

Aprimoramento do modelo conceitual da área através do uso de ferramentas de investigação de alta resolução

Conceptual Site Model improvement using High-Resolution Site Characterization Tools

Aline Diorio dos Santos ⁽¹⁾, Ariane Neres Ferreira ⁽¹⁾, Graziani Gobatto ⁽¹⁾ Marcos Tanaka Riyis ^(1, 2)

¹ Centro Universitário SENAC – Curso de Pós-Graduação em Gerenciamento de Áreas Contaminadas

² ECD Sondagens Ambientais Ltda

{aline_sduarte@yahoo.com.br, arianefer@gmail.com, graziani.gobatto@cetrel.com.br, marcos@ecdambiental.com.br}

Resumo. O presente trabalho avaliou o refinamento do diagnóstico de uma área contaminada através da utilização de uma ferramenta de alta resolução, conhecida como MiHpt. Essa ferramenta possui três sistemas distintos: um mede a condutividade elétrica do solo (CE), outro avalia o perfil hidráulico vertical – HPT e o terceiro, chamado *Membrane Interface Probe* (MIP), permite verificar a distribuição vertical de contaminantes utilizando os sensores PID, FID e XSD, montados em um cromatógrafo gasoso (GC). As medições em todos os sensores (CE, HPT, PID, FID e XSD) são feitas em tempo real e apresentadas em um perfil contínuo. Os resultados obtidos com o MIP foram comparados com dados de resultados analíticos, enquanto os dados do HPT e CE foram comparados com as descrições tátil-visuais de amostragens de solo. Desta forma, foi possível constatar que a área mais impactada está no nível mais superficial do aquífero, acima de camadas selantes de baixo fluxo. A avaliação do perfil dos poços de bombeamento indicou que os mesmos são eficientes, pois estão posicionados próximos às zonas impactadas e porque a base da seção filtrante está posicionada sobre uma camada de selante. Portanto, é possível verificar que, neste estudo de caso, a ferramenta de alta resolução permitiu um avanço no modelo conceitual da área, reduzindo a necessidade de eventuais investigações adicionais e possibilitando maior eficiência e eficácia nas etapas de remediação.

Palavras-chave: investigação de alta resolução, MiHpt, modelo conceitual, áreas contaminadas, remediação.

Abstract. *This paper evaluated a site assessment using a High-Resolution Site Characterization (HRSC) tool named MiHpt. This tool has three different systems: an Electric Conductivity probe (EC), an hydraulic profile tool (HPT) and the third, called Membrane Interface Probe (MIP), allows to check the contaminants vertical distribution, using a PID, a FID and a XSD sensors, mounted on a gas chromatograph (GC). Measurements in all sensors (EC, HPT, PID, FID and XSD) are done in real time and displayed in a continuous profile. The results obtained were compared with the laboratory analysis results, and with the soil samples tactile-visual descriptions. Thus, it was found that the most impacted area is on the superficial aquifer, above very low flow layers. Therefore, it is concluded that, in this study, the high resolution tool allowed advances in the conceptual site model, reducing the need for future site investigation and enabling greater efficiency and effectiveness in remediation.*

Key words: *high resolution site characterization, MiHpt, conceptual site model, contaminated lands, remediation.*

InterfacEHS – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade
Vol. 10 no 2 – dezembro de 2015, São Paulo: Centro Universitário Senac
ISSN 1980-0894

Portal da revista InterfacEHS: <http://www3.sp.senac.br/hotsites/blogs/InterfacEHS/>
E-mail: interfacEHS@sp.senac.br

Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição-Não Comercial-SemDerivações 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) 

1. Introdução

Áreas contaminadas são locais que contenham matérias e/ou substâncias consideradas nocivas ao solo, sedimento, biota, águas superficiais, águas subterrâneas e seres vivos. Área contaminada pode ser um terreno, instalação, edificação ou local que possua quantidades ou concentrações de matérias em condições que causem ou possam vir a causar danos ao meio ambiente, à saúde humana ou outro bem a proteger (São Paulo, 2013, p. 2). Uma boa parte das áreas contaminadas é consequência de práticas pretéritas, onde os cuidados com a proteção à saúde humana e ao meio ambiente eram desconhecidos ou ignorados. Para Cunha (1997), áreas contaminadas 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 resíduo. Regiões que se desenvolveram muito rapidamente e sem a devida ordenação do uso do solo elevaram significativamente o número áreas contaminadas. Com a intensificação da mudança de uso e ocupação do solo nos centros urbanos, essa temática ganhou mais visibilidade, uma vez que antigos terrenos industriais, aterros, lixões, entre outros, passaram a abrigar construções residenciais e comerciais, com isso muitos problemas ambientais destas áreas ganharam destaque, pois apresentam algum tipo de risco à saúde humana. Como exemplo dessa mudança de uso do solo e preocupação com aspectos ambientais pode-se citar o caso o bairro Jurubatuba/SP e o Shopping Center Norte/SP (CETESB, 2013), entre outros. No Brasil, há muita dificuldade na identificação destas áreas, uma vez que poucos estados já possuem listas oficiais de áreas contaminadas. Em dados de 2013, há 4.771 áreas contaminadas confirmadas no estado de São Paulo, sendo 52% somente na capital paulista e região metropolitana (CETESB, 2013).

O gerenciamento de áreas contaminadas (CETESB, 2013) prevê diversas etapas, desde a identificação de áreas suspeitas até a completa revitalização da área contaminada. Tanto a legislação específica, como o Decreto 59.263 (São Paulo, 2013), quanto os documentos técnicos, como o Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB, 2001), dão importância elevada às etapas de diagnóstico de uma área contaminada para que a sua recuperação ou reutilização ocorra de maneira economicamente viável e ambientalmente segura. Pode-se observar que, na maioria dos casos, as etapas de diagnóstico são negligenciadas, principalmente em função de fatores financeiros e de planejamento, causando a elaboração de um modelo conceitual fraco e com muitas incertezas para a área de estudo (Riyis, 2012).

Neste contexto, a utilização de abordagens e técnicas que possibilitem uma melhor compreensão dos aspectos físicos e geoquímicos de uma área contaminada são muito relevantes para o sucesso do diagnóstico, e consequentemente, do projeto de remediação, ou plano de intervenção.

O presente trabalho pretendeu detalhar a melhoria da qualidade do modelo conceitual de uma área impactada através da utilização de técnica de investigação de alta resolução. Foi utilizada, para isso, a ferramenta MiHpt (MacCall et al, 2014), que é a união dos equipamentos *Membrane Interface Probe* (MIP), que tem como objetivo caracterizar verticalmente a distribuição dos contaminantes, com o *Hydraulic Profiling Tool* (HPT), que tem como função fornecer um perfil qualitativo da condutividade hidráulica do meio físico em que esse contaminante está inserido. Essa melhora do modelo conceitual pode ser verificada nos seguintes fatores:

- Refinamento do modelo geológico local, através da correlação dos dados do HPT com os dados de descrições geológicas de sondagens e perfis de poços de monitoramento;
- Levantamento de dados hidrogeológicos adicionais, através das informações obtidas através da condutividade hidráulica qualitativa;

- Correlação dos diferentes aquíferos presentes na área, através da verificação de camadas mais e menos condutivas, que permitem ou não o fluxo subterrâneo, sendo possível correlacionar possíveis aquíferos e aquíferos;
- Delimitação vertical dos contaminantes, através da medição contínua dos compostos voláteis, com a utilização dos sensores do MIP;
- Investigar a relação e interligação entre diferentes focos potenciais de contaminação localizados entre as áreas A e B;
- Verificar a eficiência da Barreira Hidráulica presente na área A e avaliar a eventual necessidade de reinstalação dos poços de bombeamento existentes.

2. Revisão Bibliográfica

Modelo Conceitual

Para CETESB (2001), modelo conceitual constitui-se numa síntese das informações relativas a uma área em estudo, onde se pode visualizar, através de texto explicativo ou ilustração, a localização da contaminação, a sua forma de propagação e a sua relação com os bens a proteger existentes.

A USEPA¹ define modelo conceitual do site (em inglês, *Conceptual Site Model* – CSM) como um elemento-chave utilizado para facilitar as decisões durante a etapa de investigação no local, é uma ferramenta de planejamento que organiza as informações que já se conhece sobre o local de estudo e identifica as informações adicionais necessárias para apoiar as decisões que irão atingir os objetivos do projeto. Os gestores do projeto devem ter como base o modelo conceitual elaborado anteriormente para dar continuidade e direcionar os trabalhos futuros (USEPA, 2010). O CSM atende a diversas finalidades: um instrumento de planejamento, uma ferramenta de modelagem de dados e interpretação ou um meio de comunicação entre os membros de uma equipe de projeto, tomadores de decisão, partes interessadas e as equipes de campo.

A ABNT (2013) interpreta o modelo conceitual como uma representação gráfica ou escrita de um sistema ambiental e os processos físicos, químicos e biológicos, que delimitam o transporte dos contaminantes a partir das fontes, através dos meios, até os receptores envolvidos.

O modelo conceitual vai envolver uma série de hipóteses, simplificações e suposições que devem ser desafiados e confirmados durante todo o projeto por meio de testes e comparação com os dados obtidos em campo, para testar a validade desse modelo e determinar se ele é ou não uma representação satisfatória da realidade do meio. Todas as premissas e interpretações feitas durante a elaboração do modelo conceitual devem ser claramente registradas e, se o CSM não fornecer uma boa interpretação da realidade, é necessário coletar mais dados e revalidar o modelo (USEPA, 2005).

O modelo conceitual, então, pode ser definido como uma ferramenta elaborada para que ocorra um entendimento completo do meio físico, das fontes primárias e secundárias, das vias de exposição e dos possíveis receptores. O meio físico engloba aspectos locais como a geologia, a hidrogeologia, a pedologia e como estes fatores interagem entre si e com o contaminante. É um resumo de todas as informações obtidas até o momento sobre a área de estudo, ou uma simplificação da realidade observada na área que tem como finalidade fornecer uma visão geral das condições da área e identificar os processos que regem e afetam o transporte dos contaminantes no meio.

1. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.

Uma investigação inadequada acarreta em um modelo conceitual muito simplificado (muitas vezes observa-se o CSM com muitas incertezas, que definem o meio hidrogeológico e geológico quase como homogêneo, o que não representa realidade), prejudicando a eficiência e eficácia das etapas seguintes do projeto.

A investigação ambiental da área deve ser, portanto, a etapa mais importante do projeto. Para este momento devem-se solicitar os profissionais mais experientes e as tecnologias de investigação mais avançadas e adequadas para a uma boa caracterização do local de estudo. Para Riyis *et al.* (2013) é fundamental que não se utilize apenas as ferramentas de investigação consagradas e obrigatórias, mas também as ferramentas para investigação de alta resolução, também chamadas de *High Resolution Site Characterization (HRSC) tools* e que a tomada de decisão ocorra no campo, com a presença do profissional experiente no local e não no escritório, como tradicionalmente ocorre.

Ferramentas de Investigação de Alta Resolução

Ferramentas de investigação de alta resolução ou *High Resolution Site Characterization tools (HRSC)* são estratégias e técnicas para avaliar a área em escala adequada e com grande densidade de dados, para definir as distribuições dos contaminantes e o contexto do meio físico em que se encontram, para, com menor incerteza, subsidiar a revitalização da área de forma mais rápida eficaz (USEPA, 2013). Para isso, são utilizadas ferramentas e técnicas intrusivas dotadas de sensores que fornecem grande quantidade de dados físicos e químicos ao mesmo tempo em que a intrusão desses sensores no solo avança em profundidade. São ferramentas que fornecem dados em escala de detalhe, com uma grande quantidade de amostras pontuais qualitativas que são utilizadas para definir a distribuição vertical dos contaminantes e caracterizar, numa escala de detalhe que chega a centímetros, as heterogeneidades hidrogeológicas do local, reduzindo incertezas, refinando o modelo conceitual (RIYIS, 2012), e permitindo um melhor entendimento dos diferentes estratos do solo, da distribuição do contaminante, seu volume e sua massa.

Uma investigação de área contaminada realizada com ferramentas de alta resolução proporciona uma base mais confiável para o processo de descontaminação do site, como a caracterização das condições hidroestratigráficas da área de estudo, informação que é de extrema relevância para o sucesso do projeto de remediação. Este fato só é possível porque estas ferramentas realizam análises em uma escala que os métodos tradicionais de investigação são incapazes de trabalhar atualmente (Riyis *et al.*, 2013). A identificação da massa dos contaminantes presentes no solo (em fase livre, dissolvida, retida ou vapor) e a localização da camada hidrogeológica em que os contaminantes estão presentes (zona de fluxo – muito permeável – ou zona de retenção – pouco permeável), proporcionam maior confiança sobre a caracterização do site, já que há um aumento significativo na densidade de dados coletados. Havendo uma estimativa com menor incerteza da massa e da localização de contaminantes, através de uma melhor identificação e delimitação das fontes de contaminação e das interações meio/contaminante, é possível diminuir os custos e aumentar desempenho da remediação (USEPA, 2013; Riyis *et al.*, 2013).

Segundo Riyis (2012), as ferramentas de alta resolução podem ser divididas em dois grandes grupos: as de caracterização química ou de *screening* de concentração dos compostos e as de caracterização física do meio. Como exemplo de caracterização química é possível citar: o MIP (*Membrane Interface Probe*), o LIF (*Laser Induced Fluorescence*) e os laboratórios móveis. Como exemplo de caracterização física podemos citar o HPT (*Hydraulic Profiling Tool*), o CPT (*Cone Penetration Test*), EC (Sensor de Condutividade Elétrica), CPTu (*Cone Penetration Test* com poro pressão, ou Piezocone), RCPTu (Piezocone de Resistividade), entre outros.

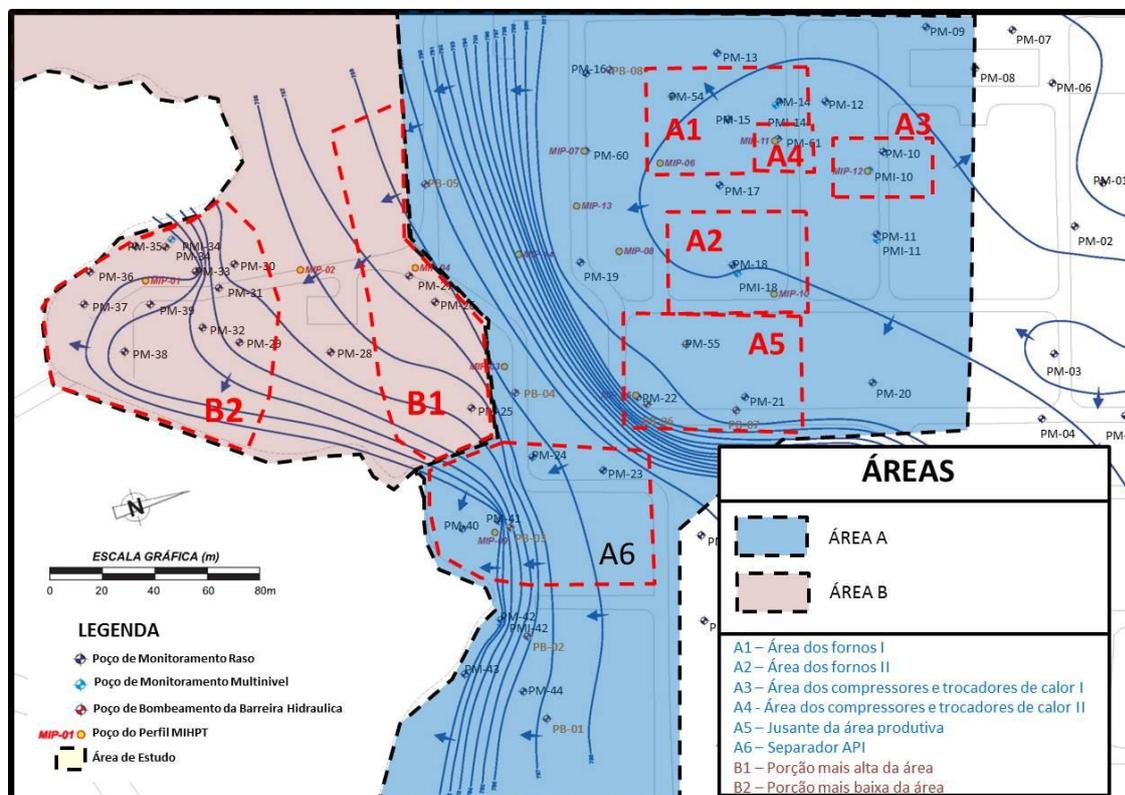
O presente trabalho avalia o MIP como ferramenta de *screening* de concentração dos compostos e o HPT+EC como ferramenta para caracterização do meio físico. Embora fosse importante avaliar outras ferramentas de investigação de alta resolução,

particularmente algum método LIF para screening de concentrações e o RCPTu para detecção das heterogeneidades hidrogeológicas, os dados aqui coletados fazem parte de um trabalho real de investigação, como tal, sujeito a limitações operacionais, logísticas e de custos, portanto, para efeito do presente estudo, serão considerados apenas o MIP e o HPT+EC.

3. Modelo Conceitual Original

A área estudo consiste em uma empresa nacional do ramo petroquímico. O histórico das análises ambientais na área indicam a presença majoritária de concentrações de Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, Naftaleno e TPH no solo e na água subterrânea. O hidrocarboneto aromático Benzeno é o composto químico de maior relevância ambiental na área, em função de possuir maior amplitude de distribuição em subsuperfície. A Figura 1 apresenta a localização de todos poços de monitoramento da área, a posição em que foram realizados os ensaios MiHpt e o mapa potenciométrico a partir das informações dos poços de monitoramento. Para facilitar os estudos, a área foi dividida em duas subáreas: A e B.

Figura 1. Planta da área e mapa potenciométrico.

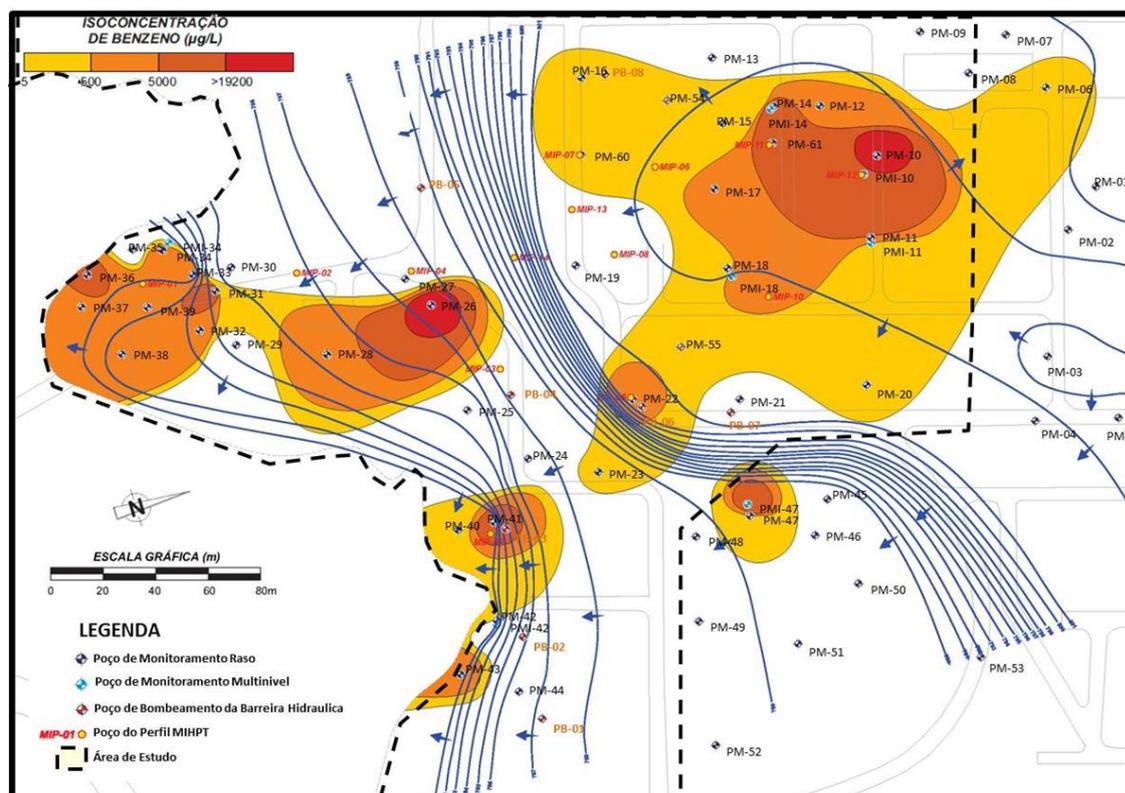


Os resultados obtidos com o MIP foram comparados com os dados de resultados analíticos existentes, referentes às duas últimas campanhas de monitoramento da área, utilizando amostras de água subterrânea coletadas nos poços de monitoramento situados nas áreas A e B. Foram considerados os resultados obtidos para o Benzeno nos três últimos monitoramentos (2012 e 2013). A Figura 2 apresenta o mapa de isoconcentrações de Benzeno de Maio de 2013.

Os dados do HPT foram comparados com descrições tátil-visuais realizadas nas amostras de solo coletadas durante a instalação dos poços de monitoramento e

durante a execução de sondagens SPT². Foram avaliados os perfis construtivos individuais dos poços e as seções geológicas elaboradas a partir dos perfis dos poços.

Figura 2. Isoconcentrações de benzeno na água subterrânea



4. Aspectos Físicos da Área de Estudo

Geologia Local

Através da avaliação dos perfis estratigráficos obtidos através da avaliação de amostras de solo obtidas em sondagens para instalação de poços de monitoramento e sondagens SPT, é possível classificar a área nos seguintes litotipos:

- Aterro, variando de 0 a 10,0 metros;
- Sedimento argiloso orgânico, por vezes arenoso, de ocorrência localizada;
- Sedimento argiloso pouco arenoso a argilo-arenoso, marrom, amarelo, cinza, localmente areno-argiloso;
- Sedimento arenoso de granulação variada, por vezes argilosa e com pedregulhos grossos, amarela, cinza escura, de ocorrência localizada;
- Solo de alteração, desenvolvido sobre o saprólito formado a partir de granitóides. Nestes solos e saprolitos são observadas frações areno-siltosas a argilosas, com areia exibindo granulação fina a média, localmente micácea, com grânulos e veios de quartzo; predomínio de coloração cinza, de consistência geotécnica medianamente compacta a compacta, com até 100 metros de profundidade na área. O pacote é formado por rochas gnáissicas em estágio avançado de alteração, sendo marcado pela presença de manchas e núcleos areno-argilosos a argilo-arenosos, irregularmente dispostos ao longo do perfil vertical.

² SPT – Standard Penetration Test, ou Sondagem de Simples Reconhecimento
InterfacEHS – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade - Vol. 10 no 2 – dezembro de 2015

Hidrogeologia

De acordo com o Serviço Geológico do Brasil (CPRM 2006), no subsolo da área são identificados dois sistemas aquíferos: um de caráter sedimentar, denominado Aquífero São Paulo, constituído por rochas sedimentares da Bacia Terciária de São Paulo; e outro denominado Aquífero Fraturado, que corresponde às rochas cristalinas pré-cambrianas da região (xistos, granitos e gnaisses). A Formação Resende aflora na área monitorada e corresponde à maior parcela deste reservatório subterrâneo. Considerando, regionalmente, ser borda de bacia (contato com o embasamento cristalino), sua espessura saturada varia de 0 a 50 metros (CPRM, 2005), com dados de vazão de exploração máxima de 10 m³/h para estas camadas. No caso do Aquífero Fraturado, as vazões são mais variáveis, dependendo do grau de faturamento da rocha cristalina, com valores entre 3 e 23 m³/h. O padrão geral de fluxo da água subterrânea na área avaliada, no âmbito do presente trabalho, apresenta fluxo de norte para sul, principalmente com a vertente noroeste para sudeste. A avaliação das cargas hidráulicas, dos pares multiníveis instalados na área, indica uma ascendência do fluxo na área A e descendência na área B.

5. Materiais e Métodos

MIP (*Membrane Interface Probe*):

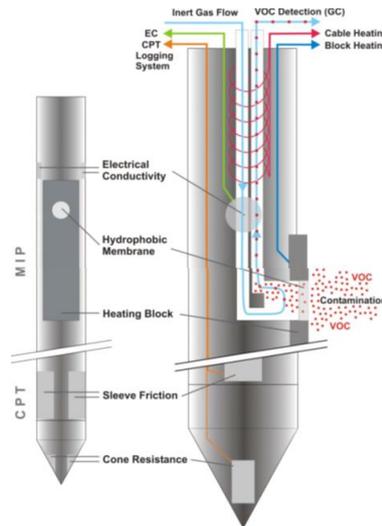
O MIP é uma sonda que possui uma membrana semipermeável que permite a passagem de voláteis através da passagem de um fluxo de gás, ele funciona como um ensaio *in situ*, por meio da cravação de um sensor no solo e obtenção de dados em tempo real sobre a distribuição de compostos orgânicos voláteis (VOC) em subsuperfície (Constanza et al, 2002; Ravella et al., 2007; Howard et al., 2012).

Seu princípio de funcionamento é baseado no aquecimento do meio (solo e/ou água) em uma temperatura entre 100 a 120 °C no entorno de uma membrana polimérica semipermeável, o que permite que a porção volátil dos compostos atravessasse esta membrana. O MIP pode ser usado tanto em solos saturados como insaturados, pois a água não atravessa a membrana. O nitrogênio é utilizado como um veículo inerte que varre toda a região em volta da membrana e transporta os VOCs capturados para os detectores instalados em superfície. O fluxo de gás demora cerca de 60 segundos para percorrer 50 metros do tubo e alcançar os detectores. Segundo Ravella et al (2007) e MacCall et al (2014), o MIP é eficaz na caracterização de zonas vadasas não saturadas e em meios porosos não consolidados, e pode obter até 300 metros verticais de dados em um dia (dependendo das condições geológicas, profundidade de sondagem e horários de trabalho). Isso representa a coleta de dados aproximadamente 300 amostras para análise de VOC num único dia.

Como limitação do MIP, Rossi et al (2014), citam: a mistura de compostos voláteis e semivoláteis (SVOC) influencia os dados transmitidos pela sonda e obtidos em superfície, podendo acarretar em profundidade diferente do pico de altas concentrações; o equipamento não consegue detectar se a concentração obtida está em fase dissolvida, livre, vapor ou retida no solo. Desta forma, há uma incerteza, usando o MIP, sobre o posicionamento vertical da massa de contaminante detectada e sobre a interação dessa massa com o meio físico.

A Figura 3 ilustra o funcionamento dos sensores acoplados na ponteira do MIP.

Figura 3. Representação esquemática da ponteira do MIP.



Fonte: Neuhaus (2008)

O sinal de saída dos detectores é capturado pelo sistema de registo de dados MIP instalado em um computador portátil. Alguns detectores podem trabalhar junto com o MIP, tais como:

- PID: consiste em uma lâmpada ultravioleta (UV) especial, montada em uma célula eletrolítica, termostaticamente controlada, com baixo volume e fluxo contínuo. A temperatura é regulável e varia a partir da temperatura ambiente até 250 °C. A lâmpada UV de 10,2 elétron-volt (eV) emite energia a um comprimento de onda de 120 nanômetros, que é suficiente para ionizar a maioria dos compostos aromáticos, tais como Benzeno, Tolueno, Xileno, além de muitas outras moléculas, tais como Sulfeto de Hidrogênio (H₂S), Hexano e Etanol, cujo potencial de ionização é menor que 10,2 eV. O PID também emite respostas para os compostos clorados que contêm átomos de carbono em ligação dupla, como Tricloroetileno (TCE) e Tetracloroetileno (PCE), substâncias de muito interesse nas investigações de áreas contaminadas. Uma vez que o PID é não destrutivo, é frequentemente executado primeiro dentro de uma série com outros detectores de análises múltiplas com uma única injeção;

- FID: utiliza uma chama para fazer a combustão dos compostos dentro do gás de arraste. Este sensor responde linearmente ao longo de diversas ordens de magnitude de forma bastante estável dia após dia. Ele responde a qualquer molécula com uma ligação Carbono-Hidrogênio e, raramente, para compostos, tais como Tetracloroeto de Carbono ou Amônia. O gás transportador dos compostos na coluna do GC é misturado com Hidrogênio e queimado. Esta combustão ioniza as moléculas de analito. Um eletrodo coletor atrai os íons negativos para o amplificador de elétrons, produzindo um sinal analógico, que é dirigido para o sistema de entrada de dados;

XSD: consiste em uma sonda de cerâmica, um fio de platina (ânodo) e um grânulo de platina (cátodo) montados no interior de um reator de alta temperatura. O XSD é sensível a átomos de halogênios, incluindo Bromo, Cloro e Flúor. O detector do reator queima a amostra em um fluxo de ar e converte compostos orgânicos halogenados em átomos de halogênio. Os átomos de halogênio livres irão então reagir com os átomos de metal alcalino, na superfície do grânulo carregado eletricamente de platina, que funciona como um emissor de elétrons. Quando esta reação acontece, a corrente é medida e transmitida para o sistema de dados;

- Sensor de condutividade elétrica do solo (CE): A condutividade elétrica do solo é medida usando um arranjo dipolo. Neste processo, uma corrente elétrica alternada é transmitida através do solo a partir do centro do sensor da sonda. Esta corrente é

então devolvida ao corpo da sonda. A resposta de tensão da corrente aplicada ao solo é medida através destes mesmos dois pontos. As propriedades elétricas do solo variam de acordo com configuração e a natureza dos materiais geológicos. Por conseguinte, as medições de condutividade elétrica variam tanto em função da granulometria e arranjo textural da camada, como em função da mudança de um tipo de solo para o outro de natureza distinta. Geralmente, em um determinado local, os valores de condutividade inferiores são característicos de partículas maiores, tais como cascalho e areias, enquanto condutividades mais elevadas são características de partículas mais finas, tais como areias finas e argilas, siltes.

A Figura 4 apresenta o equipamento utilizado durante a coleta de dados do presente trabalho.

Figura 4. Ponteira do MIP em preparação para o ensaio.



Segundo Adamson et al (2013), e Rossi et al (2014) o MIP tem como principais limitações a não identificação das principais fases dos contaminantes (retida, dissolvida ou livre) e a dificuldade na relação pico de resposta dos sensores PID/FID/XSD com a profundidade exata, decorrente da interferência entre compostos químicos diferentes, de compostos semi-voláteis e diferença de pressão, fazendo com que o MIP seja considerada uma ferramenta qualitativa, e não quantitativa (Costanza et al 2002; Rossi et al, 2014).

HPT (Hydraulic Profiling Tool):

O sistema HPT funciona injetando um fluido na formação e medindo a relação vazão/pressão de injeção para relacionar esse valor com a condutividade hidráulica (K). O HPT foi desenvolvido com o intuito de criar perfis em alta resolução e em tempo real das propriedades hidráulicas do solo, que podem ser usadas para mensurar a permeabilidade e/ou a condutividade hidráulica do local. Este sistema consiste em um controlador, uma bomba, um cabo de transferência previamente passado nos interior das hastes de sondagem, um transdutor de pressão, uma barreira permeável, e um computador de campo.

O ensaio HPT pode ser realizado simultaneamente com o MIP e registro do EC. À medida que a ferramenta avança, água é bombeada através do cabo para dentro do solo passando através da tela permeável. O escoamento é regulado de modo a ser o mais constante possível. A pressão necessária para injetar um fluxo constante no solo, conhecida como a pressão de HPT, é monitorizada pelo transdutor de pressão e registada no computador de campo, em quilopascal (kPa), em função da profundidade. O fluxo de água dentro da formação do solo, também é medido e registado em mililitros por hora (mL/h), em função da profundidade.

A mensuração da pressão estática (teste de dissipação) pode também ser realizada quando a sonda é paralisada em intervalos discretos, permitindo que o usuário possa determinar o nível d água. O teste de dissipação proporciona uma estimativa do nível do lençol freático, com base na carga hidráulica imposta sobre a sonda em repouso comparada com a pressão medida na superfície antes de cada sondagem. Ensaios de dissipação são melhores executados em materiais com granulometria mais grossa (areia e cascalho), pois asseguraram que a pressão hidrostática ambiente local é medida de forma rápida e precisa. O teste de dissipação através da utilização do software especializado torna possível a estimativa do K (condutividade hidráulica).

Como limitações da ferramenta HPT estão, principalmente, a necessidade de uma injeção de fluidos na formação, o que pode, por si só, modificar as condições hidrogeoquímicas do meio e criar caminhos preferenciais de fluxo; e o uso de um software padrão apra todas as formações correlacionando a pressão e vazão obtidas no ensaio HPT com a condutividade hidráulica, sem levar em conta as variações das formações ensaiadas.

Métodos

Para a realização do trabalho foi utilizada uma sonda MiHpt pertencente a empresa Columbia Technologies/EUA, com apoio da empresa de perfuração Aragon Sondagens Ltda. No total, foram realizados 14 pontos de sondagem para investigação do solo. A sonda MiHpt foi desenvolvido por Sistemas GeoProbe®.

Durante a penetração do equipamento da Aragon no solo, através do sistema de cravação contínua (*direct push*), são realizadas medições em tempo real, através dos sensores PID, FID e XSD, montados em cromatógrafo gasoso de qualidade laboratorial SRI8610C (GC). Estas medições são efetuadas em tempo real com o avanço da sonda. Para cada uma destas medições são realizadas ainda análises da condutividade hidráulica qualitativa através do HPT.

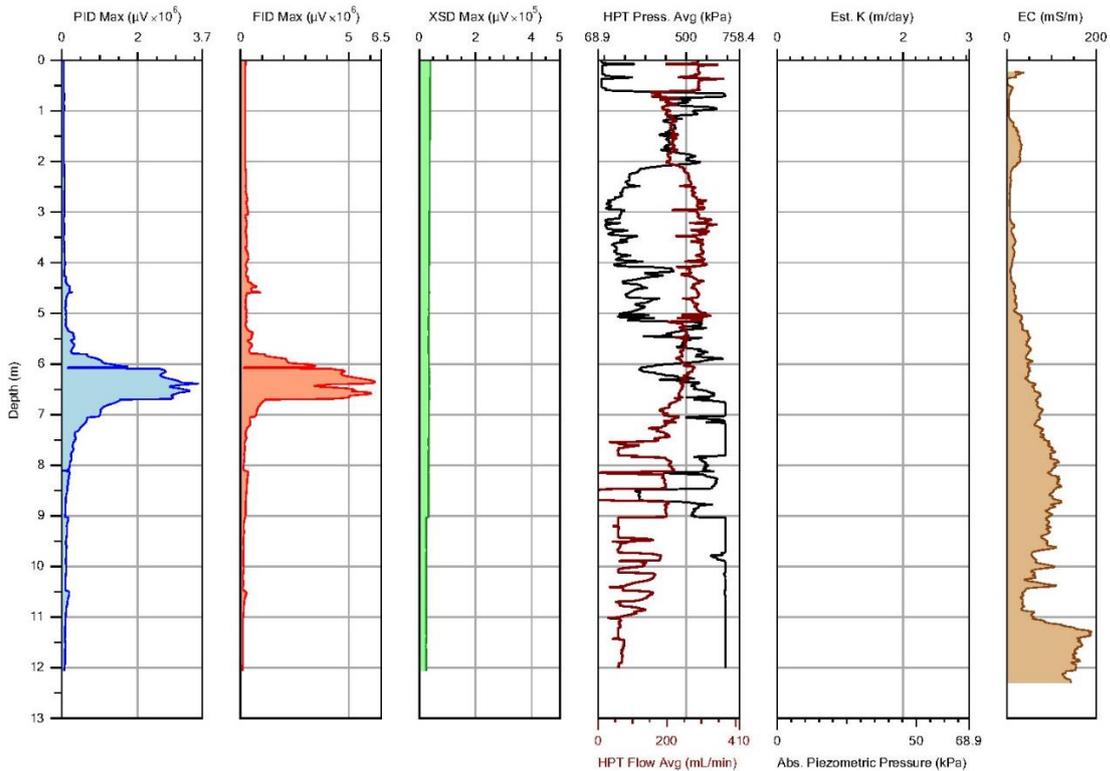
6. Resultados

Foram realizados 14 ensaios MiHpt, que permitiram ao refinamento do modelo conceitual, através da correlação entre os dados obtidos do meio físico (CE e HPT) com os dados de concentração (MIP). Serão apresentados os resultados dos ensaios MIP-01 e MIP-12 como exemplos.

MIP-01

Este ponto esta localizado na área B, próximo do PM-39, teve uma resposta significativa no valor do PID e FID, no intervalo entre 6 a 7 metros, com características típicas de Benzeno. Abaixo deste intervalo, até a profundidade máxima de 12 m, não foi detectada a presença de outras anomalias e os resultados de XSD não detectaram concentrações. A Figura 5 ilustra o perfil do MIP-01.

Figura 5. Perfil do ensaio MiHpt: MIP-01.



Os resultados do HPT indicaram alto fluxo entre 2 a 5 m, posterior camada de médio fluxo até 9,0 m, quando foi detectada uma camada com baixo fluxo e condutividade elétrica alta, possivelmente associadas a uma camada compacta com a presença de argila. Os dados do HPT não possuem correlação com os resultados de EC, indicando que a condutividade elétrica sozinha, nesse ponto, não é um dado adequado para a determinação do perfil hidroestratigráfico.

A Tabela 1 apresenta os resultados analíticos do poço de monitoramento próximo deste ponto.

Tabela 1. Resultados analíticos do poço de monitoramento próximo ao local do ensaio MIP-01.

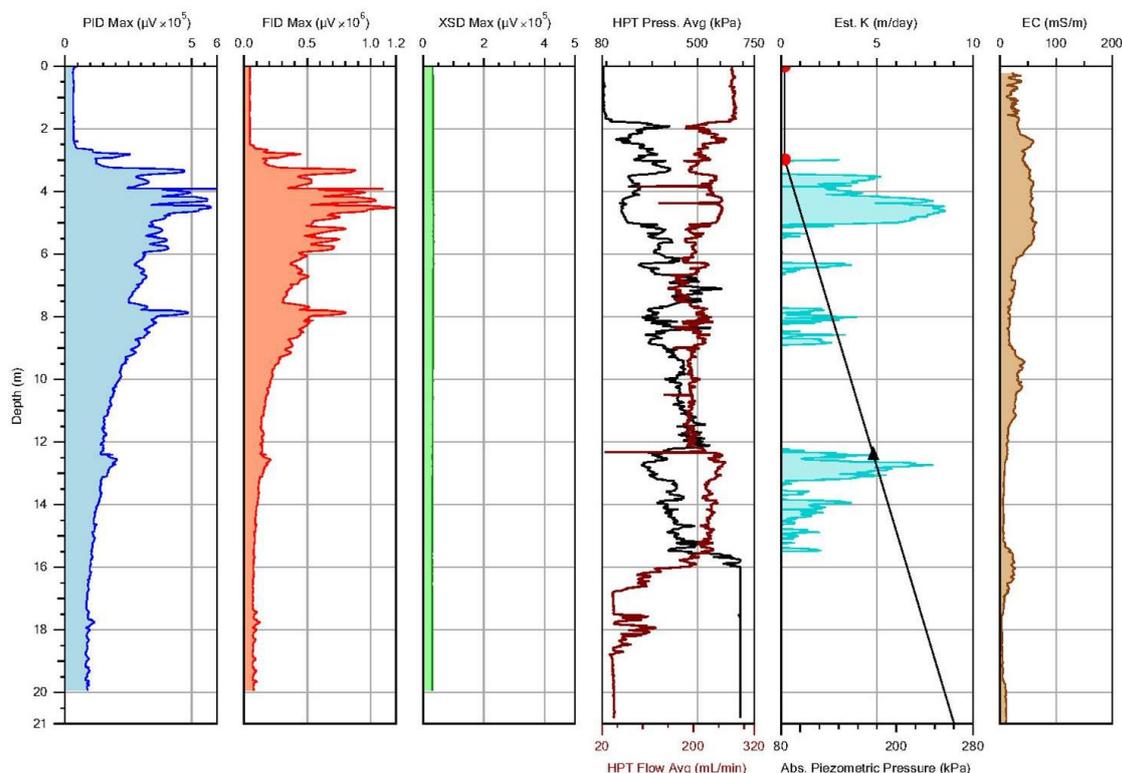
Parâmetros (µg/L)	MIP-01		Padrões Ambientais (µg/L)		
	PM-501/39 (prof. 6,8m)		CETESB	DRF	EPA RSL
	out/12	mai/13			
Benzeno	16522	5434	5	30	0,39
Tolueno	5951	1278	700	1000	2300
Etilbenzeno	1151	1129	300	150	1,5
Xilenos Totais	2397,6	1351,6	500	70	200
TPH Total	2926,6	1299,8	-	600	-
Naftaleno	43	5434	140	70	1,40E-01

MIP-12

Este ponto está localizado no interior da unidade produtiva da Área A, próximo do centro de massa delimitado pelos poços de monitoramento PM-10 e PMI-10.1 e PMI-10.2. Os resultados do MIP indicaram concentrações mais elevadas de PID e FID entre 3 a 9 m, que diminuíram gradualmente até a profundidade de 11 m. A maior parte destes compostos orgânicos se concentra no horizonte de maior condutividade

hidráulica, situado entre os 3 e 5 m de profundidade. A Figura 6 ilustra o perfil do MIP-12.

Figura 6. Perfil do ensaio MiHpt: MIP-12.



Os resultados do HPT indicaram a intercalação de camadas de médio a alto fluxo, desde o início do perfil até a profundidade de 16 metros, sendo que as maiores condutividades são observadas na porção superior do perfil, no horizonte observado entre 3 e 5 m. Todo este pacote pode estar associado a um saprolito de natureza heterogênea e composição mais arenosa. Devido as concentrações de compostos orgânicos obtidas no poço com seção filtrante mais profunda, o PMI-10.1 (6,9m), recomenda-se a instalação de mais um poço com seção filtrante entre as profundidades de 12 a 16 metros (na região dos poços PM-10, PMI-10.1 e PMI-10.2). Mais uma vez não se observa correlação dos dados de EC com os dados do HPT. A Tabela 2 apresenta os resultados analíticos do poço de monitoramento próximo deste ponto.

Tabela 2. Resultados analíticos do poço de monitoramento próximo ao local do ensaio MIP-12.

Parâmetros (µg/L)	MIP-12						Padrões Ambientais (µg/L)		
	PMI-10.1 (prof. 6,9 m)			PMI-10.2 (prof. 3,0 m)			CETESB	DRF	EPA RSL
	Abr/12	Out/12	Mai/13	Abr/12	Out/12	Mai/13			
Benzeno	276	5231	141,4	11187	14768	6176	5	30	0,39
Tolueno	6,44	163,1	< L.Q	5305	6609	2741	700	1000	2300
Etilbenzeno	< L.Q	110,3	9,652	817	988,5	291,6	300	150	1,5
Xilenos Totais	22,3	426,5	18,57	2992	2215,9	1851,4	500	70	200
TPH Total	1924,2	2756,5	1910,1	7981,5	15214,1	12787,6	-	600	-
Naftaleno	659,8	108,2	2,05	3280,6	388,3	3172,8	140	70	1,40E-01

7. Discussão: Refinamento do Modelo Conceitual

Hidroestratigrafia

De acordo com os resultados do HPT, foram realizados refinamentos nas camadas geológicas identificadas nas etapas anteriores, sendo determinadas quatro principais litotipos que ocorrem no subsolo da unidade, são descritas a seguir:

- Aterro argilo-arenoso de cor variegada, consiste em uma camada superficial, com espessura de até 5 metros, onde se dá o fluxo mais superficial. Os resultados do HPT apontaram Condutividade Hidráulica (K) máxima estimada de 8 a 10 m/dia. Estes valores de K mais elevados estão associados a horizontes mais arenosos e com menor teor de argila, que representam camadas de alto fluxo. Este pacote apresenta menor expressão nas áreas mais baixas (ÁREA B) e, geralmente, espessura maior nas zonas com cotas superiores. Possivelmente consiste no horizonte onde se deu o corte e aterro, por ocasião da terraplanagem da fábrica;

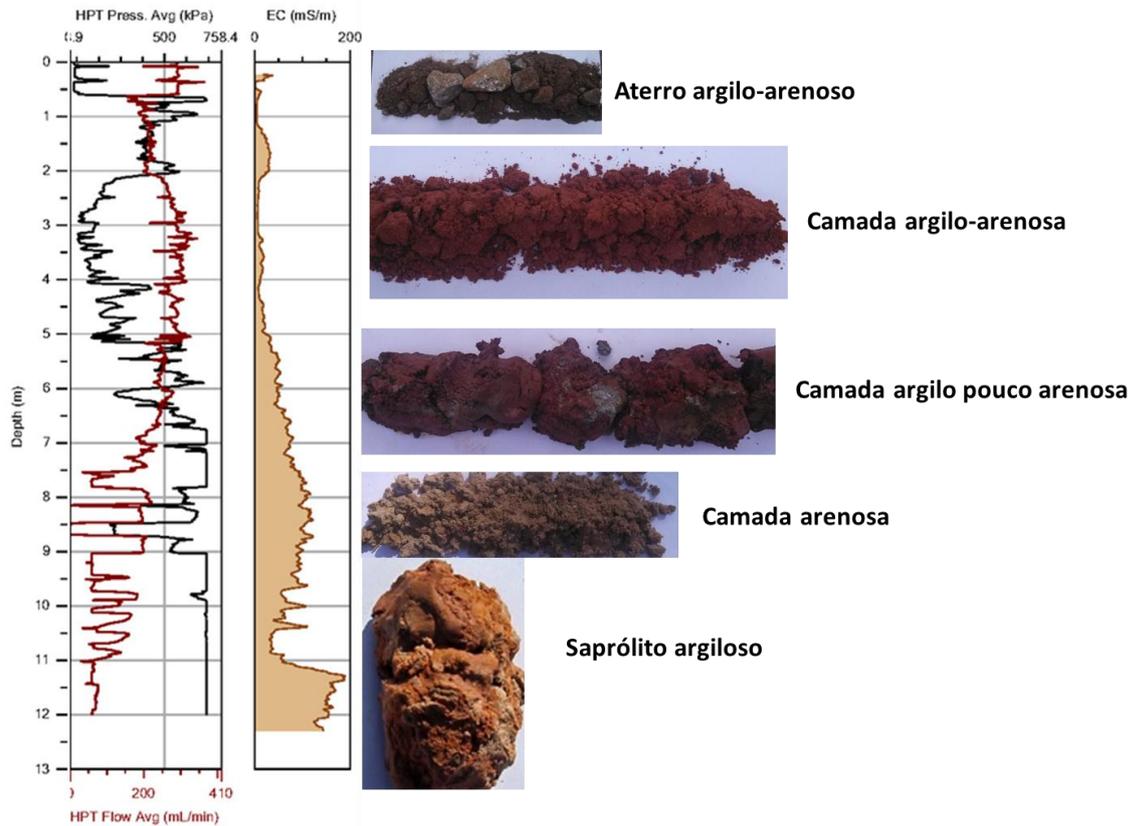
- Pacote Sedimentar formado por argila siltosa, por vezes silte argiloso e, localmente arenoso, está também associado ao aquífero superficial. Nas seções analisadas, esta camada apresentou espessura de até 10 metros, com intercalações de camadas de argila orgânica e camadas arenosas (incluindo camadas de areia média a grossa). Os dados do HPT apontaram que na camada que apresenta médio a alto fluxo, os resultados de condutividade hidráulica máxima apresentaram-se em média 5 m/dia, cabendo ressaltar que, em algumas intercalações mais arenosas, onde o fluxo é maior, foram estimados valores de até 13 m/dia, Estes horizontes arenosos e de maior fluxo de água podem representar paleocanais fluviais, característicos dos pacotes sedimentares da bacia de São Paulo e que acabam por representar caminhos preferenciais para os compostos orgânicos no aquífero;

- Camada de saprólito argiloso a argilo-siltoso, com estrutura compacta e cor cinza predominante, ocorre em profundidades que variam de 4 a 18 metros. Apresenta alto valor de pressão nos resultados do HPT, geralmente com a condutividade elétrica do solo superior a 70 mS/m. Os dados sugerem que trata-se de uma camada de baixo fluxo ou fluxo inexistente. Esta característica acaba por fazer desta camada um horizonte selante, capaz de impedir a eventual migração de compostos orgânicos no aquífero;

- Camada de saprólito areno-siltoso a arenoso, com areia fina a grossa, com estrutura compacta e presença de fragmentos de rocha, apresenta coloração variegada, mas com predominância amarelada. Ocorre intercalada com a camada saprolítica mais argilosa, sendo encontrada desde profundidades subsuperficiais até mais de 20 metros. Os resultados do HPT apresentaram alta pressão e baixo fluxo, ou mesmo ausência de fluxo, com resultados inferiores a 40 mS/m para a condutividade elétrica do solo. O valor estimado para a CE permitiu a diferenciação desta camada, para a camada de saprólito argiloso a argilo-siltoso. A provável ausência de fluxo, identificada para esta camada, pode impedir a migração de eventuais compostos orgânicos presentes no aquífero;

A Figura 7 apresenta uma comparação dos resultados de HPT obtidos no ensaio MIP-01 com descrição da sondagem realizada para este ponto.

Figura 7. Comparação das amostras de solo com o Perfil do ensaio MiHpt: MIP-01.



Com base nas interpretações acima foram elaboradas cinco seções hidroestratigráficas cuja localização em planta é apresentada na Figura 8 e foram intituladas de A-A', B-B', C-C', D-D' e E-E'. A seção C-C' está apresentada na Figura 9.

Figura 8. Planta com as seções hidroestratigráficas.

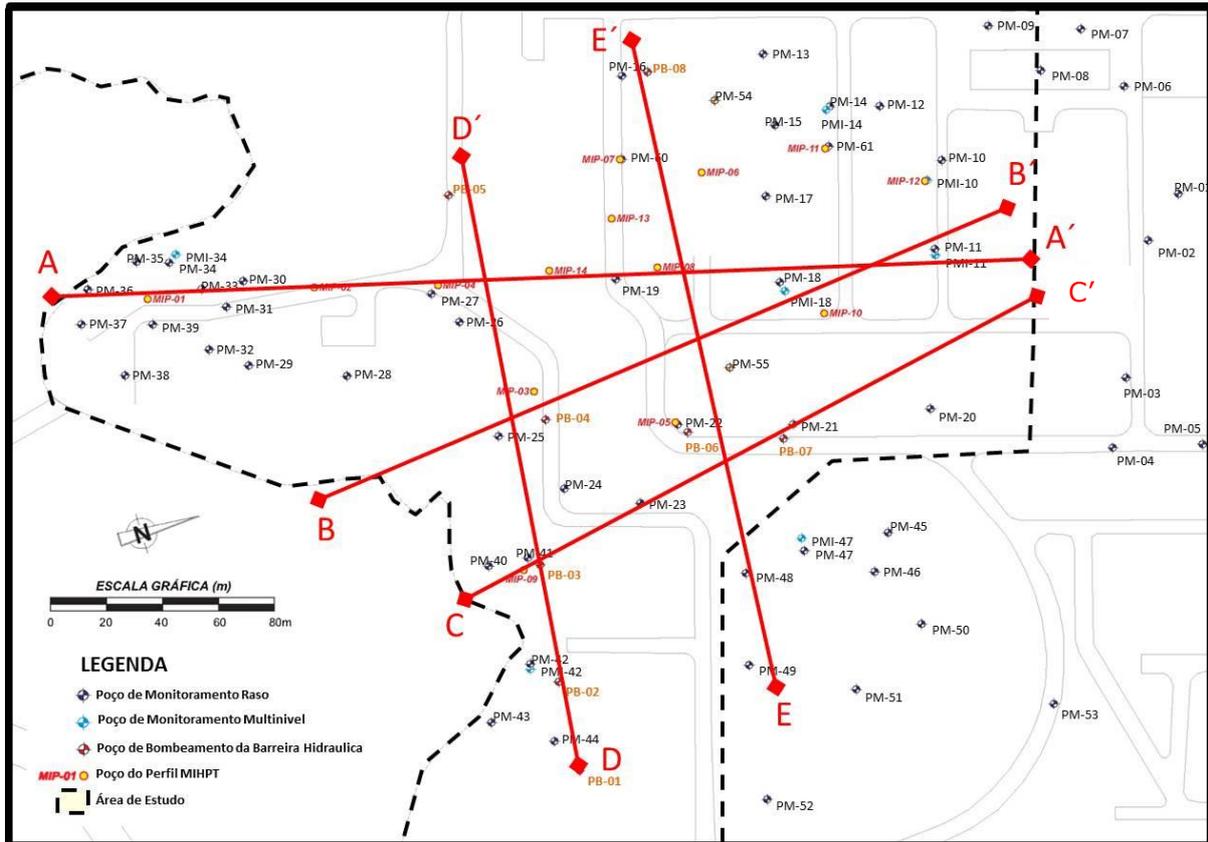
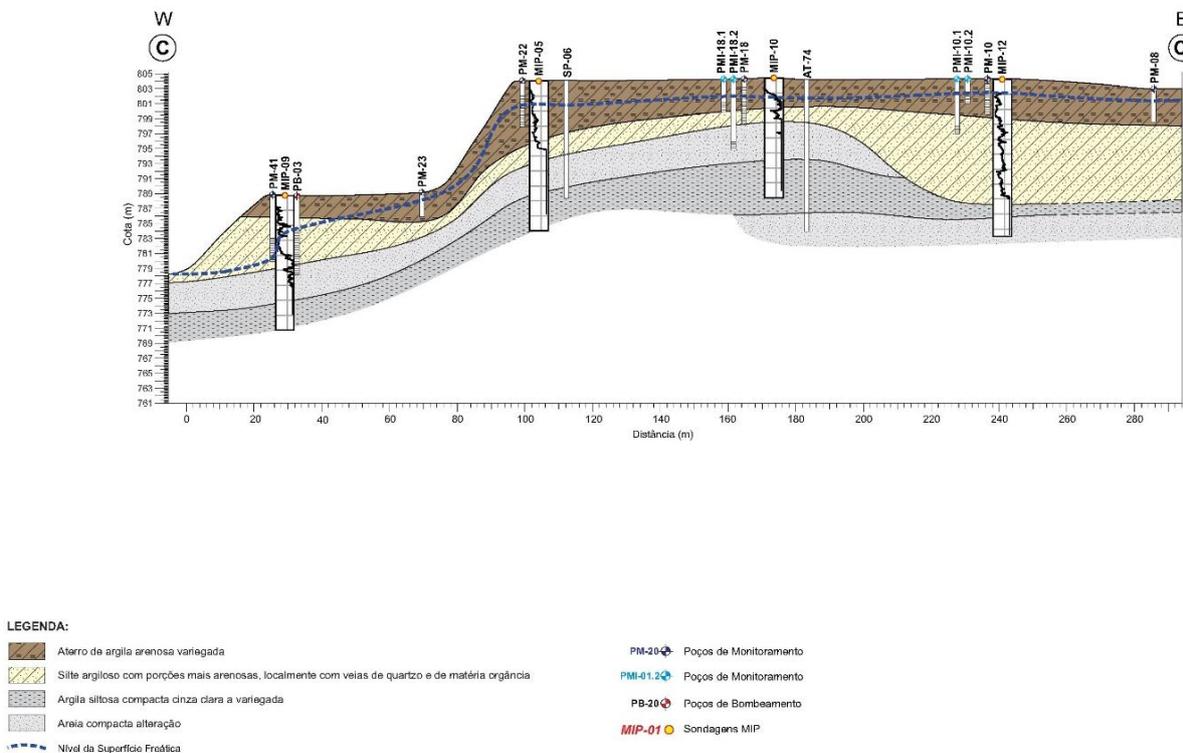


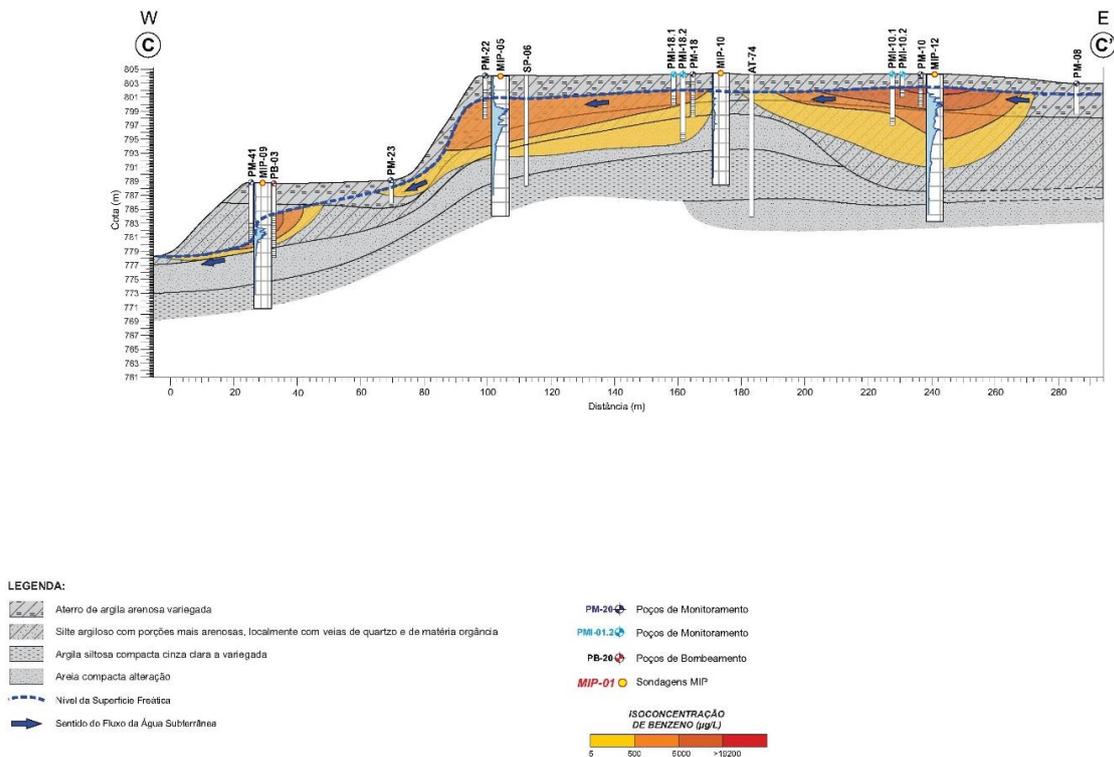
Figura 9. Seção hidroestratigráfica C-C'.



Delimitação Horizontal e Vertical das Plumas de Hidrocarbonetos

Nas áreas investigadas são observados cinco principais focos de compostos orgânicos. Diante disto, os pontos do MiHpt foram distribuídos com base na localização dos centros de massa e com objetivo de refinar o modelo conceitual, quanto à delimitação vertical e horizontal das plumas. A Figura 10 apresenta o modelo conceitual da seção C-C' elaborado com base nas seções estratigráficas.

Figura 10. Modelo Conceitual da contaminação da seção C-C'.



Tomando-se como exemplo apenas a seção C-C', os ensaios MiHpt apontaram os seguintes resultados nos centros de massa:

Área dos Fornos II: O Centro de massa engloba os poços que compõem o par multinível 18: PM-18 e PMI-18, mesmo local onde foi realizado o ensaio MiHpt MIP-10, cujo modelo conceitual foi representado na Figura 10 (seção C-C'). De acordo com os resultados analíticos da campanha de amostragem, foram verificadas concentrações de Benzeno, variando de 735,9 µg/L, na seção filtrante mais superficial (3 a 4m), para 414,8 µg/L (3 a 6m) e, finalmente, de 25,83 µg/L na porção mais inferior (8 a 9m). O ponto MIP-10 foi posicionado próximo destes poços, porém, a montante, não apresentando indícios da presença de compostos orgânicos no aquífero, segmentado a pluma de hidrocarbonetos diagnosticada nesta área. Os resultados de HPT indicaram que nesta região ocorrem camadas de baixo fluxo, que devem estar retardando o fluxo subterrâneo e impedindo a conexão com a pluma a montante. A correlação dos dados do MIP com resultados anteriores de uma sondagem SPT ali realizada no passado, indicam a presença de um horizonte inferior, de natureza arenosa e saturado, com até 9 m de profundidade onde ocorrem compostos orgânicos. Estima-se que estes compostos orgânicos ficam restritos nessa camada inferior, sendo impedidos de migrar outras porções do aquífero, devido à presença da camada sotoposta de saprólito argiloso de baixo fluxo, com profundidade de 9 a 10 m. Os dados demonstraram ainda a conexão com a pluma da área do PM-22.

A jusante da área produtiva, com centro de massa no PM-22 (correspondente ao ensaio MiHpt MIP-05): De acordo com os resultados analíticos do PM-22 foram obtidas concentrações de Benzeno de 1.041 µg/L na água subterrânea. A seção filtrante do poço está posicionada entre 5 e 6 m. Neste ponto ocorrem ainda concentrações acima dos limites de intervenção para Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos. Deste modo, o ponto MIP-05 foi realizado bem próximo ao PM-22 e, com base nos seus resultados, estima-se que os maiores teores de compostos orgânicos (superior a 500 µg/L de Benzeno) no aquífero estejam concentradas no intervalo entre 4 a 9,5 metros, caindo gradualmente até os 12 m de profundidade. A partir deste nível não há evidências da presença de compostos orgânicos no subsolo, sugerindo que a pluma de hidrocarbonetos está limitada até esta profundidade. Foi também observado evidências de uma camada com poucos indícios da presença de fluxo, porém sem qualquer indicação da presença de hidrocarbonetos, corroborando com a delimitação vertical da pluma diagnosticada no horizonte superior. As concentrações obtidas no PM-23 indicam que este poço deve estar no limite horizontal da pluma, não havendo interligação com a pluma a jusante, identificada no Separador API. A evidência detectada pelo MIP da presença de contaminação entre 9,50 m e 12,0 m em uma zona de armazenamento pode ser um indicativo que essa massa está em fase retida ou residual, não em fase dissolvida, que seria esperado em uma zona de fluxo. Essa eventual massa retida precisa ser confirmada com amostragem discreta de solo e, caso seja confirmada, pode ser uma região propensa à retroalimentação da pluma dissolvida por difusão.

Separador API: centro de massa a jusante do API, representada pelo poço de monitoramento PM-41 (correspondente ao ensaio MiHpt MIP-09). Apesar de terem sido observadas concentrações elevadas no poço PM-41 (5.438 µg/L de Benzeno), os dados obtidos com o MIP-09 indicam que os maiores teores de compostos orgânicos estão concentrados ao intervalo de 6 a 9 m de profundidade, onde foram verificadas as melhores condições de fluxo subterrâneo, com K de até 9 m/dia. Entre os 9 e os 14 m de profundidade foi observada a presença de uma camada pouco condutiva (baixo fluxo), provavelmente formada por uma camada de saprólito arenoso, que funciona como um aquitarde. Abaixo deste horizonte registra-se a presença de uma camada muito compacta, possivelmente argilosa, onde, aparentemente, não é observado fluxo.

8. Conclusões

A avaliação complementar das subáreas A e B foi realizada através das interpretações de 14 pontos de ensaios MiHpt e correlação dos resultados dos ensaios com os resultados analíticos obtidos para a água subterrânea amostrada nos poços de monitoramento existentes nestas áreas e com as descrições tátil-visuais das amostragens de solo em sondagens realizadas anteriormente.

A investigação teve como objetivos principais a atualização do modelo conceitual, descrevendo de forma mais assertiva as informações do meio físico, as características das plumas (geometria tridimensional dessas plumas), a existência de diferentes aquíferos e a delimitação vertical e horizontal das plumas de compostos detectados no aquífero mais superficial. Desta forma os pontos dos ensaios MiHpt foram posicionados para avaliar a relação entre as principais plumas identificadas nas Áreas A e B.

A comparação entre os resultados indicou que, na porção produtiva da Área A existem quatro principais centros de massa, sendo dois deles relacionados com a área dos fornos e outros dois relacionados com a área dos compressores e trocadores de calor.

Na área dos fornos, os dois focos ali encontrados indicam que a pluma se estende verticalmente entre as profundidades de 2,5 a 8,0 m, no primeiro, e de 2,5 a 5,0 m no outro foco. No primeiro foco foi verificado que o impacto não avançou verticalmente devido à presença de uma camada selante de baixa permeabilidade. Na área dos compressores e trocadores de calor, foram verificadas as maiores concentrações de

compostos orgânicos na água subterrânea. Em um dos focos identificados nesta área, constatou-se que a pluma de hidrocarbonetos se concentra verticalmente em um intervalo entre 3 e 14 m de profundidade. No outro foco a pluma de compostos orgânicos está restrita verticalmente ao intervalo de 2,5 a 8,0 m de profundidade. Em ambos os casos foram verificadas intercalações de camadas de baixo, médio e alto fluxo, que podem corroborar com a existência de aquífero multicamadas na área, podendo apresentar paleocanais fluviais. Outra hipótese é que o MIP identificou uma massa de contaminante que pode ser uma pluma dissolvida, pluma retida/residual no solo, ou ambos. A confirmação dessa hipótese se daria ao coletar amostras discretas de solo (nas camadas de baixo fluxo) e de água subterrânea (nas camadas de alto fluxo).

Ainda na subárea A, a jusante da área produtiva, foram observados outros dois focos, sendo um deles próximo ao PM-22 e outro a jusante do Separador API. No primeiro caso as evidências indicam que a pluma de hidrocarbonetos está limitada verticalmente entre as profundidades de 4,0 e 9,5 m e registra-se a presença de uma camada selante de baixo fluxo a partir dos 14 m. No segundo, caso a pluma está restrita verticalmente ao intervalo entre 6,0 e 9,0 m, sendo delimitada pela presença de uma camada de baixo fluxo que deve ter retardado a sua migração para horizontes inferiores.

Na subárea B, foram investigados dois centros de massa (intitulados de B1 e B2). No centro de massa B1, a pluma de hidrocarbonetos se concentra verticalmente entre as profundidades de 4,5 e 6,0 m, reduzindo gradativamente as concentrações até os 10 m. No segundo foco (B2), a pluma se estende verticalmente no intervalo entre 6,0 a 8,0 m, sendo condicionada pela presença sotoposta de uma camada de baixo fluxo. Em ambos os casos, na parte basal do perfil é encontrada uma camada de argila compacta cinza de baixo fluxo.

A investigação realizada entre as subáreas A e B não indicaram a conexão entre as plumas de hidrocarbonetos diagnosticadas nestas áreas, excluindo a possibilidade de uma interligação entre as mesmas.

Os compostos detectados na área possuem características de se acumularem em maior quantidade na porção superior do aquífero, pois são menos densos que a água, e isto se comprova com os resultados do MIP, que indicaram que a área mais impactada está no nível mais superficial do aquífero raso e que ocorrem camadas selantes de baixo fluxo, que impedem a migração vertical dos compostos orgânicos no subsolo.

Através dos resultados obtidos nos ensaios MiHpt, foi realizada uma atualização do Modelo Matemático que permitiu com maior assertividade a determinação da espessura das diferentes camadas com diferentes condutividades, permitindo assim um Modelo Matemático mais conclusivo.

Desta forma de acordo com os resultados obtidos é possível afirmar que os dados obtidos com a ferramenta de alta resolução MiHpt foram determinantes para um refinamento conclusivo do Modelo Conceitual, permitindo fornecer informações determinantes principalmente quanto a:

- Geologia Local, determinação de espessura de camadas e determinação dos litotipo;
- Hidrogeologia Local, determinação de diferentes níveis do aquífero e condutividades hidráulicas;
- Delimitação Vertical e Horizontal das plumas.

Com base nos dados obtidos é possível verificar que neste estudo de caso, a ferramenta de alta resolução permitiu um avanço significativo no entendimento do modelo conceitual, permitindo a redução da necessidade de eventuais futuras investigações convencionais, e permitindo a visibilidade de um cenário para próximas etapas de remediação.

Avaliando as ferramentas de alta resolução, pode-se verificar que os estudos de Costanza (2002), Adamson (2014), e Rossi et al (2014) sobre o MIP são importantes, pois, embora apresente resultados qualitativos de concentração de VOC próximos dos resultados quantitativos obtidos nos poços de monitoramento quando observados no contexto de pouco detalhe (os poços de monitoramento possuem seções filtrantes de 1-3 metros), ainda há incertezas na posição vertical da massa de contaminação e também da interação desse contaminante com o meio físico. Essas incertezas indicam que o MIP é uma excelente ferramenta de investigação inicial, mas que o diagnóstico da área não pode prescindir de amostragens discretas de água subterrânea e solo nas camadas significativas.

Quanto ao HPT, esse se mostrou uma ferramenta que pode ser corroborada com a descrição tátil-visual das amostras de solo, portanto, é um bom indicador qualitativo para as zonas de fluxo e armazenamento, mas ainda é preciso comparar essa ferramenta com outras que fazem essa determinação do perfil hidroestratigráfico, como RCPTu, ou mesmo ensaios hidrogeológicos pontuais (slug tests pneumáticos, ensaios de infiltração ou dissipação de poro pressão) para verificar a correlação desses com os valores de K estimados pelo software do equipamento.

O sensor de EC não se mostrou, nesse estudo de caso, apropriado para determinação do perfil hidroestratigráfico em alta resolução, pois seus resultados não são corroborados pelas descrições das amostras de solo nem pelos resultados do HPT.

Referências

Adamson, D. T., Chapman, S., Mahler, N., Newell, C., Parker, B., Pitkin, S., Rossi, M.; Singletary, M. **Membrane Interface Probe Protocol for Contaminants in Low-Permeability Zones**. *Groundwater*, 52: 550–565. doi: 10.1111/gwat.12085. 2014

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Modelo conceitual no gerenciamento de áreas contaminadas – Procedimento: NBR 16210**. Rio de Janeiro: ABNT 2013.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. 2º edição**. São Paulo: 2001. 389 p.

_____. **Relação de Áreas Contaminadas – Dezembro/2013**. São Paulo: 2013. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/areas-contaminadas/2013/texto-explicativo.pdf>

Costanza, J., K.D. Pennell, J. Rossabi, B. Riha, **Effect of temperature and pressure on the MIP sample collection process**, Anais da Conferência: Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds - 2002, Paper 1F-08. Monterey, CA. 2002

CRUMLING, Deana M. **Summary of the triad approach. U.S. Environmental Agency, Estados Unidos da América**, 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.

ENVIRONMENTAL AGENCY. **Guide to good practice for the development of conceptual models and the selection and application of mathematical models of contaminant transport processes in the subsurface**. Reino Unido: 2005. 121 p. Acesso em: 14/10/2014.

HOWARD, Zachary N; CHO, Jung Hwan; KURUP, Pradeep. **Electronic Nose Combined with Membrane Interface Probe for Detection of VOCs in** *InterfacEHS – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade - Vol. 10 no 2 – dezembro de 2015*

Water. In: GeoCongress, 2012, Oakland. Anais GeoCongress 2012 ASCE. p. 3382-3389.

McCall, W., Christy, T. M., Pipp, D., Terkelsen, M., Christensen, A., Weber, K.; Engelsen, P. **Field Application of the Combined Membrane-Interface Probe and Hydraulic Profiling Tool (MiHpt).** Groundwater Monitoring & Remediation, 34: 85–95. doi: 10.1111/gwmmr.12051. 2014

NEUHAUS, Michael. **In-situ characterization of soil and groundwater contamination with MIP- and ROST-CPT.** In: Seminário Internacional sobre Remediação e Revitalização de Áreas Contaminadas, 6, 2008, São Paulo. Disponível em: www.ekosbrasil.org/anexos/seminario2008/michael_FUGRO.pdf. Acesso em 03/11/2014.

RAVELLA, Michael; FIACCO, R. Joseph JR; FRAZIER, Jeffrey; WANTY, Duane; BURKHARDT, Louis. **Application of the membrane interface probe (MIP) to delineate subsurface DNAPL contamination.** Environmental Engineer: Applied Research and Practice, Maryland, Winter 2007 Edition, v. 1.

RIYIS, Marcos Tanaka. **Investigação geoambiental com tomada de decisão em campo utilizando o piezocone de resistividade como ferramenta de alta resolução.** 2012. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2012.

RIYIS, Marcos Tanaka; GIACHETI, Luiz Heraldo; DERRITE, Rafael Muraro; RIYIS, Mauro Tanaka. **Investigação geoambiental de áreas contaminadas com elaboração do modelo conceitual em campo utilizando ferramentas de alta resolução (HRSC).** In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 14., 2013, Rio de Janeiro.

ROSSI, M.; PITKIN, S; JORDAN, M. **Appropriate use and limitations of MIP in HRSC.** Apresentação na Ninth International Conference on Remediation of Recalcitrant Compounds – Battelle. Monterey, CA. 2014. Disponível em http://www.stone-env.com/profiling/Appropriate_Use_and_Limitations_of_MIP_in_HRSC.pdf

SÃO PAULO. **Decreto Nº 59.263, de 05 de Junho de 2013. Regulamenta a Lei nº 13.577, de 08 de julho de 2009.** São Paulo. 2013. Legislação Estadual.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Mapa Geológico do Estado de São Paulo, Escala 1:750.000.** 2006

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM), DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE), INSTITUTO GEOLÓGICO (IG), INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo: escala 1:1.000.000,** nota explicativa / [coordenação geral Gerôncio Rocha]. - São Paulo: 2005.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Best Management Practices: Use of Systematic Project Planning Under a Triad Approach for Site Assessment and Cleanup** (EPA-542-F-10-010). Estados Unidos da América: 2010. 18 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **High Resolution Site Characterization.** Contaminated Site Clean-Up Information (Clu-In). Estados Unidos da América: 2013. Disponível em <https://clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/>

Recebido em 26/03/2015 e Aceito em 14/10/2015.