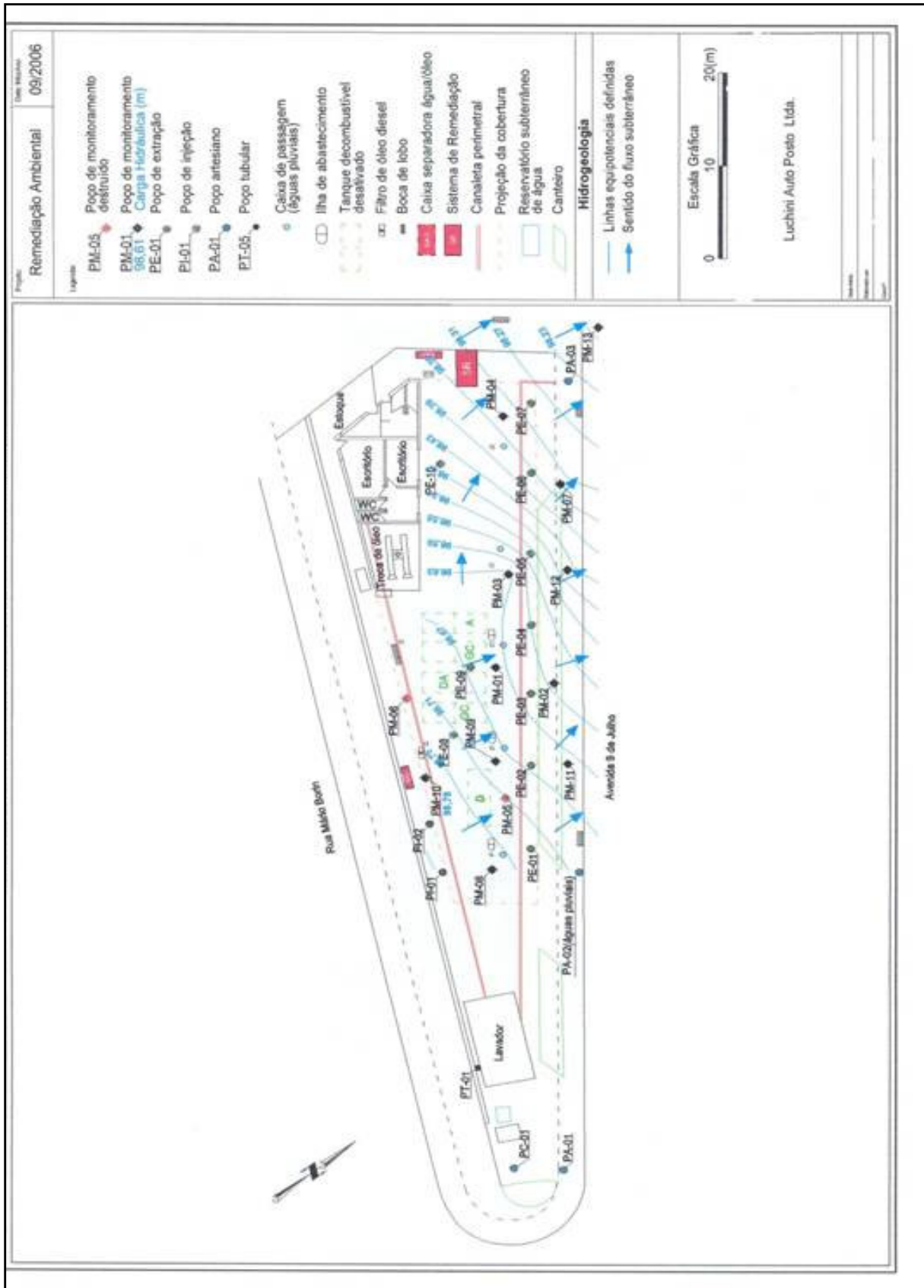


Figura 12: Caso 2 - Potenciometria local (abril / 2006)

Fonte: Servmar (2007)

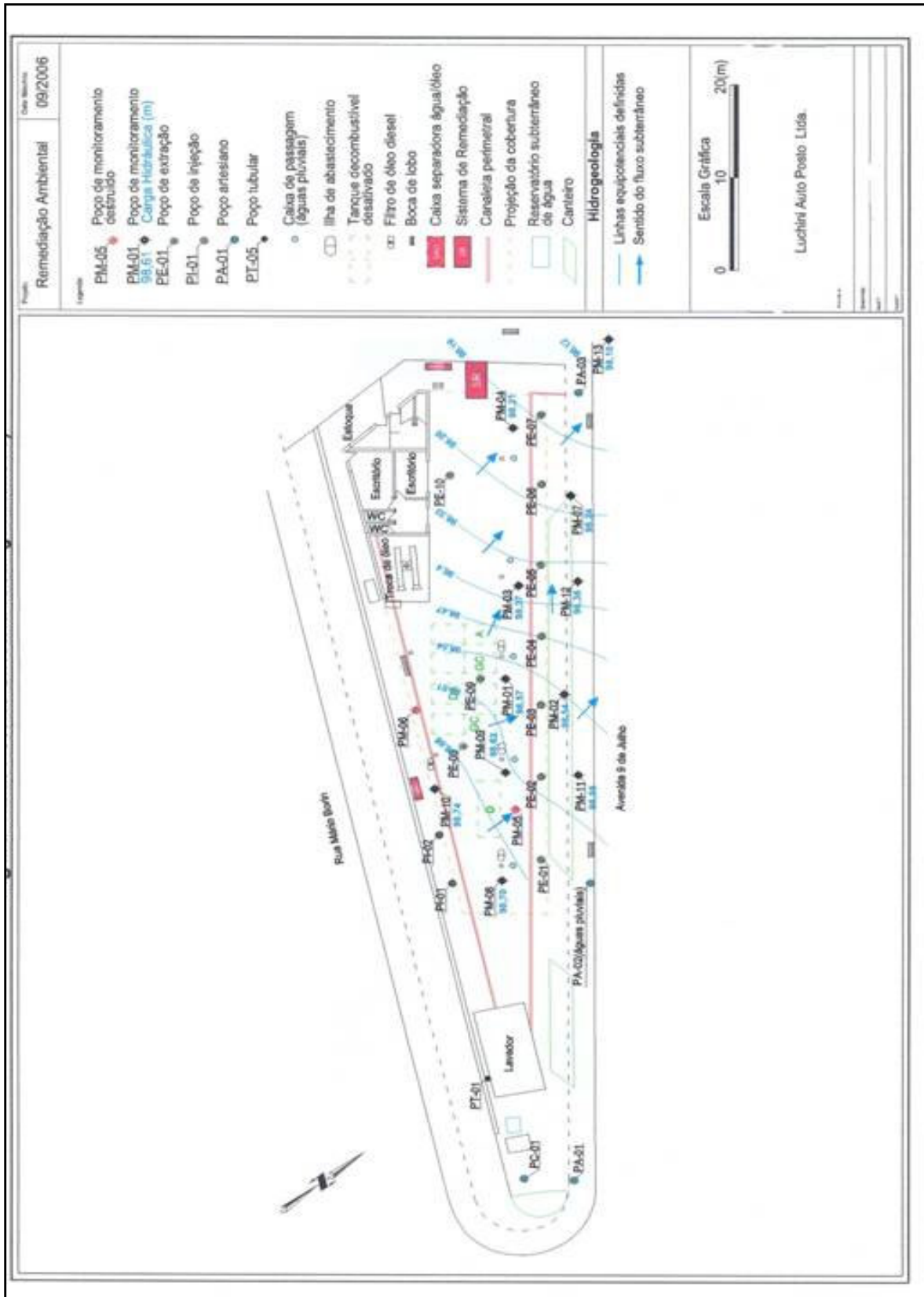


Figura 13: Caso 2 - Potenciometria local (junho / 2006)

Fonte: Servmar (2007)

9.2.2.3. Monitoramento do VOC, O₂, CO₂, H₂S e Pressão

Foi realizada a medição do VOC (ppm), O₂ - Oxigênio (%), CO₂ - Dióxido de Carbono (%), H₂S - Gás Sulfídrico (ppm) e pressão (mmH₂O) nos poços de monitoramento. As porcentagens dos gases (VOC, O₂, CO₂ e H₂S) são indicativas da atuação do sistema e resultado da volatilização e processos degradativos, a pressão interna do poço é outro parâmetro indicativo da eficácia do sistema.

Como resultado da diminuição de contaminação em fase livre e dissolvida ao longo do período, as concentrações de VOC decaíram entre maio e julho de 2006. As maiores concentrações de VOC ocorreram no poço PM-09 (6000 ppm), devido a presença de fase livre em maio/2006 (iridescência), o restante dos poços apresentaram valores inferiores a 560 ppm (PM-13).

O gráfico 9 ilustra a variação média e comportamento dos compostos orgânicos voláteis durante a atuação do sistema de remediação. Observa-se uma simetria da curva de variação do VOC médio e a de variação do nível d'água médio (gráfico 8), essa sincronia é explicada pela mobilização dos vapores presentes na zona não saturada (intraporos) para zonas de menor pressão (poços de monitoramento) devido a compressão causada pela elevação do nível d'água, resultando em valores elevados de VOC em períodos de maior precipitação local (recarga) e menores valores desses compostos em períodos de estiagem (rebaixamento).

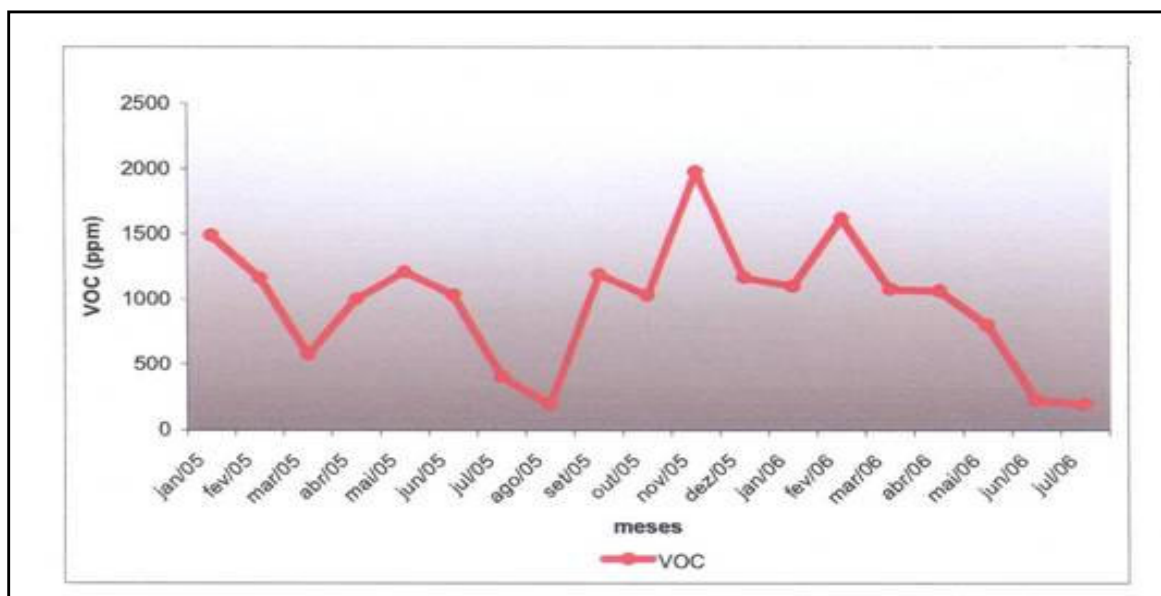


Gráfico 9: Caso 2 - Variação Média de VOC

Fonte: Servmar (2007)

O comportamento dos gases O_2 e CO_2 no trimestre também sofreram variações de acordo com as quantidades de voláteis presentes na área. O aumento dos teores de O_2 e diminuição de CO_2 foram consequência da menor disponibilidade de carbono orgânico no sítio, resultando numa menor ocorrência de processos oxidativos, indicando que a remediação da área foi efetiva. Concordando com as medidas de VOC (6000 ppm), o poço PM-09 apresentou os menores valores de O_2 (0,6 %) e valores elevados de CO_2 (4,3 %).

Analisando todo o período de atuação do sistema de remediação (janeiro/2005 a julho/2006), observa-se um aumento gradativo das porcentagens médias do O_2 desde fevereiro/2006, consequentemente redução nas concentrações de VOC e CO_2 , indicando dessa forma o final da remediação.

O gráfico 10 apresenta a relação proporcional inversa dos gases O_2 e CO_2 médios ao longo do período de janeiro de 2005 a julho de 2006, estando estes relacionados diretamente a presença de VOC nos poços.

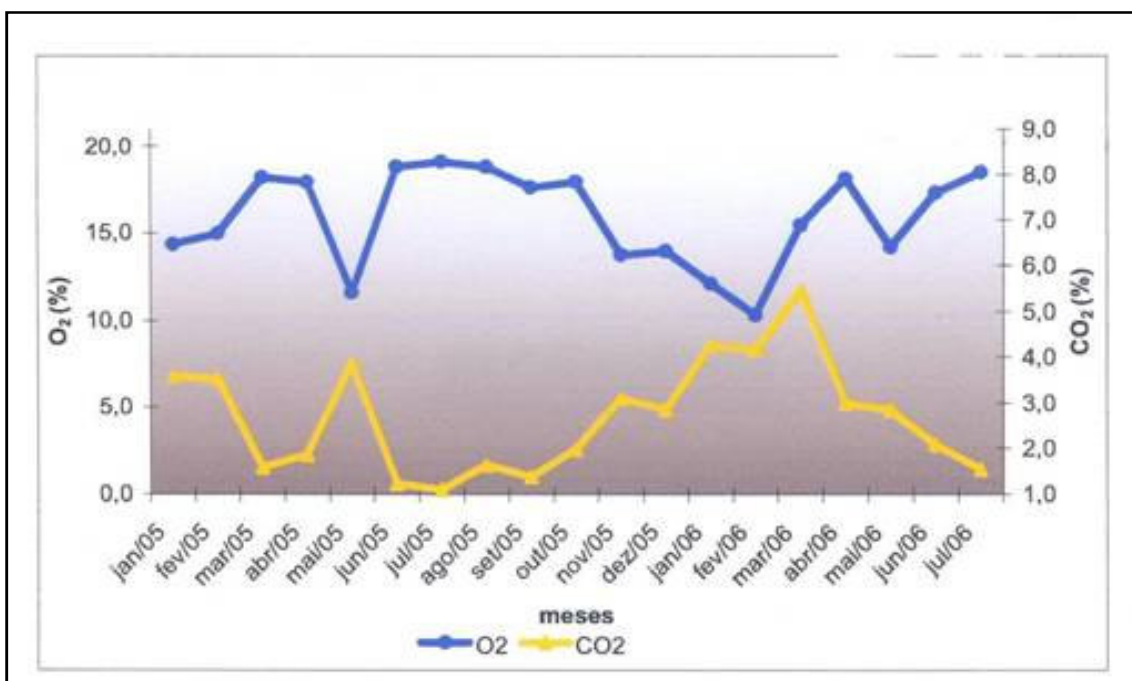


Gráfico 10: Caso 2 - Variação Média de O_2 e CO_2

Fonte: Servmar (2007)

Não foram detectadas concentrações de gás sulfídrico nos poços de monitoramento entre maio e julho de 2006.

9.2.2.4. Monitoramento dos parâmetros físico-químicos

Os parâmetros físico-químicos, oxigênio dissolvido (mg/L), pH, Condutividade Elétrica ($\mu\text{S/cm}$), Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e Potencial Redox - Eh (mV), estão diretamente relacionados à presença de contaminantes dissolvidos na água subterrânea. O monitoramento mensal não analítico destes parâmetros permite avaliar preliminarmente a eficiência do sistema de remediação, no período entre as campanhas analíticas trimestrais.

As leituras realizadas na água subterrânea por meio dos poços de monitoramento, no período entre maio e julho de 2006, são apresentadas na tabela 4 - Resultados dos Parâmetros Físico-Químicos nos Poços de Monitoramento. O acompanhamento da evolução desses parâmetros permite avaliar se o sistema e o processo de remediação são efetivos.

Tabela 4: Caso 2 - Resultados das medidas dos parâmetros físico-químicos na água subterrânea

MEDIDAS DE NÍVEL D'ÁGUA E ESPESSURA DE FASE LIVRE						
LUCHINI AUTO POSTO LTDA.						
POÇO	mai/06		jun/06		jul/06	
	NA	FASE LIVRE	NA	FASE LIVRE	NA	FASE LIVRE
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
PM-01	1,61	0,00	1,62	0,00	1,62	0,00
PM-02	1,40	0,00	1,40	0,00	1,40	0,00
PM-03	1,60	0,00	1,62	0,00	1,63	0,00
PM-04	1,54	IRIDESCÊNCIA	1,56	0,00	1,59	0,00
PM-07	1,38	0,00	1,40	0,00	1,40	0,00
PM-08	1,76	0,00	1,78	0,00	1,75	0,00
PM-09	1,71	IRIDESCÊNCIA	1,72	0,00	1,71	0,00
PM-10	1,77	0,00	1,80	0,00	1,70	0,00
PM-11	1,39	0,00	1,40	0,00	1,39	0,00
PM-12	1,37	0,00	1,37	0,00	1,38	0,00
PM-13	1,22	0,00	1,25	0,00	1,25	0,00

Fonte: Servmar (2007)

Medidas de oxigênio dissolvido entre 0,96 mg/L (PM-13) e 6,46 mg/L (PM-10) foram registradas no último trimestre de funcionamento do sistema MPE, refletindo o comportamento natural do meio, uma vez que se observou ao decorrer dos monitoramentos valores elevados a montante da área, atribuindo esses a proximidade e aeração dos poços de injeção (PI-01 e PI-02), e menores valores a jusante do posto, sendo considerado o *background* da área (1,29 mg/L).

Nota-se no gráfico 11 uma concentração média superior ao background da área em todo o período de atividade do sistema, mostrando a eficiência desses na aeração do meio.

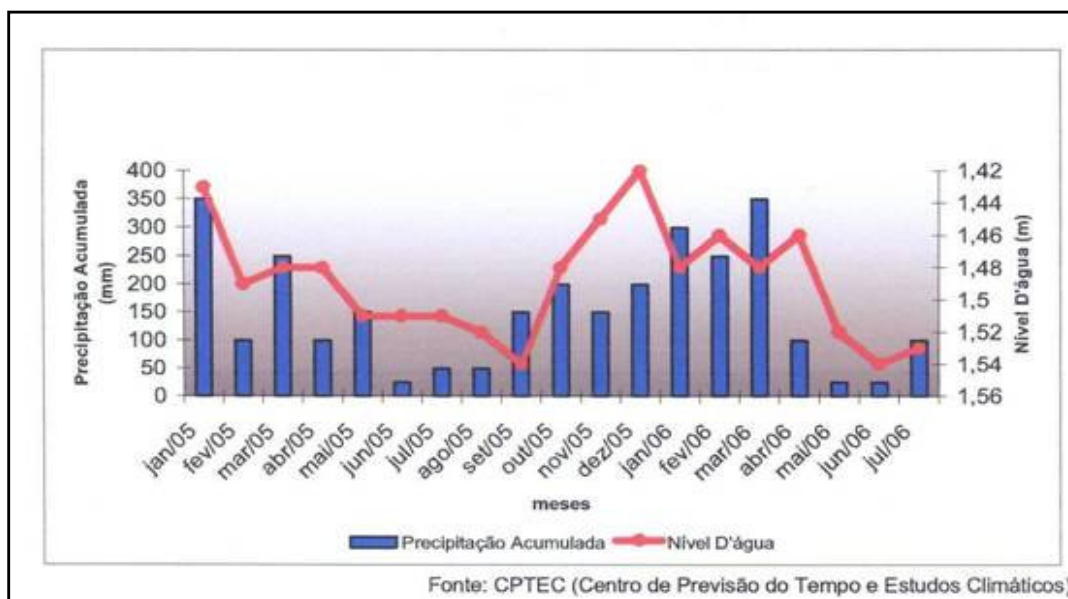


Gráfico 11: Caso 2 - Variação Média de OD, Eh e Condutividade elétrica

Fonte: Servmar (2007)

No trimestre analisado (mai/06 a jul/06) as leituras da condutividade elétrica permaneceram estáveis, mostrando uma redução no PM-01 (338 $\mu\text{S}/\text{cm}$) o qual sempre apresentou valores elevados chegando a 1272 $\mu\text{S}/\text{cm}$ em março de 2005, mostrando dessa forma que a remediação da área chegou a sua etapa final. Valores variando entre 72 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 205 $\mu\text{S}/\text{cm}$ são considerados como naturais da área. O gráfico 11 ilustra a variação média da condutividade elétrica, a qual mostra uma redução gradativa desde agosto de 2005, indicando a degradação da contaminação em fase dissolvida da área.

O potencial redox apresentou uma elevação gradativa nesta última campanha, sendo essa observada desde novembro de 2005 (gráfico 11), concordante com valores de condutividade elétrica, mostrando a ausência de hidrocarbonetos derivados do petróleo.

O pH apresentou em todos os monitoramentos, valores médios de 5,82 considerados normais para a água subterrânea.

9.2.2.5. Amostragem e análises laboratoriais da água subterrânea

Foram coletadas amostras de água subterrânea nos poços de monitoramento, para

análise dos parâmetros BTEX e PAHs, com o intuito de verificar a resposta à ação do MPE sobre a pluma de fase dissolvida e comprovar o final do processo de remediação da área. Além dessas análises, foram selecionados três pontos para análise dos parâmetros geoquímicos e microbiológicos.

9.2.2.5.1. Parâmetros químicos

Comparando os resultados das campanhas realizadas, observa-se que:

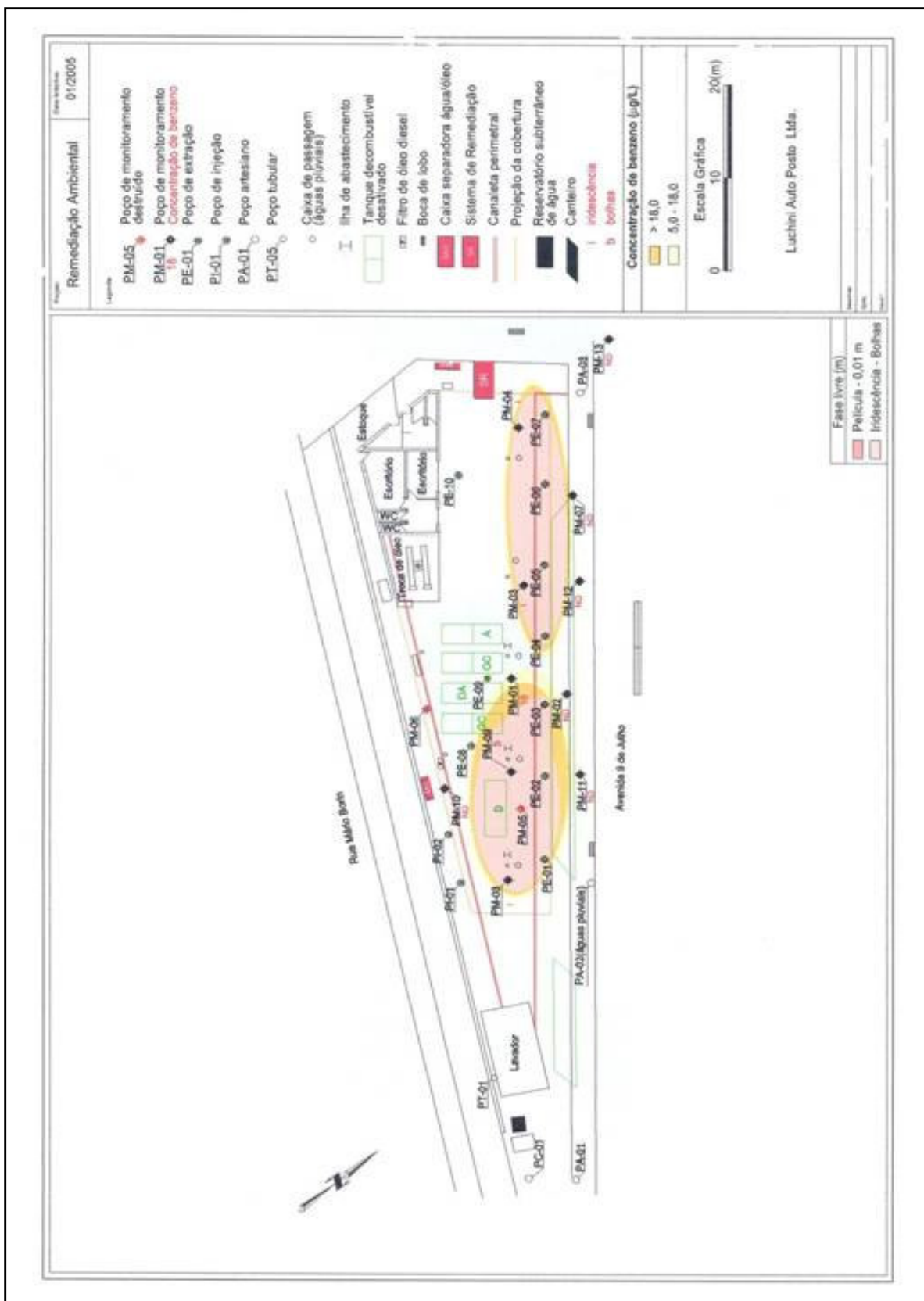
- Uma redução de 44,6% e 71,7% nos compostos de PAHs totais nas amostras dos poços PM-01 e PM-03 respectivamente. Foram registradas concentrações de 42,43 µg/L no PM-04 e 0,584 µg/L no PM-09, os quais não analisados em campanhas anteriores por apresentarem iridescência e nos demais poços não foi detectada concentrações acima do método analítico;
- Os compostos BTEX totais presentes nos PM-01 e PM-03 sofreram uma redução de 10,0% e 100,0% respectivamente, a análise do poço PM-04, não analisados anteriormente por apresentar fase livre (iridescência), apontou concentração de 275,6 µg/L, nos demais poços não foi detectada concentrações acima do método analítico analisado;
- O composto Benzeno foi detectado somente no PM-01, o qual apresentou uma redução de 53,5% na concentração se comparado com a campanha anterior.

Em julho de 2006, nenhum composto ultrapassou os valores de NABR para inalação de vapores proveniente da água subterrânea por moradores residenciais em ambiente fechado *on site*.

Analisando-se os dados, observa-se que houve uma redução significativa da presença de hidrocarbonetos derivados de petróleo em fase dissolvida, fato esse associado aos resultados positivos do sistema que se mostraram efetivos no tratamento da área, atingindo as metas de remediação estipuladas, encerrando dessa forma o funcionamento do sistema MPE.

As figuras 14 a 17 ilustram as configurações das plumas de contaminação desde janeiro de 2005 (*start up*) até julho de 2006, onde é possível confirmar a diminuição da

área abrangida pelas mesmas, assim como a redução das concentrações de Benzeno na área.



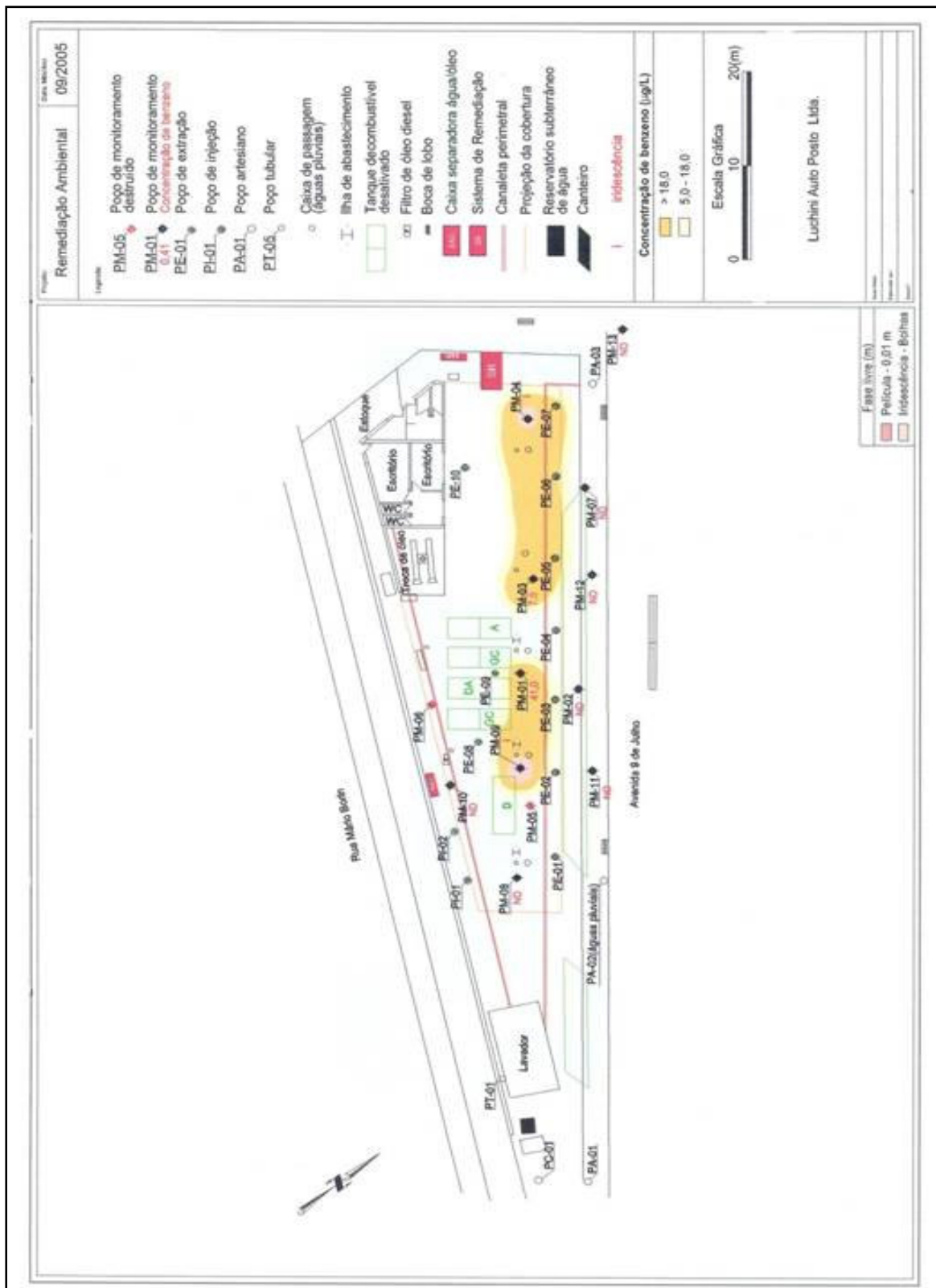


Figura 15: Caso 2 - Pluma de fase livre e fase dissolvida de benzeno (julho/2005)

Fonte: Servmar (2007)

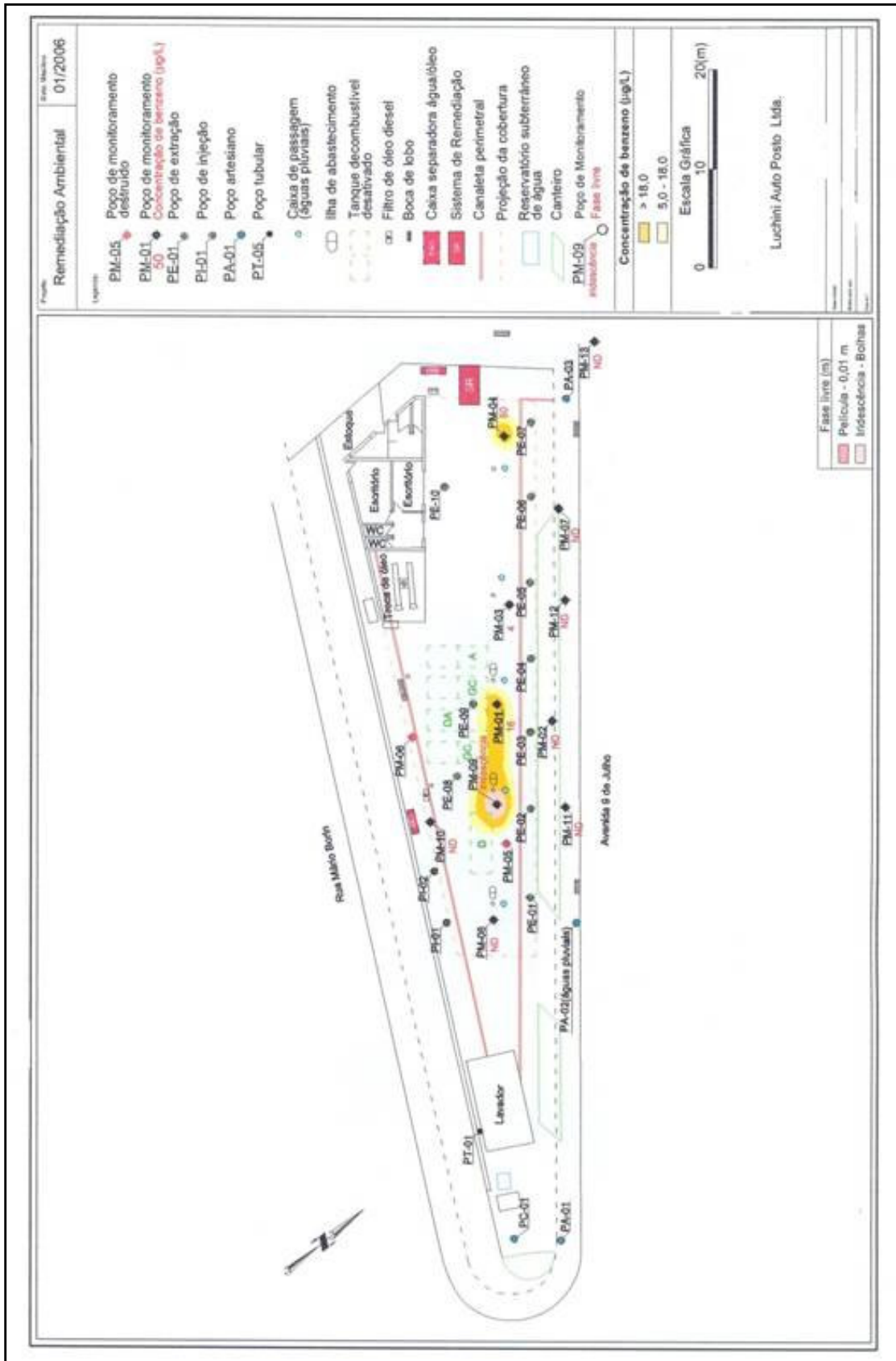


Figura 16: Caso 2 - Pluma de fase livre e fase dissolvida de benzeno (janeiro/2006)

Fonte: Servmar (2007)

9.2.2.5.2. Parâmetros geoquímicos e microbiológicos

A análise desses parâmetros teve como objetivo a obtenção de uma melhor caracterização do sítio e a avaliação do processo de biorremediação.

Os pontos escolhidos e amostrados para os parâmetros geoquímicos e microbiológicos PM-03, PM-07 e PM-10, localizam-se perpendiculares às linhas potenciométricas, acompanhando o sentido do fluxo da água subterrânea.

Os parâmetros analisados permitiram o acompanhamento dos estágios de evolução da biorremediação. A partir destas informações permite:

- Avaliar a presença de aceptores de elétrons como oxigênio dissolvido, nitratos, íons férricos e sulfatos, os quais funcionam como agentes cometabólicos nos processos de degradação dos compostos orgânicos.
- Avaliar a composição da microbiota autóctones: bactérias aeróbias, anaeróbias, bolores e leveduras.
- Monitorar o crescimento populacional da microfauna, o qual proporciona maior eficiência aos processos de biorremediação.
- Estudar a presença de espécies reduzidas (Fe^{2+} e Mg^{2+}) que indicam o processo de descarga em outros elementos que não o oxigênio dissolvido.

Os dados obtidos na campanha realizada quando da operação do sistema de remediação estão apresentados na tabela 5 - Resultados Geoquímicos e Microbiológicos da Água Subterrânea.

Tabela 5: Caso 2 - Resultados Geoquímicos e Microbiológicos da Água Subterrânea

RESULTADOS GEOQUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS DA ÁGUA						
LUCHINI AUTO POSTO LTDA. - JULHO/2006						
Parâmetros Analisados		Limite de detecção (LD)	Ponto Amostrado			
			PM-03	PM-07	PM-10	
			AA-03	AA-05	AA-08	
Geoquímicos (mg/L)	Ferro II	0,0120	12,300	ND	ND	
	Manganês II	0,0120	0,239	0,022	0,119	
	N Kjeldahl Total	0,0300	0,860	0,250	0,290	
	orto-Fosfato	0,0110	0,112	0,126	0,129	
	Potássio Total	0,0100	7,600	4,960	9,270	
	Nitratos	0,0007	0,045	3,030	2,719	
	Nitrito	0,0007	0,004	0,001	0,003	
	Ferro Total	0,0120	154,000	26,100	108,000	
	Manganês Total	0,0100	0,373	0,063	0,561	
	N Amoniacal	0,0300	0,590	0,060	0,060	
	Sulfatos	0,0056	3,370	3,780	4,299	
	Microb. (ufc/mL)	Bactérias Aeróbias Totais	-	130	170	320
		Bactérias Anaeróbias Totais	-	7	6	8
Bolores e Leveduras		-	17	940	22	

ND = não detectado

Fonte: Servmar (2007)

As análises apontaram os seguintes resultados:

- Concentrações de Ferro Total nos poços PM-03 (154,0 mg/L), PM-07 (26,1 mg/L) e PM-10 (108,0 mg/L);
- Presença de Sulfato nos poços PM-03, PM-07 e PM-10 em concentrações 3,37 mg/L, 3,78 mg/L e 4,30 mg/L respectivamente;
- Ocorrência de Nitratos nos poços PM-03, PM-07 e PM-10 em concentrações 0,045 mg/L, 3,030 mg/L e 2,719 mg/L respectivamente;
- As colônias de bactérias aeróbias e anaeróbias permaneceram em baixa contagem.

Esses dados apontam uma menor expressão do processo de biorremediação, visto que há uma menor disponibilidade de hidrocarbonetos derivados de petróleo em fase dissolvida, refletindo em uma redução na contagem de colônias de bactérias aeróbias e anaeróbias.

Com a redução dessas colônias tem-se uma menor atividade metabólica dessas, portanto uma menor concentração de espécies reduzidas de Ferro bivalente, e maior

concentração de Nitratos, Ferro Total e Sulfatos, indicando que os processos de biorremediação chegaram a seu final.

9.2.3. Monitoramento do sistema MPE

Para avaliar a eficiência do sistema de MPE foram realizadas, mensalmente, medições de parâmetros de interesse como:

- Oxigênio dissolvido (mg/L), temperatura (°C), pH, condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) e análises químicas de BTEX e PAHs ($\mu\text{g}/\text{L}$), em amostras de água coletadas antes e após passagem pela torre de *air stripping*, e;
- Compostos orgânicos voláteis (ppm), O_2 (%), CO_2 (%), H_2S (ppm) e temperatura (°C) em pontos de captação de vapores, antes, entre e após passagem pelos filtros de carvão ativado.

O gráfico 12 mostra a variação de oxigênio dissolvido do efluente pré e pós-tratamento ao longo do período de atuação do sistema MPE, onde se observa um aumento médio de 1,42 mg/L no efluente da saída, indicando a eficiência da torre de *air stripping* na areação e volatilização de compostos.

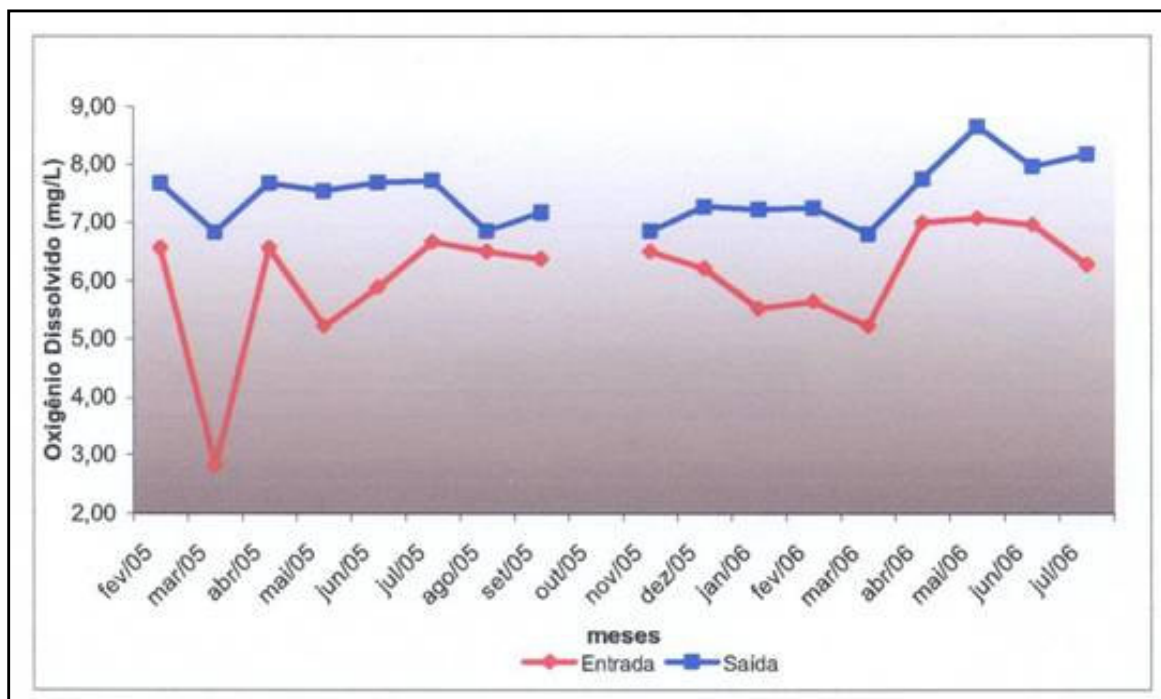


Gráfico 12: Caso 2 - Variação de OD

Fonte: Servmar (2007)

A condutividade elétrica apresentou uma pequena oscilação nos valores durante todo o período monitorado do sistema (fev/05 a jul/06), onde apenas nos meses de fevereiro e março de 2006 tem-se valores anômalos máximos de 1397 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na entrada e 1811 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na saída do sistema, gráfico 13, esse comportamento deve-se ao aumento da precipitação local e elevação do nível d'água turbilhonando e suspendendo partículas na água dos poços.

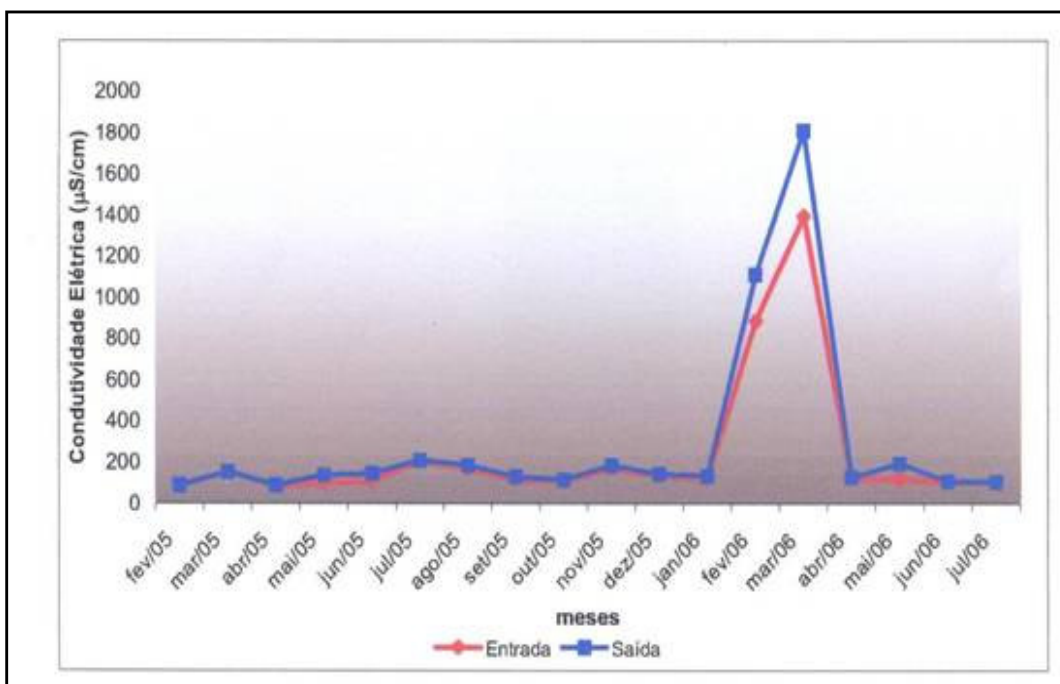


Gráfico 13: Caso 2 - Variação da Condutividade Elétrica

Fonte: Servmar (2007)

Quanto aos valores de Eh, gráfico 14, observou-se uma maior oscilação, diferença, nos valores de entrada e saída do efluente durante o tratamento, e uma tendência a estabilização dos valores em 180 mV na etapa final da remediação, indicando que o tratamento foi efetivo.

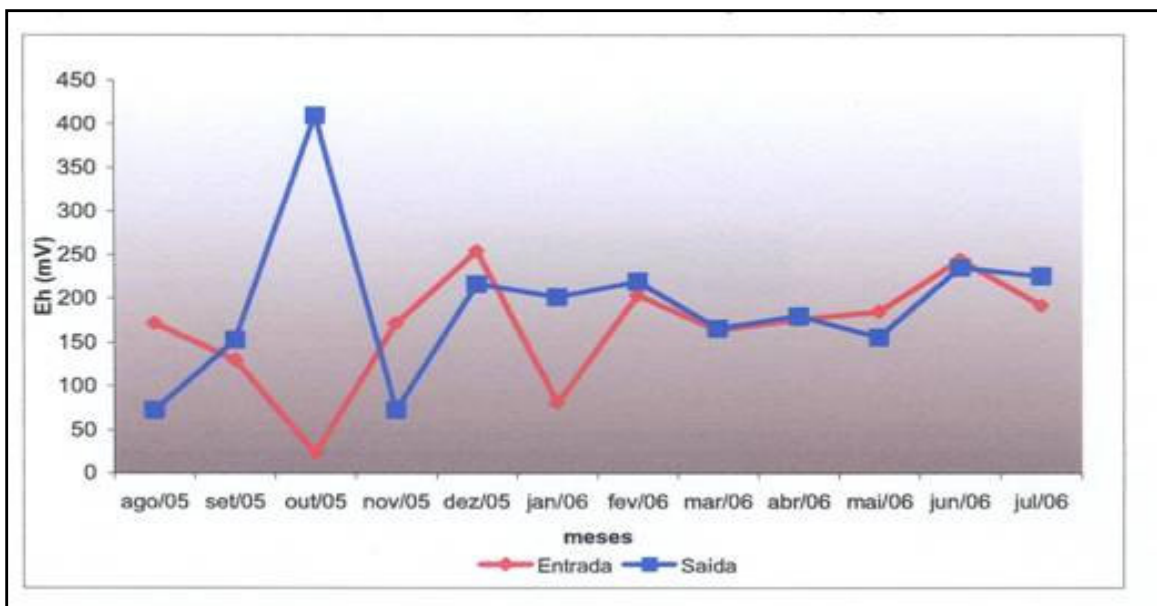


Gráfico 14: Caso 2 - Variação do Eh

Fonte: Servmar (2007)

O gráfico 15 ilustra o comportamento dos compostos orgânicos voláteis no sistema durante seu período de funcionamento, onde se comparado com o gráfico 9 da variação média de VOC nos poços de monitoramento, observou-se uma concordância nos valores de concentração medidas, sendo que valores elevados de VOC nos poços refletem em maiores leituras nas concentrações no sistema. A redução média de 30 ppm na saída dos vapores mostra que estes ficaram adsorvidos nos tambores de carvão ativado.

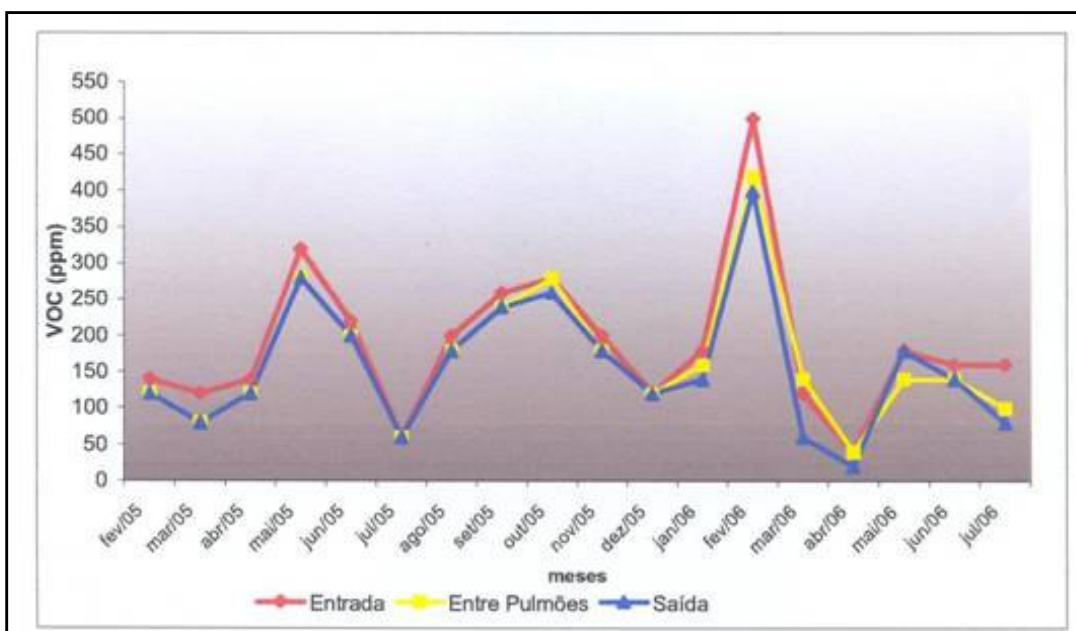


Gráfico 15: Caso 2 - Variação de VOC

Fonte: Servmar (2007)

Quanto aos gases O_2 e CO_2 , gráficos 16 e 17, permaneceram próximos aos valores atmosféricos, sendo apontado somente em maio de 2005 e março de 2006 valores expressivo de diminuição de O_2 e conseqüentemente aumento de CO_2 , fato explicado pelo aumento da concentração de VOC captado pelo sistema.

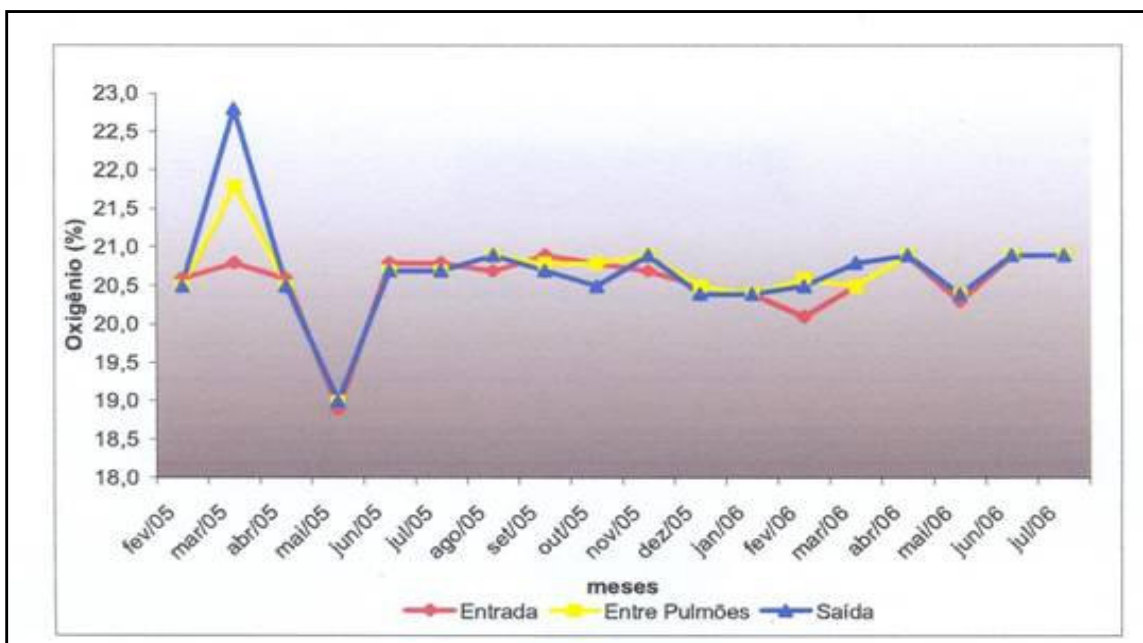


Gráfico 16: Caso 2 - Variação de O_2

Fonte: Servmar (2007)

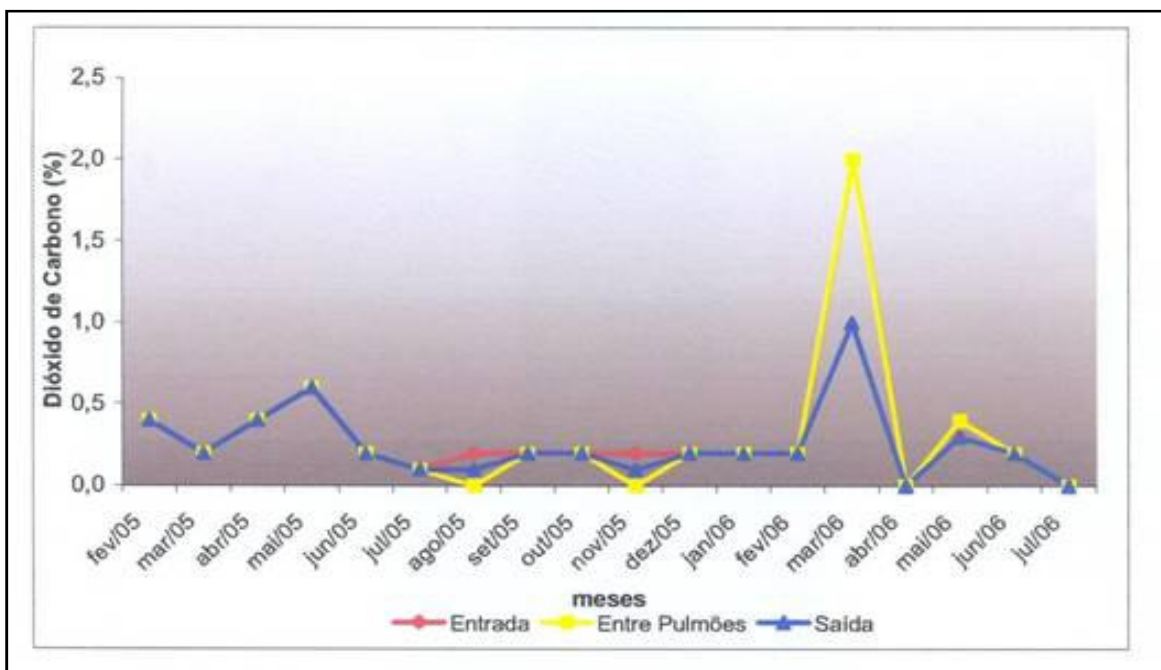


Gráfico 17: Caso 2 - Variação de CO_2

Fonte: Servmar (2007)

9.2.3.1. Amostragem e análises químicas do sistema de remediação

A eficiência da técnica de remediação foi avaliada mensalmente por meio das análises químicas do efluente coletado na entrada e saída do sistema MPE. As amostras de entrada e saída foram definidas como antes e após circulação na torre de *air stripping*, ou seja, antes e depois do tratamento.

A tabela 6 - Resultados Analíticos do Sistema de Remediação apresenta os resultados das análises químicas realizadas nos efluentes do sistema MPE nos meses de maio a julho de 2006.

Tabela 6: Caso 2 - Resultados Analíticos do Sistema de Remediação

RESULTADOS ANALÍTICOS DO SISTEMA DE REMEDIAÇÃO (µg/L)									
LUCHINI AUTO POSTO LTDA.									
Parâmetros Analisados	Limite de detecção (LD)	Ponto amostrado						Portaria 518	
		mai/06		jun/06		jul/06			
		Água entrada	Água saída	Água entrada	Água saída	Água entrada	Água saída		
PAH	Naftaleno	0,5	ND	ND	ND	ND	0,155	ND	ne
	Acenafeno	0,05	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ne
	Fluoreno	0,05	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ne
	Fenantreno	0,05	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ne
	Antraceno	0,05	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ne
	Fluoranteno	0,05	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ne
	Pireno	0,05	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ne
	Benzo (a) antraceno	0,05	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ne
	Criseno	0,05	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ne
	Benzo (b) fluoranteno	0,05	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ne
	Benzo (k) fluoranteno	0,05	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ne
	Benzo (a) pireno	0,01	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ne
	Dibenzo (a, h) antraceno	0,05	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,7
	Acenafileno	0,05	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ne
	Indeno (1,2,3-c,d) pireno	0,05	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ne
	Benzo (g, h, i) perileno	0,05	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ne
TOTAL	-	ND	ND	ND	ND	0,155	ND	-	
BTEX	Benzeno	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	5
	Tolueno	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	170
	Etilbenzeno	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	200
	Xilenos	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	300
	TOTAL	-	ND	ND	ND	ND	ND	ND	-

ND = não detectado acima do limite de detecção analítica

Fonte: Servmar (2007)

Os resultados indicaram que em maio a julho de 2006, não foram verificados compostos BTEX acima do limite de detecção do método analítico utilizado, na entrada e saída do sistema, indicando a descontaminação da área uma vez que os poços também não apresentaram concentrações significativas. Quanto aos compostos PAHs, foram observados somente valores traços de naftaleno na entrada do sistema em julho de 2006, sendo esse tratado e se isentando do efluente de saída.

Nenhum dos compostos analisados ultrapassou o limite estabelecido pela Portaria 518/04 do Ministério da Saúde, não apresentando risco a saúde humana.

9.2.4. Comentários

O sistema de remediação de extração multifásica (MPE) instalado na área do posto Luchini Auto Posto Ltda., foi projetado para maximizar a remediação da água subterrânea local, devido à presença de hidrocarbonetos derivados de petróleo dispostos no meio.

Durante o período monitorado observou-se um comportamento concordante do nível d'água subterrâneo e da precipitação acumulada mensal, onde os períodos de recarga ocorreram junto as maiores precipitações acumuladas e os rebaixamentos do nível d'água nos períodos de estiagem regional. Observou-se uma simetria da curva de variação do VOC médio nos poços de monitoramento e a de variação do nível d'água médio, essa sincronia é explicada pela mobilização dos vapores presentes na zona não saturada (intraporos) para zonas de menor pressão, poços de monitoramento, devido a compressão causada pela elevação do nível d'água, resultando em valores elevados de VOC em períodos de maior precipitação local (recarga) e menores valores desses compostos em períodos de estiagem (rebaixamento). Apresentou-se uma relação inversa das concentrações médias dos gases O₂ e CO₂ ao longo do período de janeiro de 2005 a julho de 2006, estando estes relacionados diretamente a presença de VOC nos poços.

Notou-se uma concentração média de oxigênio dissolvido superior ao *background* da área (1,29 mg/L) em todo o período de atividade do sistema, mostrando a eficiência desse na aeração do meio.

Valores da condutividade elétrica, que variaram no último trimestre entre 72 µS/cm e 205 µS/cm (naturais da área), mostraram uma redução gradativa desde agosto de 2005 indicando a degradação da contaminação em fase dissolvida da área. O potencial redox apresentou uma elevação gradativa desde novembro de 2005, concordante com valores de condutividade elétrica, mostrando a ausência de hidrocarbonetos derivados do petróleo.

Desde a implantação do sistema foi observado uma curva descendente nas concentrações dos compostos químicos de interesse, BTEX e PAHs, indicando que o sistema de remediação foi efetivo durante sua operação.

Os resultados analíticos dos parâmetros químicos BTEX e PAHs indicaram a ausência da pluma de contaminação de hidrocarbonetos derivados de petróleo em fase dissolvida na última campanha, onde todos os compostos apresentam concentrações abaixo dos valores orientadores do NABR.

Dados das análises microbiológicas e geoquímicas apontaram uma menor expressão do processo de biorremediação, visto que houve uma menor disponibilidade de matéria orgânica, refletindo em uma redução na contagem de colônias de bactérias aeróbias e anaeróbias, resultando em uma menor atividade metabólica dessas, portanto uma menor concentração de espécies reduzidas de Ferro bivalente, e maior concentração de Nitratos, Ferro Total e Sulfatos, indicando que os processos de biorremediação chegaram a seu final.

O monitoramento analítico dos efluentes do sistema MPE indicou que não foram verificados compostos BTEX e PAHs acima do limite de detecção do método analítico utilizado no efluente da saída do sistema, onde nenhum dos compostos analisados ultrapassou o limite estabelecido pela Portaria 518/04 do Ministério da Saúde, não apresentando risco a saúde humana.

Com base nesses dados, concluiu-se que o sistema de remediação MPE atingiu seu objetivo de recuperação da fase livre e tratamento das fases dissolvidas e vapor.

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A escolha de um sistema de remediação de áreas contaminadas por hidrocarboneto deve ser precedida de etapas de identificação, priorização e investigação, contemplando o planejamento e a implantação das medidas de remediação, seja de controle institucional ou de engenharia/emergenciais.

As medidas de controle de engenharia ou emergenciais implantadas nas áreas contaminadas por vazamentos de combustíveis são mais utilizadas do que as medidas de controle institucional, visto que, a maioria das áreas estão localizadas em área urbana, onde o abastecimento de água é feito por meio da rede do sistema público.

A utilização da análise de risco é de extrema importância para tomada de decisão quanto a necessidade de intervenção na área de estudo e conseqüentemente nas ações de remediação para proteção da saúde pública e do meio ambiente.

Um estudo que não apresenta risco à saúde humana, não quer dizer que a área não esteja contaminada, assim, mesmo que não apresente risco à saúde humana a área pode estar contaminada e o solo e/ou as águas subterrâneas necessitam alguma remediação.

Foi comentada neste trabalho a maioria dos métodos de remediação de áreas contaminadas por hidrocarboneto, cada um apresentando vantagens e desvantagens em relação aos locais degradados.

Atualmente observa-se pelos dados da CETESB que as técnicas mais utilizadas para remediação de áreas contaminadas são: o bombeamento e tratamento, a recuperação de fase livre e extração multifásica para o tratamento das águas subterrâneas e a extração de vapores e a remoção de solo/resíduo para as áreas contaminadas por hidrocarbonetos.

Quando dimensionados e operados de forma adequada os sistemas de remediação de extração multifásica e extração de vapores, associados ou não a um sistema “air sparging”, são exemplos que mostram boa eficiência para a remoção de fase livre residual menos densa que a água.

Nos dois exemplos apresentados neste trabalho foram utilizadas para remediação a técnica de extração multifásica e extração de vapores cujos resultados podem aferir que:

Caso 1: Auto Posto Eliane Ltda

O sistema de remediação implantado eliminou por completo a presença de fase livre verificada nos poços de monitoramento e de extração do *site* no início dos trabalhos. As concentrações para os compostos do grupo BTEX e do grupo PAHs foram reduzidas a níveis inferiores aos limites estabelecidos pela análise de risco tanto para água quanto para solo em todas as vias de exposição consideradas.

A campanha de monitoramento analítico realizada no ciclo de um ano de amostragens trimestrais após o encerramento da remediação comprovou que as concentrações para os compostos BTEX e PAHs em água e solo se encontram abaixo dos limites estabelecidos para todos os pontos analisados, portanto, não apresentando risco para os cenários considerados na análise de risco.

Caso 2: Luchini Auto Posto Ltda

Durante o processo de remediação observou-se uma concentração média de oxigênio dissolvido superior ao *background* da área (1,29 mg/L) em todo o período de atividade do sistema, mostrando a eficiência desta técnica na aeração do meio. A redução gradativa dos valores da condutividade elétrica, indicou a degradação da contaminação da fase dissolvida na área. O potencial redox apresentou uma elevação gradativa, concordante com valores de condutividade elétrica, mostrando a ausência de hidrocarbonetos derivados do petróleo.

Após a conclusão da remediação, o monitoramento analítico dos parâmetros químicos BTEX e PAHs indicou a ausência da pluma de contaminação de hidrocarbonetos derivados de petróleo em fase dissolvida, onde todos os compostos apresentaram concentrações abaixo dos valores orientadores dos Níveis Aceitáveis Baseados em Risco (NABR).

É relevante as iniciativas pioneiras da CETESB neste problema, bem como, suas contribuições de promover e divulgar as etapas detalhadas do processo de gerenciamento de áreas contaminadas, iniciadas na década dos anos 1990, e aprimoradas continuamente com revisões dos procedimentos, visando uma gestão proativa e consensual com o setor de combustíveis, da indústria de equipamentos e das empresas de consultoria ambiental.

11. REFERÊNCIAS

- ACKERMANM, M. Limpeza por meio de extração multifásica de uma área contaminada com vários VOC. In: MOERI, E.; COELHO, R.; MARKER, A. (Ed.). **Remediação e revitalização de áreas contaminadas**. São Paulo: Signus Editora, 2004.
- AEHS – The Association for Environment Health and Sciences. **HUMAN Health Risk Based Evaluation of Petroleum Release Sites: Implementing the Working Group Approach**. June 1999. Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. **Distribuição percentual dos postos revendedores de combustíveis automotivos no Brasil, segundo a bandeira, em outubro/2008**. Brasília – ANP (2008). Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>> Acesso em: 15.10.2008.
- AMBIENTE BRASIL. **Consulta geral a homepage**. 2008. Disponível em <<http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./energia/petroleo/index.html&conteudo=./energia/petroleo/petroleo.html>> Acesso em 21.03.2008.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **A guide to the assessment and remediation to underground petroleum releases**. 3.ed. Washington, 1996. 1628 p. (API Publication)
- AQUINO, R.S., ALVARENGA, F.J.M., FRANCO, D.A., LOPES, O.G.P.C. **História das Sociedades Modernas às Sociedades Atuais**. 26ª ed. Rev. E atual. Rio de Janeiro: Ed. Ao Livro Técnico, 1993.
- BARKER, J.; BANKS, J. **Efeitos da variação do nível d'água em fase livre de gasolina pura e de gasolina com etanol**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 10., São Paulo, 1998. *Resumos...* São Paulo: ABAS, 1998. p.10.
- BLAKE and HALL, **Monitoring petroleum spills with wells: some problems and solutions, Proceedings**. Fourth National Symposium on Aquifer Restoration and Groundwater Monitoring , National Water Well Association, Columbus, 1984, pp. 305-310.
- BRASIL. **Lei n.º 6.938 de 31/08/1981**: Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, Distrito Federal, 1981. Disponível em <http://planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6938.htm> Acesso em 05.09.2007.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 273**, de 29 de novembro de 2000. Brasília, 2000. Disponível em:

<http://www.cetesb.sp.gov.br/licenciamento/legislacao/federal/resolucoes/2000_Res_CO NAMA_273.pdf>. Acesso em 05.09.2007.

BUCCI, E. M. (2000) **Remediação de áreas contaminadas por vazamentos de tanques de combustíveis em postos de serviços**. São Paulo, 152 p. Dissertação (Mestrado) - Saneamento Ambiental, Universidade Mackenzie de São Paulo.

BUSBY, R. D.; LENHARD, R. J.; ROLSTON, D. E. **An investigation of saturation-capillary pressure relations in two and three-fluid systems for several NAPLS in different porous media**. Ground Water, Dublin, v. 33, n. 4, p. 570-578, July./Aug. 1995.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Decisão de Diretora nº 103/C/E**, publicada no Diário Oficial do Estado em 22 de julho de 2007. São Paulo, SP, 2008a, disponível em < <http://www.cetesb.sp.gov.br/documentos> > Acesso em 08.08.2008.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. *Ações Corretivas baseadas em Risco (ACBR) aplicadas a Áreas Contaminadas com Hidrocarbonetos Derivados de Petróleo e Outros Combustíveis* publicada no Diário Oficial do Estado em 07 de julho de 2006. São Paulo, SP, 2008b. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/2006/07/07_areas.htm> Acesso em 08.08.2008.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo**. São Paulo, CETESB, 2001.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. São Paulo: CETESB, 2001.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Cadastro de áreas contaminadas**. Banco de Dados. Desenvolvido pela CETESB. São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/cadastro.asp>.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Procedimento para avaliação de risco e estabelecimento de metas de remediação baseadas em risco** – no prelo – Procedimento não publicado. CETESB, São Paulo, 2007.

CORSEUIL, H. X.; ALVAREZ, P. J. J. **Implications of the presence of ethanol on intrinsic bioremediation of BTX plumes in Brazil.** Hazardous Waste & Hazardous Materials, New York, v. 13, n. 2, p. 213-221, 1996.

CUNHA, R. C. A. **Avaliação de risco em áreas contaminadas por fontes industriais desativadas.** 1997. 152 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

D'AGOSTINHO, A.; FLUES, M.: **Determinação do coeficiente de distribuição (Kd) de benzo(a)pireno em solo por isoterma de sorção.** In Química e Derivados vol.29 n.º 4, São Paulo, SP, Julho/Agosto 2006. Disponível em <
http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422006000400006&script=sci_arttext>
Acesso em 08.08.2008.

DINARDI, A. L.; FORMAGI, V. M.; CONEGLIAN, C. M. R.; BRITO, N. N.; DRAGONI SOBRINHO, G.; TONSO, S.; PELEGRINI, R. **Fitorremediação.** In: III Fórum de Estudos Contábeis, 2003, Limeira. Anais. Limeira: Centro Superior de Educação Tecnológica (CESET) e Curso de Tecnologia em Saneamento Ambiental - Laboratório de Pesquisas Ambientais - UNICAMP, 2003. p. 1-15.

DULLIEN, F. A. L. **Porous media, fluid transport and pore structure.** 2 ed. San Diego: Academic Press, 1992. 574 p.

ECOTEST TECNOLOGIA AMBIENTAL LTDA. **Consulta geral a homepage.** 2008. Disponível em <<http://www.ecotest.com.br>> Acesso em 15.06.2008.

ECOTEST TECNOLOGIA AMBIENTAL LTDA. **Relatório de investigação detalhada do Auto Posto Eliane Ltda.** São Paulo, SP, 2006.

ESSENCIS. **Tecnologias de remediação disponíveis.** São Paulo, 2008 Disponível em <http://www.essencis.com.br/serv_udt.asp>. Acesso em 15.06.2008.

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. Technology Transfer. **Site characterization for subsurface remediation.** Washington: US Government Printing Office, 1991. 259 p. (Seminar Publication. EPA/625/4-91/026). Disponível em:
<<http://www.epa.gov/OUST/cat/sitchasu.pdf>>. Acesso em: 21.03.2008

EUGRIS – European Information System Soil and Groundwater. **Consulta geral a homepage**. 2008. Disponível em:

<http://www.eugris.info> Acesso em 15.06.2008

FELTRE, R. **Química Orgânica**. 2004

FERREIRA, S. B. **Estudos laboratoriais para avaliação do potencial de contaminação de água e do solo por gasolina oxigenada**. 2000. Tese (Doutorado Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

FERREIRA, S. M. **Relação entre a espessura real e aparente da gasolina com etanol e da gasolina pura em colunas de laboratório**. 2003. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

FRTR – Federal Remediations Technologies Roundtable. **Remediation Technologies Screening Matrix and Refence Guide, Version 4.0**. 2008. Disponível em:

<http://www.frtr.gov/matrix2/section3/3_2.html>. Acesso em 10.06.2008.

FURTADO, M. **Remediação de solos: Para afastar o perigo que se esconde nos subterrâneos das grandes cidades, meios legais e econômicos devem fomentar obras de descontaminação**. In. Revista Química e Derivados, Outubro de 2008. Disponível em < <http://www.quimica.com.br/revista/qd437/solos5.htm> > Acesso em 15.11.2008.

GÜNTHER M. A.; CUNHA, R. C. A. Contaminated sites and urban ecology in São Paulo, Brazil. In: BREUSTE, J.; FELDMANN, H.; UHLMANN, O. (Ed.). **Urban ecology**. New York: Springer, 1998. p. 446-451.

HUNTLEY, D.; WALLACE, J. W.; HAWK, R. N. **Nonaqueous phase hydrocarbon in a fine-grained sandstone: 2. Effect of local sediment variability on the estimation of hydrocarbon volumes**. Ground Water, Dublin, v. 32, n. 5, p. p. 778-783, Sept.-Oct. 1994.

KEMBLOWSKI, MW and CY CHIANG, **Hydrocarbon thickness fluctuations in monitoring wells**, Ground Water , 1990. 244-252

LAGREGA, M. D.; BUCKINGHAM, P. L.; EVANS, J. C. **Hazardous waste management**. New York: McGraw-Hill, 1994. 1146 p.

LENHARD, R. J.; PARKER, J.C. **Estimation of free hydrocarbon volume from fluid levels in monitoring wells**. Ground Water, Dublin, v. 28, n. 1, p. 57-67, Jan. 1990.

LOPES, A. G. et al. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. São Paulo: CETESB. 2001. Disponível em:

http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/manual.asp>. Acesso em 15.06.2007.

MILLER, A. **Remediação de fase livre de gasolina por bombeamento duplo: estudo de caso - São Paulo**. 2001. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MOERI, E.; COELHO, R.; MARKER, A. (Ed.). **Remediação e revitalização de áreas contaminadas**. São Paulo: Signus Editora, 2004.

NEGRÃO, P. **Extração de compostos orgânicos voláteis de águas subterrâneas através de air strippers**. Clean News. São Paulo, n. 05, 2002. disponível em:

http://www.clean.com.br/artigos/cleannews/cleannews5_strippers.pdt>. Acesso em 10.07.2007.

NOBRE, M.M.; NOBRE, R.C.M. **Remediação de solos: Técnicas alternativas melhoram desempenho**. In Química e Derivados vol.31 Outubro/2008 [online]. São Paulo, SP 2008. Disponível em < <http://www.quimica.com.br/revista/qd417/solo1.htm> > Acesso em 15.11.2008.

NUNES, C.C.; CORSEUIL, H.X.: **Importância do Etanol da atenuação natural de águas subterrâneas impactadas por gasolina**. In: Engenharia Sanitária e Ambiental vol.12 nº 3 Jul/Set. Rio de Janeiro- RJ 2007 p.259-272.

PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. **Consulta geral a homepage**. 2008. Disponível em < <http://www.br.com.br> > Acesso em 07.09.2007.

PROSSIGA: PORTAL DE RECURSOS MINERAIS. **Consulta geral a homepage**. 2008. Disponível em < http://www4.prossiga.br/recursosminerais/glossario/glossario_i.html > Acesso em 07.09.2008.

OLIVEIRA, E. **Barreira hidráulica para contenção de plumas de contaminação**. Artigo Técnico [online], 2008. Disponível em < <http://www.abas.org/abasinforma/125/paginas/22.htm> > Acesso em 07.09.2008.

OLIVEIRA, E. **Contaminação de aquíferos por hidrocarbonetos provenientes de vazamentos de tanques de armazenamento subterrâneo**. 1992. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

OLIVEIRA, E.; DUARTE, U. Comportamento da gasolina com etanol (E-20) e da gasolina pura após a simulação de um vazamento em colunas de laboratório. **Revista do Instituto de Geociências**, São Paulo, v. 4, p. 91-102, out. 2004.

PENNER, G. C. **Estudos laboratoriais da contaminação do solo por gasolina com o uso de detector de fotoionização**. 2000. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

PEREIRA, M. A. C. **Alteração da espessura da fase livre da gasolina sob ação co-solvente do etanol**. 2000. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

POTTER, T.L.; SIMMONS, K.E. **Composition of Petroleum Mixtures**. Massachusetts: Amherst Scientific Publishers, 1998.

PUJOL, E. **Remediação de áreas**. 2007. Artigo Técnico [online]. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Remedia%C3%A7%C3%A3o_de_%C3%A1reas> Acesso em 15.06.2008.

ROCHE. R. **Vamos entender o que é remediação e seus métodos?** Artigo Técnico [online], 2008. Disponível em <http://www.robertoroche.com.br/artigos.php?id_artigo=24> Acesso em 05.09.2007.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto Estadual n.º 47.397 de 02/12/2002**: Dá nova redação ao Título V e ao Anexo 5 e acrescenta os Anexos 9 e 10, ao Regulamento da Lei 997/76. **Diário Oficial do Estado**, São Paulo, SP, 2002. Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/documentos/dec47397.pdf>> Acesso em 05.09.2007.

SÃO PAULO (Estado), Secretaria do Meio Ambiente: Dispõem sobre o licenciamento ambiental de postos de abastecimento de combustíveis e afins. **Resolução SMA n.º 05 de 28 de março de 2001**. **Diário Oficial do Estado**, São Paulo, SP, 2001. Disponível em <

www.cetesb.sp.gov.br/Servicos/licenciamento/postos/legislacao/Resolucao_Sma_05_01.pdf
f > Acesso em 05.09.2007.

SERVIÇOS TÉCNICOS AMBIENTAIS LTDA – SERVMAR. Workshop de Remediação Ambiental – Material divulgação. Elaboração SILLOS M. e Karozawa, S. S. São Paulo, 2005.

SERVIÇOS TÉCNICOS AMBIENTAIS LTDA – SERVMAR. **Relatório de investigação detalhada do** Luchini Auto Posto Ltda. Jundiaí, SP. 2007.

SEVERINO, A.J. **Metodologia do Trabalho Científico**, São Paulo, SP, 2002.

SILVA, C. C. G. **Otimização de uma unidade de *air stripping* para remover BTEX de águas residuárias**. 2004. 251 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

STIER, T. Seguindo as tendências das tecnologias de remediação. Será que às vezes não escolhemos a abordagem errada? In: MOERI, E.; COELHO, R.; MARKER, A. (Ed.).

Remediação e revitalização de áreas contaminadas. São Paulo: Signus Editora, 2004.

TECNOHIDRO PROJETOS AMBIENTAIS. **Consulta geral a homepage**. 2008.

Disponível em < <http://www.tecnohidro.com.br/tecnologias.htm> > Acesso em 15.06.2008.

TRINDADE J. V. O. **Avaliação das técnicas de bioaugmentação e bioestimulação no processo de biorremediação de solo contaminado por hidrocarbonetos de petróleo**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2002.

TROVÃO, R. S. **Análise ambiental de solos e águas subterrâneas contaminadas com gasolina: estudo de caso no município de Guarulhos - SP**. São Paulo, 157 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

YANIGA, P.M.; SMITH, W. **Aquifer restoration via accelerated *in situ* biodegradation of organic contaminants**. In: Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water - Prevention, Detection and Restoration. National Water Well Association, Worthington, OH., pp. 451–470, 1984.