

Avaliação das falhas no modelo conceitual de uma área contaminada utilizando investigação com métodos convencionais

Conceptual Site Model (CSM) fails evaluation with conventional site characterization approach

Marcos Tanaka Riyis ^(1,2,5), Rafael Muraro Derrite ^(3, 5), Edegar Yoshio Hirai ^(1, 4), Elias Manoel de Brito Lima ^(1, 4), Julia do Amaral Ceolin ⁽¹⁾, Lucas Scarpanti de Jesus ^(4,5)

¹ Centro Universitário SENAC

² ECD Sondagens Ambientais Ltda

³ Stricto Soluções Ambientais Ltda

⁴ Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB

⁵ Universidade Estadual Paulista – UNESP, Instituto de Ciência e Tecnologia, Campus de Sorocaba.

{marcos@ecdambiental.com.br, rafael@strictoambiental.com.br, edegarh@gmail.com, eliasmbl@gmail.com, julia@ceol.in}

Resumo. *O presente trabalho tem o objetivo de avaliar as principais falhas na elaboração do Modelo Conceitual (MCA) de uma área contaminada por hidrocarbonetos de petróleo através do uso de abordagem e ferramentas de investigação de tradicionais. O estudo mostra a evolução dos trabalhos, onde três empresas utilizaram métodos e ferramentas inadequados e não conseguiram estabelecer um MCA que fizesse um diagnóstico da área. Em valores reajustados, o responsável legal, com as três empresas de consultoria, gastou mais de 750 mil reais, a partir da instalação de mais 60 poços, duas remediações e outras atividades, sem conseguir resultados que permitissem um adequado gerenciamento da área. O estudo comprova a necessidade de utilizar abordagem e ferramentas de investigação adequadas, em alta resolução, para que a intervenção na área seja eficiente.*

Palavras-chave: áreas contaminadas, investigação de alta resolução, hidrocarbonetos, remediação.

Abstract. *This article has, as its main objective, evaluate the major Conceptual Site Model (CSM) mistakes in a petroleum hydrocarbon contaminated gas station. The site investigation was performed using conventional approach and tools, as large screen monitoring wells. The study shows the CSM evolution built by three different consultant companies that were not able to do a suitable site investigation. The site investigation and remediation works cost R\$ 750.000 to site owner, without any suitable result, even with 66 monitoring wells installed and two remediation systems (pump and treat and multi-phase extraction) operating in 3 years. This work shows that it is necessary a good site investigation approach, using high-resolution site characterization, to build a CSM with low uncertainties that provide a good remediation project.*

Key words: *conceptual site model, site assessment, high-resolution site characterization, remediation, hydrocarbons.*

InterfacEHS – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade
Vol. 12 no 1 – junho de 2017, São Paulo: Centro Universitário Senac
ISSN 1980-0894

© 2015 todos os direitos reservados - reprodução total ou parcial permitida, desde que citada a fonte

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-Sem Derivações 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) 

1. Introdução

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) é o órgão responsável pelo licenciamento ambiental dos postos de combustíveis do estado de São Paulo, de acordo com a resolução CONAMA 273/2000. Em 2001, a CETESB estabeleceu, a partir da Resolução SMA-05, que todos os postos de combustíveis, para serem licenciados, deveriam realizar uma investigação de seu passivo ambiental. Caso seja encontrado, o passivo deverá passar pelas etapas do Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC), através de normas e procedimentos específicos que foram se sucedendo em SP, como os "Procedimentos para o Licenciamento de Postos e Sistemas Retalhistas de Combustíveis" (CETESB, 2006); a Decisão de Diretoria Nº 103/2007/C/E (CETESB, 2007); a Decisão de Diretoria Nº 263/2009/P (CETESB, 2009), o Manual do Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB, 1999), além de normas técnicas da ABNT e de instrumentos legais, como o Decreto 59.263 (SÃO PAULO, 2013). Todos esses documentos 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.

Porém, em muitos casos (como o que foi avaliado nesse trabalho), as etapas de investigação da área são negligenciadas, seja em função de fatores financeiros, ou por deficiência de planejamento, ou por desconhecimento, causando a elaboração de um diagnóstico inconsistente e com muitas incertezas para a área de estudo (RIYIS, 2012). Em resumo, em grande parte das investigações em postos de combustíveis, muitos dos procedimentos técnicos citados são desrespeitados, em maior ou menor grau.

Mesmo quando seguidos, esses procedimentos não são suficientes para um diagnóstico adequado da área, por permitirem que sejam utilizadas tecnologias, métodos e abordagens inadequadas para que os objetivos principais da investigação: encontrar a contaminação; estimar adequadamente a sua massa e sua interação com o meio físico; e subsidiar uma avaliação de risco, sejam atingidos (RIYIS, 2012; RIYIS et al, 2013). Essa investigação inadequada leva a um diagnóstico com muitas incertezas e, por consequência, tomadas de decisão ineficientes, ou muito demoradas ou com custo muito elevado. Sobre o aspecto econômico, Pitkin et al (2014) fala em uma economia, na etapa de remediação, de 10 vezes o valor investido em uma boa investigação, enquanto Suthersan et al (2015), mostrando diversos casos, estima uma economia de 7 vezes em relação ao valor que foi investido. Neste contexto, a utilização de abordagens e técnicas que possibilitem uma melhor compreensão das heterogeneidades hidrogeológicas (HH) e da interação dos contaminantes com as HH de uma área contaminada são muito relevantes para o sucesso do diagnóstico e, consequentemente, do projeto de remediação ou plano de intervenção (RIYIS et al, 2015; RIYIS et al, 2013; SUTHERSAN et al, 2015; ITRC, 2015).

Um diagnóstico adequado leva a um entendimento da interação meio físico/contaminante e, a esse entendimento, dá-se o nome de Modelo Conceitual da Área (MCA). A NBR 16210 da ABNT (2013) estabelece que toda a complexidade do meio físico deva ser considerada na elaboração do MCA e que o mesmo deve ser revisado e refinado para efetivamente atender sua finalidade.

O Manual de Gerenciamento de Áreas contaminadas da CETESB (CETESB, 1999) também estabelece que as diversas etapas de gerenciamento devem estabelecer um MCA que identifique as fontes primárias e secundárias de contaminação, bem como os mecanismos de transporte de contaminantes, suas vias preferenciais de veiculação e os receptores potencialmente expostos. Além disso, preconiza que, ao final do diagnóstico (no referido documento, ao final da Investigação para Remediação), é fundamental que esse modelo conceitual tenha poucas e gerenciáveis incertezas. No entanto, tradicionalmente os estudos consideram o meio como homogêneo e os aquíferos identificados nos estudos ambientais de postos de combustíveis são comumente descritos como livres, homogêneos e isotrópicos.

Segundo Crumbling (2004) e Riyis (2012), um MCA pode ser definido como uma ferramenta elaborada para um entendimento completo do meio físico, das fontes primárias e secundárias, das vias de exposição e dos possíveis receptores. O meio físico engloba aspectos como rochas, solos, água subterrânea, drenagens superficiais, climas, relevos e o modo como estes atributos interagem entre si e com o contaminante. É um resumo de todas as informações obtidas até o momento sobre a área em estudo, ou uma simplificação da realidade observada na área com a finalidade de fornecer uma visão geral de suas condições e identificar os processos que regem e afetam o transporte dos contaminantes no meio. A função de um modelo conceitual bem elaborado é identificar os locais e as ações que devem ser tomadas nesses locais, para aprimorar o gerenciamento de uma área contaminada, sendo o ponto de partida para investigações e remediações eventualmente necessárias. Por isso deve ser muito bem elaborado e se torna tão importante para os passos subsequentes. Uma investigação incompleta ou insatisfatória acarreta na proposição de um modelo conceitual com premissas inadequadas. Como exemplo, podem ser citados modelos conceituais que definem o meio hidrogeológico e geológico como praticamente homogêneo, o que não representa a realidade (CHERRY, 2009; WELTY, 2012; GUIBEAULT et al (2005); PAYNE et al (2008); SUTHERSAN et al, 2015), prejudicando a eficiência e eficácia das etapas seguintes do projeto.

A investigação ambiental da área e consequente MCA elaborado constitui a etapa mais importante do projeto. Para essa tarefa, devem ser destinados os principais recursos, materiais e humanos, como: equipe de profissionais experientes para a tomada de decisões em campo; e as tecnologias de investigação mais avançadas e adequadas para uma boa caracterização do local de estudo. Para Riyis et al. (2013), Pitkin et al. (2014), Welty (2012), ITRC (2015), Suthersan et al (2015), entre outros, é fundamental que sejam utilizadas não apenas ferramentas de investigação consagradas e obrigatórias, mas também ferramentas de investigação de alta resolução, também chamadas de *High Resolution Site Characterization (HRSC) tools* e que a tomada de decisão ocorra em campo, com a presença de profissionais experientes e não em um escritório, como tradicionalmente ocorre.

Dentre as etapas da construção do MCA, a coleta de dados é a mais crítica, pois carrega mais incertezas pela natureza do trabalho de campo (RIYIS, 2012), portanto, deve-se dar a devida atenção a esse processo. Das variáveis de subsuperfície, as heterogeneidades hidrogeológicas são as mais críticas para o processo de diagnóstico, por possuírem variação medida em ordens de grandeza (CLEARY, 1989; HADLEY & NEWELL, 2012; McGUIRE et al, 2016), variação essa que deve ser adequadamente estudada e priorizada na investigação (PAYNE et al, 2008; QUINNAN et al, 2010; RIYIS et al, 2013).

Para esse adequado diagnóstico, devem ser coletadas amostras de água subterrânea e de solo para a avaliação das concentrações das Substâncias Químicas de Interesse (SQI). Das amostras de solo devem ser obtidas outras informações do solo, tais como: textura, cor, granulometria, porosidade total, porosidade efetiva, densidade, entre outros, além de dados que permitam fornecer informações sobre os processos de fluxo de água subterrânea e transporte de SQI, como gradiente de fluxo horizontal e vertical, condutividade hidráulica, fração de carbono orgânico, entre outras. Mas, de onde coletar essas amostras de solo e água subterrânea? Feenstra et al (1991), Pitkin et al (1999), Payne et al (2008), Guibeault et al (2005), Payne et al (2008), Quinnan et al (2010), Welty (2012), Riyis (2012), Riyis et al (2013), Elis (2013), Riyis (2014), Rossi et al (2014), Suthersan et al (2015), ITRC (2015), Riyis et al (2016), Welty et al (2016), entre outros, indicam que a água subterrânea deve ser coletada nas zonas preferenciais de fluxo (ZF), ou de porosidade móvel, ao passo que, nas zonas de armazenamento (na zona saturada), ou de porosidade imóvel, devem ser coletadas amostras de solo. E como determinar as zonas de fluxo e as zonas de armazenamento? Payne et al (2008), Quinnan et al (2010), Kram et al (2010), Riyis (2012), Riyis et al (2013), Welty et al (2014), Suthersan et al (2015), ITRC (2015), USEPA (2013), Welty et al (2016), Riyis

et al (2016) indicam, dentre as ferramentas mais adequadas para essa determinação, o piezocone (CPTu).

Assim, de acordo com Riyis et al (2016), para uma adequada coleta de dados que permita uma avaliação das heterogeneidades hidrogeológicas, deve-se:

- Coletar amostras de solo, inclusive da zona saturada, fazendo em campo uma varredura vertical qualitativa de SQI (para VOC, Amostragem de Solo de Perfil Completo (ASPC) (ELLIS, 2013); para hidrocarbonetos de petróleo, Caixa Preta de Investigação Geoambiental (RIYIS et al, 2015)), envio de algumas amostras ao laboratório e definição inicial das zonas de fluxo e zonas de armazenamento;

- Fazer ensaios de piezocone de resistividade (RCPTu – CPTu com um sensor a mais de condutividade elétrica (RIYIS, 2012)) com dissipação de poro pressão (PPDT) para a determinação, em escala de detalhe, das zonas de fluxo e zonas de armazenamento, ao mesmo tempo em que se obtém o valor quantitativo de K nas zonas de armazenamento (RIYIS et al, 2013; QUINNAN et al, 2010);

- Instalação de pontos de amostragem de água (poços de monitoramento ou outro instrumento) nas zonas de fluxo obtidas. Nesses pontos, além das amostras de água subterrânea, devem ser realizados ensaios hidrogeológicos para a obtenção de K quantitativo nas zonas de fluxo (RIYIS et al, 2013);

- Coleta de amostras de solo indeformadas (para análise de porosidade total, porosidade efetiva e densidade) e deformadas (para análise de granulometria e fração de carbono orgânico);

- Tomada de decisão em campo;

O principal objetivo desse trabalho é verificar que uma investigação seguindo o protocolo proposto acima em uma área contaminada por hidrocarbonetos de petróleo proporciona a elaboração de um MCA sólido e com incertezas gerenciáveis.

Para isso, foi analisado um caso de uma investigação em um posto de combustíveis na região de Itapetininga, interior de SP, iniciado em 2003 e seguiu até 2014 com métodos, ferramentas e abordagens tradicionais, passando por três diferentes responsáveis técnicos (Consultoria A, Consultoria B e Consultoria C), sem que fosse possível estabelecer um MCA aceitável pela CETESB, mesmo com a instalação de mais de 70 poços no posto e em seu entorno e da operação de sistemas de remediação por 05 anos.

2. Histórico da Investigação

O imóvel que passou pelas etapas do Gerenciamento de Áreas Contaminadas, o posto F&F¹, está localizado no centro de uma cidade de economia predominantemente rural, na região de Itapetininga-SP, com 1.888 m² de área de terreno, e 698,82 m² de área construída, sendo essa dividida em: área de abastecimento, troca de óleo, depósito, oficina mecânica, escritório administrativo, área de lavagem de veículos, loja de conveniência e sanitários. Desde 1960 já existia um posto de revenda de combustível no local (Figura 1), tendo o empreendimento operado com as bandeiras Petrolina (1970), Hudson (1975), Atlantic (1980) e Ipiranga (1993). Em 1986 ocorreu uma reforma no posto. Em 2007, ocorreu uma reforma do SASC², com a remoção de 08 tanques de 15 m³ cada, sendo: 01 tanque de gasolina aditivada, 02 tanques gasolina comum, 01 tanque de álcool e 04 tanques óleo diesel, conforme as adequações necessárias para atender a Resolução CONAMA nº 273/2000 e a Resolução da

¹ Nome Fictício. Embora o proprietário tenha autorizado a divulgação dos dados, os autores optaram por ocultar o nome verdadeiro do Posto e das Empresas que lá trabalharam. Pelo mesmo motivo, a identificação da cidade e a fonte de consulta sobre a economia do município foram omitidos.

² Sistema de Abastecimento Subterrâneo de Combustíveis – um ou mais tanques enterrados

Secretaria do Meio Ambiente – SMA nº 05/2001. Após a reforma, o posto passou a contar com um SASC composto de três tanques de combustíveis, sendo: um tanque pleno de 15 m³ com etanol hidratado; um tanque compartimentado de 15/15 m³ com etanol e gasolina comum; e um tanque compartimentado de 10/20 m³ que armazenava gasolina aditivada e diesel.

Figura 1 - Foto do posto de combustível em 1960



Fonte: Proprietário

Consultoria A

A empresa de Consultoria A trabalhou no F&F de 2003 a 2007, realizando uma investigação confirmatória e um complemento que atendeu a um Auto de Inspeção³ emitido pela CETESB. Na investigação confirmatória, essa consultoria realizou uma sondagem a percussão – *Standard Penetration Test* (SPT) – que foi interrompida a 11,40 metros de profundidade, por ter supostamente encontrado um solo impenetrável sem interceptar o nível de água (NA). Embora fosse prática comum à época, a adaptação de metodologias de outras áreas (nesse caso, a geotecnia), para a investigação de áreas contaminadas, o SPT não é adequado para esse fim. Após essa sondagem inicial, foram realizadas mais sete sondagens com trado manual, chegando a profundidade máxima de 5,0 m, com o objetivo de selecionar amostras de solo para serem enviadas ao laboratório de análises químicas. A seleção ocorreu de acordo com o procedimento da época, ou seja, medindo-se, a cada metro, em campo, os compostos orgânicos voláteis (VOC), com detector por oxidação catalítica, porém, as amostras deveriam ter sido coletadas em amostradores tubulares do tipo *liner* (Giacheti et al, 2015), não diretamente no Trado Manual, e o uso inadequado dessa ferramenta que contrariou até mesmo os procedimentos da época. O equipamento de oxidação catalítica apresentou leituras nulas, exceto nas sondagens S-07 (2820 ppm a 1,0 m) e S-08 (480 ppm a 2,0 m). As análises químicas de solo não mostraram nenhuma concentração das SQI benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno (BTEX) e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs) acima dos valores orientadores de intervenção da CETESB, portanto, a Consultoria A, em seu Modelo Conceitual da Área, concluiu que: a área não estava

³ Documento elaborado a partir de uma vistoria da CETESB na área para verificar a situação ambiental

contaminada, o NA é mais profundo que 11,40 m e que, nessa profundidade, atinge-se o topo rochoso. Como todos os trabalhos posteriores indicaram que o NA está entre 6,0 e 8,0 m, e que o topo rochoso está entre 15,0 m e 17,0 m, portanto, pode-se concluir que as informações apresentadas pela Consultoria A em seu MCA são equivocadas. Além disso, o método de sondagem utilizado (SPT) não é adequado para esse trabalho, uma vez que, a cada metro, são coletados apenas 45 cm de solo, não sendo possível elaborar um MCA com essa ferramenta. Outro fator importante de incerteza é o elevado valor de VOC medido em campo contrastando com o valor ND⁴ nas análises de laboratório. Isso provavelmente ocorreu porque, à época, não havia a norma 16.434 (ABNT, 2015) que estabelece critérios mais adequados à preservação de amostras de solo para análise de VOC.

O Posto F&F foi declarado pela Consultoria A como livre de contaminação, no entanto, em outubro de 2007, a CETESB, em virtude de uma denúncia, realizou uma inspeção no poço cacimba situado em propriedade vizinha, e distante 180 metros do posto, constatando a presença de óleo diesel. A figura 2 mostra a localização e distância entre o poço cacimba e o posto de combustível.

Figura 2 - Localização do poço cacimba e distância com o posto F&F.



Por conta da existência de contaminação no poço cacimba, o posto contratou a novamente a Consultoria A em dez/2007, que executou três novas sondagens com trado manual e instalou dois poços de monitoramento (PMs) na região próxima ao cacimba contaminado. O Nível de Água (NA) dos poços estava entre 1,16 m e 4,65 m. Durante as sondagens foi percebido o odor de combustível, porém, os resultados das amostras de solo e de água subterrânea não indicaram concentrações BTEX e PAHs acima dos valores orientadores da CETESB.

Considerando a correção monetária pelo IGP-M (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2016), o custo do trabalho da Consultoria A foi de R\$ 101.215,00.

Consultoria B

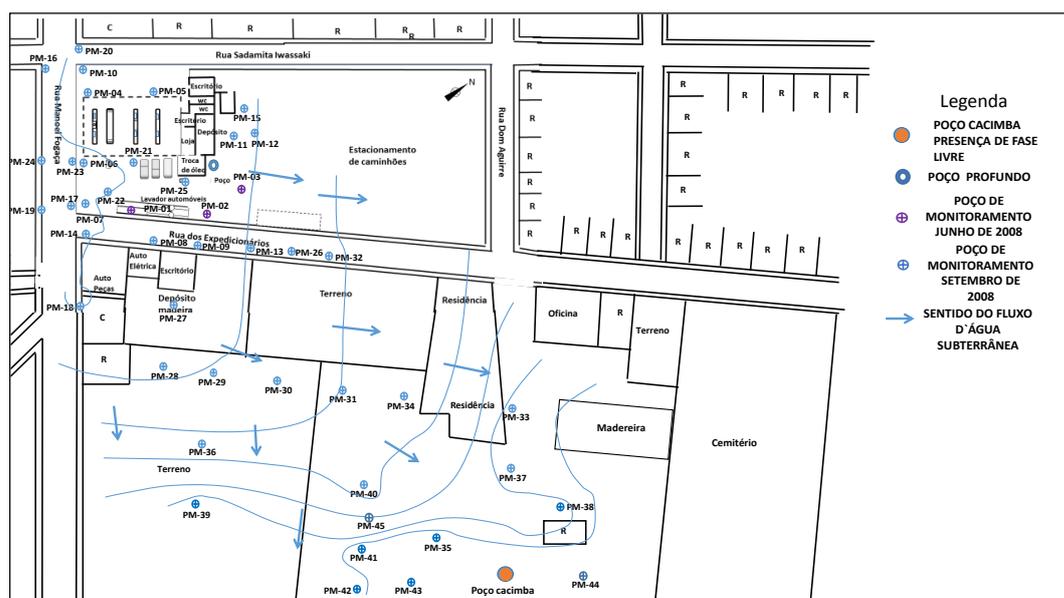
A Consultoria B atuou no F&F de 2008 a 2013, utilizando métodos tradicionais de investigação, alguns desses de maneira inadequada. Finalizou sua participação sem dar as respostas exigidas pela CETESB, mesmo tendo instalado mais de 50 poços na área.

⁴ Não Detectado – Concentração menor que o limite de quantificação do método analítico

Em junho de 2008 o posto F&F, já com o SASC substituído, contratou a empresa de consultoria B para realizar um novo estudo, já que as incertezas do MCA anterior, aliadas à descoberta de fase livre no poço cacimba, eram muito grandes para a CETESB. A Consultoria B instalou, inicialmente, três poços de monitoramentos com 10,5 metros de profundidade. Durante as duas primeiras sondagens, a empresa verificou a presença de produto (óleo diesel) em fase livre com espessura de 5,0 cm, a 7,50 metros de profundidade. Com essa constatação, a área foi declarada contaminada e sob investigação, o que exige que se faça uma Investigação Detalhada, com a necessidade de: delimitar tridimensionalmente todas as plumas (fase livre, fase retida e fase dissolvida); realizar uma avaliação de risco à saúde humana; e se houver risco, a necessidade de elaboração e implementação de um plano de intervenção. Além disso, a presença de fase livre, por si só, exigia uma ação emergencial para remoção da mesma. Nesse momento, já estava em vigor a Decisão de Diretoria 103 da CETESB (DD 103/2007), que estabelecia procedimentos para a investigação em postos de combustíveis.

Em setembro de 2008, a Consultoria B iniciou a investigação detalhada das áreas (posto e vizinhos) com objetivo de delimitar as plumas de contaminação, tendo executado 42 novas sondagens, com trado manual, e instalados 42 poços de monitoramentos convencionais, cujas profundidades variaram entre 7,5 metros e 11,0 metros. A Consultoria B, nesse momento, também elaborou um mapa potenciométrico (Figura 3).

Figura 3 – Localização dos poços de monitoramento instalados pela Consultoria B e mapa potenciométrico do “aquífero livre”.

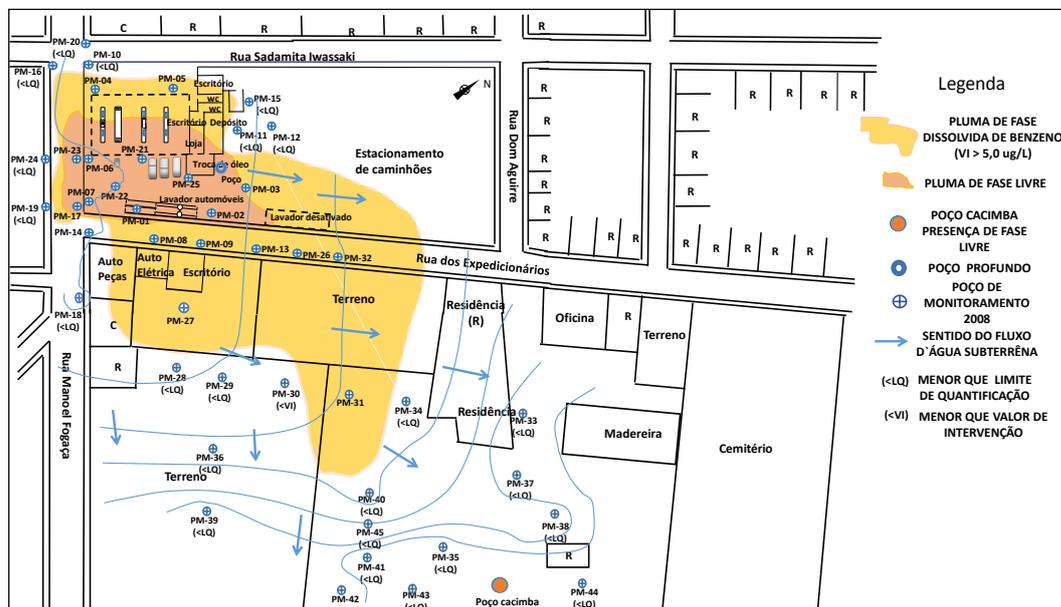


Fonte: Consultoria B

Nessa investigação detalhada, mais uma vez, nenhuma amostra de solo apresentou concentrações de BTEX e PAHs acima dos valores orientadores (VI) da CETESB. As sondagens, para amostragem de solo, foram realizadas com trado manual, sem o uso de amostradores *liner*, procedimento já obrigatório na época, e sem a preservação adequada para compostos voláteis (não exigida na época). Além disso, todas as amostras de solo foram realizadas na zona não saturada, conforme solicitavam os procedimentos da época, mas que podem deixar de lado parte significativa da massa de contaminantes presentes na porosidade imóvel (PAYNE ET AL, 2008; SUTHERSAN ET AL, 2015). Mesmo sem concentração detectada no solo, nove poços apresentaram

produto (diesel) em fase livre, e outros dez PMs apresentarem concentrações de benzeno acima dos valores orientadores da CETESB (5,0 ug/L), indicando que há contaminação na área, mas que, segundo o MCA da Consultoria B, não haveria nenhuma massa ligada ao solo. A figura 4 mostra a pluma de fase livre de diesel e a pluma dissolvida de benzeno na área.

Figura 4 – Pluma de fase livre de diesel e de fase dissolvida de benzeno.



Fonte: Consultoria B

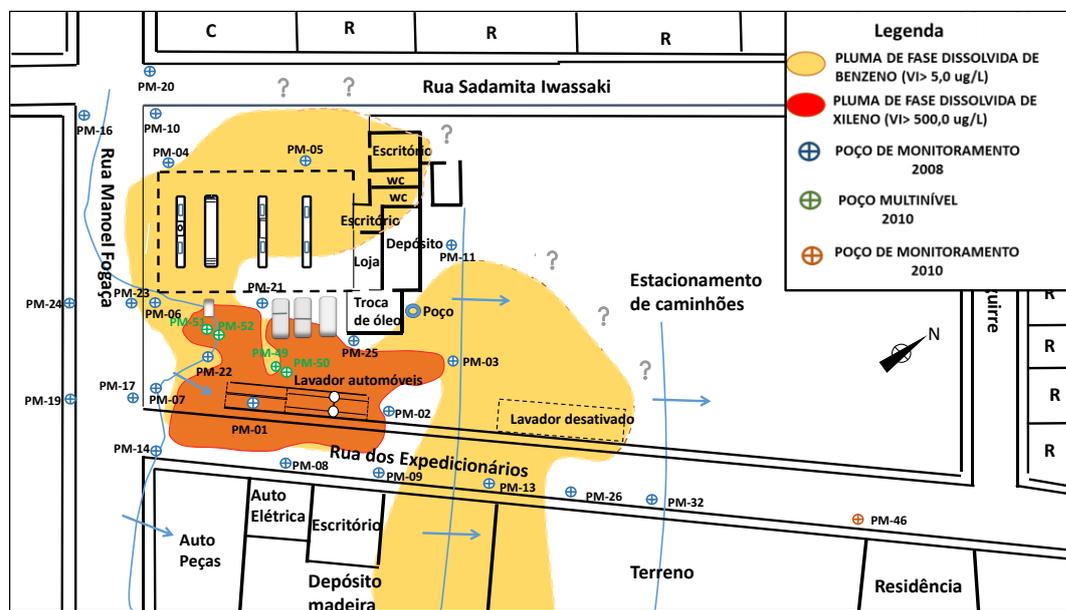
Em outubro de 2008, dando prioridade a remoção emergencial do produto em fase livre, a Consultoria B implantou um sistema de remediação por extração multifásica (MPE)⁵, tipo *bioslurping*. Os poços de monitoramento PM-01, PM-02, PM-06, PM-07, PM-21, PM-22 e PM-25 foram utilizados como poços de extração, prática que não é recomendada, pois cada poço tem a sua função, e um poço de monitoramento não é adequado para funcionar como poço de extração multifásica. Além do mais, um poço que tenha sido usado como poço de extração, não pode mais ser usado como poço de monitoramento, pois terá a presença de produto nele que não é do aquífero, mas que está retido no material do próprio poço decorrente da extração. Este sistema operou até abril de 2010 e removeu 1056 litros do produto em fase livre. A figura 5 mostra a localização dos poços utilizados no MPE. Neste período também houve a remoção de produto em fase livre no poço cacimba, com metodologia e volume desconhecido (provavelmente, remoção manual). A Consultoria B, nesse momento, considerava o caso como positivo e caminhando para uma solução, uma vez que havia removido produto e só havia fase livre de diesel nos poços de extração.

A Consultoria B, em seu MCA, não priorizou a avaliação do meio físico e sua eventual interação com o contaminante. A investigação focou em detectar e quantificar as SQUI dissolvidas na água subterrânea. É importante dizer que, exceto na coleta de amostras de solo, que deveria ter sido feita por cravação contínua e a empresa fez com trado manual, a Consultoria B agiu de acordo com os procedimentos

⁵ Nesse período, essa tecnologia de remediação foi considerada a “coqueluche” do momento, em substituição aos sistemas de Bombeamento e Tratamento, muito utilizados em postos de combustíveis no Estado de SP entre 2002 e 2006. De 2007 até 2012, predominou o MPE, que atualmente divide o status com a oxidação química *in situ* (ISCO), de acordo com consultas informais a profissionais do segmento.

vigentes à época, no entanto, segui-los não foi suficiente para a elaboração de um adequado MCA.

Figura 5 - Mapeamento horizontal das plumas de fase livre de diesel e dissolvida de benzeno na área em 2010.



Fonte: Empresa de Consultoria "B"

Em outra inspeção, a CETESB identificou fase livre aparente de 5 cm no poço de monitoramento situado na área vizinha, próximo ao poço cacimba. Para complementar a investigação nessa nova fonte identificada pela CETESB, a Consultoria B realizou sete novas sondagens para coleta de amostras de solo, avaliação em campo de VOC e instalação de sete PMs em abril de 2010, incluindo três poços multiníveis.

Poço multinível é a maneira que comumente é denominado um poço profundo de um par multinível, ou seja, trata-se de um poço que tem o objetivo de monitorar um aquífero confinado ou uma unidade hidroestratigráfica diferente e mais profunda que aquela unidade monitorada pelo poço de monitoramento "raso". A instalação desses poços multiníveis, em postos de combustíveis, foi uma obrigatoriedade instituída pela DD 263 de 2009 (CETESB, 2009), mas foi largamente desobedecida. A exemplo do posto F&F, onde as consultorias, ao invés de instalarem a seção filtrante do poço na unidade hidroestratigráfica mais condutiva, instalaram esse multinível em profundidade arbitrária de 2,0 metros abaixo do fundo do poço "raso", permitido pela CETESB apenas em casos de geologia homogênea. Se a Consultoria B (bem como as outras) não coletou amostras de solo naquela profundidade, como é possível afirmar que a geologia é homogênea ou que o multinível está instalado na profundidade correta? Dessa forma, os poços multiníveis não servem para o seu propósito.

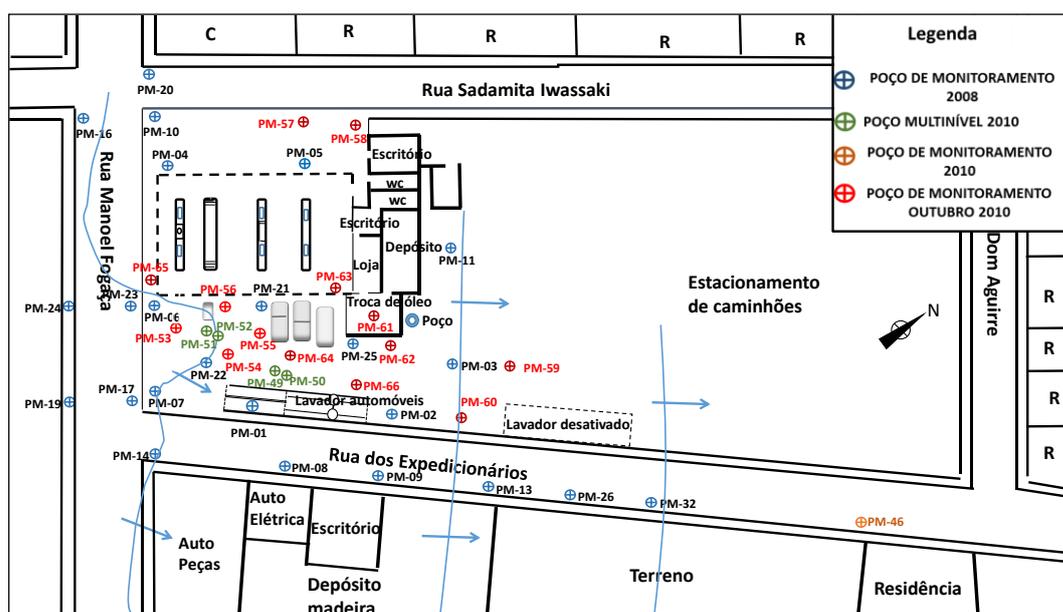
Nessa campanha, não houve a constatação de VOC nas amostras de solo em campo e as análises químicas novamente não indicaram concentração de BTEX e PAH no solo. Nesse momento, havia fase livre somente em cinco poços de extração do sistema MPE. Foram detectadas concentrações de benzeno acima dos Valores de Intervenção, mas essa concentração foi obtida também em poços de monitoramento que viraram poços de extração e tornaram a ser poços de monitoramento. Outro erro importante da Consultoria B foi incluir os poços multiníveis na pluma de fase dissolvida do aquífero raso. Esses poços são multiníveis justamente para monitorar outra unidade hidroestratigráfica, portanto, não poderiam ser colocados na mesma pluma. A figura 5

mostra a pluma de fase livre de diesel e de fase dissolvida de benzeno no aquífero raso, incluindo os poços multiníveis.

Outro aspecto notável é que, após 50 poços instalados na área, a pluma de fase dissolvida não está delimitada na direção dos poços PM-03 e PM-05, como a figura 5 mostrou com as interrogações e linhas tracejadas.

Por conta dessa não delimitação da pluma em fase dissolvida, entre agosto a outubro de 2010, a Consultoria B executou mais 14 sondagens e instalou quatorze novos poços, totalizando sessenta e seis poços instalados na área. Desse total, cinquenta e nove eram poços de monitoramentos (PM) e sete eram poços de extração (PE). A figura 6 mostra os novos poços.

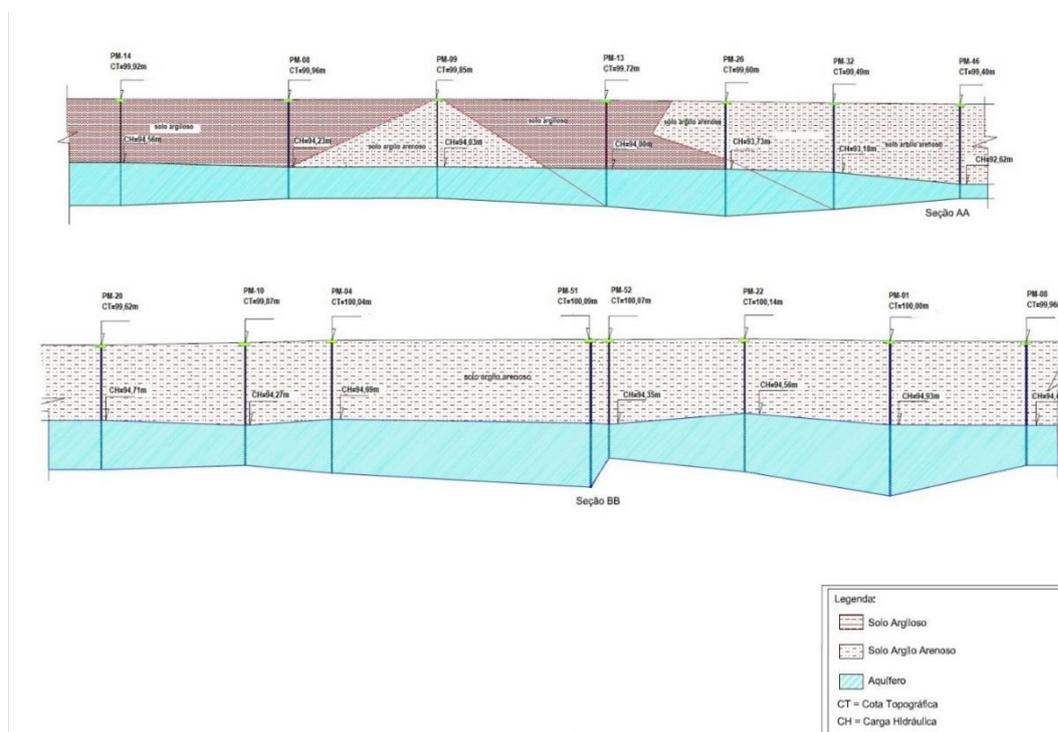
Figura 6 – Planta da área do posto com todos os poços instalados até outubro/2010



Fonte: Empresa de Consultoria "B"

A Consultoria B, evidenciando a falta de prioridade na elaboração do MCA que reduzisse as incertezas decorrentes da heterogeneidade geológica/hidrogeológica da área de estudo, caracterizou a geologia/pedologia local baseado em apenas sete sondagens (S-46 a S-52) realizadas em 2010, dos quais verificou a ocorrência de solo argiloso e solo argilo-arenoso com variação de cores do topo até a profundidade executada (11,0 metros). Também encaminhou para o laboratório a amostra de solo indeformada da sondagem coletada a 1,0 metro de profundidade (portanto, da zona não saturada, o que não traz nenhum dado significativo e representativo) para análises dos parâmetros de densidade aparente, porosidade total, umidade e granulometria. A figura 7 mostra a seção e corte da geologia local. Nota-se que a Consultoria B considerou a zona saturada inteira como "Aquífero", sem se importar em sequer identificar os diferentes tipos estratigráficos identificados nas sondagens manuais, em mais uma evidência da falta de prioridade na avaliação do meio físico.

Figura 7 – Seção geológica com as descrições das unidades hidroestratigráficas feita pela Consultoria B.



Fonte: Empresa de Consultoria "B"

Em mais uma demonstração da pouca importância dada ao meio físico, a Consultoria B executou nove ensaios hidrogeológicos tipo *Slug Test* nos poços PE-01, PE-02, PM-03, PM-10, PM-13, PE-22, PM-34, PM-37 e PM-49 e obteve condutividades hidráulicas (K) da ordem de 10^0 cm/s, as quais considerou compatíveis com os dados da literatura para unidades hidroestratigráficas compostas predominantemente por areia grossa, segundo a Consultoria B, que formava o aquífero raso da área. No entanto, a própria Consultoria B mostrou, na Figura 7, que o solo predominante é argiloso ou argilo arenoso. De acordo com Freeze & Cherry (1979), esses valores de K (10^0 cm/s) são encontrados em cascalhos e areias grossas muito selecionadas. A literatura aponta o valor de K para solos argilo-arenosos da ordem de 10^{-5} cm/s, ou seja, na informação prestada pela Consultoria B, a velocidade de fluxo da água subterrânea seria da ordem de centenas de Km por ano, e a informação da literatura indica essa velocidade em termos de poucos metros por ano.

Ainda em 2010, dois anos após a implantação do sistema de remediação por MPE, a Consultoria B realizou um ensaio piloto, tarefa exigida para o plano de intervenção (SÃO PAULO, 2013; CETESB, 1999). O ensaio concluiu que o raio de influência da extração de vapores do MPE era de 6,0 m e o raio de influência do bombeamento de água subterrânea era de 4,0 m, portanto, a empresa propôs a instalação de 4 novos PEs e a transformação de 5 PMs em PEs para a ampliação do sistema de MPE, atividade que não foi aceita pelo F&F.

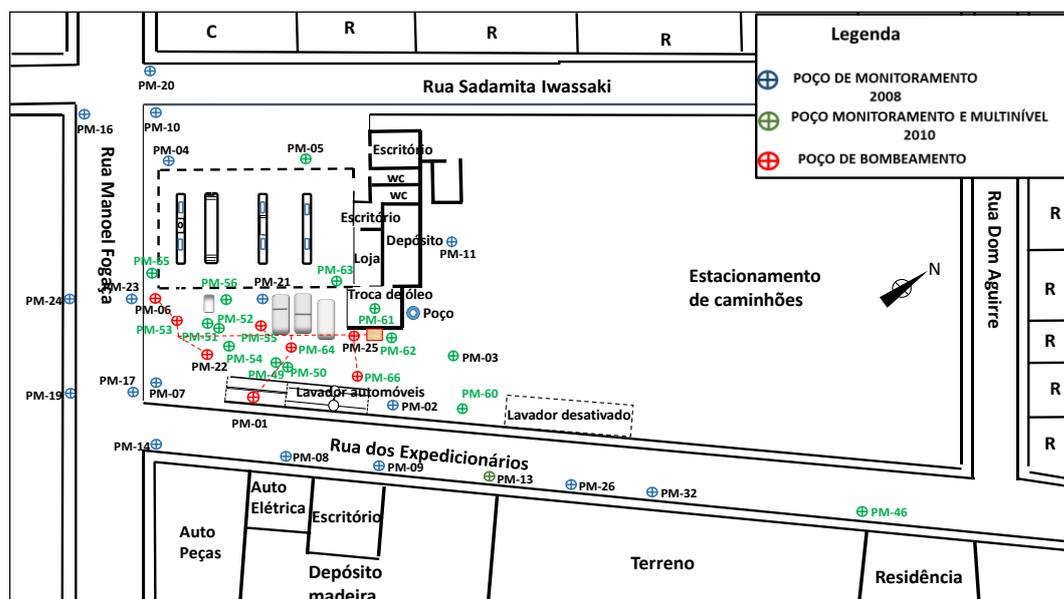
Ao final do seu trabalho no posto F&F, a Consultoria B realizou sessenta e seis sondagens, instalou sessenta e seis poços, implantou um sistema de remediação por MPE emergencial, e não conseguiu delimitar horizontalmente as plumas de Benzeno em fase dissolvida, nem verticalmente as plumas de nenhuma SQI, nem calcular a velocidade e direção do fluxo de água subterrânea, nem estabelecer se havia fluxo vertical, tampouco relacionar o aquífero com o meio poroso em que está inserido. Além de alguns erros, que não obedeceram aos procedimentos de investigação em Postos de

Combustíveis, como realizar amostragem de água subterrânea em poços onde existe fase livre e realizar amostragem de água subterrânea em poços de extração (CETESB, 2009; CETESB, 2007). Não houve, portanto, um adequado MCA ao final de 2010. Considerando a correção monetária pelo IGP-M (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2016), o custo do trabalho da Consultoria B para o F&F foi de R\$ 224.689,00

Consultoria C

Em abril de 2011, o posto F&F, através de recomendação da Bandeira Ipiranga, contratou a Consultoria "C", para gerenciar a área contaminada. Essa empresa reviu os estudos anteriores e considerou as informações "satisfatórias e adequadas", razão pela qual efetuou apenas uma atualização no plano de intervenção e implementou as medidas de remediação propostas pela Consultoria B. Em maio de 2011, a Consultoria C verificou que cinco poços (três de extração e dois de monitoramento) apresentavam a presença de fase livre de diesel. Em virtude disso, aplicou a mesma técnica e utilizou os mesmos poços, sugeridos pela Consultoria B: um MPE, que iniciou a operação em 31/05/2011, utilizando cinco poços de extração existentes na área e transformando três PMs em poços de bombeamento (PB)⁶. A figura 8 mostra o local onde foi instalado o sistema MPE.

Figura 8 – Planta do posto com os poços de monitoramento transformados em poços de bombeamento



Fonte: Empresa de Consultoria "C"

A empresa "C", em setembro de 2011, realizou uma nova avaliação, e como verificou a presença de óleo diesel, a empresa manteve o sistema MPE em operação até abril de 2012, tendo removido 90,5 litros de produto. Em maio de 2012 a consultoria "C" executou mais duas sondagens na área do posto com uma sonda perfuratriz Hollow Stem Auger e instalou dois novos poços com seções filtrantes de 8,0 metros de comprimento, sendo um de monitoramento – PM-67 e outro de bombeamento – PB-09 para complementar a investigação detalhada e ampliar a malha de remediação.

⁶ Normalmente os sistemas MPE não possuem poços de bombeamento, mas somente poços de extração. No entanto, a Consultoria C considerou esses poços como de bombeamento, embora tivesse instalado neles um sistema de captação idêntico ao *bioslurping*. Provavelmente, a única diferença era que empresa posicionava a captação totalmente na zona saturada e não fazia a separação vapor/água na entrada do sistema.

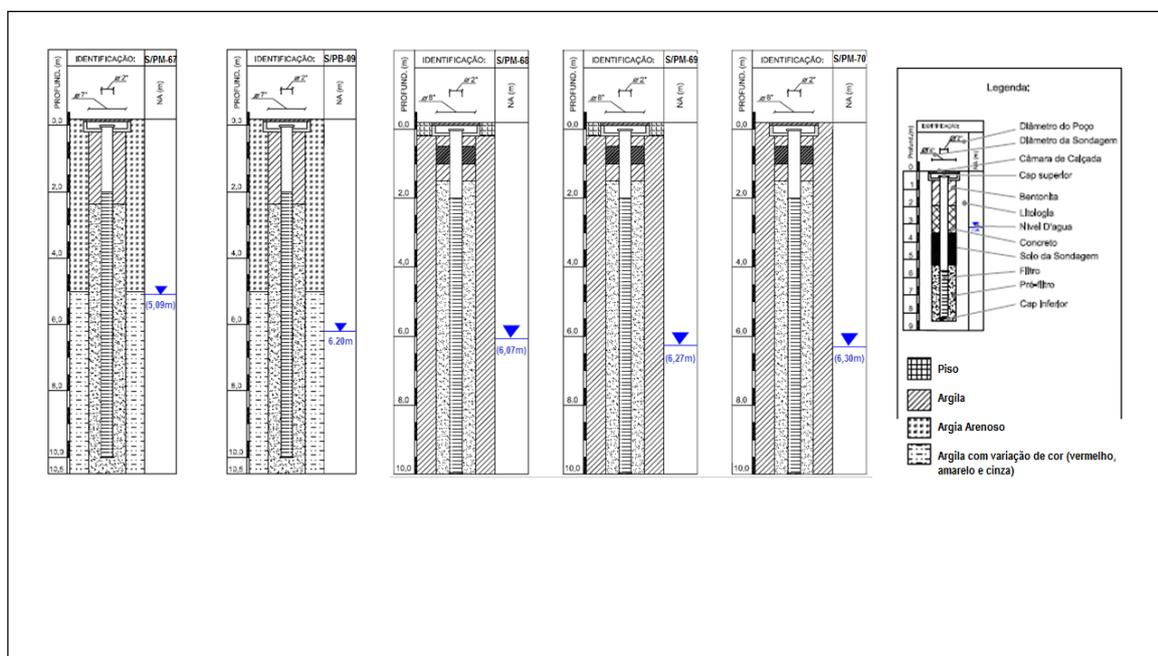
Os resultados das duas amostras de solo não apresentaram concentrações de BTEX e PAHs acima dos valores orientadores da CETESB. Porém, essas amostras de solo não foram coletadas por cravação contínua (*Direct Push*), mas da espiral dos trados ociosos, o que é inadequado de acordo com Riyis et al (2013b) e não atende os procedimentos da CETESB (2007, 2009) nem da ABNT (2015). Em resumo, essa coleta de amostras de solo foi feita utilizando procedimentos não aceitos pelo órgão ambiental, sem correspondência em nenhuma norma nacional ou internacional e inadequados para as substâncias químicas de interesse da área.

Além desse erro na amostragem de solo, a instalação de poços de monitoramento, e principalmente de poços de bombeamento com seção filtrante longa não seguiu a norma NBR 15.495-1 (ABNT, 2007), e segundo Riyis et al (2014) e Cleary (1989), a instalação desses poços pode causar um tubo de fluxo preferencial entre diferentes unidades hidroestratigráficas, e esse tubo de fluxo pode acarretar na migração vertical do diesel, que é menos denso que a água, para estratos inferiores (para uma unidade hidroestratigráfica confinada, por exemplo), promovendo um risco muito grande de agravar o problema da contaminação no posto F&F.

A Consultoria C desligou o sistema MPE, quando concluiu que não havia mais fase livre aparente e as concentrações de fase dissolvida dos compostos BTEX não causavam risco à saúde humana, de acordo com a avaliação feita por eles, e iniciou, então, as campanhas de monitoramento para encerramento do caso.

Em fevereiro de 2015, provavelmente por ter observado (mas não relatado) o retorno da contaminação ao posto F&F, decorrente de "efeito rebound" (CHAPMAN, 2011; HADLEY & NEWELL, 2012), a Consultoria C efetuou três novas sondagens da mesma forma equivocada: com o trado oco helicoidal (*Hollow Stem Auger*), sem cravação de amostradores por *Direct Push*, e instalando poços com seção filtrante longa (8,0 metros). A figura 9 mostra os perfis construtivos dos poços.

Figura 9 – Perfis construtivos dos poços instalados em 2015



Fonte: Empresa de Consultoria "C"

A Consultoria C, utilizando métodos inadequados para a amostragem de solo para a identificação do perfil geológico ou do perfil hidroestratigráfico (RIYIS, 2012; RIYIS ET AL, 2013), caracterizou a geologia local considerando somente a existência de duas unidades hidroestratigráficas: uma entre 0 a 5,0 metros profundidade, formada por argila e argila arenosa de cores vermelho, amarelo e cinza; e outra de 5,0 metros a 10,5 metros de profundidade com as mesmas características. Vale lembrar que a metodologia utilizada para a amostragem de solo (trados ocos helicoidais sem cravação contínua com *liner*) não permite a definição das unidades hidroestratigráficas, nem em termos de textura/granulometria, nem em termos de posição de início da camada. Ainda assim, foram descritas no relatório apresentado à CETESB.

Na campanha de amostragem de água subterrânea, a Consultoria C novamente amostrou os poços de extração e de bombeamento, prática inadequada e não admitida pela CETESB.

Em junho de 2015 a CETESB realizou uma vistoria nos poços existentes (monitoramento, extração e bombeamento), e constatou a presença de fase livre aparente com espessura de 1,0 cm no poço PM-50, na área do posto e uma película de fase livre aparente no poço PM-09 com espessura menor que 5,0 mm, situado à jusante e fora da área do posto de combustível, obrigando o posto F&F a realizar novo trabalho de investigação.

Da mesma forma que suas duas antecessoras, a Consultoria C finalizou sua participação como Responsável Técnica do posto F&F sem resolver o problema de contaminação da área do seu cliente e sem ao menos estabelecer um adequado modelo conceitual da área, mesmo adicionando seis poços aos sessenta e seis já existentes. Considerando a correção monetária pelo IGP-M (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2016), o custo do trabalho da Consultoria C para o F&F foi de R\$ 458.961,00.

Em 2015, após doze anos de trabalho, três empresas de consultorias, mais de 70 sondagens e poços instalados, inúmeras amostragens de solo e de água subterrânea, três sistemas de remediação implantados e mais de 780 mil reais gastos, a área continua classificada como contaminada sob investigação, sem um entendimento do meio físico nem da interação do produto que vazou com esse meio físico.

3. Recomendação de Abordagem para Elaboração de um Adequado Modelo Conceitual da Área

Para que se tenha a maior chance de sucesso na investigação da área, e conseqüentemente de elaboração de um MCA que possibilite: quantificar a massa de SQI, identificar as zonas preferenciais de fluxo e armazenamento de contaminantes, avaliar a interação dos contaminantes com o meio físico, e obter dados quantitativos das principais variáveis do estudo (SÃO PAULO, 2013; SUTHERSAN et al, 2015; RIYIS et al, 2013-b; RIYIS et al, 2015)

Para realizar isso, Riyis et al (2013-b) e Riyis et al (2016) recomendam:

- Tomada de decisão em campo, com profissional Sênior presente;
- Amostragem de solo *Direct Push* com *liner*, preferencialmente pela metodologia *Dual Tube*, alternativamente por *Single Tube* revestido por *Hollow Stem Auger*. Essa amostragem deve avançar na zona saturada até que não haja indício da presença de SQI ou não seja possível o avanço da ferramenta por cravação mecanizada;
- Avaliação discreta de VOCs no *liner* a cada 20 cm, para seleção de amostras de solo pontuais;
- Coleta e preservação de amostras de solo em metanol (NBR 16.434);

- Avaliação dos *liners* na caixa preta de investigações geoambientais (Riyis et al, 2015)
- Execução de ensaios de piezocone de resistividade (RCPTU) concomitante com ensaios de dissipação de poro pressão descritos por Riyis (2012), Riyis et al (2013-b), Riyis et al (2014), ASTM D6067 (ASTM, 2010);
- Instalação de poços de monitoramento de seção filtrante curta, com *hollow stem auger* nas unidades hidroestratigráficas definidas nas etapas anteriores;
- Execução de *bail tests* para determinação da condutividade hidráulica em todos os poços instalados;
- Amostragem de água subterrânea pelo método da baixa vazão.
- Descomissionamento de poços de seção filtrante longa que podem ter causado migração vertical de contaminantes pela norma ASTM D5299 (ASTM, 2012);
- Descomissionamento, pela mesma norma de todos os poços que foram utilizados como poços de extração e/ou de bombeamento

A condução adequada das atividades propostas deve fornecer os dados mínimos necessários à elaboração do MCA, com um custo mais elevado que metodologias tradicionais, porém, muito menor do que foi gasto até o momento no posto F&F. A estimativa para esse escopo de investigação é de R\$ 150.000,00.

4. Custos Envolvidos no Processo de Gerenciamento da Área Contaminada do Posto F&F

A Tabela 1 apresenta os valores reajustados dos custos dos estudos executados no Posto F&F até o estudo da Consultoria C.

Nesta tabela observa-se que, somando todos os custos anteriores, a execução de uma investigação mais detalhada apesar de mais cara ainda seria mais barata que sucessivas tentativas inadequadas de investigação, conforme a estimativa apresentada no item 3.

Tabela 1 – Comparativo dos Custos envolvidos no Processo de GAC do Posto F&F.

Consultoria	Etapas do GAC	Mês/Ano	Custo (R\$)	Custo reajustado (Índice IGP-M Ago/2015) (R\$)
A	1- <i>Investigação Confirmatória</i>	<i>Mai/2003</i>	<i>50.000,00</i>	101.215,00
B	1- <i>Investigação Confirmatória</i> 2- <i>Investigação Detalhada</i> 3- <i>Remediação.</i>	<i>Jun/2008</i>	<i>150.000,00</i>	224.689,00
C	1- <i>Remediação</i> 2- <i>Monitoramento</i>	<i>Abr/2011</i>	<i>360.000,00</i>	458.981,00

5. Conclusões

Uma investigação de área contaminada tem como objetivo fazer um diagnóstico que permita tomadas de decisão adequadas sobre as intervenções de reabilitação, ou seja, visam a sua recuperação. Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2013), estratégias e tecnologias de investigação de alta resolução resultam em um entendimento em escala adequada da distribuição do contaminante, embasando de forma mais eficiente e confiável a avaliação, seleção, concepção e implementação das tecnologias de remediação. Payne et al (2008) ressalta que, embora a hidrogeologia seja a ciência que estuda o movimento da água em subsuperfície, seus principais fatores limitantes decorrem do meio em que a água caminha, portanto, é fortemente dependente da variação (heterogeneidade e anisotropia) geológica. A variação da condutividade hidráulica, então, é uma variável chave para o entendimento do meio físico, que vai condicionar o fluxo subterrâneo e o transporte de contaminantes. Suthersan et al (2015) e Welty et al (2016) propõem que a avaliação da hidroestratigrafia e mapeamento da condutividade hidráulica é essencial para a definição do modelo conceitual da área.

Ao correlacionar dados de concentração com dados de hidroestratigrafia e condutividade hidráulica, em alta resolução, torna-se possível mapear e distinguir zonas de fluxo de massa de contaminação das zonas de armazenamento (SUTHERSAN et al, 2015). Segundo Suthersan et al. (2010), compreender o transporte de contaminantes e sua interação dentro e entre as camadas de alta e baixa condutividade hidráulica do aquífero permite um maior aproveitamento da relação custo-benefício do projeto de investigação e remediação de áreas contaminadas, pois visa remediar menores volumes do aquífero, em comparação à restauração do aquífero como um todo, atingindo alvos que não teriam a necessidade de tratamento.

Em resumo, para que a intervenção em uma área contaminada tenha alguma possibilidade de sucesso, faz-se necessária uma investigação adequada da área, e para que essa investigação seja bem-sucedida, é preciso que a abordagem, as metodologias e as ferramentas de obtenção de dados sejam corretas e que a interpretação dos dados de campo seja a melhor possível.

O argumento do custo mais elevado para isso não se sustenta ao observar o trabalho aqui apresentado, onde doze anos de trabalhos por métodos tradicionais, incluindo remediações, e mais de 740 mil reais gastos, não conseguiram avançar na reabilitação de uma área relativamente simples, de um posto de combustíveis. Ao extrapolar esses resultados para uma área complexa, seja geologicamente, seja devido à variabilidade de seus processos e de substâncias químicas, como uma área industrial, pode-se inferir o tamanho do desafio de tentar gerenciá-la utilizando abordagem, metodologia, ferramentas, coleta de dados ou interpretação de dados com muitas incertezas.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM D 6067 – Standard Using the Electronic Piezocone Penetrometer Test for Environmental Site Characterization.** 2010

_____. **ASTM D 5299 - Standard Guide for Decommissioning of Groundwater Wells, Vadose Zone Monitoring Devices, Boreholes, and Other Devices for Environmental Activities.** 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15.492 – Sondagem de reconhecimento para fins de qualidade ambiental.** São Paulo, 2007.

_____. **NBR 13.786: Posto de serviço – Seleção dos equipamentos para sistemas para instalações subterrâneas de combustíveis.** Rio de Janeiro. 2005.

_____. **NBR15.495 – Parte 1 - Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares - projeto e construção.** São Paulo, 2007.

_____. **NBR15.495 – Parte 2 - Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares - desenvolvimento.** São Paulo, 2007.

_____. **NBR15.515-1 – Parte 1 – Passivo Ambiental em solo e água subterrânea – Avaliação Preliminar.** Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. **NBR15.487 – Amostragem de água subterrânea em Poços de Monitoramento – Método da Purga.** Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR15.515-2 – Parte 2 – Passivo Ambiental em solo e água subterrânea – Investigação Confirmatória.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. **NBR 16.210 – Modelo conceitual no gerenciamento de áreas contaminadas.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 16.434 – Amostragem de resíduos sólidos, solos e sedimentos – Análise de compostos orgânicos voláteis (COV) - Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do Cidadão - Resultado da Correção pelo IGP-M (FGV)** - Disponível em <[https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAO/publico/exibirFormCorrecaoValores.d](https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAO/publico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores)o?method=exibirFormCorrecaoValores > acesso em 01/09/2016.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas.** 1999. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/](http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/manual.asp) manual.asp.>

_____. **Procedimento para Identificação de Passivos Ambientais em Estabelecimentos com Sistema de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis (SASC).** Cód: S701V01. Publicado em 02/02/2007.

_____. **Decisão de Diretoria 045/2014/E/C/I de 20 de fevereiro de 2014** – Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo. São Paulo. 2014

_____. **Decisão de Diretoria 103/2007/C/E.** São Paulo. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/proced_gerenciamento_ac.pdf. Acesso em: 31 de março de 2015.

_____. **Decisão de Diretoria 263/2009/P.** São Paulo. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/05_camaras.pdf. Acesso em: 31 de março de 2015

CHAPMAN, Steven; PARKER, Beth. **High-Resolution Field Characterization and Numerical Model of Contaminant Storage and Release for Low Permeability Zones.** SERDP/ESTCP Partners in Environmental Technology Technical Symposium and Workshop. Washington/DC. Dez/2011.

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>. Acesso em 16 jan. 2017.

CONSULTORIA A. **Relatório de investigação confirmatória – março de 2003** – Processo CETESB nº 46/00149/03 > acesso em setembro de 2015.

_____. **Relatório técnico de Sondagens Ambientais – janeiro de 2008** – - Processo CETESB nº 46/00381/07 > acesso em setembro de 2015.

CONSULTORIA B. **Relatório de implantação do sistema de remediação – MPE – outubro de 2008** – Pasta administrativa CETESB nº 46/00020/09 > acesso em setembro de 2015.

_____. **Relatório de investigação detalhada e plano de intervenção – Volumes I, II e III – maio de 2010** – Pasta administrativa CETESB nº 46/00042/10 Volumes I, II e III > acesso em novembro de 2015.

_____. **Relatório de investigação detalhada e plano de intervenção – Volumes I, II, III e IV – janeiro de 2011** – Pasta administrativa CETESB nº 46/00042/10 Volume IV > acesso em novembro de 2015.

CONSULTORIA C. **Relatório final de operação do sistema de remediação (mai/11 a abr/12) e 1º monitoramento para encerramento (abr/11) – setembro de 2012** – Pasta administrativa CETESB nº 46/00042/10 Volume IV > acesso em Dezembro de 2015.

_____. **Relatório de investigação ambiental complementar – março de 2015**. Pasta administrativa CETESB nº 46/00042/10 Volume IV > acesso em Dezembro de 2015.

CONSULTORIA D. **Relatório de investigação detalhada e plano de intervenção - dezembro de 2015** – Pasta administrativa CETESB nº 46/00001/16 > acesso em janeiro de 2016.

CRUMBLING, Deana M. **Building a Second-Generation Data Quality Model**. Triad Training, EPA National Site Assessment Symposium. San Diego. 2004.

ELLIS, R. E. **Summary of Findings for the 2013; High-Resolution Groundwater Hydraulic Investigation and Geochemical Investigation**; Former Burgress-Norton Mfg. Co., Inc.; 660 Nims Street; Muskegon, MICHIGAN; MDEQ Site ID 61000410. Relatório Técnico submetido ao Michigan Department of Environmental Quality. Arcadis-US. Michigan Office. 09/04/2014. Disponível em http://nimsreport.com/documents/2F2013_660_Nims_Investigation_Report_MDEQ_Text-Tables-Figures_Final.pdf

FREEZE, R. A.; CHERRY, J.A. **Groundwater**. New Jersey: Prentice-Hall, 1979. 604 p.

Hadley, P. W. and Newell, C. J. **Groundwater Remediation: The Next 30 Years**. Ground Water, 50: 669–678. 2012. doi:10.1111/j.1745-6584.2012.00942.x

McGuire, T. M., Adamson, David. T., Burcham, M. S., Bedient, P. B. and Newell, C. J. **Evaluation of Long-Term Performance and Sustained Treatment at Enhanced Anaerobic Bioremediation Sites**. Groundwater Monit R, 36: 32–44. 2016. doi:10.1111/gwmr.12151

PITKIN, Seth; Cherry, John A.; Ingleton, R.A.; Broholm, M. **Field demonstrations using the Waterloo ground water profiler**. Ground Water Monitoring and Remediation, Spring: 122–131. 1999.

PITKIN, Seth. **High Resolution Site Characterization at TRIAD Approach**. In: Triad Investigation: New Approaches and Innovative Strategies. 2008. Disponível em www.clu-in.org/conf/tio/triad4/prez/triad4ppt.ppt

PITKIN, Seth. **High Resolution Site Characterization for Groundwater** Short Course Joshua Barber, EPA Region 3. 2014. Disponível em: <https://clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/pdfs/HRSC-Participant-Manual-NARPM-2014.pdf> Acesso em 03 dezembro 2016.

QUINNAN, J.A., WELTY, N.R.H., and KILLINBECK, E. **Hydrostratigraphic and permeability profiling for groundwater remediation projects**. In Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'10), Huntington Beach, CA., 9–11 May 2010. Edited by P.K. Robertson and P.W. Mayne. CPT'10 Organizing Committee. p. 3-33. 2010. Disponível em: http://www.cpt10.com/PDF_Files/3-33Quihap.pdf

QUINNAN, J. A. **Real-Time High Resolution LNAPL and DNAPL Characterization –Part 1: Philosophy and Background**. In: North American Environmental Field Conference. Tampa, Florida. 2012.

RIYIS, Marcos Tanaka. **Investigação geoambiental com tomada de decisão em campo utilizando o piezocone de resistividade como ferramenta de alta resolução**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental – FEB/UNESP. Bauru, 2012.

_____. **A Revitalização de Áreas Contaminadas passa por Correta Amostragem de Solo**. Revista Pollution Engineering – Brasil. Edição Jul-Set/2014.

_____. **Eu Preciso Amostrar Solo em Zona Saturada?** Blog da empresa ECD Sondagens Ambientais. 2015. Disponível em: <http://ecdambiental.blogspot.com.br/2015/07/eu-preciso-amostrar-o-solo-na-zona.html/>>. Acesso em 03 dezembro 2016.

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)**. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. Rio de Janeiro, 2013a.

RIYIS, Marcos Tanaka; GIACHETI, Luiz Heraldo; DERRITE, Rafael Muraro; RIYIS, Mauro Tanaka. **Comparação entre ferramentas de amostragem de solo “Direct Push” em investigações geoambientais de áreas contaminadas**. III Congresso Internacional do Meio Ambiente Subterrâneo. São Paulo. 2013b. Disponível em <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27487/17758>

RIYIS, Marcos Tanaka; GIACHETI, Luiz Heraldo; DERRITE, Rafael Muraro; RIYIS, Mauro Tanaka. **High-Resolution Site Characterization (HRSC) in Brazil: Comparing MIP with Combined Tools in a PCE Source-Zone Architecture Definition**. X Seminário Internacional Sobre Remediação e Revitalização de Áreas Contaminadas. São Paulo. 2016. Disponível em http://seminario.ekosbrasil.org/wp-content/uploads/2016/10/3_Marcos-Tanaka.pptx

RIYIS, Marcos Tanaka; GIACHETI, Luiz Heraldo; DERRITE, Rafael Muraro; RIYIS, Mauro Tanaka. **SELECTION OF PREFERRED ZONES OF GW-FLOW FOR PUMPING TESTS USING HIGH RESOLUTION TECHNOLOGY**. IX Seminário Internacional Sobre Remediação e Revitalização de Áreas Contaminadas. São Paulo. 2014. Disponível em

<http://seminario.ekosbrasil.org/wp-content/uploads/2016/05/Marcos-Tanaka.pdf>

SÃO PAULO. **Lei Estadual no 13.577, de 08 de julho de 2009**. Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2009/lei-13577-08.07.2009.html>>. Acessado em: 21 de fevereiro de 2015.

_____. **Decreto Nº 59.263, de 05 de Junho de 2013**. Regulamenta a Lei nº 13.577, de 08 de julho de 2009, que dispõe sobre as diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá providências correlatas. São Paulo. 2013. Legislação Estadual.

St. GERMAIN, Randy. **New Generation Optical Sensors for Characterizing NAPL Source Zones**. Remediation Technology Symposium, May 14-15, 2008, Sacramento, CA, 34 slides, 2008

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). **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/>> Acesso em 15 de março de 2016.

WELTY, N. **Permeability Mapping: strategies and methods**. In: NORTH AMERICAN ENVIRONMENTAL FIELD CONFERENCE. Tampa, Florida. 2012.

WELTY, Niklaus; CURRY, Patrick; QUINNAN, Joseph; **Smart Characterization and Return of Investigation** in: Advances in Remediation: A New Way to Thinking. Pg 13-18. Arcadis. 2016