

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS POR
HIDROCARBONETOS DE PETRÓLEO ATRAVÉS DA TÉCNICA DE
EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA (MPE – MULTI-PHASE EXTRACTION)**

Thaís Feitosa Trevisani

Orientador: Prof. Dr. Uriel Duarte
Co-Orientador: Dra. Sílvia Maria Ferreira

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF –2007/43)**

**SÃO PAULO
2007**

**TF
T814
TF.r**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**REMEDIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS DE
PETRÓLEO ATRAVÉS DA TÉCNICA DE EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA**
(MPE - MULTI-PHASE EXTRACTION)
(TF 07/43)



Thaís Feitosa Trevisani

DEDALUS - Acervo - IGC

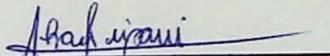


30900024320

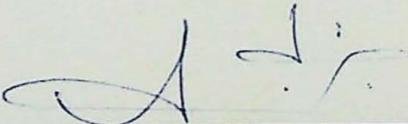
Orientador: Prof. Dr. Uriel Duarte
Co-orientador: Dra. Sílvia Maria Ferreira

Monografia de Trabalho de Formatura

De acordo,



Thaís Feitosa Trevisani



Prof. Dr. Uriel Duarte

Novembro, 2007

TF
T814
TF.R

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOGRAFIA

REMEDIACÃO DE ÁREA CONTAMINADA POR HODÓGENO SULFÊRICO DE
PETRÓLEO ATRAVÉS DA TECNOLOGIA DE EXTRACAO MULTISTÁGIO
(MEPE - MULTISTAGE EXTRACTION)
(MEPE - MULTISTAGE EXTRACTION)



Túlio Ferreira Travassos

Organização: Projeto INCA
Co-orientador: Dr. Silviano Marques Góes

Motivação de Técnico de Recursos

De acordo

Sergio D. Góes

Luis Carlos Travassos

Monções, 2001

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Uriel Duarte, meu orientador, e à Dra. Sílvia Maria Ferreira, minha co-orientadora pelo acompanhamento, ensino e paciência durante todo o processo de elaboração e entrega deste trabalho;

À Hidroplan - Hidrogeologia e Planejamento Ambiental Ltda.- pela oportunidade de estágio que me proporcionou aprender na prática.

Aos professores que me acompanharam durante toda a minha Graduação. E, em especial, ao Prof. Dr. Umberto Giuseppe Cordani, ao Prof. Dr. Antônio Carlos Rocha Campos e à Profª. Drª. Wânia Duleba, referenciais e estímulo para minha vida acadêmica e profissional.

Aos colegas de classe, de trabalho e de campo cuja presença me ajudou a vencer os obstáculos em cada etapa da graduação e, em especial, à Alexandra, pela amizade, apoio e companheirismo.

E, finalmente, aos meus pais, sempre presentes, que me fortaleceram e incentivaram em períodos difíceis, dando todo suporte necessário para que eu pudesse realizar cada um dos meus sonhos e ao Luis Felipe pela sua compreensão e ajuda incondicionais.

ÍNDICE

1. Resumo do Projeto	1
2. Abstract	2
3. Introdução.....	3
4. Metas e Objetivos.....	4
5. Fundamentação Bibliográfica.....	5
6. Materiais e Métodos	11
6.1 Sistema de Remediação	11
6.2 Monitoramento	14
6.3 Análise Química	16
7. Desenvolvimento do Trabalho	17
8. Resultados Obtidos.....	18
8.1 Caracterização geológica, hidrogeológica e de entorno	18
8.1.1 Auto Posto Azul	18
8.1.2 Auto Posto Amarelo	22
8.1.3 Auto Posto Vermelho	26
8.2 Sistema de Remediação MPE	31
8.2.1 Volume de Água Bombeada	31
8.4.2 Volume de Produto Recuperado	34
8.3 Fase Livre	37
8.3.1 Auto Posto Azul	38
8.3.2 Auto Posto Amarelo	38
8.3.3 Auto Posto Vermelho	39
8.4. Pluma contaminante – Fase Dissolvida	39
8.4.1 Auto Posto Azul	39
8.4.2 Auto Posto Amarelo	39
8.4.3 Auto Posto Vermelho	40
9. Interpretação e Discussão dos Resultados.....	41
9.1 Características Físicas.....	41
9.2 Volume de Água Bombeada.....	42
9.3 Volume de Produto Recuperado	43
9.4 Fase livre.....	45
9.5 Pluma Contaminante - Fase Dissolvida	48
10. Conclusão	49
11. Referências bibliográficas	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Principais cenários hidrogeológicos com a aplicação do sistema MPE (extraído e modificado de USACE, 1999).....	7
Figura 2 - Esquema do sistema DPE (extraído e modificado de USACE, 1999)	9
Figura 3 - Esquema do sistema TPE (extraído e modificado de USACE, 1999).....	9
Figura 4 - Perfil esquemático do poço de monitoramento PM1.....	19
Figura 5 - Variação do nível d'água em poços de monitoramento	20
Figura 6 - Dados pluviométricos (mm) da cidade de São Paulo (ago 05 a set 07)	21
Figura 7 - Perfil esquemático do poço de monitoramento PM7.....	23
Figura 8 - Variação do nível d'água em poços de monitoramento	24
Figura 9 - Índices pluviométricos (mm) na cidade de Itu (jan 95 a out 00)	25
Figura 10 - Perfil esquemático do poço de monitoramento PM11.....	27
Figura 11 - Variação do nível d'água em poços de monitoramento	28
Figura 12 - Índices pluviométricos (mm) na cidade de Osasco (jan 95 a out 00).....	29
Figura 13 - Volume de água bombeada no período de operação do sistema (Auto Posto Azul)	31
Figura 14 - Volume de água bombeada pelo sistema instalado no Auto Posto Amarelo	32
Figura 15 - Volume de água bombeada pelo sistema instalado no Auto Posto Vermelho	33
Figura 16 - Volume de produto recuperado pelo sistema instalado no Auto Azul	34
Figura 17 - Volume de produto recuperado pelo sistema instalado no Auto Posto Amarelo ..	35
Figura 18- Volume de produto recuperado pelo sistema instalado no Auto Posto Vermelho .	36
Figura 19 - Variação da espessura da fase livre em poços de monitoramento em função da variação do nível d'água (extraído e modificado de Ferreira, 2007)	37
Figura 20 – Auto Posto Azul - Profundidade da fase livre, nível d'água e mangueira extratora no poço de bombeamento PB4	45
Figura 21 - Auto Posto Amarelo - Profundidade da fase livre, nível d'água e mangueira extratora no poço de bombeamento PM/PB01	46
Figura 22- Auto Posto Vermelho - Profundidade da fase livre, nível d'água e mangueira extratora no poço de bombeamento PB1.....	47

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1 – Vista frontal do sistema.....	13
Foto 2a – Entrada do sistema e compartimento do filtro.....	13
Foto 2b – Filtro.....	13
Foto 3 - Bomba de vácuo.....	13
Foto 4 – Interior da caixa separadora.....	14
Foto 5a – <i>Interface</i>	14
Foto 5b – Vacuômetro digital.....	14
Foto 6a – PID.....	15
Foto 6b – Anemômetro.....	15

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Aplicabilidade do MPE (modificado de USEPA, 1999).....	6
Tabela 2 - Parâmetros medidos em um evento de monitoramento	15
Tabela 3 - Características físicas dos aquíferos.....	41
Tabela 4 - Parâmetros do sistema.....	43

1. Resumo do Projeto

Os postos de serviços correspondem a 73% de áreas contaminadas no Estado de São Paulo, segundo informações da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 2005).

Assim sendo, torna-se necessário o estudo e avaliação das técnicas de remediação, pois é possível estabelecer qual é a técnica mais eficiente para determinados cenários hidrogeológicos. A Extração Multifásica (MPE – *Multi-Phase Extraction*) possui diversas vantagens, uma vez que extraí simultaneamente as fases vapor, dissolvida e livre, além de servir como barreira hidráulica, evitando a migração da pluma de contaminação.

Devido às vantagens por ela oferecidas, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência da técnica de remediação de Extração Multifásica (bem como o melhor cenário) em diferentes contextos geológicos e hidrogeológicos acompanhando três casos distintos em postos de serviços localizados nas cidades de São Paulo, Itu e Osasco, no Estado de São Paulo. Tais postos são aqui denominados genericamente de Auto Posto Azul, Auto Posto Amarelo e Auto Posto Vermelho, respectivamente.

A avaliação teve base nos dados de campo, obtidos desde o início da operação do sistema, os quais foram compilados em tabelas, apresentados como gráficos e analisados comparativamente.

Os três postos encontram-se em áreas mistas, ou seja, o entorno possui residências e comércios. Todos encontram-se sob condições geológicas apropriadas à aplicação do sistema MPE, (ex. intercalações entre pacotes arenosos e argilosos). As condições hidrogeológicas também são bem propícias (nível d'água, porosidade efetiva, e condutividade hidráulica). Apesar das características geológicas/hidrogeológicas distintas, os três postos o processo de recuperação tem tido sucesso. Notou-se que os aquíferos com maior quantidade de areia, maior porosidade efetiva e condutividade hidráulica apresentam maior volume de água acumulado, bem como um maior volume de produto recuperado.

Tem-se observado uma diminuição contínua da fase livre presente nos poços de monitoramento, bombeamento e recuperação. As plumas de fase dissolvida estão contidas, decrescendo em extensão; e as concentrações tendem a diminuir, ou mesmo tornarem-se inferiores aos valores estabelecidos pela agência reguladora. A contaminação presente não oferece risco à população do entorno e a migração das plumas foi contida, não se expandindo para além das instalações dos postos.

Pode-se concluir que MPE é uma técnica eficiente se utilizada em contexto geológico aceitável, promovendo recuperação rápida do contaminante, sendo portanto ideal para aplicação em casos de contaminação por hidrocarbonetos do petróleo com formação de LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquids).

2. Abstract

Service stations correspond to 73% of contaminated areas of the State of São Paulo, according to information from the Environmental Sanitation Technology Company (CETESB, 2005).

Therefore, a study and evaluation of remediation techniques become necessary, for it is possible to establish which technique is most effective for certain hydrogeological scenarios. Multi-Phase Extraction (MPE) has several advantages; as it simultaneously extracts vapor, dissolved, free phases, besides serving as a hydraulic barrier, avoiding the spread of contaminating plume, amongst others.

Given the advantages it offers, this present work has the objective of evaluating the efficiency of the Multi-Phase-Extraction remediation technique (as well as the best scenario) in different geological and hydrogeological contexts, by following three distinct cases in service stations located in the cities of São Paulo, Itu and Osasco, in the State of São Paulo, Brazil. Such stations have been generically labeled as Blue Gas Station, Yellow Gas Station and Red Gas Station, respectively.

The performed evaluation based itself on field data, gathered since the beginning of the system's operation, organized in the shape of charts and graphics, and analyzed comparatively.

All the three stations of them are under geological conditions considered adequate to the application of the MPE system, having intercalations between the arenaceous and argillaceous packs. Hydrogeological conditions are also very appropriate (water level, effective porosity, and hydraulic conductivity).

Despite the distinct geological and hydrogeological characteristics, in all tree stations the recovery process has been successful. It has been noticed that the aquiferous containing the largest amount of sand, effective porosity and hydraulic conductivity present a greater accumulation of water volume, as well as a greater volume of recovered product.

A continuous decrease in the free phase present in monitoring, pumping and recovery wells has been observed. Dissolved phase plumes have been contained and decreasing in extension; and the concentrations tend to decrease or even become inferior to the values established by the regulating agency.

The present contamination does not jeopardize the surrounding population, and the migration of plumes has been contained, not expanding beyond the stations' facilities.

It can be concluded that Multi-Phase Extraction is an efficient technique if used in an acceptable geological context, promoting a fast recovery of the contaminating product, therefore being ideal in the event of a contamination by petroleum hydrocarbons with the formation of LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquids).

3. Introdução

A maior parte dos postos de serviços foi construída na década de 1970. Como a vida útil dos tanques de armazenamento subterrâneos é superior a 25 anos, a contaminação de solo e de água subterrânea por combustíveis derivados de petróleo, oriunda de vazamentos nesses tanques é um problema comum e crescente em todo o país.

Os postos de serviços correspondem a 73% de áreas contaminadas no Estado de São Paulo, segundo informações da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 2005).

Este tipo de contaminação pode atingir diretamente a população do entorno dos postos, que muitas vezes está inserida em contexto de escolas, creches, hospitais e zonas residenciais. Além da contaminação direta dos poços de captação de água (se existirem), há riscos de explosões e a liberação de vapores, que se inalados pela população, constituem riscos para a saúde. Sabe-se que a ingestão de BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos) pode afetar o sistema nervoso central, além do Benzeno ser considerado cancerígeno.

Diante do aumento da contaminação de solo e de água subterrânea originados em postos de combustíveis (CETESB, 2006), o estudo e avaliação das técnicas de remediação são importantes de forma a direcionar qual é a mais eficiente para determinados cenários hidrogeológicos.

A técnica de extração multifásica (MPE – *Multi-Phase Extraction*) possui diversas vantagens tais como:

- Eficiência na taxa de remoção de produto em fase livre (pode ser 5 a 10 vezes mais elevada do que nos técnicas convencionais);
- Eficiência nas taxas de bombeamento de água contaminada (fase dissolvida);
- Eficiência na extração de Compostos Orgânicos Voláteis (fase vapor);
- Incremento da atividade bacteriana atuando na degradação de Compostos Orgânicos Voláteis (VOC) e Compostos Orgânicos Semi-voláteis (SVOC) presentes no solo e água subterrânea;
- Pode servir como uma barreira hidráulica se os tubos de sucção forem colocados próximos ao fundo dos poços de extração.

Este projeto contempla o estudo de remediação de três postos de serviços utilizando a técnica de extração multifásica, que pode ser utilizada quando se identifica a presença de produtos derivados de petróleo na água subterrânea que assumem mais de uma fase em subsuperfície: livre (sobrenadante), dissolvida (água), residual (solo) e gasosa.

As áreas onde se encontram os três postos denominados genericamente de Azul, Amarelo e Vermelho apresentam características geológicas e hidrogeológicas distintas e, portanto, apresentam respostas diferentes à técnica de remediação empregada.

4. Metas e Objetivos

Avaliar a eficiência da técnica de remediação de extração multifásica ((MPE – *Multi-Phase Extraction*), bem como o melhor cenário, em diferentes contextos geológicos e hidrogeológicos acompanhando três casos distintos em postos de serviços localizados nas cidades de São Paulo, Itu e Osasco, pertencentes ao Estado de São Paulo.

5. Fundamentação Bibliográfica

Segundo a U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA , 1997a) a técnica de Extração Multifásica (*Multi-Phase Extraction* -MPE) foi desenvolvida para a remediação de Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) e outros contaminantes como hidrocarbonetos do petróleo (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos totais) e solventes clorados e não clorados (Tetracloroetileno, Tricloroetileno, etc.) em formações subsuperficiais com baixa a moderada permeabilidade. Esta técnica é a modificação da tecnologia convencional de extração de vapor de solo (*Soil Vapor Extraction* - SVE).

Na verdade, o sistema MPE é um aprimoramento do sistema tradicional SVE. Diferentemente do SVE, o MPE extrai simultaneamente a água subterrânea e o vapor do solo. O nível d'água é rebaixado até expor a zona saturada, então a técnica SVE pode ser utilizada no solo recém exposto. Isto permite que compostos voláteis adsorvidos no antigo solo saturado sejam extraídos por correntes de vapor induzidas. Além disso, Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) solubilizados na água subterrânea podem ser removidos também, por meio da extração.

A Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR,2007) define a extração multifásica como uma tecnologia que utiliza um sistema de alto vácuo para remover várias combinações de contaminantes na água subterrânea, fase livre de subprodutos do petróleo e vapor de hidrocarbonetos da subsuperfície. Os vapores e líquidos extraídos são tratados, descartados ou reinjetados em subsuperfície (em locais permitidos por leis estaduais).

A efetividade da técnica MPE é diretamente dependente das características locais incluindo geologia, hidrogeologia e as características dos contaminantes. A técnica mostra menor eficiência em locais que possuem alta permeabilidade e a litologia consiste principalmente em cascalho ou seixos.

Para que se obtenha uma aplicação eficiente do MPE, o aquífero deve ter uma maior capacidade de ter seu nível freático rebaixado. Locais com vazões de fluxo de água elevadas podem não ser adequados para o MPE. Esta técnica não é recomendada para locais contaminados por compostos não voláteis (i.e. Inorgânicos ou semi-voláteis) (USEPA, 1997 a).

As principais vantagens defendidas por USEPA (1997b) são:

- Aumento da zona de influência da extração de vapor;
- Aumento da taxa de água em cenários de baixa permeabilidade;
- Aumento da taxa de remoção da fase livre e do produto residual (NAPL);

Segue as principais limitações da remediação por MPE em locais contaminados por VOCs (USEPA, 1997b):

- Menor efetividade de custo para tipos de solos permeáveis;
- Custos de operação podem ser maiores dependendo da potência requerida dos equipamentos e do tratamento de água necessário;
- A limitação de fluxo de ar a partir da superfície pode limitar a eficiência.

O uso da técnica MPE segundo USEPA (1999) pode ser benéfica quando a técnica é aplicada apropriadamente ao cenário hidrogeológico e as propriedades dos contaminantes. Se aplicada fora das condições apropriadas esta técnica pode ser ineficaz na remediação da área impactada e pode deixar de ter um custo efetivo.

A aplicabilidade da técnica de MPE é dirigida, primariamente, pelas propriedades do meio e numa menor extensão, pelas propriedades dos contaminantes. Quando poços de extração de água subterrânea (*Pump and Treat*) são utilizados, e as concentrações atingem uma assintótica, a conversão destes poços para poços MPE pode ser econômica, conduzindo a um aumento da recuperação de massa de contaminantes. A aplicabilidade da técnica de MPE está sumarizada na **Tabela 1**.

Parâmetro	Aplicabilidade alvo ou Característica da MPE
Condutividade Hidráulica	Moderada a baixa ($K = 10^{-3}$ a 10^{-5} cm/s)
Transmissividade	Baixa (<500 gpd/ft)
Cenário Geológico	Areia a argilas
Permeabilidade do ar na zona vadosa	Moderada a baixa ($k < 1$ darcy)
Características da formação	Baixa permeabilidade, sistemas de fraturas Intercalações entre areia e argila Espessura limitada da zona saturada Nível d'água raso Zona capilar espessa
Taxa de recuperação	Baixa taxa de recuperação de água alcançada com o bombeamento convencional
Localização do contaminante	Zonas não saturada, saturada e capilar
Contaminante	VOCs halogenados VOCs aromáticos e/ou hidrocarbonetos do petróleo (TPH) Produto livre (LNAPL)
Vapor de pressão do contaminante	> 1 mm Hg a 20°C
Volatilidade do contaminante	> 0,01 a 20°C

Tabela 1 - Aplicabilidade do MPE (modificado de USEPA, 1999)

Existem três possíveis cenários hidrogeológicos (USACE, 1999):

Em sites com permeabilidade excessivamente alta e baixa pressão de entrada de ar (espessura da franja capilar menor que 25 centímetros), os poços MPE tendem a encher de água, o fluxo de ar muito pequeno será induzido, e a eficiência do processo será comprometida (**Figura 1, A**).

Em locais de permeabilidade moderada, onde as pressões de entrada de ar são baixas (a espessura da franja capilar é entre 25 e 250 centímetros), o MPE deve realçar o fluxo de ar significativamente além de aumentar a efetividade do custo. (**Figura 1, B**)

Em locais com solos de menor permeabilidade e pressões de entrada de ar elevadas (espessura da franja capilar maior que 250 centímetros), o MPE não será capaz de retirar a água do solo. Como resultado, o fluxo de ar será limitado a caminhos preferenciais, enquanto que o solo permanecerá saturado. (**Figura 1, C**)

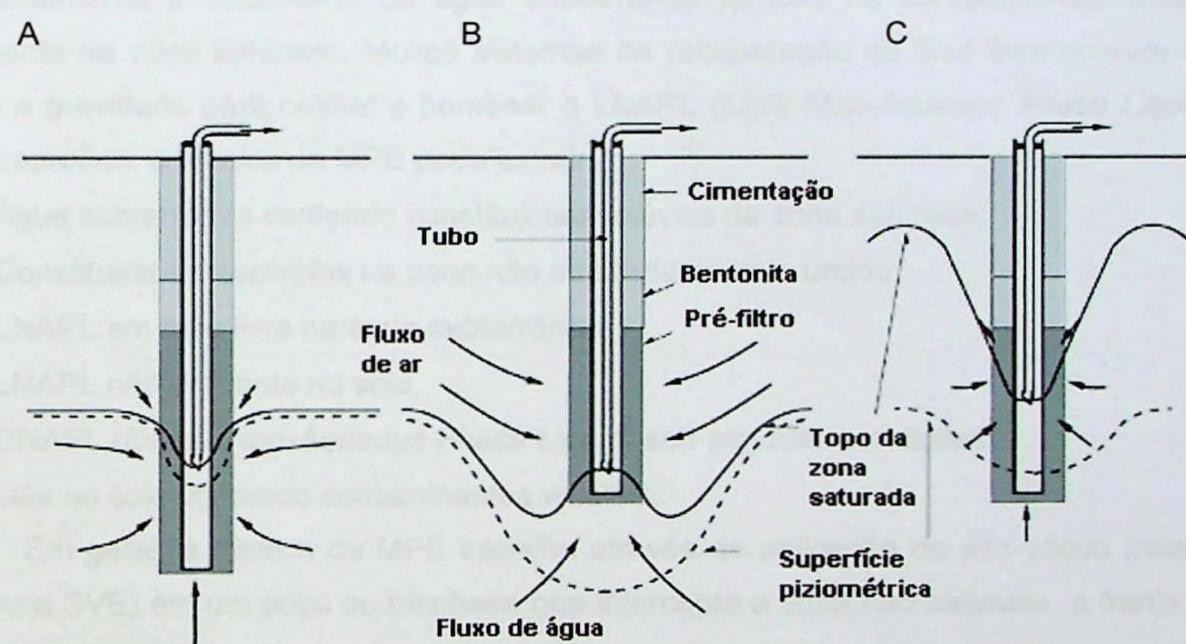


Figura 1 - Principais cenários hidrogeológicos com a aplicação do sistema MPE (extraído e modificado de USACE, 1999)

USACE (1999) define a técnica MPE como uma tecnologia de remediação *in situ* que extrai simultaneamente a fase vapor, a fase dissolvida e fase separada de contaminantes na zona não saturada, franja capilar e zona saturada de solos e água subterrânea. É uma modificação da técnica de extração de vapores do solo (SVE) e é mais comumente aplicada em solos moderadamente permeáveis.

As técnicas de remediação *in situ* podem ser descritas como métodos que mais e mais são freqüentemente utilizados, são menos caros que a escavação e não apenas movem a contaminação para outro local. De qualquer forma, as limitações de tecnologias *in situ* utilizadas isoladas, têm sido mais evidentes, especialmente em remediações que levam mais tempo que o esperado. E mais, tecnologias isoladas podem tratar apenas uma única fase da contaminação, quando de fato, a contaminação está frequentemente espalhada através de múltiplas fases e zonas.

Por exemplo, a técnica de SVE e *Bioventing* trata apenas a zona não saturada e o bombeamento e tratamento de água subterrânea remove os contaminantes dissolvidos somente da zona saturada. Muitos sistemas de recuperação de fase livre contam apenas com a gravidade para coletar e bombear o LNAPL (*Light Non-Aqueous Phase Liquid*). Em contrapartida, a técnica de MPE pode extrair:

- Água subterrânea contendo constituintes solúveis da zona saturada;
- Constituintes dissolvidos na zona não saturada do solo úmido;
- LNAPL em fase livre na água subterrânea;
- LNAPL não drenante no solo;
- DNAPL (*Dense Non-Aqueous Phase Liquid*) sob algumas condições;
- Gás no solo contendo contaminantes voláteis.

Em geral, a técnica de MPE trabalha através da aplicação de alto vácuo (relativo ao sistema SVE) em um poço ou trincheira que intercepta a zona não saturada, a franja capilar e a zona saturada.

MPE é um termo genérico para tecnologias que extraem vapor do solo e água subterrânea simultaneamente. Sob este termo genérico, de fato estão presentes duas tecnologias, a extração bifásica (*Two-Phase Extraction – TPE*) e a extração dualfásica (*Dual-Phase Extraction – DPE*) (USEPA, 1997a).

Se a fase líquida e a fase gasosa forem extraídas dentro de um mesmo tubo este tipo de MPE é chamado freqüentemente de *bioslurping* (quando usado para recuperação de LNAPL), ou extração bifásica (TPE, freqüentemente utilizado quando se trata de solventes clorados) (Figura 2). Se há condutos separados para vapor e líquido, alguns chamam esta tecnologia de extração duplo-fásica (DPE) (Figura 3). Estes termos “TPE” e “DPE” são utilizados, geralmente, em situação em que não há LNAPL.

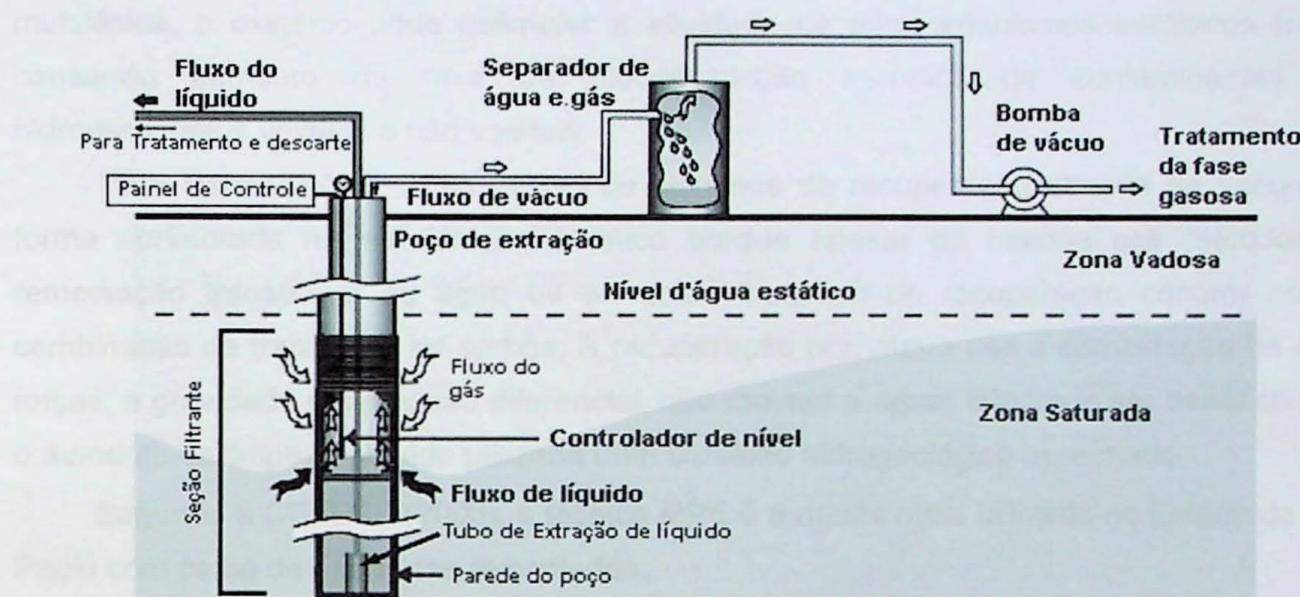


Figura 2 - Esquema do sistema DPE (extraído e modificado de USACE, 1999)

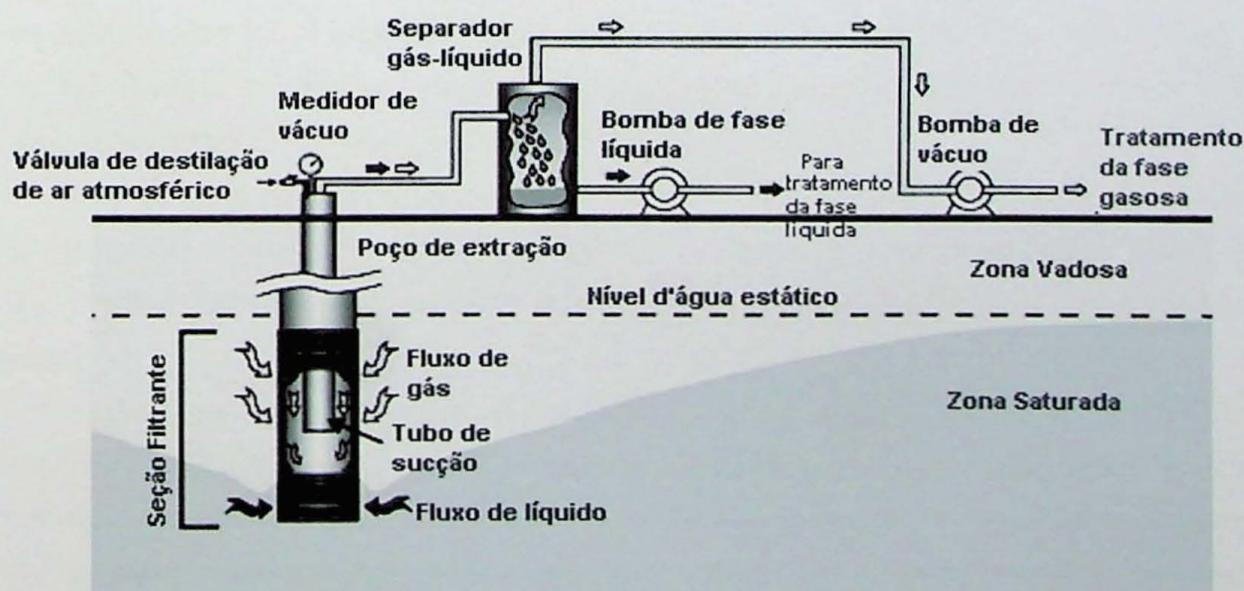


Figura 3 - Esquema do sistema TPE (extraído e modificado de USACE, 1999)

O LNAPL puro, que permanece flutuante na superfície da água também fluirá através do poço e será removido. Devido ao vácuo imposto, o NAPL retido por forças capilares no solo úmido pode, em algum grau, mover-se para o poço para ser removido. O nível da água subterrânea é rebaixado e, consequentemente, uma zona não saturada maior se forma e pode ser tratada pela extração dos vapores (SVE).

O gás do solo que é extraído, se necessário, é conduzido a um sistema de tratamento prévio da fase vapor (i.e., carvão ativado, oxidação catalítica) para ser descartado.

Devido ao movimento do ar através da zona não saturada induzido durante a extração multifásica, o oxigênio pode estimular a atividade de microorganismos aeróbicos locais, causando aumento da taxa de biodegradação aeróbica de contaminantes por hidrocarbonetos voláteis e não voláteis.

Para Palmer *et al.*, 1996, o uso de sistemas de recuperação através de vácuo, de forma aprimorada na remediação é único porque apesar da maioria nos métodos de remediação transportar ou água ou ar, estes sistemas de recuperação contam com a combinação de transporte de ambos. A recuperação por vácuo usa a combinação de duas forças, a gravidade e a pressão diferencial, que movem a água. Isto pode ser benéfico para o aumento da limpeza quando utilizada num contexto hidrogeológico apropriado.

Segundo a CETESB (2006), a técnica MPE é a quinta mais utilizada no Estado de São Paulo com cerca de 140 áreas remediadas.

6. Materiais e Métodos

Antes de ser iniciada a remediação de áreas contaminadas, outras etapas devem ser realizadas:

- Avaliação preliminar;
- Avaliação investigatória;
- Investigação detalhada;
- Avaliação de risco toxicológico;

Se os resultados da avaliação de risco toxicológico caracterizarem a presença de risco na área de interesse, as etapas subsequentes serão necessárias:

- Projeto de remediação;
- **Remediação da área contaminada;**
- **Monitoramento do sistema de remediação.**

Deve-se ressaltar que produto em fase livre caracteriza a presença de risco e, se esta fase estiver presente no local, deve-se implantar o sistema de remediação imediatamente.

Para cada etapa há seus respectivos materiais e métodos. Este trabalho, porém, se restringe apenas ao monitoramento do sistema de remediação e pode ser dividido em três etapas principais:

6.1 Sistema de Remediação

O sistema MPE (**Foto 1**) é utilizado na extração simultânea das diversas fases de hidrocarbonetos, a partir da aplicação de alto vácuo em poços de extração, estimulando a biodegradação através do aumento de oxigenação no solo. Pode ser utilizado com eficiência na remediação das fases livre, dissolvida, vapor, residual e adsorvida da contaminação.

No **Anexo 1** pode-se observar o fluxograma de componentes do sistema MPE utilizado nos postos de serviços compreendidos neste trabalho.

O produto, a água e os vapores que são extraídos através do sistema são dispostos de forma que o produto é separado na caixa separadora e armazenado em tambores,. A água extraída é direcionada para filtros de carvão ativado e descartada na caixa separadora do posto.

A entrada da água bombeada é realizada por meio de uma tubulação de PVC rígido marrom com diâmetro de $1\frac{1}{2}$ ", que transporta os líquidos e vapores succionados dos poços de extração. Na extremidade das tubulações que conduzem estes líquidos ao tanque de vácuo, existem duas válvulas seqüenciais, a primeira representada por uma de retenção para evitar o contra-fluxo, e a segunda em "Y" com filtro interno para a retenção de particulados bombeados junto com o líquido (**Foto 2a e 2b**).



Foto 1a – Vista frontal do sistema



Foto 2a – Entrada do sistema com filtro "Y";

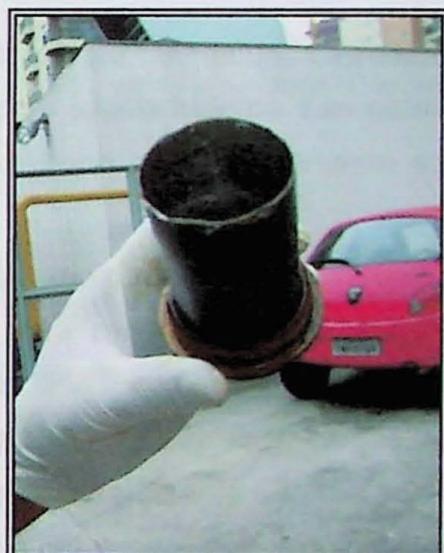


Foto 2b – Detalhe do filtro "Y"

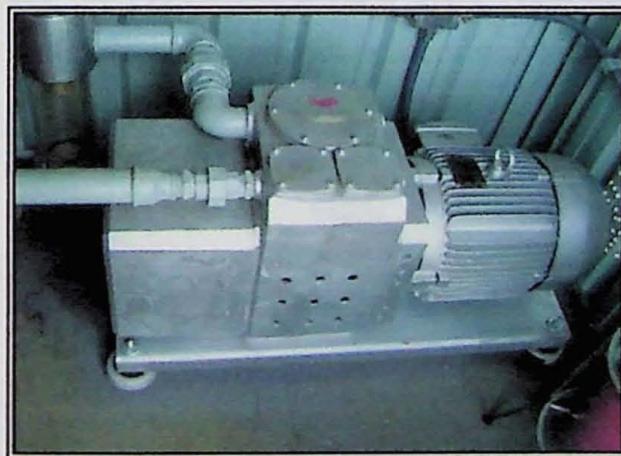


Foto 3 - Bomba de vácuo

Uma bomba de vácuo (**Foto 3**) de 5 cv e vazão nominal de 90 m³/h é responsável por gerar o vácuo no sistema. Pelo fato das palhetas de grafite que integram o motor serem sensíveis a água, na tubulação responsável por imprimir o vácuo ao tanque são instalados dois sistemas de segurança que impedem a entrada de água e drenam o vapor d'água formado durante o bombeamento.

O tanque de vácuo que recebe o eventual produto, a água e os vapores bombeados dos poços de extração, possui capacidade de 200 L.

Os vapores bombeados, com eventuais concentrações de vapores orgânicos voláteis, são conduzidos pela tubulação da parte superior do tanque até dois filtros de carvão ativado instalados em série, antes da emissão final para a atmosfera, que é realizada por meio de uma tubulação com a saída posicionada a uma altura de aproximadamente 3,5 m da superfície do terreno. Primeiramente, os vapores são conduzidos para o filtro 1, posteriormente, passam pelo filtro 2 e, finalmente são lançados na atmosfera (tubulação de saída do filtro 2).

Após a passagem do produto e da água pelo tanque de vácuo, os mesmos são direcionados com o auxílio de uma bomba centrífuga com capacidade de 1 cv para a caixa separadora água/óleo (SAO) confeccionada em aço carbono com revestimento em epóxi Modelo OWS-5 e vazão nominal de 1.135 L/h (**Foto 4**).

Da caixa separadora, a água é encaminhada por meio de tubulações com válvulas de retenção até o filtro de carvão ativado, utilizado para redução da concentração dos contaminantes e, posteriormente para um tambor de PVC com capacidade de 200 L, permanecendo armazenada até que o sensor posicionado 30 cm abaixo da tampa, acione a bomba centrífuga que realiza o recalque, e conduz a água extraída pelo sistema por meio de uma tubulação de PVC marrom de diâmetro de 1½" até a caixa separadora do posto.

O eventual produto bombeado, após passagem pela caixa separadora água/óleo, é armazenado em um tambor com capacidade para 200 L, que possui um sensor de nível instalado em seu interior. Quando o mesmo estiver com sua capacidade máxima, o produto armazenado é destinado para empresas recicladoras de óleo.

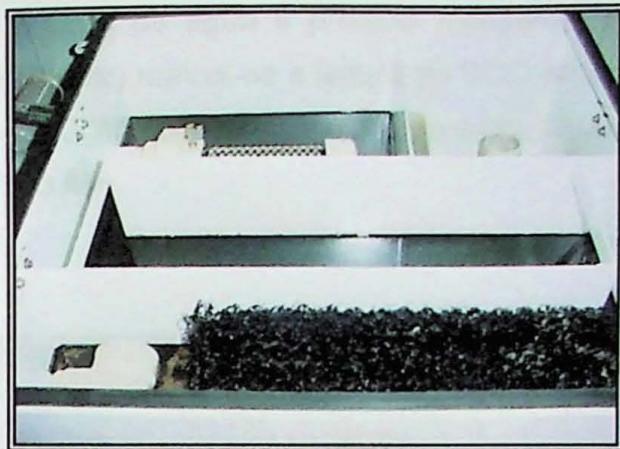


Foto 4 – Interior da caixa separadora

6.2 Monitoramento

As informações dos parâmetros operacionais de monitoramento do sistema de remediação e dos poços são coletadas em eventos com freqüência quinzenal. Um dos principais equipamentos é o *interface*, utilizado para medição da profundidade do nível d'água e da fase livre de produto (Foto 5a), tanto nos poços de monitoramento quanto de extração. Nos poços de extração são realizadas medidas dos níveis de produto e de água, e da profundidade do tubo extrator, além disso é realizada a leitura do vácuo, utilizando-se um vacuômetro digital (Foto 5b).



Foto 5a – Interface



Foto 5b – Vacuômetro digital

É medido também o volume de água e produto recuperados. Para checagem dos filtros de carvão ativado (filtro de ar) realiza-se a leitura de VOC através do sensor PID (Gas Alert Micro 5 PID) (**Foto 6a**). O anemômetro é utilizado para obtenção da temperatura e velocidade do fluxo de ar (**Foto 6b**).



Foto 6a – PID



Foto 6b - Anemômetro.

Na tabela abaixo se pode observar os principais parâmetros e unidades medidas em cada um dos equipamentos pertencentes ao sistema, durante os eventos de monitoramentos realizados (**Tabela 2**).

Equipamentos	Parâmetro	Unidade
bomba	vácuo	mmHg
entrada filtro 1	VOC	ppm
	vazão	m/s
	temperatura	°C
entrada filtro 2	VOC	ppm
	vazão	m/s
	temperatura	°C
saída filtro 2	VOC	ppm
volume de produto	tambor	litros
volume de água	hidrômetro	m ³
container	explosividade	%
PB XX	prof. Fase livre	m
	prof. NA	m
	prof. Tubo	m
	vácuo	mmHg

Tabela 2 - Parâmetros medidos em um evento de monitoramento

6.3 Análise Química

A amostragem para análise química de BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzo e Xilenos Totais) e PAH (Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos) é realizada com freqüência trimestral para verificar a eficiência dos filtros de carvão ativado, antes do descarte para a caixa separadora do posto e, posteriormente para a rede pública de esgoto. Os poços de monitoramento são amostrados com a mesma freqüência para análise de BTEX e PAH, com o objetivo de avaliar a evolução da contaminação em fase dissolvida.

A coleta das amostras de água subterrânea nos poços de monitoramento é dividida em duas etapas. A primeira envolve o esgotamento manual dos poços executado 24 horas antes das amostragens. A segunda parte consiste da amostragem propriamente dita, que é executada utilizando-se *bailers* descartáveis, introduzidos lentamente nos poços de forma a minimizar a turbulência da água no momento da coleta. A passagem da água para os frascos, adequados a cada classe de parâmetros, é executada diretamente a partir dos *bailers*, igualmente de modo lento (aproximadamente 100 mL/min). Estas amostras são encaminhadas ao laboratório para análise química, e os resultados são comparados com os valores de intervenção da Lista de Valores Orientadores para o Estado de São Paulo (CETESB, 2005), ou com seus respectivos valores alvo (SSTLs) calculados para a área por meio da avaliação de risco toxicológico.

7. Desenvolvimento do Trabalho

As atividades realizadas no decorrer deste trabalho encontram-se no cronograma abaixo:

Atividades		2007								
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov
Levantamento bibliográfico										
Acompanhamento da evolução da técnica MPE										
Interpretação dos resultados obtidos										
Elaboração do trabalho (versão final)										

O levantamento bibliográfico visou o aprofundamento do conhecimento sobre a técnica de remediação utilizada, bem como comparação com estudos similares realizados no país e no exterior. Embora no cronograma o levantamento bibliográfico ficasse restrito aos dois primeiros meses, este continuou por todo período a fim de colher um maior número de informações e detalhamento sobre o sistema. Através da pesquisa foi possível também caracterizar a geologia regional em que se insere cada um dos postos de serviço.

O acompanhamento da evolução da técnica MPE incluiu visitas aos postos para coleta de dados e tratamento dos mesmos. Os postos de serviço são de fácil acesso, e a coleta de dados foi realizada sem dificuldades. O tratamento dos dados foi desenvolvido em programas tipo planilha de forma a melhorar a visualização dos resultados através de gráficos e tabelas.

Através da interpretação dos resultados obtidos a partir dos três casos estudados e através da comparação de dados concluiu-se os objetivos deste trabalho, com a elaboração de sua versão final.

8. Resultados Obtidos

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da remediação de três postos de serviços (denominados genericamente de Azul, Amarelo e Vermelho) utilizando-se a técnica de extração multifásica (MPE – *Multi-Phase Extraction*).

8.1 Caracterização geológica, hidrogeológica e de entorno

8.1.1 Auto Posto Azul

Está localizado na cidade de São Paulo e está inserido na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, apresentando características geomorfológicas de natureza colúvio-aluvionar. Pertence ao compartimento geomorfológico da província do Planalto Atlântico, na zona do Planalto Paulistano. Geologicamente está inserido na Bacia de São Paulo, Formação Resende, do Paleógeno (Prefeitura de São Paulo, 2000), que corresponde a orto e paraconglomerados, lamitos além de arenitos fluviais (Riccomini *et al.*, 2004). Aparecem também coberturas quaternárias.

As unidades litológicas identificadas na área deste posto são: argila pouco arenosa, coesa, de coloração cinza, aparecendo no intervalo de profundidade entre 0,15 m até 2,0 m. Sotoposta a esta unidade, a partir dos 2,0 m de profundidade, encontra-se um litotipo composto por sedimentos arenosos (areia média a grossa), friável, coloração marrom amarelada, níveis milimétricos a centimétricos de seixos quartzosos com dimensões milimétricas, o qual representa o intervalo onde se tem o início da ocorrência da superfície potenciométrica na área.

Após a profundidade de 4,0 m inicia-se novamente o intervalo argiloso observado nos primeiros metros, com a ausência completa de sedimentos arenosos.

Na Figura 4 observa-se o perfil de um poço de monitoramento (PM1)

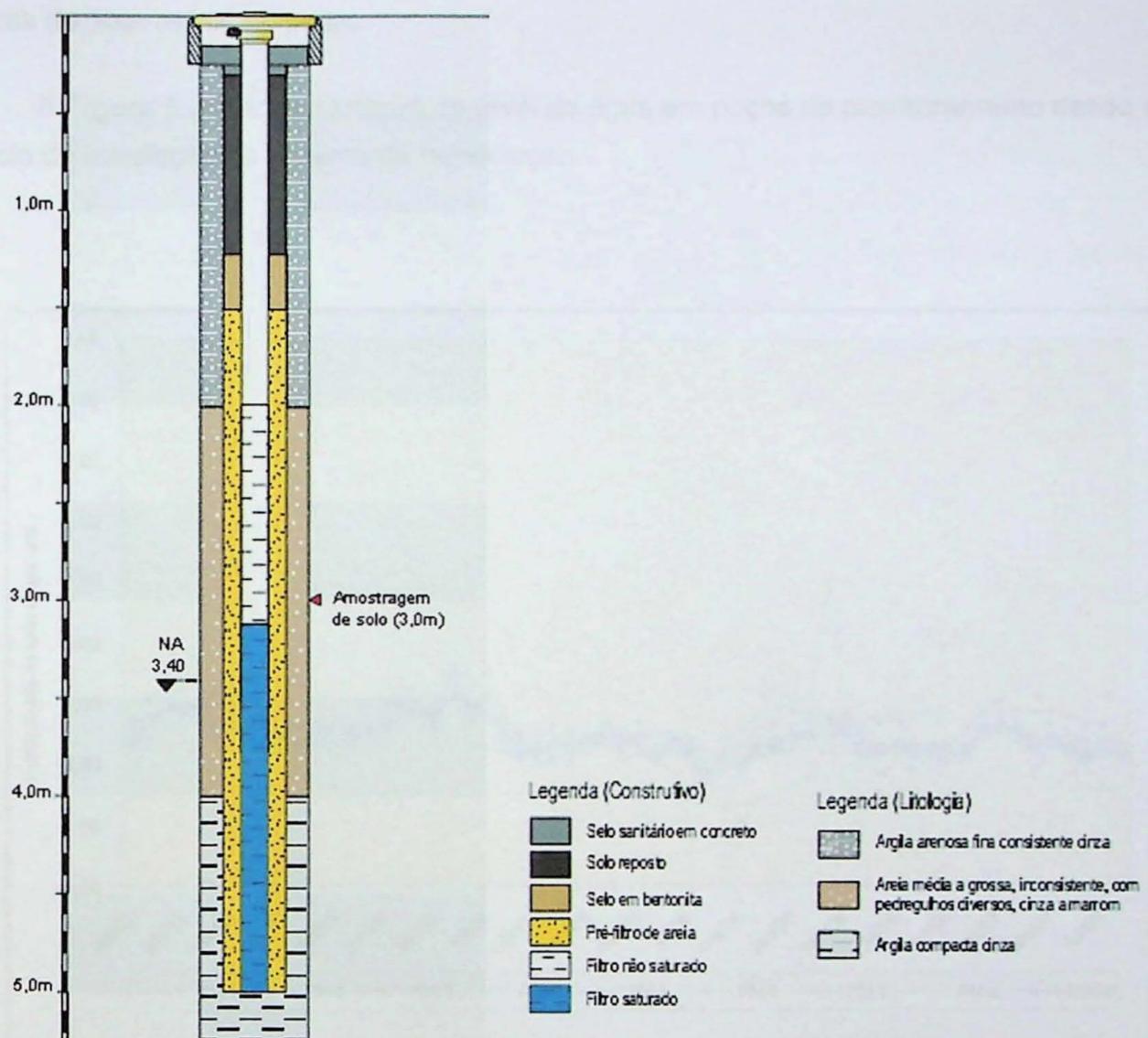


Figura 4 - Perfil esquemático do poço de monitoramento PM1

O aquífero livre apresenta características homogêneas sendo que a profundidade do nível d'água oscila entre 3,12 a 3,80 metros (agosto de 2007). O mapa potenciométrico local (**Anexo 2**) demonstra que o sentido preferencial de fluxo para a água subterrânea é de noroeste para sudeste, ou seja, da área interna do posto em direção ao Rio Tietê, situado a cerca de 100 metros do posto.

A **Figura 5** mostra a variação do nível de água em poços de monitoramento desde o início de instalação do sistema de remediação.

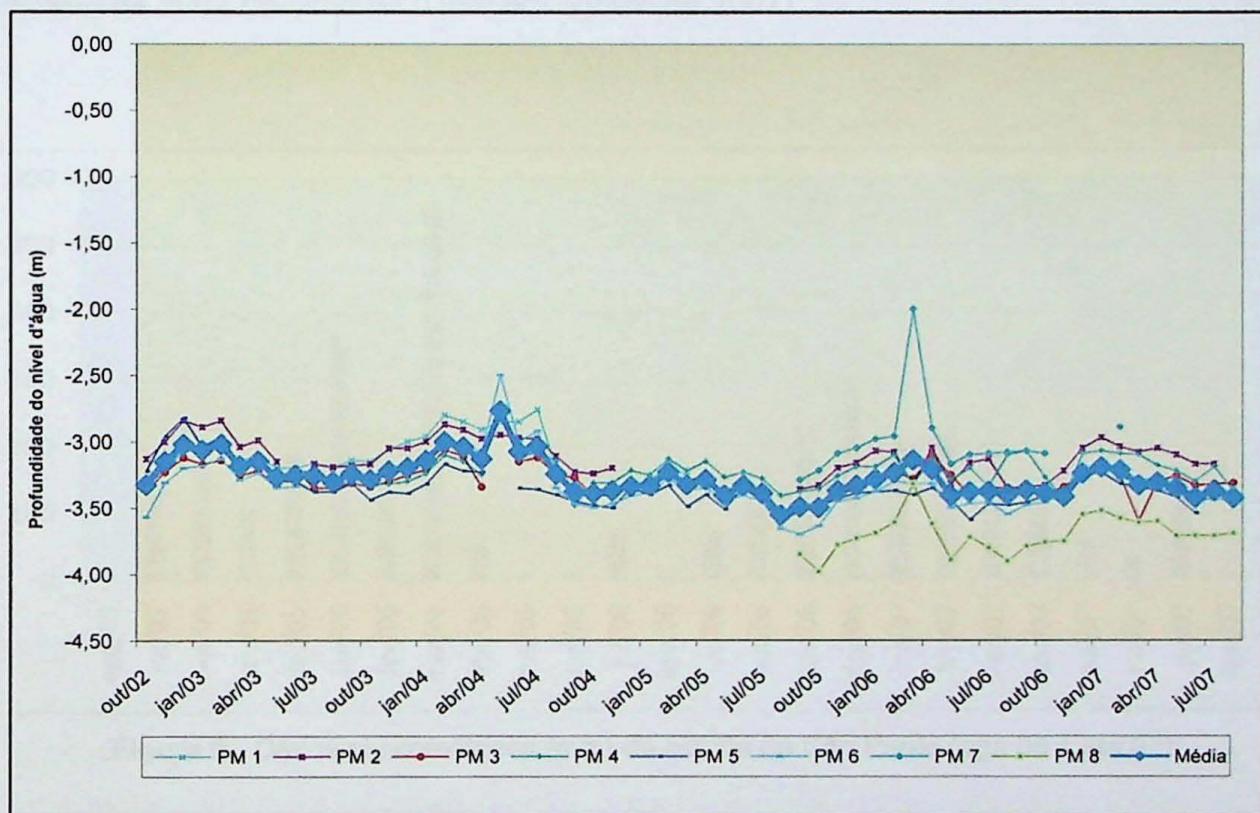


Figura 5 - Variação do nível d'água em poços de monitoramento

De acordo com o CIIAGRO (Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas do Instituto Agronômico de Campinas), a temperatura média mensal na cidade de São Paulo registrada no período de agosto de 2005 a setembro de 2007 variou entre 12,6°C durante o inverno, sendo julho de 2007 o mês mais frio, a 30,7 °C durante o verão, sendo março de 2007 o mês mais quente.

Os dados pluviométricos desde a instalação do sistema (agosto de 2005 a setembro de 2007) na cidade de São Paulo são apresentados na **Figura 6**. Nota-se nesta figura que o período de maior precipitação corresponde aos meses de janeiro e março de 2006 (máximo de 563,2 mm), enquanto o de baixa pluviosidade corresponde aos meses de agosto e setembro de 2007 (mínimo de 0 mm em agosto de 2007).

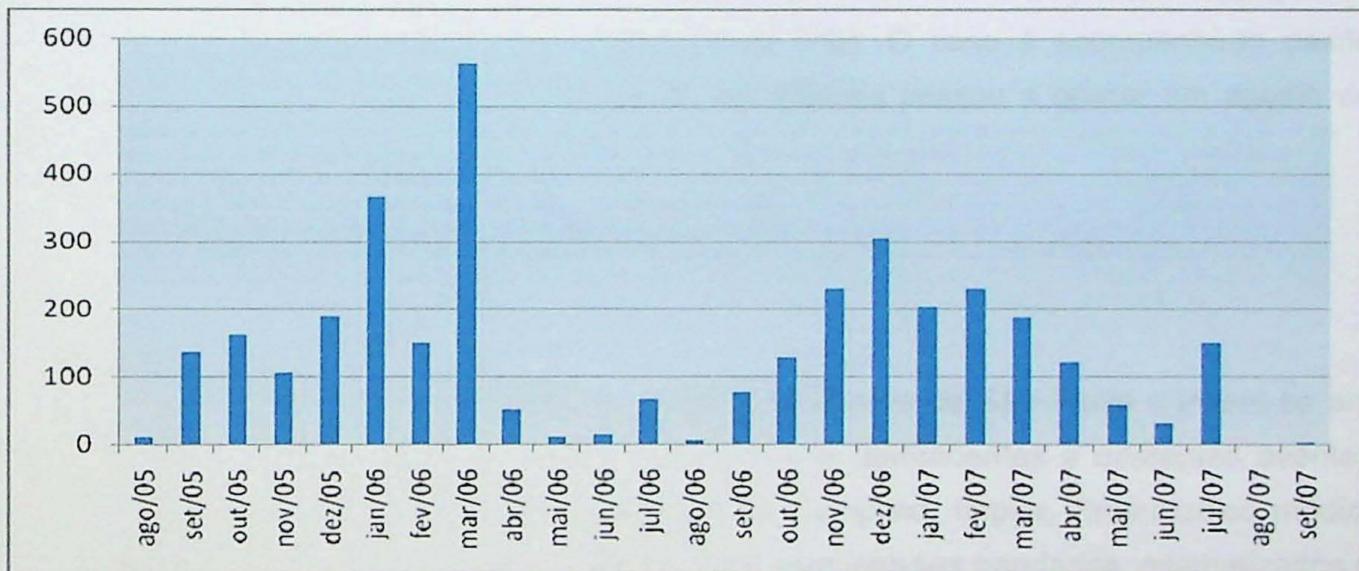


Figura 6 - Dados pluviométricos (mm) da cidade de São Paulo (ago 05 a set 07)

Segundo o ensaio conhecido como *slug test*, realizado no poço PM-08 (localizado a montante da antiga área de tancagem de gasolina comum, a jusante das bombas de abastecimento de GNV) a condutividade hidráulica apresentou resultado de $1,01 \times 10^{-6}$ cm/s.

O gradiente hidráulico possui valor de 7,3 % para a região compreendida entre os poços de monitoramento PM-03 e PM-04, e de 0,4 % para área onde estão localizados os poços de monitoramento PM-02 e PM-07.

A porosidade efetiva foi definida em 9,3 % por meio das análises físicas em amostra indeformada de solo. A velocidade linear máxima para a água subterrânea local foi calculada em 0,250 m/ano para a porção sudeste da área, entre os poços PM-03 e PM-04, e em 0,013 m/ano para a porção oeste, entre os poços PM-02 e PM-07.

O Auto Posto Azul encontra-se em operação há trinta anos e suas instalações abrangem uma área aproximada de 1.550 m² (**Anexo 3**).

O Sistema de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis (SASC) do posto é integrado por um tanque subterrâneo tricompartimentado com capacidade para 30.000 L que é destinado ao armazenamento de óleo diesel, gasolina aditivada e querosene e outros quatro tanques subterrâneos plenos com capacidade para 15.000 L que são destinados ao armazenamento de gasolina comum, óleo diesel e álcool, além de dez bombas de abastecimento, sendo todas elas equipadas com dois bicos de abastecimento, distribuídas em seis ilhas de abastecimento distintas.

O posto situa-se numa área de ocupação mista, ou seja, residencial e comercial. Esta área conta também com rede de drenagem de águas pluviais e outras redes subterrâneas de serviços (água, esgoto, telefone e energia elétrica).

O **Auto Posto Azul** apresenta oito poços de monitoramento (PM), dez poços de recuperação (PR) e oito poços de bombeamento (PB). O caso é acompanhado desde outubro de 2002, enquanto que o sistema de remediação passou a operar em agosto de 2005.

8.1.2 Auto Posto Amarelo

Está localizado no município de Itu, interior do Estado de São Paulo e insere-se em um contexto geológico mais diversificado, com rochas pertencentes a diferentes eventos geológicos. As rochas mais antigas pertencem ao Complexo Itapira, Proterozóico médio, que compreende metassedimentos, principalmente paragnaisse bandados, migmatizados e com intercalações de anfibolitos. O Grupo São Roque, de idade neoproterozóica é uma seqüência vulcano-sedimentar que compreende rochas cálcio-silicáticas, filitos, rochas psamíticas e rochas clásticas a vulcânicas-clásticas (Tassinari *et al.*, 2001). Intrusivas a estas aparecem suítes graníticas do Complexo Granítóide de Itu de idade neoproterozóica/paleozóica (Galembeck *et al.*, 2001).

A cobertura sedimentar é representada pela Bacia do Paraná, Subgrupo Itararé de idade permiana que compreende arenitos, diamictitos e turbiditos.

Geomorfologicamente, o município situa-se entre o Planalto Cristalino e a Depressão Periférica Paulista, na região do médio Tietê.

As unidades litológicas compreendem areia fina argilosa, pouco consistente, vermelha sotoposta a esta, areia fina, pouco argilosa, pouco consistente, castanho, com fragmentos de rocha. Há presença de um nível de aterro, composto por uma argila pouco arenosa fina, consistente, marrom avermelhada.

A Figura 7 apresenta o perfil do poço de monitoramento PM 7.

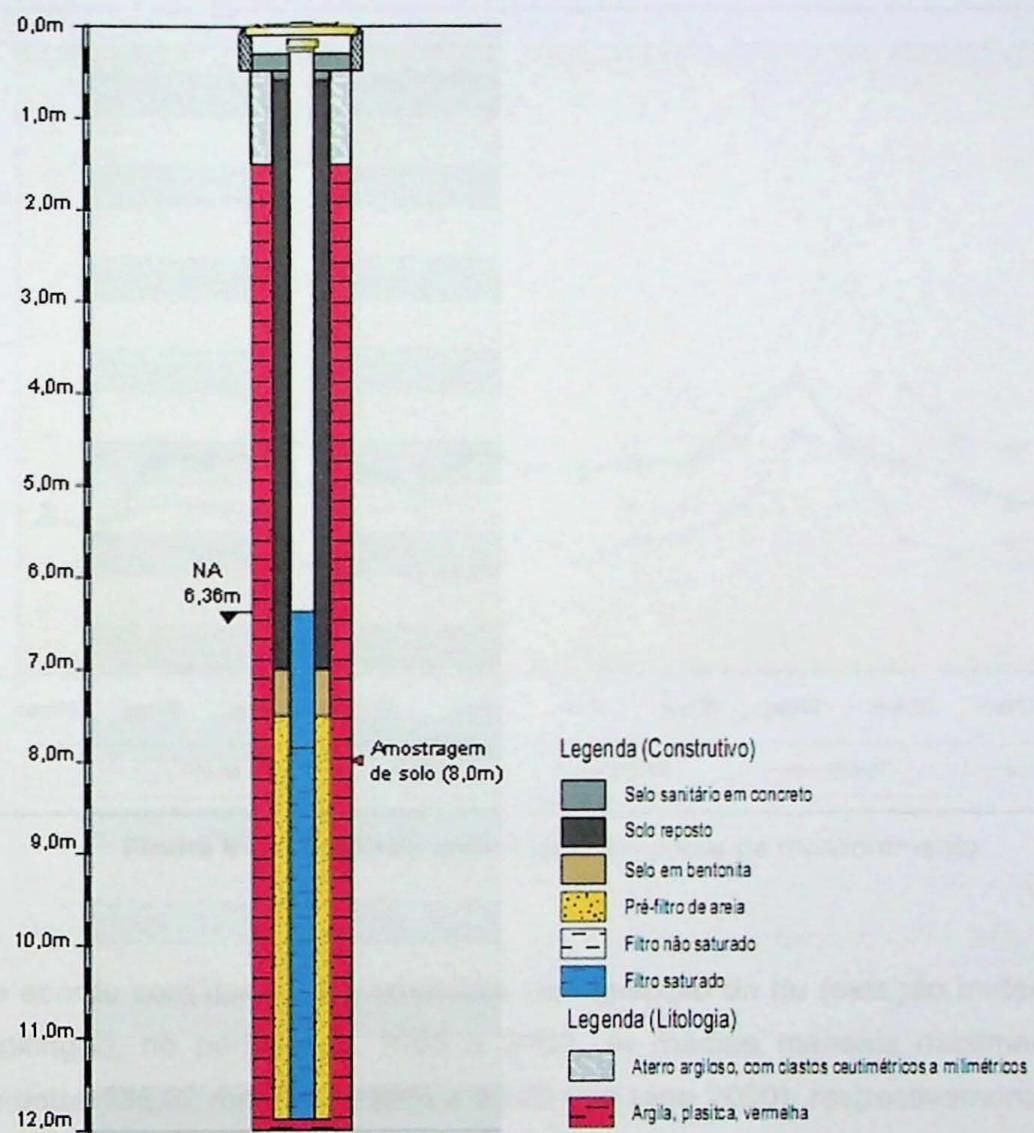


Figura 7 - Perfil esquemático do poço de monitoramento PM7

O aquífero livre local apresenta características homogêneas, com a profundidade do nível d'água oscilando entre 7,22 e 10,64 metros (agosto de 2007) (**Figura 8**).

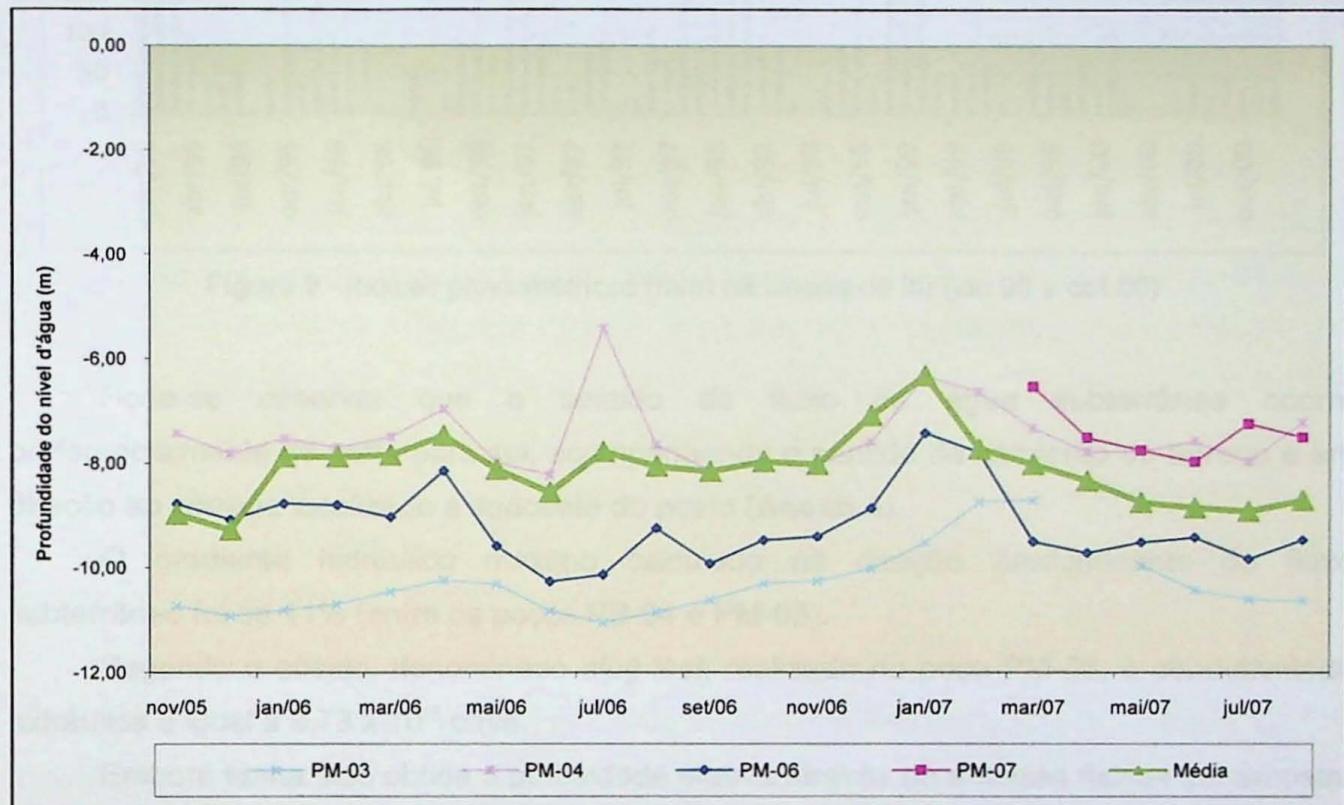


Figura 8 - Variação do nível d'água em poços de monitoramento

De acordo com dados pluviométricos do Município de Itu (estação meteorológica E4-023-Pirapitingüi), no período de 1995 a 2000, as médias mensais máximas e mínimas variaram entre 138,62 mm (ano 1995) e 33,26 mm (ano 2000), respectivamente. As médias mensais no verão (dezembro a fevereiro) variaram entre 262,93 e 141,93 mm, sendo janeiro o mês mais chuvoso e as médias mensais no inverno (junho a agosto) variaram entre 46,87 e 21,32 mm, sendo agosto o mês mais seco. O clima da região é do tipo tropical. A temperatura anual média varia entre 16° e 22°, sendo o verão muito quente e seco e o inverno seco. A distribuição dos índices mensais neste período é apresentada na **Figura 9**.

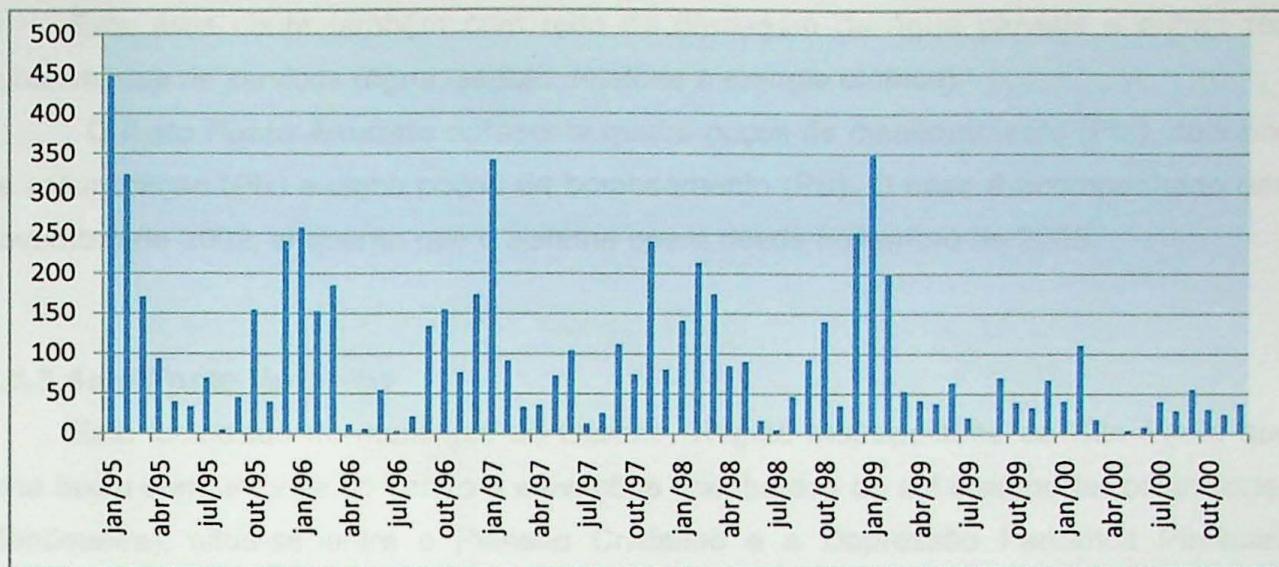


Figura 9 - Índices pluviométricos (mm) na cidade de Itu (jan 95 a out 00)

Pode-se observar que o sentido de fluxo da água subterrânea ocorre preferencialmente de norte para sul, acompanhando o sentido de cainimento do terreno e em direção ao córrego localizado a sudoeste do posto (**Anexo 4**).

O gradiente hidráulico máximo calculado na direção predominante de fluxo subterrâneo foi de 11% (entre os poços PB-04 e PM-03).

Segundo o ensaio, denominado *slug test*, realizado no poço PM-03, a condutividade hidráulica é igual a $9,73 \times 10^{-4}$ cm/s.

Embora tenha sido obtida a porosidade efetiva através de análises físicas em amostra indeformada de solo coletada no posto (5%), foi utilizado para o cálculo da velocidade linear de fluxo da água subterrânea o valor médio para areia fina igual a 21%, estabelecido na literatura (Fetter, 1994), pois a litologia predominante na zona saturada difere da litologia presente na zona não saturada, de onde foi coletada a amostra para obtenção deste parâmetro.

A partir destes resultados, levando em consideração os parâmetros conservadores, assumindo que o meio é homogêneo, isotrópico e o fluido é incompressível, a velocidade linear para a água subterrânea no local foi calculada em 160,70 m/ano a qual se apresenta coerente com a litologia arenosa encontrada na zona saturada.

O posto de serviço encontra-se em operação há aproximadamente sete anos e apresenta uma área aproximada de 3.000 m².

O posto contém quatro tanques subterrâneos de armazenamento de combustível e seis bombas duplas e duas bombas simples de abastecimento, em operação (**Anexo 5**).

Situa-se numa área de ocupação mista, ou seja, comercial e residencial, com presença de alguns templos, uma escola, uma creche e um hospital.

Esta área conta também com rede de drenagem de água pluviais e outras redes subterrâneas de serviços (água, esgoto, telefone e energia elétrica).

O Auto Posto Amarelo apresenta quatro poços de monitoramento (PM), dois poços de recuperação (PR) e cinco poços de bombeamento (PB). O caso é acompanhado desde novembro de 2002, enquanto que o sistema opera desde novembro de 2005.

8.1.3 Auto Posto Vermelho

Está localizado no município de Osasco, Região Metropolitana de São Paulo que é uma bacia com um vale no centro e elevações acentuadas ao sul e ao norte (contraforte da Mantiqueira), situa-se entre o Planalto Cristalino e a Depressão Periférica Paulista. É possível observar principalmente três unidades litoestratigráficas. A mais antiga compreende as rochas do Complexo Embu de idade provavelmente neoproterozóica composto por gnaisses, migmatito, xistos podendo ocorrer anfibolitos, quartzitos e rochas calcio-silicáticas (Heibron *et al.*, 2004). A cobertura sedimentar corresponde à Bacia de São Paulo, com rochas da Formação Resende, de idade paleógena que inclui orto e paraconglomerados, lamitos além de arenitos fluviais (Riccomini *et al.*, 2004). Aparecem também coberturas quaternárias, oriundas de depósitos aluviais.

O Embasamento cristalino Pré-Cambriano é encontrado a partir de 80m de profundidade. Sedimentos paleógenos (terciário-quaternários) pertencentes à Bacia de São Paulo encontram-se entre 10 e 80m de profundidade, sendo que em profundidades inferiores a 10m, encontram-se solo de constituição variada.

As unidades litológicas compreendem argila arenosa, pouco consistente, marrom, sotoposta a esta, argila arenosa, medianamente consistente de coloração cinza a preta. Na **Figura 10** observa-se o perfil de um poço de monitoramento (PM11)

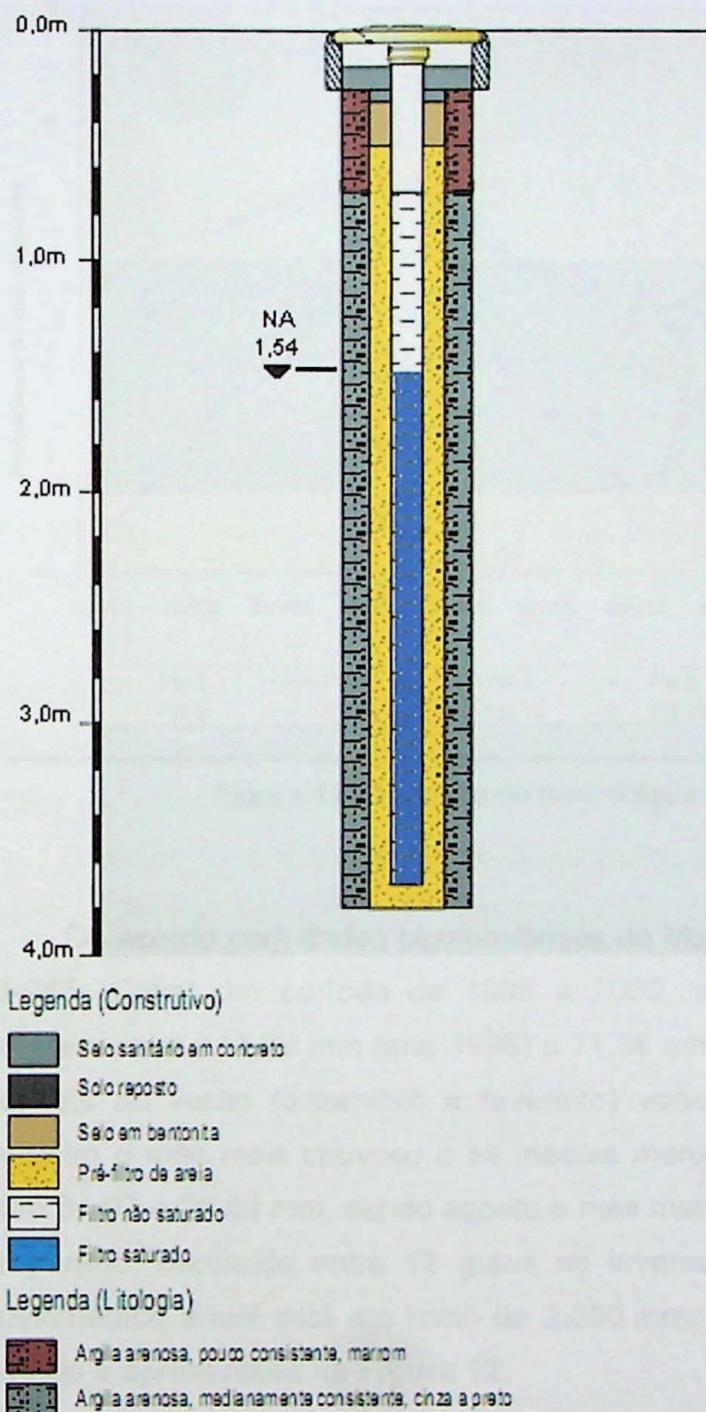


Figura 10 - Perfil esquemático do poço de monitoramento PM11

O aquífero livre local apresenta características homogêneas, com a profundidade do nível d'água oscilando entre 1,16 e 1,93 metros (agosto de 2007) (**Figura 11**).

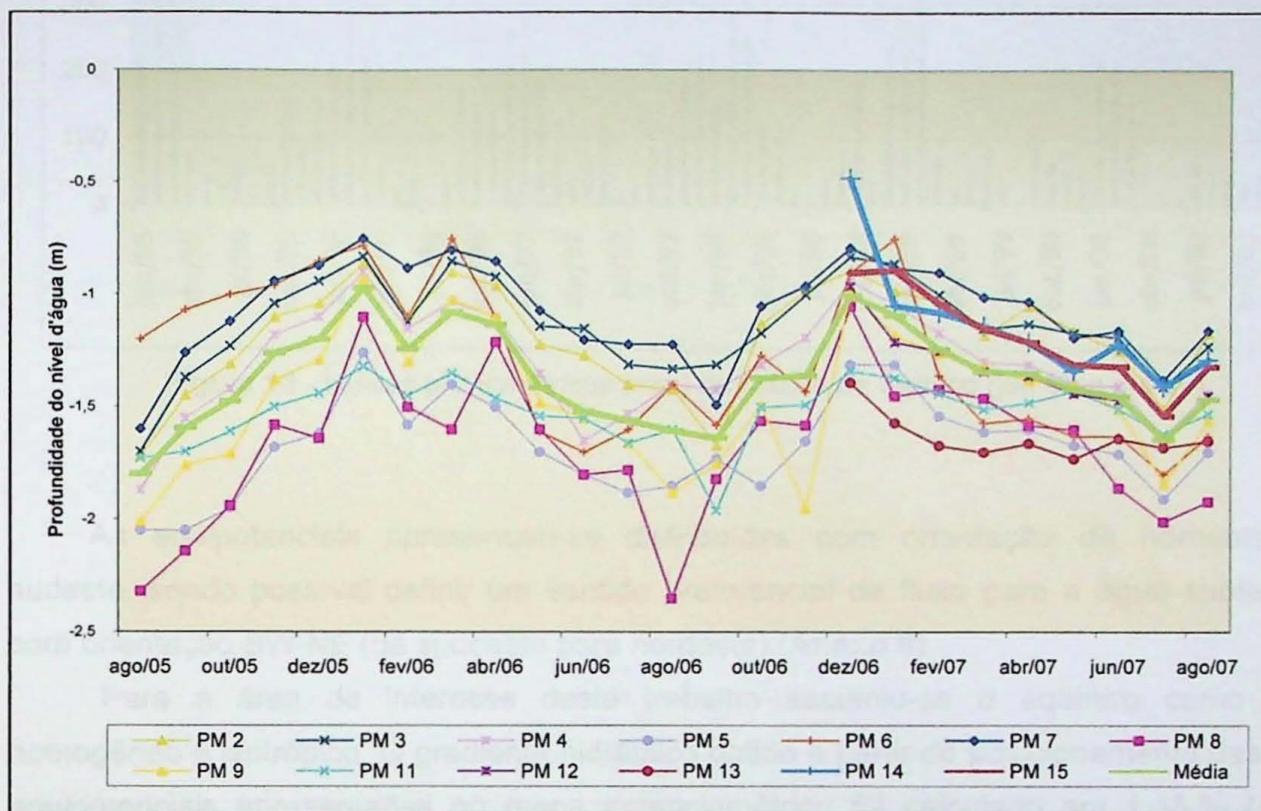


Figura 11 - Variação do nível d'água em poços de monitoramento

De acordo com dados pluviométricos do Município de Osasco (estação meteorológica E3-265- Cotia), no período de 1995 a 2000, as médias mensais máximas e mínimas variaram entre 141,29 mm (ano 1996) e 71,39 mm (ano 2000), respectivamente. As médias mensais no verão (dezembro a fevereiro) variaram entre 305,38 e 164,78 mm, sendo fevereiro o mês mais chuvoso e as médias mensais no inverno (junho a agosto) variaram entre 51,07 e 26,83 mm, sendo agosto o mês mais seco. O clima do município de Osasco é temperado, oscilando entre 12 graus no inverno e 26 graus no verão e a precipitação pluviométrica anual está em torno de 2.000 mm. A distribuição dos índices mensais neste período é apresentada na **Figura 12**.

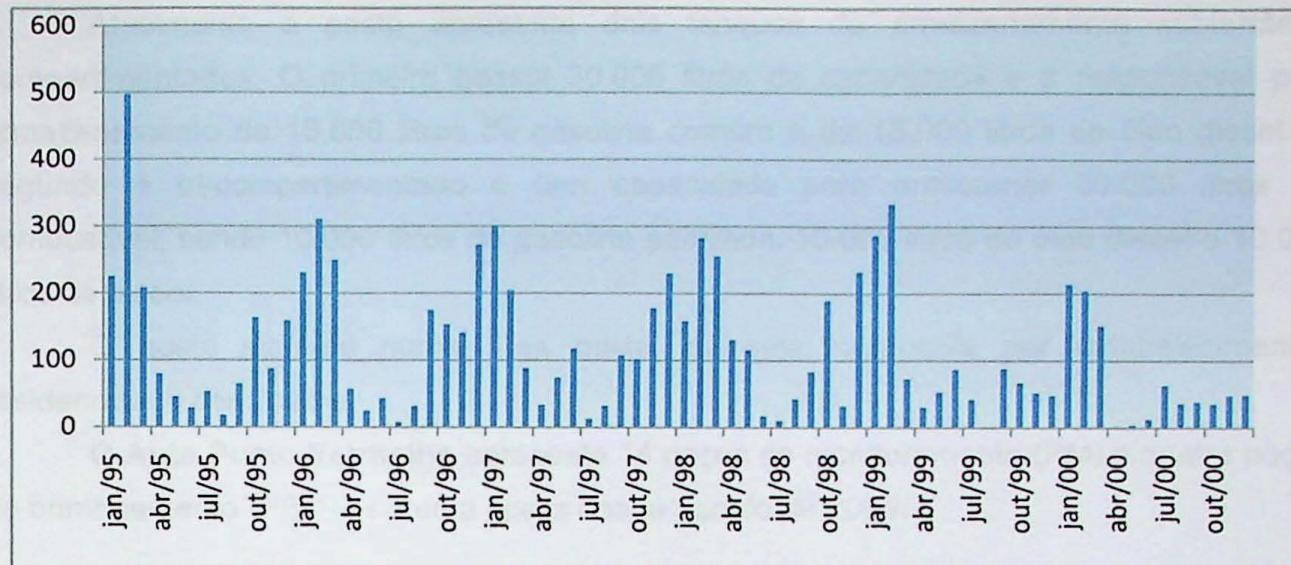


Figura 12 - Índices pluviométricos (mm) na cidade de Osasco (jan 95 a out 00)

As equipotenciais apresentam-se distribuídas com orientação de noroeste para sudeste, sendo possível definir um sentido preferencial de fluxo para a água subterrânea com orientação SW-NE (de sudoeste para nordeste) (**Anexo 6**).

Para a área de interesse deste trabalho assumiu-se o aquífero como sendo homogêneo e isotrópico. O gradiente hidráulico obtido a partir do posicionamento das linhas equipotenciais apresentadas no mapa potenciométrico foi calculado em 1,43 % (para a região entre os PMs 4 e 9).

A condutividade hidráulica foi determinada a partir de um *slug test* realizado no PM-9, sendo obtido valor de $2,96 \times 10^{-5}$ cm/s.

Utilizando dado apresentado em Fetter (1994), estimou-se que a porosidade efetiva mínima (valor que confere à água subterrânea, de acordo com a Lei de Darcy, a maior velocidade de fluxo possível), de acordo com a litologia descrita a partir das sondagens efetuadas no local (argila arenosa), possui valor igual a 3 %.

A partir destes resultados (com consideração de parâmetros conservadores, ou seja, menor porosidade efetiva para fluxo), assunções (meio homogêneo, isotrópico e fluido incompressível), a velocidade linear máxima para a água subterrânea no local foi calculada em 1,19 cm/dia ou 4,35 m/ano.

O posto de serviço possui uma área aproximada de 1.465 m² e encontra-se em operação a aproximadamente 26 anos (**Anexo 6**).

A área do posto possui pavimentação de concreto usinado e canaletas de contenção ao redor da área de abastecimento.

Atualmente o posto apresenta dois tanques de armazenamento subterrâneo compartimentados. O primeiro possui 30.000 litros de capacidade e é responsável pelo armazenamento de 15.000 litros de gasolina comum e de 15.000 litros de óleo diesel. O segundo é tri-compartimentado e tem capacidade para armazenar 30.000 litros de combustível, sendo 10.000 litros de gasolina aditivada, 10.000 litros de óleo diesel e 10.000 litros de álcool.

O posto situa-se numa área mista, ou seja, composta por estabelecimentos residenciais e comerciais.

O Auto Posto Vermelho apresenta 14 poços de monitoramento (PM) e quatro poços de bombeamento (PB). O sistema opera desde agosto de 2005.

8.2 Sistema de Remediação MPE

Os dados coletados desde o início da instalação do sistema de remediação MPE foram compilados de forma a acompanhar a evolução dos casos.

8.2.1 Volume de Água Bombeada

Quanto ao volume de água bombeada, com exceção do **Auto Posto Azul**, os gráficos gerados a partir dos dados de monitoramento apresentam características semelhantes. Há um registro ascendente rápido com estabilização posterior em um dado patamar.

No **Auto Posto Azul** ainda observa-se uma curva de crescimento, sem atingir um patamar. A curva continua como uma exponencial positiva. O valor máximo acumulado em agosto de 2007 foi de $4,54 \text{ m}^3$ (**Figura 13**)

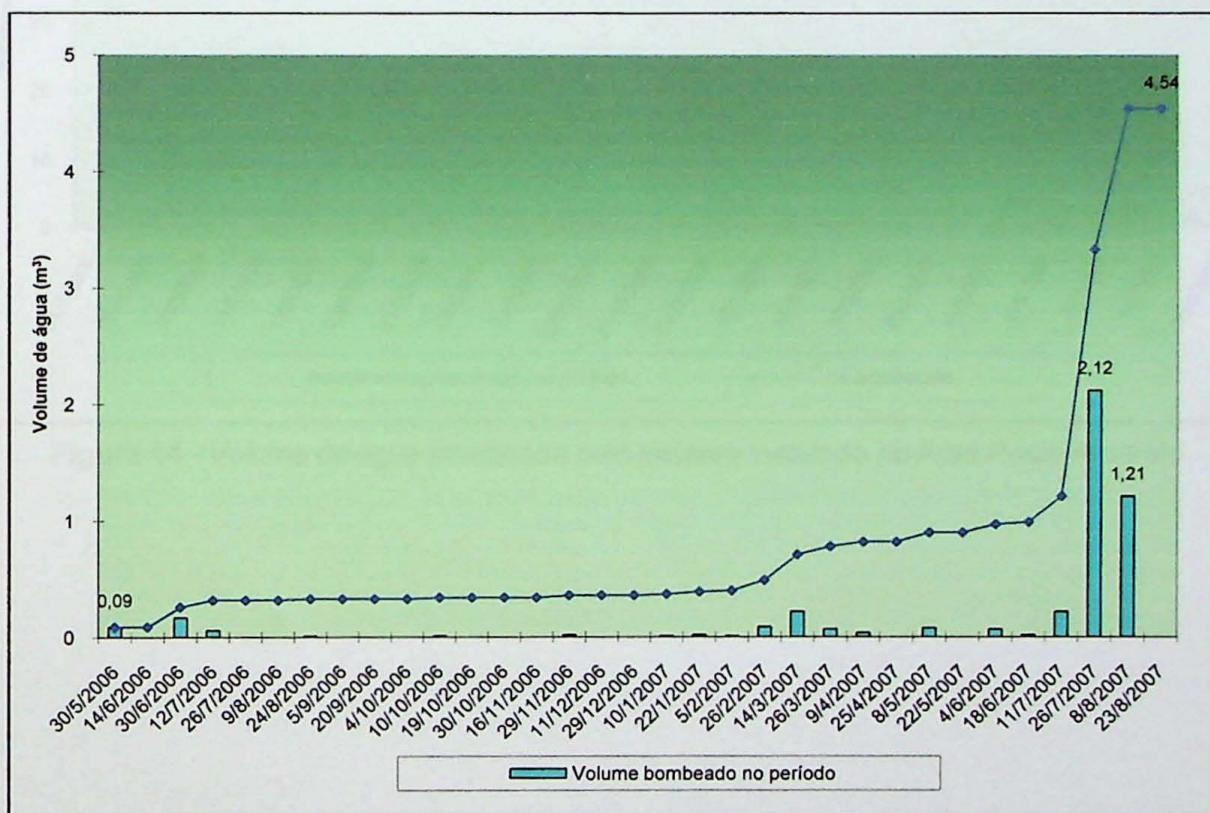


Figura 13 - Volume de água bombeada no período de operação do sistema (Auto Posto Azul)

No Auto Posto Amarelo observa-se dois patamares. O início da recuperação de água deu-se em fevereiro de 2006. O primeiro patamar foi atingido em maio de 2006 acumulando cerca de 40 m^3 . O segundo patamar foi atingido em outubro de 2006 com valor acumulado de $54,97\text{ m}^3$. O valor registrado até agosto de 2007 foi de $70,09\text{ m}^3$ (**Figura 14**);

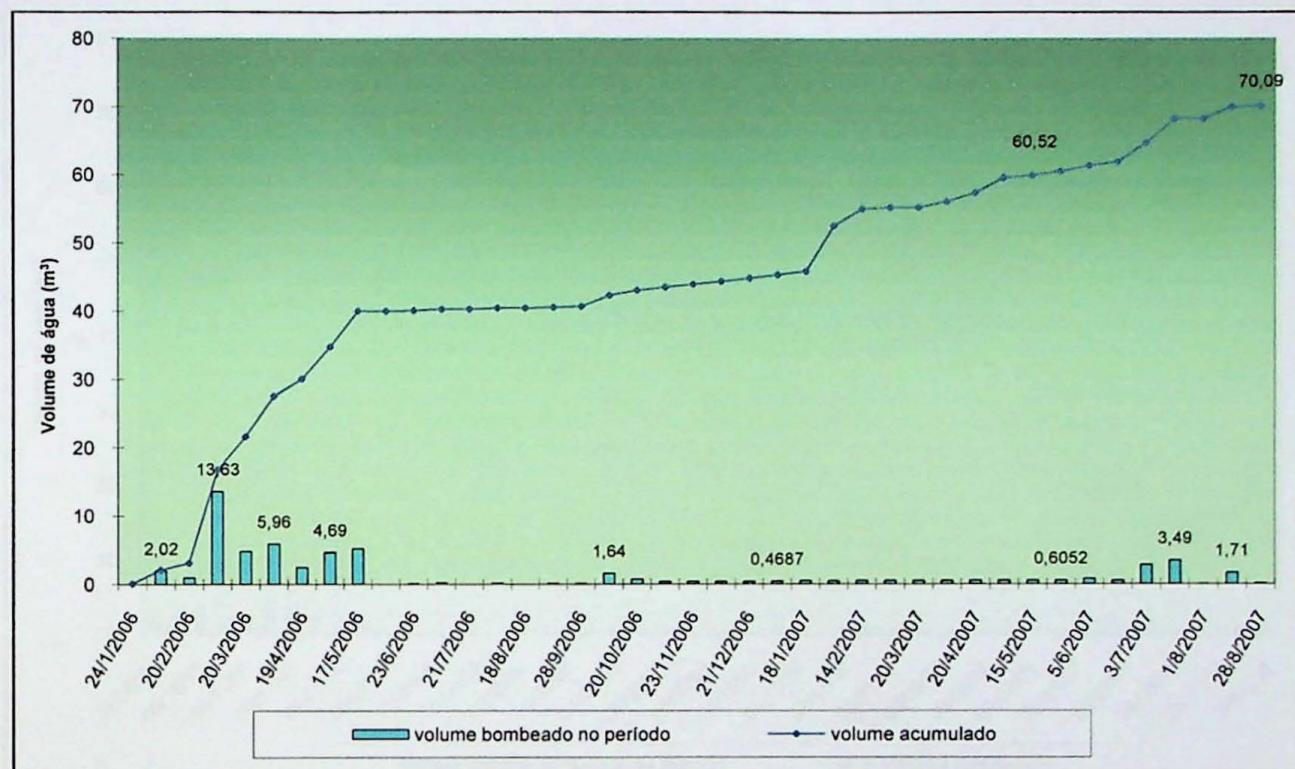


Figura 14 - Volume de água bombeada pelo sistema instalado no Auto Posto Amarelo

O bombeamento de água no **Auto Posto Vermelho** iniciou-se em agosto de 2005. Neste caso pode-se considerar apenas um patamar, que foi atingido em janeiro de 2006, somando $50,57\text{ m}^3$, havendo ainda contínuo crescimento da curva. O valor acumulado até agosto de 2007 foi de $71,98\text{ m}^3$ (**Figura 15**).

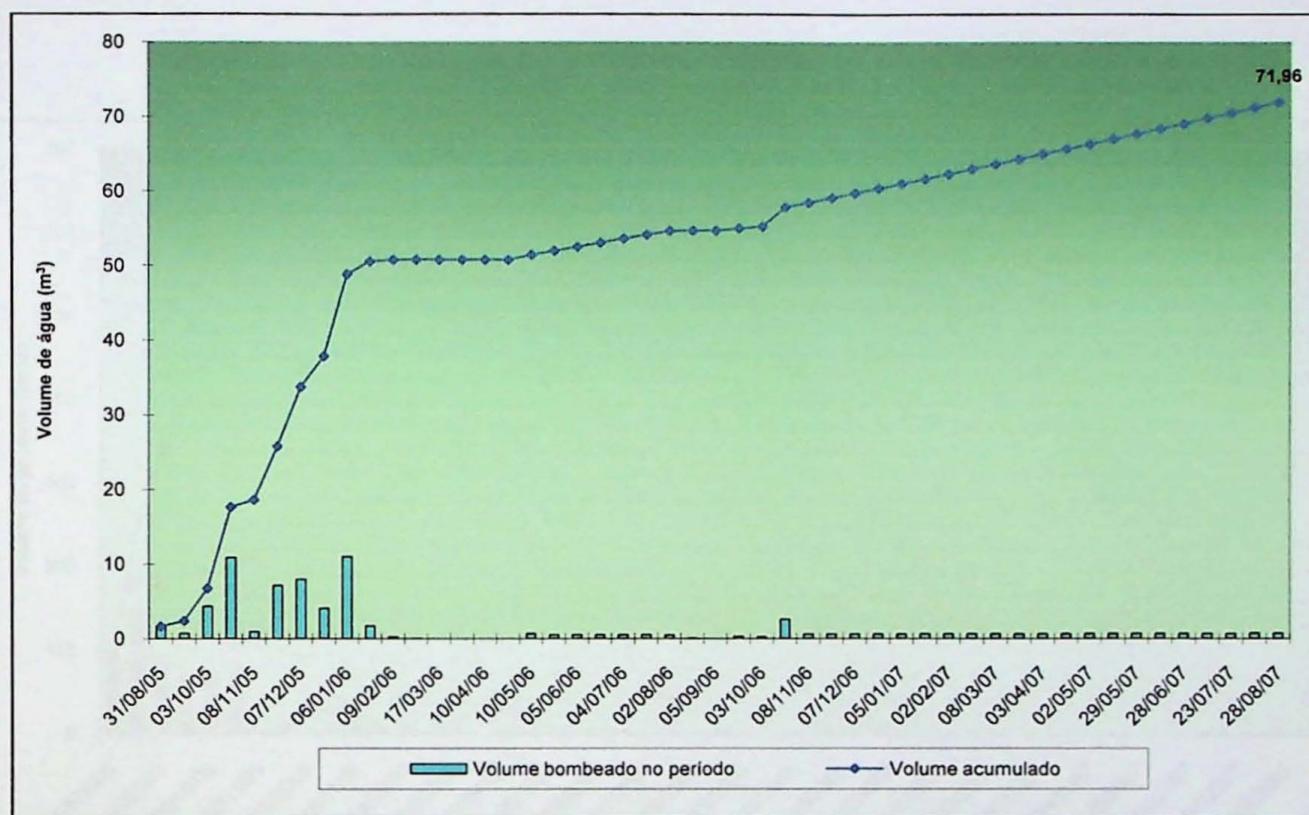


Figura 15 - Volume de água bombeada pelo sistema instalado no Auto Posto Vermelho

8.4.2 Volume de Produto Recuperado

Os gráficos com os dados de recuperação do produto apresentam-se de forma semelhante aos de bombeamento de água. Observa-se uma evolução muito rápida com estabilização posterior.

O Auto Posto Azul teve 646,82 litros de produto recuperado até agosto de 2007 (**Figura 16**). Permanece estável desde setembro de 2006.

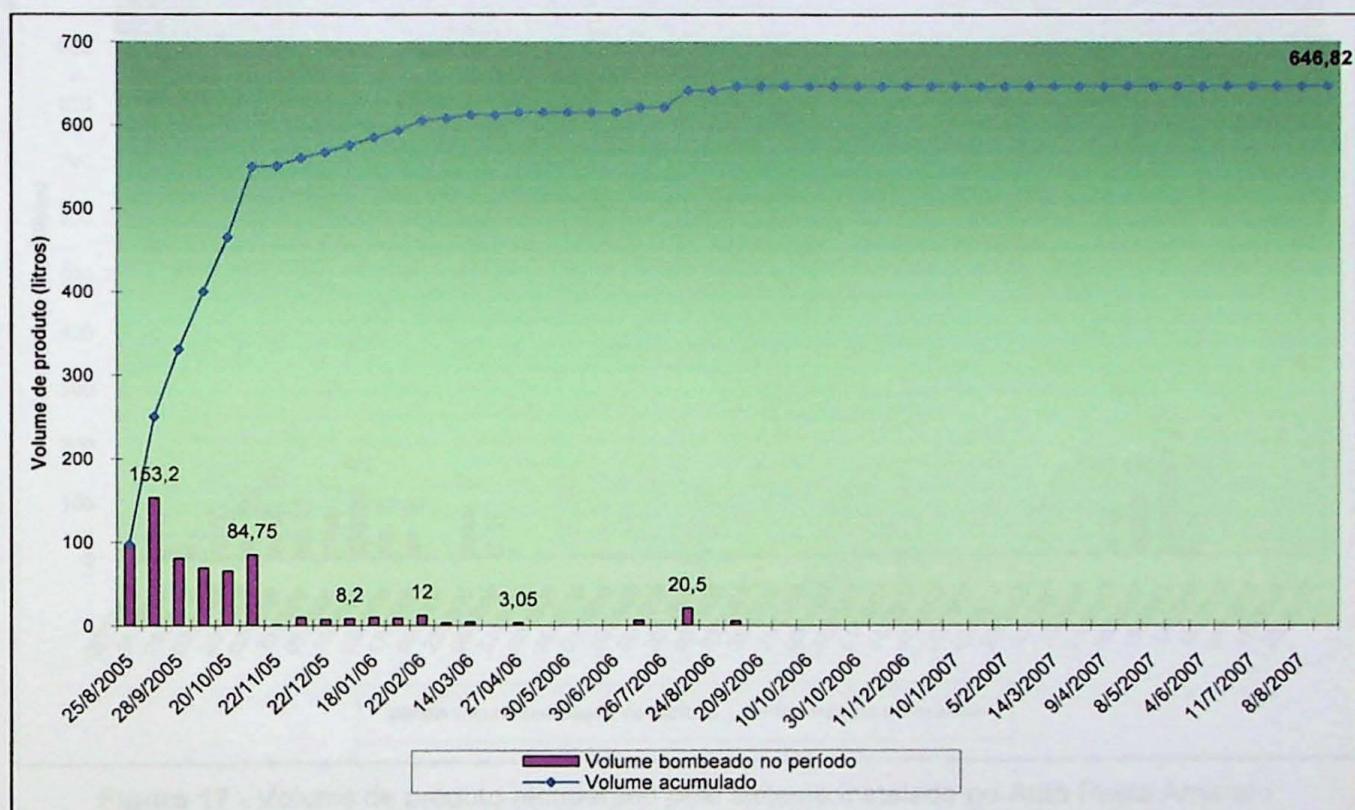


Figura 16 - Volume de produto recuperado pelo sistema instalado no Auto Azul

No Auto Posto Amarelo o início da recuperação deu-se em fevereiro de 2006, sendo que o volume de produto recuperado até maio de 2007 foi de 635 litros (**Figura 17**). Pode-se notar que o volume de produto recuperado volta a subir em junho de 2007, atingindo a estabilidade rapidamente. O total de produto recuperado até agosto de 2007 foi 945,18 litros.

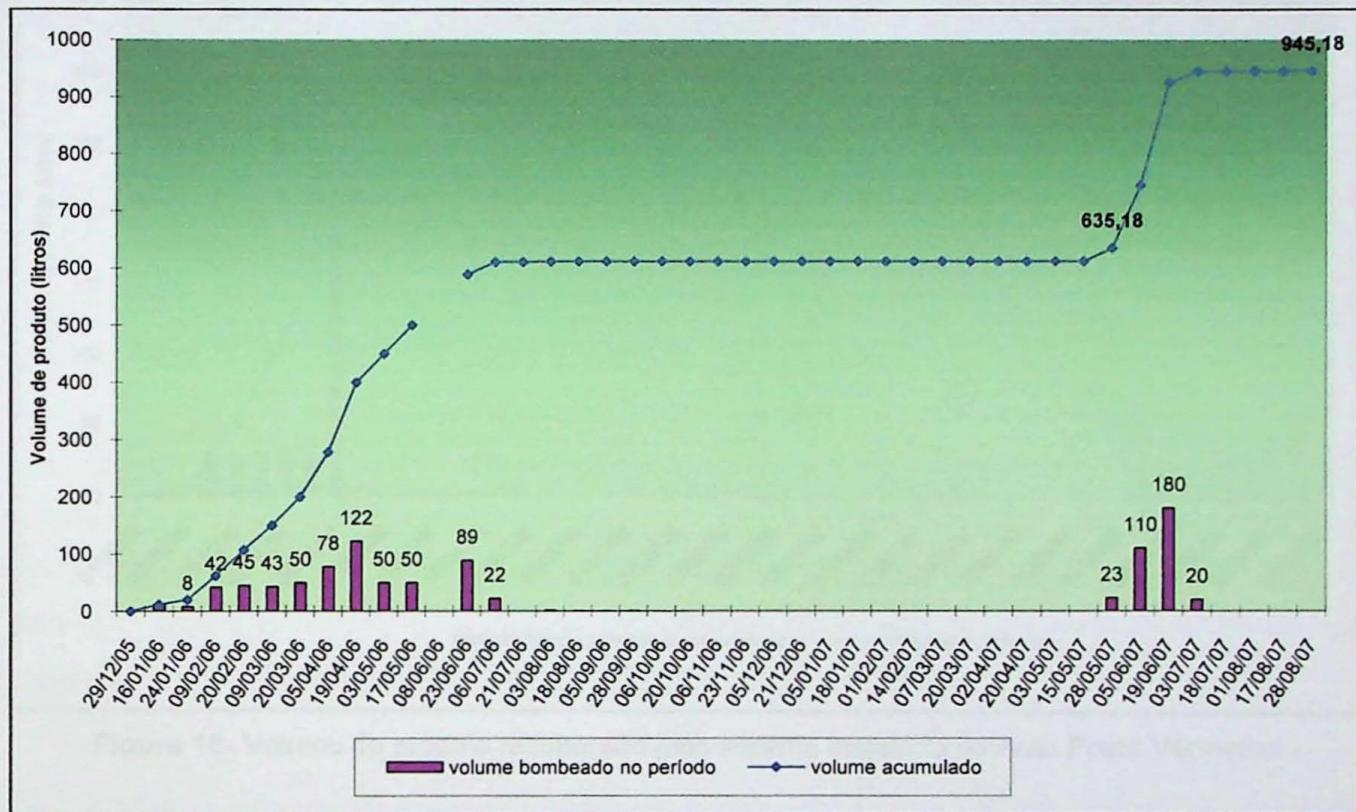
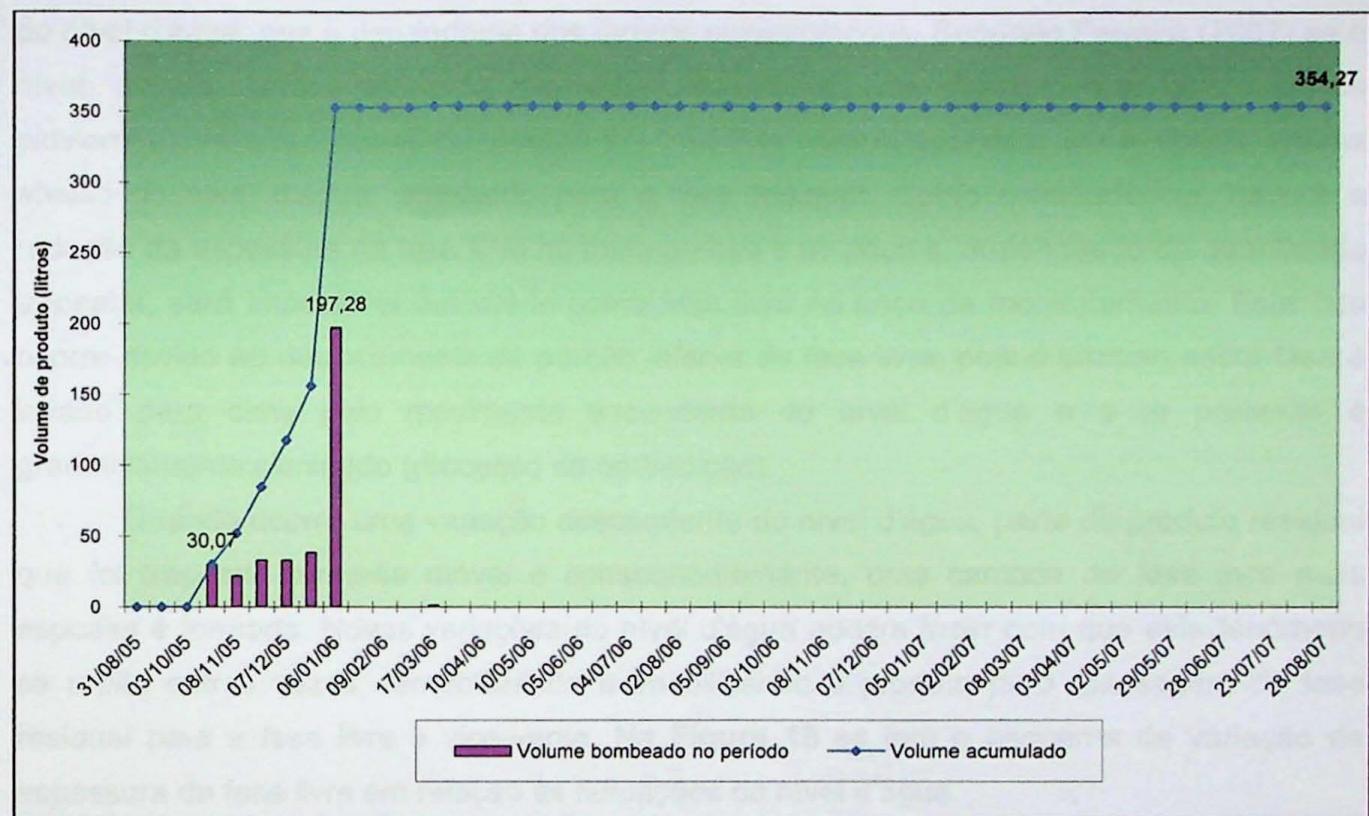


Figura 17 - Volume de produto recuperado pelo sistema instalado no Auto Posto Amarelo

Já no **Auto Posto Vermelho** o início do bombeamento foi em outubro de 2005. O patamar foi alcançado em janeiro de 2006, acumulando 354,27 litros, não havendo mais recuperação do produto após esta data (**Figura 18**).



8.3 Fase Livre

Embora a presença ou ausência de fase livre possa parecer um sinônimo de contaminação ou não, eficiência ou ineficiência do sistema, a situação não é tão trivial assim.

A presença de fase livre em um poço está diretamente relacionada com a flutuação do nível d'água, que é dependente dos índices pluviométricos. Segundo Ferreira (2007) se o nível d'água apresentar uma variação ascendente, em função dos altos índices pluviométricos, quantidades de produto em fase livre serão trapeadas, isto é, ficarão presas abaixo do nível d'água, passando para a fase residual. Como consequência, haverá a redução da espessura da fase livre no meio poroso e no poço e, dependendo da quantidade trapeada, será impossível detectá-la como fase livre no poço de monitoramento. Este fato ocorre devido ao deslocamento da porção inferior da fase livre, pois o produto nesta fase é levado para cima pelo movimento ascendente do nível d'água e o ar presente é gradativamente eliminado (processo de embebição).

Quando ocorre uma variação descendente do nível d'água, parte do produto residual que foi trapeado torna-se móvel e consequentemente, uma camada de fase livre mais espessa é formada. Novas variações do nível d'água podem fazer com que este fenômeno se repita outras vezes, remobilizando e imobilizando o produto puro (passagem da fase residual para a fase livre e vice-versa. Na **Figura 19** se tem o esquema da variação da espessura da fase livre em relação às flutuações do nível d'água.

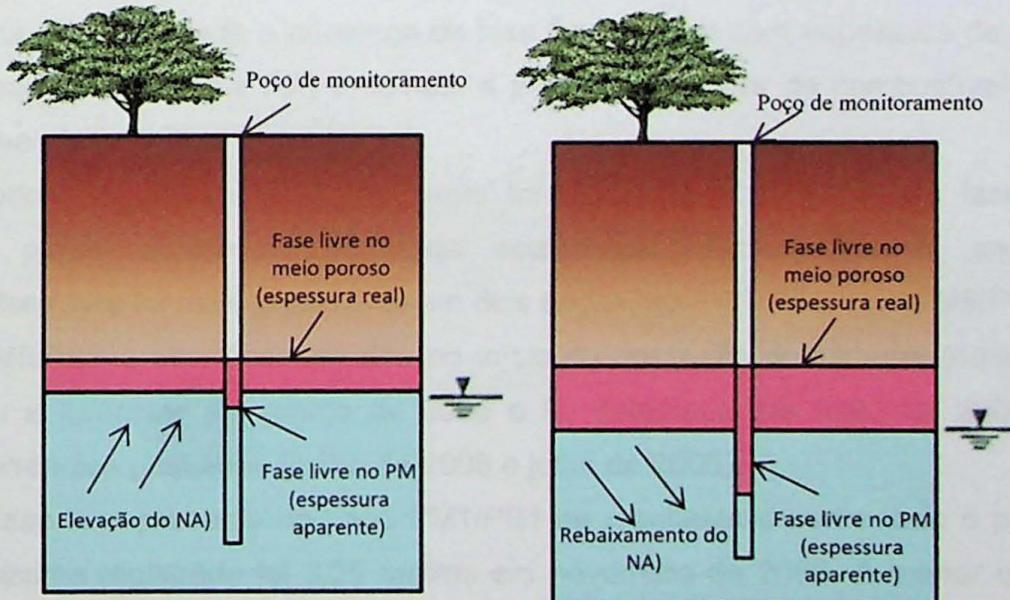


Figura 19 - Variação da espessura da fase livre em poços de monitoramento em função da variação do nível d'água (extraído e modificado de Ferreira, 2007)

8.3.1 Auto Posto Azul

Durante todo o período o Auto Posto Azul apresentou fase livre em apenas dois poços de monitoramento (PM6 e PM8), sendo a espessura máxima registrada de 77 cm (junho 2006).

A fase livre foi eliminada no PM6 após três meses de operação do sistema enquanto que no PM8 após quatro meses, havendo uma ocorrência isolada em junho de 2006. Atentando-se para que junho é um mês de menor índice pluviométrico, pode-se concluir que a recorrência da fase livre no PM6 está relacionada com a liberação do produto que estava como fase residual.

Nos poços de bombeamento, todos apresentaram fase livre com exceção dos PB3 e PB6. Apenas o PB4 teve fase sobrenadante persistente até maio de 2006. Todos os poços apresentaram odor característico da gasolina e lâminas não mensuráveis de produto. Nas últimas campanhas não foi detectada a presença de lâmina de produto, exceto nas campanhas realizadas no final de abril e início de junho, onde se constatou lâmina não mensurável de produto.

Nos poços de recuperação, exceto nos poços PR1, PR2 e PR7, houve registros de fase livre, com espessura máxima foi 39 cm no PR2 em setembro de 2005. A última observação de fase livre foi em julho de 2006 no poço PR3.

8.3.2 Auto Posto Amarelo

A fase livre foi constatada apenas no PM6 sendo persistente durante o período, com espessura máxima apresentada em julho de 2006 (28cm). Até a última campanha (agosto de 2007) havia sido detectada a presença de fase livre, porém com espessura de apenas 2 cm. Nos demais poços (PM e PR) é comum a presença de odor de combustível e lâmina não mensurável de fase livre.

Em todos os poços de bombeamento foi percebida a presença de fase livre. A maioria dos poços apresentou pequenas ocorrências, durante poucas campanhas. Entretanto a fase livre foi mais persistente em dois poços, no PM1/PB1 e no PM5/PB5.

No PM5/PB5 a ocorrência se deu no início da operação do sistema (novembro de 2005). Voltou a aparecer em março de 2006 e foi detectada até maio de 2006. Houve algumas recorrências pequenas (junho de 2006 e julho de 2006).

Já a fase livre presente no poço PM1/PB1 se manifesta durante todo o período. A espessura máxima registrada foi 3,25 metros em novembro de 2005. A menor espessura encontrada foi 0,01 metros (outubro de 2006). Embora ainda presente, pode-se notar uma diminuição da espessura, sendo que as últimas campanhas registraram apenas alguns centímetros de fase livre presente.

8.3.3 Auto Posto Vermelho

Não houve presença de fase livre nos poços de monitoramento. Apenas o poço de bombeamento PM10-PB4 apresentou fase livre, com espessura máxima de 8 cm sendo extinta em novembro de 2005. Houve algumas pequenas ocorrências, porém durante as últimas amostragens não houve constatação de fase livre.

8.4. Pluma contaminante – Fase Dissolvida

A partir das análises químicas realizadas pode-se traçar o desenvolvimento da fase dissolvida em cada um dos postos de serviço. As plumas de contaminantes foram delimitadas e para fim de comparação escolheu-se dois períodos, um no início da operação do sistema e outro na última campanha.

8.4.1 Auto Posto Azul

Não existem informações passíveis de comparação para este posto de serviço, pois a agência reguladora não solicitou a realização de análises químicas detalhadas.

8.4.2 Auto Posto Amarelo

O mapa de isoconcentrações para benzeno de novembro de 2005, mostra uma pluma de contaminação, com sua maior extensão com cerca de 40 metros (**Anexo 7**). O maior eixo da pluma está paralelo ao sentido do fluxo da água subterrânea (N-S) (**Anexo 4**).

Os poços PM01/PB01, PB03, PB04 e PM05/PB05 estão inseridos na área em que as concentrações são maiores que 300 µg/L. Vale ressaltar que o Valor de Intervenção definido pela CETESB para o benzeno é 5 µg/L, ou seja o valor é 30 vezes superior.

A área de maior concentração está sob os tanques de armazenamento. A pluma se estende por quase toda área do posto, não tendo sido detectada no entorno.

O último mapa de isoconcentrações (maio de 2007) mostra uma pluma alongada, oval, com uma menor área que a anterior. O maior eixo possui aproximadamente 45 metros. Esta pluma também está restrita às instalações do posto (**Anexo 8**).

As maiores concentrações de benzeno foram identificadas no PR01, onde anteriormente não havia sido detectada a presença do composto. Porém a concentração registrada é menor do que a registrada no mapa de novembro de 2005, que é cerca de 100 µg/L. A diferença é quase 75% entre um período e outro. Houve uma pequena mudança na direção do fluxo da água subterrânea entre os dois períodos. Na última campanha constatou-se que o fluxo a norte do posto tem direção NW-SE, passando gradativamente para N-S na porção ao sul do posto de serviço. O maior eixo da pluma está localizado a NW-SE.

Em novembro de 2005 foi detectada uma pluma de tolueno, também de formato ovalado, com as maiores concentrações maior que 1000 µg/L. O valor de intervenção da CETESB (2005) é 700 µg/L. A extensão é aproximadamente 35 metros, e possui direção NW-SE (**Anexo 9**). Na última campanha, porém, não houve registros desta pluma, havendo um único poço contaminado por este composto. O PM02 apresentou concentração inferior ao Valor de Intervenção, sendo essa igual a 65,31 µg/L.

8.4.3 Auto Posto Vermelho

O mapa de isoconcentração do composto benzeno mostra uma pluma alongada, possuindo seu maior eixo aproximadamente 15 metros, no sentido N-S, não se relacionando com os eixos dos fluxos de água subterrânea (**Anexo 10**). A maior concentração foi registrada no PM/PB04 (maior que 1000 µg/L), apresentando-se o produto como fase livre. O PM02, por sua vez, apresenta menor concentração que o anterior, porém registrando valor superior ao limite de intervenção da CETESB (2005), chegando a 273 µg/l.

A extensão da pluma permanece sob as instalações do posto de serviço, não sendo detectada nas áreas vizinhas.

Através da última campanha realizada (maio 2007), delimitou-se a pluma de fase dissolvida, que em seu maior eixo tem aproximadamente 12 metros e direção WNW-ESE (**Anexo 11**). A maior concentração foi encontrada no PM02, sendo porém 43% menor que na campanha anterior. O PM09 também apresentou concentrações acima do valor de intervenção (cerca de 30 µg/l). O PM/PB04 não apresentou valores superiores aos recomendados.

Nenhum outro composto foi encontrado acima dos valores de intervenção.

9. Interpretação e Discussão dos Resultados

9.1 Características Físicas

Os postos de serviço Azul e Vermelho se encaixam no padrão de fonte contaminante descrito pela CETESB. São postos que possuem mais de 25 anos, que possuíam tanques antigos e consequentemente corroídos.

Todos os três postos de serviço encontram-se sob condições geológicas apropriadas à aplicação do sistema MPE, possuindo intercalações entre pacotes arenosos e argilosos. As condições hidrogeológicas também são bem propícias, considerando-se que os postos Azul e Vermelho possuem nível d'água raso.

Devido às características geológicas o posto de serviço Amarelo (areia fina), apresenta uma maior condutividade hidráulica que os demais postos. A velocidade linear da água subterrânea é 643 vezes maior que a do Auto Posto Azul (que possui a menor velocidade dos três). Considerando-se apenas o fluxo advectivo, pode-se admitir que a migração da pluma contaminante é bem maior que nos demais postos. A velocidade do fluxo advectivo é maior no Auto Posto Amarelo (160m/ano) dado a litologia do aquífero que compreende pacotes arenosos e à maior condutividade hidráulica. O Auto Posto Azul possui a menor velocidade advectiva, que é menor que 0,3 m/ano. Isto é devido ao menor gradiente hidráulico e condutividade hidráulica.

Quanto à condutividade hidráulica, os postos Amarelo e Vermelho estão dentro da faixa desejada, possuindo o Auto Posto Azul uma condutividade um pouco inferior à referida pela bibliografia.

Na Tabela 3 pode-se observar as principais características físicas dos aquíferos em cada posto.

	Auto Posto Azul	Auto Posto Amarelo	Auto Posto Vermelho
Nível d'água (m)	2,97 a 3,58	7,42 a 9,52	0,75 e 1,60
Condutividade Hidráulica (cm/s)	$1,01 \times 10^{-6}$	$9,73 \times 10^{-4}$	$2,96 \times 10^{-5}$
Gradiente Hidráulico (%)	7,3 - 0,4	11,0	1,4
Porosidade efetiva (%)	9,3	21,0	3,0
Velocidade linear (m/ano)	0,250 - 0,013	160,70	4,35

Tabela 3 - Características físicas dos aquíferos

Os níveis potenciométricos estão intimamente ligados aos índices pluviométricos locais. Em períodos de chuva o nível d'água tende a ficar mais raso, enquanto que em períodos de estiagem, a superfície potenciométrica é mais profunda. Pode-se observar que o Auto Posto Amarelo possui uma maior profundidade de nível d'água, que está relacionada com as características geológicas da área. do com a alta condutividade hidráulica, menor média de precipitação mensal e maior porosidade. Em agosto de 2007 a variação da profundidade entre o nível d'água nos poços foi de 3,42 metros. A variação da profundidade do nível d'água nos poços dos demais postos não chega à métrica.

No Auto Posto Azul nota-se que há uma grande mudança do mapa potenciométrico após a instalação de um poço cacimba. Foi criado um cone de rebaixamento, dando às linhas potenciométricas uma configuração característica, evidenciando a zona de captura deste poço.

9.2 Volume de Água Bombeada

O Auto Posto Azul é o que possui a menor condutividade hidráulica e por isso o volume de água bombeada foi inferior ao dos demais postos de serviço. Um menor volume bombeado aumenta a relação de custo/benefício da técnica, pois a água bombeada recebe tratamento antes de ser descartada.

O Auto Posto Amarelo apresenta o maior volume de água bombeada no período ($70,09\text{ m}^3$), considerando-se que possui um menor tempo de operação do sistema que os demais postos de serviço. Isso está relacionado com a alta porosidade efetiva do aquífero e a alta condutividade hidráulica.

Na **Figura 14** percebe-se que há um aumento muito rápido do volume de água bombeada no início da operação do sistema. Quando os poços de bombeamento passam a operar, há um rebaixamento rápido do nível d'água nos arredores dos poços. Posteriormente, o aquífero se reequilibra, adequando-se às novas condições impostas.

O mesmo fenômeno de rebaixamento do nível d'água sucedido por estabilidade ocorre no Auto Posto Vermelho. Embora a porosidade efetiva e a condutividade hidráulica não sejam tão elevadas como no Auto Posto Amarelo, houve um grande volume de água acumulado ($71,98\text{ m}^3$). Em níveis d'água muito profundos é mais difícil fazer com que a água, o produto e o gás ascendam através do poço, devido às forças contrárias (gravidade, tensão superficial, o potencial de pressão, etc).

Na Tabela 4 pode-se observar alguns parâmetros do sistema de remediação em cada um dos postos.

	Volume de água bombeada (m ³)	Volume de produto recuperado (L)	Tempo de operação do sistema
Auto Posto Amarelo	70,09	945,18	21 meses
Auto Posto Azul	4,56	646,82	24 meses
Auto Posto Vermelho	71,98	354,27	24 meses

Tabela 4 - Parâmetros do sistema

9.3 Volume de Produto Recuperado

Os gráficos do volume de produto recuperado apresentados para os três postos (Figuras 16, 17 e 18) são semelhantes ao de volume de água bombeado. Há um aumento rápido na recuperação de produto, seguido de uma estabilidade.

Comparar o sucesso da técnica baseando-se apenas no volume recuperado de produto é insuficiente. A remediação da fase dissolvida e vapor também deve ser avaliada. Para que a remediação seja atingida com sucesso, existem vários fatores, como volume de contaminante, quantidade de matéria orgânica, características físicas do contaminante (densidade, viscosidade, volatilidade, entre outros), flutuações sazonais do freático (trapeamento do produto) que devem ser considerados durante o projeto de remediação.

A quantidade de matéria orgânica presente também é um fator importante. Ela é diretamente proporcional ao coeficiente de partição (Kd). Quanto maior o Kd, maior também será a adsorção do contaminante no solo, e portanto maior será a dificuldade em retirá-lo.

O Auto Posto Amarelo é o que possui menor tempo de funcionamento do sistema, porém apresenta a maior recuperação de produto. A litologia predominantemente na fração areia, a condutividade hidráulica e a porosidade efetiva facilitam a retirada do produto. Como os pacotes litológicos presentes são de origem glacial, há um menor acúmulo de matéria orgânica. Assim, há pouca adsorção do produto. Sabe-se também que compostos como a gasolina possuem maior permeabilidade efetiva em poros maiores, desta forma a retirada da gasolina é maior em relação aos demais postos.

O outro extremo é o Auto Posto Vermelho. O sistema está em operação a 24 meses (até agosto de 2007) e o volume de produto recuperado é quase três vezes menor que no Auto Posto Amarelo. Neste caso observa-se uma maior quantidade da fração argila, oriundas do sistema de leques aluviais da Formação Resende. As argilas possuem uma maior quantidade de argilominerais e matéria orgânica, que aumenta a adsorção de compostos orgânicos. Nota-se que o volume de água bombeada é o maior dos três postos. Isso porque a água possui uma maior permeabilidade efetiva em poros menores, facilitando a retirada de água ao invés da retirada do produto.

O Auto Posto Vermelho possui elevado volume de produto recuperado e também a menor quantidade de água recuperada. A geologia local é a principal responsável por este fenômeno. O pacote litológico do aquífero é predominantemente formado por areia média a grossa, inconsolidada, facilitando assim a retirada do produto (maior permeabilidade).

9.4 Fase livre

Embora a presença ou não de fase livre nos poços de monitoramento não seja o único parâmetro para medir a eficiência do sistema, pois a presença ou ausência de fase livre também pode estar associada às flutuações do nível d'água como descrito anteriormente no Capítulo 8.3 observa-se que no Auto Posto Azul a fase livre mensurável persistiu até meados de julho de 2006, ou seja, não é detectada há um ano, tanto nos poços de monitoramento, como os de bombeamento e de recuperação.

Embora houvesse registros de espessura aparente de quase um metro, nas últimas campanhas registrou-se apenas lâminas não mensuráveis do produto.

A maioria dos poços de recuperação apresentou fase livre, e após alguns meses a fase livre havia sido eliminada, persistindo apenas em alguns poços (PR9 e PR10).

Nos poços de bombeamento, apenas no PB4 houve fase livre persistente até maio de 2006. Na **Figura 20** é representada a profundidade da fase livre, do nível d'água e da mangueira extratora no interior do PB4 durante o período de 28 de agosto de 2005 a 25 de agosto de 2007. Embora houvesse ocorrência de fase livre nos demais postos, utilizou-se o exemplo do PB4 pois representa a diminuição da fase livre de todo o posto de serviço, assim como é didática na representação das variações de espessura *versus* a sazonalidade. Pode-se observar a nítida diminuição progressiva da espessura da fase livre, independente das flutuações sazonais do nível d'água.

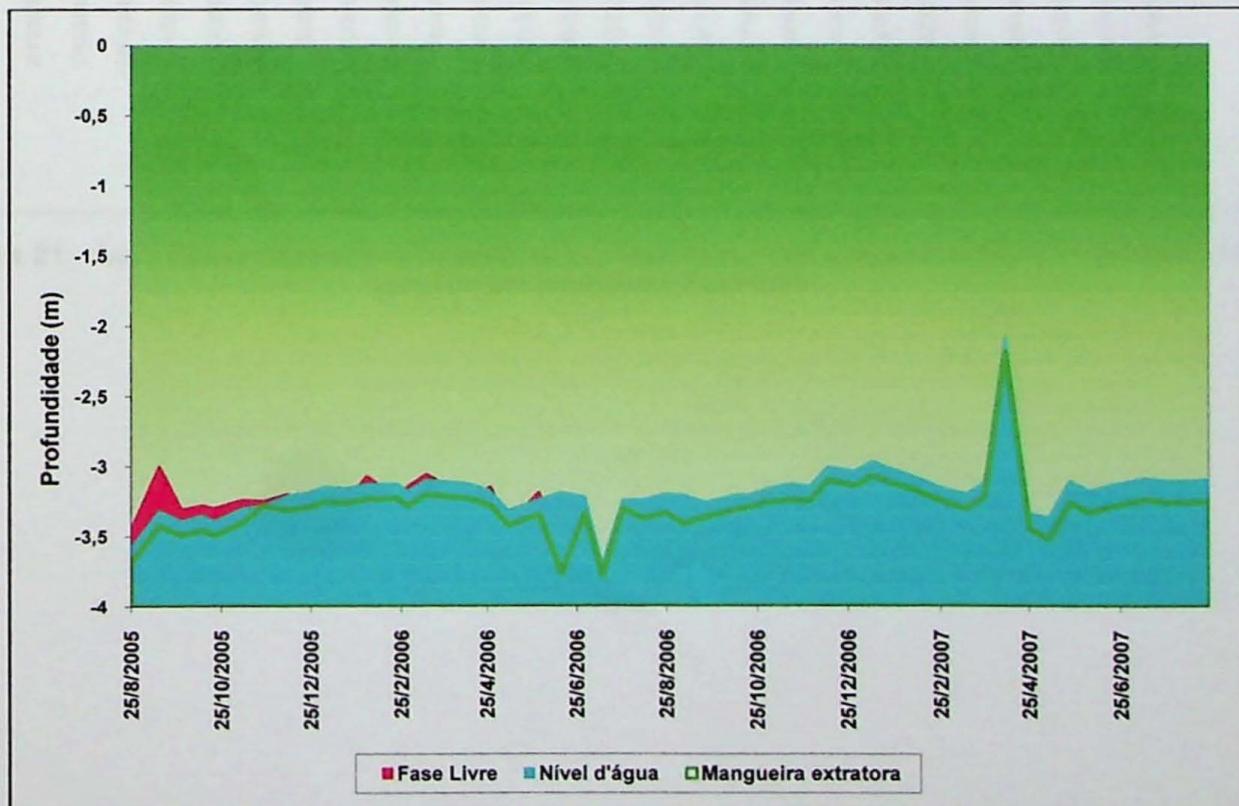


Figura 20 – Auto Posto Azul - Profundidade da fase livre, nível d'água e mangueira extratora no poço de bombeamento PB4

A fase livre ainda é persistente no Auto Posto Amarelo, tanto nos poços de bombeamento como nos poços de monitoramento.

Entretanto há uma significativa diminuição de espessura. No início da operação do sistema, a espessura aparente era até 3,25 metros no PM/PB01. Atualmente a espessura é centimétrica. A Figura 21 representa representada a profundidade da fase livre, do nível d'água e da mangueira extratora no interior do PBM/PB01 durante o período de 2 de novembro de 2005 a 28 de agosto de 2007. O PM/PB01 exemplifica a diminuição progressiva da espessura da fase livre no Auto Posto Amarelo.

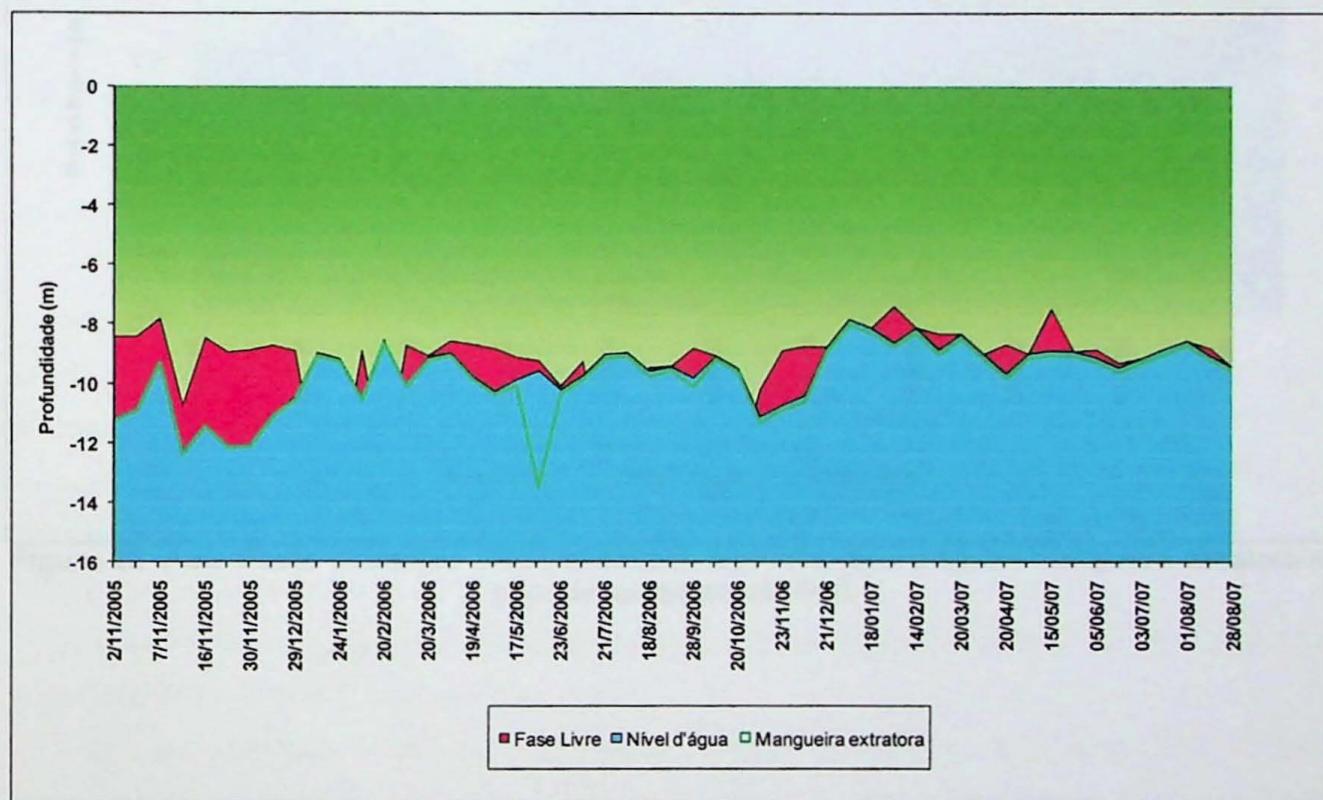


Figura 21 - Auto Posto Amarelo - Profundidade da fase livre, nível d'água e mangueira extratora no poço de bombeamento PM/PB01

O Auto Posto Vermelho obteve poucos registros de fase livre, que após a operação do sistema foi eliminada. A evolução pode ser observada no poço de bombeamento PB01 (**Figura 22**)

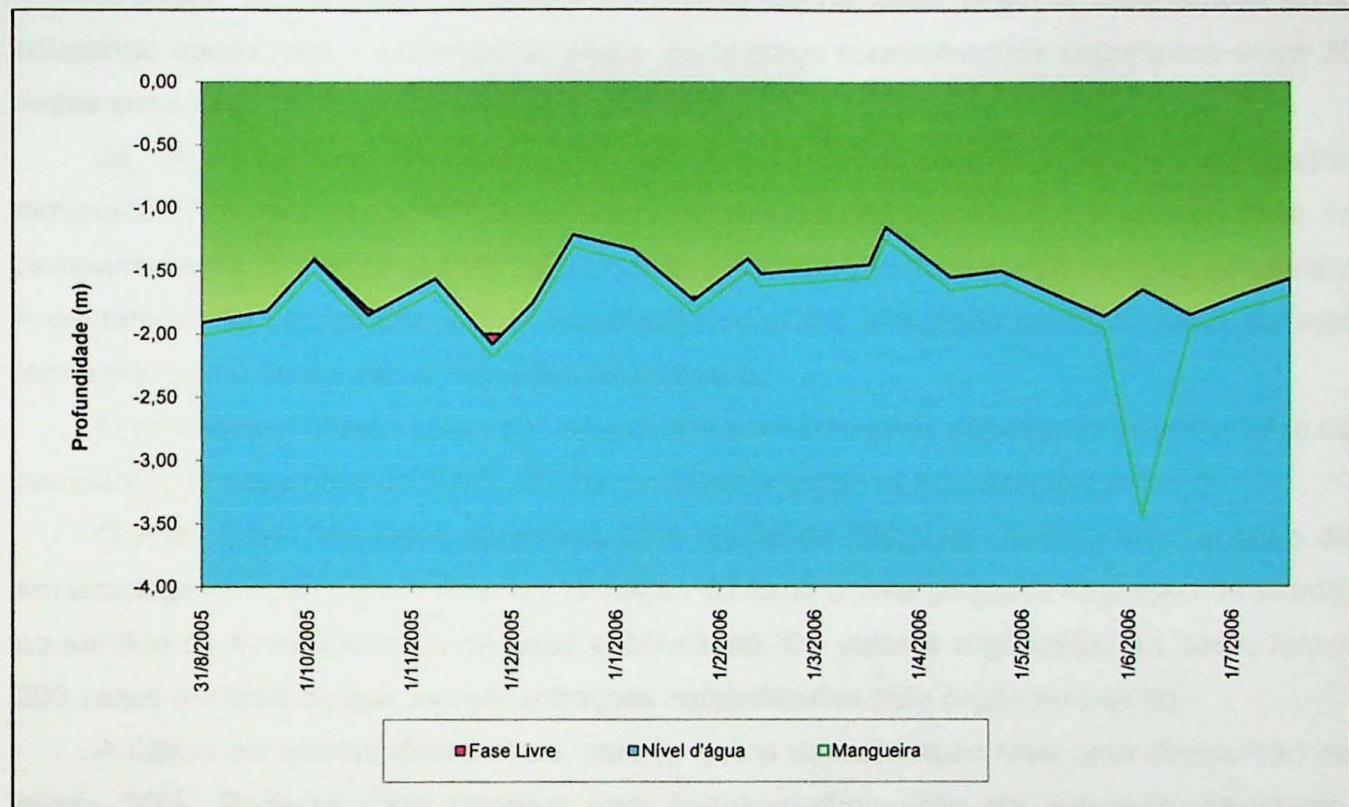


Figura 22- Auto Posto Vermelho - Profundidade da fase livre, nível d'água e mangueira extratora no poço de bombeamento PB1

9.5 Pluma Contaminante - Fase Dissolvida

O Auto Posto Amarelo apresentou três compostos que com concentrações maiores que os Valores de Intervenção da CETESB (2005), são estes, Benzeno, Tolueno e Naftaleno.

A pluma de Benzeno registrada em novembro de 2005 possuía uma ampla área, ocupando quase toda a extensão do posto. As maiores concentrações registradas eram 30 vezes superiores às exigidas pelo órgão ambiental.

Já na campanha de maio de 2007 estas concentrações foram drasticamente diminuídas. Embora o eixo da pluma seja maior, a sua área é inferior à apresentada na campanha anterior demonstrando que o sistema tem atuado na redução da fase dissolvida. A contaminação permanece sob as instalações do posto, indicando também que o sistema tem agido como contenção à migração desta pluma.

O composto Tolueno só foi encontrado em concentrações superiores às permitidas na campanha de novembro de 2005, não havendo mais registros nos demais períodos.

O Auto Posto Vermelho apresenta uma pluma de Benzeno distante dos tanques de armazenagem o que pode indicar a eliminação da fonte e uma pequena migração da pluma, no sentido do fluxo advectivo da água subterrânea. Os valores registrados no posto foram 200 vezes maiores do que as concentrações estabelecidas pelo órgão ambiental.

A última campanha demonstrou, porém, que a concentração teve uma diminuição de quase 50%. Pode-se notar também uma pequena diminuição da extensão da pluma, indicando a eficiência da técnica MPE.

Não houve migração da pluma para fora das instalações do posto, indicando que após a instalação do sistema, a pluma foi contida.

Como citado no Capítulo 8.4.1 Em função do órgão ambiental não solicitar amostragens trimestrais de água subterrânea para avaliar a eficiência do sistema de remediação no Auto Posto Azul, não foi possível apresentar informações e interpretações com relação à evolução da contaminação em fase dissolvida para este posto.

10. Conclusão

Através da análise das características físicas do aquífero conclui-se que todos os postos possuem as características necessárias para o bom funcionamento do sistema de Extração Multifásica. Embora a condutividade hidráulica obtida no Auto Posto Azul seja inferior à descrita pela literatura (USEPA, 1997a), a eficiência do sistema não foi comprometida, havendo bons níveis de recuperação do produto.

Mesmo com características geológicas e hidrogeológicas distintas em todos os três postos o processo de recuperação tem tido sucesso. Notou-se que os aquíferos com uma maior quantidade de areia, maior porosidade efetiva e condutividade hidráulica apresentaram maior volume acumulado de água, como também um volume alto de produto recuperado.

A recuperação de produto não depende apenas das características hidrogeológicas do aquíferos, mas também das características físicas dos litotipos, da quantidade de matéria orgânica e características químicas dos contaminantes.

A contaminação presente não oferece perigo à população do entorno e a migração das plumas tem sido contida, não atingindo áreas vizinhas, além das instalações dos postos.

Tem-se observado uma diminuição contínua da fase imiscível presente nos poços de monitoramento, bombeamento e recuperação. Embora isto por si só não conclua a eficiência, é um bom indício de que o sistema tem eliminado o produto contaminante dos aquíferos em cada uma das regiões.

As plumas de fase dissolvida estão contidas, têm decrescido em extensão e as concentrações tendem a diminuir, e até mesmo, ser inferiores aos valores estabelecidos pela agência reguladora. Há poços que antes registravam concentrações altas de BTEX e PAHs e na última campanha não apresentaram concentrações detectáveis pelo equipamento de análise química.

A extração multifásica é uma técnica eficiente desde que utilizada no contexto geológico aceitável, promove uma recuperação rápida do produto contaminante, ideal para contaminação por hidrocarbonetos do petróleo com formação de LNAPL.

Dos três postos avaliados, o que melhor obteve resposta à técnica de extração multifásica foi o Auto Posto Amarelo. Houve uma expressiva recuperação de produto com uma nítida diminuição da pluma de fase livre. Além disso, houve também a contenção da pluma, restringindo a migração da mesma para além dos limites do posto. Os resultados obtidos com relação à fase dissolvida para este posto, também foram extremamente favoráveis..

11. Referências bibliográficas

- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. 2005. Relatório de estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo. São Paulo, 247p. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/>>. Acesso em 8 de agosto de 2007.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. 2006. Relação de áreas contaminadas. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/>>. Acesso em 24 de setembro de 2007
- Ferreira, S.M. 2007. Onde está a fase livre de gasolina? In: ABAS, *Boletim Informativo*, 170:12.
- Fetter, C.W. 1994. *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall, Oshkosh, 691pp.
- FRTR – Federal Remediation Technologies Roundtable. In:Situ Ground Water Remediation Technology - Dual Phase extraction. Disponível em: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_41.html>. Acesso em 24 de setembro de 2007.
- Galembeck, T.M.B., Wernick, E., Godoy, A. M. 2001. Tipologia de zircão de granitos I e A (rapakivi) coexistentes no Complexo Granítóide de Itu, SP. *Revista Geociências*, 20:25-36.
- Heilbron, M., Pedrosa-Soares, A.C., Campos Neto, M.C., Silva L.C., Trouw, R.A.J. & Janasi, V.A. 2004. Província Matiqueira. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R & Brito-Neves. B.B, *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Editora Beca, pp.:203-234.
- Palmer, P.L., Nyer, E.K. 1996. Vacuum-Enhanced Recovery. In:Nyer, E.K., Palmer, P.L., Carman, E.P., Boettcher, G., Bedessem J.M., Lenzo, F., Crossman, T.L., Rorech, G.J., Kidd, D.F., *In situ Treatment Technology*. Lewis Publishers, pp.:119-180.
- Prefeitura de São Paulo. 2000. Mapa do município de São Paulo (2000) em escala 1:100000. Disponível em <<http://atlasambiental.prefeitura.sp.gov.br/mapas/117.pdf>>. Acesso em 15 de fevereiro de 2007.
- Riccomini, C., Sant'Anna, L.G., Ferrari, A.L. 2004. Evolução Geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R & Brito-Neves. B.B, *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Editora Beca, pp.: 383-405.
- Tassinari, C.C.G., Munhá, J.M.U., Ribeiro, A., Correia, C.T. 2001. Neoproterozoic oceans in the Ribeira Belt (southeastern Brazil): The Pirapora do Bom Jesus ophiolitic complex *Episodes*, 24, v.4: 245-251.
- USACE – U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1999. Engineering and Design - Multi-Phase Extraction Proponent .EM 1110-1-4010. Disponível em: <www.usace.army.mil/>. Acesso em 26 de março de 2007.
- USEPA – U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.1997a. Presumptive Remedy: Supplemental Bulletin Multi-Phase Extration (MPE) Tecnology for VOCs in Soil and Groundwater. EPA 540-F-97-004. Office of Research and Development. Washington, DC. Disponível em:< <http://www.epa.gov>>. Acesso em 26 de março de 2007.

USEPA – U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.1997b. Analysis of selected enhancements for soil vapor extraction. EPA 542-R-97-007. Office of Research and Development. Washington, DC. Disponível em:< <http://www.epa.gov>>. Acesso em 26 de março de 2007.

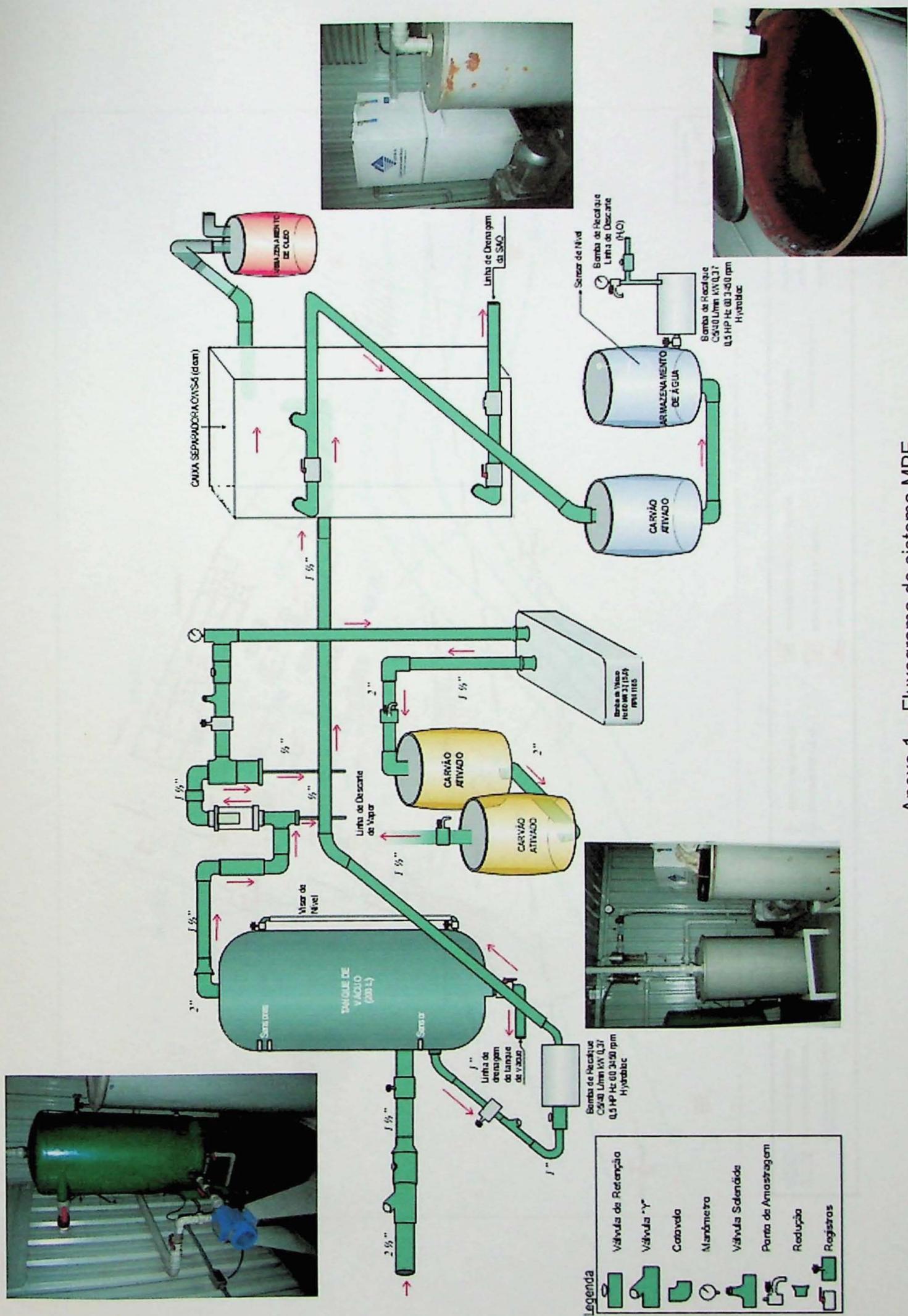
USEPA – U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.1999. Multi-Phase extraction: State of the Practice. EPA 542-R-99-004. Office of Research and Development. Washington, DC. Disponível em:< <http://www.epa.gov>>. Acesso em 26 de março de 2007.

ANEXOS

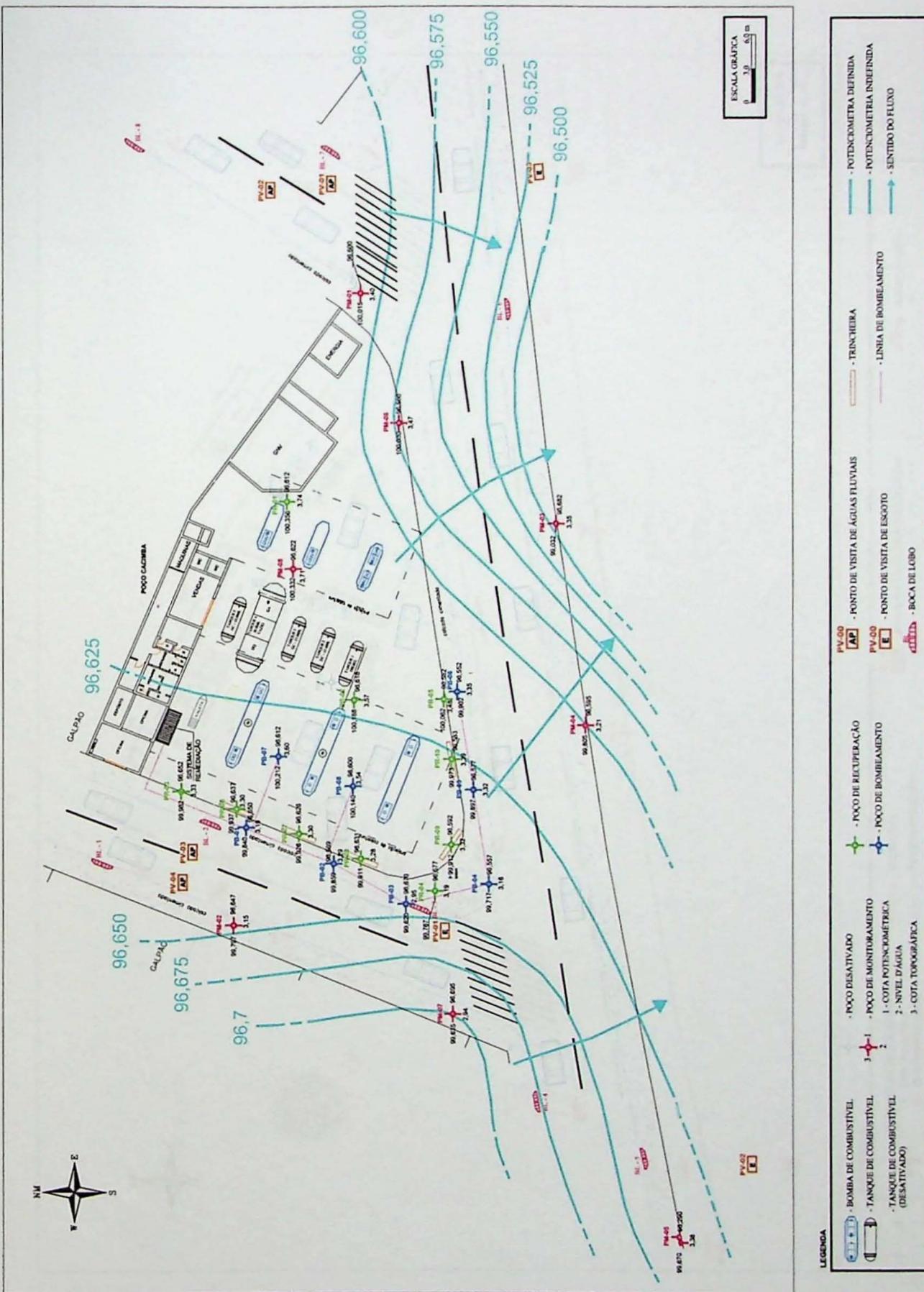
ANEXOS

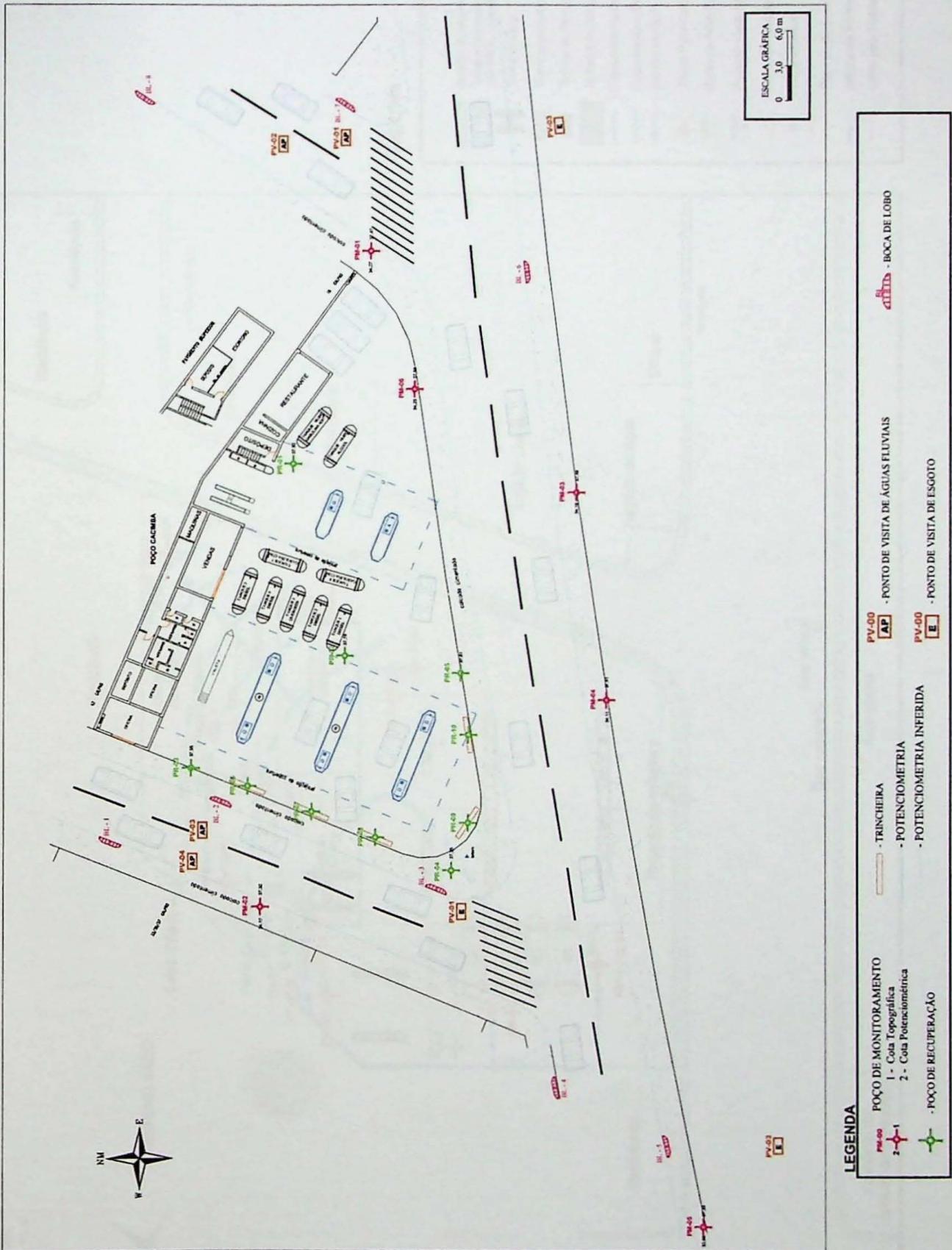
ANEXOS

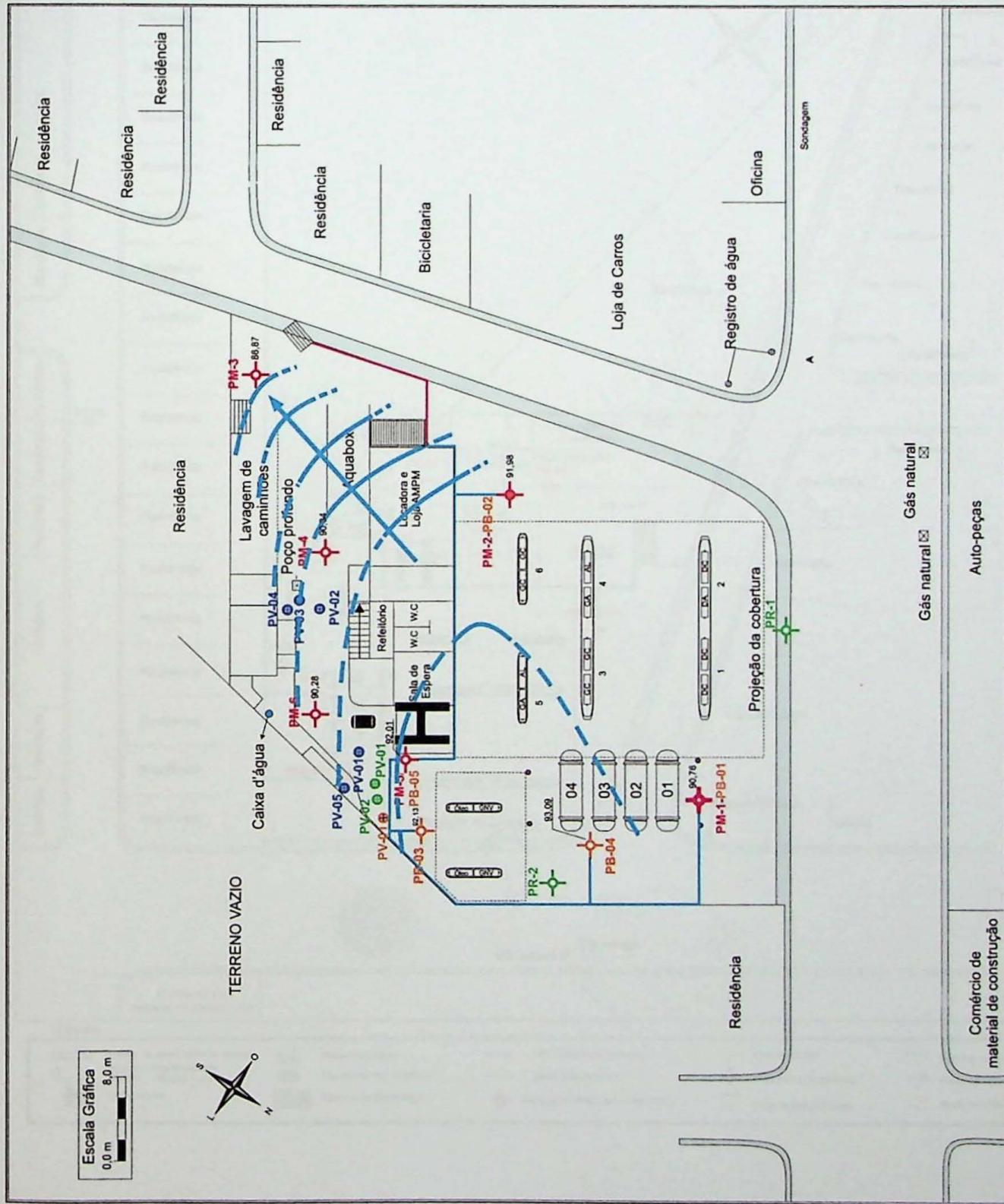
Anexo 1 – Fluxograma do sistema MPE

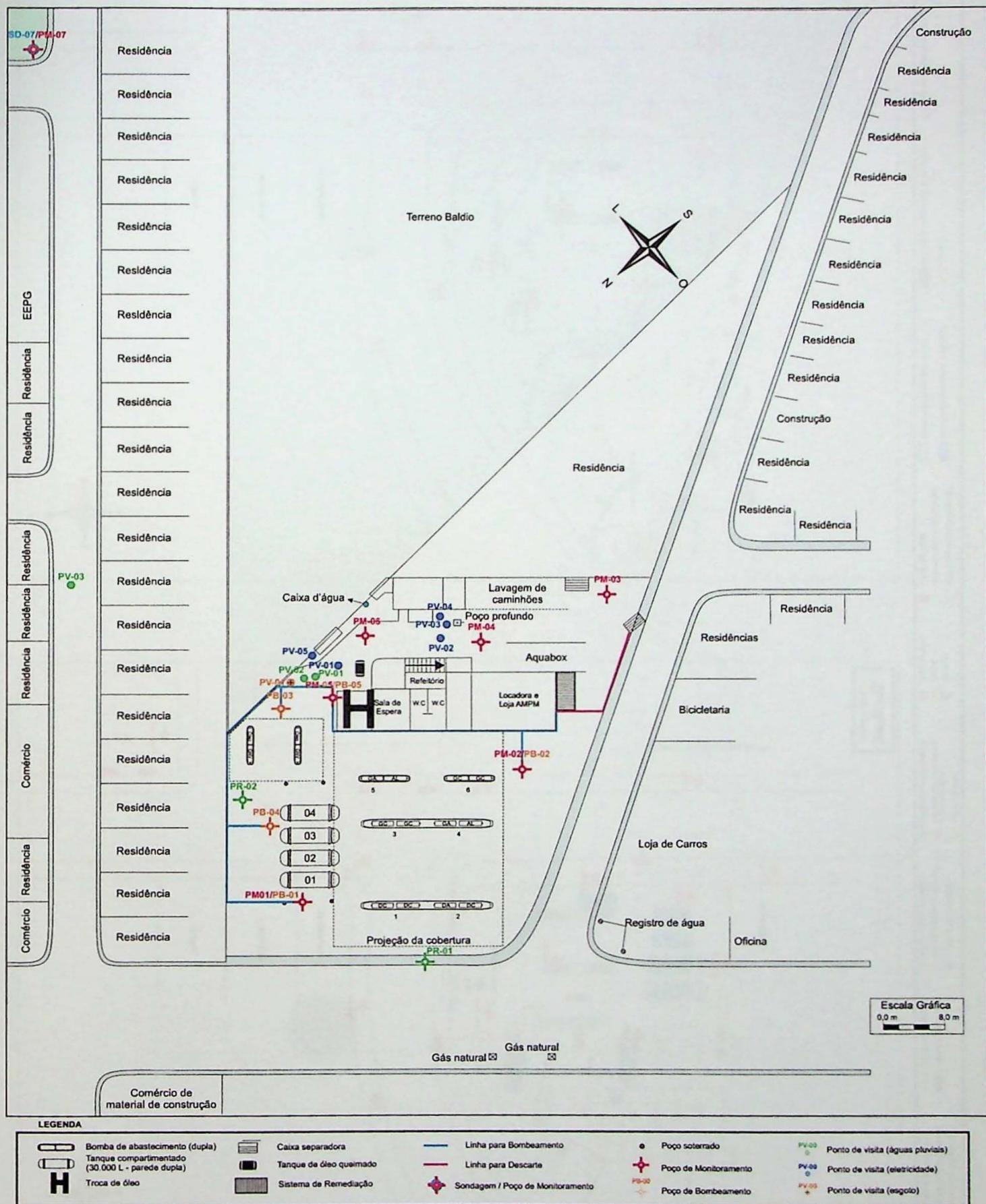


Anexo 2 - Mapa Potenciométrico - Auto Posto Azul (dez/2006)

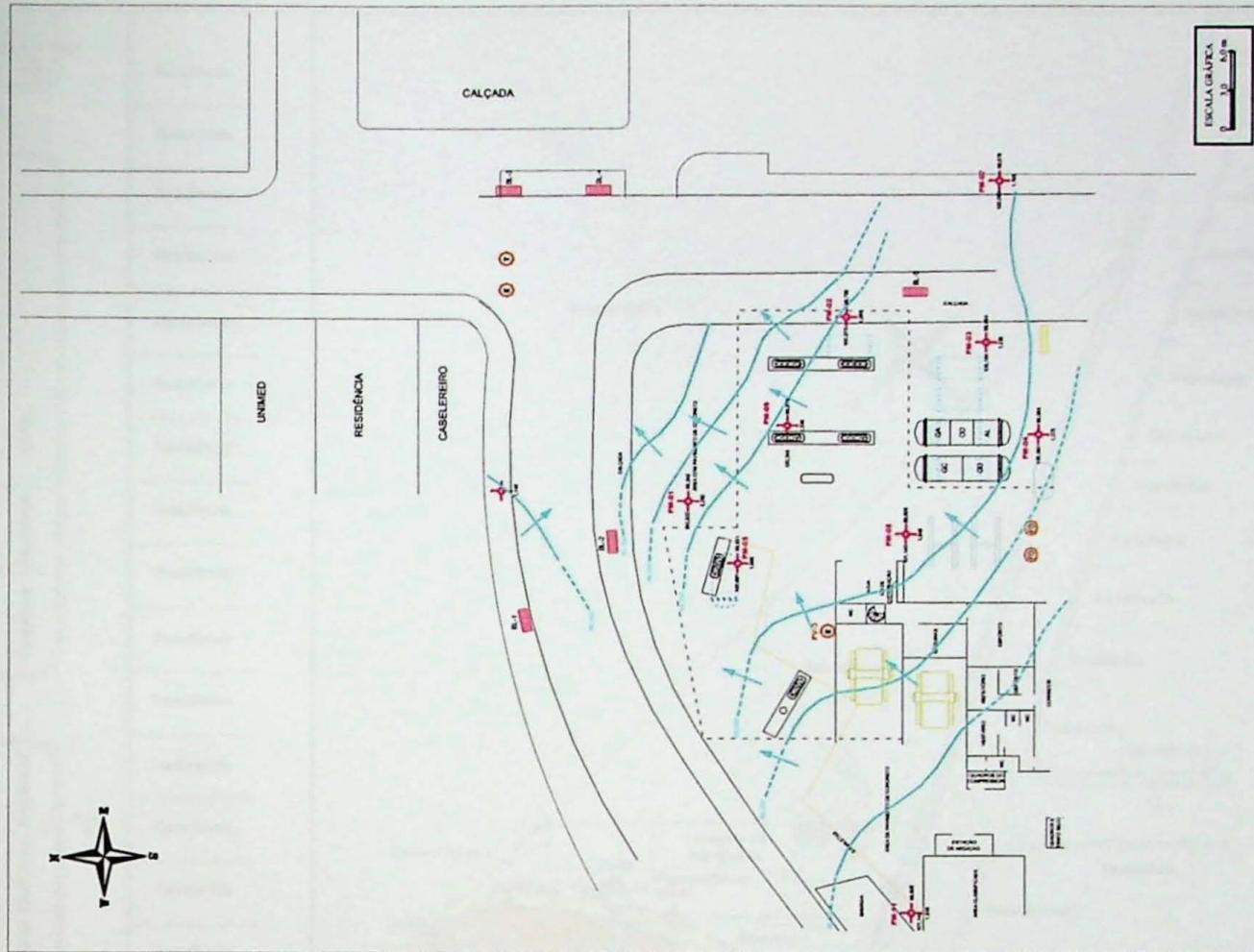




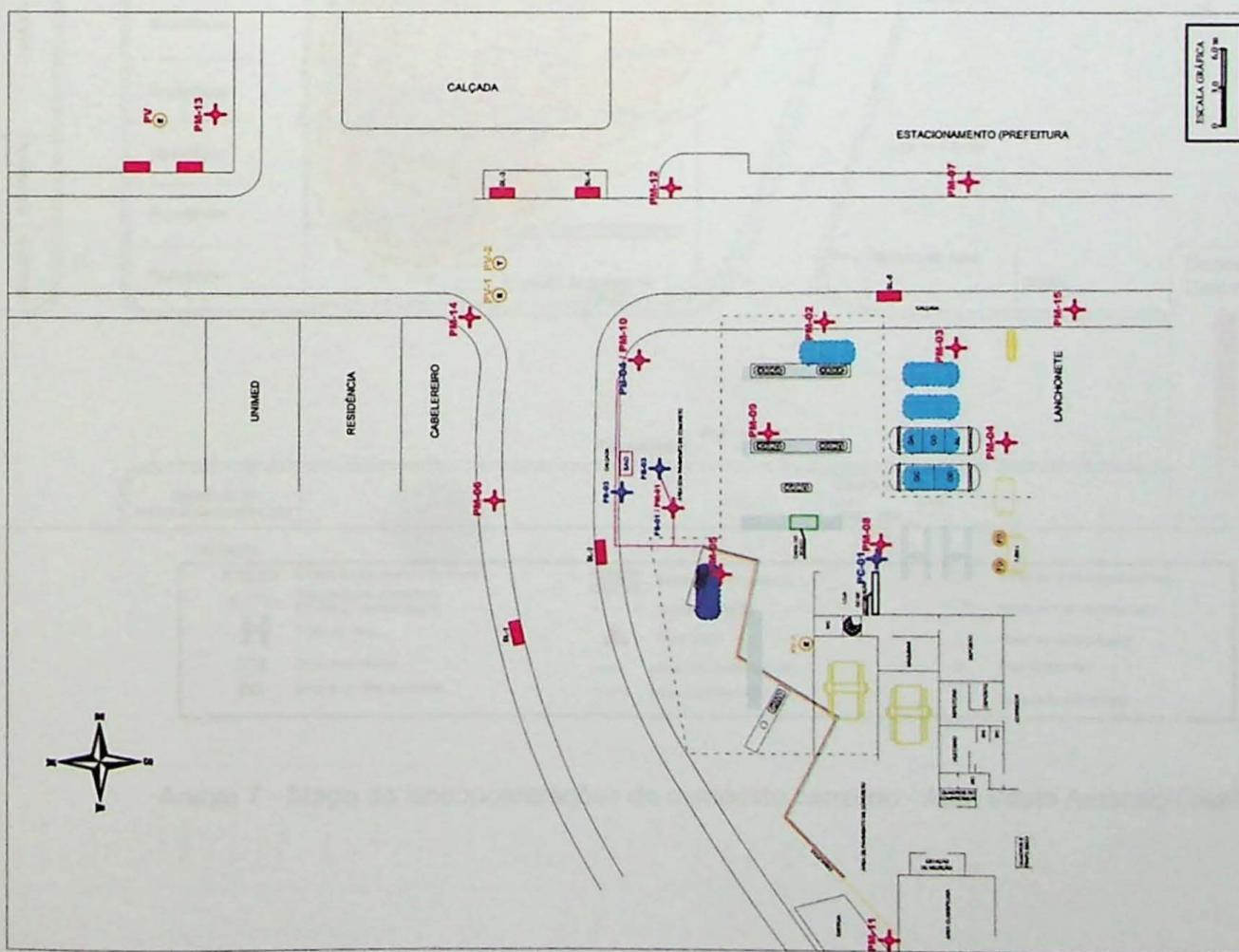




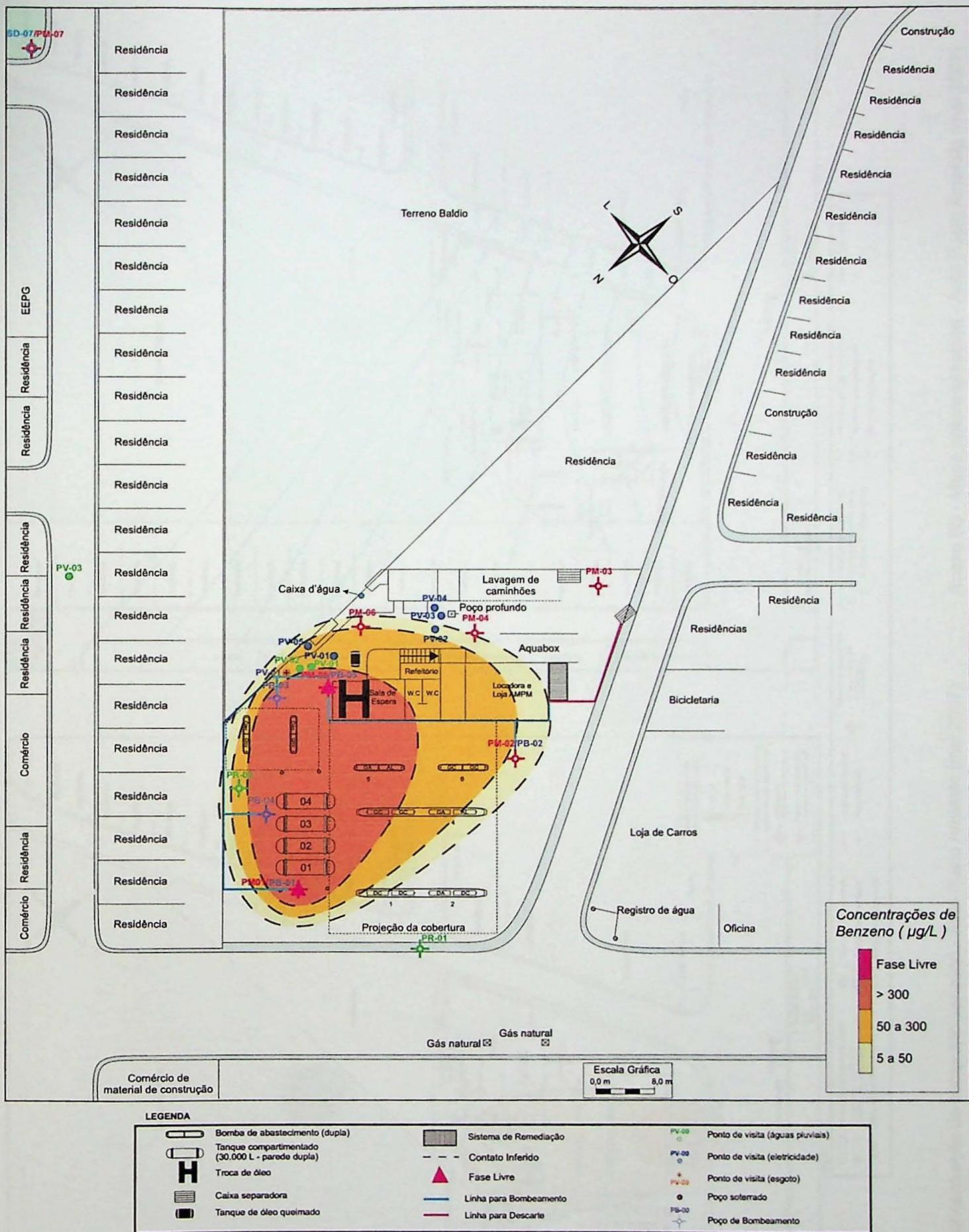
Anexo 5 - Instalações do Auto Posto Amarelo



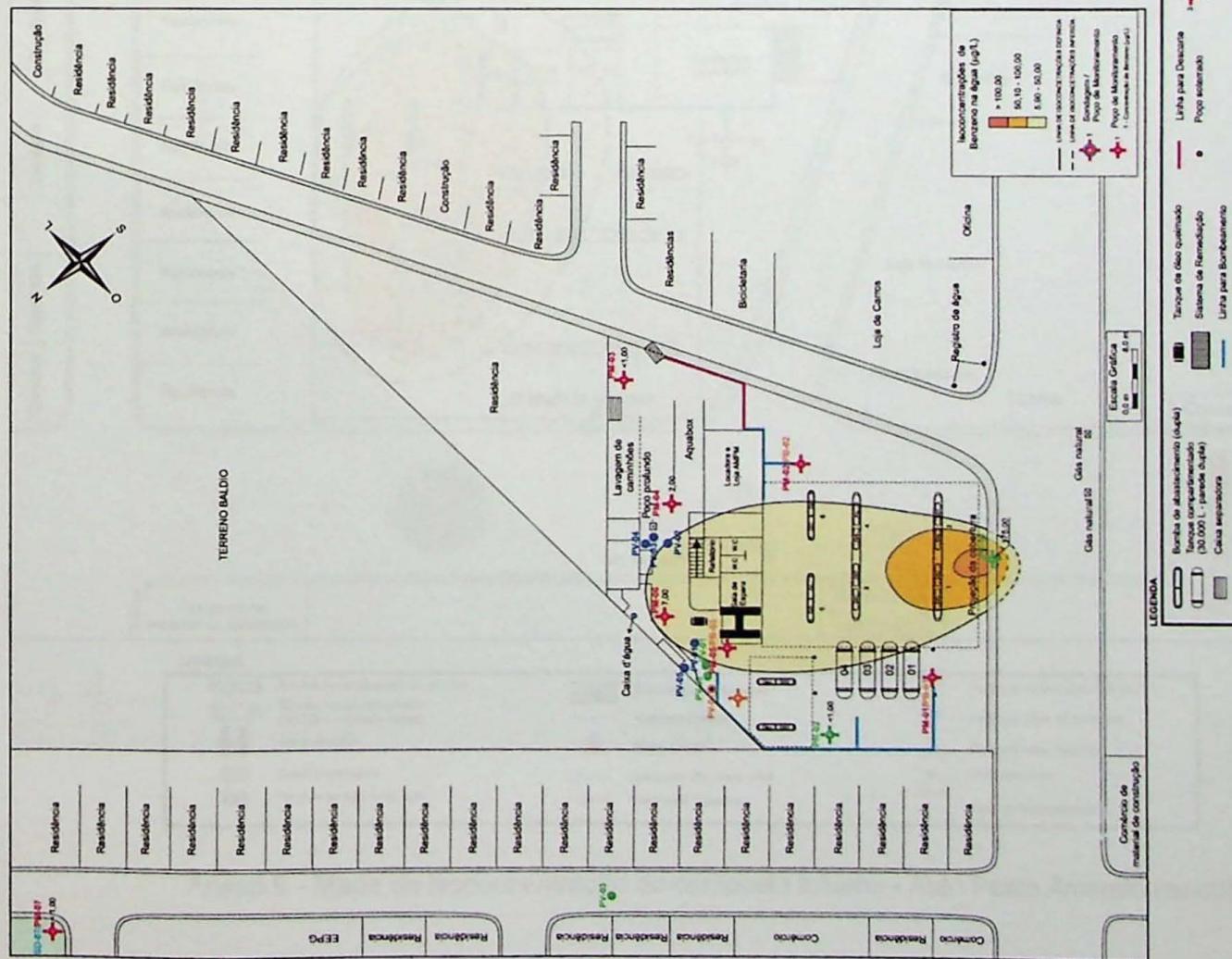
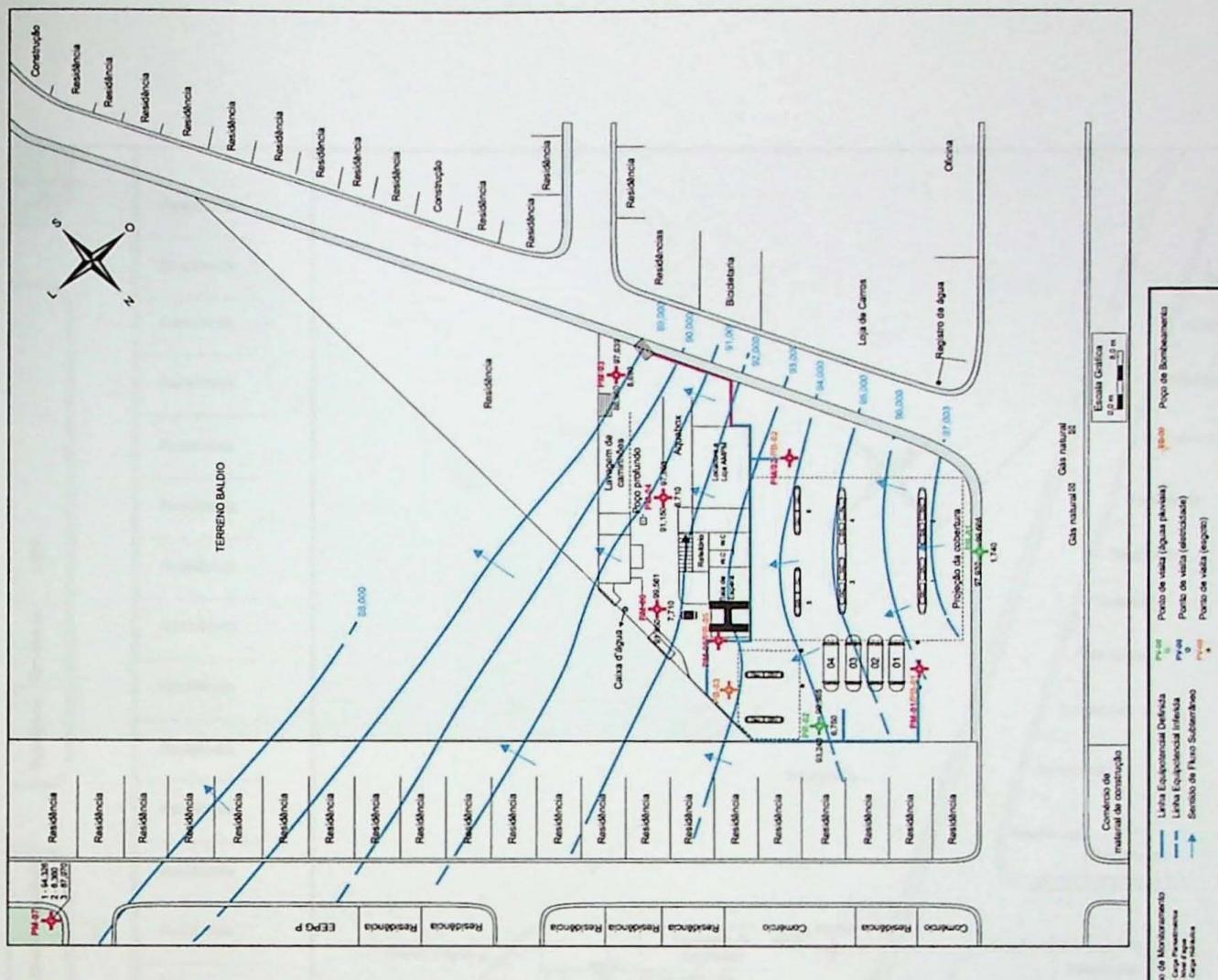
Anexo 6A - Instalações do Auto Posto Vermelho



Anexo 6B - Mapa potenciométrico - Auto Posto Vermelho (dez/06)

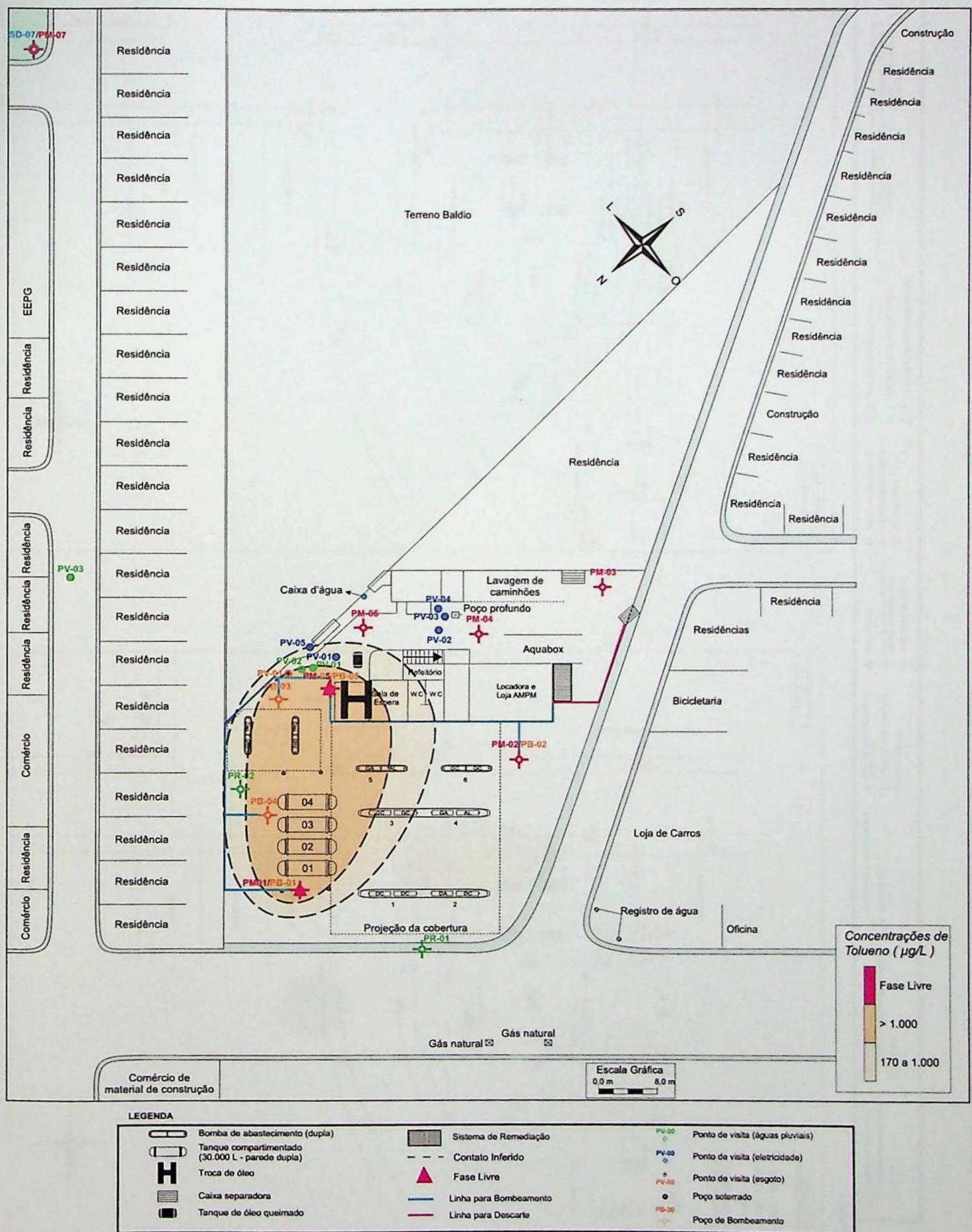


Anexo 7 - Mapa de isoconcentrações do composto benzeno - Auto Posto Amarelo (dez/06)

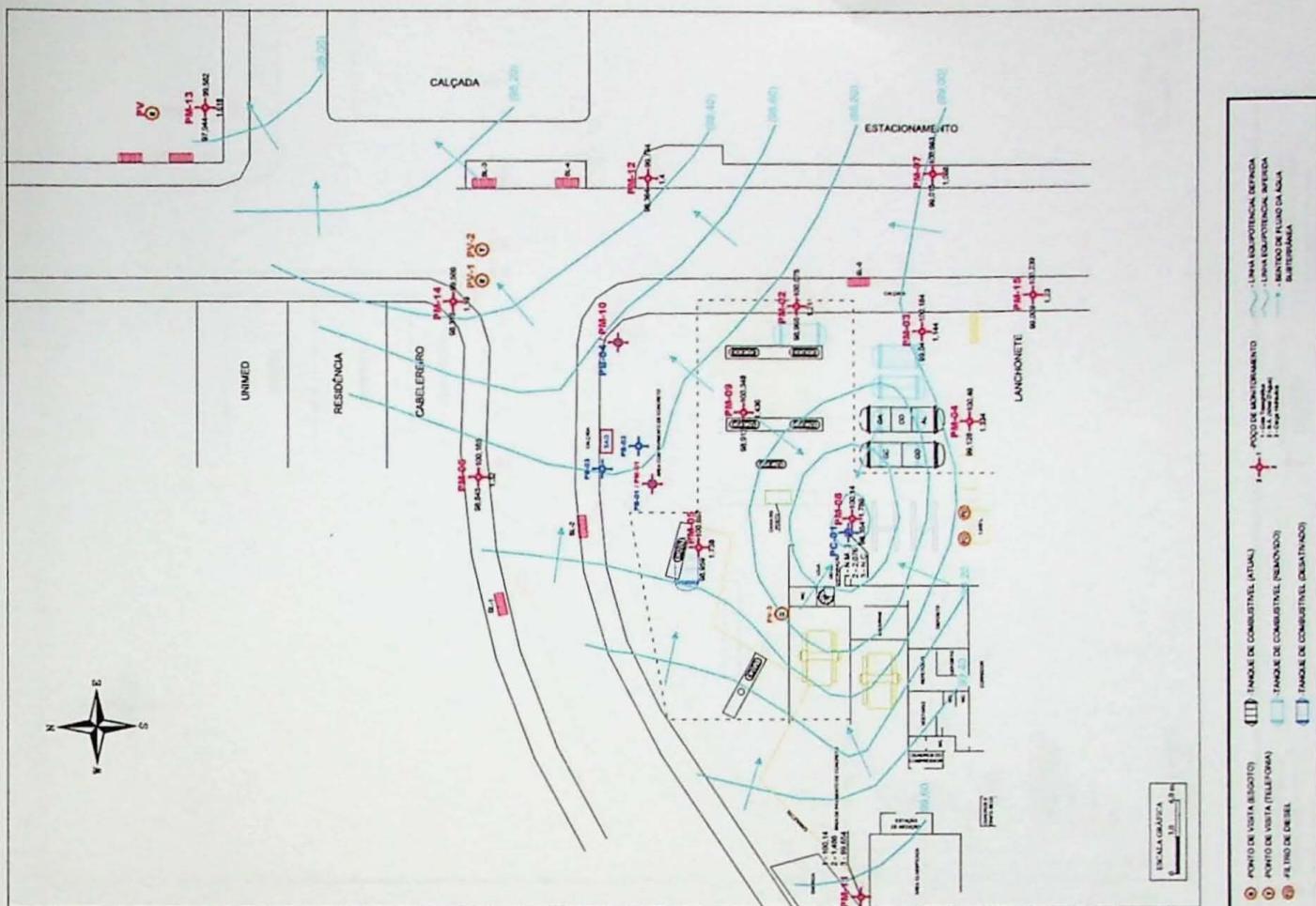


Anexo 8A - Mapa de isococoncentração do composto benzeno - Auto Posto Amarelo (maio 2007)

Anexo 8B - Mapa potenciométrico - Auto Posto Amarelo (maio 2007)

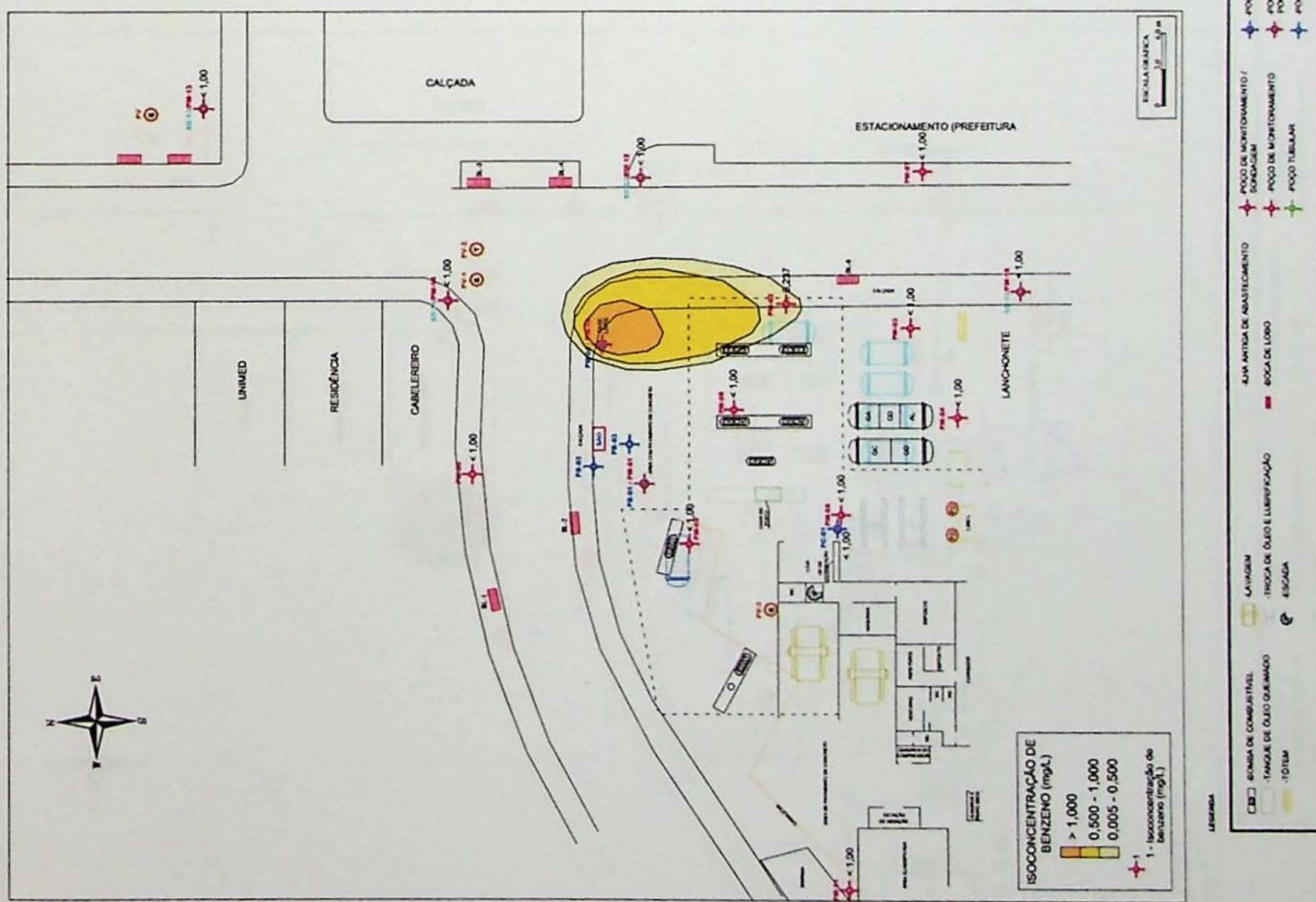


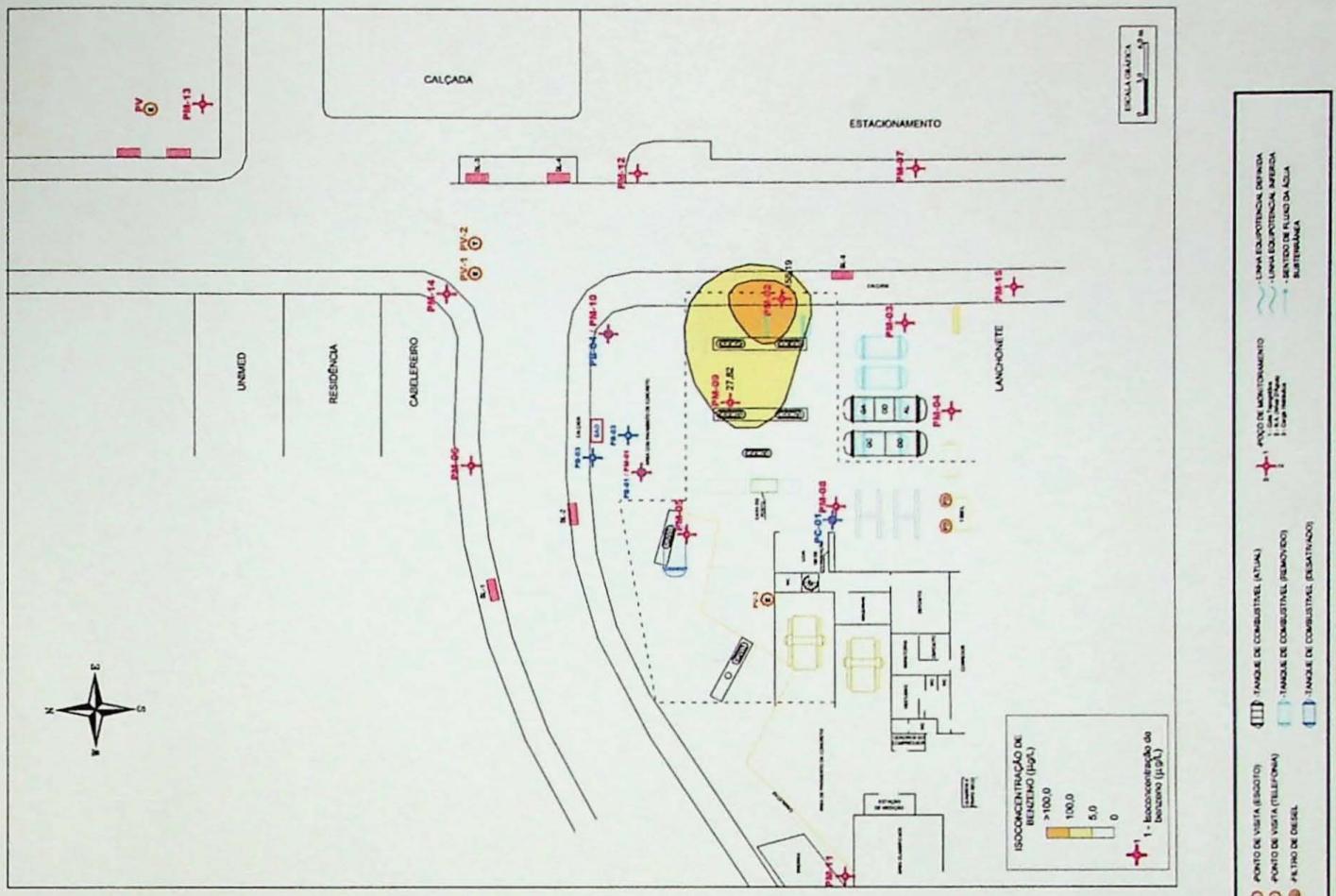
Anexo 9 - Mapa de isoconcentração do composto tolueno - Auto Posto Amarelo (nov/05)



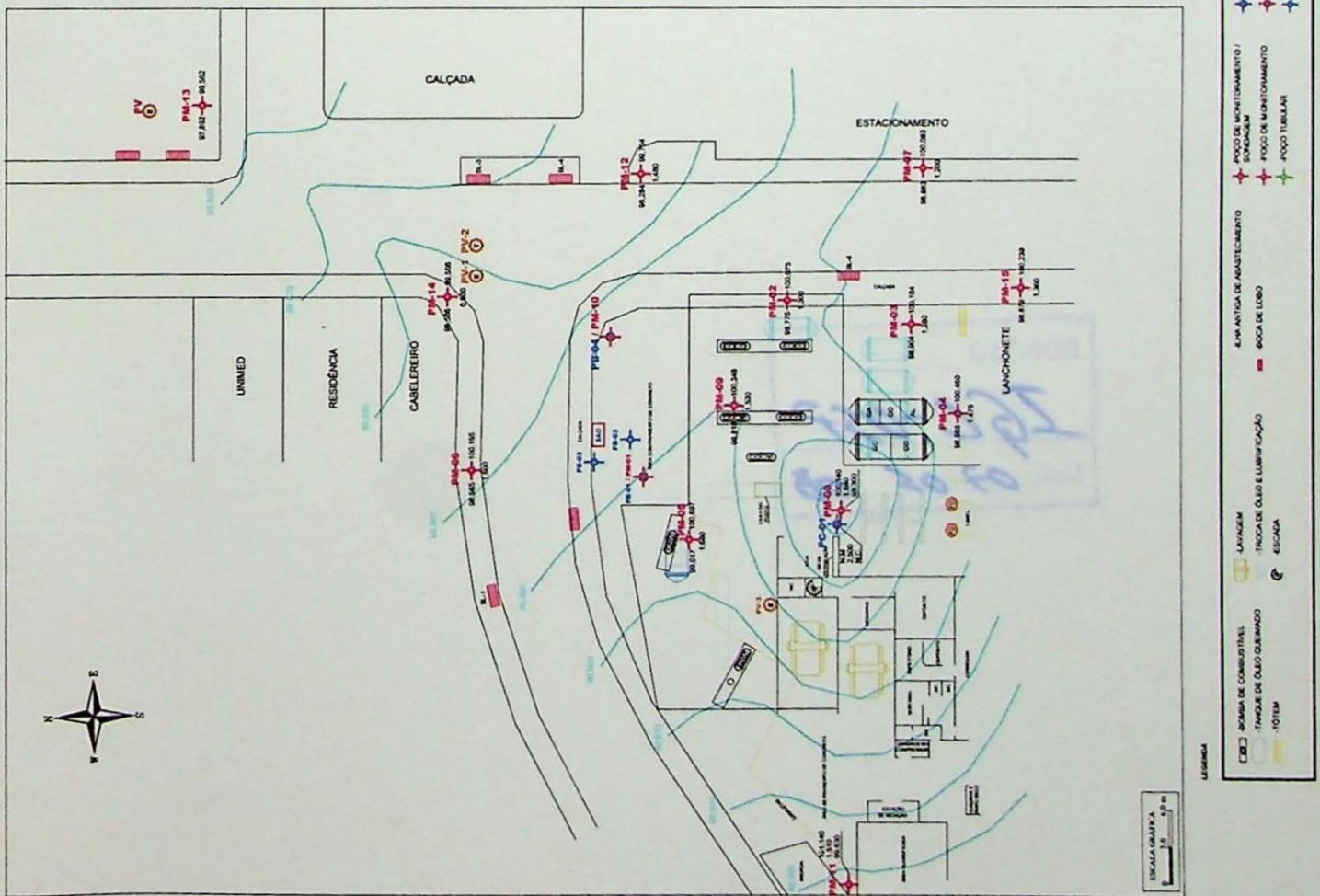
Anexo 10A- Mapa potenciométrico do Auto Posto Vermelho (nov 2006)

Anexo 10B- Mapa potenciométrico do Auto Posto Vermelho (nov 2006)





Anexo 11A- Mapa potenciométrico do Auto Posto Vermelho (mai 2007)



Anexo 11B- Mapa de isoconcentração do composto benzeno
Auto Posto Vermelho (mai 2007)

DOAÇÃO

IGC-OSP

Data: 02/05/08

