

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

CRISTIANE ERMANDINA DE FREITAS

A EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA - MPE EM ÁREAS
CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS

São Paulo

2024

A EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA (MPE) EM ÁREAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS

Versão Corrigida

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Lima

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

FREITAS, CRISTIANE ERMANDINA DE
A EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA (MPE) EM
ÁREAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS / C. E. D. FREITAS --
São Paulo, 2024.
47 p.

Monografia (MBA em MBA em Gestão de Áreas Contaminadas,
Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) - Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia
Química.

1.benzeno. remediação. eficiência. I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os meus professores da USP pelo compartilhamento do conhecimento por esses meses, agradeço meu grupo de estudo, Lorena da S. Alves Xavier, Marlon Barbosa e Polyana Luiz Rocha e à TECPAM que nos proporcionou o incentivo financeiro para que pudéssemos concluir esta etapa de formação.

RESUMO

FREITAS, Cristiane Ermandina. A Eficiência do Sistema de Extração Multifásica (MPE) em Áreas Contaminadas por Hidrocarbonetos. 2024. 47 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Este estudo visa analisar a eficiência de um sistema de extração multifásica (MPE) na remediação de uma área contaminada por hidrocarbonetos derivados do petróleo, com base nos resultados obtidos da investigação detalhada do passivo ambiental e dados da Avaliação de Risco à Saúde Humana. A eficácia do MPE depende das características físicas do solo, permeabilidade e natureza do contaminante. O sistema MPE combina técnicas de bioventilação e remoção de massa a vácuo, permitindo a extração de produtos em fase livre, de vapor e dissolvida no lençol freático e zona vadosa. Ao longo de um processo de remediação iniciado em 2.022 em uma área no Distrito Federal, este trabalho analisa dados operacionais e de monitoramento, destacando a eficiência do sistema MPE. A instalação do sistema foi precedida por uma investigação detalhada do passivo ambiental, conforme a NBR 15515/3. A análise dos dados históricos busca evidenciar a eficácia da remediação na área em estudo, considerando a criação de uma zona de influência para abranger a extensão da pluma de contaminação.

Palavras-chave: benzeno. remediação. eficiência.

ABSTRACT

FREITAS, Cristiane Ermandina. A Eficiência do Sistema de Extração Multifásica (MPE) em Áreas Contaminadas por Hidrocarbonetos. 2024. 47 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

This study aims to analyze the efficiency of a multiphase extraction system (MPE) in the remediation of an area contaminated by petroleum-derived hydrocarbons, based on the results obtained from the detailed investigation of the environmental liability and data from the Human Health Risk Assessment. The effectiveness of MPE depends on the physical characteristics of the soil, permeability and nature of the contaminant. The MPE system combines bioventilation and vacuum mass removal techniques, allowing the extraction of products in free, vapor and dissolved phases in the water table and vadose zone. Throughout a remediation process initiated in 2022 in an area in the Federal District, this work analyzes operational and monitoring data, highlighting the efficiency of the MPE system. The installation of the system was preceded by a detailed investigation of the environmental liability, in accordance with NBR 15515/3. The analysis of historical data seeks to highlight the effectiveness of remediation in the area under study, considering the creation of a zone of influence to cover the extent of the contamination plume.

Keywords: benzene. remediation. efficiency

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 OBJETIVOS.....	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1. HIDROCARBONETOS DERIVADOS DO PETRÓLEO: UTILIZAÇÃO E IMPACTOS AMBIENTAIS	11
3.2 NORMAS E LEGISLAÇÃO	13
3.3 LEGISLAÇÕES PERTINENTES.....	15
3.4 TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS	
3.5 EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA (MPE).....	22
3.6 RELAÇÃO ENTRE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E EFICIÊNCIA DA REMEDIAÇÃO FÍSICA.....	25
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO	28
5.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E HIDROGEOLOGICA	28
5.3 HISTORICOS DE INVESTIGAÇÃO	28
5.4 ENSAIO PILOTO	31
5.5 INSTALAÇÃO E OPERAÇÃO DA REMEDIAÇÃO	34
5.6 RESULTADOS E EFICIÊNCIA DO SISTEMA MPE	36
5.7 INFLUENCIA DA VARIAÇÃO DA CARGA PLUVIOMÉTRICA.....	39
6. CONCLUSÕES.....	43
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Quantidade de técnicas aplicadas em áreas contaminadas no Estado de São Paulo	21
Figura 2 – Quantidade de técnicas aplicadas em áreas contaminadas no Estado de São Paulo	22
Figura 3 – <i>Layout</i> de um sistema MPE.	24
Figura 4 –Diagrama da Lei de Darcy	25
Figura 5 – Fluxograma de gerenciamento de áreas contaminadas	30
Figura 6 – Pluma de fase livre	31
Figura 7 – Locação dos poços	32
Figura 8 – Gráfico de rebaixamento do lençol freático em função do bombeamento.....	34
Figura 9 – Localização dos poços de extração, raio de influência e sentido do fluxo	35
Figura 10 – Pluma de fase retida de benzeno.	36
Figura 11 – Gráfico de remoção de fase livre do ano de 2022.....	37
Figura 12 – Gráfico de remoção de fase livre do ano de 2023.....	37
Figura 13 – Pluma de fase dissolvida	38
Figura 14 – Pluma de fase dissolvida com a redução das concentrações.....	39
Figura 15 – Variação da precipitação do Distrito Federal nos últimos 30 anos.....	40
Figura 16 – Carga pluviométrica e movimentação do nível do lençol freático.....	41
Figura 18 – Série histórica das concentrações de BTEX e PAH.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas e químicas dos compostos BTEX.....	13
Tabela 2 - Concentrações máximas de permitidas no solo e água subterrânea.....	16
Tabela 3 - Concentrações máximas de permitidas no solo.....	17
Tabela 4 - Concentrações máximas de BTEX permitidas na água subterrânea.	17
Tabela 5 - Especificações construtivas dos poços	32
Tabela 6 - Níveis de água estáticos	33

1 INTRODUÇÃO

A remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos tornou-se um assunto relevante no Brasil após a publicação da Resolução CONAMA 273, em 29 de novembro de 2000. A escolha da técnica adequada para intervir em uma área contaminada por hidrocarbonetos derivados do petróleo deve ser feita com base nos resultados de uma investigação de passivo ambiental detalhada e Avaliação de risco a saúde humana. Dentre os compostos derivados do petróleo e utilizados na produção de combustíveis, de acordo com a Fundação Osvaldo Cruz (FIOCRUZ), o mais prejudicial à saúde humana é o Benzeno, principalmente pela sua maior relevância toxicológica, além de estar inserido na lista da Agência Internacional de Pesquisa do Câncer (IARC) como uma substância reconhecidamente carcinogênica (grupo 1A).

A eficiência do sistema de remediação depende de características físicas do solo, notadamente a sua permeabilidade, bem como das características do contaminante. Em caso de ocorrência de vazamentos de altas proporções, os hidrocarbonetos em fase líquida podem eventualmente atingir o lençol freático como fase imiscível, migrar lateralmente dando início ao processo de partição dos compostos orgânicos no aquífero. Ao passar de algum tempo as plumas de fase dissolvida migram em função do fluxo natural do lençol freático podendo sofrer um processo atenuação natural por meio de processos biológicos. Os compostos mais solúveis são dissolvidos de forma mais rápida, deixando como composição residual apenas os compostos de baixa solubilidade e com maior viscosidade.

O sistema MPE combina as técnicas de bioventilação e remoção de massa a vácuo, o que possibilita a extração de produto imiscível em fase livre, fase de vapor e fase dissolvida no lençol freático e também na zona vadosa a depender do perfil do poço de extração e estimula também o processo de biodegradação natural na zona não saturada.

O foco do trabalho é a análise de um caso concreto de área contaminada por hidrocarbonetos oriundos dos combustíveis, localizada no Distrito Federal, em que foi implantado um sistema de remediação via extração multifase no período de janeiro de 2022 à março de 2023. Anteriormente, esta área foi submetida à diversos estudos de diagnósticos ambientais no período de 2005 à 2021, culminando com uma investigação de passivo ambiental detalhada feita em conformidade com a NBR 15515/3.

A Extração Multifásica ocorreu 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 em fase livre, dissolvida e de vapor. O sistema foi dimensionado após ter sido realizado o ensaio piloto na área de interesse.

Existe um histórico significativo de dados operacionais e de monitoramento coletados ao longo do período que envolve o diagnóstico e remediação da área em estudo. O presente trabalho propõe uma análise desses dados que permitam evidenciar a eficiência desse processo.

2 OBJETIVOS

O objetivo desta tese é fazer uma análise dos dados históricos operacionais existentes ao longo de 15 meses de operação de sistema de extração multifásica, em um caso concreto, buscando evidenciar a eficiência da remediação da área de estudo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. HIDROCARBONETOS DERIVADOS DO PETRÓLEO: UTILIZAÇÃO E IMPACTOS AMBIENTAIS

O comportamento dos hidrocarbonetos derivados do petróleo no solo é influenciado por diferentes fatores, que incluem as propriedades químicas, físicas e mineralógicas do solo e fatores ambientais, temperatura e precipitação (FATORELI, 2005). No solo, os componentes voláteis, como o benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (BTEX), podem ser volatilizados para a fase gasosa podendo ser perdidos para a atmosfera, ou adsorvidos nas partículas sólidas dos solos, ou dissolvidos na solução do solo ou na água subterrânea (FERREIRA, 2003).

A mobilidade dos hidrocarbonetos no solo é definida em função das suas características físicas e químicas como a massa molar, a solubilidade, a polaridade, a densidade, viscosidade e os coeficientes de distribuição. O peso molecular afeta a densidade e a solubilidade do composto orgânico em água, sendo que a solubilidade e a viscosidade têm grande influência na distribuição dos contaminantes para a água subterrânea (DONAIRE, 2007).

Os hidrocarbonetos, quando liberados no ambiente, têm sua composição alterada por causa da biodegradação, à dissolução em água e a volatilização, devendo-se levar em consideração o

impacto do tempo destes derivados. Em geral, a mistura residual 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 (WILLIAMS et al., 2006).

Conforme PEDE (2009), os compostos derivados de petróleo formam uma fase imiscível não aquosa mais leve, denominada pela literatura internacional como LNAPL (*light non-aqueous phase liquid*). O autor indica que o entendimento do comportamento em subsuperfície dos hidrocarbonetos, em conjunto com as características hidrogeológicas do meio, permite estabelecer parâmetros necessários à remediação e ao monitoramento de uma área impactada por hidrocarbonetos.

A variação do Nível da Água do lençol freático de acordo com ISLER et al 2009, provoca o trapeamento no solo em áreas contaminadas por LNAPL na porção saturada do meio e na zona vadosa, causada pela flutuação sazonal do nível freático do aquífero local. Ter conhecimento e controle sobre esta sazonalidade é fundamental para o planejamento de sistemas de remediação e do regime ou janela de operação que considere a sazonalidade de trapeamento e destrapeamento de contaminante.

A gasolina é um dos combustíveis que contém maior concentração de benzeno em sua composição, sendo ela também um dos mais importantes produtos derivados do petróleo, e que é obtida a partir dos processos de refino, sendo o segundo combustível mais consumido no Brasil, perdendo apenas para o óleo diesel. É um combustível líquido, volátil e inflamável, constituído por mais de 400 diferentes compostos, cuja composição final depende da origem do petróleo e dos processos de produção (ANP, 2023).

A composição química dos hidrocarbonetos presentes na gasolina pertencem principalmente às classes das parafinas (normal e ramificado), olefinas, naftenos e aromáticos, e em menores quantidades, por compostos oxigenados, formados basicamente por moléculas com cadeias de 4 a 12 átomos de carbono, com pontos de ebulição variando entre 30 a 220°C. Além dos hidrocarbonetos, a gasolina também possui contaminantes tóxicos naturais em baixas concentrações, formados por compostos contendo enxofre, oxigênio, benzeno, metais e nitrogênio (ANP, 2023).

Os hidrocarbonetos aromáticos são geralmente mais tóxicos que os compostos alifáticos. Além disso, os aromáticos possuem maior mobilidade em água, pois sua solubilidade é da ordem de três a cinco vezes maior, além de possuírem maior facilidade de volatilização, apresentando risco de contaminação também por inalação de vapores (SCHWARZENBACH, 1993).

De acordo com GREGORCZIK e PICCIONI (2011 apud SCHWARZENBACH, 1993), os compostos de maior interesse são os denominados BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos), pois são os de maior toxicidade e mobilidade na subsuperfície devido, principalmente, às suas características físicas e químicas. A Tabela 1 demonstra um sumário das propriedades físicas e químicas dos BTEX.

Tabela 1 - Propriedades físicas e químicas dos compostos BTEX

Composto	Densidade (g/cm ³)	Solubilidade em água (mg/L)	Pressão de Vapor (mm Hg)	Constante da Lei de Henry (atm·m ³ /mol)	Polaridade
Benzeno	0,876	1780	76	5,43.10 ³	APOLAR
Etilbenzeno	0,867	152	7	7,90.10 ³	APOLAR
Tolueno	0,867	515	22	6,61.10 ³	APOLAR
m-Xileno	0,864	200	9	6,91.10 ³	APOLAR
o-Xileno	0,88	170	7	4,94.10 ³	APOLAR
p-Xileno	0,861	198	9	7,01.10 ³	APOLAR

Fonte: Adaptado de USEPA (1995).

As contaminações do lençol freático e dos solos representam graves problemas à saúde humana. Os maiores problemas das contaminações por hidrocarbonetos monoaromáticos (BTEX), que são os componentes mais solúveis e mais móveis da fração da gasolina. De acordo com SILVA 2005, esses compostos causam danos no sistema nervoso central, e podem apresentar toxicidade crônica, mesmo em concentrações mínimas de partículas por bilhão e, destes, o benzeno é considerado o mais tóxico, por ser comprovadamente cancerígeno.

3.2 NORMAS E LEGISLAÇÃO

No que tange à riscos ao meio ambiente e às pessoas, por conta de derrames e/ou vazamentos de combustíveis, medidas operacionais corretivas ou de gerenciamento devem ser adotadas nestas áreas objetivando diminuir seus efeitos para um patamar aceitável ou, até mesmos, elimina-los totalmente. Para a atividade de revenda de combustíveis, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) elaborou e aprovou a NBR 15.594/2023 que estabelece os procedimentos mínimos para uma operação segura e ambientalmente adequada de postos de

combustíveis, incluindo a capacitação da equipe, prevendo a elaboração do Plano de Operação no que se refere à descarga, controle de estoque e abastecimento dos veículos de forma segura (ABNT, 2023).

O Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), subsidiado por estudos que confirmaram o poder da nocividade do benzeno ao ser humano, determinou, através da Portaria nº 1109/2016, procedimentos a serem adotados para proteger a saúde das pessoas que trabalham em áreas que operam com combustíveis, que são regulados pela Norma Regulamentadora (NR) nº 9. Esta Norma estabelece a obrigatoriedade da elaboração e implementação, por parte de todos os empregadores e instituições que admitam trabalhadores como empregados, do Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA), visando à preservação da saúde e da integridade dos trabalhadores, através da antecipação, reconhecimento, avaliação e consequente controle da ocorrência de riscos ambientais existentes ou que venham a existir no ambiente de trabalho, tendo em consideração a proteção do meio ambiente e dos recursos naturais (BRASIL, 2016).

De acordo com a Decisão da Diretoria (DD) 038 da CETESB, o gerenciamento de áreas contaminadas tem como objetivo:

Reduzir, para níveis aceitáveis, os riscos a que estão sujeitos a população e o meio ambiente em decorrência de exposição às substâncias provenientes de áreas contaminadas, por meio de um conjunto de medidas que assegurem o conhecimento das características dessas áreas e dos riscos e danos decorrentes da contaminação, proporcionando os instrumentos necessários à tomada de decisão quanto às formas de intervenção mais adequadas (CETESB, 2017).

No Distrito Federal, o órgão ambiental responsável pelo licenciamento ambiental é o Instituto Brasília Ambiental (IBRAM). O IBRAM foi criado em maio de 2007 pela Lei 3.984/2007 com o objetivo de ser o órgão que executaria as políticas públicas ambientais e de recursos hídricos no Distrito Federal. Trata-se de uma autarquia vinculada à Secretaria de Estado do Meio Ambiente (Sema) do Distrito Federal. O gerenciamento de áreas contaminadas no IBRAM é feito pela Superintendência de Fiscalização, Auditoria e Monitoramento Ambiental (SUFAM).

Já no estado de São Paulo, conforme o relatório de gerenciamento de áreas contaminadas emitido pela CETESB, a maior parte das áreas contaminadas cadastradas foram contaminadas por consequência de atividades de postos de combustíveis (CETESB, 2018), conforme a **Figura 1**, que mostra a proporcionalidade das áreas contaminadas no estado de São Paulo, de acordo com as atividades.

Ainda sobre as instalações de um posto revendedor de combustíveis convencional que tem tanques, periféricos e tubulações subterrâneas, estas devem ser construídas seguindo as orientações da ABNT 16.764 publicada em sua segunda revisão em 22 de junho de 2022, com o título de: Armazenamento de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis – Instalação dos componentes do Sistema de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis (SASC). Óleo Lubrificantes usado e Contaminado e ARLA 32. Na referida NBR são citados todos os componentes a serem instalados para que possam prevenir contaminação ambiental em seus itens 8.4.2, 8.4.3, 8.4.4, 8.4.5, 8.4.6, 8.4.7, no item 8.5 e também nos itens 8.6.4, 8.15, 8.17, 8.18, 8.19, 8.21, além do item 9 que especifica os ensaios a serem realizados de forma a prevenir infiltrações e/ou vazamentos no SASC instalado.

3.3 LEGISLAÇÕES PERTINENTES

A presença de compostos derivados do petróleo em águas, conforme já mencionado, pode ser extremamente prejudicial à saúde humana e ao meio ambiente. Nesse sentido, é importante o estabelecimento de padrões de qualidade referentes a essas substâncias. A Portaria de Consolidação N° 5, de 2017 do Ministério da Saúde que estabelece normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde, em seu Anexo XX, intitulado “Do Controle e da Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano Seu Padrão de Potabilidade” (BRASIL, 2017), dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Para o composto benzeno, na referida portaria, o limite de aceitação é de 5 µg/L (micrograma por litro), assim como na Resolução CONAMA n° 420/2009.

De acordo com TECPAM (2023), sete em cada dez postos revendedores de combustíveis possuem, até por questões de custos, poço tubular perfurado em suas dependências, ou seja, fazem uso da água subterrânea, o que exige maior segurança e controle ambiental para a área.

A Resolução CONAMA n° 420/2009, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas (BRASIL, 2009), é a base de referência adotada nacionalmente para classificar uma área como contaminada, ou não, após obtenção dos resultados de uma investigação confirmatória. Cabe ressaltar que uma investigação de passivo ambiental

confirmatória deve ser realizada em fiel atendimento aos procedimentos determinados na NBR 15.515-2, de 2023 (ABNT, 2023).

A **Tabela 2** apresenta as concentrações máximas de BTEX e PAH permitidas, de acordo com o uso do solo, determinadas na Resolução CONAMA nº 420/2009.

Tabela 2 - Concentrações máximas de permitidas no solo e água subterrânea

Substâncias	CAS nº	Solo (mg.kg-1 de peso seco) (1)					Água Subterrânea (µg.L-1)
		Referência de qualidade	Prevenção	Investigação			Investigação
				Agrícola APMáx	Residencial	Industrial	
Hidrocarbonetos aromáticos voláteis							
Benzeno	71-43-2	na	0,03	0,06	0,08	0,15	5*
Estireno	100-42-5	na	0,2	15	35	80	20*
Etilbenzeno	100-41-4	na	6,2	35	40	95	300**
Tolueno	108-88-3	na	0,14	30	30	75	700**
Xilenos	1330-20-7	na	0,13	25	30	70	500**
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos							
Antraceno	07/12/20	na	0,039	-	-	-	-
Benzo(a)antraceno	56-55-3	na	0,025	9	20	65	1,75
Benzo(k)fluoranteno	207-06-9	na	0,38	-	-	-	-
Benzo(g,h,i)perileno	191-24-2	na	0,57	-	-	-	-
Benzo(a)pireno	50-32-8	na	0,052	0,4	1,5	3,5	0,7*
Criseno	218-01-9	na	8,1	-	-	-	-
Dibenzo(a,h)antraceno	53-70-3	na	0,08	0,15	0,6	1,3	0,18
Fenantreno	85-01-8	na	3,3	15	40	95	140
Indeno(1,2,3-c,d)pireno	193-39-5	na	0,031	2	25	130	0,17
Naftaleno	91-20-3	na	0,12	30	60	90	140

na – não se aplica para substâncias orgânicas

* Padrões de potabilidade de substâncias químicas que representam risco à saúde DEFINIDOS NA Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde (Tabela 3).

** Valores calculados com base em risco à saúde humana, de acordo com o escopo desta Resolução. Diferem dos padrões de aceitação para consumo humano definidos na Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde (Tabela 05) e dos valores máximos permitidos par consumo humano definidos no anexo I da Resolução CONAMA Nº 396/2008.

Fonte: Adaptado de CONAMA 420 (2009)

Especificamente em áreas contaminadas por hidrocarbonetos derivados do petróleo, os principais indicadores analisados são os compostos orgânicos benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (BTEX), Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (PAH) e os Hidrocarbonetos totais de Petróleo (TPH), em áreas onde se armazena e revende combustíveis, realizam troca de óleo, lubrificação e/ou em área de lavagem de veículos. Os compostos de TPH não têm parâmetros de referência nacional, sendo os seus resultados comparados à Lista Holandesa que, assim como a Resolução nº CONAMA 420/2009, é a tabela de referência naquele país, quando necessário (BRASIL, 2009).

As **Tabelas 3 e 4** apresentam uma comparação entre as concentrações máximas de BTEX determinadas na Resolução CONAMA nº 420/2009 e a Lista Holandesa para solo e água subterrânea.

Tabela 3 - Concentrações máximas de permitidas no solo

SUBSTÂNCIA	CONAMA 420/09 (mg/kg)	LISTA HOLANDESA (mg/kg)
Benzeno	0,15	1
Etilbenzeno	75	130
Tolueno	95	50
m-Xileno	70	25
TPH	NR	10

Fonte: Adaptado de Brasil (2009) e TECPAM (2023)

NR: Não referenciado

Tabela 4 - Concentrações máximas de BTEX permitidas na água subterrânea.

SUBSTÂNCIA	CONAMA 420/09 (µg/L)	LISTA HOLANDESA – (µg/L)
Benzeno	5	30
Etilbenzeno	700	1000
Tolueno	300	150
m-Xileno	500	70
TPH	NR	50

Fonte: Adaptado de Brasil (2009)

NR: Não referenciado

A referência nacional para os parâmetros de TPH atualmente são seguidas pela tabela da CETESB que, em sua planilha de avaliação de risco, define cenários de exposição para diferentes faixas de Carbono do TPH Fracionado (CETESB 2023).

O gerenciamento de áreas contaminadas por hidrocarbonetos derivados do petróleo no Brasil tem atualmente como referência técnica os procedimentos adotados pela CETESB, definidas no documento técnico Decisão da Diretoria 038, de 2017, que dispõe sobre os “Procedimentos para a Proteção da Qualidade do Solo e das Águas Subterrâneas”, revisa o “Procedimento para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas” e estabelece “Diretrizes para Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Âmbito do Licenciamento Ambiental”, em função da publicação da Lei Estadual nº 13.577/2009 e seu Regulamento, aprovado por meio do Decreto nº 59.263/2013, e dá outras providências (CETESB, 2017).

Os procedimentos para Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC) no Distrito Federal estão definidos na Instrução Normativa IBRAM Nº 28, de 11/08/2020 e se embasaram no CONAMA 420 e em normas técnicas da ABNT.

No Estado de Goiás o regimento do processo de licenciamento de postos de combustíveis está disposto na Resolução CEMAm Nº 29/2018, que define os critérios e procedimentos relativos ao licenciamento ambiental, renovação, instalação e/ou reforma de Ponto de Abastecimento, Posto Revendedor e Sistema Retalhista de Combustíveis.

A DD 038/2017 da CETESB determina procedimentos para gerenciamento de áreas contaminadas independente do contaminante, não sendo específica para áreas contaminadas por hidrocarbonetos. Em seu Anexo I discorre os procedimentos para proteção da qualidade do solo e das águas subterrâneas, no Anexo II, os procedimentos para gerenciamento de áreas contaminadas e seu Anexo III apresenta as diretrizes para gerenciamento das áreas contaminadas no âmbito do processo de licenciamento ambiental no estado de São Paulo.

A NBR 15515-3/2013 da ABNT estabelece procedimentos mínimos para realização de investigação ambiental detalhada em áreas que foram confirmadas a existência de contaminação do solo e/ou das águas subterrâneas.

Em uma área já diagnosticada como contaminada por hidrocarbonetos oriundos dos combustíveis, o principal meio de gestão ambiental usado para definir a técnica e/ou um sistema de remediação é a Avaliação de Risco à Saúde Humana, que possibilita determinar os níveis de riscos e os índices de perigo a que um receptor específico, assim como um grupo de receptores, estaria sujeito, possibilitando, desta forma, a tomada de decisões quanto à necessidade de

intervir, ou não, na área. A NBR 16209/2013 é a norma vigente que orienta os procedimentos de análise de riscos no Brasil. Basicamente, na elaboração da avaliação de risco à saúde humana, se houver presença de contaminantes em fase dissolvida, adsorvida no solo não saturado, no ar do solo e no ar ambiente, em concentrações acima de padrões legais aplicáveis, tem-se o cenário de risco. Também são definidas as concentrações máximas dos contaminantes, que irão garantir os índices de perigo ou os níveis de risco à saúde humana que serão aceitáveis. As Concentrações Máximas Aceitáveis (CMA) definem as metas ou concentrações alvo em um processo de remediação (ABNT, 2013).

Uma vez definido que a contaminação em uma área apresenta níveis acima da CMA, é necessária a intervenção no sentido de promover ações que irão diminuir as concentrações de hidrocarbonetos (medida de remediação) e/ou eliminar as vias de exposição (medidas de engenharia ou medidas institucionais). Após a definição das CMAs para a área em estudo, faz-se necessário a realização de um ensaio piloto que visa definir a melhor técnica e/ou as melhores técnicas de remediação. O ensaio piloto faz uso das informações de permeabilidade do solo, parâmetro de extrema importância para definição do raio de influência do sistema e, conseqüentemente, definir técnicas e quantidade de poços de extração, seja de vapor ou de fase dissolvida e até mesmo poços de injeção de ar ou de produtos químicos (oxidantes e/ou detergentes biodegradáveis), se esta for uma das opções de técnica de remediação (CETESB, 2017).

3.4 TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS

A remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos derivados do petróleo exige técnicas de alto custo operacional e que, por vezes, têm pouca eficiência se não forem bem dimensionadas, funcionando apenas como um método de contenção da contaminação. Mas diante de tamanhas exigências e cobranças feitas pelos órgãos reguladores, assim como pelos Ministérios Públicos Estaduais, que têm como objetivo preservar a segurança da população e preservar os seus direitos, os técnicos responsáveis por gerenciar uma área contaminada por estes compostos químicos têm buscado técnicas cada vez mais eficazes e seguras assim como técnicas que não resolvam um dano e que causem outros.

Basicamente os processos de remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos se dividem em três tipos de tecnologias a saber: *in situ*, *ex situ* e *on site*. Nas tecnologias *in situ*, o tratamento ocorre no local a ser remediado, sem movimentação do solo, enquanto que nas tecnologias *ex situ*, o material contaminado é removido por escavação de solo ou bombeamento da água, e nas técnicas *on site*, o tratamento é feito retirando a água ou solo contaminado, que será tratado em estações instaladas na área e, posteriormente, será devolvido ou não ao seu lugar de origem (BOOPATHY, 2000).

As medidas de intervenção a serem aplicadas devem ser definidas pelo Responsável Legal e Responsável Técnico, em função dos objetivos e estratégias estabelecidas através do Plano de Intervenção, que tem como objetivo avaliar a necessidade de adoção de medidas de intervenção, após análises da conclusão obtida na etapa de Avaliação de Riscos à saúde humana (CESTEB, 2017).

Segundo SANTOS (2008), para a determinação de ações e métodos de remediação para um local específico é preciso definir e esclarecer os seguintes pontos:

- Quais os contaminantes existentes na área?
- Qual o risco desta contaminação à saúde humana ou aos bens à proteger?
- Qual o objetivo a ser atingido com a técnica de remediação?
- Qual a melhor técnica de remedição?

Todos os questionamentos citados precisam ser detalhadamente respondidos para que seja elaborado um Plano de Intervenção eficaz. O plano de intervenção deve também seguir as diretrizes da NBR 16784/2020.

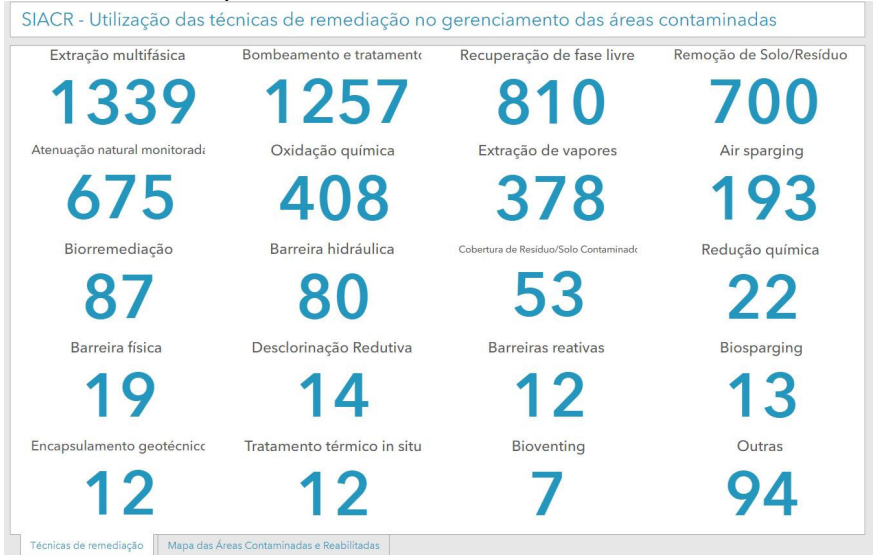
Ainda com base nessas premissas, os seguintes objetivos deverão ser adotados na elaboração do Plano de Intervenção: controlar as fontes de contaminação identificadas; atingir o nível de risco aceitável aos receptores humanos e/ou ecológicos identificados, assim como controlar os riscos identificados com base nos padrões legais aplicáveis (CETESB, 2017).

CETESB (2017) e Santos (2008) afirmam que várias são as técnicas disponíveis para intervir em uma área contaminada por hidrocarbonetos derivados de petróleo, onde pode-se citar: Extração Multifásica (MPE); Sistema *Pump - and - Treat* (bombeamento e tratamento);

Recuperação de fase livre; Extração de Vapores; Oxidação química; *Air Sparging*; Extração de vapor do solo (EVS); *Soil Flushing*; Biorremediação; Fitorremediação; entre outras. Todas as técnicas citadas são técnicas de remediação *in situ*.

Como ilustração do cenário regional de contaminações, na **Figura 1** são apresentadas as técnicas aplicadas em processos de remediação em áreas contaminadas no estado de São Paulo. É importante ressaltar que as técnicas descritas na figura não se referem exclusivamente a áreas contaminadas por hidrocarbonetos e foi utilizado o levantamento referente ao estado de São Paulo já que, a título de informação, não foram encontrados acompanhamento de casos similares para o estado de Goiás e no Distrito Federal. Pode-se observar na Figura 1 que as técnicas mais utilizadas são as de extração multifásica e bombeamento e tratamento.

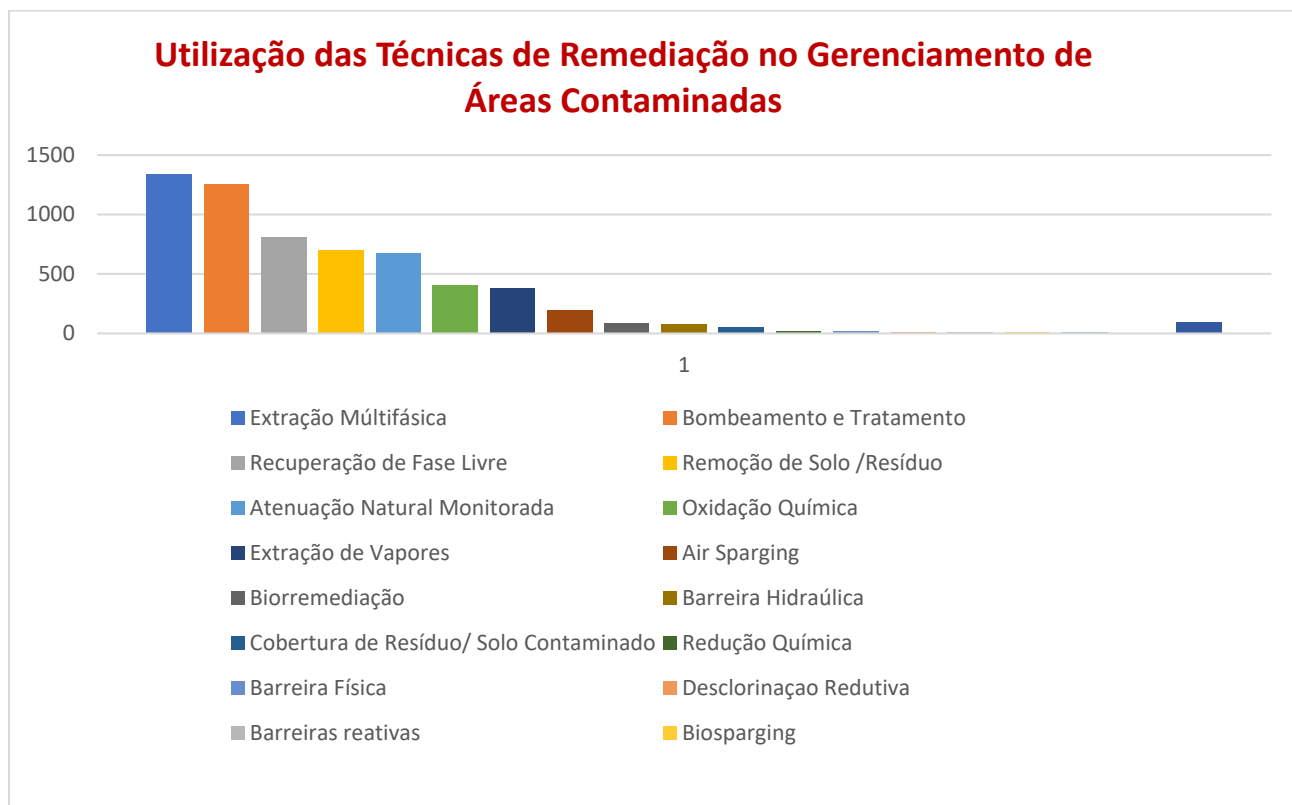
Figura 1 – Quantidade de técnicas aplicadas em áreas contaminadas no Estado de São Paulo



Fonte: CETESB (2023)

A **Figura 2** apresenta o quantitativo do quadro acima em forma de gráfico.

Figura 2 – Quantidade de técnicas aplicadas em áreas contaminadas no Estado de São Paulo



Fonte: Autor (2023).

3.5 EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA (MPE)

Os Sistemas de Remediação *Multi Phase Extracion* - MPE ou, Extração Multifásica, combinam as técnicas de bioventilação e remoção de massa a vácuo, o que possibilita a extração da fase livre (NAPL) ou fase imiscível na água, fase de vapor (Compostos Orgânicos Voláteis – COV) e fase dissolvida no lençol freático. O MPE estimula o processo de biodegradação natural na zona não saturada. Ele 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 (TECNOHIDRO, 2023).

Através da aplicação do vácuo nos poços de extração, cria-se um gradiente de pressão dirigido para estes pontos, de onde são extraídas as fases do contaminante (livre, vapor e dissolvida). 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, armazenando o combustível recuperado em tambores e direcionando a água contaminada para um tratamento

com filtro de carvão ativado, para posterior reinjeção, se assim for definido no Plano de Intervenção, ou para ser descartado na rede de esgoto ou em sumidouros, caso não haja atendimento de rede de esgoto na área (HIDROSUPRIMENTOS, 2023).

O vapor extraído no processo deverá ser direcionado para um sistema de carvão ativado e lançado na atmosfera. O vácuo aplicado no MPE provoca o movimento da fase de vapor ao longo dos poços de extração. Esse mesmo processo aumenta a disponibilidade de oxigênio na zona não saturada, que propicia a biodegradação aeróbia da fase residual de hidrocarbonetos derivados de petróleo. A remoção da fase dissolvida, através da sucção da água do lençol freático, arrasta a fase livre de hidrocarbonetos, como já citado. Necessariamente, um sistema MPE precisa constantemente de um operador para controlar o rebaixamento do lençol freático e manusear os equipamentos sempre que houver este rebaixamento, evitando que as bombas que trabalham submersas fiquem fora da água nos poços de extração (HIDROSUPRIMENTOS, 2023).

A **Figura 3** ilustra um *layout* de instalação e funcionamento de um sistema MPE, mostrando cada uma das etapas e dispositivos. O sistema MPE possui um dispositivo de regulação, que deve ser ajustado para intervalos de operação que otimizem a extração do contaminante da zona não saturada e do lençol freático. Essa estratégia possibilita o acompanhamento da extração da fase dissolvida, 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 (VOCs); pH; potencial de oxirredução; condutividade; volume recuperado de fase livre; nível d'água dos poços de monitoramento (NA) e espessura de fase livre (TECPAM, 2019).

Figura 3 –Layout de um sistema MPE.

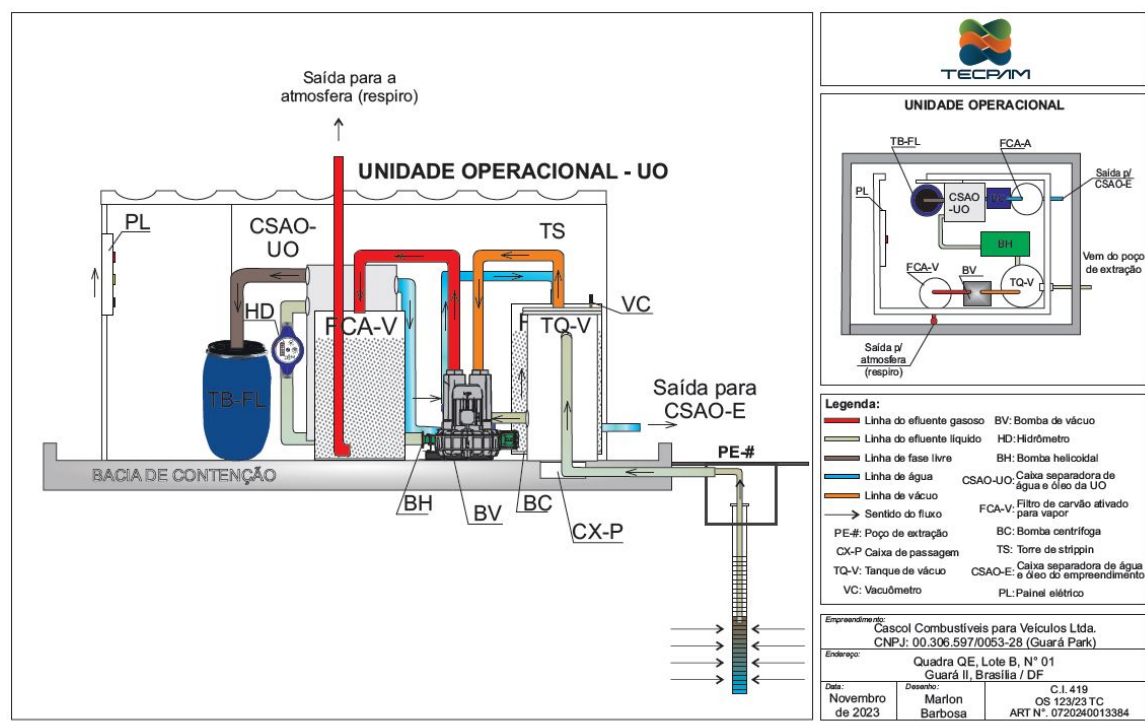


Figura 12 - Croqui esquemático da unidade operacional (vista lateral).

Fonte: TECPAM (2021)

A técnica descrita acima é a mais utilizada atualmente no Estado de São Paulo em áreas contaminadas por hidrocarbonetos derivados do petróleo. A CETESB, um dos poucos órgãos que promovem o gerenciamento das áreas contaminadas através de um cadastramento e tem um acompanhamento metódico da evolução dos casos, apresentou em seu Relatório de Áreas Contaminadas, em dezembro de 2018, que dos 4.593 casos de contaminação por combustíveis registrados, existem 1.339 sistemas que usam ou usaram a técnica do MPE, conforme já observado anteriormente na Figura 2 (CETESB, 2023).

As ações relativas ao gerenciamento de áreas contaminadas por hidrocarbonetos são realizadas como resultado da mobilização de diversos setores da sociedade, com participação efetiva dos órgãos responsáveis pela proteção do meio ambiente, saúde, recursos hídricos e planejamento urbano em níveis estaduais e municipais. Em decorrência dessa mobilização e do gerenciamento adequado, os problemas atualmente existentes poderão ser solucionados ou mesmo transformados em ações de incentivo ao desenvolvimento econômico e à geração de empregos. O sucesso de um programa de gerenciamento de áreas contaminadas, que já demonstram resultados bastante positivos em todo o país, depende do engajamento das empresas que apresentam potencial de contaminação, dos investidores, dos agentes financeiros,

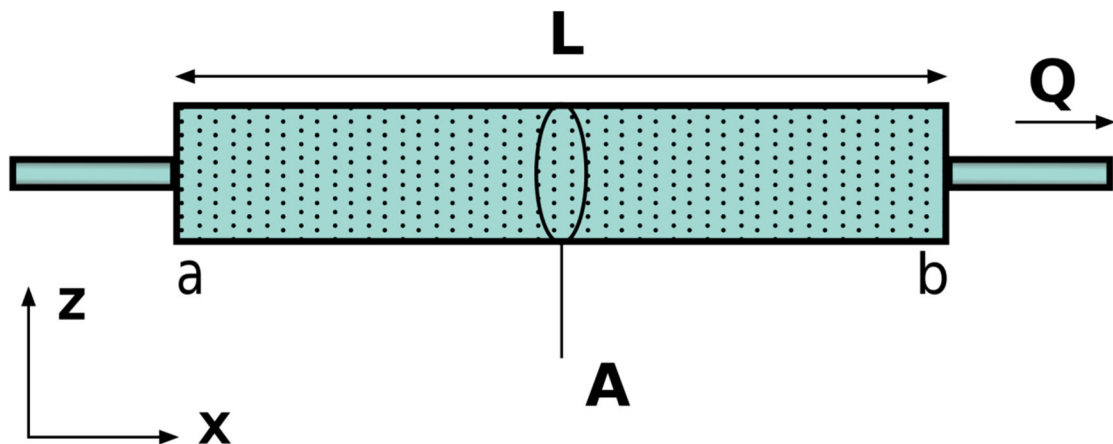
das empresas do setor da construção civil, das empresas de consultoria ambiental, das universidades, do poder público em todos os níveis (legislativo, executivo e judiciário) e da população em geral (CETESB, 2018).

3.6 RELAÇÃO ENTRE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E EFICIÊNCIA DA REMEDIAÇÃO FÍSICA

É importante ressaltar que as características físicas dos solos interferem diretamente na movimentação do contaminante, tanto na sua verticalidade como no caminhamento horizontal após atingir o lençol freático. A lei de Darcy determinou experimentalmente que a descarga (Q) que atravessa um meio poroso é diretamente proporcional à diferença da carga hidráulica ($h_2 - h_1$) e a área da seção (A) atravessada pelo fluxo é inversamente proporcional à distância percorrida (DOMENICO, 1998).

A **Figura 4** mostra o diagrama e definições para a Lei de Darcy no que tange ao ensaio de permeabilidade.

Figura 4 –Diagrama da Lei de Darcy



Fonte: Adaptado de Tomaz (2019).

A movimentação dos hidrocarbonetos no solo e no lençol freático acontece da mesma forma, mas nem sempre com a mesma velocidade, visto que estes têm uma viscosidade e densidade diferente da água. A densidade da água é $1,00 \text{ g/cm}^3$, já a densidade da gasolina por exemplo é de $0,72 \text{ g/cm}^3$ a $0,85 \text{ g/cm}^3$. A condutividade hidráulica é uma propriedade física dos solos,

usada para estimar a velocidade do fluxo da água do lençol freático em meio poroso, ajudando a entender a movimentação dos contaminantes derivados do petróleo. A condutividade hidráulica pode ser determinada em ensaios de laboratoriais, usando amostras indeformadas, assim como também através de ensaios de campo realizados *in situ*, como o de infiltração em sondagens e o *slug tests* (ONGARATTO et al., 2012).

Os ensaios de permeabilidade do solo são usados para subsidiar tomada de decisões e prever ações da própria contaminação no solo e no lençol freático. A finalidade dos ensaios de permeabilidade é determinar a condutividade hidráulica (K) dos diversos litotipos de ocorrência na área de estudo, sendo indispensável para a elaboração do modelo conceitual para a área contaminada. Neste método, a condutividade hidráulica é calculada pela equação de Hvorslev (Equação 1):

$$K = \frac{r^2 \ln\left(\frac{L_e}{R}\right)}{2 L_e t_0} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

K = condutividade hidráulica;

r = raio do revestimento;

L_e = comprimento da seção filtrante do poço;

R = raio da sondagem;

T₀ = tempo correspondente para o nível de água.

Para que os resultados sejam mais precisos deve-se calculado um k para cada instante (tempo) apresentado e, ao final, calcula-se a média dos coeficientes hidráulicos (k), chegando-se, assim, a um k_{médio}, sendo este o resultado de permeabilidade adotado. O ensaio deve ser realizado direto no poço de monitoramento instalado na área de estudo (ONGARATTO et al., 2012).

Conforme PEDE (2009), a permeabilidade relativa é um fator que representa a habilidade de um fluido se mobilizar através do meio poroso, quando o mesmo é parcialmente ocupado por outro fluido. A permeabilidade relativa de um fluido depende de sua saturação e da saturação de outro fluido presente.

A ação da remediação por MPE na fase retida ocorre de forma indireta e de duas formas. A primeira é por meio a biodegradação, uma vez que o vácuo promovido pela extração promove a aeração dos poros do solo, portanto, aumentando o oxigênio disponível para os microorganismos. A segunda forma que o MPE age na fase retida é por meio da volatilização e posterior extração em forma vapor.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados fornecidos pela empresa TECPAM, como laudos laboratoriais, levantamentos técnicos realizados *in loco*, pareceres técnicos emitidos pelo órgão ambiental fiscalizador (IBRAM), assim como outras informações, foram consultados para subsidiar a discussão acerca do tema, visando, a partir desses dados, verificar a eficiência técnica do sistema de remediação pela técnica de MPE para a área de estudo.

Os laudos laboratoriais tiveram seus resultados comparados com a Resolução CONAMA nº 420/2009, assim como com os CMA calculados para a área através da análise de risco à saúde humana. Foram também avaliados dados da CETESB, relativos, por exemplo, aos casos de remediação que operaram e operam com o sistema MPE, visando a comparação com o sistema em estudo.

Além disso, foi realizada a comparação de resultados de trabalhos técnicos científicos previamente publicados por outros autores, os quais também foram realizados em áreas contaminadas por hidrocarbonetos. Por fim, foram analisados dados, métodos e procedimentos operacionais a serem adotados para prevenir uma nova contaminação da área de estudo, visando, inclusive, a comparação com dados após a ocorrência de fatos que poderiam ter agravado o dano ambiental já ocorrido na área.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO

O empreendimento é um posto de combustíveis localizado na porção sudoeste de Brasília, na Região Administrativa de Taguatinga (RA-III), Macrozona Urbana Consolidada, às margens da rodovia DF- 001, também conhecida como Estrada Parque do Contorno – EPTC

5.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA

O site contém um solo heterogêneo com presença de camada de aterro, com predominância de uma camada na textura areno argiloso até a profundidade de 2,00 metros, seguido de 2,00 metros de argila arenosa e uma camada de argila, entre 4,00 e 5,00 metros de profundidade; finalizado com uma camada de argilo arenoso, até os 12,00 metros de profundidade. Quanto a coloração do solo, esta varia entre vermelho amarelado, bruno amarelado e oliva acinzentado, sendo desconhecido as profundidades inferiores a 12,00 metros. A zona saturada ocorre em profundidade média de 10,57 metros, variando de 10,20 metros à 11,65 metros de profundidade, com um coeficiente hidráulico de $1,55 \times 10^{-4}$ cm/s a $2,02 \times 10^{-4}$ cm/s e uma velocidade média do fluxo do lençol freático identificada de 33,83 m/ano. O sentido do fluxo do lençol freático é de noroeste (NO) para sudeste (SE). (TECPAM 2021)

5.3 HISTÓRICOS DE INVESTIGAÇÃO

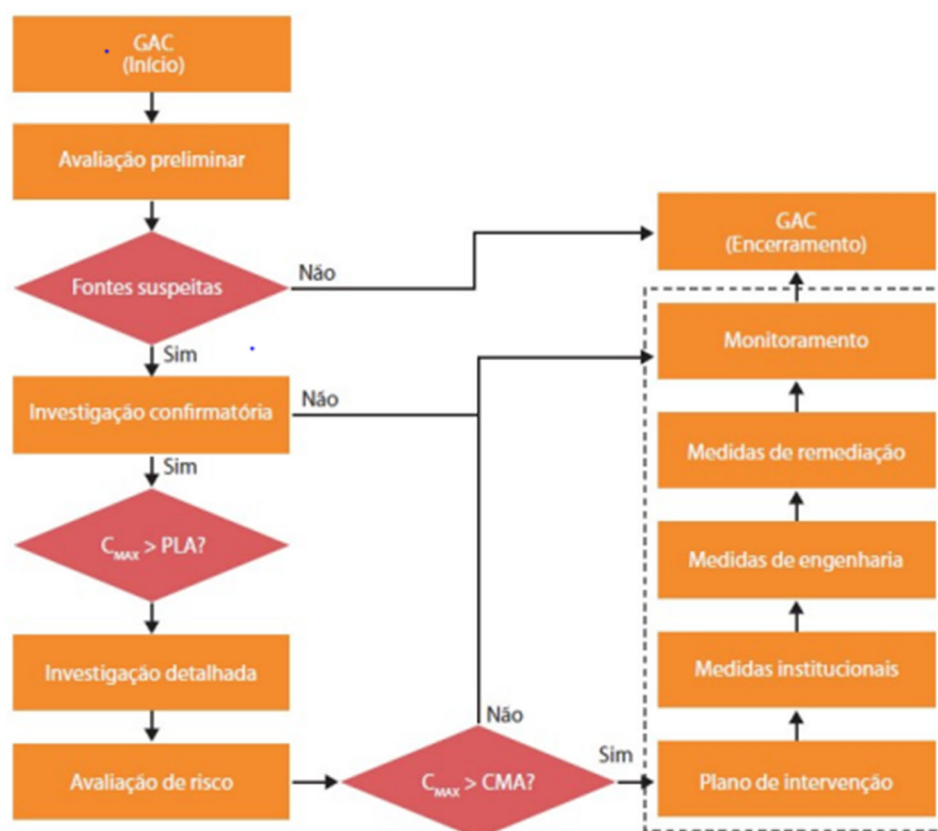
O empreendimento está em funcionamento na área desde 1996 e, no período de 2.005 à 2020, de acordo com os dados obtidos com a TECPAM Consultoria Ambiental, a área foi submetida a 5 (cinco) diagnósticos de passivo ambiental e um Teste de Estanqueidade no Sistema de Armazenagem Subterrâneo de Combustíveis. É importante citar que os escopos técnicos desses estudos foram variando conforme a intensificação das exigências do órgão ambiental do DF, IBRAN. A seguir um breve resumo das ações desenvolvidas em cada estudo ambiental.

- 2005: Campanha de Medição de COV. Realizada uma campanha de medição de Compostos Orgânicos Voláteis (COV) na área em estudo quando foi identificada a presença de COV.
- Julho de 2012: Campanha de Medição de COV. Realizada uma nova campanha de COV na área do posto onde foi novamente constatado pontos de presença de Compostos Orgânicos Voláteis.

- 2019: Análise de Fundo de Cava. O empreendimento passou por uma reforma onde foram removidos os tanques antigos e instalados novos tanques em áreas distintas a área de tancagem anterior. Durante o processo de análise de fundo de cava, de acordo com os dados analisados, foi feita amostragens de solo no fundo da cava dos tanques removidos e submetidas à análise de BTEX. O resultados não apresentaram valores acima da referência do CONAMA 420/2009. Já para o composto TPH Total foram identificadas concentrações 1.387,071 mg/kg, resultado acima dos valores de referência, todavia abaixo do valor de alerta até 2.525 mg/kg.
- Maio de 2020: Investigação de Passivo Ambiental Confirmatória. Foi realizada uma investigação de passivo ambiental confirmatória na área em estudo onde foram feitas três sondagens usando trados helicoidais e instalados três poços de monitoramento do lençol freático (PM1 a PM3). O solo e água do lençol freático foi amostrada e submetida à análise laboratorial dos parâmetros BTEX e PAH. Nos PM1 e PM3 foram identificadas concentrações do composto Benzeno em fase dissolvida acima da referência do CONAMA 420/2009. Foi recomendada a continuidade do diagnóstico com a realização de uma investigação de passivo ambiental detalhada.
- Setembro de 2020 a abril de 2021: Investigação de Passivo Ambiental Detalhada. Para delimitação da pluma de fase dissolvida, foram executadas 25 sondagens e instalados 25 poços de monitoramento com amostragem de solo e água do lençol freático. Não foram identificados valores de concentrações para os compostos de BTEX acima da referência do CONAMA 420/2009 para as amostras de solo. Já para as amostras de água subterrânea, foram identificados valores de concentrações acima dos valores de referência para os compostos benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos e naftaleno. De acordo com o cenário ambiental, as plumas de fase dissolvida foram delimitadas apenas no plano horizontal. Também foi identificada a presença de fase livre que é a ocorrência de substância ou produto imiscível e móvel, em fase separada da água nos poços PM-6 (12,00 cm) e PM-7 (8,00cm), sendo necessário ações de intervenção na área.
- Agosto de 2021: Teste de Estanqueidade. Foi realizado teste de estanqueidade em todo o sistema de armazenamento subterrâneo de combustível visando averiguar possível presença de fonte primaria ativa de contaminação na área. Os resultados do teste foram estanques para todo o sistema avaliado. Portanto é razoável presumir que a contaminação em fase livre e dissolvida, identificada na área, foi oriunda das instalações anteriores à 2019, conforme já mencionado anteriormente.

Portanto de acordo com o artigo 26 do CONAMA 420/2009 a área em estudo foi declarada pelo órgão ambiental competente como Área Contaminada sob Intervenção – ACI, ou seja, aquela área em que foi constatada a presença de substâncias químicas em fase livre ou foi comprovada, após investigação detalhada e avaliação de risco, a existência de risco à saúde humana. Diante deste cenário se seguindo o fluxograma de Gerenciamento de Áreas Contaminadas do CONAMA 420/2009, a fase livre representa risco iminente à saúde humana fazendo-se necessária uma ação de intervenção. No entanto, e este detalhe é fundamental, havia ainda um grau de incerteza quanto ao fechamento do modelo conceitual, uma vez que, não havia sido feito ainda um estudo adequado para o levantamento da fase retida no solo. A definição para o caso foi a de se iniciar a remediação ambiental concomitante à continuidade da Investigação Detalhada de Passivo Ambiental. Na **Figura 5** é possível observar um fluxograma de gerenciamento de áreas contaminadas elaborado com base nas orientações do CONAMA 420/2009.

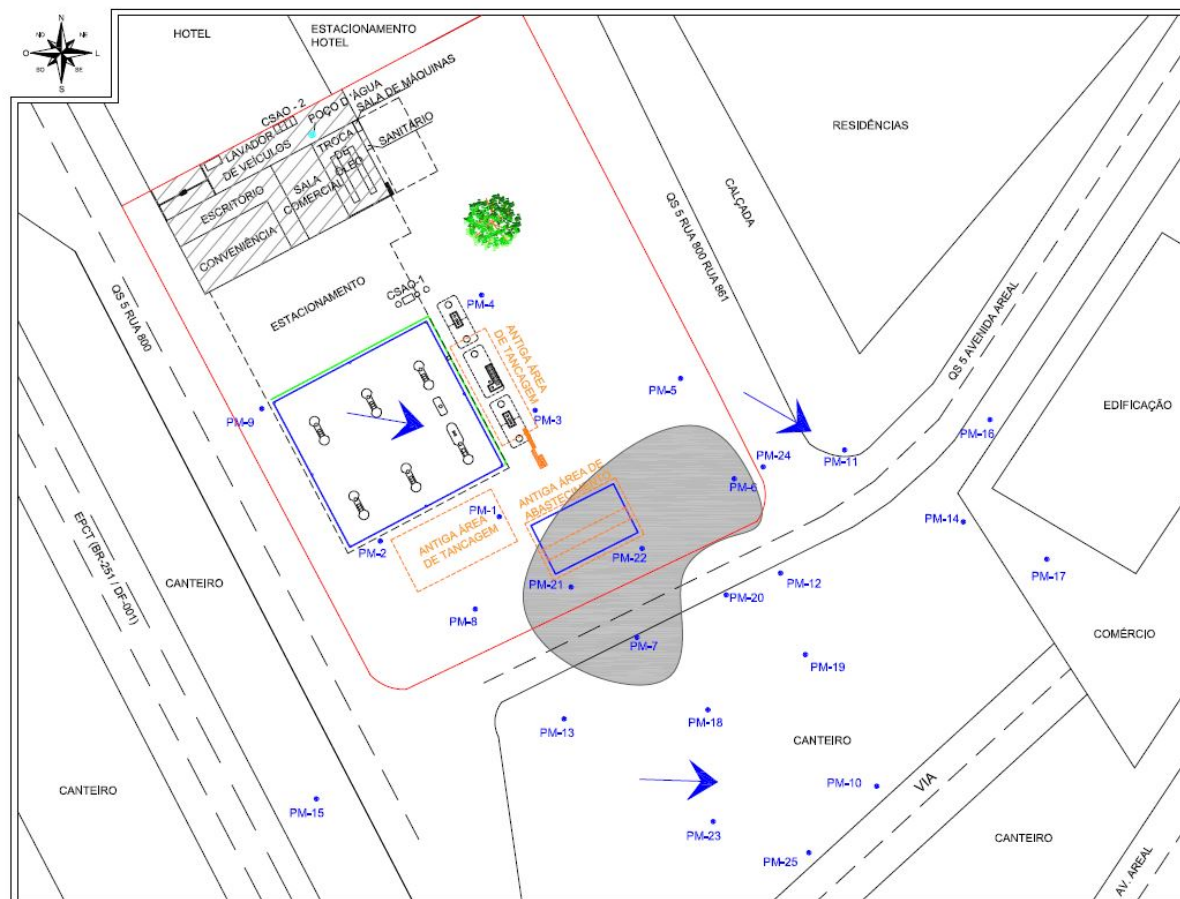
Figura 5 – Fluxograma de gerenciamento de áreas contaminadas



Fonte: GOIAS (2018).

No site em estudo, e de acordo com os dados fornecidos pela TECPAM, a área de ocorrência de produto em fase livre estava localizada a jusante da antiga área de tancagem e pista de abastecimento de diesel, como pode ser observada na **Figura 6**.

Figura 6 – Pluma de fase livre



Fonte: TECPAM (2022)

5.4 ENSAIO PILOTO

Para instalação da Remediação Proposta foi realizado o Ensaio Piloto. A seguir um resumo compilado retirado do relatório específico TECPAM 2022. Foram realizadas 4 sondagens para a instalação de um poço de bombeamento (PB) e três poços de observação (PO). Para tanto, utilizou-se um trado sólido helicoidal de 4 polegadas de diâmetro acoplado a perfuratriz rotopneumática.

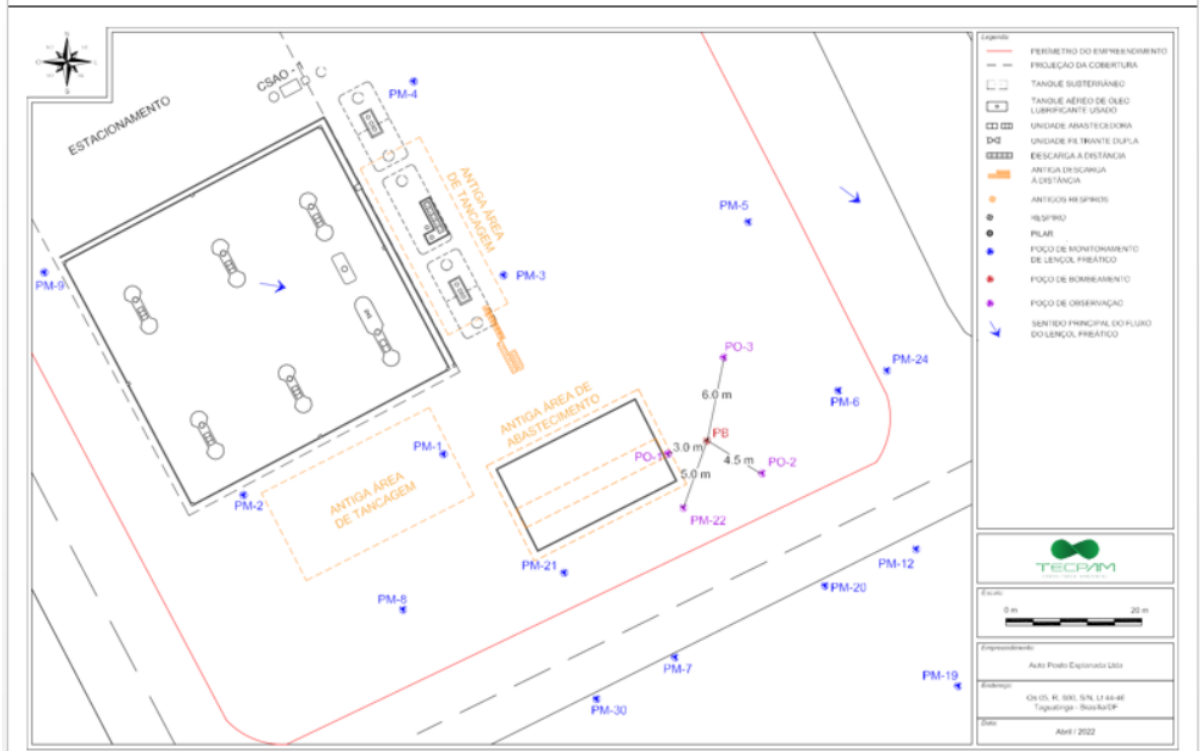
A partir da sondagem S-1 foi instalado o PB, já a partir das sondagens S-2 a S-4 foram instalados os três PO. Na **Tabela 5** é apresentado os detalhes das especificações construtivas dos poços

instalados. Na **Figura 7** é apresentada a locação dos poços utilizados no ensaio e suas respectivas distância do PB.

Tabela 5 - Especificações construtivas dos poços

Sond.	Poço	Prof. do poço (m)	Nível d'água (m)	Distância do PB (m)	Tubo Liso (m)	Tubo Filtro (m)	Diâmetro interno (pol.)	Data da instalação
S-1	PB	13	10,76	-	9	4	2	05/01/2022
S-2	PO-1	13	10,51	3	9	4		05/01/2022
S-3	PO-2	13	10,17	4,5	9	4		05/01/2022
S-4	PO-3	13	9,48	6	9	4		06/01/2022

Figura 7 – Locação dos poços



Fonte: TECPAM 2022.

A técnica ensaiada foi a extração multifásica (MPE, do inglês Multi-Phase Extraction) na configuração *Bioslurping*, na qual, por um único conduto, extrai-se simultaneamente a fase livre, dissolvida e de vapor. Seu funcionamento ocorre inserindo o *droptube* (tubo de sucção) em um poço de bombeamento (PB) o qual é acoplado a um tanque de vácuo, sendo este evacuado por bomba de vácuo, promovendo simultaneamente, por diferença de pressão, a sucção da água subterrânea e dos vapores do solo.

Assim sendo, no ensaio piloto do sistema MPE busca-se definir o raio de influência de bombeamento em função do vácuo aplicado no poço. Avaliou-se, também, a vazão obtida pelo bombeamento. O resultado da aferição dos poços de observação, antes e durante o ensaio piloto, pode ser visto na **Tabela 6**.

Tabela 6 - Níveis de água estáticos

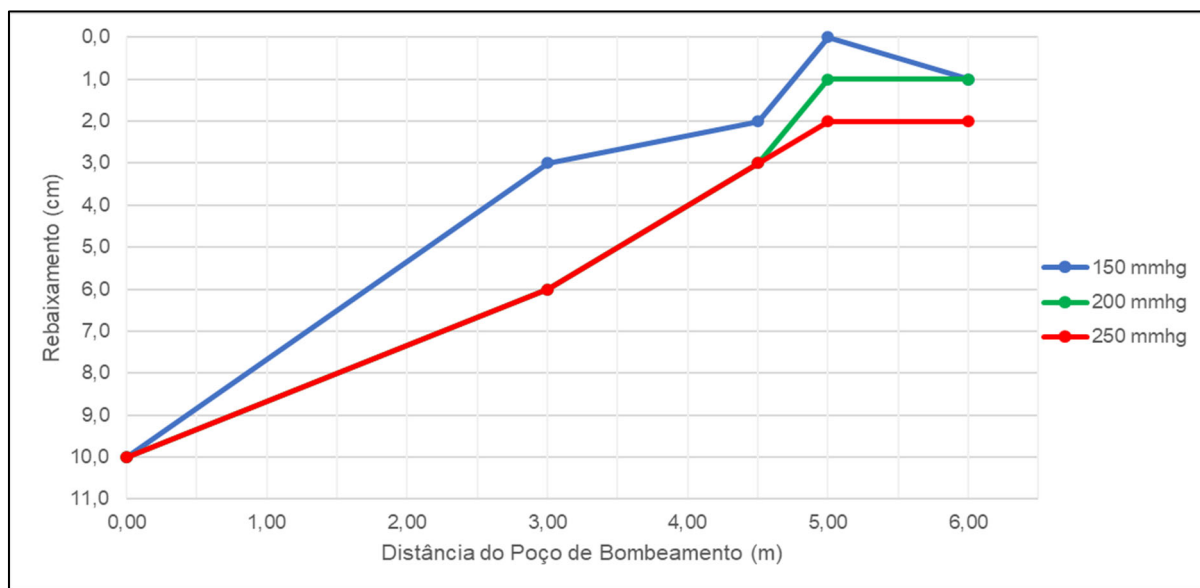
		Poços de Observação			
		PO-1	PO-2	PM-22	PO-3
	Distância do PB (m)	3,00	4,50	5,00	6,00
Hora	Nível da Água Estático (m)	10,51	10,17	9,94	10,47
08:30	Nível da Água – Pressão a 150 mmhg (m)	10,53	10,18	9,94	10,47
08:55		10,54	10,19	9,94	10,48
09:16		10,54	10,19	9,94	10,48
09:45		10,54	10,19	9,94	10,48
10:10	Nível da Água – Pressão a 200 mmhg (m)	10,57	10,20	9,95	10,48
10:35		10,57	10,20	9,95	10,48
11:00		10,57	10,20	9,95	10,48
11:25	Nível da Água – Pressão a 250 mmhg (m)	10,57	10,20	9,96	10,49
11:50		10,57	10,20	9,96	10,49
12:15		10,57	10,20	9,96	10,49

Legenda: PB - Poço de bombeamento; PO - Poço de observação; m - Metro.

Fonte: TECPAM 2022.

Como pode ser visto na Tabela 6, a variação no nível da água dos poços de observação aumentou conforme se aumentou a pressão aplicada no poço de bombeamento. A maior variação identificada foi de 6 centímetros, no PO-2, o qual está locado à 3 metros do PB. No poço mais distante do PB, o PO-3, foi identificado variação de 2 centímetros. Na **Figura 8** pode ser visto o gráfico do rebaixamento do lençol freático para cada pressão de trabalho.

Figura 8 – Gráfico de rebaixamento do lençol freático em função do bombeamento.

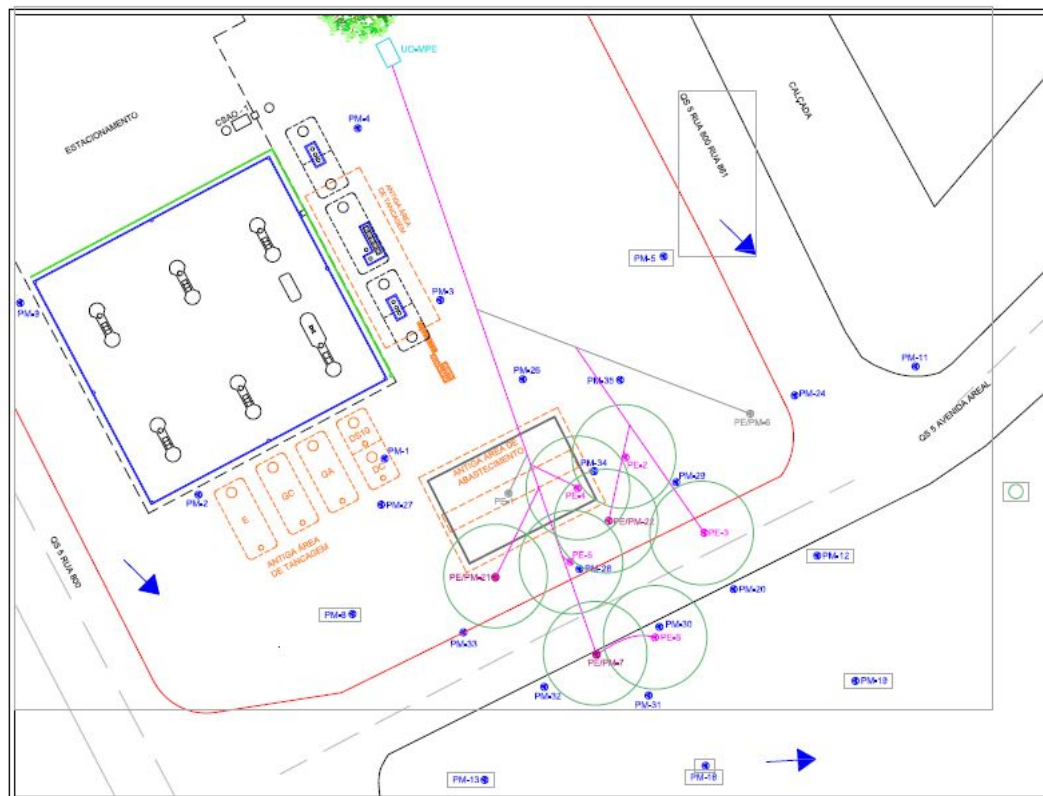


Fonte: TECPAM 2022.

5.5 INSTALAÇÃO E OPERAÇÃO DA REMEDIAÇÃO

Após a realização do ensaio piloto foi instalado um Sistema de Remediação por Extração Multifásica (MPE), que esteve em funcionamento de forma contínua no período de janeiro de 2.022 a março de 2.023, divididos em 05 etapas de avaliação trimestral em um número de poços de extração que foram variando conforme o resultado da remoção da fase livre, bem como o desenvolvimento do estudo da fase retida no solo que ocorreu concomitantemente. Deste modo, os poços que apresentaram fase livre, PM-6, PM-7, PM-21 e PM-22, foram transformados em poços de extração, e foram instalados outros 3 poços denominados PE-1, PE-2 e PE-3. O croqui com a localização destes poços pode ser observado na **Figura 9**.

Figura 9 – Localização dos poços de extração, raio de influência e sentido do fluxo

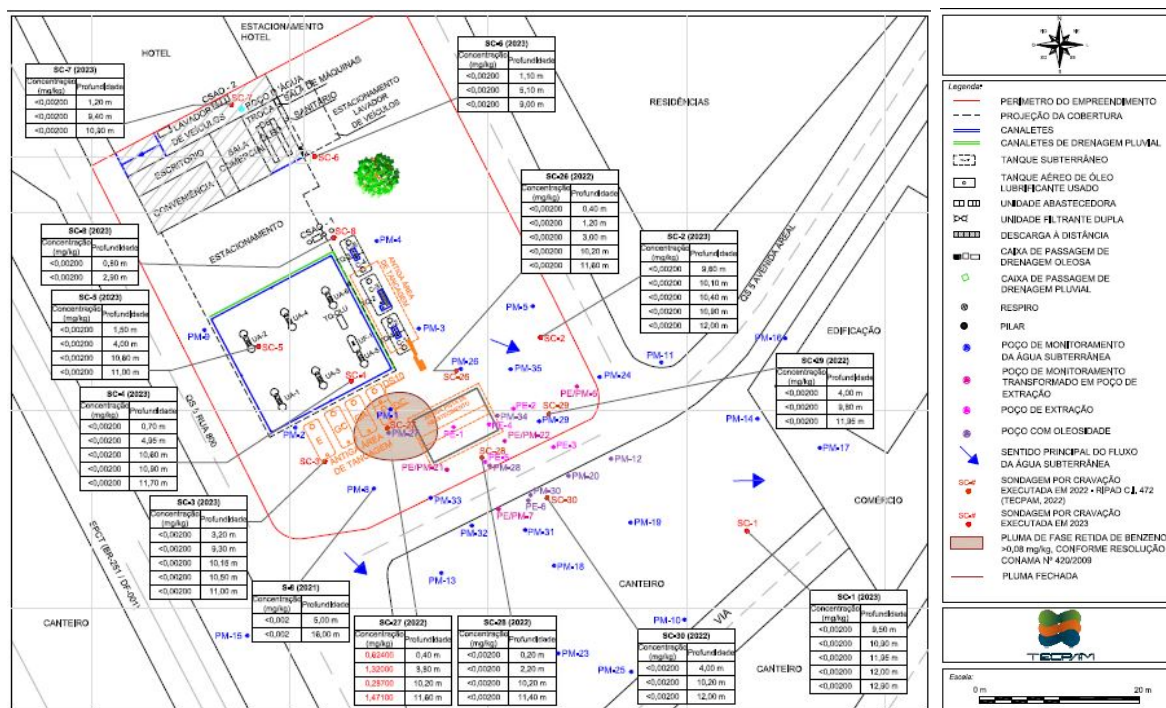


Fonte: TECPAM (2022).

O sistema MPE ampliado em novembro de 2022, com a adição dos poços de extração PE-4, PE-5 e PE-6. Após a ampliação do sistema de remediação, os poços PE-1 e PE/PM-6 foram desativados temporariamente, visto que, não foi mais identificada fase livre nesses poços. O PE-1 apresentou-se seco na maior parte dos meses de outubro e novembro de 2022, períodos estes de grande estiagem na região do Distrito Federal. Foi observado o retorno do nível do lençol freático no poço de monitoramento após início das chuvas e não foi mais observada a ocorrência de fase livre.

Conforme já citado, seguindo a recomendação do CONAMA 420/2009 foi dada continuidade na investigação de passivo ambiental visando a delimitação da pluma em fase dissolvida também no plano vertical (uso de poços multiníveis) e fase retida de solo usando o método de *Direct Push* e *screening*. Durante este novo estudo de Investigação de Passivo Ambiental Detalhada (RIPAD) foram identificadas contaminação em fase retida no solo. Na **Figura 10** é possível observar as plumas de fase retida de benzeno.

Figura 10 – Pluma de fase retida de benzeno.



Fonte: TECPAM (2022).

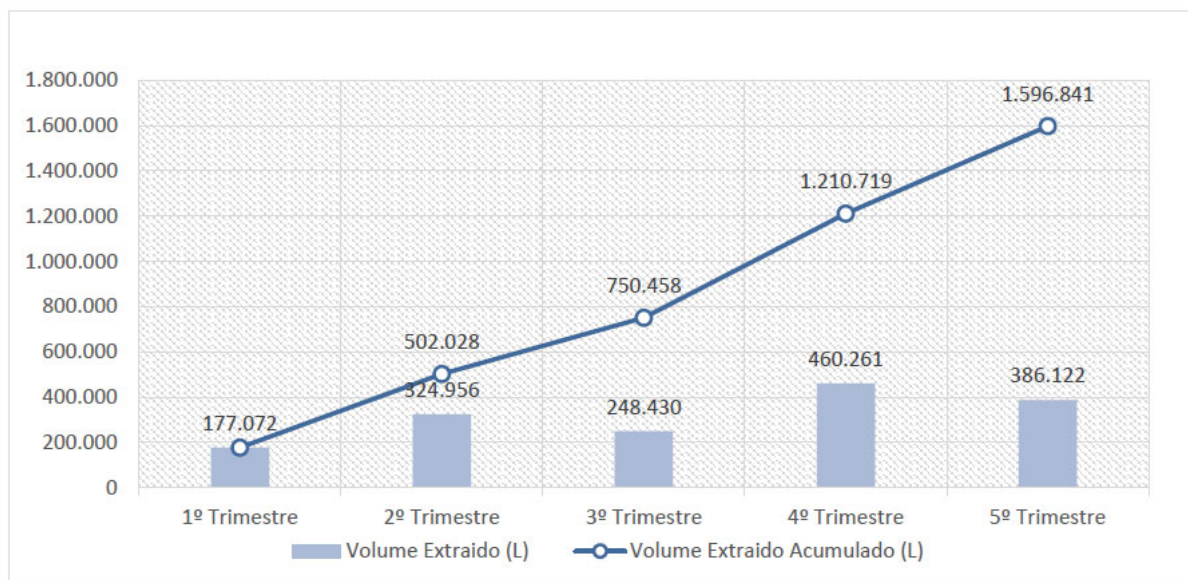
A finalização da Investigação de Passivo Ambiental Detalhada utilizando o método de *Direct Push* e *screening* mostrou novos cenários que direcionou a ampliação do sistema de remediação.

5.6 RESULTADOS E EFICIÊNCIA DO SISTEMA MPE

Durante o quinto período de avaliação do processo de remediação ambiental no site, pode-se observar a ausência de fase livre sobrenadante à água subterrânea nos poços e o decréscimo das concentrações de BTEX, em fase dissolvida, em 98% dos poços instalados na área em estudo. Diante desses resultados, o sistema de remediação por extração multifásica (MPE), iniciado no dia 07 de janeiro de 2022, foi encerrado no dia 31 de março de 2023.

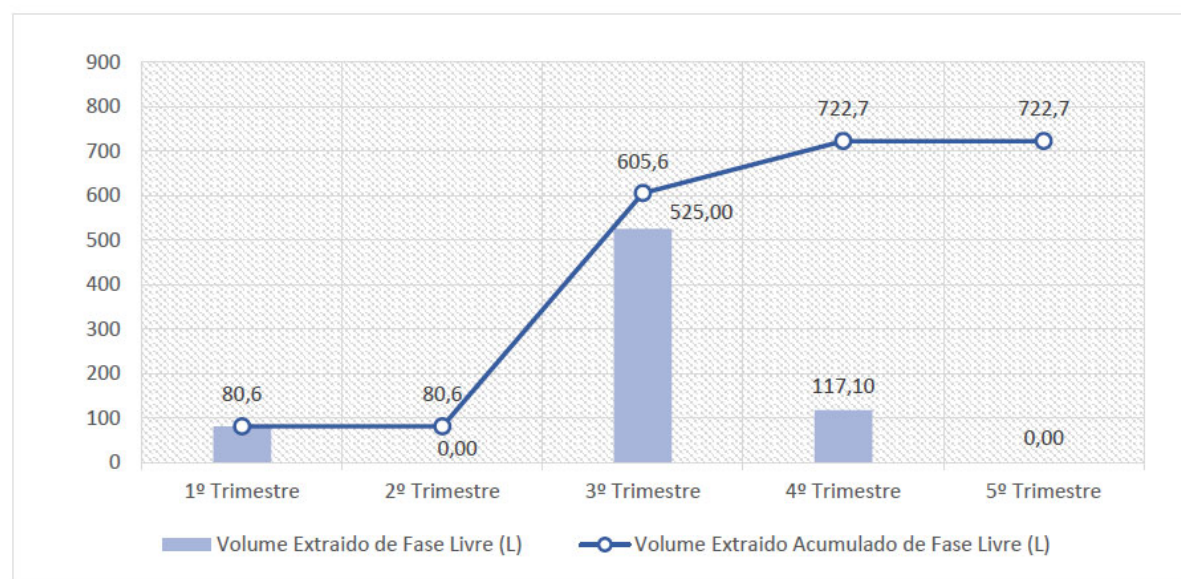
O volume de vapor removido não foi quantificado no sistema. No presente caso, durante período de 15 meses de operação do Sistema de Remediação, foram removidos 1.596,84m³ de água contaminada e 722,7 litros de produto em fase livre conforme a distribuição abaixo que segue nas Figuras 11 e 12.

Figura 11 – Gráfico de remoção de fase livre do ano de 2022



Fonte: TECPAM (2023).

Figura 12 – Gráfico de remoção de fase livre do ano de 2023



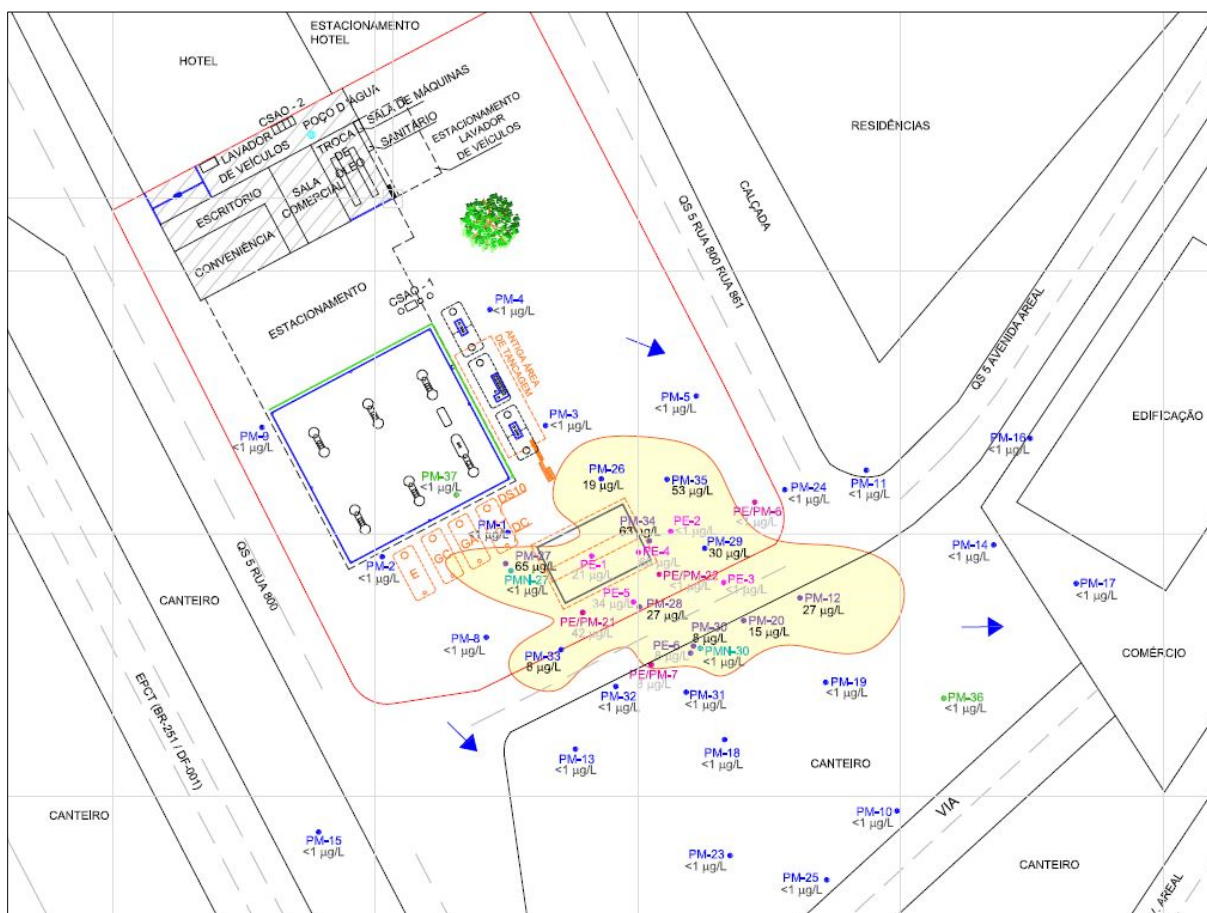
Fonte: TECPAM (2023).

Na **Figura 13** é possível observar a planta da pluma de fase dissolvida de benzeno anterior ao início da operação do sistema de remediação.

A pluma de contaminação em fase dissolvida diminui e, neste novo estudo, foram também analisados os parâmetros de TPH Fracionado, que foram comparados com os valores orientadores da CETESB por não estarem previstos no CONAMA 420/2009, na figura acima essa pluma pode ser observada.

38

Figura 14 – Pluma de fase dissolvida com a redução das concentrações



Fonte: TECPAM (2023).

Ainda no estudo elaborado pela TECPAM em 2023 (RIPAD) também foi possível observar variações nas concentrações dos poços de monitoramento para os compostos do TPH Fracionado. Comparando os dados de maio e/ou junho de 2022 com os dados de março de 2023 observa-se um acentuado decaimento nos PM limítrofes ao centro de massa, ou seja, do *hot spot* da área. Alguns poços como PM1, PM20, PM27, PM28, PM29 e os PM19 e PM34 que tiveram um aumento significativo apenas para a faixa dos Aromáticos médio (>C9 a C16).

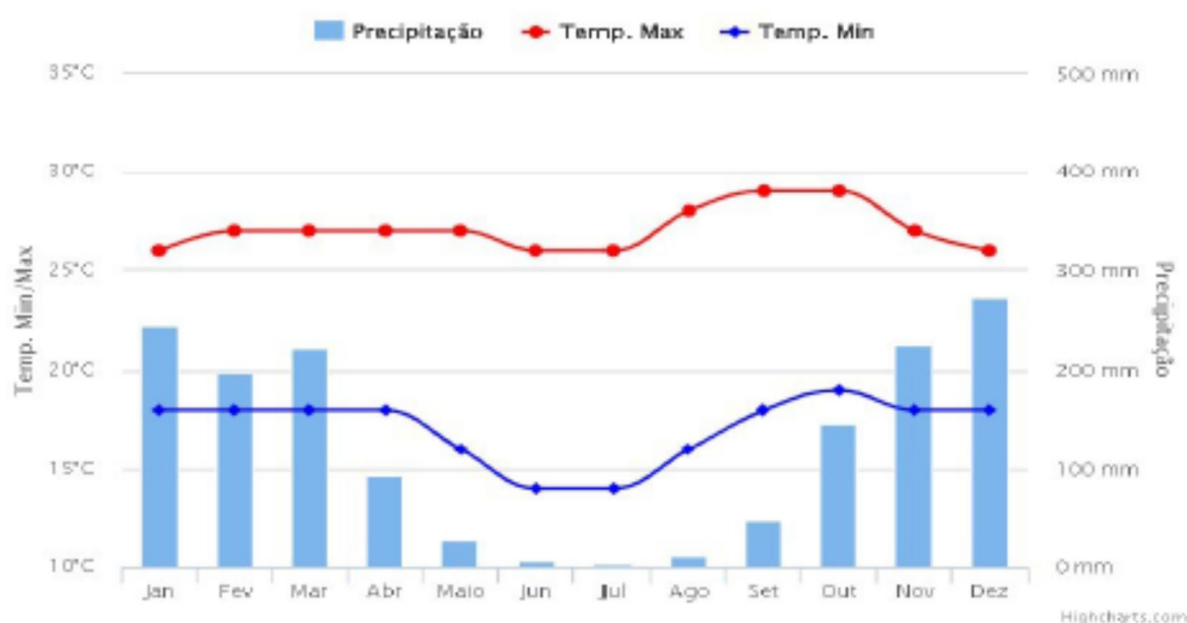
5.7 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA CARGA PLUVIOMÉTRICA

De acordo com dados obtidos com a TECPAM, no Distrito Federal existem áreas que ocorrem variações acima de 8,00 m do nível freático, mais especificamente nas regiões do Lago Norte e Sobradinho, conforme a variação sazonal da carga pluviométrica anual. Na região da área de

estudo, que é Águas Claras, a variação média, durante o período avaliado, de acordo com os levantamentos da TECPAM, foi maior que um metro.

De acordo com o Clima Tempo e que pode ser observado no gráfico na **Figura 15** a seguir a variação média no volume de chuva mensal no Distrito Federal nos últimos 30 anos, estima-se de 1991 a 2021, sendo possível identificar as épocas mais chuvosas/secas o que influencia diretamente no processo de gerenciamento de áreas contaminadas.

Figura 15 – Variação da precipitação do Distrito Federal nos últimos 30 anos.



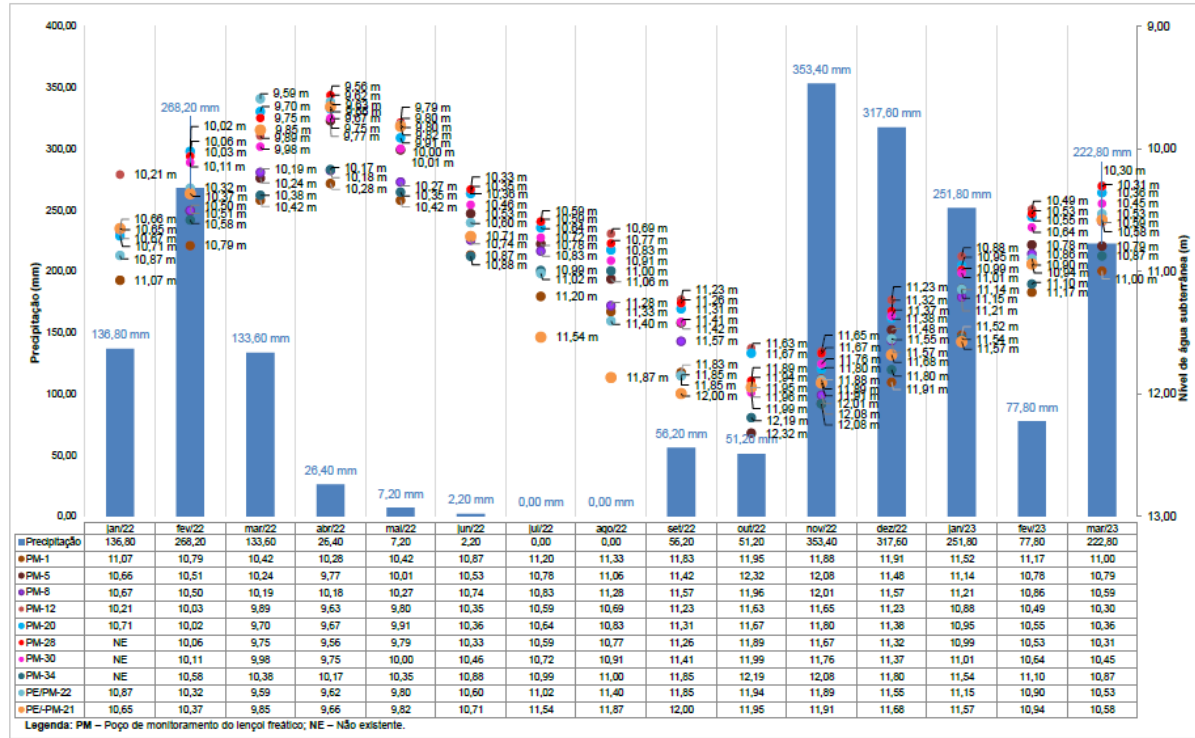
Fonte: Clima Tempo (2023).

Já o quadro a seguir mostra a carga pluviométrica mensal versus a variação do nível de água nos poços em relação à superfície especificamente na área analisada. Durante os procedimentos de inspeção nos poços, observou-se ausência de fase livre sobrenadante à água subterrânea no *site*, a partir de dezembro de 2022, presença de oleosidade nos poços PM-34 (08/02/23 e 15/03/23), PE-4 (03/03/23), PM-27 (15/03/23), PM-29 (31/03/23) e iridescência no PE-5 (31/03/2023).

Avaliando a variação do nível da água nos poços que apresentaram fase livre em outubro de 2022 (PM-28, PM-30, PM-34, PE/PM-21 e PE/PM-22), dos poços que circundam a área de influência do sistema de remediação (PM-1, PM-5, PM-8, PM-12 e PM-20) e comparando com os dados de precipitação na região (**Figura 16**), constata-se uma relação direta entre a carga

pluviométrica e a movimentação do nível do lençol freático, com um *gap* de 30 dias. Os últimos seis meses do período de duração da operação de remediação foram, com exceção do mês de fevereiro de 2.023, sob a mais intensa carga pluviométrica. Por outro lado, nos meses de julho, agosto e setembro, período de estiagem, foi removido o maior volume de fase livre.

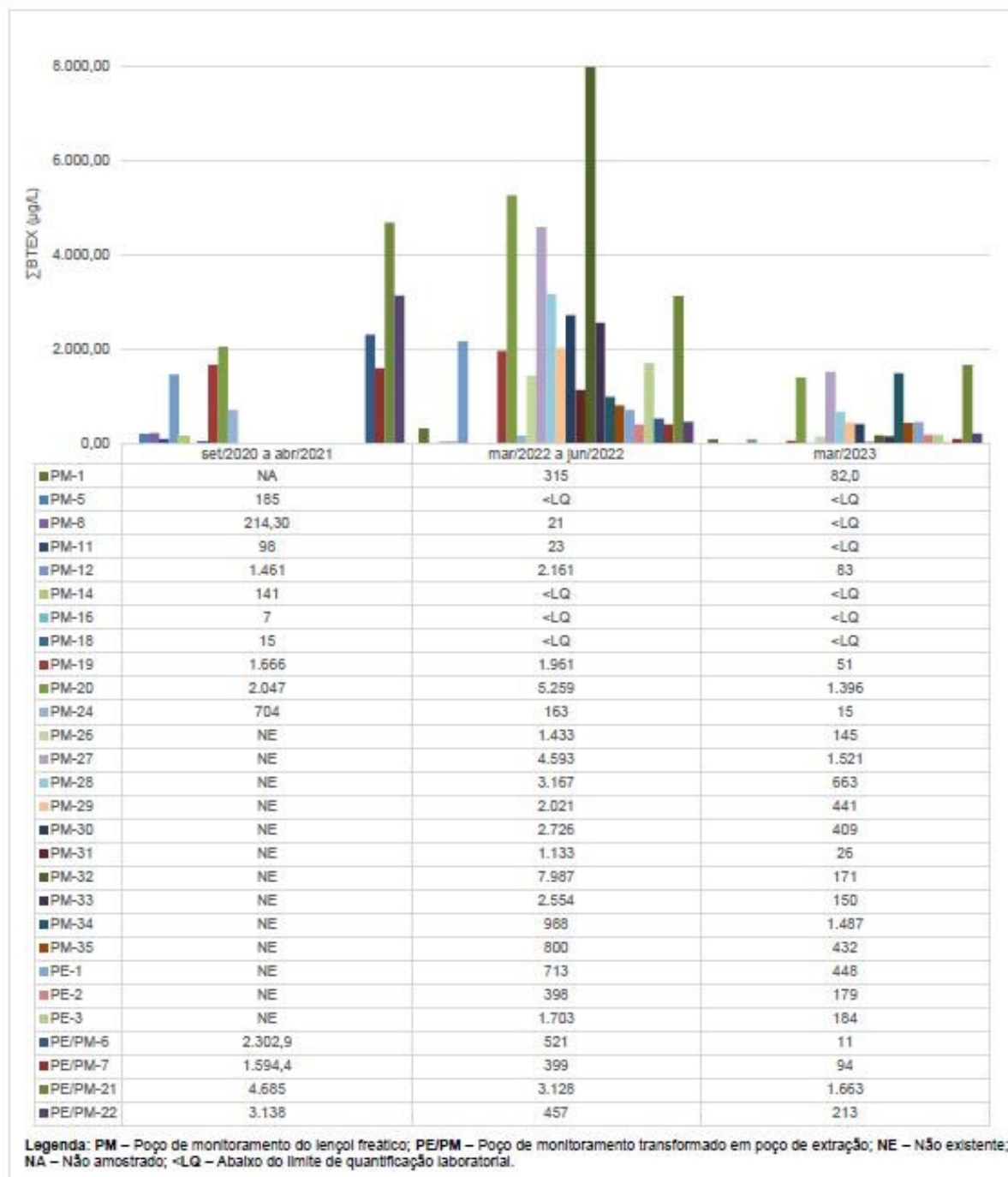
Figura 16 – Carga pluviométrica e movimentação do nível do lençol freático



Fonte: TECPAM (2023)

A seguir a um panorama geral da variação das concentrações dos compostos de BTEX, por meio de representações gráficas. **Figura 17.**

Figura 17 – Série histórica das concentrações de BTEX e PAH



Fonte: TECPAM (2023).

Avaliando a série histórica da somatória dos compostos de BTEX, os resultados apresentam um decréscimo nas concentrações na maioria dos poços, onde apenas no PM-34 foi identificado um acréscimo nas concentrações. Tal análise indica a eficácia do sistema MPE, que ficou ativo até março de 2023, não só na remoção de fase livre, como também na remoção de fase dissolvida.

6. CONCLUSÕES

De acordo com os dados analisados presume-se que a fonte de contaminação do site teve origem na antiga área de tancagem e/ou na antiga pista de abastecimento de diesel que foram desmobilizadas em 2019 visto que após realização do teste de estanqueidade, assim como das inspeções das instalações, não foram identificadas fontes primárias de contaminação ativas após estas desmobilizações.

O Sistema de Remediação pelo método MPE mostrou-se eficiente no entanto, é evidente que o tempo de operação não foi suficiente para alcançar uma redução significativa nas concentrações dos parâmetros relacionados ao TPH, os quais apresentaram um aumento ao final do período de remediação. Este aumento é esperado, uma vez que o MPE tende a agrupar os contaminantes dentro do raio de influência do sistema para posterior degradação. Além disso, é importante ressaltar que o MPE promove aeração no meio físico, o que proporciona uma taxa de degradação mais elevada nos contaminantes. Portanto, seria relevante estender o período de operação do sistema para garantir uma remoção mais eficaz dos contaminantes.

A introdução de novos métodos para o levantamento da fase retida no solo conseguiu apurar o Modelo Conceitual definindo a presença de uma contaminação no solo em fase trapeada e, ainda que no segundo trimestre o resultado tenha sido nulo para a remoção de fase livre, teve-se a segurança e o comedimento na continuidade da operação da remediação. A chegada da estiagem e o conhecimento do cenário proporcionou a remoção do maior volume de fase livre de todo período, mesmo que o volume de água removido tenha sido um dos menores.

Outro ponto importante observado é que o sistema MPE teve um excelente resultado justamente no período de estiagem, atuando em profundidades superiores à 10,00m da superfície. Enquanto o efeito do arraste do contaminante para profundidades maiores, tanto em fase livre, quanto dissolvida, o que poderia aumentar a contaminação em profundidade, no plano vertical é uma realidade no sistema *pump treat*, no sistema MPE, pela sua própria concepção construtiva, esse efeito é amenizado ou, até mesmo, nulo.

É notório observar o grau de incertezas quanto a existência da contaminação por hidrocarbonetos oriundos do petróleo, por conta dos métodos usados para investigar os solos na área. Nos estudos iniciais, anteriores a 2021, quando não foram usados o processo de *Direct*

Push e uso de *liner* para amostragem de solo, não foi possível a verificação da contaminação em toda sua extensão, que teria trazido mais precisão do ponto de amostragem e poderia ter diminuído a insegurança na gestão da contaminação ambiental da área. A falta de conhecimento da fase retida no solo, por conta dos métodos de sondagens realizados antes de 2021 para amostragem de solo, acarretou em inconsistências iniciais no processo de remediação.

Em resumo, a remediação por MPE é uma abordagem eficaz e versátil para a limpeza de sites contaminados por hidrocarbonetos, oferecendo benefícios como remoção abrangente, eficiência, controle em tempo real e adaptação a diferentes condições do local, mas os processos anteriores à sua instalação impõem o uso de ferramentas eficazes para mapear adequadamente as plumas de contaminação sejam em fase retida, fase dissolvida e também por vapores. A utilização de técnicas conjugadas de remediação pode ser uma excelente alternativa para aprimorar a eficácia do processo de gestão ambiental do local.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Norma Brasileira nº. 15.515-2:** Passivo Ambiental em Solo e Água Subterrânea. Parte 2: Investigação Confirmatória. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ABNT____**NBR 15.515-3:** Passivo Ambiental em Solo e Água Subterrânea. Parte 3: Investigação Detalhada. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ABNT____**NBR 15.594:** Posto revendedor de combustível automotivo (PRC) Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ABNT____**NBR 16.209:** Avaliação de risco à saúde humana para fins de gerenciamento de áreas contaminadas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT____**NBR 16.764:** Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis – Instalação dos componentes do sistema de armazenamento subterrâneo de combustíveis (SASC), óleo lubrificante usado e contaminado (OLUC) e ARLA 32. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABNT____**NBR 16.784:** Reabilitação de áreas contaminadas – Plano de Intervenção. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Distribuição e Revenda.** 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/distribuicao-e-revenda/revendedor>> Acesso em: 15 de novembro de 2023.

ANDERSON, P. W. Moreis different: broken symmetry and nature of hierarchical structure of science. **Science**, v. 177, n. 4047, p. 393-396, 1972.

BOOPATHY, R. Factors Limiting Bioremediation Technologies. **Bioresource Technology**, v. 74, p. 63-67, 2000.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Portaria 1109.** Aprova o Anexo 2 - Exposição Ocupacional ao Benzeno em Postos Revendedores de Combustíveis - PRC - da Norma Regulamentadora n.º 9 - Programa de Prevenção de Riscos Ambientais - PPRA. Disponível em <https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=328911>. Acesso em 15 de novembro 2023.

CEMAm - Conselho Estadual do Meio Ambiente. **Resolução CEMAm Nº 29/2018.** Dispõe sobre os critérios e procedimentos relativos ao licenciamento ambiental de Ponto de Abastecimento, Posto Revendedor e Instalação de Sistema Retalhista de Combustíveis no Estado de Goiás.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **DECISÃO DE DIRETORIA Nº 038/2017/C, DE 07 FEVEREIRO DE 2017.** Dispõe sobre a aprovação do “Procedimento para a Proteção da Qualidade do Solo e das Águas Subterrâneas”, da revisão do “Procedimento para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas” e estabelece “Diretrizes para Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Âmbito do Licenciamento Ambiental”, em função da publicação da Lei Estadual nº 13.577/2009 e seu Regulamento, aprovado por meio do Decreto nº 59.263/2013, e dá outras providências.

CETESB://mapas.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=28e7bb2238a443819447a8ec3ae4abe5, acesso em 20/10/23 as 11:49.

CETESB:https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/conceitos-sobre-transporte-de-substancias-nas-zonas-nao-saturada-e-saturada/, acesso em 18/02/24 as 11:16.

CLIMA TEMPO. Climatologia e histórico de previsão do tempo em Brasília, BR Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/climatologia/61/brasil-df>>. Acesso em setembro de 2023.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 273, de 29 de novembro de 2000**. Estabelece diretrizes para o licenciamento ambiental de postos de combustíveis e serviços e dispõe sobre a prevenção e controle da poluição.

CONAMA____**420, 28 de dezembro de 2009**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.

DOMENICO, P.A. and SCHWARTZ, F.W. (1998). **Physical and Chemical Hydrogeology**, 2nd Edition, Editora, 824pp.

DONAIRE, P.P.R. **Tratamento de água subterrânea contaminada com BTEX utilizando fotocatalise heterogênea**. Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química, Campinas, 2007.

FATORELI L. **Proposta de avaliação de risco ecológico para contaminações de petróleo e derivados: estudo de caso**, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005

FERREIRA, A.V. et al. Orange IV stabilizes silk fibroin microemulsions. **Engineering in Life Sciences**, Weinheim, v.15, n.4, p. 400-4009, May 2015. doi: 10.1002/els.201400190.

FIOCRUZ, disponível em: [https://portal.fiocruz.br/noticia/concentracao-de-benzeno-em-postos-de-combustiveis-traz-riscos-saude-do-trabalhador#:~:text=Considerando%20esses%20efeitos%20causados%20pela,reconhecidamente%20carcinog%C3%AAnica%20\(grupo%201A\)](https://portal.fiocruz.br/noticia/concentracao-de-benzeno-em-postos-de-combustiveis-traz-riscos-saude-do-trabalhador#:~:text=Considerando%20esses%20efeitos%20causados%20pela,reconhecidamente%20carcinog%C3%AAnica%20(grupo%201A).).

GREGORCZYK, G.; PICCIONI, W. J. **Análise de Eficiência da Remediação por Sistema Extração Multifásica em Postos de Combustíveis**. TCC apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Processos Ambientais - DAQBI - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Curitiba, 2011.

HVORSLEV, M. J. **Time lag and soil permeability in ground water observations**: Vicksburg, Miss U S Army Corps of Engineers Waterwaus Experiment Station, Bulletin.1951.

IBRAM – **INSTRUÇÃO NORMATIVA IBRAM Nº 28 DE 11/08/2020** Estabelece os procedimentos para o licenciamento ambiental de postos revendedores, pontos de abastecimento, instalações de sistemas retalhistas, postos autuantes de combustíveis e posto revendedor lacustre e dá outras providências. Publicado no DOE - DF em 18 ago 2020.

ISLER E., TERAMOTO E.H., BAESSA M.P.M, PEDE M.A.Z., KIANG C.H. **Trapeamento de LNAPL observado por meio da técnica de fluorescência induzida por laser (LIF)** 2018, Artigo, Revista Águas Subterrâneas, v. 32, n.3, p. 315-324, 2018

ONGARATTO, C.; ESPÓSITO, M.; NASCIMENTO, N. C. **Análise Comparativa dos Valores de Condutividade Hidráulica em Manto de Alteração através de Ensaio Laboratoriais e de Campo**. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-graduação em Gerenciamento de Áreas Contaminadas) – Serviço Nacional de Aprendizagem – SENAC, São Paulo, 2012. P 55.

PEDE M.A.Z. **Flutuação do lençol freático e sua implicação na recuperação de hidrocarbonetos: Um Estudo de Caso**, 2009. Dissertação (Tese de Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro, 2009

SANTOS. **PRINCIPAIS TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO E GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS NO ESTADO DE SÃO PAULO**. 2008.

Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/escolasuperior/wpcontent/uploads/sites/30/2016/06/Edson_Helio_Matilde.pdf>. Acesso em: 1 de novembro de 2019.

SCHWARZENBACH, R.P.; GSCHWEND, P.M.; IMBODEN, D.M. **Environmental Organic Chemistry**. New York: John Wiley, 1993. 681p.

SILVA, M.A. **Sistema de Classificação Fuzzy para Áreas Contaminadas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

TECNOHIDRO. **Extração Multifásica**. Disponível em: <<http://tecnohidro.com.br/portfolio-posts/extracao-multifasica-mpe/>> Acesso em: 22 de setembro de 2023.

TECPAM Engenharia e Instalação de Postos Ltda. **Relatório de Investigação de Passivo Ambiental Detalhada com Análise de Risco à Saúde Humana Nº 184**. Aparecida de Goiânia, GO, julho de 2021.

_____. **Relatório de Ensaio Piloto e Instalação do Sistema de Remediação Ambiental C.I. nº 090**. Aparecida de Goiânia, GO, abril de 2022.

_____. **Relatório de Ampliação do Sistema de Remediação de Passivo Ambiental C.I. nº 497**. Aparecida de Goiânia, GO, novembro de 2022.

_____. **Relatório de Investigação de Passivo Ambiental Detalhada com Avaliação de Risco à Saúde Humana (RIPAD) C.I. nº 497**. Aparecida de Goiânia, GO, novembro de 2022.

RIYIS, M. T. et al. **Águas Subterrâneas**, v. 33, n. 3, p. 247-257, 2019.

WILLIAMS, S. D.; LADD, D. E.; FARMER, J. J. **Fate and transport of petroleum hydrocarbons in soil and ground water at Big South Fork National River and Recreation Area, Tennessee and Kentucky, 2002-2003: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5104**. 29 p. 2006. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/sir/2005/5104/PDF/SIR20055104.pdf>>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.