

ESTUDO DE ÁREA CONTAMINADA POR HIDROCARBONETOS POR APLICAÇÃO DO MÉTODO POLARIZAÇÃO INDUZIDA

Paula Gomes Junqueira¹; César Augusto Moreira²

Resumo – Impactos relacionados ao aporte de hidrocarbonetos em subsuperfície são particularmente preocupantes ao ambiente e a saúde humana, devido a aspectos degradativos e separação em fases dissolvida e residual, que resultam num tempo frequentemente prolongado de residência. Os métodos geofísicos são ferramentas consagradas no estudo de contaminações em solo, tanto na fase de confirmação, como na fase de monitoramento, devido á possibilidade de investigações indiretas e não invasivas em solos e rochas. Neste sentido, este trabalho apresenta o diagnóstico geofísico numa área impactada pelo vazamento de hidrocarbonetos, devido a acidente ferroviário. A área investigada é um trecho de ferrovia localizado no município de Cerquillo (SP), onde ocorreu em 2002 um acidente com vagões que transportavam óleo diesel e está em processo de recuperação desde então. Foi medido o parâmetro físico cargabilidade a partir do método geofísico Polarização Induzida, por meio da técnica de imageamento elétrico. Também foram compilados dados de análises químicas realizadas na área de estudos disponibilizados pela CETESB. Os resultados dos ensaios geofísicos foram comparados com as análises químicas, com o intuito de estabelecer as fases residual e dissolvida e avaliar a evolução da pluma de contaminação.

Abstract – Impacts related to the oil supply in the subsurface are of particular concern to the environment and human health due to degradative aspects and separation in dissolved and residual phases, resulting in an often prolonged residence time. Geophysical methods are tools dedicated to the study of contamination in soil, both in the confirmation phase, as in the monitoring phase, due to the possibility of indirect and non-invasive investigations in soils and rocks. In this sense, this work presents geophysicist diagnosis in an area affected by the leak of hydrocarbons due to railway accident. The study area is a railway stretch in the municipality of Cerquillo (SP), where an accident with wagons carrying diesel oil occurred in 2002 and the area is in recovery process since then. Chargeability was the physical parameter measured from the geophysical method Induced Polarization by means of electrical imaging technique. Chemical analysis data collected in the study area provided by CETESB were also compiled. The results of the geophysical test were compared with the chemical analysis, in order to establish the residual and dissolved phases and evaluate the evolution of the contamination plume.

Palavras-Chave – contaminação, hidrocarboneto, Polarização Induzida.

¹ Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental (FEB/UNESP); Avenida 20-A, 1050, Rio Claro-SP, (11) 996166178, pgjunqueira@hotmail.com

² Professor Assistente Doutor do Dpto de Geologia Aplicada (IGCE/UNESP); Avenida 24-A, 1515, Rio Claro-SP, (19) 3526-9322, moreirac@rc.unesp.br

1 – INTRODUÇÃO

A logística de transporte de hidrocarbonetos no sudeste do Brasil envolve oleodutos que interligam campos produtores aos parques de refino, que posteriormente fazem uso de rodovias para curtas distâncias e ferrovias para longas distâncias no transporte de derivados. O transporte ferroviário é particularmente relevante devido à possibilidade de movimentação de grandes volumes a um custo relativamente baixo (BRASIL, 2014). Neste contexto, acidentes ferroviários frequentemente resultam em contaminações de grande extensão e impacto ambiental.

Existem diversas fontes potenciais de contaminação dos solos, como aterros sanitários e industriais; tanques de armazenamento de substâncias perigosas; cemitérios; instalações de incineração; curtumes; postos de combustíveis; aplicação de pesticidas e fertilizantes na lavoura e a disposição incorreta de suas embalagens; efluentes hídricos da agroindústria e atividades de transporte ferroviário, como por exemplo, no caso de acidentes com transporte de substâncias potencialmente contaminantes (MORINAGA, 2007; DIAS, 1999; CALIJURI & CUNHA, 2013)

As atividades contaminadoras do solo podem ser classificadas como: comercial, industrial, resíduos, postos de combustíveis, acidentes/desconhecida/agricultura. O Texto Explicativo - Relação de áreas contaminadas e reabilitadas no Estado de São Paulo (2014) apontou como a principal atividade contaminadora os postos de combustíveis e registrou 47 pontos referentes à atividade Acidentes/Agricultura/Fonte desconhecida, que representam 1% do total. Os três principais grupos de contaminantes encontrados nas áreas contaminadas são combustíveis líquidos, solventes aromáticos (benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos) e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs).

O processo identificação de áreas contaminadas é composto pelas seguintes etapas: definição da região de interesse, identificação de áreas potencialmente contaminadas, avaliação preliminar e investigação confirmatória. O processo de recuperação de áreas degradadas é composto por seis etapas: investigação detalhada, avaliação de risco, investigação para remediação, projeto de remediação, remediação e monitoramento. Neste manual, a geofísica é indicada como um método não invasivo e não destrutivo de investigação das estruturas de subsuperfície, que pode ser aplicada em diferentes etapas do processo, como investigação confirmatória, detalhada e para remediação e na remediação (CETESB, 2001; CETESB, 1999a; CETESB 1999b).

O emprego da geofísica no gerenciamento de áreas contaminadas possibilita uma análise multipontual e não invasiva, complementar à quantificação de teores por meio de análises químicas. A aplicação desta ferramenta em subsídio ao planejamento de ações de remediação pode proporcionar resultados efetivos e num prazo relativamente reduzido, diante do direcionamento das técnicas de tratamento e locação de poços para áreas onde haja impregnações no solo (fase residual)

que eventualmente haja como fonte secundária de impacto ao aquífero (CETESB, 1999a; LAGO et al, 2006; FACHIN et al, 2006).

A área de estudos apresenta um histórico de acidente ferroviário, onde houve contaminação do solo e água subterrânea, devido ao derramamento de aproximadamente de 240.000 litros de óleo diesel no município de Cerquilha (SP) em abril de 2002. São encontrados três grupos de contaminantes na área de estudo: combustíveis líquidos, solventes aromáticos e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs) (CETESB, 2006).

Esta área é monitorada desde 2002 por meio de análises químicas de água subterrânea. Estes trabalhos apontam oscilações nos teores de contaminantes na água subterrânea, com destaque para o benzeno, mesmo em processo de remediação. Nesse sentido é provável que haja aporte sazonal de contaminantes no aquífero, proveniente de impregnações no solo insaturado. A geofísica permite o estudo da fase residual no solo. (CETESB, 2006).

2 – OBJETIVOS

Este trabalho objetiva o diagnóstico geofísico integrado a dados químicos disponíveis para uma área de estudos no município de Cerquilha – SP, onde houve um vazamento de óleo diesel por acidente em transporte ferroviário.

Os objetivos específicos são:

a) compilar dados químicos disponibilizados pela CETESB em diversas campanhas. Os dados estão disponíveis no Processo CETESB nº PA 06/00204/06, de acesso público.

b) realizar ensaios geofísicos a partir do método Polarização Induzida, por meio da técnica imageamento elétrico em arranjo Wenner-Schlumberger, para definição de contrastes entre solo contaminado e área não contaminada.

c) analisar os resultados obtidos no ensaio geofísico e comparar com as análises químicas, na tentativa de determinação de fases dissolvidas e fases residuais de contaminantes e avaliar a evolução da pluma de contaminação.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Contaminação por Hidrocarbonetos

A recuperação de uma área pode ocorrer por meio da atenuação natural. Esse processo ocorre em qualquer área contaminada e varia em eficiência, a partir do tipo e concentração dos contaminantes e do corpo que eles atingiram. Assim, alcançadas condições favoráveis, diversos

processos físicos, químicos e biológicos passam a agir na área contaminada, sem a intervenção do homem, que possibilitam a redução de massa, toxicidade, mobilidade, volume ou concentrações dos contaminantes no solo ou água subterrânea (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA, 1998; 1999).

A atenuação natural é relevante na degradação de derivados de petróleo, que são passíveis de consumo por organismos presentes em quase todos os ambientes.

O refino do petróleo gera diversos produtos com gasolina, gases combustíveis, parafinas, dentre os quais o diesel, hidrocarboneto onde predomina o benzeno. Esse composto, além de imiscível, tem densidade menor que a da água, portanto, considerado um composto de fase líquida leve não-aquosa (LNAPL) (USEPA, 1998; 1999).

Exemplos de LNAPL são compostos como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno (BTEX), hidrocarbonetos aromáticos de natureza hidrofóbica que ocupam vazios ao redor de partículas de granulometria fina, sob a forma de películas. Assim, em zonas não saturadas de solos, os BTEX ocupam pequenos poros. (NEWELL *et al.*, 1995)

Quando os hidrocarbonetos são submetidos ao processo de biodegradação, são gerados subprodutos muito reativos, que interagem com solutos inorgânicos e minerais no ambiente geológico, fato que caracteriza e delimita áreas contaminadas (HARTER, 1977).

Os compostos permanecem em fase residual e impregnam os grãos minerais próximos à fonte de contaminação, com preenchimento dos poros em detrimento ao oxigênio. Conforme a pluma de contaminação avança em sentido vertical, atinge o nível freático onde é parcialmente convertida em fase dissolvida, com mobilidade próxima à da água. Essa fase passa por processos de dispersão, diluição e dissolução, o que reduz os teores de contaminantes e a toxicidade e aumenta o teor de oxigênio, sob a forma de fase dissolvida.

Sob tais condições, os micro-organismos passam a atuar com agentes biodegradadores, de onde obtém energia e produzem ácidos inorgânicos e hidrocarbonetos de cadeias menores como produtos, até a conversão dos compostos iniciais em gases voláteis e água.

A produção de ácidos em elevadas quantidades pode causar alterações físicas no matriz do solo/rocha, diante da dissolução mineral e aumento da porosidade (McCABE *et al.*, 1987). As frações dissolvidas são incorporadas ao aquífero e provoca um aumento da salinidade da água, quer pode atingir a supersaturação em momentos de grande atividade (BENNETT & SIEGEL, 1987; HIEBERT & BENNETT, 1992).

3.2 – Trabalhos Aplicados de Geofísica em Estudos de Contaminação do Solo

Em uma área localizada no município de Araras, São Paulo, foi realizado um estudo de contaminação no solo por meio dos métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida por Moreira e Braga (2009), onde funcionaram duas indústrias químicas entre 1981 e 1992. Em novembro de 1985 denúncias de odores em poços de abastecimento próximos à área levaram ao estudo e confirmação da contaminação. Análises químicas identificaram os contaminantes 1,2 dicloroetano, benzeno, tolueno, xileno e sais inorgânicos e que a área sofre processo de atenuação natural. O estudo indicou a presença de fase residual solo e áreas em processo de retorno às características naturais do ambiente.

Lago et al (2006) apontam que em uma caracterização de área contaminada, a geofísica é geralmente utilizada pela possibilidade de realizar o mapeamento da extensão da área contaminada, a profundidade da zona saturada e a direção do fluxo subterrâneo. Desta forma, aplicaram diferentes métodos geofísicos (Eletrorresistividade, Polarização Induzida e Potencial Espontâneo), com o objetivo de caracterizar a área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru/SP. A aplicação dos métodos geofísicos permitiu inferir a possibilidade de contaminação, que foi confirmada por ensaios diretos, inclusive indicando concentrações anômalas de metais pesados e alterações de valores de alguns parâmetros físico-químicos em locais indicados através dos métodos geofísicos.

4 – MATERIAIS E MÉTODO

4.1 – Caracterização da Área

4.1.1 – Município de Cerquillo/SP

A área de estudos está localizada no município de Cerquillo, região Centro-Leste do Estado de São Paulo distante 150 km da capital, com uma população de 39.617 habitantes, precisamente na latitude 23°09'54"S e longitude 47°44'37"O. O município possui área territorial de 128,86 km², dos quais apenas 31,29 km² estão em zona urbana. A densidade demográfica é de 309,98 habitantes/km², bem acima da densidade demográfica média do Estado de São Paulo, que é de 116,20 habitantes/km² (IBGE, 2014).

Cerquillo está localizado na zona do Médio Tietê, que possui como principais redes de drenagem os Rios Sorocaba e Capivari, afluentes do Rio Tietê, principal corpo hídrico da região. Em relação à topografia o município apresenta relevo acidentado, pertencente à província da

depressão periférica, em área predominantemente composta por relevo de morrotes alongados e espigões (PERINOTTO, 1987).

O município de Cerquilha está na região nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, que ocupa toda a porção centro-oeste do Estado de São Paulo. De acordo com Massoli *et al.* (1986), esta unidade geotectônica é preenchida por sedimentos que datam desde o Paleozóico até o Cretáceo e está localizada sobre o Embasamento Cristalino. No início a região da bacia era ocupada pelo mar, que em alguns períodos recuava, possibilitando a formação de ambientes litorâneos e continentais. Essa dinâmica resultou em sedimentos marinhos, profundos, raros ou litorâneos e sedimentos continentais, com influência ou não de degelo de calotas glaciais. Diversos fatores incidiram nesses sedimentos, que possibilitou a geração diferentes rochas, como por exemplo as que compõem o Aquífero Tubarão, presente na área. As principais unidades geológicas que compõem a região são o Grupo Itararé, depósitos aluvionares recentes e a Formação Tatuí, que compõe majoritariamente a área de estudo é composta principalmente de argilitos e siltitos, com lentes e níveis de arenitos e calcários (MASSOLI *et al.* 1986; IRITANI & EZAKI, 2012; DAE/IG/IPT/CPRM, 2005; PERINOTTO & LINO, 2016).

Na área de estudos foram realizadas sondagens que permitiram a elaboração de um perfil geológico local. O perfil é constituído, do topo para base, por sedimentos da Formação Tatuí, com acabamento plano paralelo. Nas camadas menos rasas predominam grãos de silte e nas mais profundas de argila, devido a processo de lixiviação e acumulação em camadas mais profundas. Há a presença de lentes de arenitos finos a muito finos. A primeira camada é inconsolidada e composta por um siltito marrom avermelhado, decorrente de alterações *in situ*, por preenchimento de uma voçoroca e cultivo de cana-de-açúcar.

Essa camada vai até 4 metros de profundidade. A camada sotoposta a essa é composta por um siltito cinza esverdeado, com espessura que varia de 1 a 3 metros e que ocorre a profundidades de 2 a 8 metros. A terceira camada mais profunda apresenta baixos teores de umidade e é composta por argilito marrom ou esverdeado, com espessura que varia de 4 a 6 metros e que ocorre a profundidades de 4 a 7 metros. A partir de 14 metros de profundidade esses materiais estão são e muito bem compactados. Conforme a profundidade aumenta no perfil, os materiais ficam mais compactos e plásticos (CETESB, 2006).

O aquífero presente na área de estudos é do tipo livre ou freático, ou seja, ele está próximo à superfície, e suas zonas não saturada e saturada têm contato direto, que faz com que o aquífero fique submetido à pressão atmosférica e com recarga direta da água da chuva que infiltra no solo. O horizonte não saturado ocorre nas duas primeiras camadas, compostas por material inconsolidado e siltito. E o ambiente saturado ocorre no argilito. O nível d'água subterrânea varia entre 8 e 10

metros de profundidade nas zonas topograficamente mais altas (arredores na ferrovia) e de 4 a 5 metros nas zonas mais deprimidas.

Ensaio de caracterização hidráulica foram realizados nos entornos da ferrovia e apresentaram valores no horizonte saturado em termos de condutividade hidráulica entre $1,47 \times 10^{-4}$ cm/s e $7,267 \times 10^{-4}$ cm/s. O fluxo da água subterrânea da área tem sentido sudoeste, em direção ao córrego Figueira Velha, área de descarga do aquífero livre em questão, na qual flui da região topograficamente mais alta (região da ferrovia) para a mais baixa. Os gradientes hidráulicos variam entre os extremos de 0,032 m/m, na porção centro-norte da área e 0,029 m/m na porção sul. A área de estudos é um vale aberto com desnível de 5 metros na direção oeste e 30 metros na direção sul. Nos arredores da ferrovia, a superfície é praticamente plana. (CETESB, 2006; IRITANI & EZAKI, 2012).

4.1.2 – Histórico do Acidente

As informações referentes ao histórico do evento foram extraídas do processo CETESB PA 06/00204/06, material de acesso público junto a regional da CETESB de Itu/SP (CETESB, 2006; 2014).

No dia 28/04/2002 ocorreu um acidente na estrada de ferro Cerquilha – Laranjal Paulista, Kms 164/14 a 166/15 operada pela Ferroban – Ferrovias Bandeirantes S.A. Essa área está localizada no bairro Taquaral, área rural a noroeste da cidade de Cerquilha (SP).

A composição que fazia o transporte de óleo combustível despreendeu-se dos trilhos e tombou, o que ocasionou o derramamento de cerca de 240.000 litros. Quatro dos oito vagões da composição tiveram praticamente toda sua carga vazada, com perda parcial nos demais.

A área impactada está situada num divisor de águas entre duas bacias hidrográficas. Ao norte ocorre a bacia das nascentes do córrego Taquaral, afluente do Rio Sorocaba. Ao sul, a bacia das nascentes do córrego Figueira Velha, afluente do Rio Tietê. O escoamento superficial de óleo diesel seguiu o relevo do terreno e a estrutura da linha férrea. Nenhuma nascente ou drenagem foi atingida diretamente e todo o produto infiltrou no solo. A zona que indica infiltração do óleo diesel está localizada ao longo da estrada de ferro. Sentido sudoeste e nordeste da área diretamente ocupada está uma plantação de cana-de-açúcar e sentido norte residências e comércio.

O sistema emergencial de remediação começou a operar em 10/05/2002 e após dois meses, foram recuperados 1.364 litros do contaminante presente em fase livre sobrenadante na água subterrânea. Posteriormente foi dado início ao monitoramento de nível de água subterrânea e de fase livre de combustível em poços instalados e nas cacimbas de granjas localizadas próximas à área do

derramamento. De 2002 a 2004 esse monitoramento era executado duas vezes por semana, associado ao bombeamento da fase livre.

No dia 23/06/2005 foi assinado um Termo de Ajustamento de Conduto – TAC entre a Ferroban e o Ministério Público, onde foram acordadas medidas de segurança, controle e remediação ambiental, que deviam ser cumpridas a partir de então pela empresa. Assim, houve ampliação do sistema de monitoramento, extração de fase livre e implantação de sistemas de remediação (Sistema de Extração de Fase Dupla – DPE e Sistema de Extração de Vapor – SVE).

Os sistemas de remediação foram modificados em 2007 a fim de otimizar a degradação do produto em fase residual. O sistema de remediação DPE foi substituído pelo Sistema Extração Multi-Fásica – MPE e o sistema SVE foi modificado para operar com Sistema Bioaeração *in situ*.

Em 2008 os sistemas de remediação foram desinstalados devido à ausência de fase livre do contaminante. A área continuou a ser monitorada e foi identificada fase residual intermitente e sazonal e fase livre intermitente e sazonal, com remoção manual até setembro de 2009, quando foi instalado um sistema de MPE móvel.

Em novembro de 2011 um novo sistema entrou em operação para remoção de fase livre e residual, o Sistema Bombeamento Simples aliado ao Sistema Lavagem do Solo *in situ*. Isso porque a partir da desmobilização do sistema de remediação em 2008, o monitoramento da área indicou aporte recorrente e pontual de fase livre nos poços de monitoramento. Houve a extração contínua da fase livre, porém persistia o aporte sazonal de contaminante, o que indica a presença de fase residual. Assim foram realizadas sondagens no solo impactado e o resultado indicou a presença de contaminante sobrenadante na água.

O surfactante injetado na área é o Lauril Sulfato de Sódio (SDS) em solução 2%, injetado por doze poços. A fase livre e residual são bombeadas junto com a água subterrânea por oito poços e a água retorna pelo sistema de injeção.

Até o primeiro semestre de 2014, o monitoramento apontou que a espessura de contaminante em fase livre teve uma redução significativa, porém não o suficiente para interromper o sistema de remediação.

4.1.3 – Métodos Geofísicos

A Polarização Induzida é um fenômeno elétrico provocado pela transmissão de corrente no solo, observado como uma resposta defasada de voltagem nos materiais terrestres (SUMNER, 1976). A curva de decaimento da Polarização Induzida é resultado do retorno ao estado original de

campo elétrico e a descarga de energia armazenada de diversas formas: mecânica, elétrica ou química. O armazenamento desta energia resulta de:

- Variações entre condutividades iônicas e eletrônicas, quando estão presentes minerais metálicos, denominada polarização de eletrodo;

- Variação da mobilidade de íons em fluídos presentes na rocha, que ocorre mesmo na ausência de minerais metálicos, denominada polarização de membrana.

A polarização de membrana é um fenômeno associado a rochas carentes em minerais metálicos, e com certa quantidade de argilominerais. A cargabilidade ocorre devido a uma diferença de mobilidade entre ânions e cátions, onde ao redor dos argilominerais ocorre uma nuvem de íons negativos, em semelhança a uma membrana (KEAREY, 2002), (Figura 1).

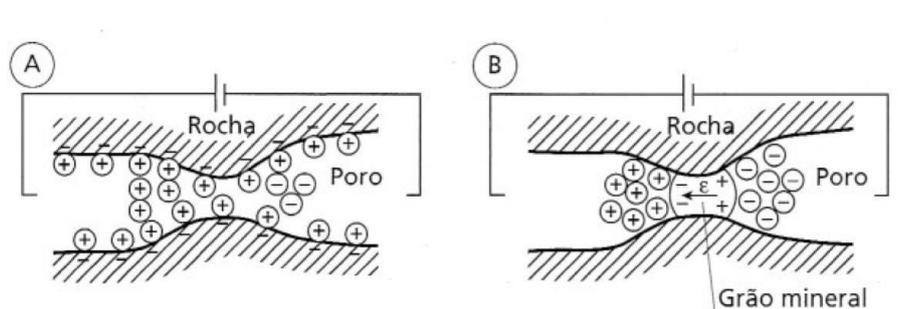


Figura 1. Demonstração da distribuição dos íons no fenômeno polarização de membrana (A) e polarização metálica ou eletrônica (B). Fonte: Kearey, 2002.

Uma das formas de medida da Polarização Induzida no domínio do tempo é comparar a tensão residual $V(t)$, existente em um tempo t após o corte de corrente, com a tensão constante V_c , durante o intervalo de fluxo de corrente. Contudo, $V(t)$ deve ser medido antes da corrente residual decair acentuadamente (Equação 1).

$$M = \frac{1}{V_c} \int_{t_2}^{t_1} V_t dt \quad (\text{Equação 1})$$

Existem diversas técnicas de aplicação dos métodos, entre elas o imageamento elétrico, que é proposto no presente trabalho. A técnica consiste em medidas efetuadas ao longo de uma linha de aquisição, por meio de eletrodos de corrente e potencial, separados equidistantes. Conforme os eletrodos são movimentados é possível investigar diferentes profundidades, o que gera uma investigação em duas dimensões, distância e profundidade.

O movimento dos eletrodos em apenas um sentido possibilita a leitura dos parâmetros em diversas profundidades. Existem diversas posições geométricas para os eletrodos sobre a superfície do terreno chamadas arranjos. O presente trabalho propõe o uso do arranjo Wenner-Schlumberger, que é sensível a estruturas tanto horizontais como verticais, caracterizado por pares de eletrodos de potencial no centro e eletrodos de corrente nas extremidades, com espaçamento constante.

4.2 – Aquisição e Processamento

Os ensaios geofísicos foram realizados na faixa de domínio da ferrovia, composta de no mínimo quinze metros para cada lado da via férrea (BRASIL, 2013).

Os resultados das análises químicas das diversas campanhas de monitoramento e seus produtos estão disponíveis no processo CETESB PA 06/00204/06 e foram utilizados para gerar os modelos de pluma de contaminação da área de 2011 a 2014.

Para a etapa de aquisição de dados foi feita uma atividade de campo, com a realização de um levantamento geofísico. O método aplicado foi Polarização Induzida.

A técnica de investigação empregada foi o imageamento elétrico, com oito linhas em arranjo Wenner-Schlumberger de 120 m de comprimento cada e 6 m de espaçamento entre eletrodos.

A primeira e segunda linhas foram posicionadas paralelas à ferrovia, uma de cada lado, de forma a cobrir toda a extensão longitudinal da pluma de contaminação referente ao ano de 2014. Próximo a essas linhas é possível encontrar diversos poços de monitoramento e remediação instalados no local pela empresa responsável pela descontaminação da área, além da estação de tratamento. As linhas 3, 4, 5 e 6 foram realizadas paralelas as linhas 1 e 2, no sentido sudoeste, onde há uma plantação de cana-de-açúcar. Assim, as linhas também cobriram toda a extensão da pluma no sentido transversal e foram posicionadas distantes umas das outras em 6 m. No dia da aquisição de dados a plantação estava cortada e baixa.

Uma sétima linha foi realizada a montante do local contaminado para servir como referência. Ela foi posicionada a nordeste da área contaminada, paralela à estrada asfaltada que está a montante da região do acidente, ao lado de uma plantação de cana-de-açúcar.

Os eletrodos utilizados foram do tipo cerâmicos não polarizáveis. Eles consistem de um recipiente cilíndrico com base porosa, preenchido por uma solução supersaturada de CuSO_4 , com uma haste de cobre no seu interior no eixo longitudinal, por onde o eletrodo é conectado ao cabo de transmissão

A montagem de cada linha foi feita com marcações de 6 em 6 metros com o auxílio de uma trena, para identificação da posição dos eletrodos. Uma enxada foi usada para deixar plano os pontos de estabelecimento de eletrodos e permitir seu contato diretamente com o solo. Assim, foi possível alocar os eletrodos e preenche-los com a solução supersaturada de CuSO_4 , sem que eles tombassem. Além disso, os eletrodos foram umedecidos para a redução da resistência de contato. Após isso, o local já estava pronto para a alocação do cabo transmissor, que foi conectado à haste metálica dos eletrodos, de forma a manter o espaçamento estabelecido e uma de suas extremidades conectada ao equipamento de aquisição de dados geofísicos, deixa linha pronta para medições.

Na aquisição de dados geofísicos o equipamento utilizado foi o Terrameter LS, fabricado pela ABEM Instrument (Suécia) e disponibilizado pelo Laboratório de Geofísica do Departamento de Geologia Aplicada da Universidade Estadual Paulista (UNESP) campus de Rio Claro. O mesmo equipamento permite realizar estudos geofísicos através dos métodos Eletroresistividade (ER), Potencial Espontâneo (SP) e Polarização Induzida (IP). O equipamento foi calibrado com os seguintes valores para obtenção das medidas em campo: corrente mínima de 50 mA e máxima de 500 mA, tempo de transmissão de corrente de 1 segundo, duas janelas de leitura fixas e consecutivas de 100 ms e início de janela de leitura após o corte de corrente (delay time) de 0,4 segundos (ABEM, 2014).

Os dados geofísicos de campo foram processados no *software* Res2dinv. Esse software permite a geração de modelos inversão bidimensionais para análise qualitativa, através de dados quantitativos de campo. O modelo gerado são seções de cargaabilidade em termos de distância x profundidade, com escala gráfica logarítmica e intervalos de interpolação de valores de cor.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das medidas resultantes das análises químicas realizadas na área de estudo, os relatórios presentes no processo CETESB PA 06/00204/06, apresentam modelos de plumas de contaminação. A Figura 2 representa uma compilação de plumas de contaminação para os anos de 2011 a 2014 baseadas nos valores de espessura aparente da fase livre.



Figura 2. Evolução da pluma de contaminação de 2011 a 2014 em valores de espessura aparente de fase livre. Fonte: Autor

Em 2011, a pluma de contaminação possuía formato de “U”, com seu eixo longitudinal correspondente com a extensão da linha férrea e espessura da fase livre variando entre 0 e 0,5 metros. Há dois pontos com maiores espessuras. Um no sentido sudeste, próximo de onde tombaram três dos quatro vagões que vazaram totalmente. Nesse ponto a espessura de fase livre chega a 1,5 metros. E outro a noroeste, onde a espessura de fase livre chega a 1 metro.

Nos anos seguintes a evolução da pluma de contaminação aconteceu primeiro na redução dos níveis mais espessos de fase livre, para depois regredir a pluma de forma geral. Assim, de 2011 para 2012 o ponto a noroeste regride a espessura, para valores que correspondem a maior parte da pluma e o ponto a sudeste se desloca no sentido do fluxo de água subterrânea. De 2012 para 2013, esse ponto também regride a espessura para valores que correspondem a maior parte da pluma. E a partir daí a pluma começa a regredir de forma geral, alterando seu formato.

A redução nos valores de espessura aparente acontece devido ao processo de atenuação natural e a remoção direta através do sistema de remediação Bombeamento Simples.

As linhas para realização do ensaio geofísico foram posicionadas de modo a atingir toda extensão longitudinal e transversal da área contaminada, baseado nos modelos de pluma de contaminação.

O modelo de inversão bidimensional para análise qualitativa dos dados geofísicos está apresentado em seções de cargabilidade em termos da distância x profundidade, com cores quentes representando maiores valores de cargabilidade (Figura 3).

As seções de cargabilidade apresentam valores mais baixos nas linhas 1 e 2 posicionadas paralelas à ferrovia, entre zero e 0,905 milissegundos (ms). E esses valores vão aumentando até 1,64ms nas próximas linhas, conforme elas se distanciam da linha de trem, se aproximando da feição da linha de referência. Na linha 1, próximo a superfície, a seção apresenta uma zona com cores mais quentes, com valores mais elevados de cargabilidade, que variam entre 1,9 ms a 3,99 ms. Esse zona permanece mais evidente na seção da linha 2.

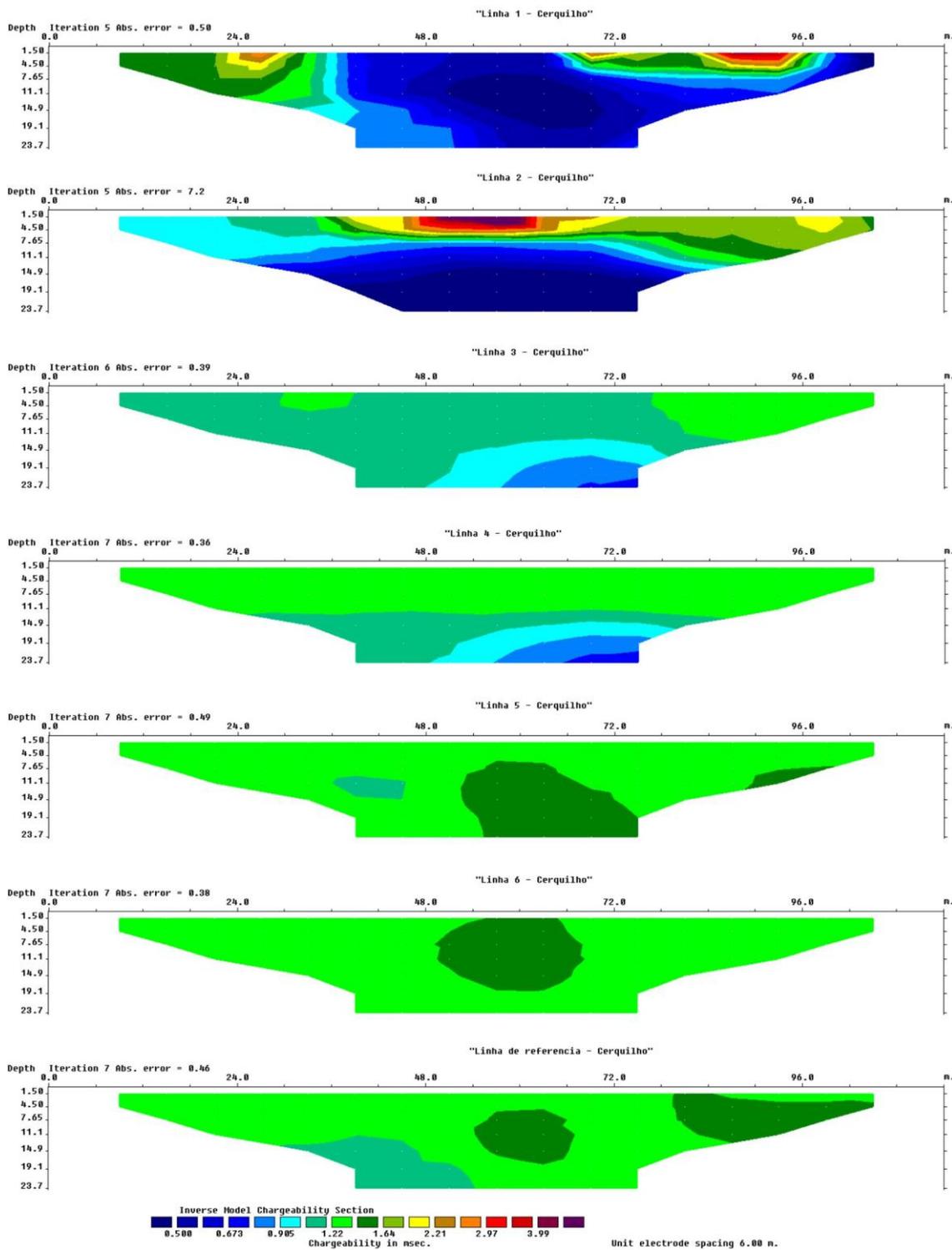


Figura 3. Modelo de inversão de cargabilidade. Fonte: Autor

6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados corroboram com os relatórios presentes no processo CETESB PA 06/00204/06, indicando que a pluma de contaminação está regredindo. A partir do resultado do ensaio geofísico é possível ver uma clara distinção entre o ambiente contaminado, próximo as linhas 1 e 2 e o não contaminado. Além disso, ele indica diferentes zonas da pluma de contaminação, como a área por

onde o contaminante foi absorvido pelo solo e de fase residual e um ambiente sobre maior influência da oxidação e de fase livre.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEM INSTRUMENT AB. **Terrameter LS - Manual de Instrucción**. ABEM Product Number 33 3000 95. 2011. Disponível em: < <http://www.abem.se/support/downloads/archive/user-manuals/guia-de-usuario-terrameter-ls-20120628.pdf> >. Acesso em: 15 de jun. de 2016.

BENNETT P.; SIEGEL D. I. **Increased solubility of quartz in water due to complexing by organic compounds**. Nature, 326, 684-686. 1987.

BRASIL. **Decreto n. 7929, de 18 de fevereiro de 2013. Regulamenta a Lei nº 11.483, de 31 de maio de 2007, no que se refere à avaliação da vocação logística dos imóveis não operacionais da extinta Rede Ferroviária Federal S.A. - RFFSA; altera o art. 4º do Decreto nº 6.018, de 22 de janeiro de 2007; e dá outras providências**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2013/Decreto/D7929.htm>. Acesso em 18 de novembro de 2014.

BRASIL – MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Transporte Ferroviário**. 2014. Disponível em: < <http://www.transportes.gov.br/transporte-ferroviario-relevancia.html> >. Acesso em: 02 de jun. de 2016.

CALIJURI, M.C.; CUNHA, D.G.F. **Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier. 2013 p.338.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Métodos Geofísicos**. Projeto CETESB – GTZ. 1999a. Disponível em: < <http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2013/11/6200.pdf> >. Acesso em: 02 de jun. de 2016.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **O gerenciamento de áreas contaminadas**. Projeto CETESB – GTZ. 1999b. Disponível em: < <http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2013/11/6000.pdf> >. Acesso em: 02 de jun. de 2016.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. 2001.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Processo nº PA 06/00204/06. FERROBAN – Ferrovias Bandeirantes**. Itu, 2006.v.2.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Processo nº PA 06/00204/06. FERROBAN – Ferrovias Bandeirantes**. Itu, 2014.

- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Texto Explicativo - Relação de áreas contaminadas e reabilitadas no Estado de São Paulo**. 2014.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE); INSTITUTO GEOLÓGICO (IG); INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT); SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo**. Escala 1:1.000.000. Nota explicativa, 2005.
- DIAS, M. C. O. **Manual de impactos ambientais: orientações básicas sobre aspectos ambientais de atividades produtivas**. Fortaleza: Banco do Nordeste, 1999. 297p.
- FACHIN, S. J. S.; HUBER, F.; SHIRAIWA, S.; BORGES, W. R.; MIGLIORINI, R. B. **Aplicação de métodos geofísicos para identificar áreas contaminadas por resíduos de um curtume**. Rev. Bras. Geof. vol.24 no.1 São Paulo Jan./Mar. 2006
- HARTER, R.D. Reactions of minerals with organic compounds in soil. IN: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Eds.). **Minerals in the soil environment**. Madison, 1977, p. 709-739.
- HIEBERT, F. K.; BENNETT, P. C. **Microbial control of Silicate Weathering in Organic-Rich Ground Water**. Science: American Association for the Advancement of Science, 258: 278-281, 1992.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **e-cidades**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em 15 de maio de 2014.
- IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SMA, 2012. 104p. 3a edição. p20-26, 31-37.
- LAGO, A. L.; ELIS, V. R.; GIACHETI, H. L. **Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru – SP**. Revista Brasileira de Geofísica 24(3): 357-374. 2006. ISSN 0102-261X.
- KEAREY, P. **Geofísica de Exploração (tradução de Maria Cristina Moreira Coelho)**. Oficina de Textos. 429pp, 2002.
- MASSOLI, Marcos et al. **Contribuição à geologia do município de Cerquillo, SP**. Rev. Inst. Geol. [online]. 1986, vol.7, n.1-2, pp. 17-30. ISSN 0100-929X.
- McCABE, C.; SASSEN, R.; SAFFER, B. **Occurrence of secondary magnetite within biodegraded oil**. *Geology*, v. 15, n.1, p. 7-10, 1987.
- MOREIRA, A. C.; BRAGA, A. C. O. **Aplicação de métodos geofísicos no monitoramento de área contaminada sob atenuação natural**. Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Vol 14(2), 257-264, 2009.

- MORINAGA, C. M. **Recuperação de áreas contaminadas: um novo desafio para projetos paisagísticos.** Dissertação. Faculdades de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2007. 152 p.
- NEWELL C. J.; ACREE S. A.; ROSS, R. R.; HULLING S. G. **Light Nonaqueous Phase Liquids.** Ground Water Issue, Environmental Protection Agency. Oklahoma, 25p. 1995.
- PERINOTTO, J.A.J. 1987. **Análise Estratigráfica da Sequencia Portadora de Carvão na Região de Cerquilha (SP).** São Paulo. 76 p. (Dissertação de Mestrado, IG/USP).
- PERINOTTO, J. A.; LINO, I. C. **Geologia, Recursos Minerais e Passivos Ambientais.** Atlas Ambiental da Bacia do Rio Corumbataí. Disponível em: < <http://ceapla2.rc.unesp.br/atlas/geologia.php> >. Acesso em: 09 de jun. de 2016.
- SUMNER, J. **Principles of induced polarization for geophysical exploration.** Elsevier Scientific. Amsterdam, 277pp, 1976
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Microbial processes affecting monitored natural attenuation of contaminants in the subsurface.** EPA/540/S-99/001. Ada, Oklahoma, 1999.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Technical Protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in ground water.** EPA/600/R-98/128. Washington, DC, 1998.