

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

YAEL CREMONINI BAPTISTA

**Emprego de tecnologia de investigação ambiental com alta resolução para refinamento  
do modelo conceitual e delimitação dos centros de massas com maior precisão.**

São Paulo

2022

**Emprego de tecnologia de investigação ambiental com alta resolução para refinamento  
do modelo conceitual e delimitação dos centros de massas com maior precisão.**

**Versão Corrigida**

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

Orientador: Vicente de Aquino Neto

São Paulo

2022

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

#### Catalogação-na-publicação

Baptista, Yael Cremonini

Emprego de tecnologia de investigação ambiental com alta resolução para refinamento do modelo conceitual e delimitação dos centros de massas com maior precisão. / Y. C. Baptista -- São Paulo, 2022.

75 p.

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

1.Diagnóstico Ambiental 2.Áreas Contaminadas 3.Organoclorados  
4.Remediação do solo I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.  
Departamento de Engenharia Química II.t.

## AGRADECIMENTOS

À Deus por toda saúde e oportunidade que tive e tenho em minha vida.

Ao meu orientador, Vicente de Aquino Neto, por todos os ensinamentos durante o curso, paciência e compreensão na elaboração desta monografia.

À minha amiga e quase mentora Gessia Shida, sem suas criteriosas revisões, discussões técnicas e amizade a minha trajetória teria sido muito mais complicada.

Ao meu marido e amigo Victor Ferenzini, por todo amor, companheirismo e entendimento em mais uma difícil caminhada.

A Mauricio Sabbag e a ConAm Consultoria Ambiental pelos ensinamentos e disponibilidade dos dados utilizados neste trabalho.

A toda equipe do MBA Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields por todo ensinamento que tive durante este período.

## RESUMO

O Gerenciamento de Áreas contaminadas (GAC) é um conjunto de ações de identificação, caracterização e implementação de medidas de intervenção em uma Área Contaminada (AC), cujo objetivo principal é a viabilização do uso seguro proposto ou implementado. As medidas de intervenção necessárias para atingir o objetivo mencionado somente podem ser definidas de forma eficaz à partir de um diagnóstico preciso e detalhado da área. Este trabalho apresenta como a investigação ambiental com alta resolução em uma área contaminada por organoclorados pode viabilizar financeiramente e ambientalmente a reutilização de uma área contaminada enquanto gerencia de forma sustentável a contaminação existente. O estudo de caso apresentado neste trabalho ilustra como uma investigação com alta resolução contemplando o uso de ferramentas de investigação em tempo real (*Membrane Interface Probe* (MIP), Sensor de Caracterização da Condutividade Elétrica (EC), *Hydraulic Profiling Tool* (HPT)), permitiu o refinamento do Modelo Conceitual da Área (MCA) e delimitou melhor os centros de massa. Esta melhor delimitação possibilitou o uso combinado de técnicas de remediação, sendo elas: remediação termal apenas nos grandes centros de massa e a técnica de redução desclorativa para as demais porções da pluma de contaminação.

Palavras-chaves: Diagnóstico Ambiental, Áreas Contaminadas, Organoclorados, Remediação do solo.

## ABSTRACT

Baptista Cremonini, Yael Emprego de tecnologia de investigação ambiental com alta resolução para refinamento do modelo conceitual e delimitação dos centros de massas com maior precisão. 2022. 75f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Contaminated land management (CLM) it's an identification, characterization, and implementation guideline for site remediation on a Contaminated Land (CL), where the main goal is to feasibly the proposed or implemented safe use of the land. Remediation measures needed to achieve CLM goals can only be precisely defined after an accurate and detailed diagnose from a specific area. This work can be defined as high-resolution environmental research on a organochlorinated contaminated land has the potential to feasibly economically and environmentally avoiding abandonment of environmental liabilities. This case study presents how high-resolution environmental research comprising real time investigation tool (Membrane Interface Probe (MIP), Electrical Conductivity Characterization Sensor (CE), Hydraulic Profiling Tool (HPT)), allowed the refinement of the conceptual area model and improved centers of mass delimitation. This delimitation improvement made possible the use of combined remediation techniques, as quoted: thermal remediation exclusively on mass center and dechloroactive reduction for remaining portions of the contamination plume.

**Keywords:** Environmental assessment, contaminated Land, organochlorinated compounds, soil remediation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- - Modelo de 14 compartimentos (Adaptado de SALE e NEWELL, 2001).....	19
Figura 2- Princípio da operação do <i>Membrane Interface Probe</i> (MIP). Fonte: Geoprobe, 2017 .....	22
Figura 3- MIP (Fonte: HRSC-2019 - AESAS).....	22
Figura 4 - Descritivo ferramenta OIP. Fonte: Finkler Ambiental, 2019 .....	24
Figura 5- Exemplos de imagens captadas por ferramentas OIP. (Fonte: Finkler, 2019) .....	25
Figura 6- Caixa Preta de Luz UV-A fechada (a esquerda) e aberta (a direita), mostrando a lâmpada (Fonte: Riyis,2019) .....	26
Figura 7- Liner com amostra de solo sendo colocado dentro da caixa preta de luz UV-A (Fonte: Riyis, 2019).....	27
Figura 8 - Ferramenta HPT (Fonte: HRSC-2019 - AESAS).....	28
Figura 9- Exemplo perfil HPT (Fonte: Finkler) .....	29
Figura 10 - CPTU- Fonte: Pattrol .....	30
Figura 11 Sensor de Condutividade Elétrica (EC). (Fonte: HRSC-2019 - AESAS).....	30
Figura 12 – Localização da área do estudo.....	34
Figura 13 – Localização dos pontos de perfurações para leitura de gases .....	37
Figura 14 – Localização dos pontos de investigação de resposta contínua sobreposto com as maiores concentrações.....	38
Figura 15 – Perfis MIP de respostas típicas de Hidrocarbonetos Clorados no aquífero raso..	42
Figura 16 – Perfis MIP a presença de organoclorados na camada confinante de 7 a 10 metros. ....	43
Figura 17 – Perfis MIP com indicativo de TPH .....	44
Figura 18 – Seção Geológica A-A' .....	48
Figura 19 – Seção Geológica B-B' .....	49
Figura 20 – Seção Geológica C-C' .....	50
Figura 21 – Mapa Potenciométrico .....	51
Figura 22 – Mapa Potenciometrico .....	52
Figura 23 – Novos Poços de Monitoramento .....	54
Figura 24 – Pluma de Tetracloroeteno (PCE) .....	57
Figura 25 – Pluma vertical de Tetracloroeteno (PCE) .....	58
Figura 26 – Pluma de Tricloroeteno (TCE).....	59
Figura 27 – Pluma de Tricloroeteno (TCE).....	60
Figura 28 – Pluma de Cloreto de Vinila (CV).....	61
Figura 29 – Pluma de Cloreto de Vinila (CV).....	62
Figura 30 – Mapa de Riscos .....	66
Figura 31 – Mapa de Intervenção .....	69

## **LISTA DE SIGLAS (OPCIONAL)**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
CE – Condutividade Elétrica  
CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo  
CMA – Concentrações Máximas Aceitáveis  
CV – Cloreto de Vinila  
DCE – Dicloroeteno (Cis + Trans)  
ID – identificação  
NA – Nível d'Água  
NBR – Norma Brasileira  
OD – Oxigênio Dissolvido  
ORP – Potencial Redox  
PCE – Tetracloroeteno  
pH – Potencial Hidrogeniônico  
PM – Poço de Monitoramento  
PMN – Poço de Monitoramento Multinível  
ppm – Partes por Milhão  
PV – Poço de monitoramento vapores do solo  
RSLs – Regional Screening Levels  
SQI – Substâncias Químicas de Interesse  
TCE – Tricloroeteno  
TPH – Hidrocarbonetos Totais de Petróleo  
VO – Valor Orientador  
VOC – Compostos Orgânicos Voláteis  
ZS – Zona não Saturada

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	11
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	12
<b>3. JUSTIFICATIVA.....</b>	12
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	12
<b>4.1. Gerenciamento de Áreas contaminadas .....</b>	12
<b>4.2. Remediação de Áreas Contaminadas .....</b>	13
<b>4.3. Modelo Conceitual da Área (MCA).....</b>	15
<b>4.4. Importantes definições estabelecidas na DD-38/2017 .....</b>	17
<b>4.5. Investigação Ambiental com alta resolução – algumas ferramentas.....</b>	20
<b>4.5.1. Ferramentas para mapeamento da distribuição das SQIs.....</b>	21
<b>4.5.1.1. Membrane Interface Probe -MIP .....</b>	21
<b>4.5.1.2. Optical Image Profiler – OIP .....</b>	23
<b>4.5.1.3. Caixa de Luz UV para detecção de fase residual/Fase livre de Hidrocarbonetos .....</b>	26
<b>4.5.2. Ferramentas para caracterização da Heterogeneidades Hidrogeológicas .....</b>	27
<b>4.5.2.1. – Hydraulic Profiling Tool – Groudwater Sampler HPT-GWS .....</b>	27
<b>4.5.2.2. Piezocene - CPTu .....</b>	29
<b>4.5.2.3. Sensor de Condutividade – EC .....</b>	30
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	31
<b>5.1. Coleta e análise dados .....</b>	31
<b>5.2. Área de estudo.....</b>	31
<b>5.2.1. Descrição da área .....</b>	31
<b>5.2.2. Histórico Ambiental da Área de estudo .....</b>	31
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	35
<b>6.1. Investigação detalhada complementar com alta resolução .....</b>	35
<b>6.1.1.1. Screening Soil Gas Survey (SGS).....</b>	35
<b>6.1.2. Caracterização em Alta Resolução através da ferramenta MIP (Membrane Interface Probe) .....</b>	39
<b>6.1.3. Modelo Geológico e Hidrogeologia Local .....</b>	45
<b>6.1.4. Amostragem dos poços existentes.....</b>	53
<b>6.1.5. Instalação de Poços de Monitoramento e Amostragem de Solo .....</b>	53

6.1.6. Resultados compilados Água Subterrânea .....	55
6.2. Discussão .....	63
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	72

## 1. INTRODUÇÃO

As áreas contaminadas podem ser consideradas um dos principais problemas ambientais da atualidade, representando risco à saúde pública e ao meio ambiente. A fim de diminuir estes riscos é realizado o processo denominado Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC), cuja função principal é proporcionar o uso seguro do local.

O Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC) é uma exigência legal que em âmbito nacional é regulamentada pela Resolução CONAMA 420 e no Estado de São Paulo estabelecida pela Lei Estadual SP 13.577/2009, regulamentada pelo Decreto 59.263/2013, e implementada pela Decisão de Diretoria DD-038/2017/C (CETESB, 2017) considerada como referência nacional.

O GAC é composto por três principais etapas: identificação, investigação (caracterização e diagnóstico), remediação e reabilitação. A remediação consiste na etapa do GAC que mais desprende de recursos, tempo, riscos e insucessos. Conforme mencionado na Lei Estadual SP 13.577/2009, recomenda que os projetos de remediação de áreas contaminadas devam ter como prioridade a remoção de massa de contaminante. Pode-se considerar que o sucesso da remediação é proporcionalmente ligado a qualidade da etapa de investigação/diagnóstico realizada na área.

De acordo com Pitikin et al., (2014); Quinnan (2012), SINGER e Fiacco, (2010), Suthersan et al., (2015), estima-se que cada unidade monetária investida na etapa de investigação, resultará em uma economia de 10 unidades monetárias na etapa de remediação como consequência de aprimoramento do Modelo Conceitual da contaminação.

Riyis (2019) afirma que atualmente no Brasil, as investigações não são priorizadas, mas sim realizadas apenas seguindo os procedimentos, normas e instrumentos legais e, em geral, apresentam diversas falhas de execução, conceito e abordagem. Portanto, faz-se necessário o uso de técnicas mais eficazes para o diagnóstico de áreas contaminadas. Em decorrência dessa necessidade o uso de ferramentas de análise em tempo real para caracterização do meio físico e da contaminação com alta resolução vem ganhando destaque por sua capacidade de permitir uma coleta e análise de um número maior de amostras e assim, gerar um Modelo Conceitual mais representativo da área investigada. A investigação ambiental deve priorizar a elaboração de um Modelo Conceitual Aplicável à área de estudo com detalhes necessários para a definição, dimensionamento e execução de medidas de intervenção eficazes.

## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica e estudo de caso sobre investigação ambiental com alta resolução em área contaminada por organoclorados de forma a demonstrar os seus benefícios na redução do custo e tempo de vida útil de um projeto de remediação.

## 3. JUSTIFICATIVA

É frequente a verificação de sites realizando remediação termal em toda sua extensão, consumindo grande quantidade de energia sem que houvesse a certeza da sua real necessidade.

O investimento financeiro e técnico desprendido na etapa de investigação ambiental pode proporcionar estratégias combinadas de remediação possibilitando o uso da remediação termal apenas nos centros de massa.

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1. Gerenciamento de Áreas contaminadas

O estudo e o gerenciamento das áreas contaminadas (ACs) veem apresentando uma crescente relevância seja por causas ambientais, saúde pública, econômica e políticas.

A preocupação e conscientização dos riscos causados à saúde humana causada pelas ACs começou ter destaque nos Canadá, Estados Unidos e Europa entre as décadas de 1970 e 1980, ocasionadas por casos emblemáticos como, por exemplo, “Ville la Salle”, “Love Canal” –EUA, e “Lekkerkerk” – Holanda onde os três casos envolveram a contaminação do solo e da água subterrânea (CETESB, 2003).

No cenário nacional, o conhecimento das consequências de uma AC iniciou por volta da década de 1990, com o aparecimento de casos emblemáticos e conhecidos até hoje como, por exemplo: Aterro Mantovani- Santo Antônio de Posse – SP e Cidade dos Meninos – Duque de Caxias – RJ. Porém o conhecimento e conscientização referente às ACs em território nacional não homogêneo entre os Estados, sendo o Estado de São Paulo por meio da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) reconhecido como referência nacional.

As normas e legislações brasileiras que tratam especificamente sobre o tema de ACs são relativamente novas, e em sua maioria foram publicadas pela CETESB no início da década de 2000, com o lançamento do Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB,

2001). Em nível nacional, a legislação vigente é a Resolução CONAMA 420, de 28 de dezembro de 2009 (CONAMA, 2009).

Segundo a Lei Estadual Nº 13.577/2009 do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2009), as áreas contaminadas são definidas 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 bem a proteger”.

O Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2009) define áreas contaminadas 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, que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural”.

Cunha (1997) define áreas contaminadas como áreas que estão associadas a diferentes fontes de poluição, sendo as atividades mais comuns as de caráter industrial, de armazenamento e distribuição de combustíveis, e de sistemas de tratamento e disposição de resíduos.

Nota-se que as definições são pautadas no gerenciamento dos riscos à saúde humana ou nos bens a proteger.

Em 07 de Fevereiro de 2017 a CETESB publicou, a Decisão de Diretoria nº 038/2017/C – CETESB, que dispõe, entre outros itens, sobre a revisão do Procedimento para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas “e estabelece o documento “Diretrizes para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Âmbito do Licenciamento Ambiental”. O “Procedimento para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas” descreve as etapas do gerenciamento de áreas contaminadas, desde a identificação até o processo de reabilitação, bem como as metodologias empregadas. Nas “Diretrizes para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Âmbito do Licenciamento Ambiental” é ressaltada a necessidade de execução de estudos de passivo para emissão de licenças em áreas ocupadas previamente por empreendimentos potencialmente poluidores, corroborando com o disposto na Lei nº 13.577/2009 e no Decreto nº59.263/2013.

#### **4.2. Remediação de Áreas Contaminadas**

Conforme estabelecido na DD-038/2017, caso ocorra contaminações que apresentem riscos à saúde humana que se tenha a necessidade de medidas de remediação, deve ser priorizada medidas que promovam a remoção da massa de contaminante, porém, este regulamento não define procedimentos necessários para definir métricas específicas de remoção de massa. Isso

dificulta muito a atuação dos responsáveis legais na definição dos objetivos a serem definidos para cada projeto.

Maximiano e Moraes (2013) escrevem que as técnicas de remediação tradicionalmente eram, em sua maioria, associadas à contenção da pluma (seja por bombeamento e tratamento) ou por tratamento *off-site* (como escavação e destinação do solo contaminado). Com a evolução das tecnologias em âmbito geral as tecnologias aplicadas na remediação de AC também foram aprimoradas. As técnicas de remediação *in situ* começaram a ser mais utilizadas.

Atualmente há diversas técnicas para remediação de áreas contaminadas, técnicas essas que continuam em constante evolução e atualização. No cenário nacional podemos citar como as mais difundidas as técnicas a seguir:

- Bioestimulação;
- Extração de Vapores do Solo (*SVE- soil vapor extraction*);
- Extração Multifásica (*MPE- multi-phase extraction*);
- Oxidação Química *in situ* (*ISCO*);
- Redução Química *in situ* (*ISCR*);
- Remoção de solo contaminado;
- Dessorção Térmica (conhecida como “Remediação Termal”).

A definição da(s) técnica(s) de remediação a ser (em) utilizada(s) na remediação da AC, deve ser pautada em diversas considerações tendo em vista o meio a ser remediado, características físico-químicas do ambiente de subsuperfície (complexidade).

Riyis (2019), afirma que o sucesso de um projeto de remediação de áreas contaminadas depende, em grande parte, do entendimento do meio físico e a implementação de uma (ou mais) técnicas adaptadas à geologia específica da área e às propriedades específicas das substâncias químicas de interesse (SQIs).

Os desafios e limitações da remediação estão mais relacionados à dificuldade de identificar os centros de massa e direcionar o tratamento nas unidades hidroestratigráficas alvo, do que nas diferenças tecnológicas dos sistemas de remediação (Stroo et al., 2012; ITRC, 2015; Suthersan et al., 2015), ou seja, o sucesso da remediação possui maior relação com a definição do Modelo Conceitual da Área (MCA).

De acordo com Riyis et al. (2013), os trabalhos de investigações de áreas contaminadas no Brasil não definem um Modelo Conceitual da Área (MCA) adequado às incertezas que necessitam ser gerenciadas. O problema está em considerar um Modelo Conceitual único para todas as áreas, o que acarreta muitas vezes em equívocos no mapeamento das plumas e na definição dos seus centros de massa, assim como na identificação das fontes dessas contaminações.

Clearly, (2009) apud (Riyis et. al 2013) menciona que as maiores falhas nas remediações de áreas contaminadas são causadas por problemas nas investigações.

#### **4.3. Modelo Conceitual da Área (MCA)**

Conforme descrito na DD-038/2017, “Modelo Conceitual é um relato escrito, acompanhado de representação gráfica, dos processos associados ao transporte das substâncias químicas de interesse na área investigada, desde fontes potenciais, primárias e secundárias de contaminação, até potenciais ou efetivos receptores. Este relatório deve conter a identificação das substâncias químicas de interesse, das fontes de contaminação, dos mecanismos de liberação das substâncias, dos meios pelos quais substâncias serão transportadas, dos receptores e das vias de ingresso das substâncias nos receptores”.

Nota-se que a definição do Modelo Conceitual da Área (MCA) descrita na DD-38/2017 não informa a necessidade de definição da distribuição de massa e volume da fonte secundária. Porém, verifica-se que o conhecimento da distribuição de massa e volume da fonte secundária é de extrema importância para o gerenciamento de uma área contaminada impactando diretamente na etapa de remediação e reabilitação. Seria de grande valia para o GAC caso a DD-38 seja atualizada, a definição de MCA comtemple também a necessidade da investigação e detalhamento da distribuição de massa e volume da fonte secundária. Além disso, essa DD deveria apresentar uma diretriz para a definição de como deve ser caracterizada uma fonte secundária em cada área, como por exemplo, é o volume de meios impactados, que deveriam conter, mínimo, 50% da massa da contaminação mapeada em determinada área. Uma diretriz com este objetivo, sem dúvida nenhuma irá criar uma lógica de trabalho para o mapeamento das plumas de contaminação com maior ou menor grau de resolução, e na definição de estratégias de remediação focadas não somente para eliminar o risco, mas para remover massa e controlar o comportamento das plumas de contaminação.

Riyis *et al.*, (2015) sintetizou o conceito do Modelo Conceitual da Área (MCA) em entendimento completo do meio físico e das SQIs, das fontes primárias e secundárias de contaminação, das vias de exposição, e dos receptores. O meio físico a ser entendido compreende no conjunto composto pela geologia, hidrologia e pedologia em interface das SQIs e histórico de uso da área.

De acordo com Aniceto e Horbe (2012), as características dos contaminantes, a quantidade do material depositado e o tipo de solo são fatores fundamentais que determinam a intensidade e distribuição da contaminação. O comportamento dos contaminantes no meio depende de vários fatores, como: constituintes do solo, permeabilidade, propriedades físicas e químicas dos contaminantes (Picarelli, 2013, Aniceto, Horbe, 2012).

Crumbling (2004) e Stro *et al.*, (2012) asseguram que, apesar da evolução de todas as técnicas de remediação (*in situ e ex situ*) os resultados positivos continuam a mercê da boa investigação ambiental para elaboração do modelo conceitual da área aplicável e sem falhas.

Riyis, (2019), afirma que não há método de remediação eficiente para funcionar sem que a investigação da área tenha sido bem elaborada.

Riyis (2012), também afirma que a elaboração do MCA é a etapa fundamental da investigação, pois sem ele ou com falhas nele, as medidas de intervenção podem ser ineficientes, mal dimensionadas, excessivamente custosas, mal planejadas, mal executadas.

Linch (2004) propõe um roteiro de perguntas que devem ser respondidas para que a aquisição de dados que embasaram o MCA seja representativa, são elas:

1. “Como devo gerenciar incertezas?”
2. “Quantas amostras são necessárias?”
3. “Onde devem ser coletadas?”
4. “As amostras obtidas são representativas de toda a área?”
5. “Os dados são suficientes?”

Riyis (2012) propõe que as questões acima devem ser revisadas com grande frequência e principalmente durante as atividades de campo.

Riyis (2019) propõe que para um MCA seja adequadamente elaborado é obrigatório que as condições geológicas, hidrogeológicas, pedológicas e SQIs da área estejam bem definidas e sem pontos de dúvidas.

De acordo com Riyis, para que um MCA seja bem elaborado as técnicas de investigação devem fornecer informações assertivas, são elas:

- Perfil estratigráfico;
- Direção e sentido preferenciais de fluxo tridimensional da água subterrânea;
- Delimitação dos aquíferos e aquietardes;
- Parâmetros hidráulicos da área (condutividade hidráulica (K), gradiente hidráulico (i)).
- Espessuras dos aquíferos;
- Zona de fluxo;
- Zona de armazenamento também conhecida como zona de retenção;
- Substâncias Químicas de Interesse (SQIs) presentes na área e possíveis de serem encontradas.
- E o mapeamento tridimensional da contaminação.

Riyis (2019), também propõe que na ausência das informações acima apresentadas, o MCA deve ressaltar essas incertezas e propor um método de investigação que permita o seu gerenciamento a níveis aceitáveis para a tomada de decisão sobre a existência e grau de riscos presentes na área de influência da contaminação.

#### **4.4. Importantes definições estabelecidas na DD-38/2017**

A seguir são apresentadas algumas importantes definições estabelecidas da DD-38/2017:

- Área Fonte: Área que abriga ou abrigou fontes potenciais ou fonte primária de contaminação;
- Fonte Primária de Contaminação: instalação, equipamento ou material a partir dos quais as substâncias químicas de interesse se originam e estão sendo, ou foram liberadas para um ou mais compartimentos do meio físico;
- Fonte Potencial de Contaminação: instalação, equipamento ou material a partir do qual as substâncias químicas de interesse podem ser liberadas para um ou mais compartimento do meio físico;
- Fonte Secundária de Contaminação: meio atingido por substâncias químicas de interesse provenientes da Fonte Primária de Contaminação, capaz de armazenar certa massa dessas substâncias e atuar como fonte de contaminação de outros compartimentos do meio físico;

- Foco de Contaminação (*Hot spot*): Porção de uma área contaminada onde são detectadas as maiores concentrações das substâncias químicas de interesse.

A DD-38/2017 sanciona que a etapa de investigação detalhada deve caracterizar o meio físico na área de influência da contaminação distribuição das SQIs, definição tridimensional dos limites das plumas de contaminação, quantificação da massa de contaminante considerando as diferentes fases em que ele se encontra, caracterização do transporte das SQIs nas diferentes unidades hidroestratigráficas e sua evolução no tempo. De acordo com ITRC, 2015, um MCA deve ter como premissas três perguntas básicas, são elas:

1. Onde a contaminação reside em sua maior parte?
2. Por onde essa contaminação está sendo transportada?
3. A massa adsorvida ou residual em zonas de baixa permeabilidade pode ser liberada para zonas mais permeáveis? Se sim, podem gerar uma pluma expansiva ou persistente?

Apesar das três perguntas acima apresentadas serem classificadas como básicas não são fáceis de serem respondidas. Sale e Newell (2011) propõem o modelo de 14 compartimentos para visualizar a distribuição e movimento de contaminantes entre as fases químicas que podem estar presentes em áreas contaminadas, especialmente por DNAPLs.

O modelo de 14 compartimentos, apresentado na figura 1, foi proposto por Sale e Newell (2011) ilustra como os contaminantes podem se distribuir em vários compartimentos, a transferência de massa potencial (fluxos) entre eles e como a remediação pode afetar igualmente cada compartimento dentro da fonte ou pluma. Riyis (2019) afirma que o modelo de 14 compartimentos é uma ferramenta poderosa para o planejamento da caracterização da área e desenvolvimento do MCA.

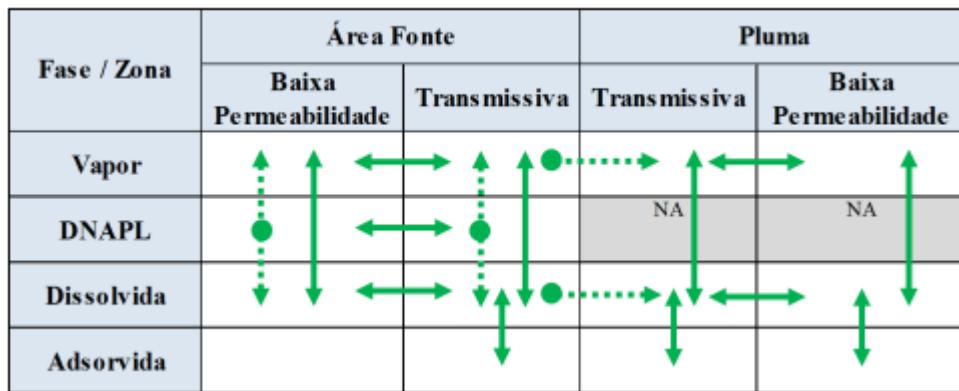


Figura 1- - Modelo de 14 compartimentos (Adaptado de SALE e NEWELL, 2001)

Como ilustrado na figura 1, o modelo dos 14 compartimentos ilustra as tendências de equilíbrio e movimento relativo dos contaminantes entre fase livre e/ou retida (NAPL), fases vapor, dissolvidas e sorvida. A partir do tempo percorrido desde o vazamento por organoclorado, o modelo apresenta três estágios: inicial, intermediário e avançado.

Estágio inicial (próximo ao momento da contaminação) → os contaminantes estão presentes em fase livre na zona mais transmissiva, pois ainda não houve tempo suficiente para a passagem para zonas de baixas permeabilidade. O particionamento para fase vapor e mecanismos de solubilização para fase dissolvida começam a acontecer, considera-se como processo inicial para geração da pluma de fase dissolvida. Nesta situação, remover a massa de fase dissolvida impacta positivamente na diminuição do progresso da contaminação.

Estágio intermediário → fase livre ainda presente na zona mais transmissiva, podendo migrar para as zonas menos contaminadas. A interação com as zonas menos transmissivas tende a ocorrer por difusão. É esperado aumento das concentrações de contaminantes na fase dissolvida (fonte e pluma), mas está mais restrito a zonas mais transmissivas. Inicia-se o processo de sorção (fonte e pluma). Observa-se a presença moderada dos contaminantes em toda a área onde a distribuição ocorre de forma uniforme. Neste caso, tratar apenas a fonte trará efeito menos pronunciado.

Estágio avançado → todas as zonas transmissivas apresentam menor concentração de contaminantes, grande parte da massa se encontra nas zonas de baixa permeabilidade. Não se verifica mais fase livre no meio. Neste tipo de cenário, é indicado direcionar as ações de remediação nas zonas transmissivas e principalmente nas zonas de baixa permeabilidade, onde é esperado encontrar maior massa de contaminante sorvida. A opção de remoção da contaminação apenas da fase dissolvida, na zona transmissiva, provocará uma diferença de

concentração, induzindo a persistência da contaminação através do mecanismo de difusão reversa.

A DD-38/2017 não obriga, porém no seu item “observação 1” recomenda a utilização de métodos de investigação de alta resolução na investigação de áreas com complexidades associadas ao meio físico e à distribuição das substâncias químicas de interesse, além da localização de fontes primárias de contaminação não identificadas nas etapas de Avaliação Preliminar e Investigação Confirmatória.

#### **4.5. Investigação Ambiental com alta resolução – algumas ferramentas**

Os procedimentos de investigação mais modernos possuem como um dos princípios pilares o detalhamento da heterogeneidade do meio e a distribuição de massa de contaminante em diferentes unidades hidroestratigráficas e em diversas fases a fim de melhorar o mapeamento das fontes secundárias. Este objetivo é possível de ser executado, somente com a coleta e análise de mais amostras, e este é o princípio básico da investigação com alta resolução.

O detalhamento hidroestratigráficos e da distribuição das SQIs permitirá um delineamento adequado das fontes secundárias por meio da identificação de algumas questões de extrema importância para a elaboração do MCA.

No cenário nacional estão disponíveis algumas ferramentas de análise em tempo real que podem ser utilizadas numa HRSC (Hight-Resolution Site Characterization), que de acordo com Riyis (2012) e Riyis et al (2013) são divididas em dois grandes grupos, são eles:

- Mapeamento da distribuição das SQIs, com a localização das maiores concentrações das SQIs e
- Avaliação do meio físico, onde o interesse é focado no entendimento do meio com base na heterogeneidade hidrogeológica, zonas preferencias de fluxo e transporte, e zona de armazenamento.

Convém afirmar que comumente HRSC é confundido com a utilização de equipamentos/técnicas de análise em tempo real, porém trata-se de conceito errôneo, pois como já explicado anteriormente, a HRSC é o conjunto de estratégias e técnicas de coleta de dados em densidade e escala apropriada para a definição da contaminação e sua interação com o meio físico (EPA, 2013). A seguir é apresentado um breve resumo das técnicas e ferramentas utilizadas numa investigação HRSC:

#### **4.5.1. Ferramentas para mapeamento da distribuição das SQIs**

A seguir são apresentadas as principais ferramentas utilizadas para mapeamento da distribuição das SQIs no âmbito nacional.

##### **4.5.1.1. Membrane Interface Probe -MIP**

O *Membrane Interface Probe* (MIP) é uma ferramenta acoplada a um equipamento de sondagem por direct push que permite a medição direta em tempo real, de dados contínuos sobre a distribuição de compostos orgânicos voláteis (VOC) na subsuperfície seja em meio saturado ou em meio não saturado (Milani, MG 2021).

A ferramenta possui uma sonda de 60 centímetros de comprimento e 57 milímetros de diâmetro e pode ser acoplada com outros sensores/ferramentas que serão apresentados a seguir.

A sonda do MIP possui uma membrana porosa de politetrafluoretileno fixada em a uma chapa de aço inoxidável, a qual é aquecida eletricamente até a faixa de temperatura (100 a 120 graus Celsius (°C) para estimular o particionamento dos VOCs presentes no solo e/ou na água subterrânea próxima à ponta da sonda, fazendo com que esses compostos se volatilizem, Figura 2.

Os VOCs até um determinado tamanho molecular (moléculas do tamanho do naftaleno ou menores) difundem-se pela membrana, sob o efeito de um gradiente de concentração e são transportados através de um gás de arraste (comumente é usado o gás nitrogênio) por uma alça de tubulação (linha tronco) e são carreados até três sensores químicos, são eles:

- PID (*Photo Ionization Detector*);
- FID (*Flame Ionization Detector*);
- e XSD (*Halogen Specific Detector*).

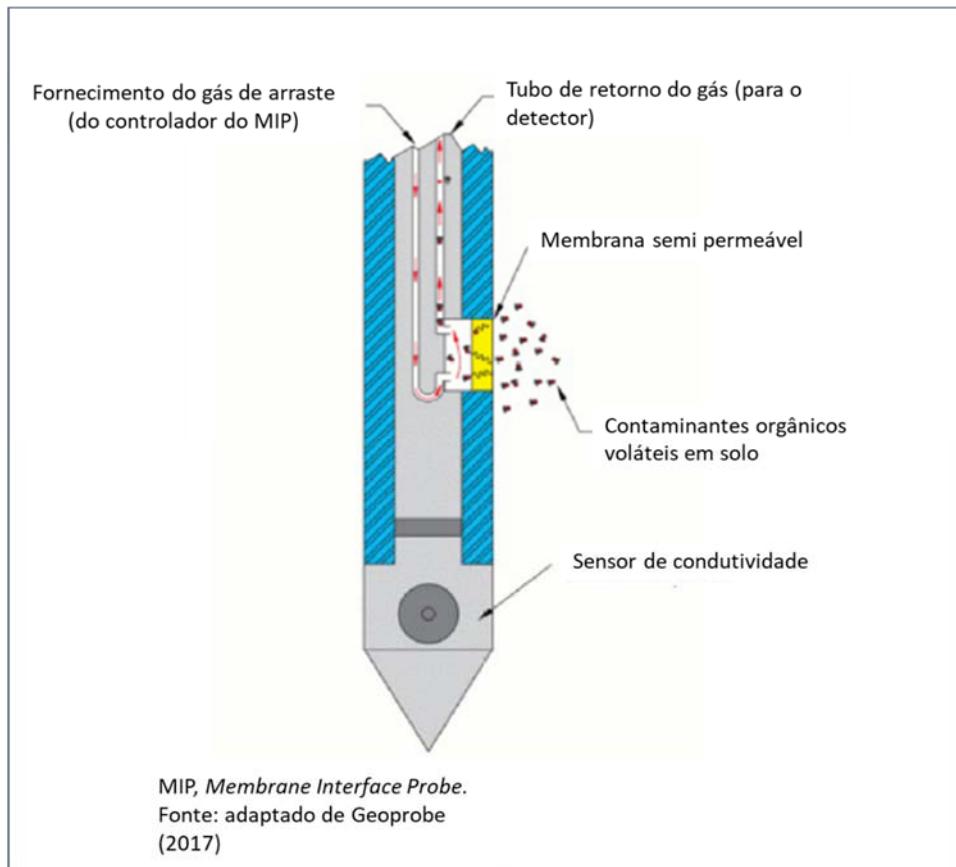


Figura 2- Princípio da operação do *Membrane Interface Probe (MIP)*. Fonte: Geoprobe, 2017

A **Figura 3** ilustra a distribuição dos sensores do cromatógrafo associado ao MIP.

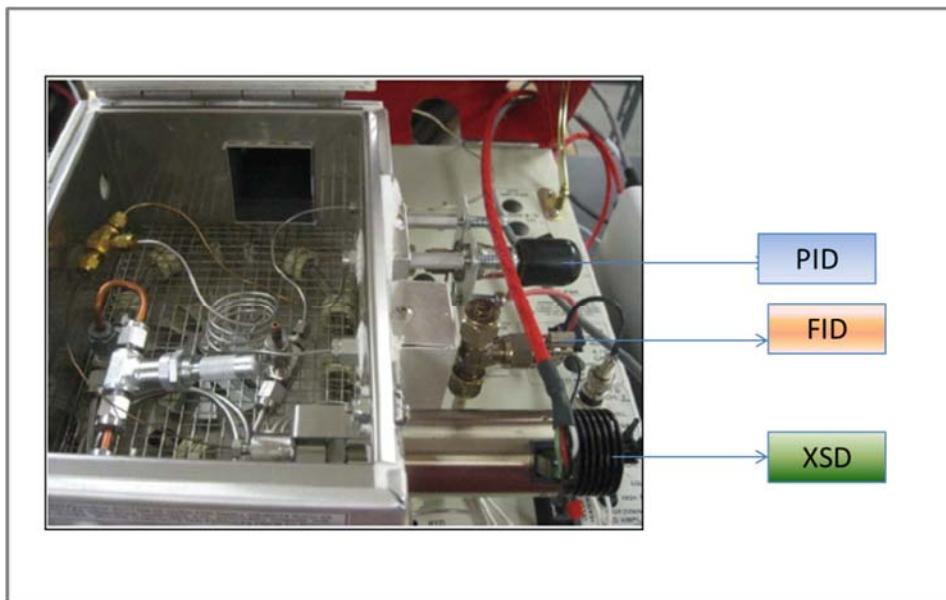


Figura 3- MIP (Fonte: HRSC-2019 - AESAS)

## PID – Photo Ionization Detector

O detector químico de fotoionização (PID) consiste em uma lâmpada ultravioleta (UV) de 10,6 eletrovols (eV), que ioniza compostos com potencial de ionização menor do que 10,6 eV, o que inclui compostos orgânicos aromáticos (por exemplo: BTEX), compostos clorados que possuem átomo de carbono em ligação dupla, (por exemplo, PCE, TCE).

Geralmente, este sensor é montado em uma célula eletrolítica termostaticamente controlada, de baixo volume.

## FID- Flame Ionization Detector

Através da mistura do Nitrogênio (N<sub>2</sub>), Hidrogênio (H<sub>2</sub>) e os contaminantes, ocorre uma reação resultando na ionização do contaminante a qual posteriormente é captada pelo eletrodo. Este equipamento detecta compostos que sofrem combustão como, por exemplo: metano e concentrações elevadas de alguns compostos clorados.

## XSD- Halogen Specific Detector

Compreende em uma câmara cerâmica, com fio de platina e grânulo de platina no interior de um reator de alta temperatura (aproximadamente 1.200°C).

Esta ferramenta oxida compostos orgânicos halogenados, liberando átomos de halogênio (exemplo: cloro, bromo e flúor) os quais são coletados em um detector de platina.

Os dados de saída do MIP são fornecidos na forma de perfis com até seis perfis para cada ponto, sendo três perfis representam as respostas dos detectores químicos: PID, FID e XSD, medidos em  $\mu$ V, e indicam as concentrações relativas da contaminação presente naquele ponto.

### 4.5.1.2. Optical Image Profiler – OIP

Compreende uma ponteira com sensores luminosos (OIP-UV) ou laser verde (OIP-G) cravados no meio com a técnica *Direct-push* e que fornecem registros fluorescência em tempo real e em escala de detalhe à medida que penetram no solo. Conforme descrito por Riyis 2019, seu funcionamento acontece da seguinte forma: os elétrons dos compostos aromáticos presentes nos hidrocarbonetos de petróleo absorvem energia em um determinado comprimento de onda e emitem essa energia recebida na forma de fluorescência, a qual pode ser detectada por algum equipamento ou até mesmo a olho nu.

O equipamento emana uma luz UV de 275 nm, uma fonte de luz visível por meio de uma lente de safira (que protege a câmara dos sensores do OIP) que capta a emissão dos elétrons liberados pela luz UV. Os dados fornecidos pelo OIP são interpretados por um *software*, que mostra qual a porcentagem da área da câmara está com luz irradiada. Esta porcentagem fornece qualitativamente se há presença ou ausência de LNAPL.

Há também equipamento UVOST (*Ultra Violet Optical Screening Tool*) que utiliza a tecnologia LIF/OIP. O que difere o UVOST do OIP acima explicado é que ausência da câmara e a luz UV emitida possui comprimento de onda de 308nm e é possível a identificação dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs) em vários comprimentos de onda. Os dados também são processados e interpretados por *software* e fornecem informações de qual comprimento de onda o composto responde com maior intensidade, ou seja, é possível diferenciar hidrocarbonetos distintos (Isler et al. 2018). Figura 4

Estas ferramentas são indicadas para áreas com suspeitas de presença oleosa em fase pura, como estratégia para eliminar o efeito *carry-over* da tecnologia MIP.

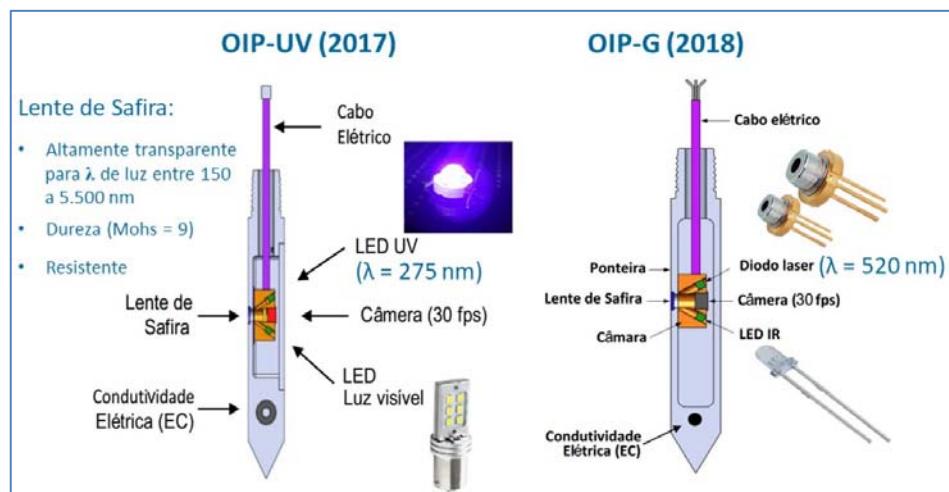


Figura 4 - Descritivo ferramenta OIP. Fonte: Finkler Ambiental, 2019

Abaixo a tabela exibe um breve resumo das principais características (OIPUV x OIP-G):

Tabela 1- Comparativo entre OIP-UV e OIP-G

Característica	OIP-UV	OIP-G
Indicação:	Diesel, gasolina, querosene e óleos combustíveis leves	Alcatrão, creosoto e óleos combinados pesados (ex BPF)
Sensores de detecção de contaminação	Diodo Emissor de Luz (LED) UV	Diodo Laser (LD) verde
Sensores de detecção de textura/grãos do solo	Diodo Emissor de Luz (LED) visível	Diodo Emissor de Luz (LED) IR

O OIP possui dois pontos positivos, fornece informação em tempo real e informação em escala detalhada (centímetros), porém como mencionado por Riyis, 2019 possui com ponto negativo o elevado custo. Em 2019 o valor cobrado no Brasil variava entre 12 e 15 mil reais por dia, o que se torna inviável na maioria dos projetos.

A Figura 5 ilustra exemplos de imagens captadas por ferramentas OIP e suas interpretações.

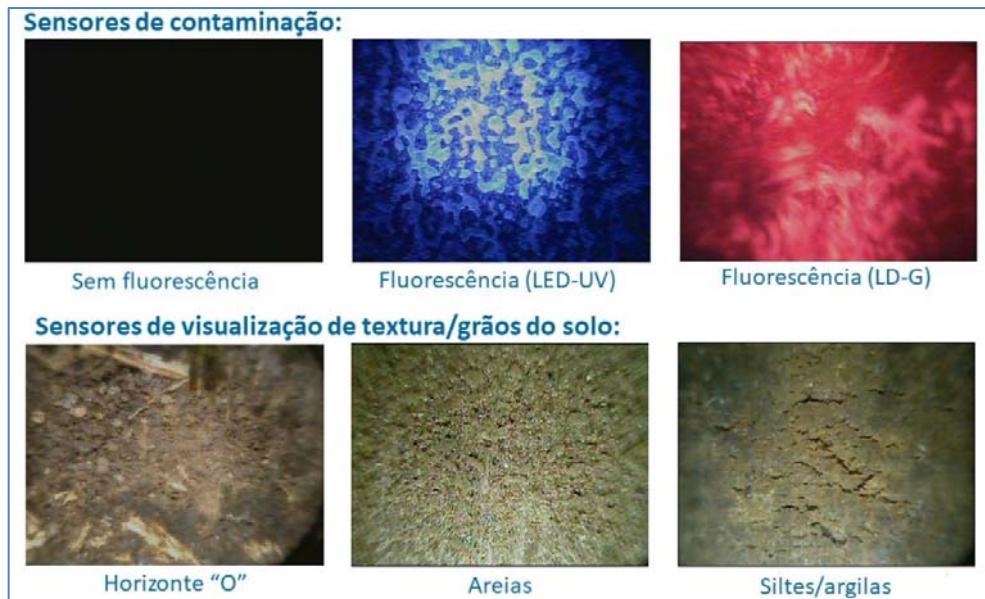


Figura 5- Exemplos de imagens captadas por ferramentas OIP. (Fonte: Finkler, 2019)

#### 4.5.1.3. Caixa de Luz UV para detecção de fase residual/Fase livre de Hidrocarbonetos

Utilizada como alternativa mais barata, a Caixa de Luz UV comprehende uma caixa de madeira de 80 cm de comprimento, 20 cm de altura e 20cm de profundidade, com uma lâmpada fluorescente UV-A (luz negra) de 25 w e 110 V presa na parte superior. As extremidades da caixa possuem um furo de aproximadamente 45mm de diâmetro por onde o *liner* com o testemunho de solo é inserido. Na tampa onde é acoplada a lâmpada UV, há uma abertura pequena, com cerca de 40cm de comprimento e 1cm de largura, onde é possível observar o liner contendo a amostra de solo, Figura 6 e Figura 7.

A lâmpada UV presente na Caixa Preta de Luz UV-A possui comprimento de onda entre 380-420nm, correspondente ao intervalor de UV-A (REUCH,2013 e RYIS, et al 2019).

O principal objetivo deste equipamento é viabilizar a varredura vertical de hidrocarbonetos de petróleo tendo em vista a discrepância de custos quando comparado a ferramenta concorrente.



Figura 6- Caixa Preta de Luz UV-A fechada (a esquerda) e aberta (a direita), mostrando a lâmpada (Fonte: Riyis,2019)



**Figura 7- Liner com amostra de solo sendo colocado dentro da caixa preta de luz UV-A (Fonte: Riyis, 2019)**

#### **4.5.2. Ferramentas para caracterização da Heterogeneidades Hidrogeológicas**

Para a caracterização da heterogeneidade do meio, as ferramentas mais comuns no âmbito nacional, são:

##### **4.5.2.1. – Hydraulic Profiling Tool – Groudwater Sampler HPT-GWS**

Compreende na ferramenta de medição da pressão necessária para injetar o fluxo de água no solo à medida que a sonda avança na subsuperfície. Este registro de pressão é considerado como excelente indicador de permeabilidade de formação.

Além na medição da pressão de injeção o HPT estima a profundidade do Nível d'água (n.a) assim como a Condutividade Hidráulica (K), dados de extrema importância para a remediação do local, Figura 8

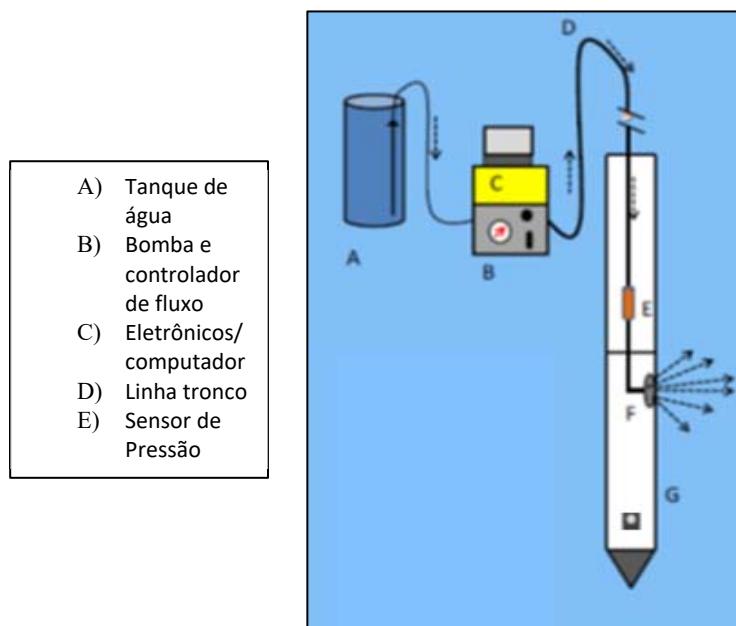


Figura 8 - Ferramenta HPT (Fonte: HRSC-2019 - AESAS)

A pressão medida nesta ferramenta é plotada ao longo da sondagem e correlacionada com a granulometria do solo da área. Em linhas gerais, a pressão de injeção está relacionada inversamente à capacidade do solo de transmitir fluidos (condutividade hidráulica relativa), a qual teoricamente está correlacionada a granulometria do solo. Uma baixa pressão de injeção medida no HPT indica maior permeabilidade (exemplo areia, cascalho) e uma alta pressão de injeção indica baixa permeabilidade característica de solo argiloso e siltoso, solos com granulometria predominantemente arenosa (fina) podem ter também K mais baixo, vide exemplo Figura 9. Esta ferramenta permite em tempo real e com alta resolução vertical, identificar as camas de fluxo preferencial no aquífero, e aquelas que se comportam como camadas de retenção/armazenamento.

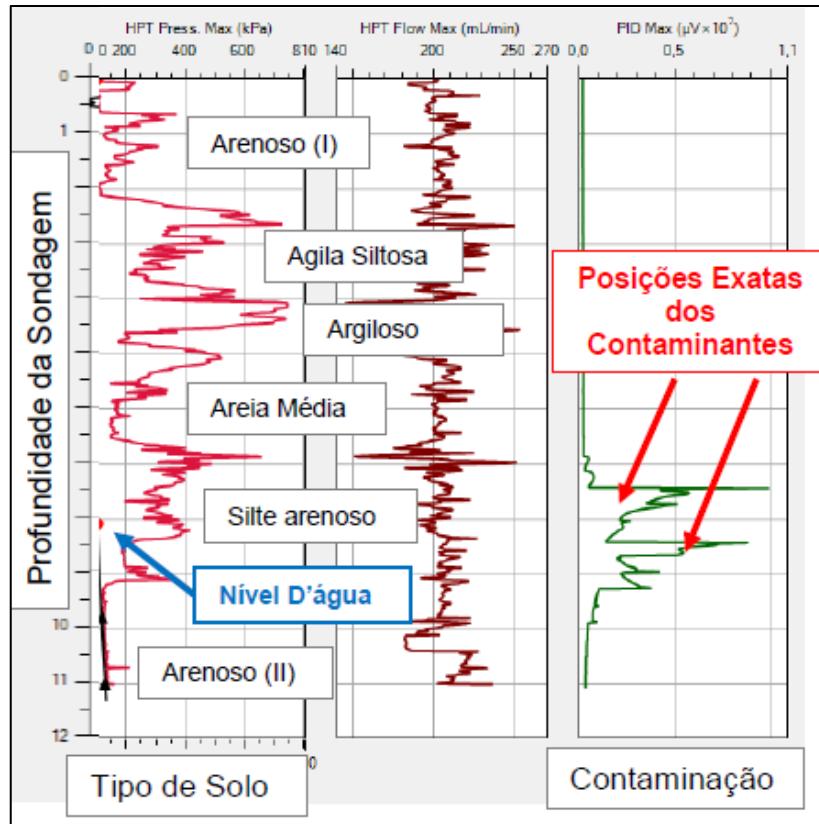


Figura 9- Exemplo perfil HPT (Fonte: Finkler)

#### 4.5.2.2. Piezocone - CPTu

Consiste em um ensaio realizado por ferramenta geotécnica que possibilita a identificação do perfil hidroestratigráfico, destacando a diferenciação vertical dos horizontes de maior ou menor condutividade hidráulica.

Este ensaio é realizado através da cravação do piezocone (Figura 10), os resultados são obtidos em tempo real e transmitidos a um computador em campo. Estes ensaios no gerenciamento de áreas contaminadas são utilizados para detalhamento do coeficiente de permeabilidade (K).



Figura 10 - CPTU- Fonte: Pattro

#### 4.5.2.3. Sensor de Condutividade – EC

Sensor acoplado a sonda MIP, com o objetivo de fornecer uma medida da Condutividade Elétrica do Solo em milisiemens/metro (mS/m) em tempo real, Figura 11. As propriedades elétricas do solo variam com as características geológicas e de maneira geral, valores baixos de condutividade elétrica indicam partículas grandes como areia e cascalho, enquanto valores elevados de condutividade elétrica caracterizam partículas menores, sugerindo areias finas, siltes e argilas.



Figura 11 Sensor de Condutividade Elétrica (EC). (Fonte: HRSC-2019 - AESAS)

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1. Coleta e análise dados

Os dados foram coletados por pesquisa documental. Foram solicitadas vistas aos processos presentes no órgão ambiental responsável Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler – RS (FEPAM). Também foram analisados documentos disponíveis para consulta no endereço eletrônico: [http://www.fepam.rs.gov.br/servicos/consulta\\_processos.asp](http://www.fepam.rs.gov.br/servicos/consulta_processos.asp).

### 5.2. Área de estudo

#### 5.2.1. Descrição da área

Como forma de preservar a identidade das empresas envolvidas neste estudo de caso, os nomes das empresas aqui abordados são nomes fantasias (baseados no alfabeto grego).

O terreno de interesse consiste em duas áreas, sendo que aquela localizada na região oeste, denominada Área 1, era ocupada pela Alfa Cutelaria; e a Área 2, localizada na região leste, abrigava a Beta Fábricas de Talheres, vide figura 12. Além disso, ao longo dos anos, outras empresas de cutelaria ocuparam as áreas. As principais atividades desenvolvidas nas áreas compreendiam a fabricação de utensílios em metal e cutelaria. As informações históricas obtidas apontaram uso e ocupação da área investigada por unidades industriais desde a década de 30, referentes ao ramo de cutelaria, envolvendo atividades como tratamento de superfícies metálicas. Atualmente, o imóvel encontra-se desocupado, sendo que sua desativação foi concluída em 2002.

O entorno apresenta ocupação predominantemente residencial, com presença de um curso d'água canalizado com sentido para norte.

#### 5.2.2. Histórico Ambiental da Área de estudo

Estudos ambientais foram realizados na área desde 2012, e incluíram serviços de caracterização ambiental, análise temporal do uso e ocupação, estudos de investigação confirmatória e detalhada da contaminação, e estabelecimento de um modelo conceitual preliminar da área, que indicou possíveis cenários de contaminação.

O primeiro estudo ambiental realizado para a área incluiu os serviços de caracterização ambiental, da análise temporal do uso e ocupação, da revisão de estudos de investigação de contaminação. Um estudo complementar denominado – Fase I”, teve como objetivo revisar estes conceitos e estabelecer um modelo conceitual preliminar da área, que indicou possíveis

cenários de contaminação. Foi observado que área investigada está situada em uma região de ocupação predominantemente residencial. As informações históricas obtidas apontaram uso e ocupação da área investigada por unidades industriais desde a década de 30, referente ao ramo de cutelaria, envolvendo atividades como tratamento de superfícies metálicas, conforme mencionado acima.

Foi possível identificar possíveis fontes com potencial de contaminação, por meio de entrevista com um antigo funcionário, contudo não foi possível estabelecer um *layout* básico da fábrica. As análises laboratoriais apresentadas nos estudos realizados em março de 2012 apontaram a detecção de substâncias químicas contaminantes em água subterrânea e em solo, em concentrações superiores aos valores de investigação estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/09.

Investigações Confirmatórias foram realizadas em maio de 2013 e abril de 2014 com o objetivo de avaliar as áreas com possível potencial de contaminação. Observaram-se concentrações no solo acima dos valores de intervenção para metais e TPH nas sondagens executadas. Os resultados analíticos das amostras de água subterrânea dos poços instalados indicaram concentrações superiores aos valores de investigação estabelecidos pela legislação vigente, englobando principalmente o grupo de inorgânicos (metais e nitrato) e etenos clorados.

A fim de delimitar as contaminações encontradas na investigação confirmatória, foram realizadas três etapas de Investigação Detalhada, em outubro de 2014, março e dezembro de 2015. Foram instalados poços de monitoramento em diversas porções do aquífero, com o objetivo de delimitar a contaminação verticalmente e horizontalmente. A partir dos resultados analíticos pode-se observar que a contaminação não ultrapassava os limites da área investigada, contudo não se pôde delimitar verticalmente a extensão da contaminação, uma vez que os poços profundos apresentaram resultados acima dos respectivos valores orientadores de solventes clorados, apesar de já terem sido instalados ou no topo rochoso ou no meio fraturado. Não é recomendada a instalação de poços profundos no centro de massa de contaminação, pois a própria sondagem para instalação do poço por mais cuidadosa pode levar a contaminação para níveis mais profundos do aquífero. Poços de vapores foram instalados e amostrados em ambas as áreas e não tiveram resultados expressivos.

Na avaliação de risco realizada optou-se por utilizar o programa RBCA Tool Kit, versão 2.5 e RISC 5.0. Os cenários de exposição para a área foram discriminados com base na proposta de

ocupação futura do empreendimento, considerando assim a área afetada pelos contaminantes e os respectivos receptores e as vias de exposição e ingresso. Na análise dos cenários de exposição foi considerada a disposição das edificações previstas no projeto de ocupação sobre a conformação das plumas dos contaminantes. Para fins de comparação com as Concentrações Máximas Aceitáveis – CMAs calculadas pela Avaliação de Risco, foram considerados os pontos que apresentaram as maiores concentrações de contaminantes nos respectivos cenários. Desse modo, foi possível constatar que em todas as vias de exposição modeladas, inalação, ingestão de água ou contato dérmico, foi evidenciada a presença de riscos para alguma SQI analisada na água subterrânea.

Durante os serviços de investigação, foram instalados poços profundos, representando o aquífero intermediário. Estes poços foram instalados em regiões que já apresentavam elevadas concentrações de solventes clorados, indicativas da possível presença de fase livre de DNAPL (fase livre densa não aquosa).

Em janeiro de 2018, foi realizada uma nova investigação de gases no solo, instalação e amostragem de novos poços de monitoramento nos aquíferos raso e profundo, e uma primeira etapa de investigação com o uso da tecnologia *Membrane Interface Probe* (MIP).

Através das respostas dos sensores do MIP foi possível observar que as concentrações de Tetracloroeteno, Tricloroeteno e sua cadeia de degradação se deslocam nas camadas mais permeáveis e existe um acúmulo com altas concentrações na camada confinante (entre 7 e 10 metros), provavelmente de contaminantes adsorvidos no solo.

Figura 12 - Localização da área de estudo

Legenda



Área de estudo- Terreno



## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1. Investigação detalhada complementar com alta resolução

Como já mencionado, com base nos dados de investigação já disponíveis para a área, e após verificar as incertezas que ainda permaneciam para a finalização do modelo conceitual, optou-se pela realização de uma investigação detalhada complementar. Para tanto, foram executadas uma nova investigação de vapores no solo, , investigação com uso de ferramentas de análise em tempo real, especificamente MIP e HPT e nova campanha de monitoramento da água subterrânea, incluindo a análise de todos os poços de monitoramento existente para os parâmetros de Compostos orgânicos voláteis (VOCs), Compostos orgânicos semi-voláteis (SVOCs) e Metais Dissolvidos, detalhamento da contaminação com instalação e amostragem de novos poços de monitoramento nos aquíferos raso e profundo.

A investigação com alta resolução foi com o uso da ferramenta *Membrane Interface Probe* (MIP) e HPT, que permite a análise qualitativa em tempo real da contaminação presente em todo o perfil das sondagens executadas, além de prover informações HPT relativas à permeabilidade e condutividade elétrica nos pontos de investigação. Tais estimativas permitem analisar zonas de fluxo e verificar onde a contaminação se desloca e onde ela se acumula.

#### 6.1.1.1. Screening Soil Gas Survey (SGS)

Devido ao corte de orçamento para a investigação complementar não foi possível à utilização da ferramenta OIP para o detalhamento vertical da contaminação de TPH total no solo. Diante da impossibilidade optou-se pela execução de malha de gases no solo – SGS (Método Indireto).

Embora a Decisão de Diretoria nº 038/2017/C, de 07 fevereiro DE 2017, em seu Artigo 8º, tenha revogado o ANEXO IV da Decisão de Diretoria nº 010/2006/C, de 26 de janeiro de 2006, na falta de outros procedimentos normativos, o procedimento descrito em seu Anexo IV.2 – Procedimentos para Avaliação de Gases no Solo é ainda utilizado para realização desta etapa de investigação por metodologia de *screening*, apesar de gerar dados pouco confiáveis, caso as medições não sejam executadas em poços de monitoramento sem vazamento, e que permitam a purga e renovação do ar do solo previamente a medição, e caso não sejam usados medidores com limites de quantificação baixos.

Para avaliar possíveis contaminações superficiais no solo, foi executada uma rede de amostragem de VOC (Compostos Orgânicos Voláteis), a partir de malha com distribuição

regular de pontos de leitura de gases orgânicos voláteis no solo (*Soil Gas Survey - SGS*), realizada com uma sonda e equipamento detector com detector de fotoionização (PID), oxidação catalítica ou ionização em chama (FID), (apresentados no item ii) permitindo assim uma avaliação de pontos com possível presença de contaminação no solo, porém, conforme descrito acima, sem possibilitar uma investigação representativa dos vapores do solo.

Foram realizadas 200 perfurações de acordo com o seguinte procedimento: determinada uma malha regular, a medição foi realizada através do uso de perfuratriz com broca de 16 mm de diâmetro, sonda metálica de 10 mm de diâmetro, com perfurações de 3 mm de diâmetro cada nos últimos 40 cm de sua extremidade inferior, e mangueira de material plástico (nylon ou teflon), Figura 13.

O piso e o solo subjacente foram perfurados até a profundidade de 1 metro, onde imediatamente após a retirada da perfuratriz, a sonda foi introduzida e realizada a medição por meio de analisadores de gases adaptados à mangueira. Ou seja, o ponto de medição não foi construído para ser estanque, sendo provável que na medição realizada, ocorra grande contribuição do ar atmosférico que já foi introduzido durante os trabalhos de perfuração e remoção do equipamento de perfuração. Além disto, um PID portátil de campo não tem limite de quantificação adequado para diferenciar concentrações ppb.

Ao final de cada medição de gases, os furos foram preenchidos com uma calda de cimento ou bentonita umedecida, evitando-se que os produtos que eventualmente sejam derramados atinjam o subsolo por meio desses furos.

A maior concentração encontrada foi de 1.087 ppm, contudo pôde-se observar que os pontos que apresentaram as maiores concentrações tiveram suas respectivas áreas de influência avaliadas por poços de monitoramento e amostras de solo, figura 13.

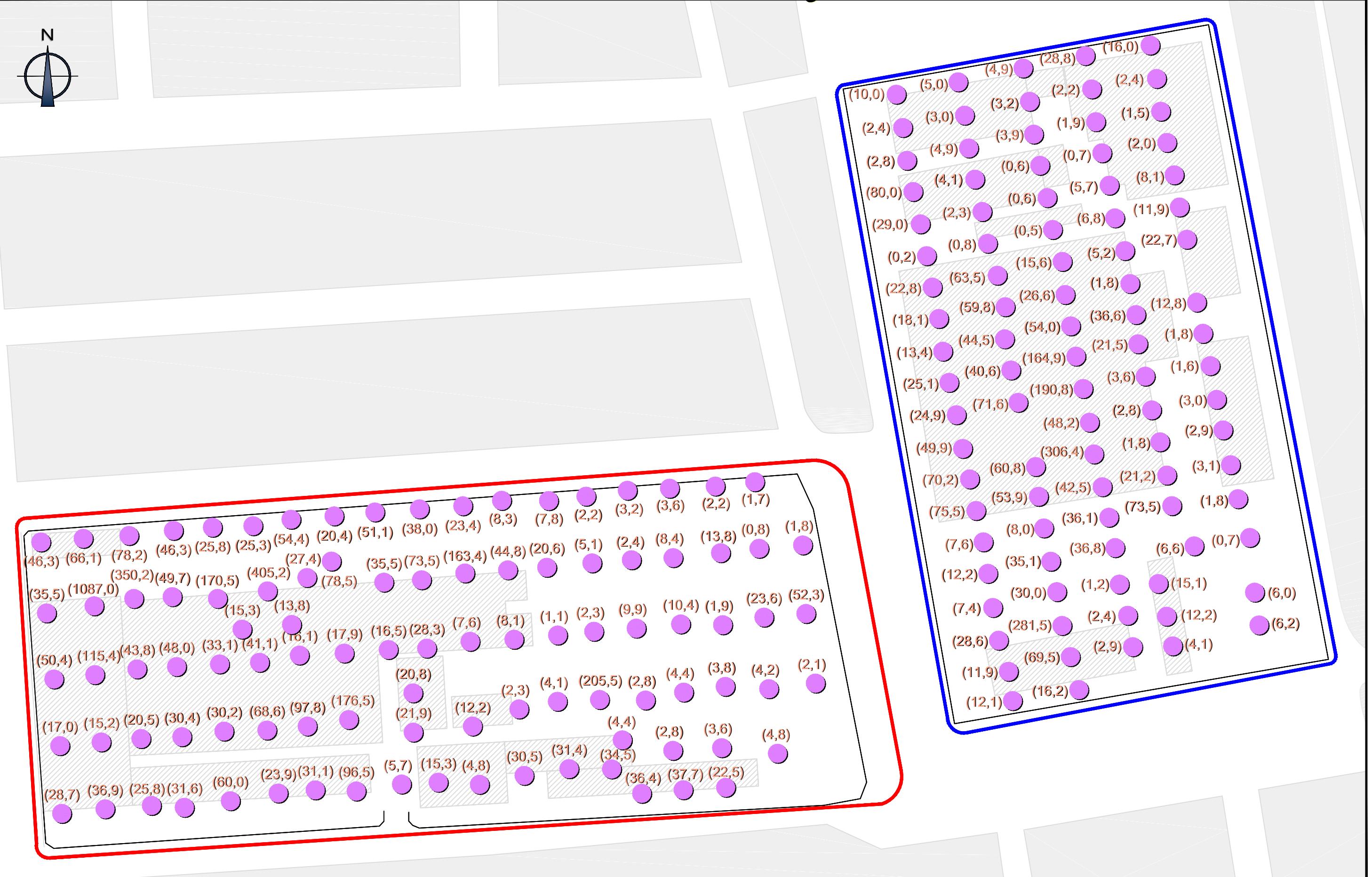
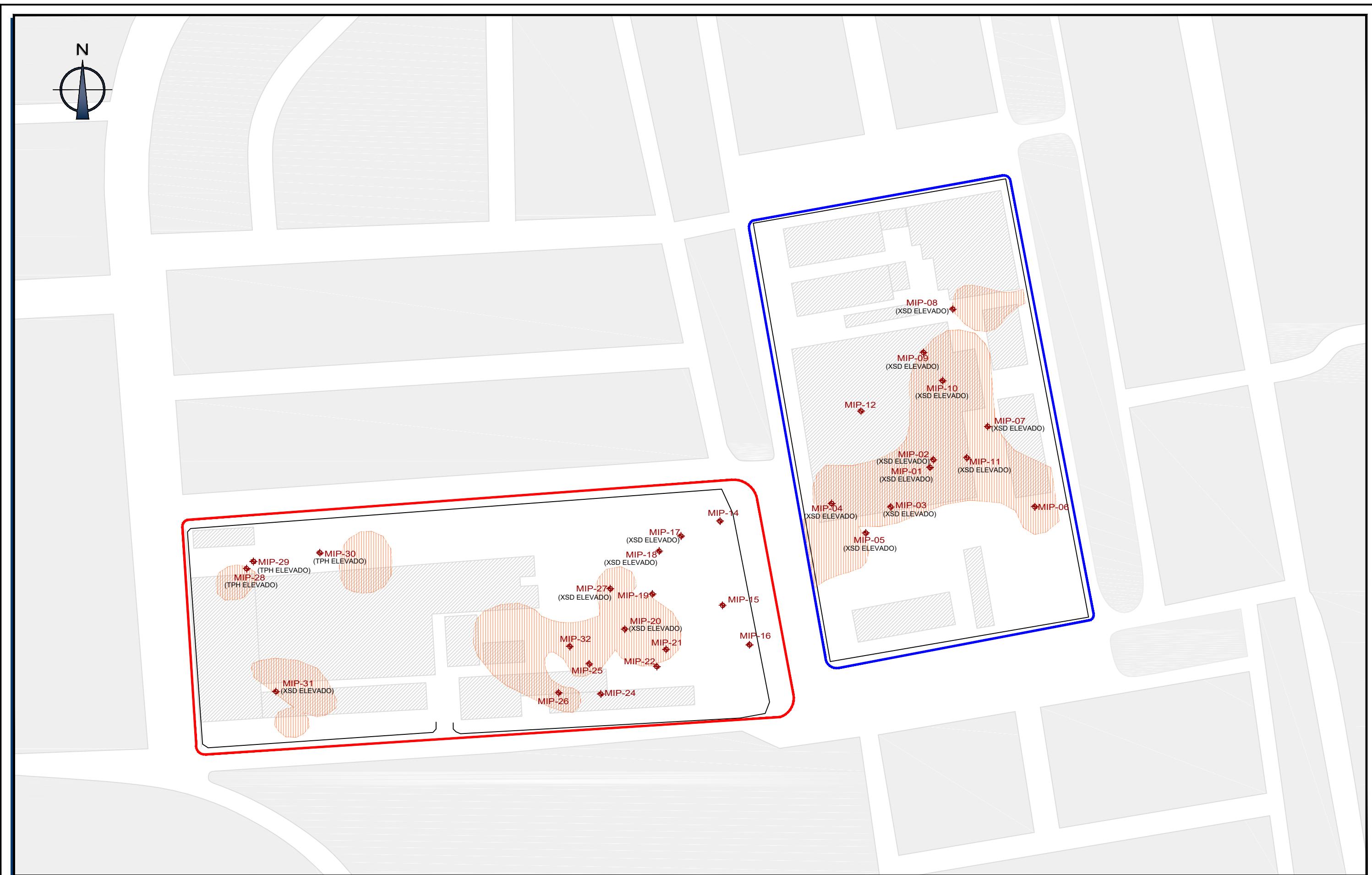


FIGURA 13



**Título:** MIP Sobreposta com  
Maiores Concentrações dos  
Estudos Anteriores

Local:

Porto Alegre- RS

**Escala:** Gráfica

0 40 80m  
Escala Gráfica

**FIGURA 14**

### **6.1.2. Caracterização em Alta Resolução através da ferramenta MIP (Membrane Interface Probe)**

Em busca de um melhor entendimento sobre a área de estudo, em adição aos trabalhos realizados nas etapas de Investigação Detalhada, foram utilizadas ferramentas de medição em tempo real, com alta resolução espacial vertical e aquisição de dados em escala apropriada às heterogeneidades do subsolo que comandam a distribuição e o transporte dos contaminantes investigados.

Assim, para direcionar de forma mais precisa a instalação e amostragem de novos poços de monitoramento nos aquíferos raso e profundo, foi utilizada sonda MIP (*Membrane Interface Probe*), perfilagem de condutividades hidráulicas através de ferramenta HPT (*Hydraulic Profiling Tool*) e caracterização da Condutividade Elétrica do solo utilizando sensor para este parâmetro.

Os serviços foram executados por meio da cravação contínua da ferramenta denominada MiHpt Probe, contendo as três tecnologias citadas, por método *Direct Push*, utilizando-se equipamento Geoprobe operado por equipe da empresa fornecedora do equipamento.

Durante estes trabalhos foram realizados 30 pontos de sondagens, internamente à área de estudo, cujas profundidades variaram entre aproximadamente 3,7 e 11,0 metros a partir da superfície do terreno. Os pontos foram escolhidos com base em resultados de estudos anteriores, que já haviam possibilitado em 9 anos de investigação, a localização dos centros de massa, mas não permitiram o seu mapeamento com a escala adequada ao dimensionamento de trabalhos de remediação necessários de forma a serem eficazes.

A Tabela 2 apresenta as profundidades de cada sondagem utilizando o MIP.

**Tabela 2 Profundidades de sondagem utilizando a ferramenta MiHpt**

Ponto	Profundidade (m)	Ponto	Profundidade (m)	Ponto	Profundidade (m)
MIP-01	4,10	MIP-11	5,10	MIP-22	6,20
MIP-02	5,20	MIP-12	5,10	MIP-23	5,90
MIP-03	4,90	MIP-14	7,70	MIP-24	8,80
MIP-04	4,50	MIP-15	6,90	MIP-25	8,20
MIP-05	4,90	MIP-16	73,00	MIP-26	8,20
MIP-06	6,30	MIP-17	6,10	MIP-28	7,50
MIP-07	3,80	MIP-18	9,40	MIP-29	7,90
MIP-08	4,30	MIP-19	8,30	MIP-30	5,90
MIP-09	4,00	MIP-20	11,00	MIP-31	6,90
MIP-10	3,70	MIP-21	6,70	MIP-32	7,90

Os resultados desta etapa são realizados através da interpretação de perfis disponibilizados em campo após cada sondagem.

O eixo X do perfil apresenta a profundidade penetrada pela ferramenta enquanto o eixo Y apresenta o parâmetro medido.

De acordo com os perfis emitidos, nota-se que a litologia se torna progressivamente mais consolidada com a profundidade e existem camadas de seixos e matações a partir de 5 metros de profundidade em algumas regiões, que limitam a capacidade de avanço das sondagens por método de cravação por percussão e pressão (*Direct Push*).

Foram observadas duas camadas contínuas, de maior condutividade hidráulica e menor resposta ao sensor de Condutividade Elétrica (EC), indicando as camadas de areia e cascalho de alta permeabilidade hidráulica. Essas camadas localizam-se em duas profundidades distintas, sendo uma mais rasa entre 2 e 4 metros e outra mais profunda variando de 9 e 11 metros. Notou-se que essas representam as camadas de maior deslocamento de fluxo do aquífero subterrâneo. Entre essas duas camadas citadas, observaram-se zonas de retenção, de alta condutividade elétrica e baixa permeabilidade e condutividade hidráulica.

Com base nos dados fornecidos pelos sensores PID, FID e XSD, foi possível observar que as concentrações de Tetracloroeteno, Tricloroeteno e seus produtos “filhos” se deslocam nas camadas mais permeáveis citadas anteriormente e se acumulam nas camadas confinantes (entre

7 e 10 metros). Não foram coletadas amostras de solo com alta resolução nestas camadas menos condutivas, e na transição, o que deveria ter sido efetuado.

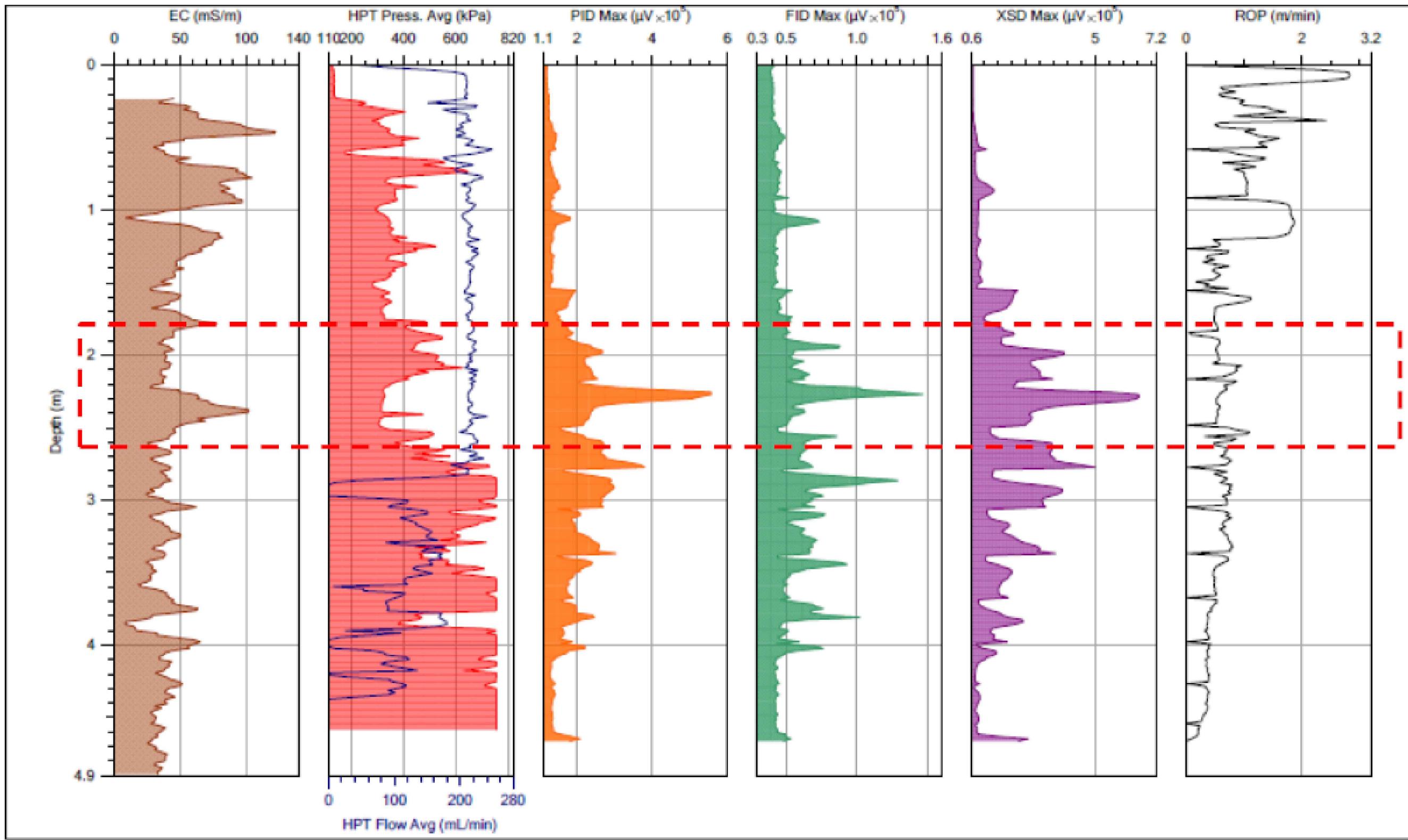
Ao correlacionarmos uma resposta elevada de XSD (superior a  $1.0e + 05\mu V$ ) com as respostas das ferramentas PID e FID são observados indicativos de solventes clorados em 20 dos 30 pontos de sondagem.

Verificou-se que os pontos MIP-01 até o MIP-05, MIP-07 até o MIP-10, MIP-11, MIP-17 e MIP-18 apresentaram respostas típicas de Hidrocarbonetos Clorados no aquífero raso, (Figura 15). Já o MIP-20, MIP-27 e MIP-31 ilustraram a presença de organoclorados na camada confinante de 7 a 10 metros (Figura 16). Esses compostos encontram-se em áreas com baixo ou sem fluxo, na zona de pressão mais alta HPT. Essas áreas podem servir futuramente como fonte secundária ativa, representando possível liberação, por difusão, de contaminantes retidos no solo.

Os pontos MIP-28, MIP-29 e MIP30 apresentaram altas respostas no PID e FID e baixa resposta no XSD, sendo um indicativo da presença de cadeia de carbono mais longa, hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP) tal como óleo BPF utilizado para aquecimento de caldeiras e que foi verificado na execução da sondagem do poço de monitoramento PM-182 (Figura 17).

Desta maneira, confirmou-se que os estudos realizados na área identificaram as principais fontes de contaminação, através do modelo conceitual proposto, contudo sem o devido detalhamento.

# MIP-03



## LEGENDA:

Indicativo de organoclorados no aquífero raso

Título:

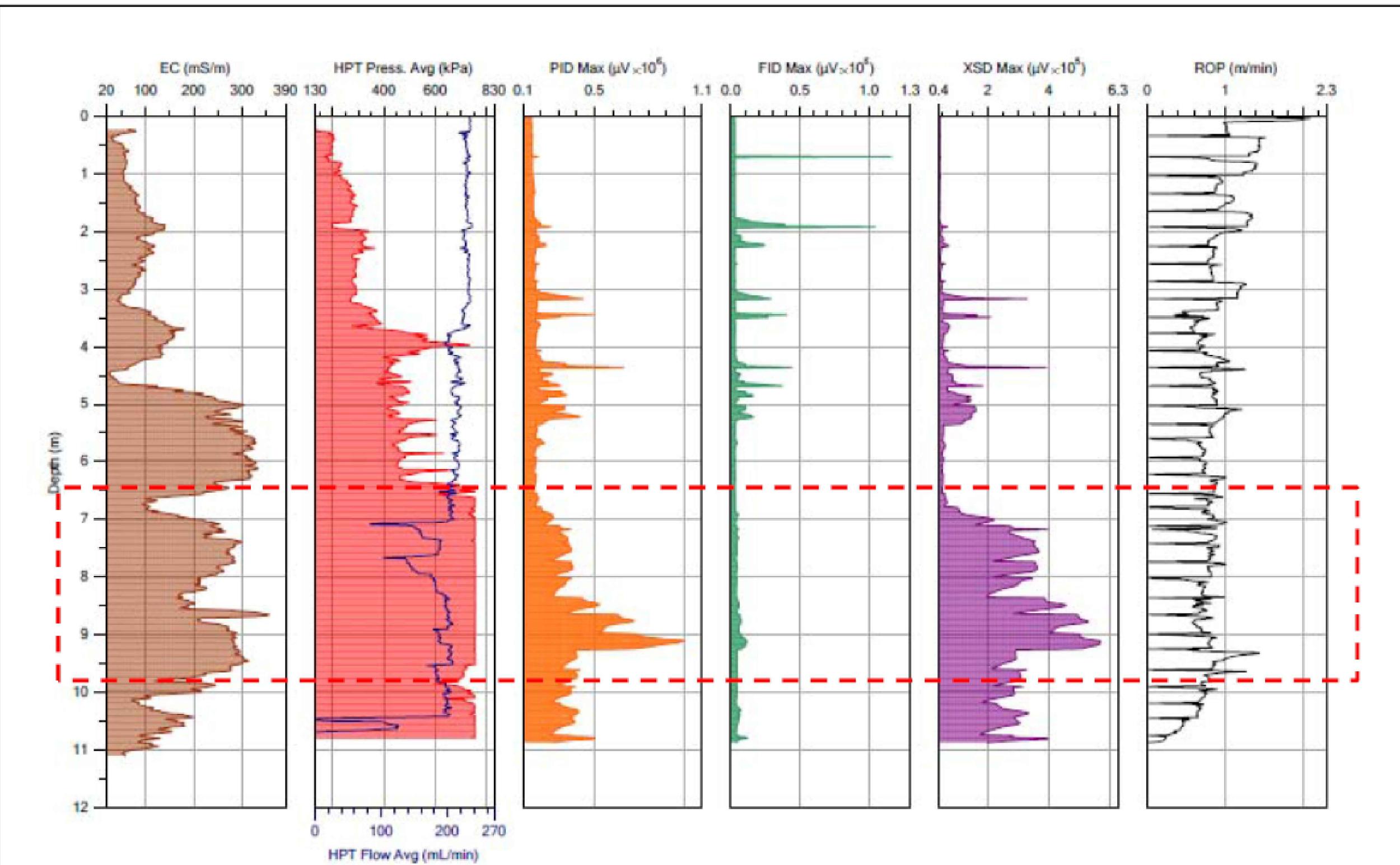
Perfis MIP de respostas típicas de Organoclorados no aquífero raso

Local:

Porto Alegre- RS

**FIGURA 15**

## MIP-20



### LEGENDA:

Indicativo de organoclorados na camada confinante de 7 a 10 metros

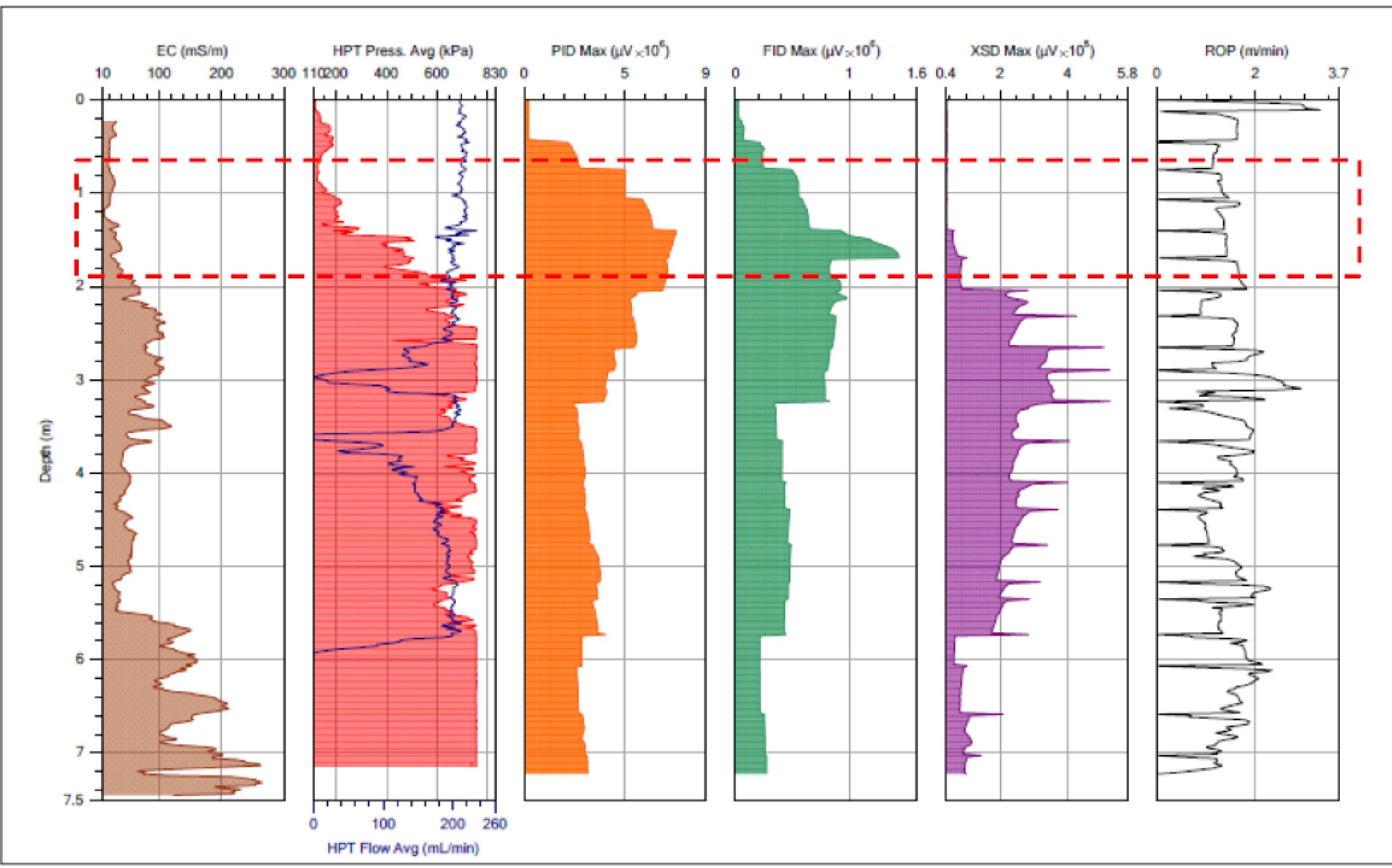
Titulo:  
Perfis MIP de respostas típicas de Organoclorados na camada confinante

Local:

Porto Alegre- RS

**FIGURA 16**

# MIP-28



## LEGENDA:

Indicativo da presença de cadeia de carbono mais longa, hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH)

**Título:**  
Perfis MIP de respostas típicas de indicativo de presença de  
TPH total.

**Local:**  
Porto Alegre- RS

**FIGURA 17**

### 6.1.3. Modelo Geológico e Hidrogeologia Local

A geologia na área de estudo foi determinada através das sondagens em conjunto com as informações obtidas nos perfis de MIP. As sondagens foram descritas sob o ponto de vista de suas características geológicas naturais e dos impactos sofridos observados e análise granulométrica.

A área de estudo situa-se, em geral, sobre uma camada de aterro que foi depositado sobre sedimentos quaternários da bacia do Guaíba, sedimentos terciários, solo superficial, solo de alteração e rocha ocorrendo em toda a área avaliada.

As sondagens realizadas, aliadas às observações diretas e análises granulométricas permitiram constatar que a área em estudo assenta-se sobre a seguinte estratigrafia, do topo para base:

- Aterro de composição variada, sendo verificado rachão logo abaixo do piso, sobreposto a solo argilo siltoso a silto argiloso, pouco arenoso (areia fina), de cor vermelha, amarela a cinza, podendo haver rachão e entulhos misturados;
- Sedimentos aluvionares da Bacia de Guaíba, de composição areno argilosa (areia fina) marrom escura no topo e argilosa arenosa (areia fina) de coloração cinza escura na base. Na área da empresa Alfa foi observada na base do aluvião uma camada de argila arenosa com pedregulhos e seixos;
- Sedimentos terciários, presente em quase todas as sondagens, apresentando no topo camada de composição argilo arenosa (areia fina) de coloração cinza, sobrepostas a areia fina pouco argilosa, cinza.
- Solo superficial, observado apenas nas sondagens de uma parte da área, apresenta composição silte areno argiloso, (areia Fina) com fragmentos de rocha micáceo cinza esverdeado e amarelo;
- Solo de alteração, composto por silte arenoso pouco argiloso (areia fina), com fragmentos de rocha micáceo cinza esverdeado e amarelo no topo e camada de conglomerados e matação na base.

As Figuras 18, 19 e 20 representam os cortes da seção geológica.

Estudos passados indicaram o topo rochoso a partir de 5 metros em algumas áreas, contudo, como pode ser observado nos cortes apresentados, a presença de seixos e matações nesta profundidade pode ter levado a conclusões equivocadas a respeito do modelo geológico.

Ressalta-se que o solo de alteração caracterizado predominantemente por conglomerado e matação foram verificados em uma profundidade média de 10 metros, abaixo deste material, foi identificado o embasamento cristalino, apresentando o seu topo entre 12 e 14 metros.

Em consulta ao cadastro online do serviço de Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) no site da Companhia Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), foram encontrados dois poços profundos na área de estudo. A Tabela 3 apresenta informações referentes aos poços tubulares.

**Tabela 3- Poços tubulares presentes na área de estudo**

Nome	Zona	UTM Norte (km)	UTM Leste (km)	Situação	Uso
RM-POA-104	22J	6.680.400	483.700	Desativado	Abastecimento Industrial
RM-POA-351	22J	6.680.400	483.500	Não encontrado	Abastecimento Industrial

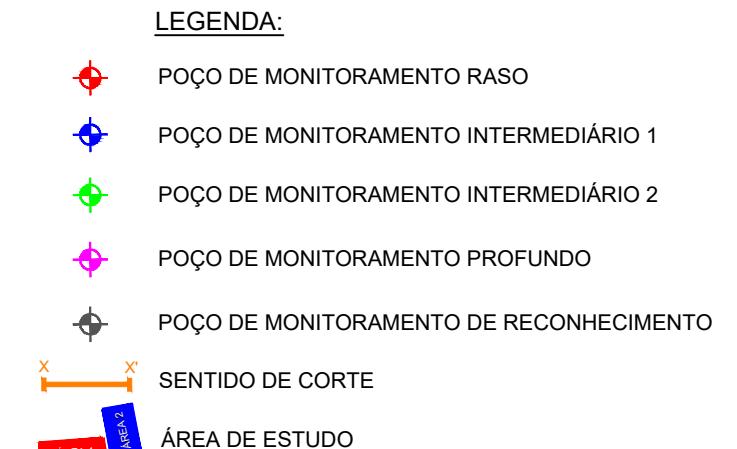
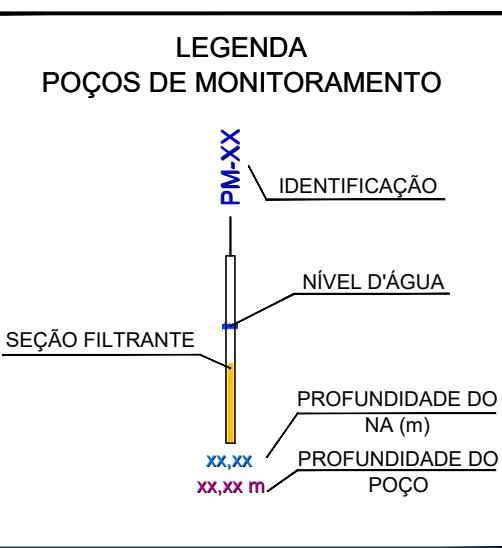
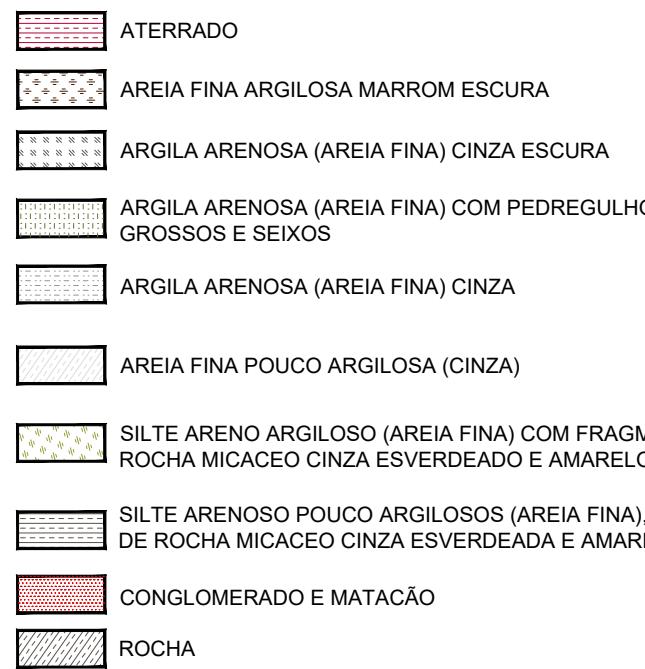
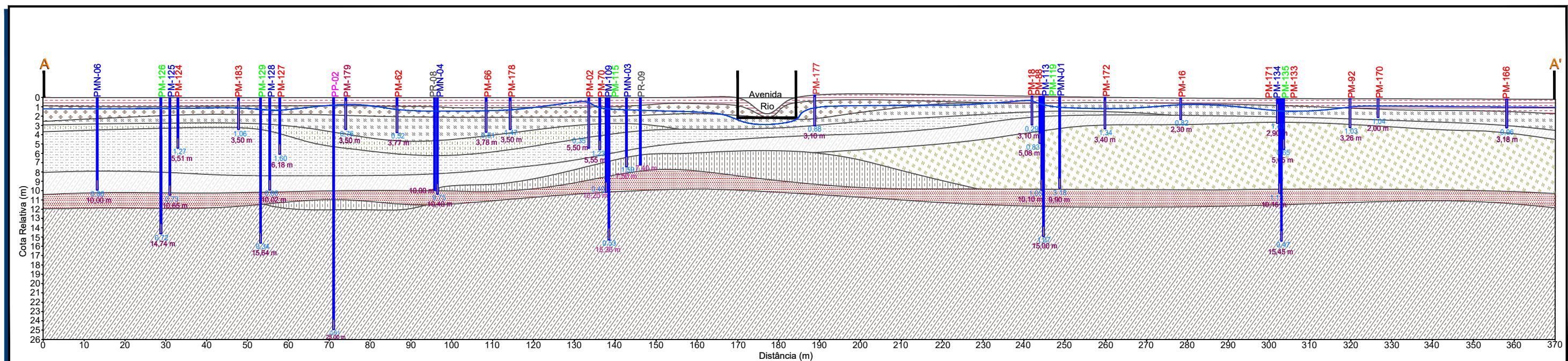
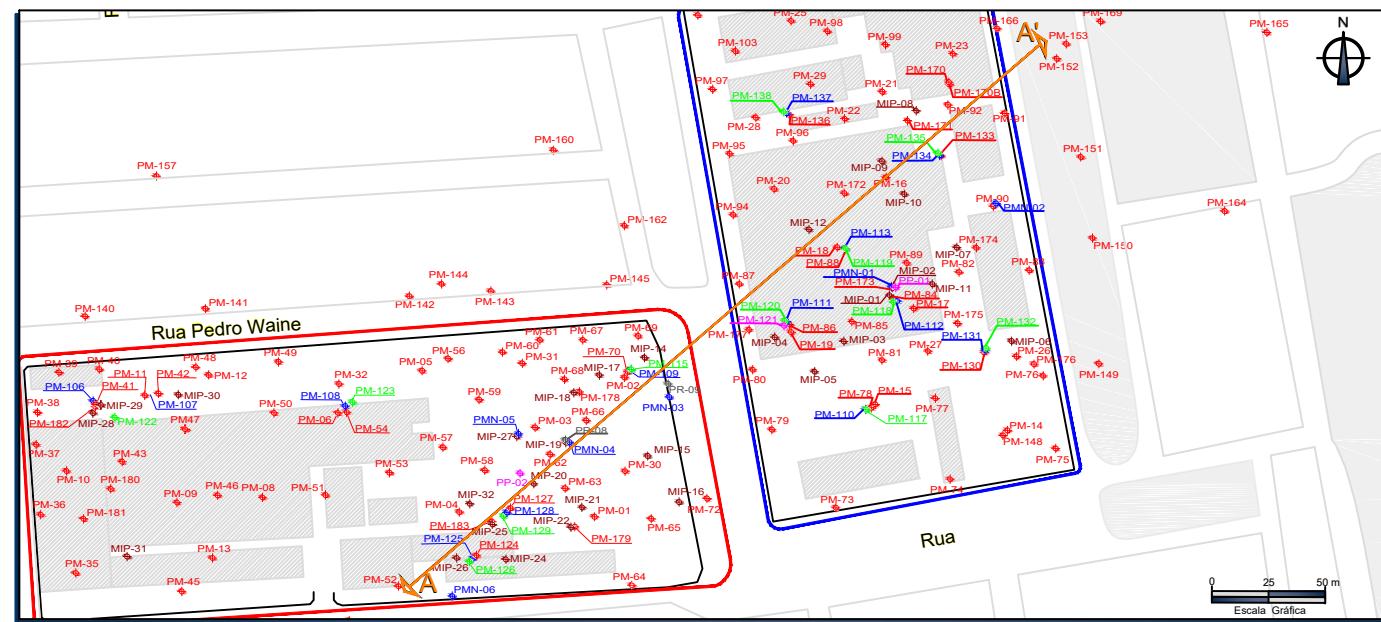
As informações obtidas a partir do perfil litológico dos poços tubulares também foram utilizadas na confecção das seções geológicas.

Na área foi identificado um aquífero freático raso, com profundidades entre 0,17 (PM-01) e 1,83 metros (PM-38). Foi realizado levantamento das cotas topográficas e os níveis d'água, medidos no mês de setembro de 2017, possibilitando, desta forma, a elaboração do mapa potenciométrico, conforme apresentado na Figura 21. O terreno apresenta um fluxo difuso com sentido preferencial para norte, em direção ao curso hídrico sem denominação situado entre os dois terrenos da área investigada.

Com relação aos níveis mais profundos do aquífero, de forma geral, o mesmo sentido de fluxo verificado no compartimento superior, indicando a interconectividade entre os níveis. Desta forma, o aquífero local é considerado livre até o topo rochoso.

No que concerne aos conjuntos multiníveis, observa-se que o fluxo apresenta componente ascendente, conforme pode ser observado na Figura 18.

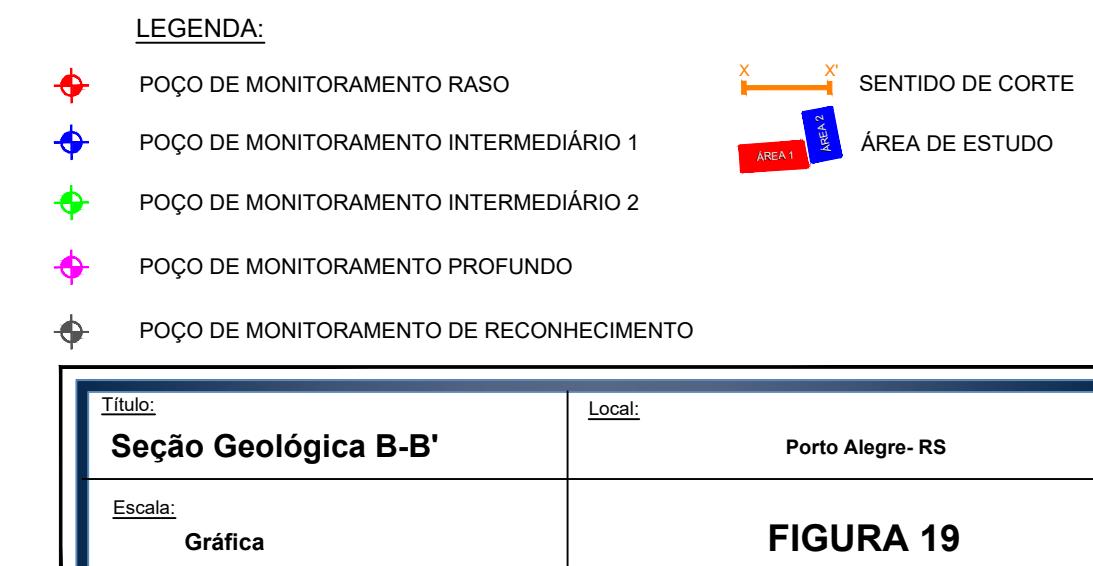
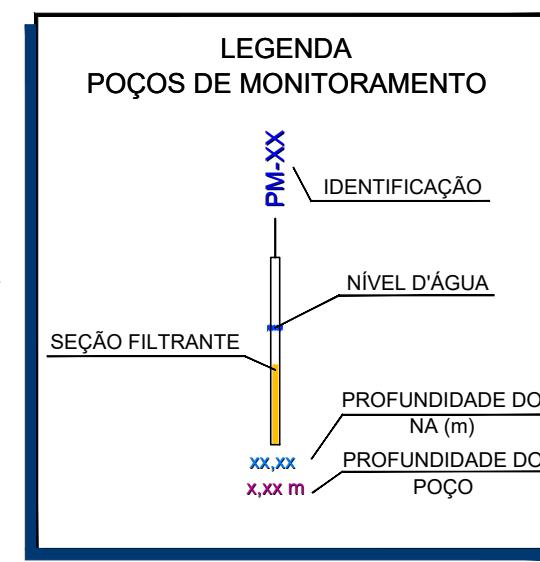
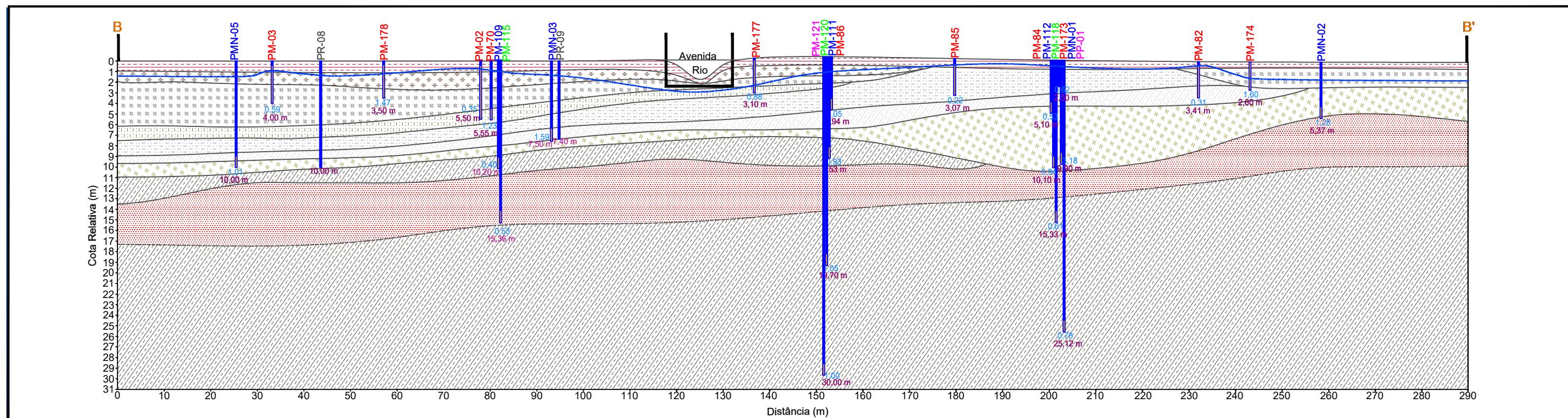
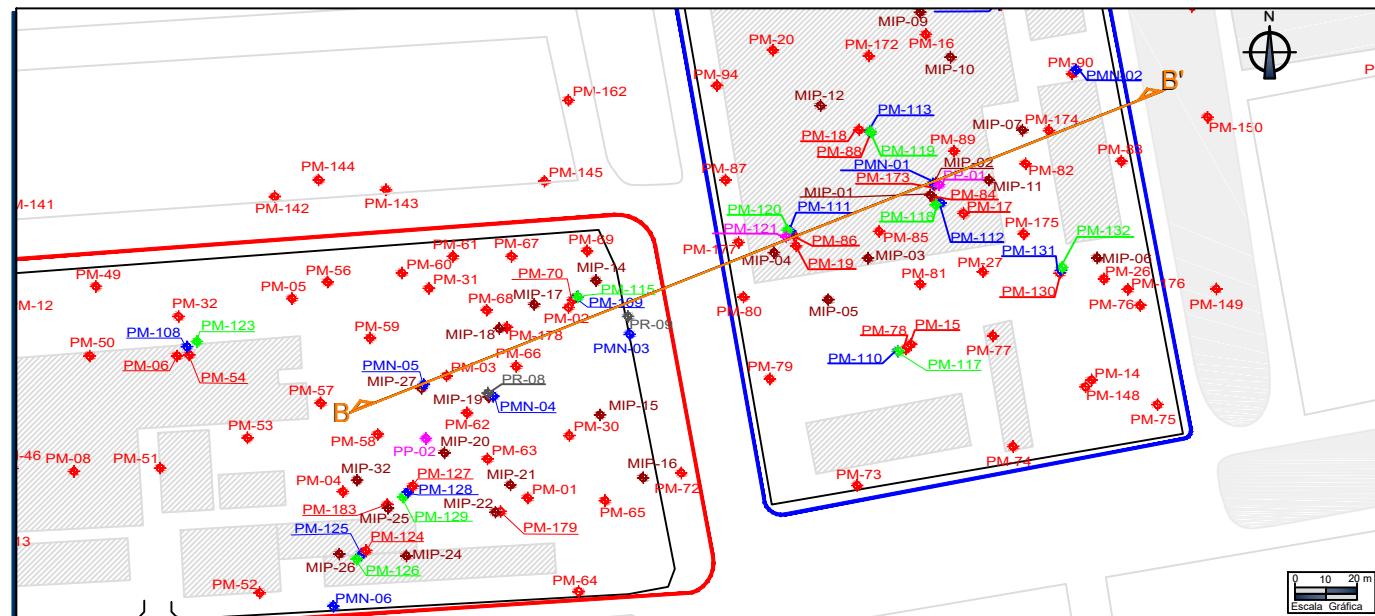
# SEÇÃO GEOLÓGICA - A - A'



Título:	Seção Geológica A-A'	Local:
Escala:	Gráfica	Porto Alegre - RS

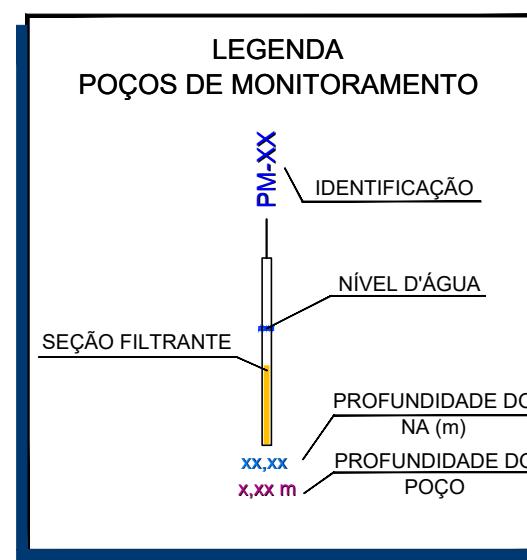
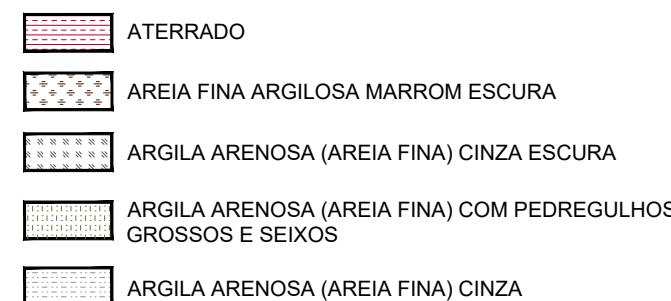
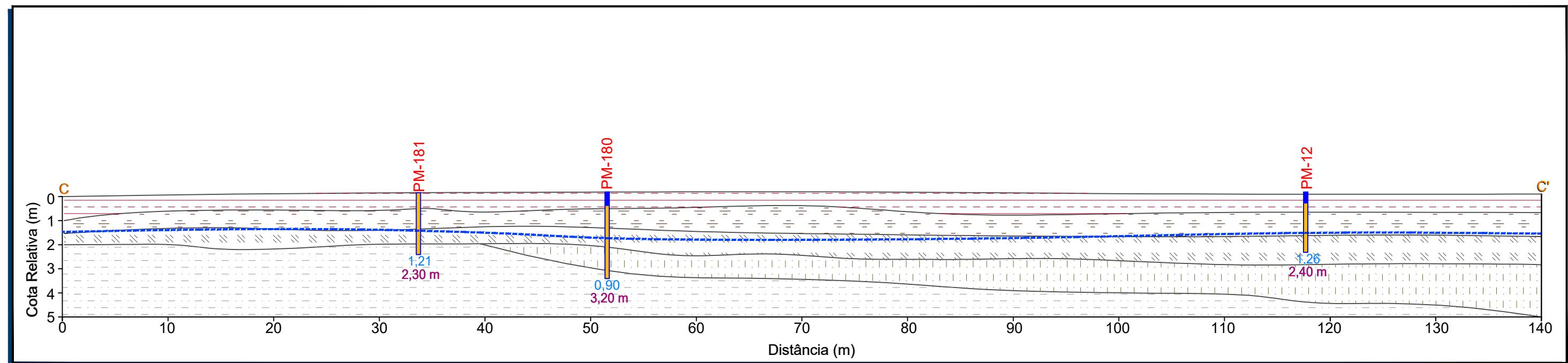
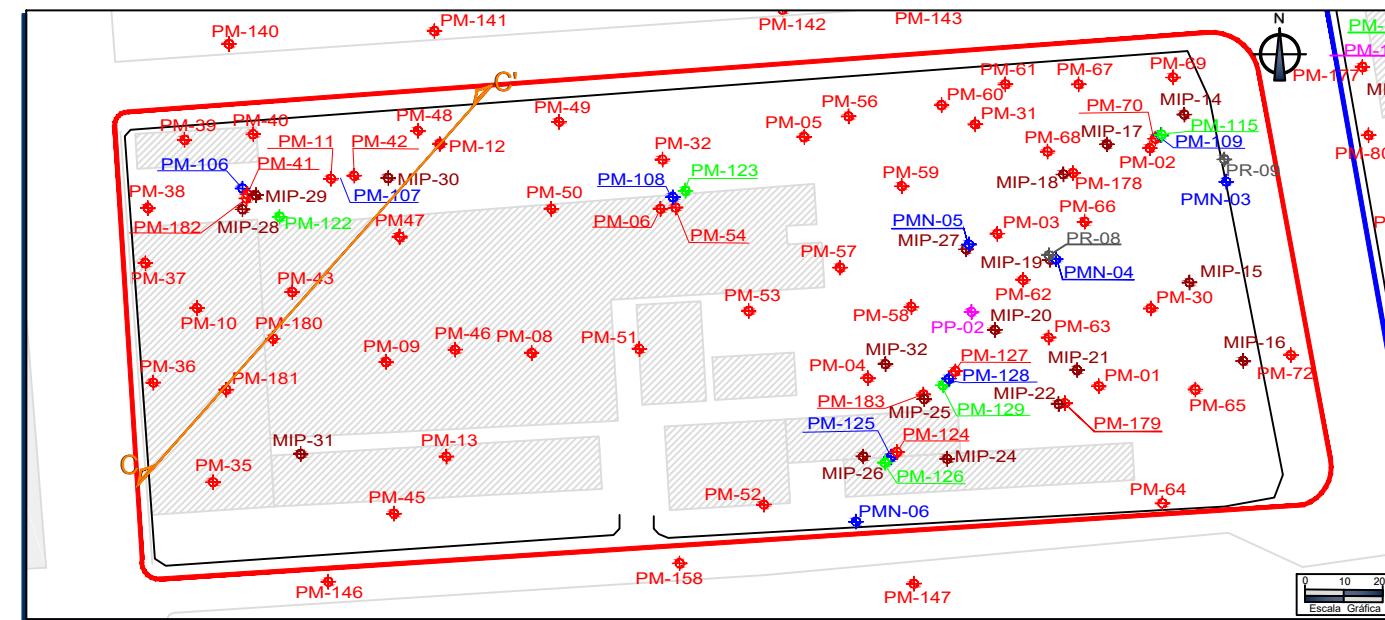
**FIGURA 18**

## SEÇÃO GEOLÓGICA - B - B'



## FIGURA 19

# SEÇÃO GEOLÓGICA - C - C'

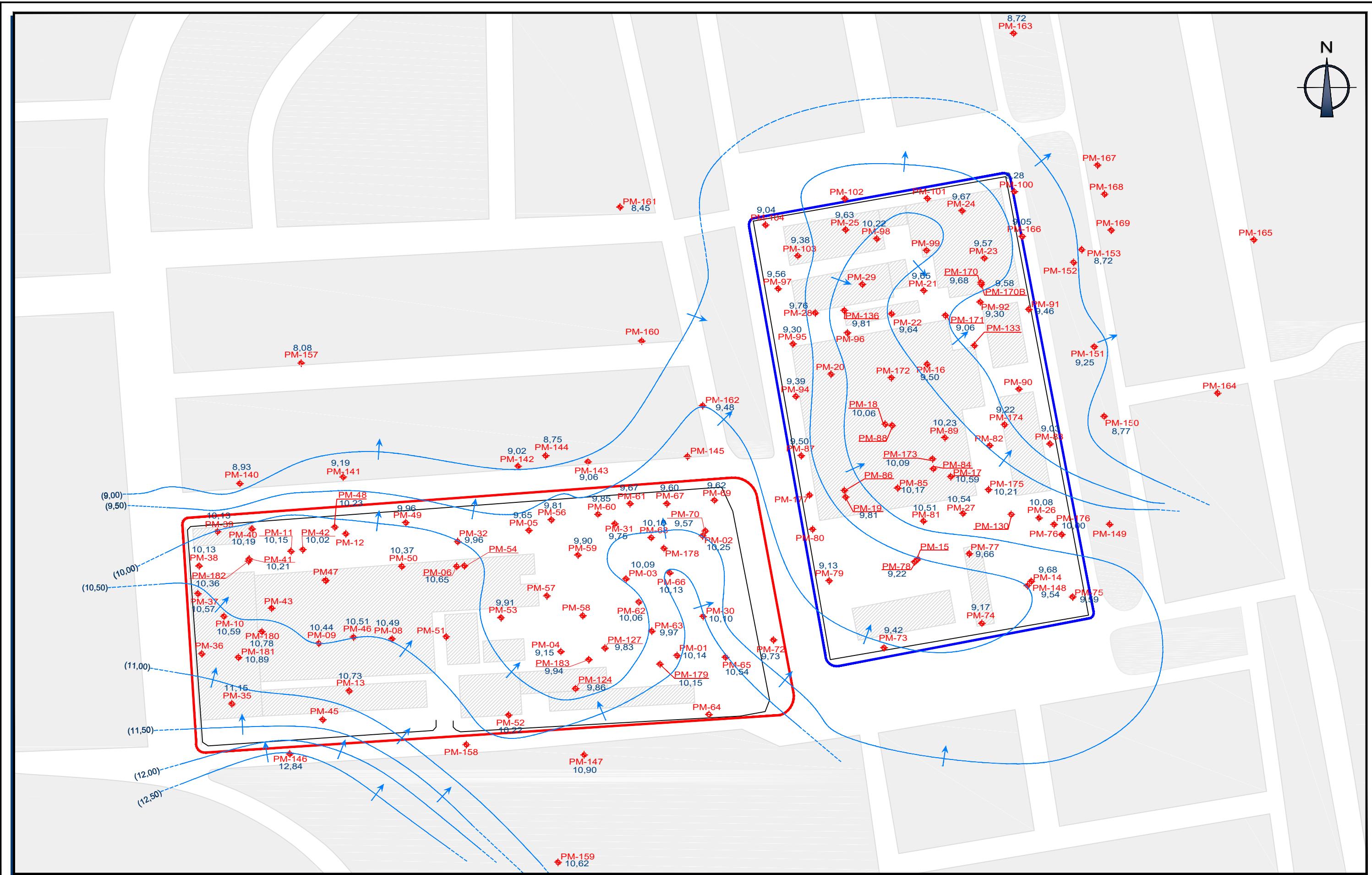


## LEGENDA:

- POÇO DE MONITORAMENTO RASO
- POÇO DE MONITORAMENTO INTERMEDIÁRIO 1
- POÇO DE MONITORAMENTO INTERMEDIÁRIO 2
- POÇO DE MONITORAMENTO PROFUNDO
- POÇO DE MONITORAMENTO DE RECONHECIMENTO
- SENTIDO DE CORTE
- ÁREA DE ESTUDO

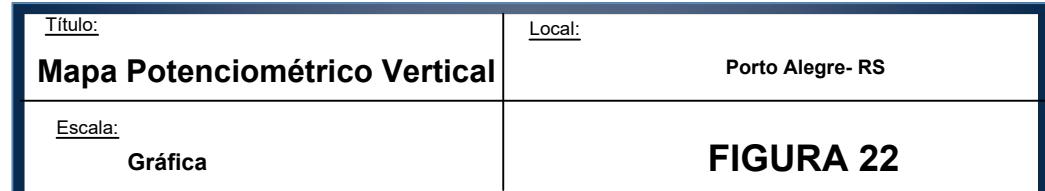
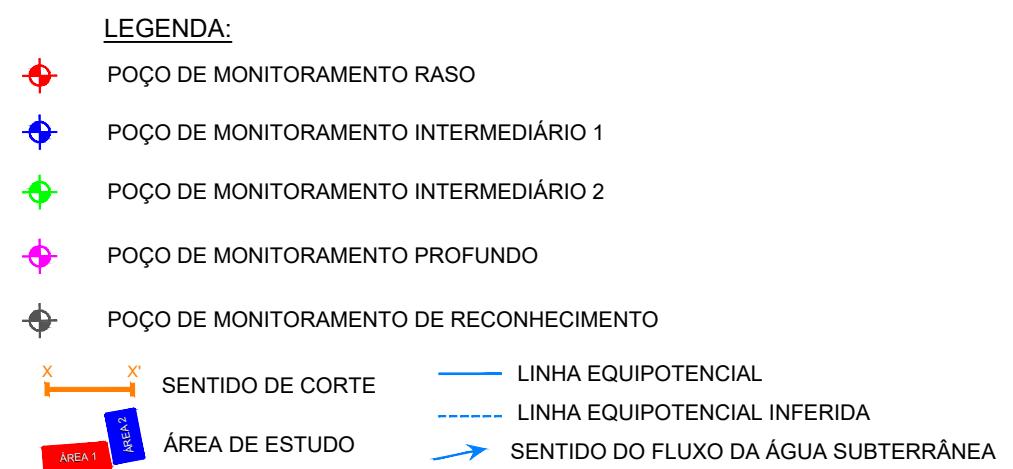
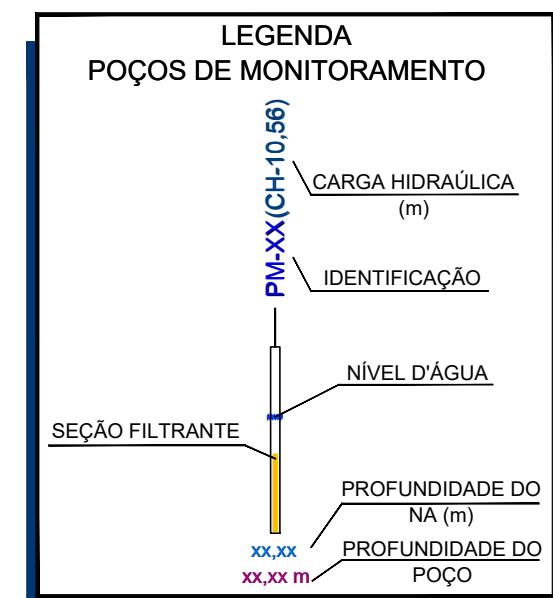
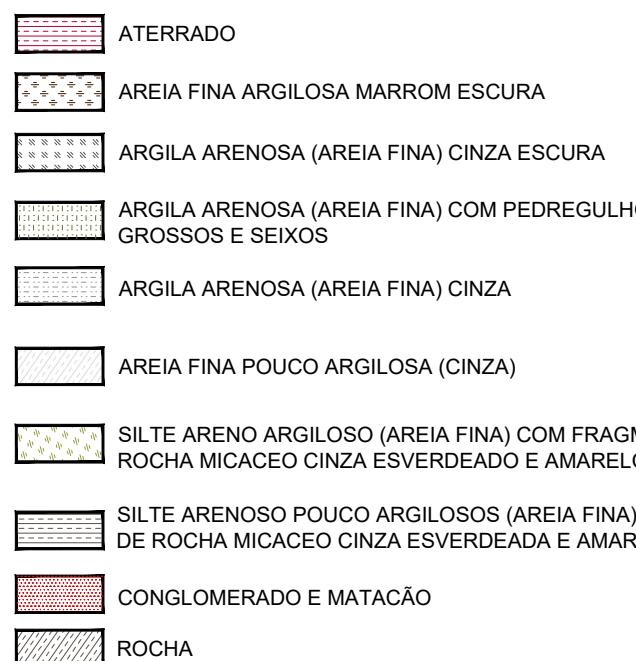
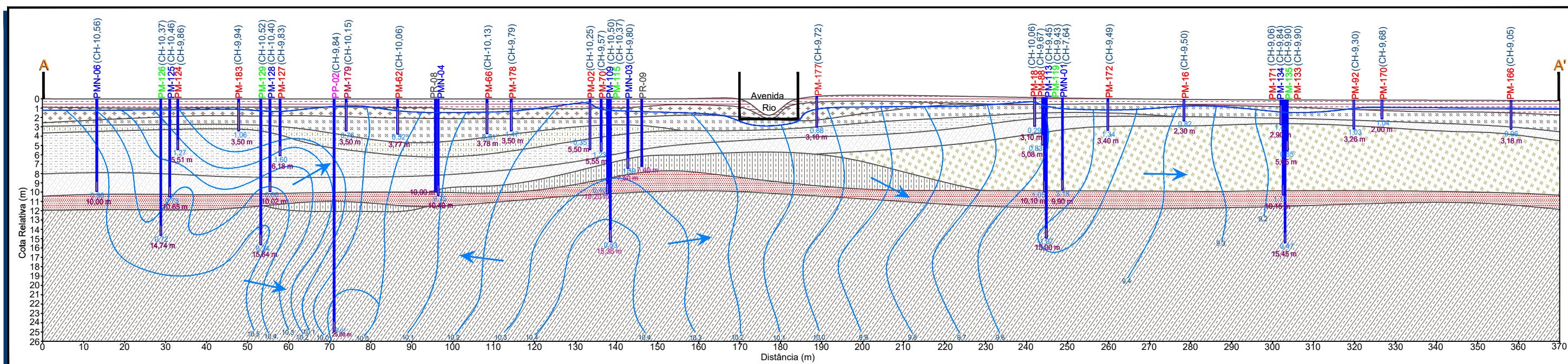
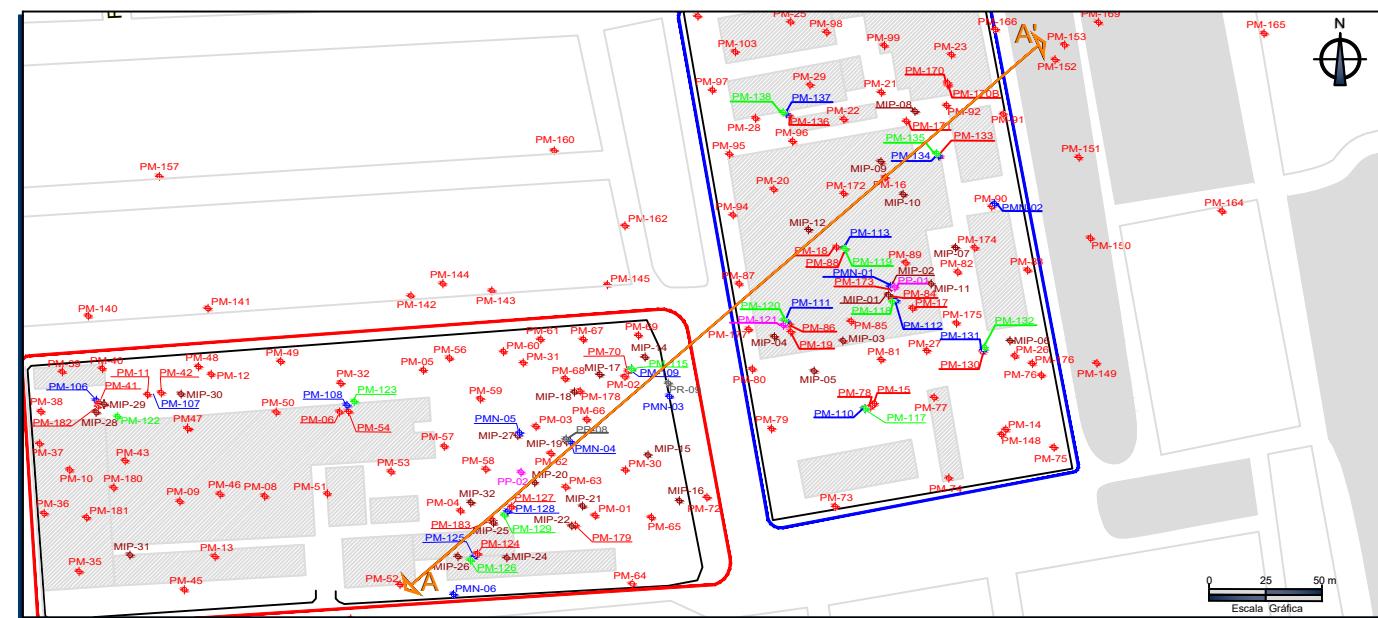
Título:  
**Seção Geológica C-C'**  
Local:  
Porto Alegre - RS  
Escala:  
Gráfica

**FIGURA 20**



**FIGURA 21**

# SEÇÃO GEOLÓGICA - A - A'



**FIGURA 22**

#### **6.1.4. Amostragem dos poços existentes**

Em conjunto com as demais técnicas de investigação já mencionadas, realizou-se monitoramento da água subterrânea na malha de poços de monitoramento cujo perfil litológico era conhecido.

Este monitoramento teve como objetivo principal a verificar as condições do meio e atualizar as concentrações das SQIs na água subterrânea, tanto na área interna, quanto na área externa do imóvel. Os poços contemplados neste monitoramento foram amostrados para análise de VOC, SVOC, TPH Finger Print e Metais dissolvidos.

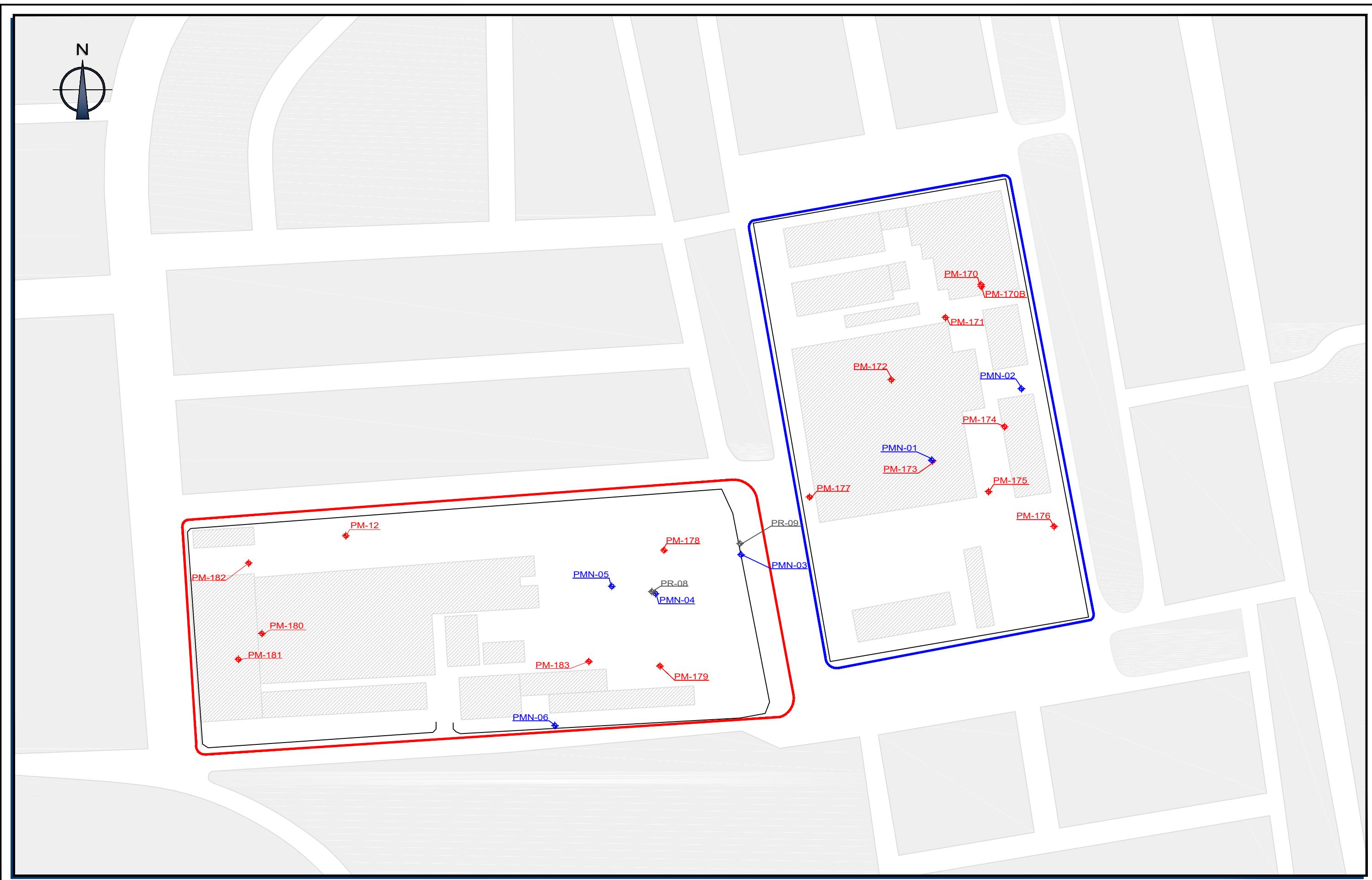
Foram coletados 155 poços de monitoramento, sendo 127 com seção filtrante variando entre 0,0m a 6,5m, 14 poços com seção filtrante variando entre 6,5m a 11,0 m, 13 poços com seção filtrante variando de 11,0 a 16, m e 3 poços com seção filtrante de 16,0m a 30,0m.

Destaca-se que os poços escolhidos neste monitoramento possuem perfis litológicos conhecidos e suas seções filtrantes localizam-se nas três principais camadas litológicas observadas nos perfis do MIP e HPT.

#### **6.1.5. Instalação de Poços de Monitoramento e Amostragem de Solo**

Após o levantamento do *layout* básico da indústria com ex-funcionário e execução de investigação com alta resolução com o MIP, foram realizadas sondagens com coleta de solo durante a instalação dos novos poços de monitoramento. As amostras de solo durante esta etapa foram coletadas, exclusivamente, até 3m de profundidade. Os poços foram instalados com o objetivo de verificar áreas potenciais que não haviam sido estudadas / para delimitação de contaminação observada em estudos anteriores / pontos de MIP que deram alta concentração de solventes clorados e não haviam sido investigados, Figura 23.

Deste modo, foram instalados 22 poços de monitoramento, sendo 17 com seção filtrante entre 0,0 e 6,5m e 5 com seção filtrante entre 6,5 a 11,0m.



LEGENDA:

- ◆ POÇO DE MONITORAMENTO RASO
- ◆ POÇO DE MONITORAMENTO INTERMEDIÁRIO 1
- ◆ SONDAGEM DE RECONHECIMENTO

ÁREA DE ESTUDO

ÁREA 1      ÁREA 2

0 40 80m  
Escala Gráfica

Título:  
Localização dos Poços instalados  
após a execução do MIP

Escala:  
Gráfica

Local:

Porto Alegre - RS

FIGURA 23

### 6.1.6. Resultados compilados Água Subterrânea

Os resultados analíticos realizados nos poços de monitoramento foram compilados e possibilitaram as seguintes afirmações:

**Compostos Orgânicos Voláteis e Semi-Voláteis (VOC e SVOC):**

Para as análises dos grupos VOC e SVOC nos poços de monitoramento amostrados, foram identificados os parâmetros de: 1,1,2-Tricloroetano, 1,1 -Dicloroeteno, Cis-1,2 - Dicloroeteno, Trans-1,2 -Dicloroeteno, Benzeno, Cloreto de Vinila, Tetracloroeteno e Tricloroeteno com concentrações acima dos respectivos valores orientadores estabelecidos.

**TPH Fingerprint (Hidrocarbonetos Totais de Petróleo):**

Os resultados analíticos das amostras de água subterrânea coletadas indicaram presença do parâmetro TPH acima do respectivo valor orientador no aquífero raso e intermediário 1. A pluma identificada está delimitada em ambos aquíferos e não sai do empreendimento.

**Metais Dissolvidos:**

Para as análises do grupo de metais dissolvidos nos poços de monitoramento amostrados, foram identificados os parâmetros de: Antimônio, Arsênio, Bário, Boro, Chumbo, Cobalto e Níquel com concentrações acima dos respectivos valores orientadores estabelecidos.

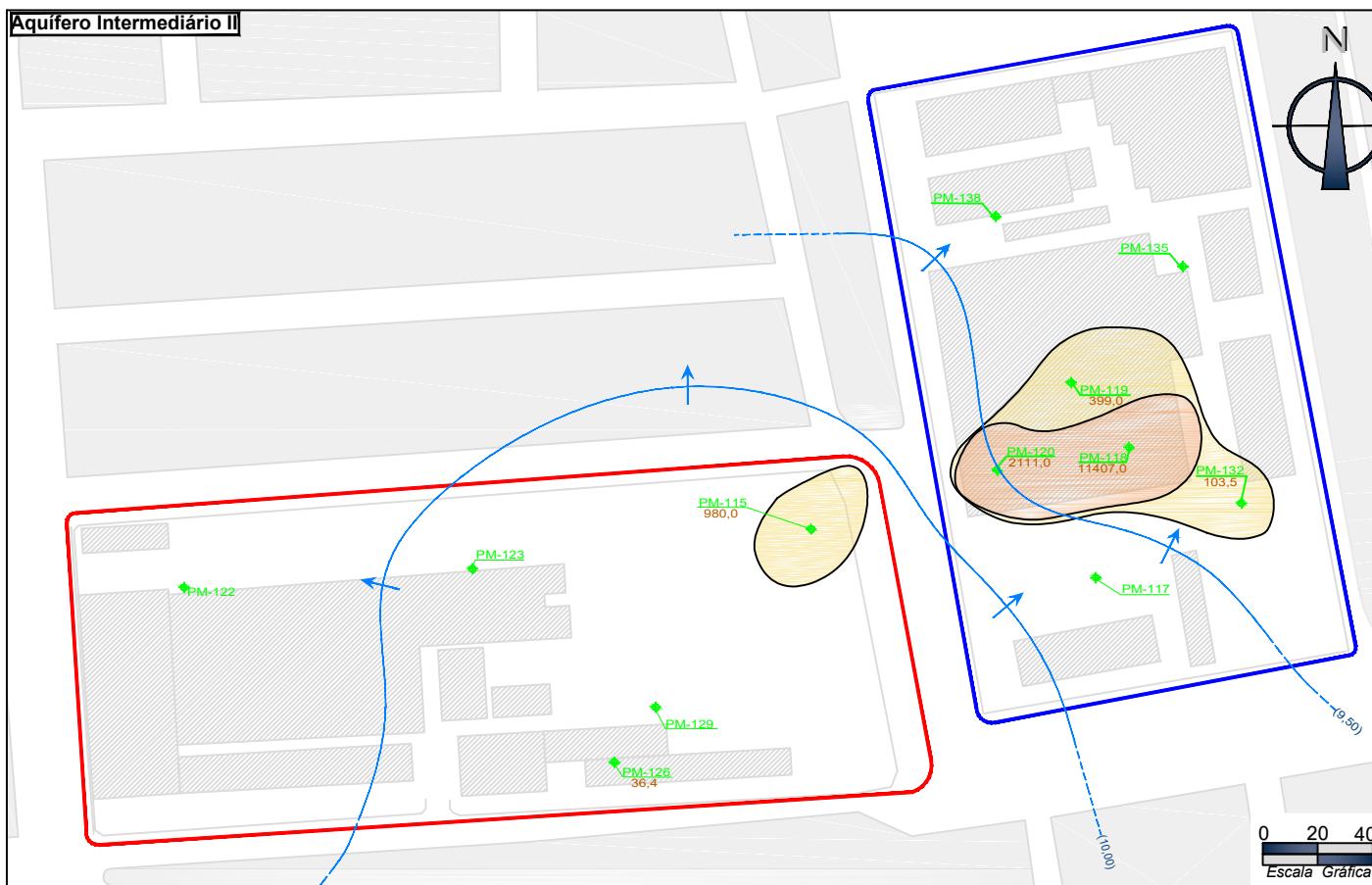
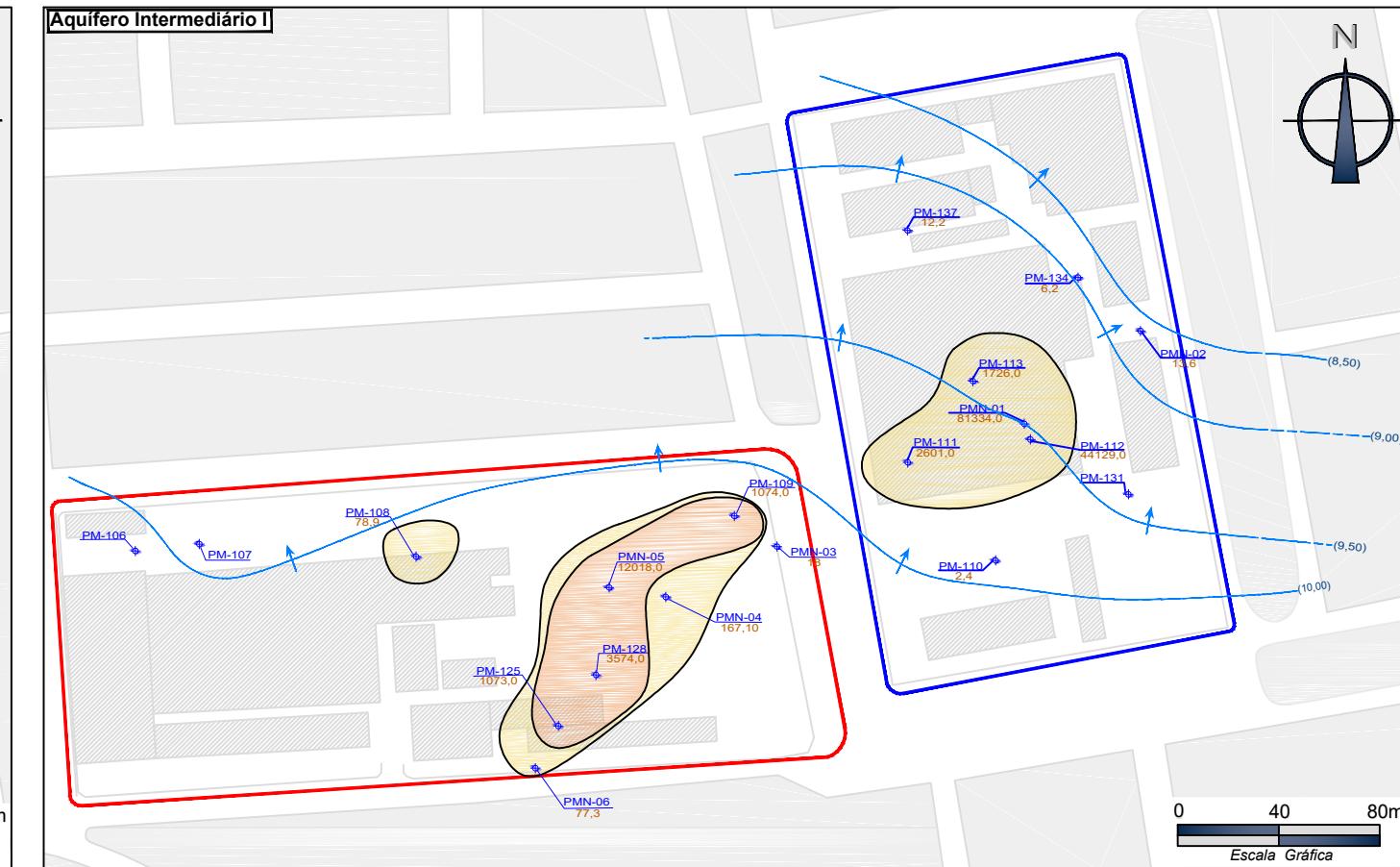
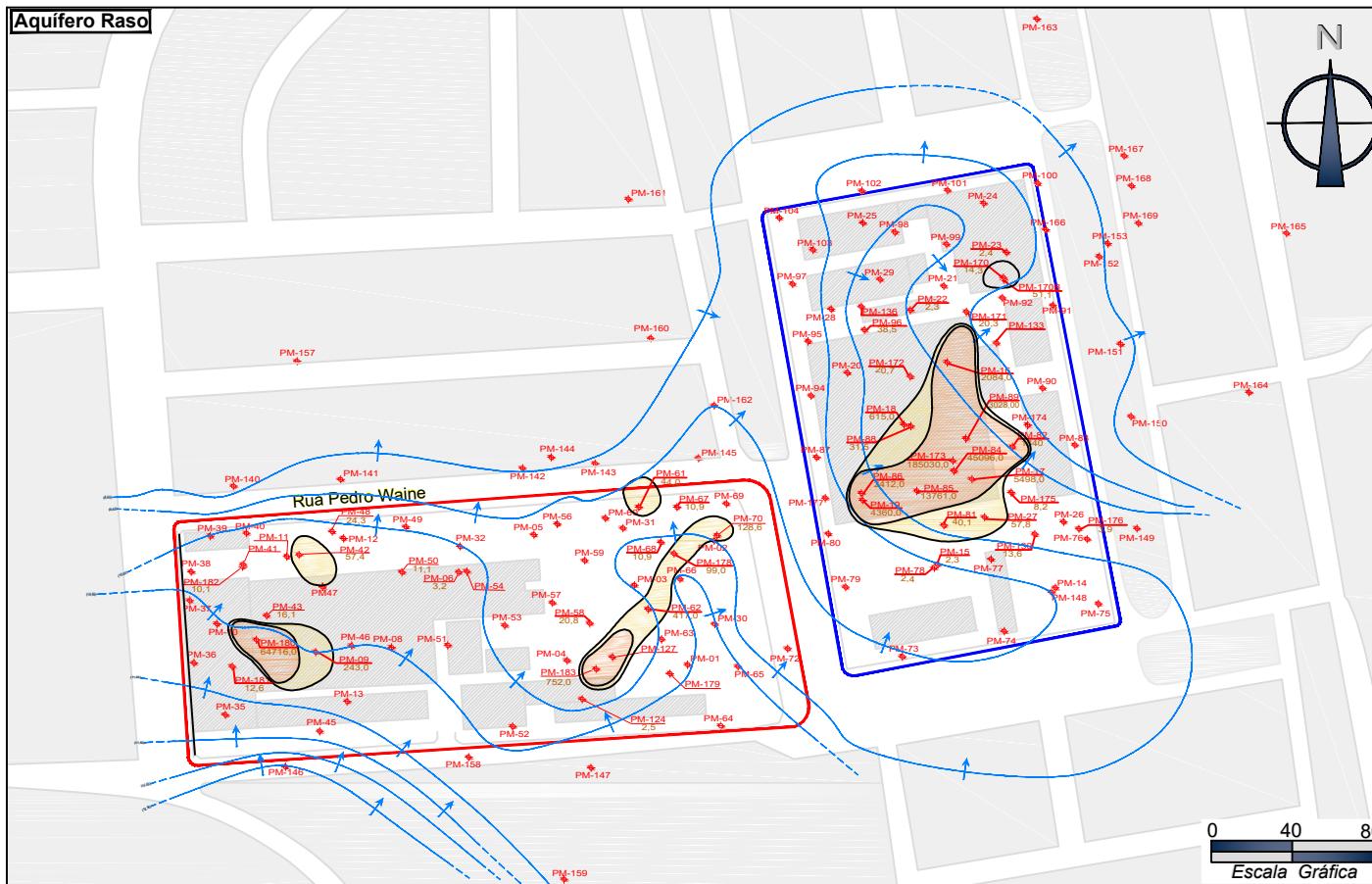
**Íons:**

Para as análises do grupo de Íons nos poços de monitoramento amostrados, foi identificado o parâmetro de Nitrato com concentrações acima dos respectivos valores orientadores estabelecidos.

Com base nos resultados acima apresentados e históricos da área, constatou-se que as substâncias químicas acima dos valores orientadores do CONAMA, são: Tetracloroeteno (PCE), Tricloroeteno (TCE) e o Cloreto de Vinila (CV) na água subterrânea. No solo, foi constatada a presença do parâmetro TPH em concentração acima do valor orientador. Esse composto foi identificado próximo à região das antigas caldeiras, sendo um indicativo da presença de óleo BPF.

Diante do exposto, neste trabalho serão apresentadas apenas a plumas das substâncias cuja contaminação supera os valores das concentrações máximas aceitáveis. São elas: Tetracloroeteno (PCE), Tricloroeteno (TCE) e Cloreto de Vinila (CV) (figuras 24 a 29).

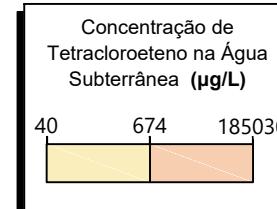
Visando elaboração de modelo conceitual hidrogeológico para a área de interesse, foram traçadas duas secções transversais da área (corte AA' e BB'), expondo a litologia encontrada ao longo de regiões nas quais se identificou anomalia por Tetracloroeteno, Tricloroeteno e Cloreto de vinila (figuras 24 a 29).



**LEGENDA:**

- ◆ POÇO DE MONITORAMENTO RASO
- ◆ POÇO DE MONITORAMENTO INTERMEDIÁRIO 1
- ◆ POÇO DE MONITORAMENTO INTERMEDIÁRIO 2
- ◆ POÇO DE MONITORAMENTO PROFUNDO
- LINHA EQUIPOTENCIAL
- LINHA EQUIPOTENCIAL INFERIDA
- xx,xx CARGA HIDRÁULICA (m)
- SENTIDO DO FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

ÁREA DE ESTUDO  
AREA 1 AREA 2



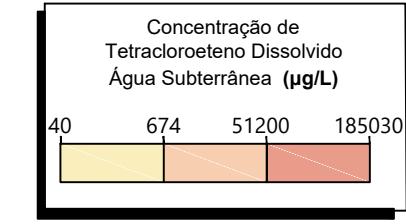
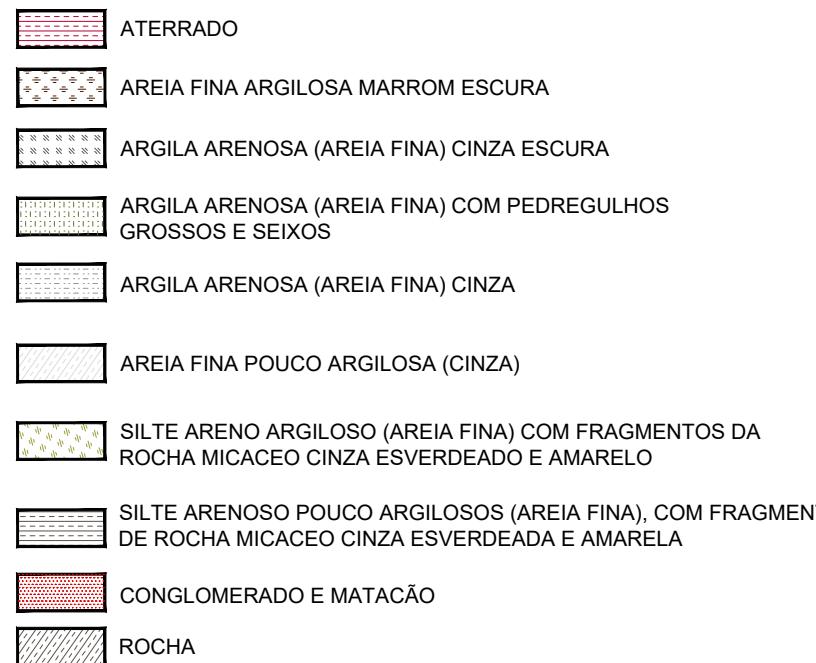
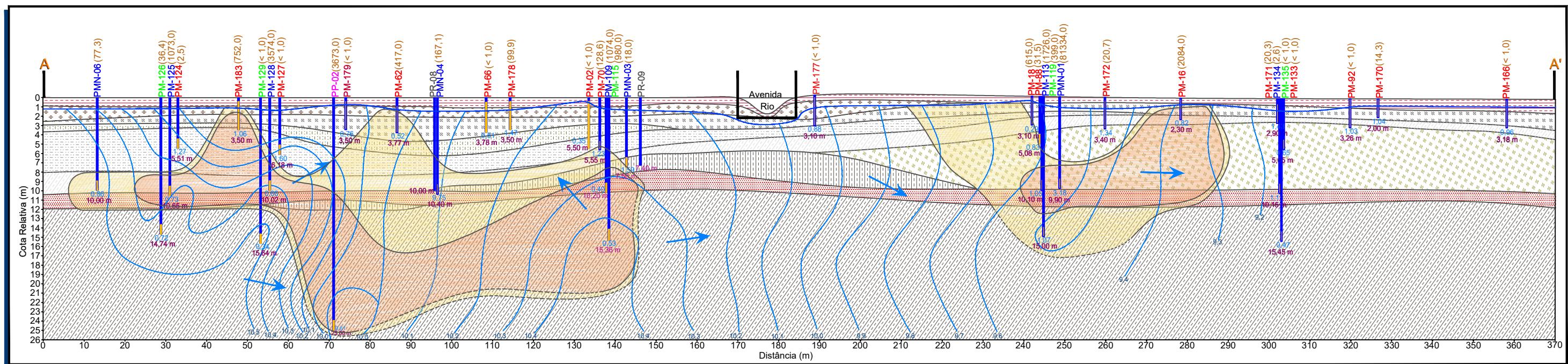
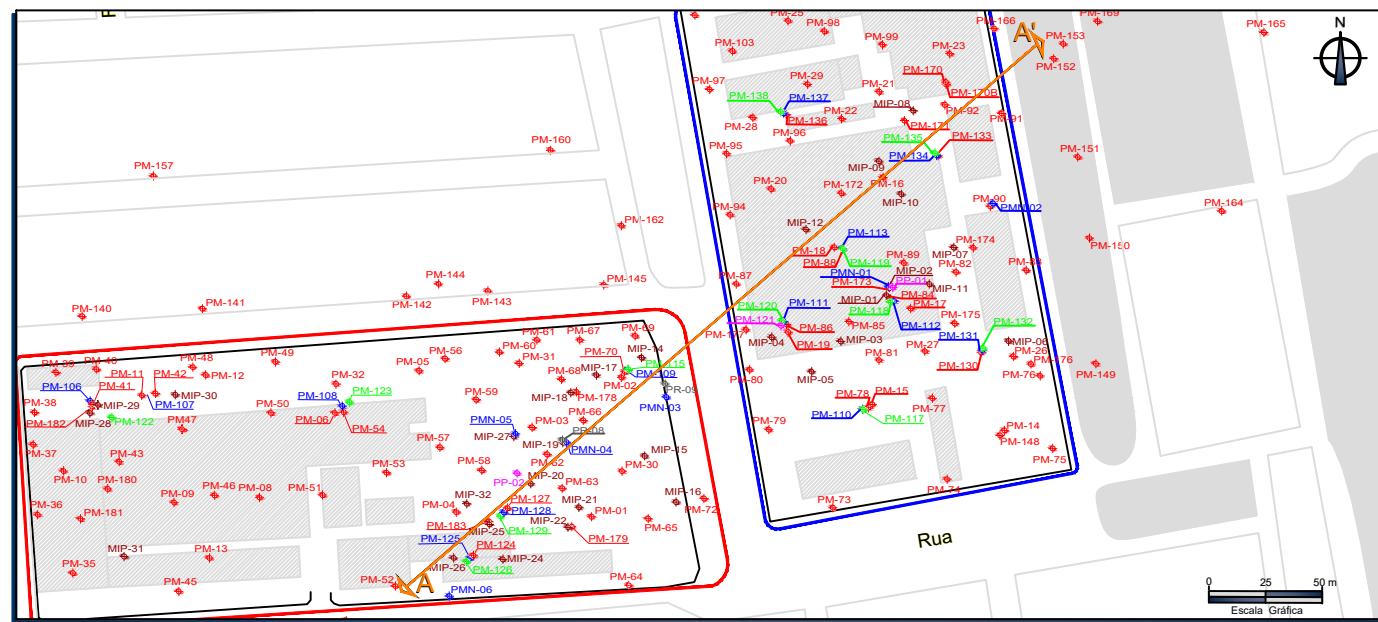
**Título:**  
Pluma de Tetracloroeteno  
na Água Subterrânea

**Local:**  
Porto Alegre - RS

**Escala:**  
Gráfica

**FIGURA 24**

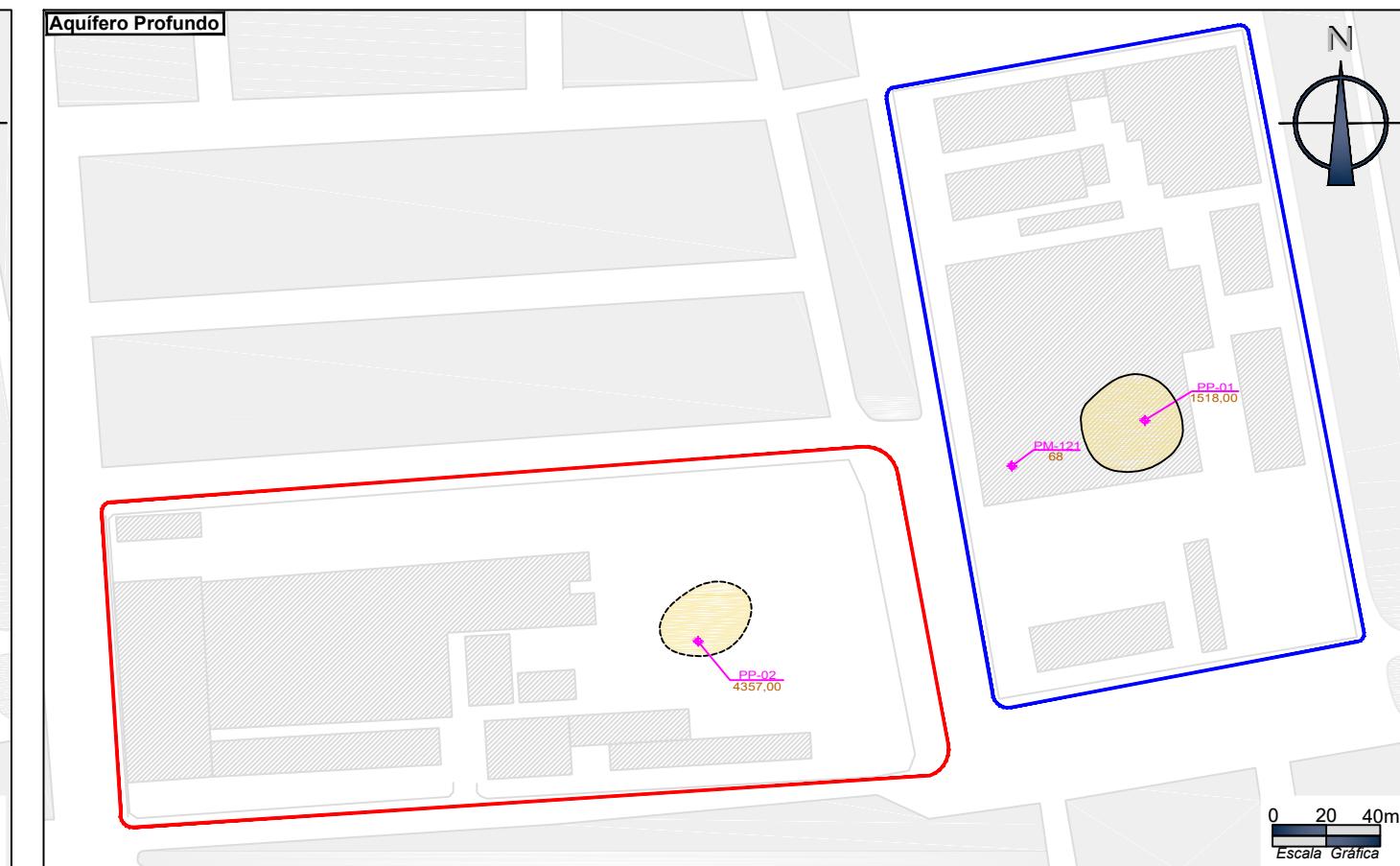
# SEÇÃO GEOLÓGICA - A - A'



**Título:** Pluma Vertical de Tetracloroeteno na Água Subterrânea (Secção A-A') **Local:** Porto Alegre- RS

**Escala:** Gráfica

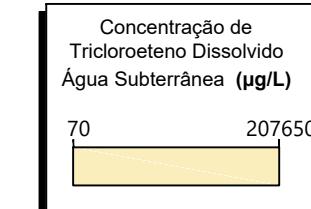
**FIGURA 25**



**LEGENDA:**

- ◆ POÇO DE MONITORAMENTO RASO
- ◆ POÇO DE MONITORAMENTO INTERMEDIÁRIO 1
- ◆ POÇO DE MONITORAMENTO INTERMEDIÁRIO 2
- ◆ POÇO DE MONITORAMENTO PROFUNDO
- LINHA EQUIPOTENCIAL
- LINHA EQUIPOTENCIAL INFERIDA
- xx,xx CARGA HIDRÁULICA (m)
- SENTIDO DO FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

ÁREA DE ESTUDO  
AREA 1 AREA 2



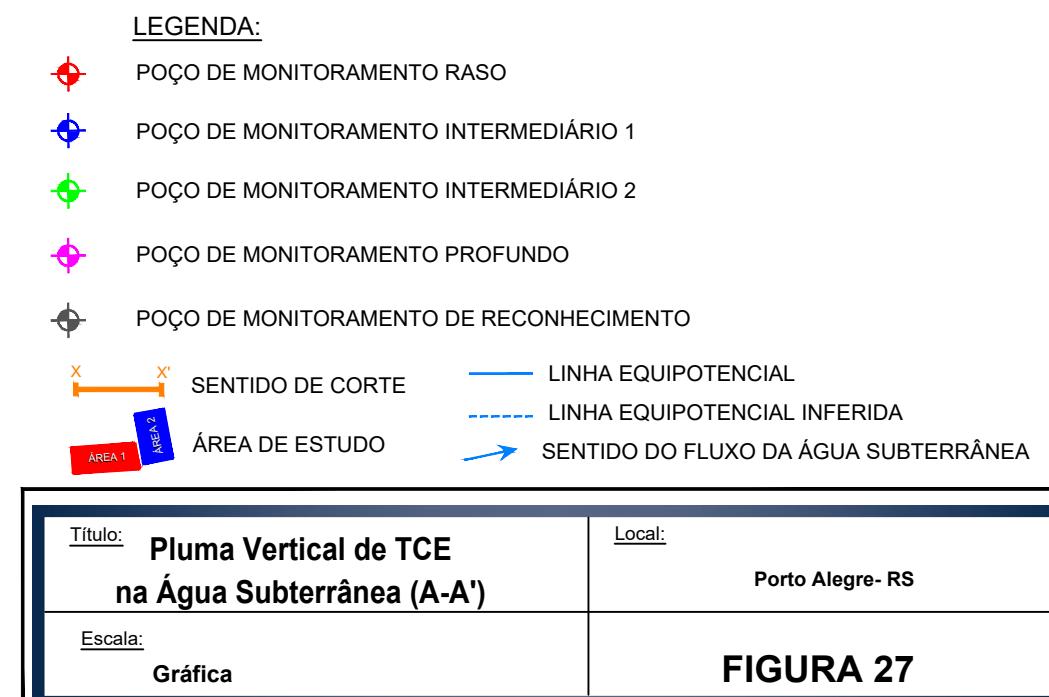
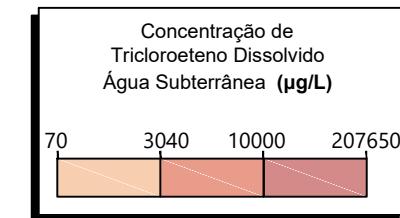
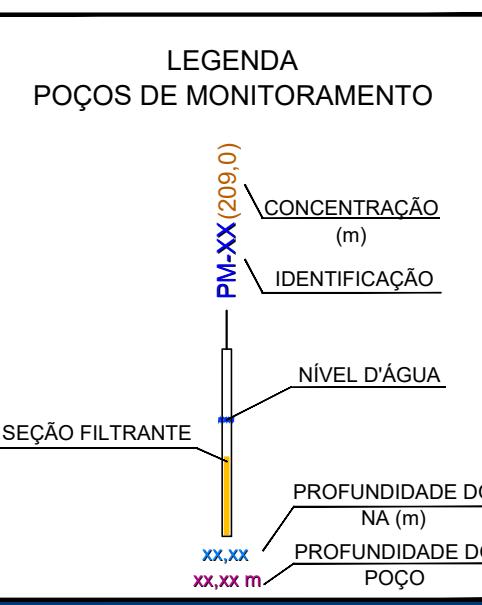
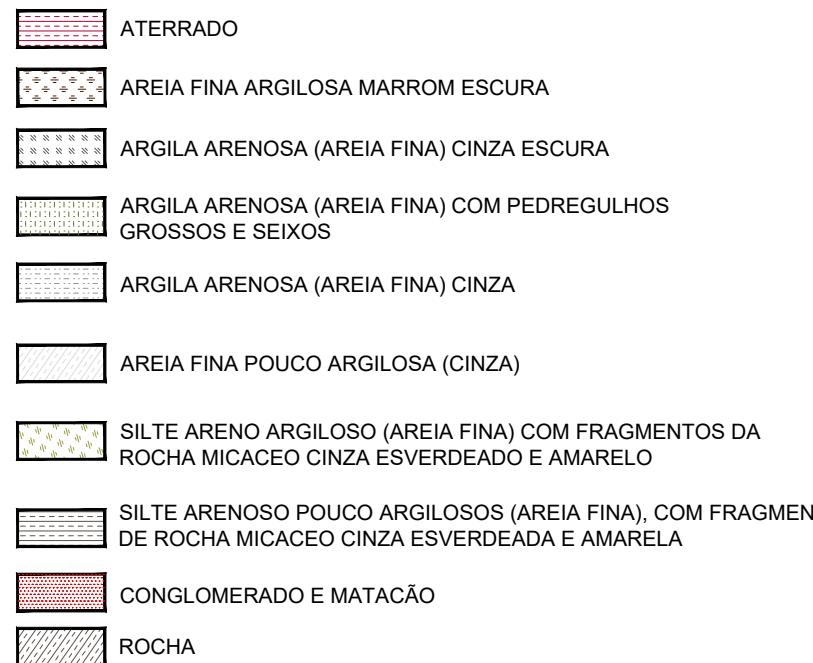
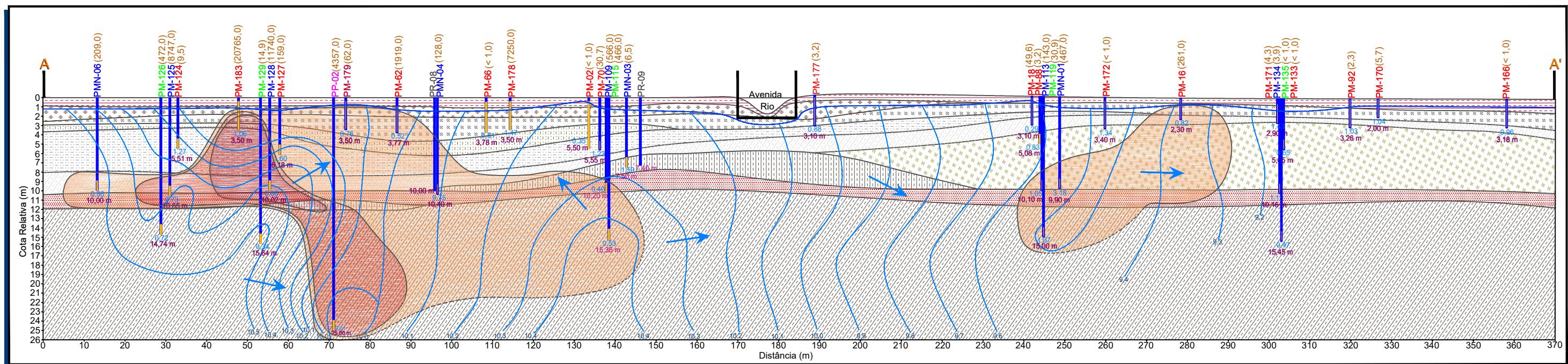
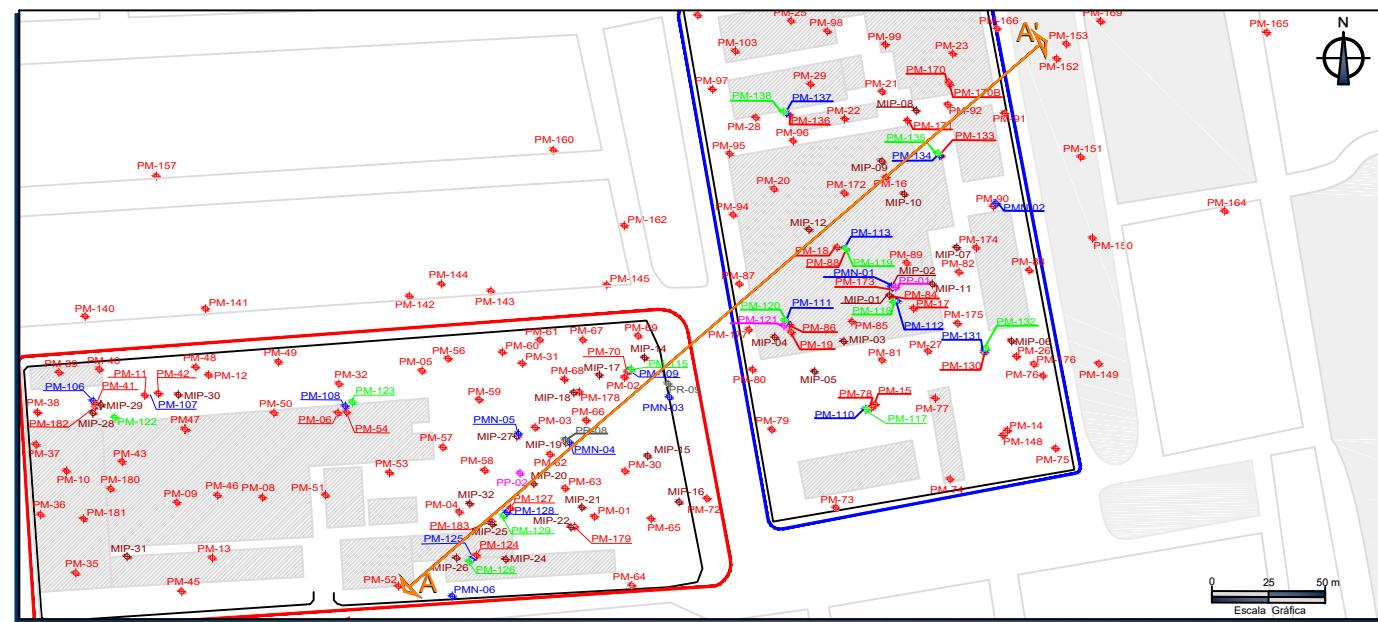
**Título:**  
Pluma de Tricloroeteno  
na Água Subterrânea

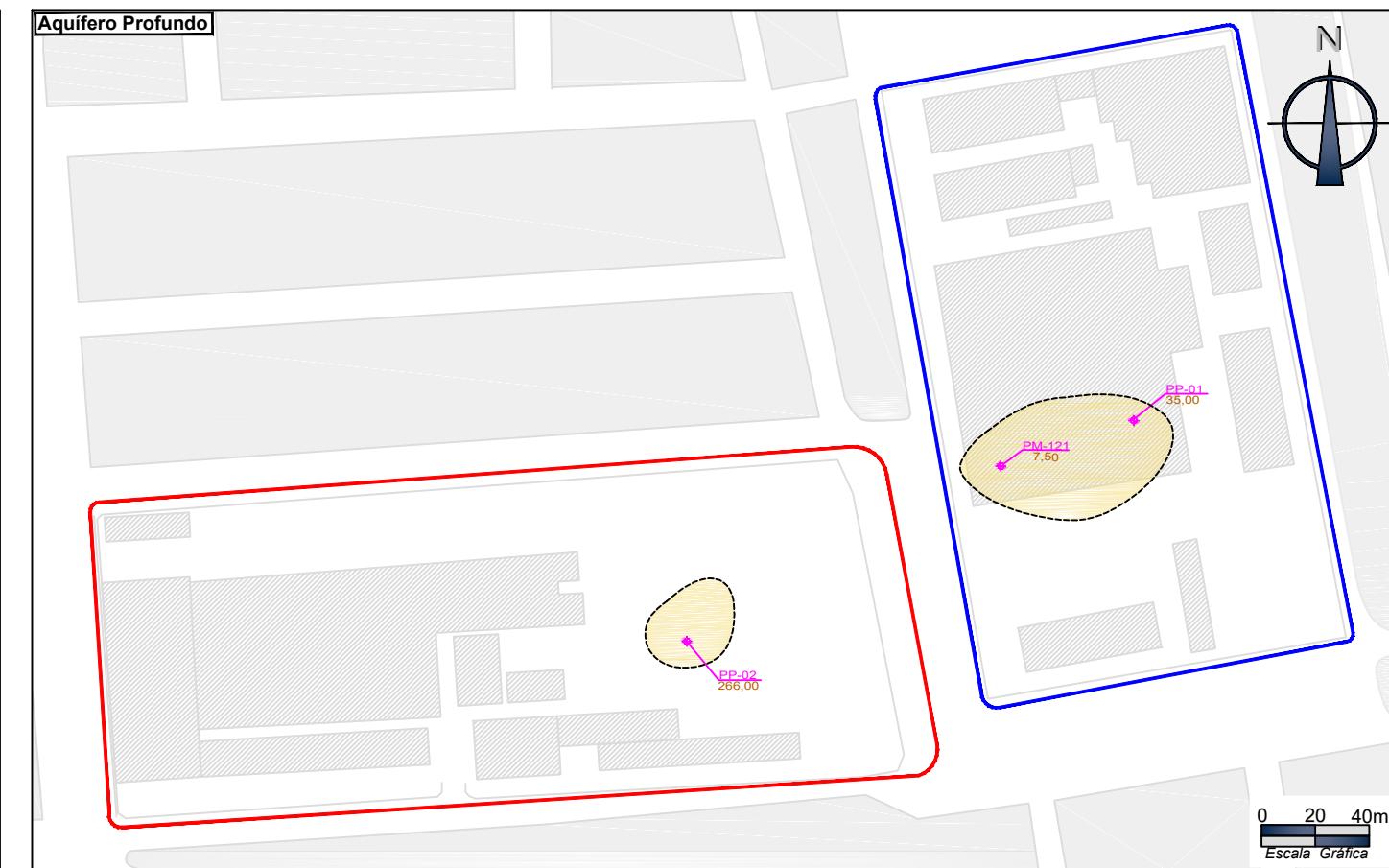
**Local:**  
Porto Alegre - RS

**Escala:**  
Gráfica

**FIGURA 26**

# SEÇÃO GEOLÓGICA - A - A'

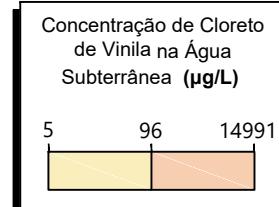




**LEGENDA:**

- ◆ POÇO DE MONITORAMENTO RASO
- ◆ POÇO DE MONITORAMENTO INTERMEDIÁRIO 1
- ◆ POÇO DE MONITORAMENTO INTERMEDIÁRIO 2
- ◆ POÇO DE MONITORAMENTO PROFUNDO
- LINHA EQUIPOTENCIAL
- LINHA EQUIPOTENCIAL INFERIDA
- xx,xx CARGA HIDRÁULICA (m)
- SENTIDO DO FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

ÁREA DE ESTUDO  
AREA 1 AREA 2



**Título:**  
Pluma de Cloreto de Vinila na Água Subterrânea  
**Local:**  
Porto Alegre- RS  
**Escala:**  
Gráfica

**FIGURA 28**

## 6.2. Discussão

A partir dos resultados indicados pela investigação complementar foi possível identificar que existem três centros de massa principais de contaminação de solventes clorados, sendo dois localizados na porção oeste da área, e um localizado na porção leste da área. As contaminações se deslocam na camada de maior condutividade hidráulica, correspondendo a camadas de areia e cascalho de alta permeabilidade hidráulica, localizado em duas profundidades distintas, sendo uma mais rasa variando entre 2 e 4 metros e outra profunda variando entre 9 e 11 metros, dependendo da região. Essas camadas são as que apresentam o maior deslocamento de fluxo do aquífero subterrâneo. Entre essas camadas, mais condutivas, observam-se zonas de retenção.

Os poços de monitoramento instalados após a execução da investigação com alta resolução possuem seção filtrante nas duas principais camadas de maior condutividade hidráulica, representando a zona de transporte (areia e cascalho). As seções filtrantes destes poços foram projetadas para permitir a coleta de amostras discretas nestas camadas, sem atravessar camadas com comportamento diferente.

Através das respostas dos sensores do MIP foi possível observar que as concentrações de Tetracloroeteno, Tricloroeteno e sua cadeia de degradação se deslocam nas camadas mais permeáveis citadas acima e existe um acúmulo com altas concentrações na camada confinante (entre 7 e 10 metros) que deveria ter o solo amostrado junto do centro de massa em alta resolução espacial e vertical.

Durante a instalação dos poços de monitoramento após os resultados da investigação com alta resolução, foram coletadas e analisadas amostras de solo apenas em profundidade rasas (até 1m) e as zonas de armazenamento observadas nos perfis do MIP não foram amostradas e analisadas. Apesar das outras amostras de solo exibirem apenas concentrações de TPH total, é possível que as camadas de armazenamento não amostradas apresentem concentrações de organoclorados possibilitando futuros aporte de contaminação na água subterrânea.

Os resultados do mapeamento das plumas em fase dissolvida apontam clara evidência de que a não detecção de contaminação no solo deve ser assumida no modelo conceitual como uma incerteza ser gerenciada no desenvolvimento do projeto de remediação, ou a

ser gerenciada com novas campanhas de amostragem deste meio, uma vez que é esperado que a maior massa de contaminantes estejam a ele associadas.

Seria de grande valia que se além das ferramentas utilizadas (MIP e HTP) e acopladas na sonda *direct push* durante a investigação detalhada complementar tivessem sido utilizadas ferramentas para coletas de amostras instantânea de água subterrânea, com a análise delas em campo, por exemplo, com um laboratório móvel.

Para uma melhor atualização do Modelo Conceitual a amostragem de solo poderia ser realizada na forma de uma malha regular com no máximo 1 metro de espaçamento, aplicada nas regiões de maior concentração das plumas dissolvidas. Em relação às plumas dissolvidas, a implantação de um *transect* multinível próximo e imediatamente a jusante das áreas centro de massa permitiria também um mapeamento mais preciso da distribuição da massa de contaminantes e quantificação do fluxo de massa. Essas amostragens fornecem informações mais precisas do volume de solo e aquífero que concentra a maior massa de contaminante e possibilitando estratégias de remediação mais específica para a área.

Por meio das investigações também foi possível observar que existe uma anomalia de hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP) no solo, provavelmente óleo BPF, utilizado na área de aquecimento de caldeiras na região da sondagem ST-182.

Os vapores presentes na zona não saturada não foram investigados nesta etapa de investigação devido à ausência de concentrações nos poços de vapores nas investigações anteriores. Devido ao raso n.a da área de estudo, recomenda-se que a investigação dos vapores provenientes dos poros do solo seja realizada de forma direta através de poços construídos com esta finalidade (se houver presença de piso impermeável no local) ou poços de vapor para que a avaliação de risco proveniente dos vapores dos poros de solo seja mais fidedigna a área.

Com base nos dados obtidos na investigação com alta resolução, atualização das concentrações presente na água subterrânea e entendimento da geologia do local foi realizada a avaliação de risco, considerando a matriz água subterrânea, foram identificados, aos futuros ocupantes da área, riscos potenciais associados à ingestão de água subterrânea, contato dérmico com a mesma, inalação em ambientes fechados e abertos.

Dentre os riscos potenciais identificados na área de estudo, os mais críticos aos receptores se referem aos riscos potenciais de inalação de vapores em ambientes fechados e abertos para residentes. Constatou-se que tal cenário de risco provém de concentrações de Tetracloroeteno, Tricloroeteno e Cloreto de Vinila identificadas no aquífero raso. Apesar de somente o aquífero raso ser considerado para o cálculo do risco de inalação, é importante ressaltar que os aquíferos mais profundos também apresentam concentrações elevadas de solventes clorados (entre 10 e 15 metros de profundidade) e devido ao fluxo de água ascendente, medidas devem ser propostas visando diminuir a massa de contaminantes presentes nestas regiões.

As comparações entre as concentrações máximas aceitáveis e as concentrações obtidas geraram o mapa de riscos. Este representa as áreas nas quais foram detectadas alterações de qualidade da água subterrânea que proporcionam riscos toxicológicos potenciais para as vias de ingresso simuladas.

A figura 30 apresenta o mapa de risco, considerando o uso futuro pretendido (cenário residencial).

Avaliação de risco identificou a necessidade da remediação da água subterrânea. A remediação tem como objetivo a eliminação dos riscos associados à inalação de vapores provenientes da água subterrânea do nível raso do aquífero. Contudo, devido à contaminação elevada de solventes clorados presentes no aquífero profundo (entre 10 e 15 metros de profundidade) e, devido ao fluxo de água ascendente na área de estudo, foram propostas medidas visando remoção de massa de contaminantes nestas regiões. As metas consideradas aplicáveis para a remediação na área referem-se ao uso futuro, cujo empreendimento a ser construído no local terá finalidade residencial.



## LEGENDA:

- |   |  |
|---|--|
|  POÇO DE MONITORAMENTO RASO            |  SUBTERRÂNEA (PORTARIA 2914/2011)   |
|  POÇO DE MONITORAMENTO INTERMEDIÁRIO 1 |  ÁREA DE RISCOS PARA CONTATO DÉRMICO COM<br>ÁGUA SUBTERRÂNEA                  |
|  POÇO DE MONITORAMENTO INTERMEDIÁRIO 2 |  ÁREA DE RISCO PARA INALAÇÃO EM AMBIENTE FECHADO DEVIDO<br>À ÁGUA SUBTERRÂNEA |
|  POÇO DE MONITORAMENTO PROFUNDO        |  ÁREA DE RISCO PARA INALAÇÃO EM AMBIENTE ABERTO DEVIDO<br>À ÁGUA SUBTERRÂNEA  |

A horizontal scale with a black bar. The origin is marked with '0' on the left. '40' is marked on the right. Above the scale, two colored boxes are placed: a red box labeled 'ÁREA 1' and a blue box labeled 'ÁREA 2'. The blue box is positioned above the red box, and both boxes overlap the scale bar.

Título:

### Escala:

## FIGURA 30

## Definição das estratégias de remediação

A definição das técnicas de remediação a serem aplicadas na área deste de casos, baseou-se na relação às características da contaminação existente e ao meio em que ela está inserida.

As principais características da contaminação da água subterrânea e do meio na área de estudo são:

- Contaminação por organoclorados (PCE,TCE e CV);
- Concentrações elevadas de contaminação em fase dissolvida;
- Área da pluma abrangendo parcela significativa do imóvel;
- Baixa profundidade do nível d'água (aquéfero raso);
- Contaminação até o meio fraturado;
- Necessidade de se obter resultados em curto espaço de tempo;
- Redução de custos na etapa de remediação.

Apesar da investigação complementar realizada na área apresentar alguns pontos de melhoria (investigação detalhada na matriz solo), (investigação e amostragem dos vapores provenientes dos poros do solo) considerou-se as características acima listadas e os resultados apresentados no capítulo anterior, para a definição das estratégias e técnicas da remediação visando a atualização do plano de remediação que anteriormente era composto apenas por remediação termal (por condução elétrica) para toda a área.

A atualização do plano de remediação contemplou ou uso duas técnicas, Termal (por dessorção térmica) e redução desclorativa ambas com o objetivo de reduzir a massa de contaminantes para níveis que não ofereçam riscos aos cenários aplicáveis. Para as regiões de centro de massa, que apresentaram as maiores concentrações de organoclorados desde o aquífero raso até o aquífero fraturado, foi selecionada a técnica de remediação termal por condução elétrica, devido à sua comprovada eficácia de remoção de organoclorados em um curto espaço de tempo. Como já informado, inicialmente, previa-se que toda a área de risco seria remediada através da dessorção térmica. Após os dados obtidos na investigação complementar foi possível reduzir a área de atuação da remediação termal em 90%, deixando-a exclusivamente para os grandes centros de massa

Para as regiões que apresentaram concentrações de organoclorados acima das metas para inalação em ambiente fechado, considerando um cenário residencial, contudo restritas aos primeiros metros do aquífero, foi selecionada a técnica de redução desclorativa, considerando

aplicação de produto redutor bioestimulador por meio de injeção direta - direct push ou por aplicação em trincheiras escavadas.

A figura 31 apresenta o mapa de intervenção com as técnicas de remediação selecionadas.



LEGENDA:

- POÇO DE MONITORAMENTO RASO
- POÇO DE MONITORAMENTO INTERMEDIÁRIO 1
- POÇO DE MONITORAMENTO INTERMEDIÁRIO 2
- POÇO DE MONITORAMENTO PROFUNDO
- ÁREA DE RISCOS PARA INGESTÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA (PORTARIA 2914/2011)
- ÁREA DE RISCOS PARA CONTATO DÉRMICO COM ÁGUA SUBTERRÂNEA
- ÁREA DE RISCO PARA INALAÇÃO EM AMBIENTE FECHADO DEVIDO À ÁGUA SUBTERRÂNEA
- ÁREA DE RISCO PARA INALAÇÃO EM AMBIENTE ABERTO DEVIDO À ÁGUA SUBTERRÂNEA

ÁREA 1      ÁREA 2

0      40      80m  
Escala Gráfica

**Título:** Mapa de Riscos - Cenário Residencial  
**Local:** Porto Alegre - RS  
**Escala:** Gráfica

**FIGURA 31**

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma área contaminada é um grande problema ambiental, social e econômico e deve ser tratada como tal. Na maior parte das vezes o proprietário deste passivo ambiental não possui conhecimento técnico do problema e que considera desnecessária investigação ambiental detalhada de sua propriedade. Porém a investigação é a etapa essencial no processo de reabilitação de uma área contaminada, diminuindo e/ou evitando gastos desnecessários na etapa de remediação.

Durante 09 anos foram realizadas diferentes etapas de investigação da área do estudo de caso, e a partir da análise destes relatórios verificou-se que ainda existiam incertezas a respeito da contaminação. Desse modo, foi elaborado um novo diagnóstico ambiental com objetivo principal de esclarecer tais pontos e atualizar as informações sobre a distribuição dos contaminantes no terreno.

Deste modo, o estudo de caso contemplou um compilado de todos os estudos ambientais protocolados no órgão ambiental, nova investigação de gases no solo, a partir da técnica de investigação Soil Gas Survey (SGS), nova campanha de monitoramento para a remediação, incluindo a análise de todos os poços de monitoramento existentes para os parâmetros de Compostos orgânicos voláteis (VOCs), Compostos orgânicos semi-voláteis (SVOCs), Metais Dissolvidos, Hidrocarbonetos Totais de Petróleo e Íons (Cianeto Livre e Total, Fosfato e Sulfato) e detalhamento da contaminação com instalação e amostragem de novos poços de monitoramento nos aquíferos raso e profundo. O estudo também realizou uma investigação utilizando ferramenta de alta resolução com a tecnologia Membrane Interface Probe (MIP), que permitiu a análise qualitativa em tempo real da contaminação presente em todo o perfil das sondagens executadas, além de prover informações relativas à permeabilidade e condutividade elétrica nos pontos de investigação.

Com os resultados obtidos constatou-se que os principais contaminantes de interesse identificados foram Tricloroeteno (TCE), Tetracloroeteno (PCE) e o Cloreto de Vinila (CV), na água subterrânea, com concentrações acima dos valores orientadores do CONAMA 420/09.

O PCE e TCE eram utilizados como desengraxante na fabricação dos utensílios de metais, e estão relacionados aos riscos potenciais de inalação, considerando suas volatilidades e toxicidades.

A partir dos resultados indicados pela investigação complementar foi possível identificar que existem três centros de massa principais de contaminação de solventes clorados, sendo dois localizados na área 1 (terreno a oeste) e um localizado na área 2 (terreno a leste). As contaminações se deslocam na camada de maior condutividade hidráulica, correspondendo a camadas de areia e cascalho de alta permeabilidade hidráulica, localizado em duas profundidades distintas, sendo uma mais rasa variando entre 2 e 4 metros e outra profunda variando entre 9 e 11 metros, dependendo da região. Essas camadas são as que apresentam o maior deslocamento de fluxo do aquífero subterrâneo. Entre essas camadas, mais condutivas, observam-se zonas de retenção.

Através das respostas dos sensores do MIP foi possível observar que as concentrações de Tetracloroeteno, Tricloroeteno e sua cadeia de degradação se deslocam nas camadas mais permeáveis citadas acima e existe um acúmulo com altas concentrações na camada confinante (entre 7 e 10 metros).

Por meio das investigações também foi possível observar que existe uma anomalia de hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP) no solo, provavelmente óleo BPF, utilizado na área de aquecimento de caldeiras na região da sondagem ST-182.

Apesar da investigação complementar realizada na área apresentar alguns pontos de melhoria (investigação detalhada na matriz solo), (investigação e amostragem dos vapores provenientes dos poros do solo) as informações obtidas nesta etapa a possibilitou a elaboração do plano de remediação.

O Plano de Remediação foi elaborado com o objetivo de mitigar a exposição dos futuros moradores às áreas fontes de riscos toxicológicos potenciais à saúde humana. Com base nos resultados obtidos, definiu-se o uso combinado de técnicas de remediação empregando remediação termal e redução desclorativa. Inicialmente toda a área de risco de inalação seria remediada através da dessorção térmica e após os dados obtidos na investigação complementar foi possível reduzir a área de remediação termal em 90%, deixando-a exclusivamente para os grandes centros de massa. Diante disso, verificou-se que o tempo e investimentos financeiros desprendidos na etapa de investigação complementar possibilitaram a redução da área a ser remediada pela técnica mais onerosa (remediação termal) viabilizando economicamente o projeto e evitando que mais um passivo ambiental fosse “abandonado” em nosso país.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANICETO, Keila Cristina Pereira; HORBE, Adriana Maria Coimbra. Solos urbanos formados pelo acúmulo de resíduos em Manaus, Amazonas, Brasil. *Acta Amazônica*, v. 42, n. 1, p. 135-148, 2012.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). (2009). Resolução nº 420. Brasil: Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2009.

BRASIL - Ministério da Saúde, 2011. Portaria nº 2914 - Anexo - Norma de Qualidade da Água para Consumo Humano e seu Padrão de Potabilidade.

CLEARY, Robert. Águas Subterrâneas. Porto Alegre: ABRH, 1989. 117 p. Disponível em <[http://www.clean.com.br/Menu\\_Artigos/cleary.pdf](http://www.clean.com.br/Menu_Artigos/cleary.pdf)>. Acesso em 26 de outubro. 2021.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Diretoria de Controle de Licenciamento Ambiental. Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo. São Paulo: CETESB, 2013.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. A problemática das áreas contaminadas em São Paulo. Disponível em:<[https://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/003/08/21\\_assec.htm](https://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/003/08/21_assec.htm)>. Acesso em: 30/12/2021.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Diretoria Plena. Decisão de Diretoria nº 038/2017/C. São Paulo: CETESB, 2017.

CETESB, 1999. Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas: Regulamentação da Lei federal Alemã de Proteção do Solo e de AC (RLPFPS) – CETESB - GTZ – 2<sup>a</sup> Ed. – São Paulo, Brasil.

CETESB, 2003. Guia para Avaliação do Potencial de Contaminação em Imóveis – CETESB - GTZ – 2<sup>a</sup> Ed. – São Paulo, Brasil.

CETESB, 2004. Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas: Investigação Detalhada – CETESB - GTZ – 2<sup>a</sup> Ed. – São Paulo, Brasil.

CETESB, 2007. Procedimento para gerenciamento de áreas contaminadas. Decisão da Diretoria 103-2007-C-E, de 22 de junho de 2007. CETESB/SMA. Diário Oficial do Estado de São Paulo (27/06/2007), Poder Executivo – Seção I – p. 34-39.

CETESB, 2011. Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras – Água, Sedimento, Comunidades Aquáticas e Efluentes Líquidos. CETESB/SMA, São Paulo e ANA – Agência Nacional de Águas, Brasília - DF.

CETESB, 2016. Valores Orientadores para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo. Anexo Único - (Decisão de Diretoria Nº 256/2016/E) São Paulo, Brasil.

CHERRY, J. PARKER, B. DNAPL Contamination on Groundwater. Anais do I Congresso Internacional do Meio Ambiente Subterrâneo (CIMAS). São Paulo-SP. Setembro, 2009. CLEARY, Robert. Águas Subterrâneas. Porto Alegre: ABRH, 1989. 117 p. Disponível em <[http://www.clean.com.br/Menu\\_Artigos/cleary.pdf](http://www.clean.com.br/Menu_Artigos/cleary.pdf)>. Acesso em 16 jan. 2022.

CLEARY, Robert. Por que a maioria dos sistemas de remediação falha? Anais do I Congresso Internacional do Meio Ambiente Subterrâneo (CIMAS). São Paulo-SP, setembro, 2009.

COUTINHO, B.R. Caracterização de áreas contaminadas através de ensaios in situ. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2002.

CRUMBLING, Deana M. Summary of Triad Approach. U.S. Environmental Protection Agency Office of Superfund Remediation and Technology Innovation: Superfund Triad Support Team. 2004.

CUNHA, Rodrigo César de Araújo. Avaliação de risco em áreas contaminadas por fontes industriais desativadas – Estudo de caso. Dissertação (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1997. 128 f.

CUNHA, Rodrigo César de Araújo. Prefácio. In: MORAES, Sandra Lúcia de; TEIXEIRA, Cláudia Echevenguá; MAXIMIANO, Alexandre Magno de Sousa. Guia de Elaboração de Planos de Intervenção para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas. Centro de Pesquisa em Áreas Contaminadas do IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, 2013.

DE MORAES, Sandra Lúcia; TEIXEIRA, Cláudia Echevenguá; DE SOUSA MAXIMIANO, Alexandre Magno. Gerenciamento de áreas contaminadas.

FREITAS, Leandro Gomes de. Aplicação de técnicas de alta resolução para caracterização geoambiental de áreas com ocorrência de gás metano. 2017.

GEOPROBE. MIP: Membrane Interface Probe. 2017. Disponível em: <http://geoprobe.com/mip-membrane-interface-probe>. Acesso em: 15 de dezembro 2021.

LINCH, K.P. Evolving Conceptual Site Models (CSMs) in real-time for cost effective projects. San Diego: National Site Assessment Symposium, 2004

MCKINNON, C. D.; CALLAGHAN, J. P.; DICKERSON, C. R. Evaluation of the influence of mobile data terminal location on physical exposures during simulated police patrol activities. Applied ergonomics, v. 43, n. 5, p. 859-867, 2012.

MILANI, Mariana Gava; CARVALHO, Ana Cristina Malheiros Gonçalves. Study of high-resolution site characterization technologies for the improvement of the conceptual site model—case study: Duque de Caxias (RJ), Brazil. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 26, n. 2, p. 327-337, 2021.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Áreas Contaminadas. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-perigosos/areas-contaminadas.html>>. Acessado em 30 de dezembro de 2021.

NEGRÃO, P. C. M. Determinação da Descarga de Massa de Contaminantes em Meio Poroso Saturado em Ambiente Estuarino. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. 2015.

PITKIN, Seth; EDWARDS, Tracy; TURLEY, Lance; RAWNSLEY, Chris. Reduction of Thermal Treatment Volume Through the Application of HRSC at Superfund site.apresentação na Ninth International Conference on Remediation of Recalcitrant Compounds – Battelle. Monterey, CA. Book of Abstracts. Paper E-106. 2014.

QUINNAN, Joe. Real-Time High Resolution LNAPL and DNAPL Characterization – Part 1:Philosophy and Background. In: North American Environmental Field Conference. Tampa,FL. Março/2012

Revista Pollution Engineering – Brasil. Edição Out-Dez/2013. Disponível em <http://www.revistape.com.br/coluna/areas-contaminadas-investigacao-geoambiental-de-altaresolucao-e-sinonimo-de-mip/1639>

RIYIS, Marcos Tanaka. Contribuição para investigação de áreas contaminadas com abordagem de alta resolução. 2019

RIYIS, Marcos Tanaka et al. Varredura vertical de amostras de solo com LNAPL utilizando dispositivo de baixo custo com luz ultravioleta. Águas Subterrâneas, v. 33, n. 3, p. 247-257, 2019.

RIYIS, Marcos Tanaka. Investigaçāo Geoambiental de Alta Resolução é Sinônimo de MIP? Revista Pollution Engineering – Brasil. Edição Out-Dez/2013. Disponível em <http://www.revistape.com.br/coluna/areas-contaminadas-investigacao-geoambiental-de-altaresolucao- e-sinonimo-de-mip/1639>

RIYIS, Marcos Tanaka; ARAKAKI, Edson; De JESUS, Lucas Scarpanti; GIACHETI, Heraldo Luiz. Varredura vertical de amostras de solo com LNAPL utilizando dispositivo de baixo custo com luz ultravioleta. Revista Águas Subterrâneas, v. 33, n. 3, p. 247-257, 2019. : <https://doi.org/10.14295/ras.v33i3.29362>

RIYIS, Marcos Tanaka. Eu Preciso Amostrar Solo em Zona Saturada? ECD Ambiental 16/07/2015.

RIYIS, Marcos Tanaka. A Revitalização de Áreas Contaminadas passa por Correta Amostragem de Solo. Revista Pollution Engineering – Brasil. Edição Jul-Set/2014.

RIYIS, Marcos Tanaka. Investigaçāo Geoambiental de Alta Resolução é Sinônimo de MIP?

RIYIS, M.T.; GIACHETI, H.L.; DERRITE, R.M.; RIYIS, M.T. Investigaçāo geoambiental de áreas contaminadas com elaboração do modelo conceitual em campo utilizando ferramentas de alta resolução (HRSC). Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v. 3, n. 1, p. 125-137, 2013.

RIYIS, Marcos Tanaka. Investigaçāo Geoambiental com Tomada de Decisão em Campo utilizando o Piezocone de Resistividade como Ferramenta de Alta Resolução. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia de Bauru, UNESP, Bauru, 2012.

QUINNAN, J.A., WELTY, N.R.H., KILLEMBECK, E. 2010. Hydrostratigraphic and permeability profiling for groundwater remediation projects. In Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'10), Huntington Beach, Calif., 9–11 May 2010.

QUINNAN, Joe. Real-Time High Resolution LNAPL and DNAPL Characterization – Part 1: Philosophy and Background. In: North American Environmental Field Conference. Tampa,

FL. Março/2012

SÁNCHEZ, L.E. A desativação de empreendimentos industriais: um estudo sobre o passivo ambiental. 178f. Tese (Doutorado Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SINGER, M.; FIACCO, J. Abordagem tríade: você consegue viver sem ela? Apresentação realizada no VII Seminário Internacional sobre Remediação e Revitalização de Áreas Contaminadas; São Paulo, Brasil: Instituto Ekos, 20/10/2010.

SUTHERSAN, Suthan; Quinnan, Joseph; Welty, Nicklaus. The New ROI: Return of Investment by Utilizing SMART Characterization Methods. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 35- n3. Summer: 25-33. 2015.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Superfund. Estados Unidos: USEPA, 2019. Disponível em: <https://www.epa.gov/superfund/what-superfund>. Acesso em: 23 dez. 2021.