

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

LARISSA AVELINO DE SOUZA DOS SANTOS

HIERARQUIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO PARA ÁREA DE  
ESTUDO CONTAMINADA POR HIDROCARBONETOS POLICÍCLICOS  
AROMÁTICOS POR MEIO DE MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO POR  
ATRIBUIÇÃO DE PESOS E CRITÉRIOS

São Carlos

2019



LARISSA AVELINO DE SOUZA DOS SANTOS

HIERARQUIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO PARA ÁREA DE  
ESTUDO CONTAMINADA POR HIDROCARBONETOS POLICÍCLICOS  
AROMÁTICOS (HPA) POR MEIO DE MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO  
POR ATRIBUIÇÃO DE PESOS E CRITÉRIOS

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao curso de Engenharia  
Ambiental, da Escola de Engenharia de  
São Carlos, da Universidade de São  
Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da  
Rocha

Co-orientador: Alexandre Muselli Barbosa

São Carlos

2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da  
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

A237h      Avelino de Souza dos Santos, Larissa  
                Hierarquização de técnicas de remediação para  
                área de estudo contaminada por Hidrocarbonetos  
                Policíclicos Aromáticos (HPA) por meio de método de  
                tomada de decisão por Atribuição de Pesos e Critérios.  
                / Larissa Avelino de Souza dos Santos; orientador  
                Marcelo Monteiro da Rocha . São Carlos, 2019.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, 2019.

1. áreas contaminadas. 2. hidrocarbonetos  
policíclicos aromáticos. 3. técnicas de remediação. 4.  
solos. I. Título.

# FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Larissa Avelino de Souza dos Santos**

Data da Defesa: 31/05/2019

Comissão Julgadora:

Resultado:

**Marcelo Monteiro da Rocha (Orientador(a))**

**Alexandre Muselli Barbosa - Presidente da Banca (Co-orientador(a))**

**Jéssica Pelinsom Marques**

**Lázaro Valentin Zuquette**

Aprovada

Aprovada



**Prof. Dr. Marcelo Zaiat**

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação



## **Agradecimentos**

Primeiramente gostaria de agradecer à todas as mulheres que lutaram pela igualdade de oportunidades em ambos os gêneros para que eu pudesse estudar e me formar Engenheira Ambiental.

À todos que lutaram para que a Universidade de São Paulo se mantivesse pública, para que assim o meu acesso e o de muito outros/as estudantes a essa universidade fosse possível.

Aos meu pais, Marcia Margarete de Souza e Alexandre Eduardo Avelino dos Santos, que foram essenciais em vários sentido para que esse trabalho acontecesse.

Ao meu companheiro Rafael Simões por todo apoio e suporte em muitos momentos.

Ao orientador Marcelo Monteiro da Rocha, pelo apoio durante o trabalho realizado.

Ao co-orientador Alexandre Muselli pela orientação e dedicação a esse trabalho, por todo o conhecimento compartilhado e pelos conselhos como profissional no campo de áreas contaminadas.

Ao Leandro Oliveira e outros/as colegas da Arcadis, pelos também conhecimentos compartilhados sobre a teoria e a prática da temática de Gerenciamento de Áreas Contaminadas.



## RESUMO

SANTOS, L. A. S. Hierarquização de técnicas de remediação para área de estudo contaminada por Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA) por meio de método de tomada de decisão por Atribuição de Pesos e Critérios. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Ambiental. 77 páginas.

As áreas contaminadas por substâncias tóxicas e cancerígenas são comuns em atuais e antigas zonas industriais e apresentam riscos ecotoxicológicos. A aplicação do Gerenciamento de Áreas Contaminadas tem sido essencial para gerir as áreas que podem apresentar risco e necessitam da aplicação de técnicas de remediação. O presente trabalho visou avaliar a aplicabilidade de técnicas de remediação para a área de estudo Unidade de Tratamento de Madeira (UTM) Jaguaré, antiga usina de tratamento de dormentes, considerando a contaminação de HPA. Através de sondagens de reconhecimento, análises físicas do solo e ensaios de alta resolução por *Laser Induced Fluorescence* (LIF), foi possível caracterizar o meio físico e elaborar modelos tridimensionais estratigráficos e de distribuição de contaminação. Foi aplicado a metodologia de Tomada de Decisão por Atribuição de Pesos e Critérios, tendo como base toda a caracterização do problema para a seleção das melhores técnicas de remediação aplicadas ao cenário. Os resultados mostraram que a utilização de ferramentas de modelagem facilitaram a visualização e entendimento do problema em um menor tempo. O método de tomada de decisão se mostrou efetivo, tanto para a seleção de técnicas isoladas, quanto para a aplicação de técnicas conjugadas. A técnica de Atenuação Natural Monitorada se mostrou como a mais recomendada considerando o cenário de uso futuro da área de estudo, e a junção das técnicas de *Termal Conduction Heating* e *Soil Vapor Extraction*, como combinação mais indicada para a área de estudo em um cenário em que seja necessária maior eficiência de remediação.

Palavras-chave: áreas contaminadas; hidrocarbonetos policíclicos aromáticos; técnicas de remediação; solos;



## **ABSTRACT**

SANTOS, L. A. Hierarchization of remediation techniques in a study area contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) through the Attribution of Weights and Criteria decision-making method. Undergraduate thesis presented to the School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, as part of the requirements to acquire the title of Environmental Engineer. 77 pages.

Areas contaminated by toxic and carcinogenic substances are common in former and current industrial zones posing many ecotoxicological risks, and the application of a Contaminated Area Management method has been essential for managing the areas that may be at risk and require the implementation of remediation techniques. This Undergraduate thesis evaluates the applicability of different remediation techniques considering the contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons at the Unidade de Tratamento de Madeira (UTM), a former railroad tie treatment plant. Through soil borings recognition, physical analysis and high resolution tests by Laser Induced Fluorescence (LIF), it was possible to characterize the physical environment and to construct three-dimensional models of stratigraphy and contamination distribution. Based on the characterization of the problem, the methodology applied for the selection of the best remediation technique was the Weights Attribution and Criteria decision-making method. The outcomes revealed the benefits on visualizing and understanding the problems that modelling tools can have. The decision-making method proved to be effective for the selection of isolated and conjugated techniques, indicating the Monitoring Natural Attenuation as the best application, considering the future use scenario of study area, and pointing to the combination of Thermal Conduction Heating and Soil Vapor Extraction as the most suitable for the study area in a scenario where greater remediation efficiency is required.

**Keywords:** contaminated areas; polycyclic aromatic hydrocarbons; remediation techniques; soil;



## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1 - FLUXOGRAMA DO GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS.</b> .....	5
<b>FIGURA 2 – NÚMERO DE ÁREAS CONTAMINADAS POR ESTADO.</b> .....	10
<b>FIGURA 3 - EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE ÁREAS CONTAMINADAS E REABILITADAS NO BANCO DE DADOS DA CETESB.</b> .....	11
<b>FIGURA 4 - MAPA DA RELAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS E REABILITADAS DOS ESTADO DE SÃO PAULO.</b> .....	12
<b>FIGURA 5 - NÚMERO DE ÁREAS CONTAMINADAS E REABILITADAS DAS PRINCIPAIS CIDADES DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.....</b>	13
<b>FIGURA 6 - NÚMERO DE ÁREAS CONTAMINADAS E REABILITADAS POR SETOR DE ATIVIDADE.....</b>	13
<b>FIGURA 7 - INCIDÊNCIA DE CONTAMINANTES NAS ÁREAS CONTAMINADAS E REABILITADAS.....</b>	14
<b>FIGURA 8 - INCIDÊNCIA DE CONTAMINANTES POR ATIVIDADE ECONÔMICA.....</b>	15
<b>FIGURA 9 – CLASSIFICAÇÃO DAS ÁREAS CADASTRADAS EM RELAÇÃO AO STATUS DO GERENCIAMENTO.....</b>	16
<b>FIGURA 10 - PORCENTAGEM DA APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO EM RELAÇÃO AO TOTAL DE AÇÕES DE REMEDIAÇÃO NO ESTADO DE SÃO PAULO.</b> .....	19
<b>FIGURA 11 – ESQUEMA DO FUNCIONAMENTO DE ZONA REATIVA IN-SITU.</b> .....	24
<b>FIGURA 12 - LOCALIZADA DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	29
<b>FIGURA 13 - FOTO DA ÁREA DE TANQUES E AUTOCLAVES EM 2002 DA UTM JAGUARÉ.....</b>	30
<b>FIGURA 14 – FOTO ÁREA DE 2004 DA UTM JAGUARÉ COM EVIDÊNCIAS DE MANCHAS DE ÓLEO.....</b>	31
<b>FIGURA 15 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE SONDAGEM E DE AMOSTRAGEM.....</b>	32
<b>FIGURA 16 – ABERTURA DE AMOSTRADOR E DESCRIÇÃO TÁTIL-VISUAL DO SOLO COLETADO.....</b>	33
<b>FIGURA 17 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE SONDAGEM POR CRAVAÇÃO DIRETA PARA APLICAÇÃO DA TÉCNICA LIF.....</b>	35
<b>FIGURA 18 - EXEMPLO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO ATRIBUIÇÃO DE PESOS E CRITÉRIOS.....</b>	37
<b>FIGURA 19 – SEQUÊNCIA ESTRATIGRÁFICA OBSERVADA NA ÁREA .....</b>	39
<b>FIGURA 20 – MODELO ESTRATIGRÁFICO DA ÁREA DE INTERESSE .....</b>	42
<b>FIGURA 21 – CORTE VERTICAL DO MODELO ESTRATIGRÁFICO DA ÁREA DE INTERESSE DE ACORDO COM A PROFUNDIDADE.....</b>	42
<b>FIGURA 22 – FATIAMENTO DA PROJEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DA CONTAMINAÇÃO .</b>	43
<b>FIGURA 23 – MODELO MATEMÁTICO DO VOLUME DE SOLO IMPACTO PELO CONTAMINANTE (645 M<sup>3</sup>). ....</b>	43
<b>FIGURA 24 – DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO EM RELAÇÃO A PROFUNDIDADE NA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	44
<b>FIGURA 25 – INTEGRAÇÃO DO MODELO ESTRATIGRÁFICO E DE DISTRIBUIÇÃO DA CONTAMINAÇÃO .....</b>	46

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1 - REATIVIDADE DOS OXIDANTES COM CONTAMINANTES FREQUENTEMENTE ENCONTRADOS.....</b>	22
<b>TABELA 2 - GRANULOMETRIA DO SOLO DA ÁREA.....</b>	33
<b>TABELA 3 – PESOS ADOTADOS PARA A CATEGORIZAÇÃO DAS TÉCNICAS.....</b>	36
<b>TABELA 4 – DELIMITAÇÃO DAS CAMADAS ESTRATIGRÁFICAS.....</b>	38
<b>TABELA 5 – DELIMITAÇÃO DAS CAMADAS ESTRATIGRÁFICAS.....</b>	38
<b>TABELA 6 - GRANULOMETRIA DO SOLO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	40
<b>TABELA 7 – MONITORAMENTO DO NÍVEL DA ÁGUA DOS POÇOS DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	40
<b>TABELA 8 – RESULTADOS ANALÍTICOS DE AMOSTRA DE SOLO COLETADA NO CENTRO DE MASSA – FASE ADSORVIDA DE CONTAMINANTE .....</b>	45
<b>TABELA 9 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO CONSIDERANDO A CARACTERIZAÇÃO DO MEIO E CONTAMINANTE.....</b>	48
<b>TABELA 10 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO POR ATRIBUIÇÃO DE PESOS E CRITÉRIOS PARA A ÁREA DE ESTUDO.....</b>	53
<b>TABELA 11 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO POR ATRIBUIÇÃO DE PESOS E CRITÉRIOS PARA A APLICAÇÃO DE TÉCNICAS CONJUGADAS. ....</b>	55



## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Áreas Contaminadas.....	1
1.2	Gerenciamento de Áreas Contaminadas .....	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1	Gerenciamento de Áreas Contaminadas .....	5
2.2	Panorama do Gerenciamento de Áreas Contaminadas .....	9
2.3	<i>Brownfields</i> .....	16
2.4	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs).....	17
2.5	Métodos de Remediação aplicados à HPAs .....	18
3.	OBJETIVOS.....	27
3.1	Objetivos Gerais.....	27
3.2	Objetivos Específicos .....	27
4.	JUSTIFICATIVA.....	28
5.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	29
5.1	Unidade de Tratamento de Madeiras Jaguaré (UTM – Jaguaré) .....	29
5.1.1	Uso futuro da área de estudo .....	31
5.2	Caracterização do Meio Físico.....	31
5.3	Caracterização da Fonte Ativa .....	34
5.4	Avaliação de alternativas de intervenção.....	35
6.	RESULTADOS E DISCUSSÂO .....	38
6.1	Caracterização do Meio Físico.....	38
6.2	Modelo de Distribuição da Contaminação.....	43
6.2.1	Integração dos modelos.....	45
6.3	Avaliação de alternativas de intervenção.....	46
7.	CONCLUSÂO .....	57
8.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....	59

## 1. INTRODUÇÃO

A execução de atividades produtivas através dos processos industriais acarreta diversos impactos ao meio ambiente. Desde o início da revolução industrial, iniciada no século XVIII, atividades de extração de matérias primas do meio, manufatura de produtos e transporte dos bens produzidos, têm causado sérios impactos ao meio ambiente. A produção de modo industrial pressupõe o uso de maquinário, produção em larga escala, consumo intensivo de matérias primas extraídas e a criação e uso intensivo de produtos químicos, tanto como matéria prima no processo de produção e também como combustível, lubrificante e outras substâncias necessária na manutenção e funcionamento do maquinário industrial (KIELY, 1998).

Além dos impactos causados pela extração de matérias primas do meio de forma desenfreada, e tantos outros impactos causados pelo modo de produção industrial, o meio ambiente é receptor direto das substâncias químicas liberadas como efluente dos processos de produção, vazamento das tubulações, tanques e maquinários industriais ou também através de acidentes ambientais (POTT; ESTRELA, 2015).

Um dos impactos ambientais causados pela liberação dessas substâncias químicas no meio ambiente é a contaminação das áreas receptoras dessas substâncias, que inclui as matrizes solo e água subterrânea. Esse fato por sua vez pode acarretar o contato dos seres vivos potencialmente receptores com esses compostos, como humanos que se abastacem da água subterrânea contaminada ou trabalhadores sujeitos a inalação das substâncias na forma de vapor, por exemplo.

As instituições da sociedade contemporânea têm desenvolvido métodos para gerenciar os passivos ambientais causados pelo modo de produção industrial, de modo a controlar os riscos à saúde humana e ecológicos.

### 1.1 Áreas Contaminadas

Desde meados da década de 70 têm sido instauradas políticas que visam o controle de atividades que possam causar danos ao meio ambiente, o que por sua vez pode causar danos à saúde humana. A *Resource Conservation and Recovery*

Act (RCRA), legislação estabelecida nos Estados Unidos em 1976, foi um marco em relação a criação e execução de legislação referentes ao gerenciamento de áreas contaminadas no mundo (USITIC, 2004).

No Brasil, a Resolução nº 273 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) em 2000 foi a primeira legislação a considerar de forma específica a contaminação da água subterrânea e do solo. Ela especificamente foi elaborada com o intuito de regulamentar o licenciamento ambiental de postos de combustíveis e a prevenção e controle da poluição e, cita de forma específica em seu texto que a resolução foi elaborada “Considerando que os vazamentos de derivados de petróleo e outros combustíveis podem causar contaminação de corpos d’água subterrâneos e superficiais, do solo e do ar;” (CONAMA nº273, de 29 de novembro de 2000). A partir dessa legislação, outras leis, decretos e resoluções em âmbito federal, estadual e municipal foram elaboradas a fim de controlar as atividades potencialmente poluidoras de forma a evitar contaminações.

Em 8 de julho de 2009, o conceito de áreas contaminadas é definido pela Lei nº 13.577, também apresentada pelo decreto nº 59263 de 05/06/2013, como “área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria que contenha quantidades ou concentrações de matéria em condições que causem ou possam causar danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger.”

## **1.2 Gerenciamento de Áreas Contaminadas**

Diante desse cenário de contaminação das áreas receptoras das atividades potencialmente poluidoras foi necessário o desenvolvimento de metodologias que possibilitassem o gerenciamento dessas áreas, além das legislações que já haviam sido elaboradas. Em 2001 a CETESB publicou a primeira lista de valores orientadores para Solos e Águas Subterrâneas para o Estado de São Paulo, contemplando 37 substâncias e o Relatório de Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo (CETESB, 2019). Em 28 de dezembro de 2009 foi apresentada a Resolução CONAMA nº 420, que estabelece valores orientadores em relação a qualidade ambiental do solo também discorre sobre estratégias de gerenciamento de áreas contaminadas. Além disso, instituiu o cadastramento e disponibilização de forma pública da relação de

áreas contaminadas por estado é instituído por essa legislação.

Em São Paulo, o gerenciamento de áreas contaminadas passa frequentes atualizações, sendo o documento mais recente foi publicado em 07 de fevereiro de 2017, formalizado e detalhado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) com a emissão da Decisão de Diretoria (DD) nº038/2017, sendo a legislação ativa para o estado de São Paulo referente ao gerenciamento de áreas contaminadas e a principal referência nacional em relação a esse tema. Segundo a DD nº038:

O Gerenciamento de Áreas Contaminadas visa reduzir, para níveis aceitáveis, os riscos a que estão sujeitos a população e o meio ambiente em decorrência de exposição às substâncias provenientes 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).

A metodologia de gerenciamento de áreas contaminadas apresentada na DD nº038/2017 institui etapas sequenciais, em que cada etapa depende das informações obtidas na etapa anterior, visando a eficiência dos recursos consumidos nas atividades relacionadas as áreas contaminadas.

A metodologia utilizada no GAC se sustenta a partir de dois processos principais, o primeiro é o processo de Identificação de Áreas Contaminadas, em que são investigados os históricos de uso e ocupação das áreas, investigadas as fontes de contaminação e delimitadas as plumas de contaminação e avaliados os riscos proveniente da área contaminada para que seja avaliada a necessidade da aplicação de medidas de intervenção. Fazem parte desse processo as etapas de Identificação de Áreas com Potencial de Contaminação; Priorização de Áreas com Potencial de Contaminação; Avaliação Preliminar; Investigação Confirmatória; Investigação Detalhada e Avaliação de Risco a Saúde Humana e Ecológica.

O segundo processo é a Reabilitação de Áreas Contaminadas, em que, a partir dos dados obtidos na etapa anterior, são definidas e colocadas em prática, se necessárias, medidas de intervenção e monitoramento da eficiência dessas medidas

para a reabilitação da área. Fazem parte desse processo as etapas Elaboração do Plano de Intervenção; Execução do Plano de Intervenção; Monitoramento para Encerramento.

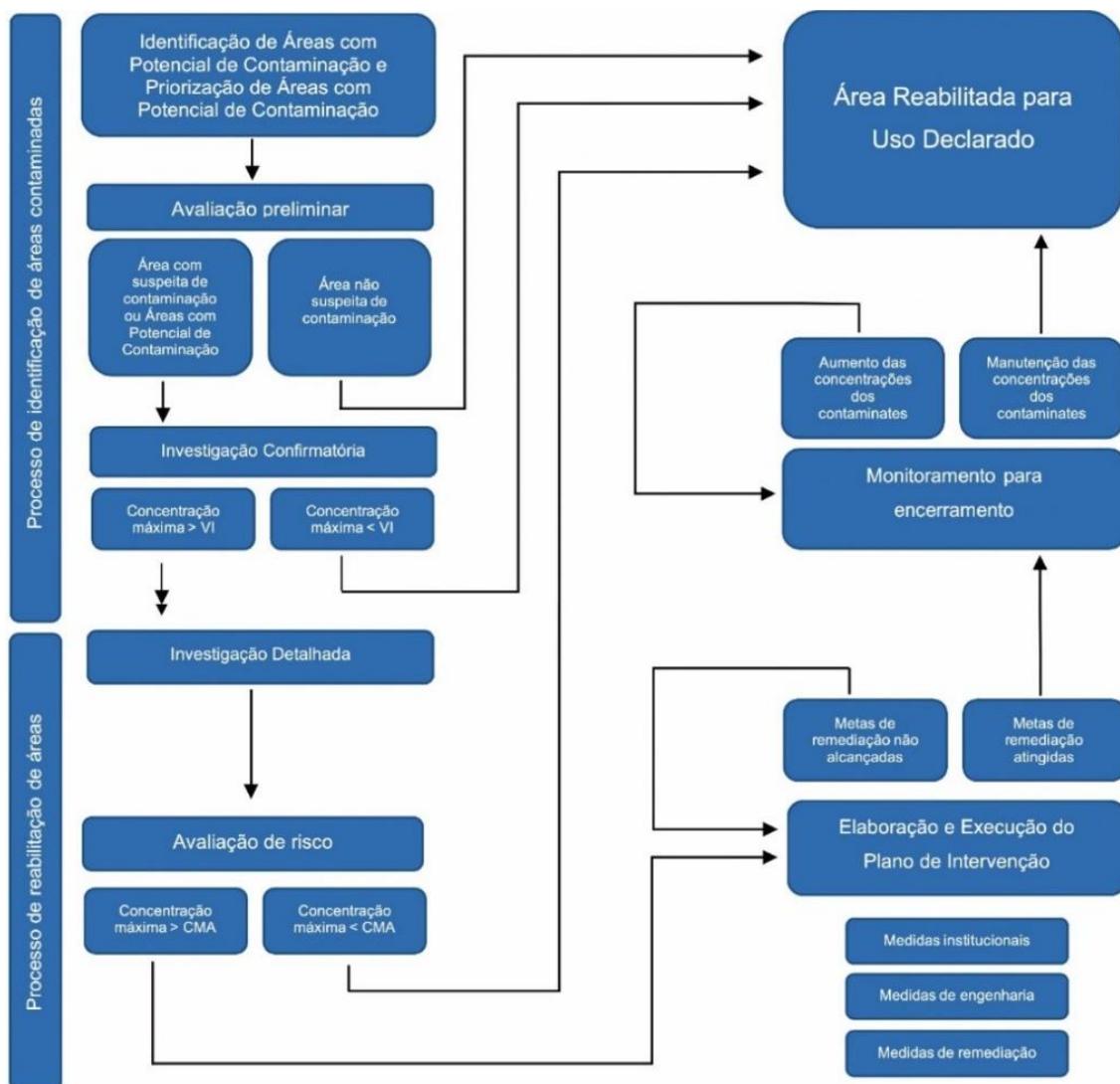
Para a elaboração e execução do Plano de intervenção é importante que a seleção de técnicas de remediação seja feita de forma embasada, considerando as características do meio físico e do contaminante. Esse trabalho, apresenta a avaliação e interpretação dos dados do meio e do contaminante de forma a caracterizar a área de estudo, e sugere o uso de metodologia para embasar a escolha da técnica de remediação para o plano de ação.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Gerenciamento de Áreas Contaminadas

Considerando a necessidade do gerenciamento das áreas contaminadas do Estado de São Paulo, foi publicada a Decisão de Diretoria nº38/2017 pela CETESB, sendo a publicação mais recente relacionada ao tema. Nesse documento é sugerido o gerenciamento das áreas contaminadas a partir do processos Identificação de Áreas Contaminadas e Reabilitação de Áreas Contaminadas.

**Figura 1 - Fluxograma do Gerenciamento de Áreas Contaminadas.**



Fonte: Autora, com base nos dados da CETESB 2017.

## **2.1.1 Identificação de Áreas Contaminadas**

### **2.1.1.1 Identificação de Áreas com Potencial de Contaminação e Priorização de Áreas com Potencial de Contaminação**

A Identificação de Áreas com Potencial de Contaminação é executada pela CETESB, de forma a atender o Decreto 59.263/2013, considerando a relação de atividades potencialmente poluidoras e geradora de áreas contaminadas. A partir disso, ocorre a Priorização de Áreas com Potencial de Contaminação, também realizada pela CETESB, com base em critérios para a priorização da Relação de Áreas com Potencial de Contaminação. As áreas que forem selecionadas a partir dos critérios entraram na Relação de Áreas com Potencial de Contaminação Prioritárias, lista que é atualizada e publicada pela CETESB anualmente.

### **2.1.1.2 Avaliação Preliminar**

Nessa etapa ocorre a investigação das atividades ocorridas na área, das possíveis fontes potenciais de contaminação e fatos que contribuem com a suspeita de contaminação da área. Caso sejam encontrados indícios de contaminação a área é classificada como Área Suspeita de Contaminação (AS), é criado o Plano de Investigação Confirmatória e o gerenciamento da área segue para a fase da investigação confirmatória. Nessa fase o modelo conceitual inicial da área é elaborado a partir de informações de histórico de uso e ocupação da área e de seu entorno, histórico de uso da água subterrânea no raio de 500 m do site, informações sobre geologia, pedologia e hidrologia, possíveis outras atividades ambientais realizadas na área.

### **2.1.1.3 Investigação Confirmatória**

Essa etapa é executada nos casos em que houver suspeita de contaminação, ou caso a área seja convocada pela CETESB para etapa de investigação confirmatória ou ainda, a área se enquadrar em pelo menos um dos cenários definidos como área com potencial de contaminação, definido pelo artigo 27 do Decreto nº59.263/2013 e visa confirmar a presença ou ausência de contaminantes, através da investigação ambiental das possíveis fontes de contaminação encontradas ou de outros indícios de contaminação. As informações obtidas nessa

fase irão aprimorar o modelo conceitual elaborado que será utilizado na fase de investigação detalhada, caso seja comprovada a contaminação. Além disso, a Investigação Confirmatória deverá ocorrer sempre após a fase de Avaliação Preliminar e basear-se no Plano de Investigação Confirmatória.

Os Valores de Intervenção estabelecidos pela CETESB (CETESB, 2016) e, para os parâmetros não contemplados pela CETESB, os Valores de Intervenção definidos na *Regional Screening Levels (RSLs)*, desenvolvidos pela *United States Environmental Protection Agency (US EPA)* (EPA, 2019a), serão a referência para que sejam comparados os valores obtidos através das análises das amostragens realizadas na etapa de investigação confirmatória. Caso as concentrações obtidas sejam maiores que os valores de referência, e/ou produto em fase livre, substâncias ou situações que possam representar perigo e/ou resíduos perigosos dispostos em desacordo com as normas vigentes sejam encontrados, a área será classificada como Área Contaminada sob Investigação (ACI).

#### **2.1.1.4 Investigação Detalhada**

A Investigação Detalhada é a etapa em que são exploradas de forma minuciosa as características do meio físico e do contaminante a fim de se aperfeiçoar o modelo conceitual do cenário em questão e desenvolver a avaliação de risco. Para isso serão analisadas as características do meio físico, definidas as substâncias químicas de interesse, as concentrações dessas nas diferentes camadas de solo e aquíferos, delimitadas horizontalmente e verticalmente as plumas de contaminação, identificadas as unidades hidroestratigráficas da área e sentido de fluxo da água subterrânea e seu comportamento quanto ao transporte dos contaminantes comparativamente em relação ao tempo.

Ainda nessa fase, devem ser identificadas as possíveis vias de contato do contaminante com os receptores, tanto na área contaminada quanto em áreas externas, considerando a posterior elaboração da fase de Avaliação de Risco.

#### **2.1.1.5 Avaliação de Risco**

Essa etapa tem como objetivo identificar os possíveis riscos aos receptores que podem entrar em contato com os contaminantes por diferentes vias. Através da

definição das Concentrações Máximas Aceitáveis (CMA), que levam em consideração as características dos contaminantes, as vias de exposição do receptor, e as características da exposição, é definido a necessidade da elaboração e execução de uma Plano de Intervenção e as metas de remediação, que ocorre quando as concentrações dos contaminantes no meio são superiores as CMAs. Nesse caso a área é classificada como Área Contaminada com Risco Confirmado (ACRi).

No caso de receptores humanos, deverá ser realizada a Avaliação de Risco a Saúde Humana. No caso do risco proveniente da área contaminada afetar ou possivelmente afetar ecossistemas naturais, deverá ser realizada Avaliação de Risco Ecológico. Essa deverá ser elaborada considerando o ecossistema afetado, e os impactos possivelmente causados em relação ao espaço e ao tempo, sendo necessária a elaboração de uma metodologia específica para cada Avaliação de Risco Ecológico.

## **2.1.2 Reabilitação de Áreas Contaminadas**

### **2.1.2.1 Elaboração e Execução do Plano de Intervenção**

O Plano de Intervenção deverá ser elaborado a fim atingir as metas de remediação definidos na Avaliação de Risco a Saúde Humana, através de medidas institucionais, medidas de engenharia e medidas de remediação, que devem ser escolhidas e aplicadas considerando o modelo conceitual elaborado até o momento. Também deverá ser definida a duração da aplicação dessas medidas.

Quando medidas de remediação fizerem parte do plano de intervenção, será necessário que o Projeto Executivo do Sistema de Remediação, que possui informações como dimensionamento do sistema de remediação e informações sobre área a ser atingida pelo sistema de remediação, esteja presente no plano de intervenção.

### **2.1.2.2 Monitoramento para Encerramento**

Essa etapa se aplica os casos em que após a Avaliação de Risco os valores das CMAs estão acima das concentrações dos contaminantes encontrados no site,

após a execução de medidas de controle institucional ou medidas de engenharia quando forem indicadas apenas essas no plano de intervenção e após o atingimento das metas de remediação nos casos em que houve medidas de remediação. Nesses casos a área é classificada como Área em Processo de Monitoramento para Encerramento.

Na fase de monitoramento é definido um determinado número de campanhas de monitoramento, a depender do cenário da contaminação da área. Se ao final da execução de todas as campanhas previstas for observado a manutenção dos valores das concentrações dos contaminantes, a área é classificada com Área Reabilitada para Uso Declarado. Caso não sejam mantidas as concentrações dos contaminantes na área durante as campanhas de monitoramento, deverão ser avaliadas as medidas a serem tomadas, considerando a reativação do sistema de remediação em casos em que foram aplicados métodos de remediação, e/ou a aplicação de outras medidas, visando a reabilitação da área para uso.

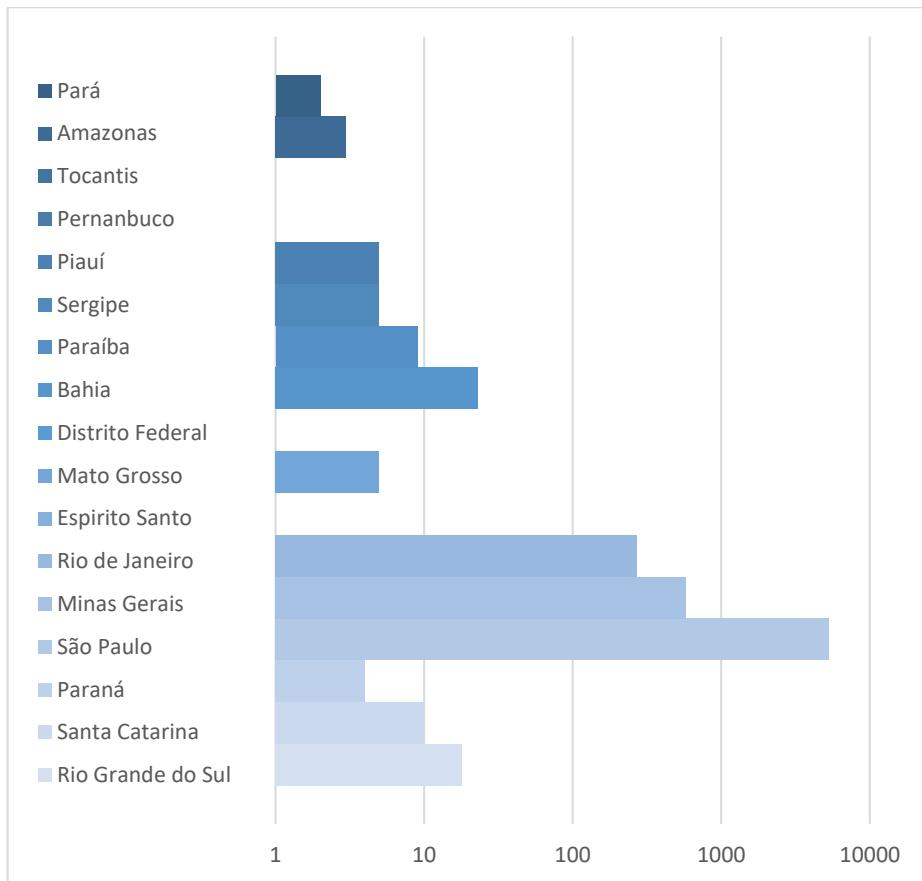
## **2.2 Panorama do Gerenciamento de Áreas Contaminadas**

A Resolução Conama nº420 (CONAMA, 2019), institui o banco de dados nacional sobre áreas contaminadas, para que se tornem públicas a informações e dados dos estados referentes a áreas contaminadas, através dos dados que os órgãos estaduais de meio ambiente possuem. Apesar disso, apenas os estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo possuem banco de dados das áreas contaminadas dos estados.

Em 2016, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) desenvolveu uma pesquisa sobre o cenário de áreas contaminadas no Brasil, a partir das contribuições e dados dos órgãos ambientais dos estados e da literatura e notícias publicadas (IPT, 2016).

De acordo com o gráfico acima, os estados com os maiores números de áreas contaminadas é São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. Esses valores são influenciados principalmente pelo nível de urbanização e desenvolvimento de indústrias nesses estados. Porém, a observação do baixo número de áreas contaminadas nos estados deve ser feita com cautela, visto que a ausência de banco de dados sobre áreas contaminadas desses estados.

**Figura 2 – Número de áreas contaminadas por estado.**



Fonte: IPT, 2016.

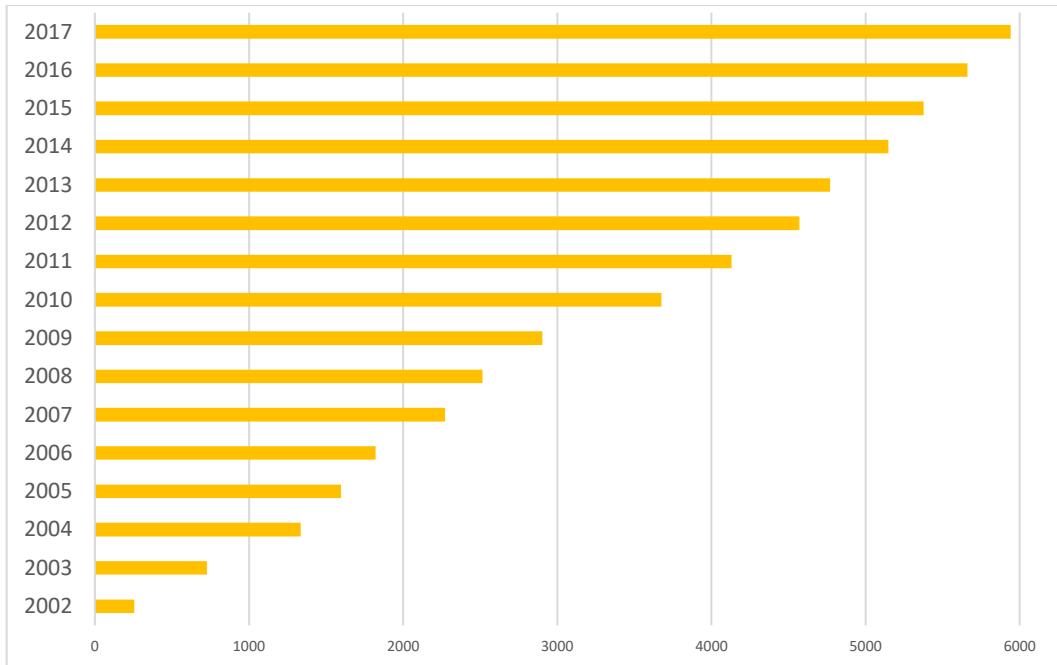
O Estado de São Paulo possui atualmente 5942 áreas contaminadas e reabilitadas cadastradas no banco de dados da Cetesb, sendo o estado que mais possui áreas contaminadas no Brasil (CETESB, 2017). Esses números estão relacionados a industrialização do estado, que representa 32,1 % do PID industrial do Brasil e possui 26,1 % do total de empresas ativas no setor industrial do Brasil. (CNI, 2016).

Em São Paulo, a Cetesb atualiza anualmente a Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas dos Estado de São Paulo<sup>1</sup>.

No gráfico abaixo é possível observar a evolução do número de áreas contaminadas e reabilitadas cadastradas no banco de dados da Cetesb.

<sup>1</sup> Até a data de elaboração desse trabalho não foram divulgados os dados relativos à atualização do ano de 2018 do banco de dados da Cetesb e por isso estão sendo utilizados os dados referentes a relação de áreas contaminadas e reabilitadas de 2017.

**Figura 3 - Evolução do número de áreas contaminadas e reabilitadas no banco de dados da Cetesb.**



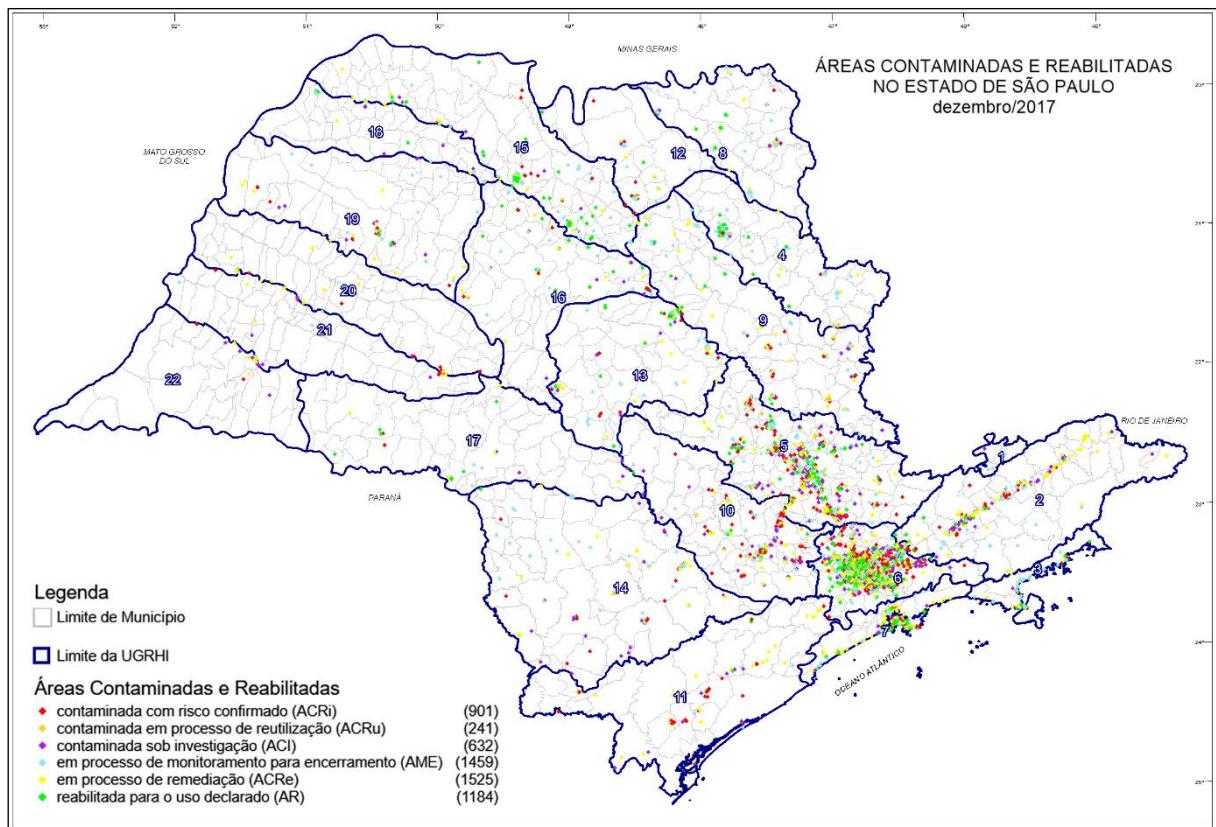
Fonte: IPT, 2014 – adaptado.

A partir do mapa é possível observar que a região que possui o maior número de áreas contaminadas e reabilitadas é a região metropolitana de São Paulo, região localizada na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRH) Alto tietê. Além disso, o eixo São Paulo – Campinas, que está na UGRH Piracicaba/Capivari/Jundiaí e o eixo São Paulo – Rio de Janeiro, na UGRH Paraíba do Sul, possuem também números significativo de áreas contaminadas e reabilitadas.

Na **Figura 4** é possível observar o mapa representativo da relação de áreas contaminadas da Cestesb de 2017.

A região metropolitana de São Paulo engloba, além da cidade de São Paulo, outras cidades com alto nível de urbanização e diversas plantas industriais em seus territórios, principalmente as cidades de Santo André, São Bernardo, São Caetano, Diadema e Mauá. Na **Figura 5** é possível observar os valores das áreas contaminadas e reabilitadas dessas cidades. A soma dos cadastros relativos a essas cinco cidades é maior do que 1/5 dos cadastros referentes a cidade de São Paulo.

**Figura 4 - Mapa da relação de áreas contaminadas e reabilitadas dos Estado de São Paulo.**

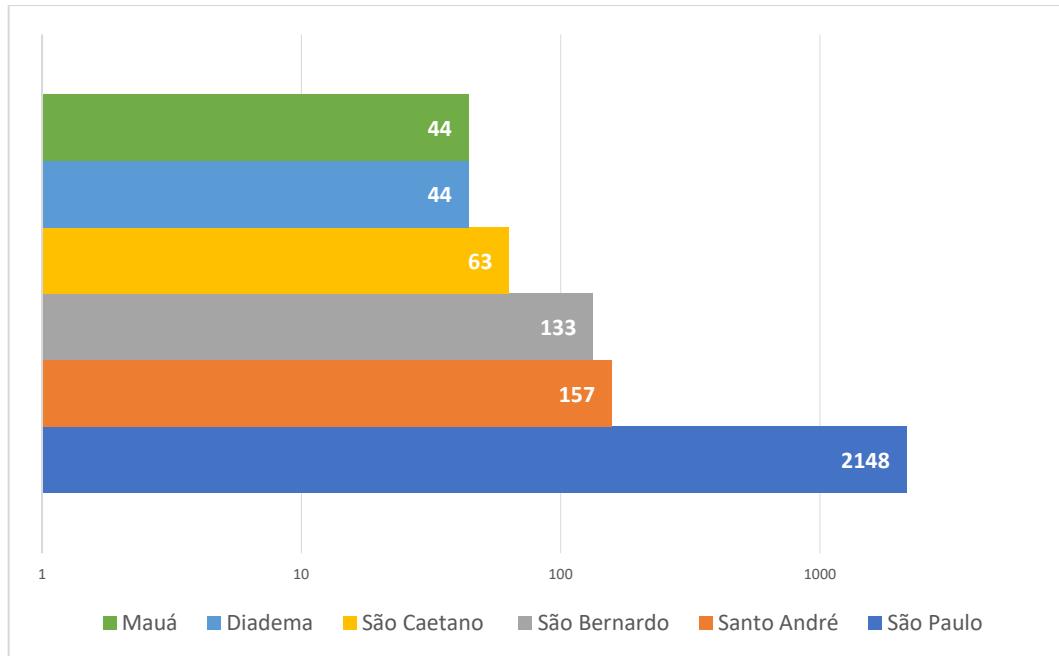


Fonte: CETESB, 2017.

Em relação a atividade econômica das áreas contaminadas e reabilitadas, os postos de combustíveis varejistas, ou seja, aqueles que comercializam combustíveis principalmente para automóveis leves, são responsáveis pela maior parte das áreas cadastradas, cerca de 72,1 %. Seguido dos poços de combustível estão as atividades industriais, que representam aproximadamente a quinta parte das áreas cadastradas (18,7 %). Os setores de comércio, resíduos e outros, que engloba acidentes, agricultura e atividades e não identificadas, representa 549 áreas (9,2 %).

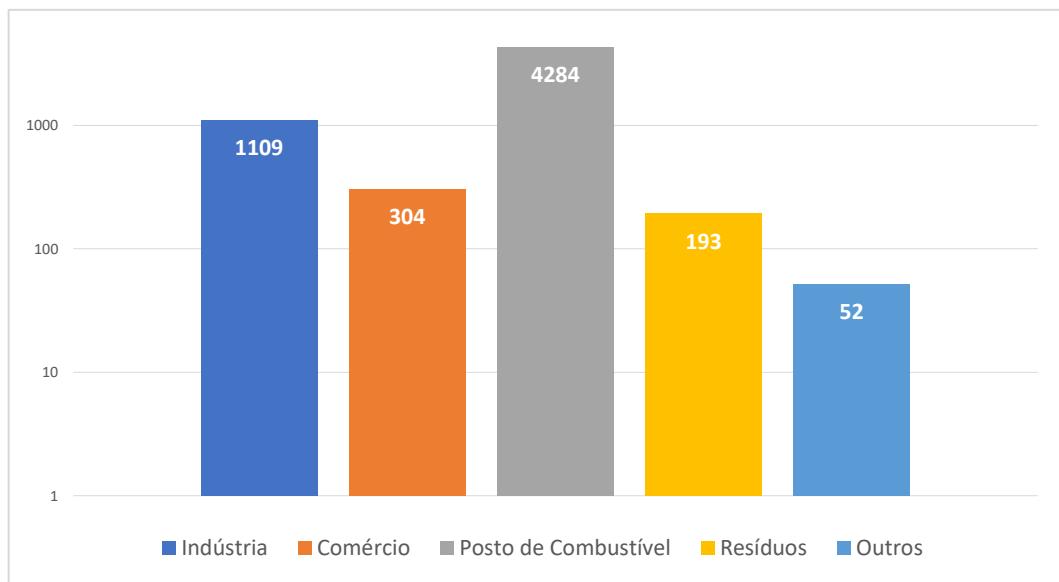
Os dados referentes a presença de contaminantes das áreas cadastradas está diretamente relacionada aos números das atividades econômicas. De todas as áreas cadastradas com contaminação de compostos solventes aromáticos, 4050 áreas, 3518 áreas são relacionadas a atividade de poços de combustível, o que representa 87,08 % da áreas contaminadas por solventes aromáticos.

**Figura 5** - Número de áreas contaminadas e reabilitadas das principais cidades da região metropolitana de São Paulo.



Fonte: Autora, com base nos dados da CETESB 2017.

**Figura 6** - Número de áreas contaminadas e reabilitadas por setor de atividade.

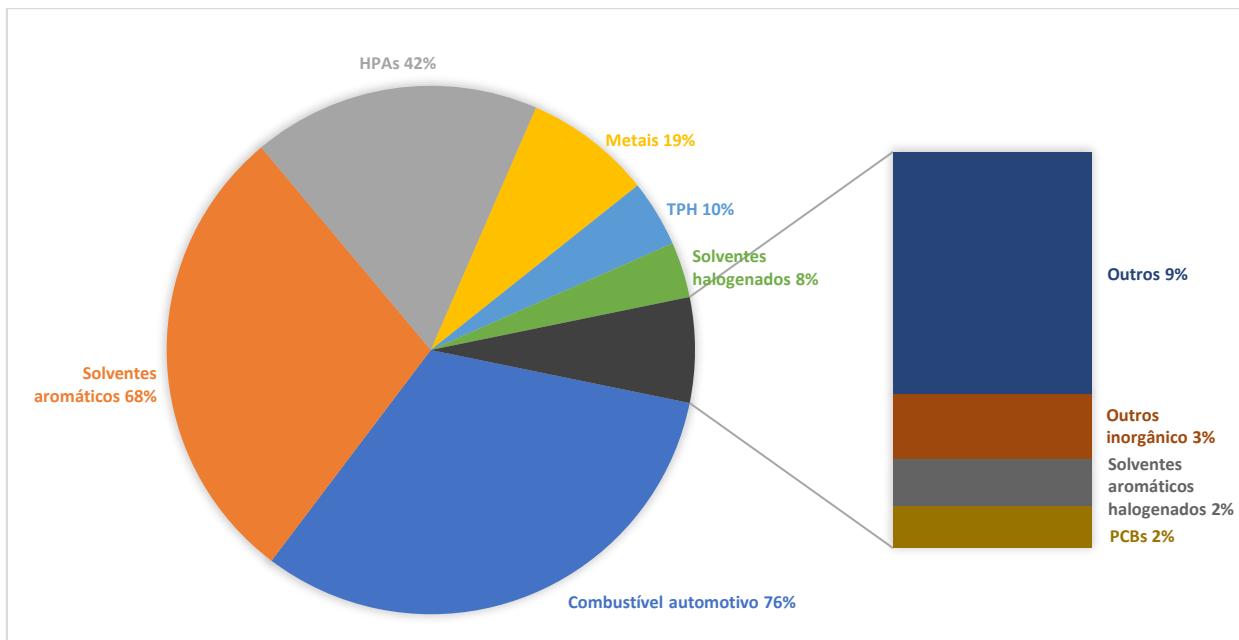


Fonte: Autora, com base nos dados da CETESB 2017.

O **Figura 7** mostra incidência dos contaminantes nas áreas cadastradas. É possível observar que os contaminantes combustível automotivo, solventes aromáticos e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) possuem as maiores incidências de contaminantes. Todos os contaminantes presentes no meio devem

ser investigados e controlado o riscos causados por eles, quando necessário. Apesar disso, é importante citar que os solventes halogenados, que englobam os compostos clorados, devem receber maior atenção devido ao alto risco associado a esses compostos e sua alta capacidade de volatilização.

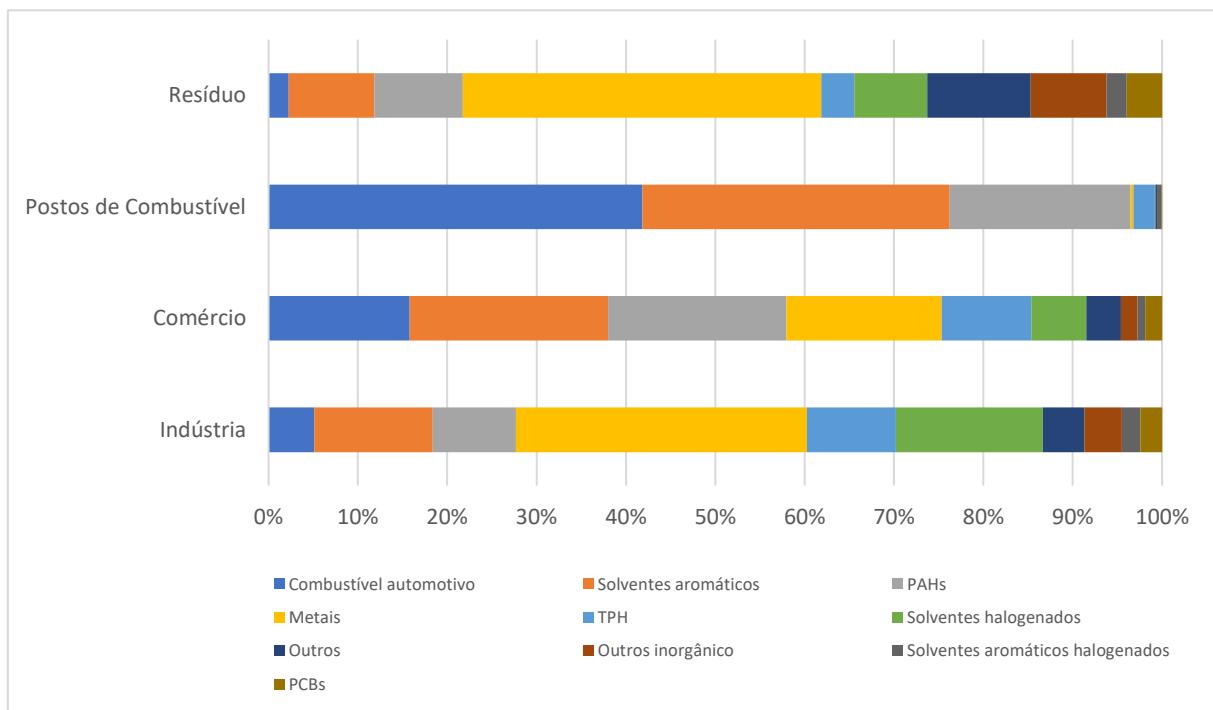
**Figura 7** - Incidência de contaminantes nas áreas contaminadas e reabilitadas.



Fonte: Autora, com base nos dados da CETESB 2017.

Na **Figura 8** pode ser observada a incidência dos contaminantes com a atividade econômica. Os postos de combustível são contaminados em mais de 95 % das vezes por compostos derivados de petróleo, devido ao fato do armazenamento e comercialização dos combustíveis. Já as atividades de comércio e a industria possuem maior diversidade em relação a incidência de contaminantes, possivelmente devido a variedade dos produtos armazenados e comercializados em áreas relacionadas ao comércio e as diferentes atividades industriais.

**Figura 8 - Incidência de contaminantes por atividade econômica.**



Fonte: Autora, com base nos dados da CETESB 2017.

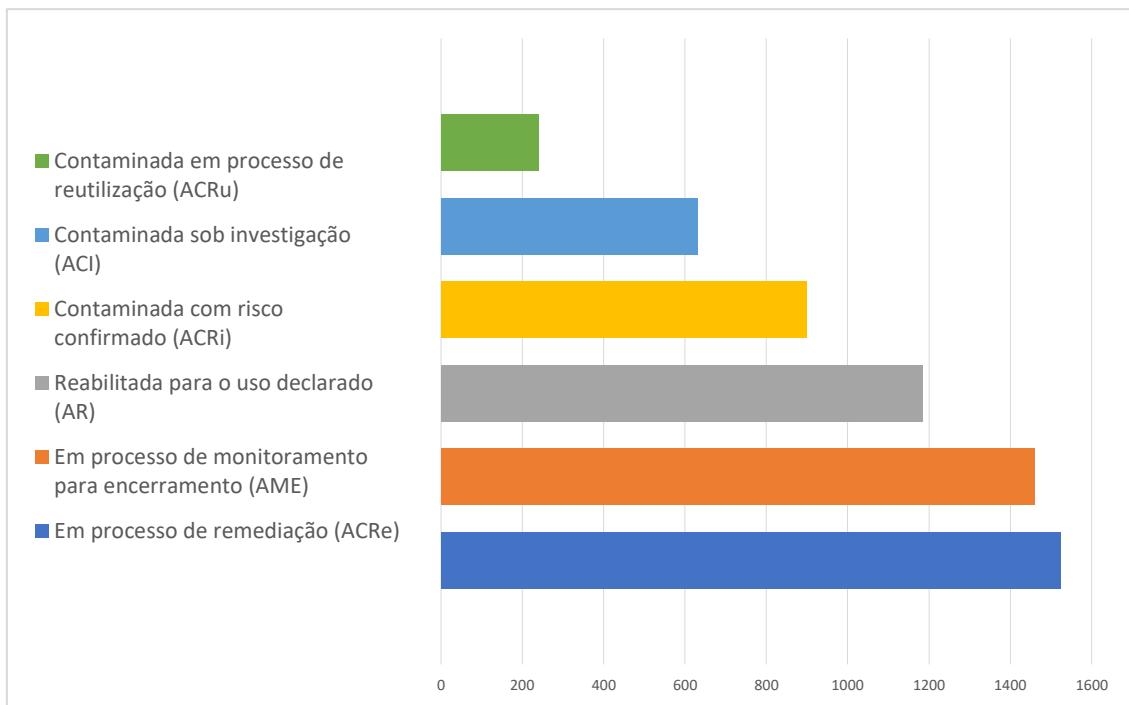
No **Figura 9** é apresentada o cenário da classificação de áreas contaminadas. A classificação com o maior número de áreas cadastradas é a *Área Contaminada em Processo de Remediação (ACRe)*, com 25,7 % (1525) das áreas. Logo após as classificações de *Área Contaminada em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME)* e *Área Contaminada Reabilitada para Uso Declarado (AR)*, com respectivamente 1459 e 1184 áreas cadastradas, somam, junto as ACRes 70,2 % das áreas cadastradas.

Esse números exemplificam a amadurecimento do gerenciamento de áreas contaminadas no estado de São Paulo e a importancia das ações da Cetesb. É importante citar que nesses dados não foram consideradas as área em etapas de avaliação preliminar, consideradas Áreas Suspeitas de Contaminação (AS), segundo a classificação da DD 38/2017 da Cetesb, e em investigação confirmatória, consideradas Áreas com Potencial de Contaminação, segundo a classificação presente no Decreto 59.263 de 5 de junho de 2013 em que a contaminação ainda não foi confirmada ou não existe.

Diante desse cenário é importante que os métodos de investigação ambiental, os conceitos de avaliação de risco, as técnicas de remediação ambiental, através de estudos, pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias, sejam aperfeiçoadas e

detalhadas para os diferentes modelos conceituais. Os planos de gerenciamento e ação dos sites baseados nessas etapas devem ser sustentáveis em relação ao custo e apropriado considerando os fatores técnicos para então serem aplicados aos gerenciamento de áreas contaminadas.

**Figura 9 – Classificação das áreas cadastradas em relação ao status do gerenciamento.**



Fonte: Autora, com base nos dados da CETESB 2017.

### 2.3 Brownfields

Brownfields são áreas cuja expansão, redesenvolvimento ou reutilização pode ser complicada devido a presença real ou potencial de substâncias perigosas, poluentes ou contaminantes (EPA, 2019b).

As áreas caracterizadas como *brownfields* podem ser revitalizadas para uso social, como habitações sociais, praças públicas, centros cultuais, museus, ou ainda reintegradas ao ciclo econômico pelo reuso como área industrial e/ou comercial (*International Council for Local Environmental Initiatives - ICLEI*, 2013). Independente do uso proposto para essas áreas, é necessário que seja realizadas investigações a fim de se verificar possíveis contaminações e realizar as ações de remediação, caso necessário.

Além de áreas em que estiveram em atividade industriais, empresas comerciais inoperantes, minas desativadas, depósitos de resíduos e estruturas como

ferrovias, portos e usinas, que após sua desativação sofreram degradação natural, são considerados *brownfields* (VASQUES, 2006).

Nos Estados Unidos, devido ao grande número de *brownfields*, a importância dessas áreas e a degradação real ou potencial causadas por elas ao meio ambiente, foi criado um programa de revitalização dessas áreas, gerenciado pela *EPA*. Segundo a *EPA* (2019), o programa foi elaborado para capacitar os estados, comunidades e outras partes interessadas em redesenvolvimento econômico a trabalhar em conjunto de maneira oportuna para prevenir, avaliar, limpar com segurança e reutilizar de maneira sustentável os *brownfields*.

No Brasil, as maiores concentrações de *brownfields* encontram-se nas cidades de São Paulo, Rio de Janeiro e Cubatão. As principais causas para o surgimento dessas áreas no Brasil são a globalização, reestruturação industrial, declínio dos ciclos econômicos e a desconcentração industrial, fômeno comum na região metropolitana de São Paulo, em que as plantas industriais são transferidas para o interior (VASQUES, 2006).

O fechamento de indústrias e outras atividades que culminam no surgimento de *brownfields* podem causar problemas socio-ambientais que atingem diretamente as comunidades vizinhas a essas áreas. Além de ocupações irregulares nas áreas, despejo de esgotos irregulares, existe a possibilidade de contaminação de solo e água subterrânea, que podem atingir a comunidades através das diferentes vias de contato e causar sérios problemas de saúde.

## 2.4 Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs)

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) são compostos químicos constituídos apenas por átomos de carbono e hidrogênio, que combinados na forma de dois ou mais anéis aromáticos dão origem a diferentes compostos, pelo número de anéis e posições possíveis. Existe um grande número de HPAs identificados pela IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), porém há 16 HPAs mais importantes devido a função industrial, ambiental e toxicológica (JACQUES et al, 2007).

Segundo EPA, 2009, os HPAs ocorrem naturalmente em carvão, petróleo bruto e gasolina. Eles também são produzidos quando carvão, petróleo, gás,

madeira, lixo e tabaco são queimados. O cozimento em alta temperatura também pode formar HPAs na carne e outros alimentos. Os HPAs gerados a partir dessas fontes podem se ligar a pequenas partículas no ar e se deslocarem pelo ar ambiente. O naftaleno é um HPA que é fabricado nos Estados Unidos.

A contaminação do solo por HPA é comumente relacionada à atividade industrial, devido à produção dos HPAs (para fabricação de corantes, de fibras sintéticas, de preservantes de madeira, etc.), à produção de carvão vegetal, à extração e gaseificação do carvão mineral e aos processos de extração, transporte, refino, transformação e utilização do petróleo e de seus derivados. derivados (BANFORTH; SINGLETON, 2005 *apud* JACQUES et al, 2007).

Devido a complexidade da estrutura química dos HPAs, da sua baixa solubilidade em água (solubilidade antraceno = 0,073mg L<sup>-1</sup>) e da tendência de sorção à fase sólida do solo, as contaminações por HPA no solo tornam-se recalcitrantes e permanecem por longos períodos no ambiente, o que aumenta a possibilidade de exposição de seres vivos a esses compostos (JACQUES et al, 2007).

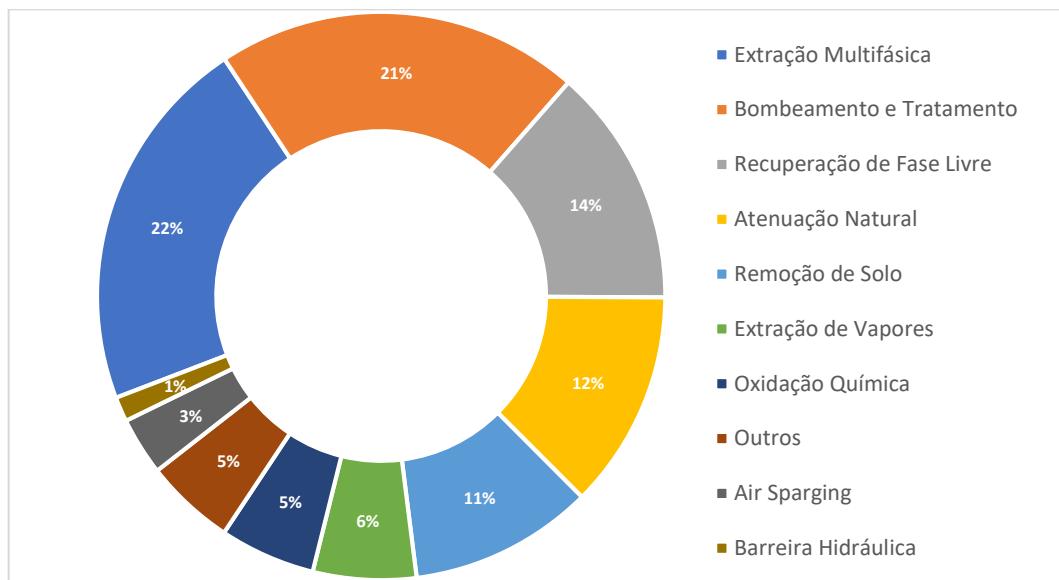
Sobre as estruturas moleculares dos 16 HPAs definidos como poluentes prioritários pela EPA, são moléculas relativamente estáveis, com baixa solubilidade e baixa volatilidade, exceto pequenos componentes como naftaleno. Sua lipossolubilidade é alta, Os HPAs possuem longas meias-vidas em meios geológicos. São considerados poluentes orgânicos persistentes (POPs) no meio ambiente, e a persistência aumenta conforme o número de anel e grau de condensação (HENNER et al, 2007).

## 2.5 Métodos de Remediação aplicados à HPAs

Diante do cenário do gerenciamento de áreas contaminadas e em muitos casos a necessidade da aplicação de medidas de remediação, surgiu a engenharia de remediação, que é o desenvolvimento e aplicação de métodos que removam do meio ambiente contaminantes liberados no solo desde o início da revolução industrial (SUTHERNAN, 2017). Técnicas de remediação têm sido desenvolvidas, aplicadas e aprimoradas. A **Figura 10** apresenta as porcentagens de aplicação das

técnicas no estado de São Paulo.

**Figura 10 -** Porcentagem da aplicação das técnicas de remediação em relação ao total de ações de remediação no estado de São Paulo.



Fonte: CETESB, 2017.

### 2.5.1 Técnicas *In Situ*

As técnicas *in situ* são aplicadas diretamente na área contaminada, considerando a área fonte da contaminação e toda a porção impactada. As tecnologias *in situ* podem envolver a aplicação de processos químicos, biológicos ou físicos à subsuperfície para degradar, remover ou imobilizar contaminantes sem remover o solo. Essas técnicas possuem benefícios comparados as técnicas *ex-situ*, pois podem ser utilizadas para contaminação em camadas do solo profundas ou aquíferos profundos e geralmente têm menor custo (EPA, 2006).

#### 2.5.1.1 Extração Multifásica

A remediação de áreas contaminadas a partir da extração multifásica funciona a partir da combinação de uma bomba alocada no fundo do poço que permite a extração de contaminante em fase livre, fase dissolvida e em vapor (EPA, 2019b).

É o método de remediação mais empregado no estado de São Paulo, representando 22 % dos métodos de remediação aplicados (CETESB, 2017).

A remoção do contaminante na fase vapor ocorre através de uma vazão de ar na subsuperfície induzida pela aplicação de vácuo através de um poço instalado na

zona de interesse. Essa extração do vapor do solo ocorre na camada semi-saturada da subsuperfície ou da zona vadosa (EPA, 1999). Em relação a remoção de vapor, esse método é chamado de *Soil Vapor Extraction (SVE)*, e a combinação desse método com outros métodos que possibilitam a remoção de compostos em fase dissolvida e fase livre constituem a extração multifásica.

A remoção do contaminante na fase dissolvida ocorre pela método *Pump – and – Treat*, que envolve a extração da água subterrânea contaminada através de poços de extração e o tratamento *ex-situ*. O fluxo de água subterrânea é criado a partir do rebaixamento do nível da água que ocorre devido ao bombeamento da água subterrânea (EPA, 1999).

Além disso, através do rebaixamento do nível da água o contaminamento na fase vapor é exposto e removido através do vácuo aplicado na bomba.

O método de extração multifásica tem sido amplamente usado para remediação de solo e água subterrânea contaminados por compostos halogenados voláteis e compostos derivados de petróleo. Além disso, esse método pode se utilizado em diferentes tipos de solo, porém funciona melhor nos solos de baixa ou média permeabilidade (EPA, 1999).

### **2.5.1.2 Atenuação Natural Monitorada**

A Atenuação Natural é a degradação dos compostos contaminantes a partir de processos biológicos, físicos e químicos naturais do meio em que se encontra o contaminante (SANTOS; UGARI; SANTOS, 2008). A Atenuação Natural é um método de remediação passivo e ocorre *in – situ*. Através da avaliação das condições físico-químicas dos solo e a presença de microorganismos é possível avaliar a taxa de atenuação natural dos contaminantes.

Esse método tende a ter a eficiência de degradação mais baixa em comparação com outros métodos de remediação comumente usados. Apesar disso possui baixo custo de implantação e manutenção, visto que é apenas necessário a instalação de poços de monitoramento para o acompanhamento das taxas de degradação dos contaminantes.

A atenuação natural, se identificadas as condições favoráveis a sua

ocorrência no meio, possui boa eficiência para contaminantes não-halogenados voláteis e semi voláteis e para compostos derivados de petróleo (EPA, 2013).

O método da Atenuação Natural Monitorada representa cerca de 12% dos métodos de remediação aplicados no Estado de São Paulo (CETESB, 2017).

### 2.5.1.3 Oxidação Química

O método da Oxidação Química funciona a partir de reações redox dos contaminantes que o degradam para compostos não perigosos ou menos perigosos, e que podem diminuir a mobilidade do contaminante e/ou torna-ló inerte (EPA, 2019b).

Assim como em outros métodos de remediação comumente aplicados, a Oxidação Química pode ocorrer através da injeção de um composto, que no caso desse método possui a função de agente oxidante na reação redox.

As substâncias oxidantes já usualmente utilizadas são o dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ), hipoclorito de sódio ( $\text{NaOCl}$ ) ou de cálcio ( $\text{Ca(OCl)}_2$ ), peroxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), ozônio ( $\text{O}_3$ ) e permanganato de potássio ( $\text{KMnO}_4$ ), que é considerado um forte oxidante para compostos orgânicos clorados. É importante considerar que a injeção de oxidantes base de clorados deve ser feita com cuidado devido ao potencial de formação de compostos clorados subprodutos das reações redox (SUTHERSAN, 2017).

Na **Tabela 01** abaixo é possível observar a relação de reatividade das substâncias oxidantes com os principais contaminantes. Nota-se a grande variedade de contaminantes que tem alto índice de reação com os substâncias oxidantes mais comumente utilizadas.

Uma série de fatores devem ser observados quando considerada a aplicação do método de oxidação química. Segundo EPA (2006), esses fatores são:

- Se o agente oxidante é capaz de degradar as substâncias de interesse e se é favorável a utilização de um catalisador para aumentar a eficiência do processo;
- Qual é a demanda de oxidação do solo, que é a medida de como a ocorrência natural de materiais no solo podem afetar a ação dos

oxidantes injetados. Em caso de oxidantes não seletivos e solo com alta demanda de oxidante, o custo da aplicação poderá aumentar devido ao maior volume de oxidante requerido;

- O pH natural do solo. Para a ação de alguns oxidantes é necessário um meio ácido. Caso o ambiente seja básico, pode ser necessária a aplicação de alguma substância ácida;
- Taxa de decomposição do oxidante. Algumas substâncias oxidantes podem se manter longos períodos no solo sem reagir enquanto outras naturalmente se decompõem algumas horas após a injeção;
- A profundidade em que se encontra o contaminante, o estado físico do contaminante e sua taxa de decomposição também devem ser consideradas;

**Tabela 1** - Reatividade dos Oxidantes com Contaminantes frequentemente encontrados.

Oxidante	Alto	Moderado	Baixo
Ozônio	PCE, TCE, DCE, CV, MTBE, CB, HPAs, Fenóis, Explosivos, PCBs, Pesticidas	BTEX, CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> ,	TC, CHCl <sub>3</sub> ,
Peroxido de Hidrogênio	PCE, TCE, DCE, CV, CB, BTEX, MTBE, Fenóis	DCA, CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , HPAs, Explosivos	TCA, TC, CHCl <sub>3</sub> , PCBs, Pesticidas
Peroxido de Calcio	PCE, TCE, DCE, CV, CB	DCA, CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	TC, CHCl <sub>3</sub>
Reagente de Fenton	PCE, TCE, DCE, CV CB, BTEX, MTBE, Fenóis	DCA, CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , HPAs, Explosivos	TCA, TC, CHCl <sub>3</sub> , PCBs, Pesticidas
Permanganato de Sódio/Potássio	PCE, TCE, DCE, CV, TEX, HPAs, Fenóis, Explosivos	Pesticidas	Benzeno, DCA, CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , TCA, TC, CB, CHCl <sub>3</sub> , PCBs
Persulfato de Sódio (Ferro)	PCE, TCE, DCE, CV, CB, BTEX, Fenóis	DCA, CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , CHCl <sub>3</sub> , HPAs, Explosivos, Pesticidas	TCA, TC, PCBs
Persulfato de Sódio (Calor)	Todos CVOCs, BTEX, MTBE, HPAs, Fenóis, Explosivos, PCBs, Pesticidas		

Fonte: Adaptado de EPA (2006).

O método da oxidação química é inovador e altamente eficiente. Para sua aplicação devem ser considerados, além dos fatores citados acima, as características do solo, como sua granulometria e composição mineralógica.

#### 2.5.1.4 Biorremediação

Essa técnica funciona a partir do uso de microrganismos ou vegetação (fitorremediação) para transformação química de compostos perigosos para menos perigosos. Muitos microrganismos, principalmente bactérias e fungos, naturalmente presentes no meio podem causar reações químicas, como até alterar a valência de metais perigosos, tornando-os menos perigosos e/ou diminuindo sua mobilidade.

A biorremediação microbiana pode ocorrer sob condições aeróbicas e anaeróbicas e de forma natural ou estimulada. A biorremediação natural ocorre a partir da degradação dos contaminantes pelos microrganismos presentes no meio sem que as condições do meio sejam alteradas. A atenuação natural monitorada (MNA) muitas vezes depende da biorremediação natural como um importante mecanismo de degradação. Nos casos de biorremediação melhorada, a biodegradação é facilitada pela manipulação do ambiente microbiano. Normalmente, o ambiente é manipulado por alterações do meio físico, como ar, substratos orgânicos, nutrientes e outros compostos, cujo objetivo é que a disponibilidade dos substratos das reações de degradação não sejam os limitantes para sua ocorrência. Também pode ocorrer aumento dos processos de biorremediação pela adição de culturas microbianas no meio (EPA, 2006).

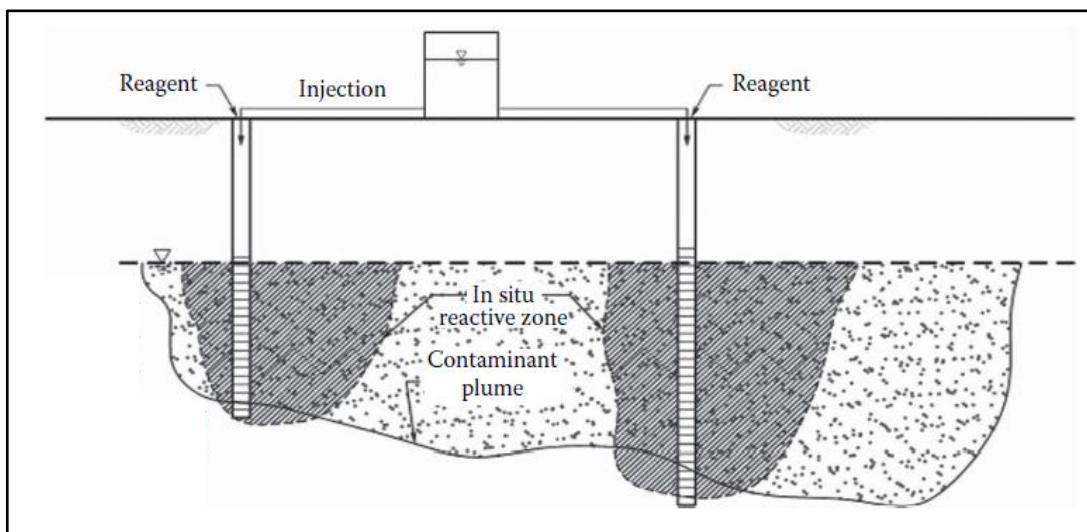
Um dos principais métodos de biorremediação é *Bioventing*, que pressupõe a injeção de gás na subsuperfície de modo a melhorar a eficiência da biodegradação. O gás pode ser injetado para manter a subsuperfície aeróbica ou anaeróbica, ou para fornecer um substrato (EPA, 2006).

Outro método comumente usado é a criação de Zonas Reativas *In Situ* (IRZs) para o melhoramento da biorremediação (*Enhance Bioremediation*), como apresentado na **Figura 11**. Esse método tem por objetivo a criação de meios propícios para processos de oxidação, redução e processos biogeoquímicos naturais, através da injeção de ar e/ou soluções, que disponibilizem no meio substratos para a atividade microbiana, visando a degradação dos contaminantes na subsuperfície (SUTHERSAN, 2017).

A injeção para criação de zonas reativas é um método comumente usado para aumentar a eficiência da biodegradação de contaminantes formados por HPA. Deve-se ter cuidado em relação as características do meio, pois solos com baixa

condutividade hidráulica, requerem altas pressões de injeção, o que por vezes pode causar fraturas nas camadas mais compactadas. As fraturas por sua vez, se tornam caminhos preferenciais para o composto injetado, dificultando o controle formação da barreira reativa na camada e raio de influência pré definido.

**Figura 11 – Esquema do funcionamento de Zona Reativa *In-Situ*.**



Fonte: SUTHERSAN, 2017.

### 2.5.1.5 Tratamento Térmico

O tratamento de dessorção térmica de contaminantes funciona a partir do aquecimento do solo contaminado. As principais tecnologias de tratamento térmico in situ são: aquecimento por resistência elétrica, injeção e extração de vapor, aquecimento condutivo, aquecimento por radiofrequência e vitrificação. Com exceção da vitrificação, todas essas tecnologias de tratamento dependem da adição de calor no solo para o aumento da eficiência remoção de contaminantes voláteis e semi-voláteis. A vitrificação in situ é única entre as tecnologias térmicas nas quais as temperaturas utilizadas irão vitrificar o solo e pode ser utilizada para contaminantes não voláteis, incluindo metais e materiais radioativos (EPA, 2006).

A extração de vapor é parte integrante do sistema de remediação para garantir a remoção e tratamento de contaminantes mobilizados. A extração líquida também é usada durante a injeção de vapor e, às vezes, com outras tecnologias térmicas, quando as taxas de fluxo de água subterrânea são altas e / ou quando o contaminante que está sendo recuperado é semi-volátil (SANTOS, 2008).

Ainda, segundo EPA, 2006, o aumento da temperatura também aumenta a viscosidade e a solubilidade e diminui a adsorção, o que aumenta a taxa de recuperação de VOCs e SVOCs. Para alguns NAPLs de SVOC, como o creosoto, a redução da viscosidade pode ser um mecanismo importante para o aumento da recuperação de contaminantes

As tecnologias termais têm sido cada vez mais usadas por apresentarem ótimos níveis de eficiência, em comparação com outros métodos de remediação. Algumas tecnologias termais não são indicadas para aplicação em zona saturada, já que a energia a ser aplicada para obtenção de um raio de influência adequado geralmente é muito alta, o que impossibilita a aplicação dessas técnicas nessas situações (SUTHERSAN, 2017).

## 2.5.2 Técnicas *Ex Situ*

A aplicação das técnicas *ex-situ* requerem a extração do volume a ser tratado, no caso da água subterrânea ocorre o bombeamento e no caso do solo é necessária a escavação e o tratamento do solo contaminada pode ocorrer *on-site*, na própria área em que foi removido, ou *off-site*, transportado para outro lugar para receber tratamento.

### 2.5.2.1 Bombeamento e Tratamento

O método de bombeamento e tratamento, conhecidos também como *Pump – and Treat*, é amplamente utilizado individualmente ou em conjunto com outros métodos de remediação.

É um método amplamente empregado, representando 21% dos métodos de contaminação empregados no estados de São Paulo (CETESB, 2017).

Por meio do bombeamento da água subterrânea para superfície (tratamento *ex-situ*), os contaminantes são removidos da água subterrânea através de tratamento físico, químico e/ou biológico em sistema de remediação alocado próximos aos poços de extração de água. Esse método pode ser utilizado também para a contenção das plumas de contaminação, através da instalação de poços de extração de água subterrânea contaminada de forma linear, constituindo uma

barreira hidráulica, que diminui modifica as características do fluxo da água subterrânea (SANTOS; UGARI; SANTOS, 2008).

Esse método pode ser utilizado para a remoção de diversos tipos de contaminantes dissolvidos na água subterrânea. É geralmente utilizado quando a fonte ativa da contaminação já foi removida ou estabilizada (EPA, 2012).

#### **2.5.2.2 Remoção de Solo**

O método de remoção do solo ocorre através da escavação do solo contaminado, que é posteriormente tratado de forma *ex-situ*. Pode ocorrer ou não a alocação de solo não contaminado na área em que houve a escavação.

Existem diferentes métodos de destinação adequada do solo contaminado, como incineração, disposição final em aterro para resíduos perigosos e co-processamento, por exemplo (SANTOS; UGARI; SANTOS, 2008).

No estado de São Paulo esse método representa 11% dos métodos de remediação empregados (CETESB, 2017).

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivos Gerais**

Avaliar a aplicabilidade de técnicas de remediação para a intervenção em uma área contaminada por Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

1. Caracterizar o meio físico;
2. Avaliar a distribuição dos contaminantes na área de estudo a partir dos modelos gerados pelas ferramentas de investigação de alta resolução;
3. Avaliar a aplicabilidade de técnicas de remediações para aplicação no caso UTM-Jaguaré através de método de tomada de decisão, considerando as características do meio e da distribuição e características do contaminante.

#### 4. JUSTIFICATIVA

O estado de São Paulo possui quase 6000 áreas contaminadas e reabilitadas, segundo a CETESB (2017). Grande parte desse número ocorre em *Brownfields*. A contaminação do solo e água subterrânea podem alcançar os receptores através de diferentes vias de contato e causar problemas de saúde.

Dessa forma é necessário que as áreas contaminadas sejam geridas conforme o fluxo de etapas proposto no Gerenciamento de Áreas Contaminadas e, caso a contaminação apresente riscos, que sejam aplicados medidas de intervenção.

A definição dos planos de intervenção é um desafio, pois deve considerar a eficiência necessária para que sejam eliminados os riscos causados pela contaminação, o custo de implantação e manutenção das medidas de remediação, tornando possível a aplicação da técnica de remediação escolhida e os impactos ambientais causados, a fim de se evitar alterações negativas significativas no meio.

Assim, é importante que a seleção das técnicas de remediação para os planos de intervenção considerem as características do meio e do contaminante, a distribuição do contaminante e também os critérios de eficiência, custo e impacto ambiental. As metodologias de tomada de decisão podem ser utilizadas para embasar a seleção das técnicas, considerando todos os fatores relevantes de acordo com o grau de importância para cada caso.

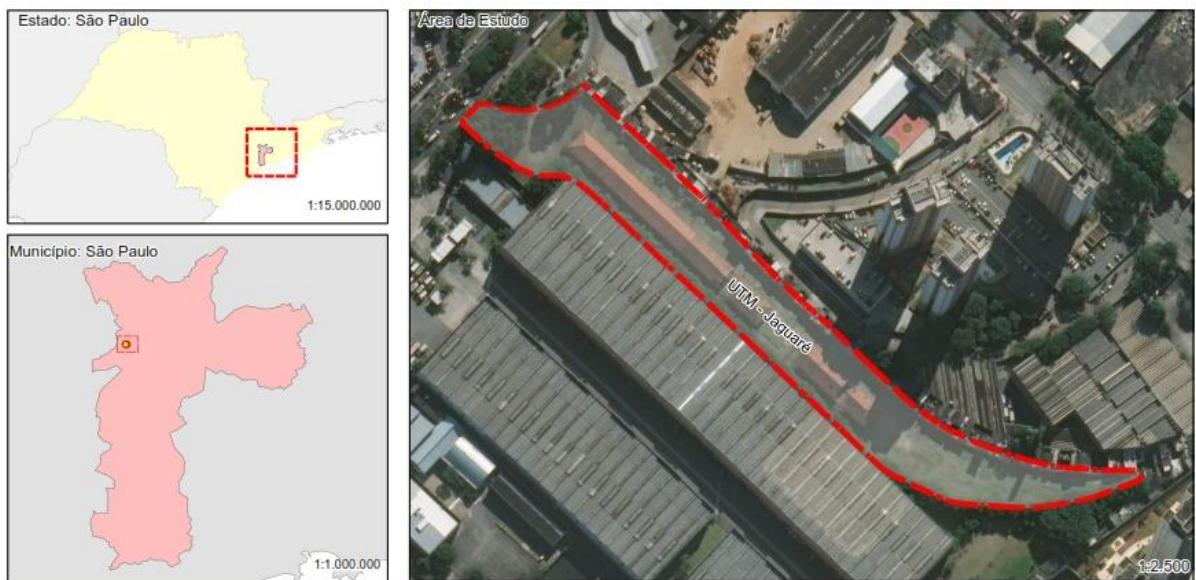
Dessa forma esse trabalho objetiva avaliar a aplicabilidade das técnicas de remediação para a definição do plano de intervenção mais adequado para a área de estudo, necessário para o gerenciamento correto dessa área contaminada. A partir das informações do meio físico, do contaminante e considerando o uso futuro da área foi aplicado o método de tomada de decisão considerando critérios relevantes para a definição da técnica de remediação mais adequada para o caso.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 Unidade de Tratamento de Madeiras Jaguaré (UTM – Jaguaré)

O terreno do caso em questão se localiza no bairro do Jaguaré, zona oeste da cidade de São Paulo, SP. A **Figura 12** apresenta o mapa de localização do terreno.

**Figura 12** - Localizada da área de estudo.



Fonte: Acervo IPT.

A operação da Usina de Tratamento de Madeiras do Jaguaré ocorreu entre os anos de 1977 e 1997, sendo depois desmobilizadas as atividades. Em 2003 foi encerrada a utilização da área, e a área encontra-se atualmente desativada.

As atividades relacionadas à preservação de madeira foram encerradas em 1997, porém os tanques utilizados para armazenamento de preservantes foram removidos apenas em 2003.

Durante as atividades da Usina de Tratamento de Madeiras do Jaguaré, as madeiras passavam pelo tratamento químico em autoclaves, onde ocorria a injeção de uma substância preservativa sob pressão na madeira.

No tratamento de dormentes, os principais produtos utilizados eram o Arseniato de Cobre Cromatado (CCA) e o creosoto, que é um preservante usado para proteção de madeira composto por uma mistura complexa de mais de duzentos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos produzidos pela carbonização a alta temperatura do carvão, que possui alta densidade e baixa volatilidade (ZABEL;

MORRELL, 1992).

No processo não havia tratamento de efluentes e todo volume das sustâncias que restavam eram reutilizados. Apesar disso eram comuns derramamentos de caráter accidental dos produtos químicos no chão, principalmente durante a retirada dos dormentes das autoclaves.

Para esse estudo será considerado a contaminação por HPA no solo da antiga área de injeção de preservantes. Essa área é localizada ao sul do interior do Galpão principal. Parte do piso usado na época de atividade da usina foi removido e é possível observar índios superficiais de contaminação no solo superficial (**Figura 13 e Figura 14**).

**Figura 13** - Foto da área de tanques e autoclaves em 2002 da UTM Jaguaré.



Fonte: TEIXEIRA, 2005

Os estudos realizados na área identificaram as áreas prioritárias de investigação, com a definição das fontes de contaminação potenciais (FREITAS et al., 2015; BARBOSA et al., 2017). A área de injeção de preservantes nos dormentes foi considerada como fonte de contaminação, e o processo de gotejamento de preservante ao longo da operação como causa da contaminação.

**Figura 14** – Foto área de 2004 da UTM Jaguaré com evidências de manchas de óleo.



Fonte: Acervo IPT – adaptado.

### 5.1.1 Uso futuro da área de estudo

A área de estudo atualmente encontra-se desativada. Seu uso futuro pretendido a longo prazo ainda não foi definido e a médio prazo a área se manterá desativada e serão realizadas apenas atividades ambientais para o gerenciamento da contaminação e a negociação do imóvel para uso futuro a longo prazo.

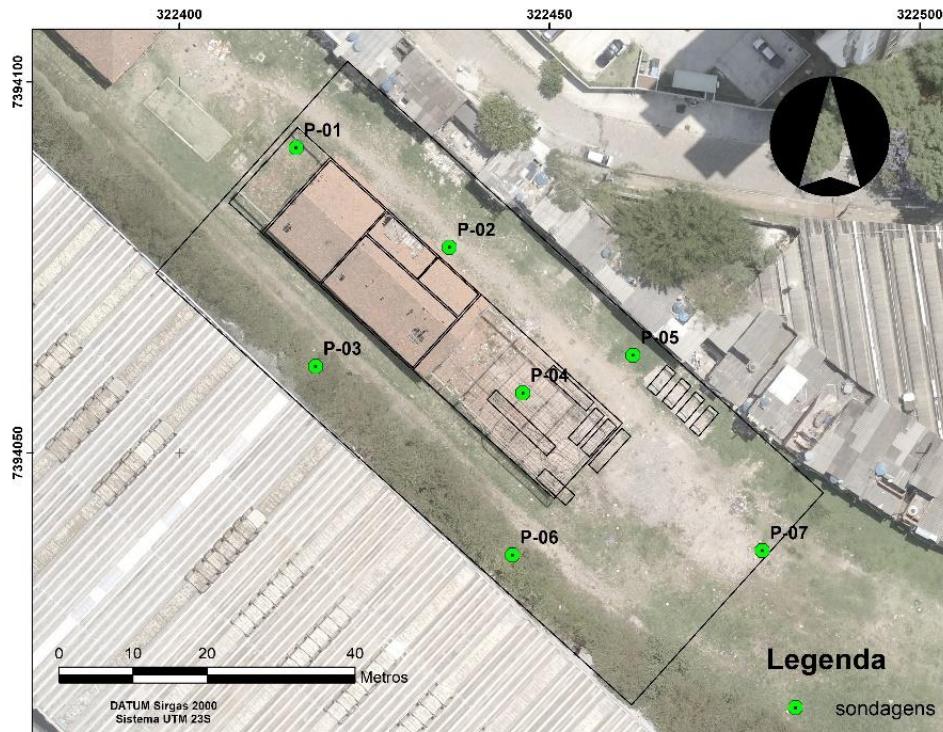
Dessa forma, será considerado nesse trabalho o cenário de manutenção da área desativada a médio prazo.

### 5.2 Caracterização do Meio Físico

Para a caracterização do meio físico, foram realizadas sondagens de reconhecimento. Estas foram distribuídas de forma a se avaliar de forma qualitativa a variação estratigráfica no entorno da área de interesse. Foram realizadas 7 sondagens (P-01 a P-07) pelo método de cravação direta (**Figura 15**), com a utilização de amostradores de polietileno de 1,5 m, com a utilização de equipamento percussivo de cravação, com cravações e amostragem até 7,5 m, sendo aplicada a metodologia sugerida pela NBR 15.492/2007, com o registro das coordenadas com auxílio de GPS Garmin eTrex Vista Cx.

Todas as amostras foram devidamente identificadas e levadas ao laboratório de ensaios geoambientais (EGEO) do IPT para abertura e realização de descrição táctil-visual do solo (**Figura 16**).

**Figura 15 – Localização dos pontos de sondagem e de amostragem**



Fonte: Acervo IPT.

Os horizontes do solo foram classificados e individualizados, seguindo-se metodologia adaptada de Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - SBCS (2005), gerando assim os limites das camadas, o que subsidiaram a construção do modelo tridimensional da estratigrafia da área.

**Figura 16** – Abertura de amostrador e descrição tátil-visual do solo coletado



Fonte: Acervo IPT.

Para a caracterização física do solo, foi realizada a cravação e coleta de amostras indeformadas com amostrador shelby seguindo metodologia preconizada pela NBR 9820 (1997), com a obtenção de 7 amostras, com profundidade variando entre 0 m e 10 m, em um ponto fora da área de influência de forma a se obter amostras livres da presença de contaminação. Os amostradores foram encaminhados para laboratório para extração e realização dos ensaios.

Para a caracterização física do solo, foram realizados os ensaios de granulometria, teor de matéria orgânica, condutividade hidráulica e porosidade. Os ensaios realizados e suas respectivas metodologias são apresentados na **Tabela 2**.

**Tabela 2** - Granulometria do solo da área

Ensaio	Referências
Análise granulométrica conjunta	ABNT NBR 7181 (1984); NBR 6502 (1995); NBR 6457 (1986); Nogueira (1995).
Teor de matéria orgânica	NBR 13600/1996; EMBRAPA (1999).
Condutividade hidráulica saturada com parede rígida	Klute (1986); EMBRAPA (1997); Pinto (2000); Libardi (2005).
Porosidade total e efetiva	Klute (1986); Libardi (2005); Kiehl (1979).

Fonte: Acervo IPT.

## 5.3 Caracterização da Fonte Ativa

### 5.3.1 Distribuição da contaminação

Para a delimitação da fonte ativa da área, foi utilizada a ferramenta *Laser Induced Fluorescence* (LIF), através de 9 sondagens realizadas pela técnica de cravação direta para a caracterização da distribuição dos contaminantes no solo (**Figura 17**). Este ensaio foi realizado pela equipe do IPT, sendo aqui utilizados apenas os resultados do ensaio para a construção do modelo tridimensional da distribuição da massa de contaminante.

Para a identificação dos compostos químicos presentes nas anomalias identificadas durante os ensaios de campos realizados em novembro de 2018, foi coletada uma amostra de solo por método *direct push* dentro do centro de massa e enviada para o laboratório ALS Corplab para determinação analítica, para a determinação dos compostos.

A técnica LIF é baseada na fluorescência, onde compostos orgânicos, como os HPAs, possuem a propriedade de emitir radiação com comprimentos de ondas característicos devido ao tamanho da cadeia aromática quando expostos a luz. Com este equipamento pode-se caracterizar em curto intervalo de tempo uma área contaminada por hidrocarbonetos aromáticos nas fases residual e livre (*Non Aqueous Phase Liquid* - NAPL), nas zonas saturada e zona vadosa (ISLER *et al*, 2013).

**Figura 17** – Localização dos pontos de sondagem por cravação direta para aplicação da técnica LIF.



Fonte: Autora

Os dados fornecidos foram tratados, criando uma base com as informações das coordenadas de cravação e resposta obtidas pelo ensaio de LIF. Com o auxílio do programa Rockworks 16, os dados foram intermolados pelo modelo geoestatístico tridimensional inverso do quadrado da distância (IDW – *Inverse Distance Weighting*), para modelos anisotrópicos, visto que a caracterização do solo mostrou grande variação em profundidade. A seleção do método foi realizada por ser um método disponível dentro do programa, e por princípio de funcionamento, em que dados mais próximos entre si são mais parecidos do que os mais distantes. Desta forma, um valor para algum local não medido, o método usará os valores conhecidos próximos, que terão um maior peso do que os valores mais distantes (JAKOP & YOUNG, 2006). Isso tem um efeito direto, principalmente em ponto com grandes concentrações, que terão uma influência maior sobre as áreas no seu entorno, permitindo representar as anomalias da contaminação.

#### 5.4 Avaliação de alternativas de intervenção

No Guia de elaboração de planos de intervenção para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas (IPT, 2014), é apresentado o método de tomada de decisão a partir da atribuição de pesos e critérios para a comparação das técnicas de

remediação. Nesse método são selecionados critérios para a seleção das técnicas, como eficiência, custo e impacto ambiental, e considerados pesos para esses critérios, variando de 1 a 4, sendo que 1 representa que o critério possui baixa importância e 4 alta importância. Também são elencados pesos para os planos de intervenção considerando cada critério, conforme apresentado na **Tabela 3**.

**Tabela 3** – Pesos adotados para a categorização das técnicas.

<b>Critério</b>	<b>Escala de medição por critério</b>			
	<b>Alto</b>	<b>Médio alto</b>	<b>Médio</b>	<b>baixo</b>
Eficiência	4	3	2	1
Custo	1	2	3	4
Impacto ambiental	1	2	3	4

Fonte: IPT, 2014.

Dessa forma, cada técnica de remediação é representada por uma série de critérios com suas respectivas notas, o valor final que representa a técnica é decorrente da ponderação das notas critérios. A técnica que obter maior nota será recomendado para a implantação. É importante citar que a definição de pesos deve resultar de um processo de discussão das partes interessadas, que irá considerar no plano selecionado os interesses de todos os atores envolvidos (IPT, 2014).

Na **Figura 18** é apresentado um modelo de aplicação do método de seleção de plano de intervenção.

**Figura 18 - Exemplo da aplicação do método Atribuição de Pesos e Critérios.**

PI	Engenharia/Remediação por contenção	Remediação (tratamento)	Destinação	Pontuação e pesos			Hierarquização Pontuação Final*		
				Eficiência (4)	Custo (4)	ACV (2)			
1	Encapsulamento <i>ex situ</i>	<i>on site</i>	Dessorção Térmica <i>ex situ</i>	<i>on site</i>	Não	4	2	4	32
2	Contenção Geotécnica <i>in situ</i>	<i>on site</i>	Dessorção Térmica <i>in situ</i>	<i>on site</i>	Não	4	3	3	34
3	Contenção Geotécnica <i>in situ</i>	<i>on site</i>	Dessorção Térmica <i>in situ</i>	<i>on site</i>	Sim	4	4	3	38
4	Recobrimento <i>in situ</i>	<i>on site</i>	–	–	Não	1	4	4	28
5	Encapsulamento <i>ex situ</i>	<i>on site</i>	Dessorção Térmica <i>in situ</i>	<i>on site</i>	Não	4	2	4	32
6	Escavação <i>ex situ</i>	<i>on site</i>	Dessorção Térmica <i>ex situ</i>	<i>on site</i>	Sim	4	2	2	28
7	Encapsulamento <i>ex situ</i>	<i>on site</i>	Biorremediação <i>ex situ</i>	<i>on site</i>	Não	2	2	3	22
8	Encapsulamento <i>ex situ</i>	<i>on site</i>	Nanorremediação <i>ex situ</i>	<i>on site</i>	Não	4	2	2	28
9	Encapsulamento <i>ex situ</i>	<i>on site</i>	–	–	Não	4	2	3	30
10	Contenção Geotécnica <i>in situ</i>	<i>on site</i>	–	–	Não	3	3	2	28

Fonte: IPT, 2014.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Caracterização do Meio Físico

Os dados obtidos nas sondagens de reconhecimento são apresentados nas **Tabela 4 e Tabela 5.**

Foram identificadas oito camadas, sendo as duas primeiras, decorrentes das antigas atividades da área. A primeira, uma camada de brita que recobre todo o terreno, proveniente das antigas atividades de linha ferrea que existiam no terreno. A segunda, uma camada de aterro argiloso vermelho, com espessura variando entre 0,4 m (mínimo) e 1,5 m (máximo). O solo natural da área é observado a partir de 1,2 m, sendo ele uma camada de argila cinza, plástica e pegajosa.

**Tabela 4** – Delimitação das camadas estratigráficas.

ID	Textura							
	Brita		Aterro		Argila		Argila orgânica	
	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base
P-01	0,0	0,4	0,4	1,2	1,3	1,8	1,8	2,0
P-02	0,0	0,4	0,4	1,5	1,5	2,0	2,0	2,3
P-03	0,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0	3,0
P-04	0,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0	3,0
P-05	0,0	0,4	0,4	1,1	1,1	1,5	1,5	3,0
P-06	0,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,5	2,5	3,0
P-07	0,0	0,4	0,4	1,3	1,3	2,5	2,5	3,2

Fonte: Autora.

**Tabela 5** – Delimitação das camadas estratigráficas.

ID	Textura							
	Argila-arenosa		Areia fina		Seixo		Areia	
	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base
P-01	2,0	4,0	4,0	5,2	5,2	5,5	5,5	12,0
P-02	2,3	4,5	4,5	5,5	5,5	5,8	5,8	12,0
P-03	3,0	4,5	4,5	5,0	5,0	5,2	5,2	12,0
P-04	3,0	4,0	4,0	5,2	5,2	5,5	5,5	12,0
P-05	3,0	4,3	4,3	5,5	5,5	5,7	5,7	12,0
P-06	3,0	4,5	4,5	5,3	5,3	5,5	5,5	12,0
P-07	3,2	5,3	4,0	5,3	5,3	5,5	5,5	12,0

Fonte: Autora.

Subjacente se encontra uma camada de argila-orgânica preta, onde são

visualizados restos vegetais (folhas, troncos e galhos). Essa camada apresenta mais de 10 % de teor de M.O., como é apresentado na **Tabela 3**. A partir desta camada, os teores de areia são crescentes, tendo inicio na quinta camada identificada, sendo uma camada argila-arenosa, cinza e bem úmida (**Figura 19**).

As camadas de areia franca se inciam em 4,0 m, mesma profundidade do nível d'água observado na área, entremeada por camada de seixos, com presença de frações de areia grossa e calhaus, com continuidade da camada arenosa até 12 m.

A partir da análise de caracterização física do solo de *background* foi obtido o perfil de variação das propriedades do solo ao longo da profundidade (**Tabela 6**).

**Figura 19** – Sequência estratigráfica observada na área



Fonte: Autora

O solo superficial apresentou altas frações de materiais finos, argila e silte, baixa porosidade efetiva e condutividade hidráulica. A partir de 4,5 m de profundidade observa-se o incremento de areia, com maior porosidade efetiva e condutividade hidráulica em relação ao solo mais superficial, o que favorece a mobilidade dos contaminantes, o que corrobora com as observações feitas durante as descrições táctil-visuais.

**Tabela 6** - Granulometria do solo da área de estudo.

Profundidade	Fração (%)				MO (%)	Porosidade (%)			Cond. Hidráulica (cm/s)
	Argila	Silte	Areia	>2 mm		Total	Micro	Efetiva	
0,00 – 0,86	35	32	32	1	5,67	50,1	42,8	7,3	9,2 x10 <sup>-8</sup>
1,08 – 1,50	29	33	38	0	2,36	-	-	-	-
3,00 – 3,30	37	29	34	0	11,7	-	-	-	3,37 x10 <sup>-6</sup>
3,30 – 4,50	43	27	30	0	3,97	41,3	34,9	6,4	-
4,50 – 6,00	3	3	72	22	0,44	-	-	-	6,1x10 <sup>-6</sup>
7,50 – 8,30	5	1	70	24	0,35	41,4	20,7	20,7	1,21x10 <sup>-4</sup>
9,90 -10,0	9	4	84	3	0,49	38,6	19,5	19,1	2,53 x10 <sup>-4</sup>

Fonte: Autora.

Legenda: (-) ensaio não realizado.

Na camada entre 3,0 e 3,5 m observa-se alto índice de matéria orgânica, o que caracteriza a camada de argila orgânica. A partir dessa profundida é observado solo de matriz predominantemente arenosa, com condutividade hidráulica muito superior que os valores observados nas camadas superficiais. Os resultados obtidos em laboratório apresentam consonância com as observações de campo, evidenciando a grande diferença nas composição das camadas ao longo do perfil.

O nível da água da área de estudo foi monitorado nos anos de 2014 em setembro e dezembro e semestralmente em 2017 e 2018. O resultado do monitoramento pode ser observado na **Tabela 7**.

**Tabela 7** – Monitoramento do nível da água dos poços da área de estudo.

Poço	Prof. Instalação (tubo) (m)	Nível da água (m)					
		09/2014	12/2014	03/2017	08/2017	03/2018	11/2018
PM-02a	6,35	-	5,25	4,14	4,58	3,99	4,56
PM-05a	7,14	2,92	5,71	4,55	5,05	4,32	4,66
PM-06a	7,53	4,55	5,61	4,48	4,99	4,36	4,97
PM103	8,18	-	5,36	4,2	4,73	4	5,16
PM105	7,49	5,29	5,43	4,31	4,81	4,22	4,79
PM106	7,26	4,83	5,15	3,98	4,53	3,92	4,57

Poço	Prof. Instalação (tubo) (m)	Nível da água (m)					
		09/2014	12/2014	03/2017	08/2017	03/2018	11/2018
PM114	7,10	5,06	5,38	4,24	4,82	4,18	4,83
PM115	11,36	4,98	5,86	4,67	5,3	4,55	5,32
PM116	11,04	5,28	5,65	4,57	4,87	4,28	4,92
PM117	11,24	4,82	5,08	3,93	4,44	3,68	4,35
PM118	10,64	5,86	6,32	5,58	5,5	4,58	4,41

Fonte: Acervo IPT.

Legenda: (-) nível da água não monitorado.

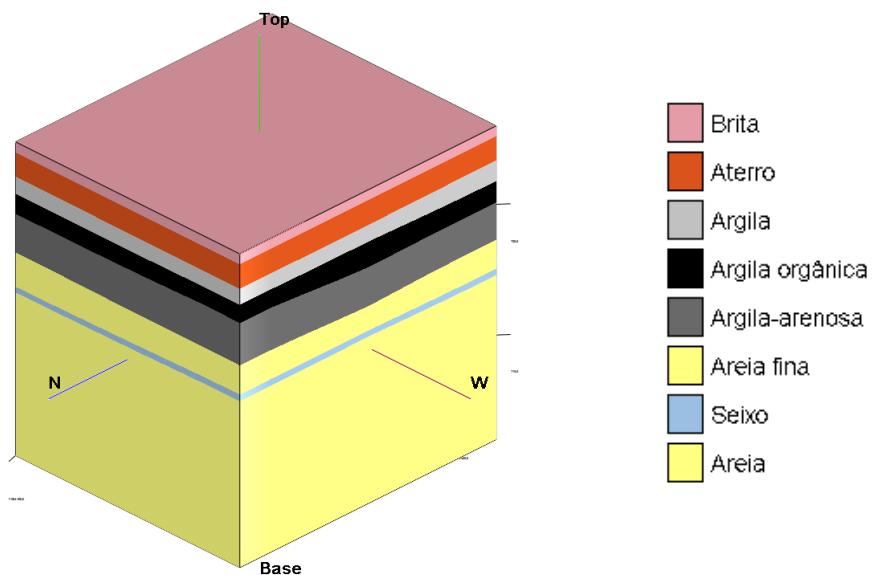
A variação do nível da água (NA) entre os valores de máximo e mínimo encontrados nos poços foi de 3,40 m, sendo a média do NA 4,77 m. Apenas o poço PM118 apresentou NA maior que 6 m em dezembro de 2014. A média do NA no mesmo período dos todos os poços foi de 5,54 m, o que apresenta variação de 0,77 m do NA médio da área (4,77 m). A média mais baixa do NA foi observada em março de 2018 (4,19 m), o que apresenta variação de 0,58 m do NA médio da área.

### 6.1.1 Modelo Estratigráfico da Área

A partir dos resultados obtidos foi possível elaborar um modelo estratigráfico da área de estudo apresentado na **Figura 20 e Figura 21**. O modelo foi gerado com as dimensões de 55 m largura x 65 m comprimento x 12 m de profundidade, com a representação das 8 camadas identificadas durante as descrições táctil visuais, sendo possível através deste, avaliar a distribuição das camadas ao longo da área

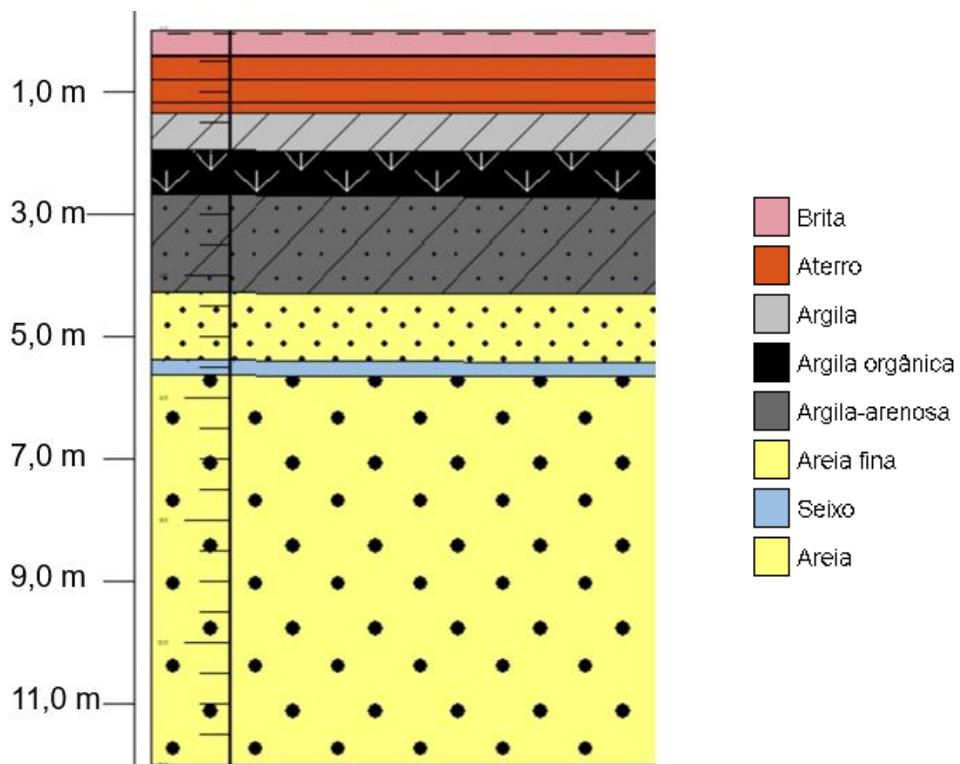
É possível visualizar que as camadas que compõe a área de estudo são de deposição plana e contínua, com camadas bem definidas. Este tipo de formação do solo é característico de terraços aluvionares, porção morfológica que a área se encontra, visto que a área está nas planícies de influência do Rio Pinheiros.

**Figura 20 – Modelo estratigráfico da área de interesse**



Fonte: Autora.

**Figura 21 – Corte vertical do modelo estratigráfico da área de interesse de acordo com a profundidade.**



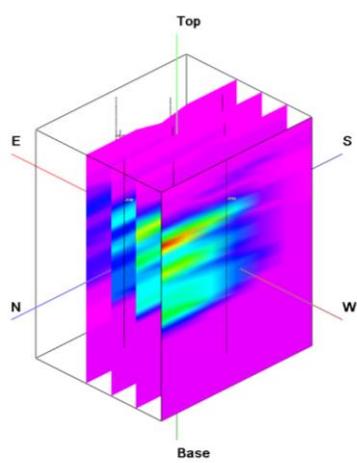
Fonte: Autora.

## 6.2 Modelo de Distribuição da Contaminação

A partir dos ensaios de campo e resultados do LIF foi elaborado o modelo da distribuição dos contaminantes no solo conforme as **Figura 22** e **Figura 23**, aplicando modelo de interpolação.

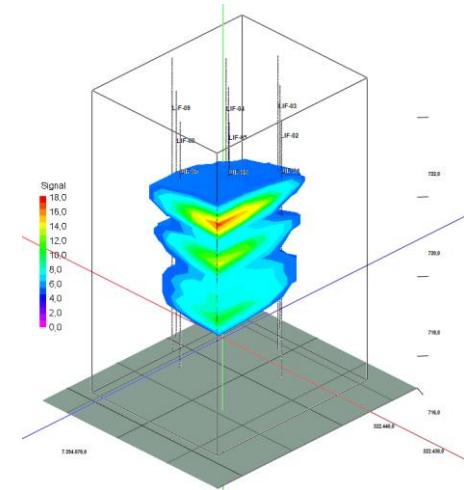
O resultado mostrou que a distribuição da contaminação chega até a 4,80 m de profundidade. Como é possível observar na seção apresentada na Figura 24, onde os maiores valores de sinal (acima de 12), que representam as maiores concentrações de contaminantes retidos no solo, são distribuídas de forma intercalada, demonstrando que a contaminação encontrada na área não é decorrente de infiltração vertical e sim por deslocamento lateral dos contaminantes.

**Figura 22** – Fatiamento da projeção da distribuição da contaminação



Fonte: Acervo IPT.

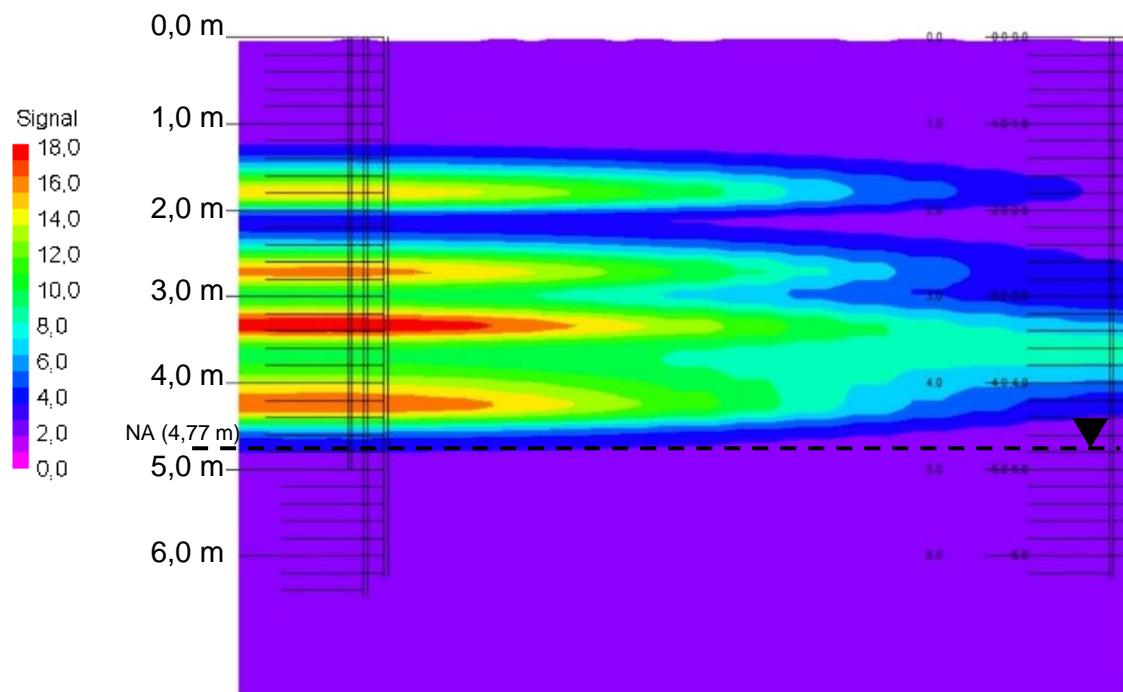
**Figura 23** – Modelo matemático do volume de solo impacto pelo contaminante (645 m<sup>3</sup>).



Fonte: Acervo IPT.

Um processo de infiltração apresentaria um padrão de distribuição vertical das concentrações, com valores maiores em superfície e redução das concentrações ao longo da profundidade. Nos padrões observados, a distribuição das maiores concentrações está em um padrão horizontal, demonstrando assim, que o contaminante se distribuiu através das camadas do solo, que apresentam um padrão horizontal de deposição.

**Figura 24** – Distribuição da concentração da contaminação em relação a profundidade na área de estudo.



Fonte: Acervo IPT.

A partir dos modelos é possível afirmar que o centro de massa é de 3,2 m a 3,4 m, com 3 pontos de alta concentração (1,7 m - 1,9m; 2,6 m - 2,8 m; 4,1 m - 4,4 m).

Além disso, o NA médio anual é 4,77 m, com variação entre média entre 4,19 m e 5,54 m de acordo com a variação pluvial durante o ano. Dessa forma pode se observar que quase toda a massa de contaminante adsorvida ao solo encontra-se na zona vadosa. Esse informação é necessária para a avaliação da aplicação das técnicas de remediação na área de estudo.

Os resultados analíticos das amostras de solo comprovaram os resultados de respostas obtidas com o LIF, em que a quantificação analítica identificou a presença de HPAs e altas concentrações de TPH (**Tabela 8**).

**Tabela 8** – Resultados analíticos de amostra de solo coletada no centro de massa – fase adsorvida de contaminante.

Grupo	Parâmetro	CAS	Concentração (mg/kg)
HPA	Acenafteno	83-32-9	213
	Acenaftileno	208-96-8	2
	Antraceno	120-12-7	9
	Benzo(a)antraceno	56-55-3	2,3
	Benzo(a)pireno	50-32-8	1,3
	Benzo(b)fluoranteno	205-99-2	3,8
	Benzo(k)fluoranteno	207-08-9	5,8
	Benzo[g,h,i]perileno	191-24-2	<1,2
	Criseno	218-01-9	4,1
	Dibenzo[a,h]antraceno	53-70-3	<1,2
	Fenantreno	85-01-8	43
	Fluoranteno	206-44-0	23
	Fluoreno	86-73-7	54
	Indeno[1,2,3-cd]pireno	193-39-5	<1,2
	Pireno	129-00-0	12
	Dibenzofurano	132-64-9	51
TPH	MCNR	---	3562
	TPH Resolvido	---	12180
	TPH Total (C8 - C40)	---	15743

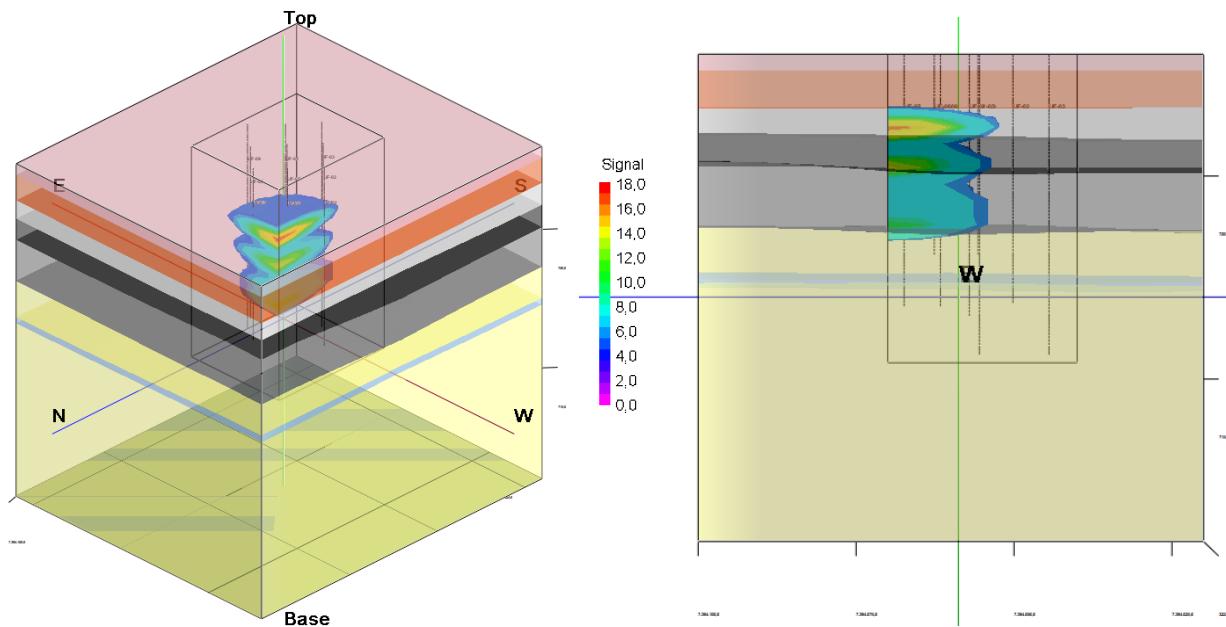
Fonte: Acerto IPT.

Legenda: CAS – número de resgistro do composto químico.

### 6.2.1 Integração dos modelos

Para a avaliação da distribuição da contaminação em relação a variação estratigráfica do meio, foi realizada a sobreposição dos modelos, permitindo assim a visualização em diferentes planos (**Figura 25**).

**Figura 25 – Integração do modelo estratigráfico e de distribuição da contaminação**



Fonte: Autora.

Como é possível observar, o centro de massa de contaminação se encontra nas camadas superficiais do solo, estando entre as camadas de argila cinza, argila orgânica e argila-arenosa. A maior parte da concentração está localizada antes do nível da água (4,77 m), o que significa que a massa de contaminante esta retida principalmente na zona vadosa.

### 6.3 Avaliação de alternativas de intervenção

Com base nos resultados das caracterizações físicas do solo, no modelo de distribuição da massa dos contaminantes adsorvidos ao solo da área e identificados na análise química, foi realizada uma avaliação da aplicabilidade das técnicas de remediação disponível para o tipo de contaminação, considerando o cenário de uso futuro da área, definido no item 5.1.1 desse trabalho.

É importante citar que algumas características do meio físico e do contaminante influenciam diretamente a aplicabilidade das técnicas de remediação:

- **Presença de matéria orgânica:** No uso de técnicas em que ocorre reação de oxido-redução, como a Oxidação Química, a matéria

orgânica do meio compete com o contaminante na demanda química de oxidante, sendo necessário grandes volumes de oxidantes (SUTHERSAN, 2017). Como descrito no item 6.1 desse trabalho, o solo é composto por 6 camadas, entre elas a camada de argila orgânica, que pode influenciar significativamente a aplicação da técnica de Oxidação Química na área de estudo;

- **Condutividade hidráulica:** Em solos com baixa condutividade hidráulica, devido a presença de materiais finos como argila e silte, técnicas de remediação que pressupõe de injeção de substâncias podem não ser indicadas, pois é necessário aplicação de altas pressões de injeção que podem causar fraturas no solo. Essas fraturas tornam-se caminhos preferenciais das substâncias injetadas, fazendo com que seja alterado o raio de influência da injeção e o solo contaminado não seja atingido pela substância injetada como previsto (SUTHERSAN, 2017).
- **Fonte ativa:** É caracterizada pela presença de contaminante adsorvido no solo, em grandes concentrações, podendo chegar ao limite de saturação do solo. A grande concentração de contaminantes da fonte é um limitante para técnicas como bio e fitoremediações, por estarem em um limite de toxicidade biológica, sendo necessárias técnicas que mobilizem esses contaminantes para a fase dissolvida e / ou fase vapor (SUTHERSAN, 2017).
- **Nível da água:** A definição do NA é uma informação necessária já que alguns métodos de remediação podem não ser adequados para aplicação em zona saturada ou zona vadosa. Como apresentado no item 6.1 desse trabalho, o NA médio é 4,77 m, com baixa variação em alguma épocas do ano. Assim, quase toda a massa de contaminante está adsorvida ao solo na zona vadosa.

Além disso, como citado no item 5.1 desse trabalho, a contaminação da área foi originada pela utilização do composto creosoto, que possui alta densidade e baixa volatilidade. Grande parte do volume do contaminante está adsorvida ao solo, entre 1,4 m a 4,6 m, como apresentado no item 6.2 desse trabalho.

A **Tabela 9** apresenta as vantagens e desvantagens da aplicação das técnicas de remediação considerando as características da área de estudo.

**Tabela 9 – Vantagens e Desvantagens das técnicas de remediação considerando a caracterização do meio e contaminante.**

Técnicas de remediação	Vantagens	Desvantagens
Extração Multifásica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo custo</li> <li>• Aplicável para áreas com menor volume de óleo</li> <li>• Moderado tempo de atuação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa aplicabilidade em solos compactos e argilosos</li> <li>• Necessária realização de teste piloto</li> <li>• Necessário tratamento <i>ex situ</i> da água e vapor extraídos</li> <li>• Baixa influência lateral (raio de influência)</li> </ul>
Dual Phase Extraction (DPE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicável para remoção de fase dissolvida, vapor e <i>NAPL</i></li> <li>• Estimula o particionamento das SQIs</li> <li>• Estimula a renovação de oxigênio na zona vadosa e biodegradação aeróbica dos vapores no solo</li> <li>• Moderado tempo de atuação</li> <li>• Aplicável para remoção de massa e contenção de plumas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessária realização de teste piloto</li> <li>• Necessário tratamento <i>ex situ</i> da água e vapor extraídos</li> </ul>
Soil Vapor Extraction (SVE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remediação ativa por tratamento para remoção de massa</li> <li>• Curto prazo</li> <li>• Baixo/médio custo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessária realização de teste piloto</li> </ul>
Atenuação Natural Monitorada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gerenciamento do risco</li> <li>• Requer apenas monitoramentos periódicos</li> <li>• Custo baixo, comparado a outras técnicas aplicáveis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessária avaliação prévia da capacidade de atenuação do meio</li> <li>• Processo aplicável em longo prazo</li> </ul>

Técnicas de remediação	Vantagens	Desvantagens
Oxidação Química	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pode suportar remediação agressiva</li> <li>Curto período de operação</li> <li>Rápida e completa destruição de substâncias orgânicas</li> <li>Acelera as taxas de recuperação de óleo</li> <li>Aplicável para <i>LNAPL</i> com baixa mobilidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Necessária realização de teste piloto e de bancada</li> <li>Matéria orgânica na camada de argila orgânica compete com contaminante na demanda química de oxidante, sendo necessário grandes volumes de oxidantes</li> <li>Aplicável para aquíferos de alta a média condutividade hidráulica</li> <li>Requer demanda de água tratada para diluição do oxidante</li> <li>Baixa aplicabilidade em solo argiloso/compacto – a injeção é limitada devido à baixa condutividade hidráulica</li> </ul>
Biorremediação - bioestimulação		<ul style="list-style-type: none"> <li>Requer controle hidráulico</li> <li>Risco de migração de <i>LNAPL</i> por sentidos preferenciais para fora da propriedade</li> <li>Aumento de massa para pluma em fase dissolvida e aumento de potencial migração da pluma</li> <li>Aumento da vulnerabilidade da área vizinha devido a possível migração de contaminantes</li> <li>Baixa aplicabilidade em solo argiloso/compacto – a injeção é limitada devido à baixa condutividade hidráulica</li> <li>Longo prazo, visto as limitações de distribuição</li> </ul>
Tratamento Termal <i>In Situ</i> - <i>Electrical Resistance Heating ERH</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Remediação ativa por tratamento</li> <li>Comumente utilizada para remediação de camadas de baixa permeabilidade</li> <li>Curto prazo de operação</li> <li>Trata altas e baixas concentrações</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Após extração, a água subterrânea e os vapores são tratados em filtros de carvão ativado - geração de volume de carvão ativado contaminado a ser destinado como resíduo de Classe I</li> <li>Alto consumo de energia elétrica em curto espaço de tempo</li> <li>Não indicado para SVOCs de cadeia longa</li> </ul>

Técnicas de remediação	Vantagens	Desvantagens
Tratamento Termal <i>In Situ</i> - <i>Thermal Conduction Heating</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Processo altamente efetivo</li> <li>• Curto prazo</li> <li>• Trata altas e baixas concentrações</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto consumo de energia elétrica em curto espaço de tempo</li> <li>• Necessário monitoramento constante</li> <li>• Necessária aplicação de técnicas de remediação conjuntas para tratamento de vapor e água subterrânea</li> </ul>
Bombeamento e Tratamento <i>Pump and Treat</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicável para <i>LNAPL</i> com alta mobilidade</li> <li>• Custo médio de implantação</li> <li>• Aplicável para remoção de fase dissolvida e fase livre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor aplicabilidade em áreas com baixa transmissividade de <i>LNAPL</i></li> <li>• Requer médio a longo período de operação</li> <li>• Não indicada a aplicação isolada da técnica para <i>SVOCs</i> por não mobilizar os contaminantes</li> <li>• Não trata fases vapor e fase adsorvida no solo</li> </ul>
Remoção de Solo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medida de curto prazo</li> <li>• Remoção de toda a massa de contaminante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto custo de operação</li> <li>• Requer grande volume de solo a ser removido</li> <li>• Requer medidas de contenção do solo e gerenciamento de grande volume de resíduos perigosos</li> <li>• Grande quantidade de resíduos Classe I para destinação</li> <li>• Custos muito elevados</li> </ul>

Fonte: SUTHERSAN, 2017; EPA, 2013; EPA, 2006.

Considerando as técnicas apresentadas na **Tabela 9** de acordo com as informações obtidas da área de estudo observa-se que a técnica de extração multifásica, que ocorre a partir da extração do contaminante em fase livre, fase dissolvida na água subterrânea e fase vapor e tratamento *ex situ* não apresentaria boa eficiência na área de estudo pois o solo é argiloso, o que dificulta a extração e o contaminante que está adsorvido ao solo e é pouco volátil, o que também diminui o raio de influência do poço de extração. Dessa forma, para que o contaminante seja extraído na forma de vapor é necessário que o solo seja aquecido a temperatura de ebulação do creosoto (SUTHERSAN, 2017). A técnica DPE apresenta as mesmas desvantagens relacionadas a extração do contaminante em fase dissolvida e fase vapor e a técnica *pump and treat* apresenta a mesma desvantagem relacionada a extração da fase dissolvida e não permite tratamento da fase vapor.

A técnica SVE, que é a extração do contaminante na fase vapor, não é

adequada isoladamente na área de estudo pois devido a baixa volatilidade do contaminante a massa de contaminante extraída seria baixa (EPA, 2013). Já a técnica de atenuação natural monitorada apresenta resultados a longo prazo e só necessita de monitoramentos semestrais para avaliação das taxas de degradação dos contaminantes no meio (SUTHERSAN, 2017). É necessária apenas uma avaliação da capacidade natural do meio de degradar o contaminante em questão.

A técnica de oxidação química não é indicada pois é necessária injeção de agente oxidante e o solo da área possui baixa condutividade hidráulica, o que pode acarretar em fraturas nas camadas de argilas e formação de caminhos preferenciais, dificultando o controle da atividade de remediação (EPA, 2006). O mesmo ocorre para a técnica de biorremediação em que é necessário injeção de compostos. Além disso, nesse caso, deve-se avaliar também a capacidade de biodegradação do meio, já que a toxicidade do contaminante pode tem influência sobre este.

A técnica termal ERH não indicado para contaminante com baixa volatilidade pois alcança no máximo 100°C de aquecimento no solo, o que é inferior ao ponto de ebulação do creosoto (EPA, 2019c). Já a técnica TCH aquece o solo a temperaturas superiores a temperatura de ebulação do creosoto, porém necessita de aplicação de técnica para tratamento do contaminante na fase vapor principalmente, considerando que a massa de contaminante está na zona vadosa.

A técnica de remoção de solo apesar do alto custo de operação e grande volume de resíduo classe 1 gerado, o solo contaminando é removido e tratado *ex-situ*, apresentando alta eficácia em curto período de tempo.

Considerando as vantagens e desvantagens das técnicas de remediação apresentadas na **Tabela 9**, as características do meio e do contaminante e a distribuição do contaminante na área de estudo, foi aplicada a metodologia de Atribuição de Pesos e Critérios (IPT, 2014) para o caso em questão.

Para a aplicação da metodologia foram utilizados os critérios abaixo:

- Eficiência: relação entre tempo e massa de contaminante removida;
- Custo: valor total de aplicação e manutenção da técnica;
- Impacto ambiental: alterações ambientais significativas decorrentes da atividade de remediação.

Conforme prevê a metodologia de Tomada de Decisão (IPT, 2014), os critérios devem receber pesos conforme a importância de cada um dele para o caso. Como abordado no item 5.3 desse trabalho, a área contaminada em questão é caracterizada pela presença do contaminante HPA adsorvido ao solo, considerada fonte ativa de contaminação. Dessa forma, é necessário que a técnica de remediação considerada para o caso possua eficiência média para controlar e remediar a fonte ativa, evitando assim que a extensão da contaminação aumente. Porém, considerando o cenário de uso futuro a médio prazo da área, como descrito no item 5.1.1 desse trabalho, a área continuará desativada, não sendo preciso necessariamente uma medida de remediação de curto prazo.

O critério custo é importante para que seja considerada uma técnica de remediação possivelmente aplicada, sendo o custo um fator limitante no momento da escolha da técnica.

O critério de impacto ambiental contribui para que na escolha da técnica sejam consideradas as alterações indesejadas no meio decorrentes da atividade de remediação, favorecendo as técnicas que apresentam menor impacto. Sendo assim foi definido peso 2 para o critério Eficiência, 3 para Custo e 3 para Impacto Ambiental.

A **Tabela 10** apresenta a aplicação do método de Atribuição de Pesos e Critérios para a área de estudo com as justificativas dos pesos associados.

**Tabela 10 – Aplicação do método de Tomada de decisão por Atribuição de Pesos e Critérios para a área de estudo.**

Técnica de Remediação	Destinação de resíduo	Eficiência		Custo		Impacto Ambiental		Pontuação Final	
		2	Justificativa	Pontos	Justificativa	Pontos	Justificativa		
Atenuação Natural Monitorada (MNA)	<i>in situ</i>	Não	Requer longos períodos para degradação significativa de contaminantes	1	Requer apenas monitoramento	4	Sem alteração significativa do meio	4	26
Tratamento Termal In Situ - <i>Thermal Conduction Heating</i>	<i>in situ</i>	Não	Aumenta a mobilidade dos contaminantes, mas não os extrai do meio	2	Requer instalação de eletrodos	3	Sem alteração significativa do meio	4	25
Tratamento Termal <i>In Situ</i> - <i>Electrical Resistance Heating ERH</i>	<i>in situ</i>	Não	Máxima temperatura alcançada é baixa aumentar mobilidade do contaminantes em questão	1	Requer instalação de eletrodos	3	Sem alteração significativa do meio	4	23
Extração Multifásica	<i>ex situ</i>	Sim	Baixa eficiência para HPA adsorvido ao solo	2	Necessidade de teste piloto, instalação de poços e do sistema de tratamento para vapor, fase livre e fase dissolvida do contaminante	3	Geração de resíduo Classe 1	3	22
<i>Dual Phase Extraction (DPE)</i>	<i>ex situ</i>	Sim	Baixa eficiência para HPA adsorvido ao solo	2	Necessidade de teste piloto, instalação de poços e do sistema de tratamento para vapor e fase dissolvida do contaminante	3	Geração de resíduo Classe 1	3	22

Técnica de Remediação	Destinação de resíduo	Eficiência		Custo		Impacto Ambiental		Pontuação Final	
		2		3		3			
		Justificativa	Pontos	Justificativa	Pontos	Justificativa	Pontos		
Biorremediação - bioestimulação	<i>in situ</i>	Não	Baixa eficiência em solo com características argilosas, baixo raio de influência	2	Requer instalação de poços de injeção e nutrientes para estimular a biodegradação	3	Injeção de agente oxidante no meio - alteração breve da microbiota	3 22	
<i>Soil Vapor Extraction (SVE)</i>	<i>ex situ</i>	Sim	Baixa eficiência para HPA adsorvido ao solo	1	Necessidade de teste piloto, instalação de poços e do sistema de tratamento para vapor	3	Geração de resíduo Classe 1	3 20	
Bombeamento e Tratamento ( <i>Pump and Treat</i> )	<i>ex situ</i>	Sim	Só trata fase dissolvida na água subterrânea	1	Instalação de sistema simples (apenas tratamento de água)	3	Geração de resíduo Classe 1	3 20	
Oxidação Química	<i>in situ</i>	Não	Baixa eficiência em solo com características argilosas, baixo raio de influência	2	Requer instalação de poços de injeção e agente oxidante, que pode ter custo elevado	2	Injeção de agente oxidante no meio - alteração breve da microbiota	2 16	
Remoção de Solo	<i>ex situ</i>	Sim	Remove significativamente os contaminantes	4	Requer remoção e transporte do solo escavado	1	Geração grandes volumes de resíduo Classe 1	1 14	

Fonte: Autora, com base nos dados do IPT 2018.

Considerando as justificativas e os pesos dados as técnicas de remediação consideradas para a área de estudo, a técnica que apresentou melhor pontuação dentro do critério de tomada de decisão foi o atenuação natural monitorada, que apesar da baixa eficiência não apresenta grandes impactos ambientais e possui baixo custo de instalação e manutenção.

A segunda melhor pontuação foi obtida pela técnica *In Situ* por sistema *Thermal Conduction Heating*. Apesar de sua colocação, isoladamente ela não é suficiente para o tratamento dos contaminantes e sua aplicação de forma isolada poderia causar a liberação dos contaminantes em forma de vapor para o meio, o que não é adequado.

Desta forma, uma solução é a aplicação de uma técnica complementar para a captação e tratamento dos gases gerados durante a aplicação do método, permitindo o controle do processo, sendo a técnica de *Soil Vapor Extraction (SVE)* a mais indicada, em que os gases no solo são bombeados e tratados em um sistema *Ex Situ*. Com a aplicação de um sistema conjugado, o TCH aumentaria significativamente a mobilidade da massa de contaminante adsorvida no solo, tornando-a volátil, e o SVE, extrairia o vapor e o trataria *ex-situ*, mitigando os riscos apresentados pela contaminação da área.

Para a validação foi aplicado o método de tomada de decisão a partir da aplicação conjugada das técnicas, onde o resultado final das notas atribuídas foi superior aos valores encontrados quando as técnicas foram aplicadas de forma isolada, validando assim, a hipótese de maior eficiência da ações conjuntas das técnicas (**Tabela 11**).

**Tabela 11** – Aplicação do método de Tomada de decisão por Atribuição de Pesos e Critérios para a aplicação de técnicas conjugadas.

Técnica de Remediação	Tratamento Termal - <i>Thermal Conduction Heating (TCH)</i> + <i>Soil Vapor Extraction (SVE)</i>
Tipo	<i>in situ/ ex situ</i>
Destinação de resíduo	Sim
Eficiência (peso 2)	Remove significativamente os contaminantes
Pontos	4
Custo (peso 3)	Requer instalação de eletrodos e sistema de tratamento de vapor
Pontos	3
Impacto Ambiental (peso 3)	Geração de resíduo Classe 1

Técnica de Remediação	Tratamento Termal - <i>Thermal Conduction Heating (TCH)</i> +
Pontos	<i>Soil Vapor Extraction (SVE)</i>
Pontuação Final	3 26

Fonte: Autora.

Assim, a aplicação conjuntas das técnicas de TCH e SVE é também alternativa adequada para elaboração do plano de ação para a área de estudo. Além disso, caso o cenário de uso futuro seja alterado e seja requerida técnica com resultados a curto prazo, essas seriam as técnicas mais indicadas.

A técnica de Atenuação Natural Monitorada é uma alternativa que apesar de um grande viés ambiental (não possui impacto ambiental significativo) e de baixo custo, seria necessário longos períodos para que técnica apresentação degradação significativa da massa, o que pode não ser adequado em um cenário com riscos aos receptores e para o tratamento do centro de massa.

O uso da técnica de remoção de solo é relativamente comum, como apresentou a **Figura 10**. Porém, a técnica apresenta grande impacto ambiental considerando o volume de solo contaminado que é transportado e tratado como resíduo de Classe 1. Entretanto, por ser um processo de engenharia que permite conter centros de massa de forma rápida e eficiente, é recomendado, principalmente em situações de risco ou de necessidade de execução de obras.

É importante citar que a avaliação das técnicas para a área de estudo, devido a limitações acadêmicas, não considerou análises de solubilidade e volatilidade do composto presente no solo da área de estudo, que já passou por degradação desde o início do processo de contaminação, e a composição mineralógica do solo da área. Esse dados são importantes para a definição da técnica a ser considerada no plano de intervenção.

## 7. CONCLUSÃO

A caracterização do meio físico, principalmente em situações de grande heterogeneidade é de suma importância para a compreensão dos processos de comportamento dos contaminantes e previsão de potenciais intervenções a serem realizadas. Por meio dos estudos realizados pôde-se determinar que o solo da área de estudo é heterogêneo, com a presença de camadas argilosas na porção mais rasa e camadas arenosas em porções mais profundas.

As aquisições de informações por técnicas de alta resolução como o LIF, atreladas à espacialização através de modelos trimensionais permitem a visualização clara e simples, além de propiciarem a integração com outras informações, como as características do meio físico, de forma rápida e precisa. Foi possível observar que a maior parte da massa de contaminante se encontra na zona vadosa, nas camadas argilosas, com centro de massa em 3,2 m e 3 outros pontos de alta concentração.

As análises químicas para validação e identificação dos compostos presentes na área e a determinação das SQIs se faz necessário, entretanto, através da integração das informações do meio físico, estas são realizadas de maneira pontual.

Através do uso do método Tomada de decisão por Atribuição de Pesos e Critérios (IPT, 2014), da avaliação das técnicas de remediação, considerando as características do meio, do contaminante e da distribuição do contaminante no meio, foi possível obter uma sugestão embasada na melhor alternativa de técnica de remediação a ser aplicada na área de estudo. Para o caso retratado nesse trabalho, de acordo com o cenário de uso futuro, a técnica mais adequada é a Atenuação Natural Monitorada. Apesar disso, a realização conjugada de um tratamento térmico *In situ* pela técnica de *Thermal Conduction Heating* (TCH), com um sistema de tratamento de vapores *ex situ* por *Soil Vapor Extraction* (SVE), também foi considerada adequada, apresentando maior eficiência para remoção dos contaminantes mas também custo mais elevado.

O método de tomada de decisão se mostrou efetivo, tanto quando aplicado a técnicas de maneira isolada, quanto durante a avaliação de técnicas conjugadas. Salienta-se que é possível aumentar o número de variáveis, como por exemplo, disponibilidade de materiais, tornando a matriz mais complexa.

É importante observar que a seleção de técnicas deve ser sempre realizada considerando os critérios de eficiência, custo e viabilidade ambiental, e considerando os riscos potenciais e reais que a área contaminada apresenta aos receptores diretos e indiretos, e estarem de acordo com as legislações vigentes em território nacional.

## 8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181 – Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, RJ, 1984. 13 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6502** – Coleta de amostras indeformadas de solos de baixa consistência em furos de sondagem - Procedimento, RJ, 1997. 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 9820** – Rochas e Solos. Rio de Janeiro, RJ, 1995. 18 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6457** – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, RJ, 1986. 9 p.

BARBOSA, A. M.; FREITAS, L. G.; GUIMARAES, C. C.; CRUZ, R. P. *Application of xrf as a screening tool for the assessment of CCA contaminated sites*. 7th International Contaminated Site Remediation Conference, 2017, Melbourne, Australia.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Decisão de Diretoria nº38, de 7 de 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*”. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-038-2017-C.pdf>>. Acesso em 16 de jan. 2019.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Mapa de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo**, 2017. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2018/01/Mapa.pdf>>. Acesso em 10 de fev.2019.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo**, 2017. Disponível em: <[https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2018/09/Ordem-Alfab%C3%A9tica-06\\_09\\_18.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2018/09/Ordem-Alfab%C3%A9tica-06_09_18.pdf)>. Acesso em 10 de fev.2019.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Valores orientadores para solo e água subterrânea**, 2014. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/solo/valores-orientadores-para-solo-e-agua-subterranea/>>. Acesso em: 10 de mai.2019.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 420, de 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. Disponível em

<<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>>. Acesso em 21 jan. 2019.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 273, de 29 de novembro de 2000. **Dispõe sobre prevenção e controle da poluição em postos de combustíveis e serviço.** Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=271>>. Acesso em: 20 jan. 2019.

Confederação Nacional da Indústria. **Portal da Indústria.** Disponível em: <<http://perfildaindustria.portaldaindustria.com.br/estado/sp>>. Acesso em: 10 de fev. 2019.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de Análise de Solo.** Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212 p.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Remediation Technology Descriptions for Cleaning Up Contaminated Sites.** Disponível em: <<https://www.epa.gov/remedytech/remediation-technology-descriptions-cleaning-contaminated-sites>>. Acesso em 16 de fev. 2019.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Overview of EPA's Brownfields Program Regional Screening Levels (RSLs) - Generic Tables.** 2019a. Disponível em: < <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables>>. Acesso em 04 de mai. 2019.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Overview of EPA's Brownfields Program.** 2019b. Disponível em: <<https://www.epa.gov/brownfields/overview-epas-brownfields-program>>. Acesso em 27 de abr. 2019.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **In-Situ Thermal Treatment.** 2019c. Disponível em: <<https://clu-in.org/download/techfocus/thermal/ABR09-6-Thermal.pdf>>. Acesso em 20 de abri. 2019.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Table 3-2: Treatment Technologies Screening Matrix,** 2013. Disponível em: <[https://frtr.gov/matrix2/section3/table3\\_2.pdf](https://frtr.gov/matrix2/section3/table3_2.pdf)>. Acesso em 09 de março. 2019.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **A Citizen's Guide to Pump and Treat,** 2012. Disponível em <[https://clu-in.org/download/Citizens/a\\_citizens\\_guide\\_to\\_pump\\_and\\_treat.pdf](https://clu-in.org/download/Citizens/a_citizens_guide_to_pump_and_treat.pdf)>. Acesso em 23 de fev. 2019.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs).** 2009. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2014->

03/documents/pahs\_factsheet\_cdc\_2013.pdf>. Acesso em 11 de mai. 2019.

EPA – United States Environmental Protection Agency. *In Situ Treatment Technologies for Contaminated Soil*. 2006. Disponível em: < <https://clu-in.org/download/remed/542f06013.pdf>>. Acesso em 01 de mai. 2019.

EPA – United States Environmental Protection Agency. *Mult-Phase Extraction State-of-the-Practive*, 1999. Disponível em: <<https://clu-in.org/download/remed/mpe2.pdf>>. Acesso em 20 de fev. 2019.

FREITAS, L. G.; Gandolfo, O. C. B.; GALLI, V. C.; BLANCO, R. G.; BARBOSA, A. M.; LEITE, D. C. **Integração de métodos geofísicos com a sonda MIP para caracterização estratigráfica de uma área contaminada**. IV Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, 2015, São Paulo, SP.

HENNER, P.; et al. **Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) occurrence and remediation methods**. 2007. Disponível em <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00193277>>. Acesso em 22 de abr. 2019.

ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade. Manual: **Revitalização de áreas degradadas e contaminadas (brownfields) na América Latina**. 1º ed. São Paulo, 2013. < [http://e-lib.iclei.org/wp-content/uploads/2017/06/Manual\\_INT\\_Portugues\\_Final.pdf](http://e-lib.iclei.org/wp-content/uploads/2017/06/Manual_INT_Portugues_Final.pdf)>. Acesso em 27 de abr. 2019.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **A produção imobiliária e a Reabilitação de Áreas Contaminadas**. 2018.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Panorama GAC – Mapeamento da cadeia de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. 2016

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Guia de elaboração de planos de intervenção para o Gerenciamento de áreas contaminadas**. Páginas & Letras Editora Gráfica. 2014.

ISLER, E.; et al. **Uso do Laser-Induced Fluorescence (LIF) da Caracterização de Áreas Contaminadas dm tempo real**. 2013. Disponível em < <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27852>>. Acesso em 11 de mai. 2019.

JACQUES, R., J., S.; et al. **Biorremediação de solos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos**. Revista Ciência Rural, v.37, n/4, jul-ago 2007.

JAKOP, A. A. E. & YOUNG, A. F. **O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas**. XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, ABEP, Caxambu. 2006.

KIEHL, E. J. ***Manual de Edafologia: Relações Solo-Planta.*** Ouro Fino: Editora Agronômica Ceres, 1979.

KIELY, R. ***Industrialization and development: A comparative analysis.*** ECL Press, 1998.

KLUTE, A. ***Methods of Soil Analysis:*** Part 1 – Physical and Mineralogical Methods. SSSA Book Series, 1986.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo.** São Paulo: EDUSP, 2005.

NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos Solos – Ensaios de Laboratório.** São Carlos: Gráfica EESC/USP, 1995.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

POTT, Crisla; ESTRELA, Carina. **Histórico ambiental: desastres ambientais e o despertar de um novo pensamento.** Pelotas, 2015.

SANTOS, E.; UNGARI, H. C. N.; SANTOS, M. B. **Principais técnicas de remediação e gerenciamento de áreas contaminadas por hidrocarbonetos no estado de São Paulo.** Universidade Estadual de Campinas, 2008.

SÃO PAULO. Decreto nº59.263, de 5 de junho de 2013. **Regulamenta a Lei nº 13.577, de 8 de julho de 2009, que dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá providências correlatas.** Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/areascontaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2013/11/decreto-59-263-05062013.pdf>>. Acesso em: 02 de fev. 2019.

SUTHERSAN, Suthan. **Remediation Engineering.** CRC Press LLC, 2017.

TEIXEIRA, L. C. C. **A fitorremediação como alternativa para recuperar solos contaminados com produto preservativo de madeira (Arseniato de Cobre Cromatado - CCA): um estudo de caso.** 2005. Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo.

USITC – UNITED STATES INTERNATIONAL TRADE COMMISSION. ***Remediation and Nature and Landscape Protection Services: An Examination of U.S. and Foreign Markets.*** Washington, DC: USITC, 2004.

VASQUES, A. R. **Considerações sobre estudos de caso de Brownfields: Exemplos no Brasil e no Mundo.** Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, 2006.

WIPO – World Intellectual Property Organization. ***Mobile Processing System For Hazardous And Radioactive Isotope Removal,*** 2015. Disponível em:

<<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US231858554&tab=PCTDESCRIPTION&queryString=solar&recNum=229&maxRec=545281>>. Acesso em 09 de fev. 2019.

Zabel, R. A.; Morrell, J. J. (1992). ***Wood microbiology: decay and its prevention.*** USA: Academic Press, Inc, 420p.