

MÉTODO DE RESISTIVIDADE CAPACITIVA PARA DETECÇÃO DE CONTAMINAÇÃO ORGÂNICA E INORGÂNICA EM ÁREA DE MANEJO DE RESÍDUOS DOMILICIARES

CAPACITIVE RESISTIVITY METHOD FOR DETECTION OF ORGANIC AND INORGANIC CONTAMINATION IN A DOMESTIC WASTE MANAGEMENT AREA

Wagner França AQUINO, Paulo Sérgio TONELLO

Universidade Estadual Paulista - UNESP, Campus Sorocaba. Avenida Três de Março, 511 - Alto da Boa Vista, Sorocaba – SP.
E-mails: wagnergpr@gmail.com; paulo.tonello@unesp.br

Introdução
Área de estudo
Materiais e métodos
Método de Resistividade Capacitiva
Aquisição e processamento de dados
Apresentação e discussão dos resultados
Considerações finais
Referências

RESUMO - Neste trabalho, são apresentados os aspectos teóricos e os resultados obtidos pela aplicação do método de Resistividade Capacitiva, através da técnica de imageamento elétrico, em área comprovadamente contaminada. As variações de resistividades elétricas medidas por essa metodologia geofísica inovativa possibilitaram, através da detecção de anomalias de altos e baixos valores, discriminar a presença de compostos orgânicos e inorgânicos em subsuperfície, decorrente da infiltração no solo de combustível e chorume, respectivamente. Os posicionamentos das anomalias definidos neste levantamento geofísico puderam ser correlacionados às fontes potenciais de contaminação existentes na área e que são representadas pela unidade de abastecimento e lubrificação e os locais de manejo e transbordo de resíduos domiciliares. Além dessas anomalias ambientais, nas seções geofísicas obtidas também são identificadas feições associadas aos raios de influência dos poços de bombeamento instalados para a remediação do local, apontando suas eficiências ou limitações para a remoção da água subterrânea contaminada. Portanto, os resultados obtidos e as interpretações aqui apresentadas confirmam a potencialidade do método de Resistividade Capacitiva neste tipo de aplicação e sua utilidade para o gerenciamento ambiental do caso.

Palavras-chave: Método de Resistividade Capacitiva. Resistividades elétricas. Compostos orgânicos e inorgânicos.

ABSTRACT - In this work, the theoretical aspects and the results obtained by the application of the Capacitive Resistivity method, through the electrical imaging technique, in a proven contaminated area are presented. The variations in electrical resistivities measured by this innovative geophysical methodology made it possible, through the detection of anomalies of high and low values, to discriminate the presence of organic and inorganic compounds in the subsurface, due to the infiltration in the soil of fuel and leachate, respectively. The positioning of the anomalies defined in this geophysical survey is correlated to the potential sources of contamination existing in the area and which are represented by the supply and lubrication unit and the places for handling and transferring domestic waste. In addition to these environmental anomalies, in the images obtained, features associated with the zones of influence of the pumping wells installed for remediation of the site are also identified, pointing out their efficiencies or limitations for the removal of contaminated groundwater. Therefore, the results obtained confirm the potential of the Capacitive Resistivity method in this type of application and its usefulness for the environmental management of the case.

Keywords: Capacitive Resistivity Method. Electrical resistivities. Organic and inorganic compounds.

INTRODUÇÃO

Ao serem citados os impactos causados à qualidade dos solos e água subterrânea decorrente de manejo incorreto ou descartes irregulares de resíduos domésticos, frequentemente há associação direta com a contaminação em subsuperfície provocada pela infiltração e lixiviação de chorume, resultado da decomposição dos materiais orgânicos, mas que também podem conter altas concentrações de sais e ácidos orgânicos e inorgânicos, além de metais como chumbo, zinco, cádmio, arsênio, cromo, manganês, dentre outros (Muñoz, 2002), o que implica na possibilidade de sua detecção e mapeamento por métodos geofísicos em função da geração de anomalias de

baixas resistividades elétricas, como constatado por Bortolin & Malagutti Filho (2012).

No estudo aqui apresentado, a eventual contaminação subterrânea por infiltração de chorume das atividades de transbordo de resíduos domiciliares para as unidades de armazenamento provisório (fontes potenciais) não havia sido considerada para confirmação e muito menos monitorada, em detrimento da constatação comprovada da ocorrência de vazamentos de hidrocarbonetos combustíveis a partir dos locais de abastecimento e lubrificação de veículos, que demandaram um diagnóstico mais direcionado do passivo ambiental existente e atividades de

monitoramento apenas para os compostos orgânicos, o que, conseqüentemente, aponta que as ações para diagnóstico ambiental do caso em questão deveriam ter sido mais abrangentes e melhor gerenciadas.

Para maior compreensão dos resultados aqui registrados dos compostos orgânicos presentes, é importante descrever o comportamento dos combustíveis após infiltração em subsuperfície e que condiciona a forma como se encontram na zona não saturada e saturada, e, de acordo com Fetter (2001), por serem compostos imiscíveis e menos densos que a água subterrânea (*light non aqueous phase liquid – LNAPL*) estão associadas à fase livre, que é o produto sobrenadante em estado puro na água subterrânea, à fase adsorvida, que pode estar presente na matéria orgânica na zona saturada e não saturada, ou à fase residual, retida nos poros dos solos sob a forma de glóbulos desconectados, e, por possuírem maiores concentrações que as fase dissolvidas e gasosas, apresentam maiores possibilidades de detecção por métodos geofísicos (Moreira et al., 2019).

É imprescindível mencionar que, nesta pesquisa, é empregada uma metodologia geofísica inovativa para medição das resistividades elétricas do terreno, aqui representada pela aplicação do método de Resistividade Capacitiva (RC), cujos princípios se fundamentam, inicialmente, na

Eletroresistividade (galvânica), porém, segundo Kuras (2002), possuidor de características distintas e que o individualiza desta, como será visto mais adiante.

Assim, de maneira geral, o levantamento geofísico executado na área em estudo teve por objetivo o mapeamento dos principais focos existentes de contaminação orgânica e inorgânica com intuito de se ampliar a rede de poços de monitoramento e para definição de mais pontos de bombeamento, além dos poços já instalados de extração de água subterrânea contaminada para remediação.

Por outro lado, a importância da metodologia de Resistividade Capacitiva aqui reportada está no fato de ser utilizada para investigar a presença simultânea de contaminantes com características físico-químicas diferentes, com formas e ocorrências de contaminação distintas, e na possibilidade de segregação de suas identificações através da detecção de anomalias de baixas resistividades elétricas para o chorume, bem como de anomalias de maiores resistividades para os compostos combustíveis, devendo, também, ser destacada a condição do local, totalmente impermeabilizado por concreto armado e asfalto, o que dificultaria sobremaneira o emprego convencional do método de Eletroresistividade por meio de cravação de eletrodos.

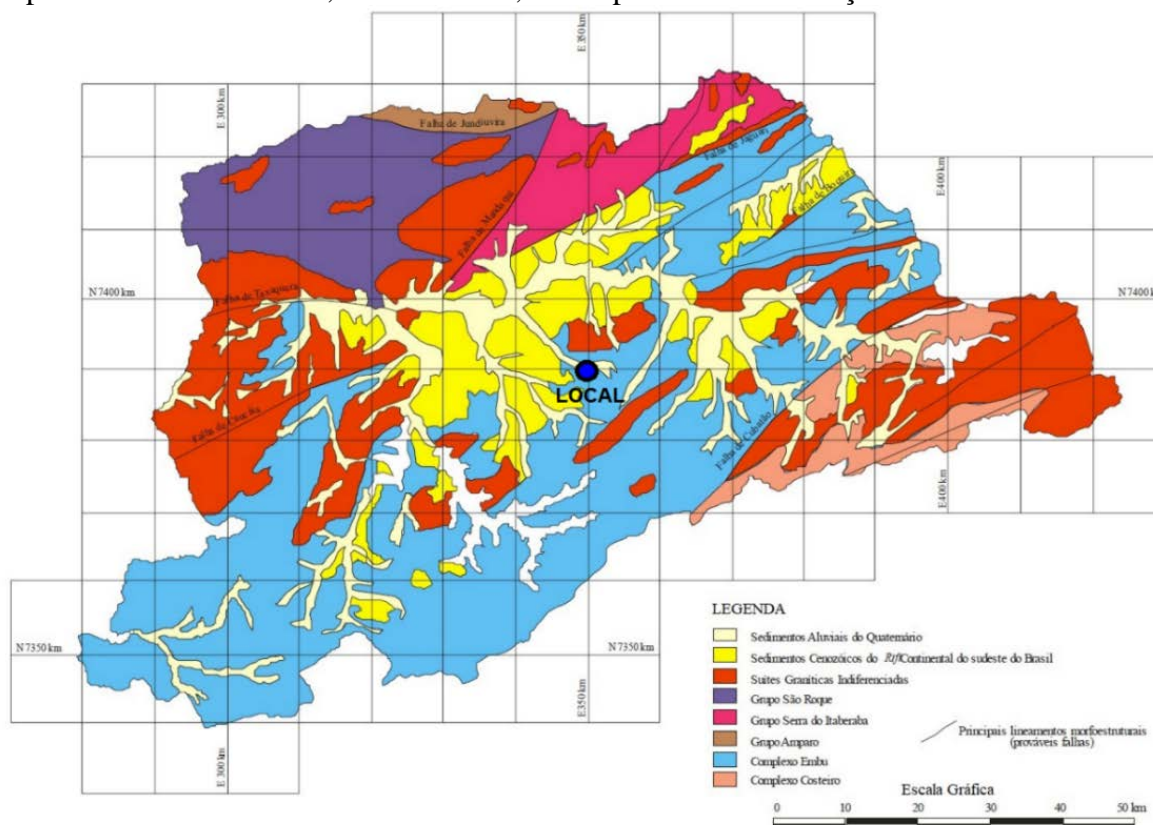


Figura - Localização da área em mapa geológico (adaptado de Gurgueira, 2013).

ÁREA DE ESTUDO

A área do estudo em questão se situa na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), mais especificamente em várzea de rio (Figura 1), onde a litologia presente, conforme sondagens realizadas no local, se compõe de sedimentos quaternários, predominantemente, argilosos e siltosos, como também arenosos.

Como já descrito, os trabalhos de investigação confirmatória e monitoramento nos poços instalados na área investigada, decorrente da constatação de vazamentos de combustíveis antes dos levantamentos geofísicos aqui desenvolvidos, se voltaram exclusivamente para o acompanhamento da propagação e remediação da pluma de hidrocarbonetos. Neste contexto, portanto, observa-se que a contaminação inorgânica, provavelmente existente em face das atividades de transbordo de resíduos para contêineres de armazenamento em superfície e infiltração de chorume no pavimento local (fontes potenciais), não foi contemplada no monitoramento

realizado ao longo do tempo, sendo disponíveis apenas os dados de presença dos hidrocarbonetos na água subterrânea nos diagnósticos realizados.

Em relação às porções internas e externas da área avaliada, estas apresentam grande variação do nível d'água, com sentido de fluxo subterrâneo para norte de acordo às medições efetuadas nos poços de monitoramento instalados no local, onde se evidenciaram também indícios de contaminação orgânica na água subterrânea, e que estão compiladas na tabela 1. Nesta época, análises químicas realizadas em amostras coletadas nesses poços de monitoramento confirmaram a presença de pluma de contaminantes orgânicos, tanto em fase livre (fase sobrenadante), como em fase dissolvida, decorrente dos possíveis vazamentos e/ou infiltrações de óleo e de combustível dos setores de abastecimento e de lubrificação de caminhões existentes no local, cujas abrangências são apresentadas a seguir na figura 2.

Tabela 1 - Medidas nos poços de monitoramento - março de 2018.

Poço de monitoramento	Profundidade do poço (m)	Cota topográfica relativa (m)	Nível d'água medido (m)	Carga hidráulica (m)	Espessura de fase livre (m)
PM-01	11,50	100,23	8,45	91,78	-
PM-02	12,50	101,27	9,45	91,82	0,03
PM-03	12,05	100,80	9,12	91,68	-
PM-04	10,51	100,20	9,24	90,96	oleosidade
PM-05	12,00	99,75	9,38	90,37	oleosidade
PM-06	11,90	99,91	9,54	90,37	-
PM-08	12,34	100,71	9,72	90,99	-
PM-09	12,70	99,70	9,64	90,06	0,03
PM-10	12,20	100,05	9,32	90,73	-
PM-11	3,11	90,52	0,1	90,42	-
PM-12	3,60	90,68	1,04	89,64	-
PM-13	3,50	91,30	2,08	89,22	oleosidade
PM-14	3,01	89,80	0,02	89,78	-
PM-15	2,99	88,10	0,25	87,85	-
PM-16	4,01	91,80	3,34	88,46	-
PM-17	3,40	88,20	0,00	88,20	-
PM-18	10,50	98,30	8,31	89,99	oleosidade
PM-19	10,76	98,10	7,93	90,17	-
PM-20	9,97	102,50	7,05	95,45	-
PM-21	11,75	-	10,33	-	0,47

MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com Loke (1999), os métodos geofísicos que trabalham com a resistividade elétrica dos materiais geológicos (ou sua inversa condutividade elétrica) se fundamentam no fato que solos e rochas possuem poros e/ou fissuras em proporção maior ou menor, que podem estar ocupados total ou parcialmente por eletrólitos, do que resulta se comportarem como condutores iônicos com resistividade elétrica muito variável conforme o caso, como pode ser observado nos

valores para alguns materiais geológicos apresentados na tabela 2, refletindo, assim, os diferentes graus de saturação existentes em função de suas porosidades e/ou permeabilidades. Nesta tabela, também constam algumas substâncias inorgânicas e orgânicas, potencialmente contaminantes quando presentes em altas concentrações em subsuperfície, e que apresentam baixos e altos valores de resistividades elétricas, respectivamente.

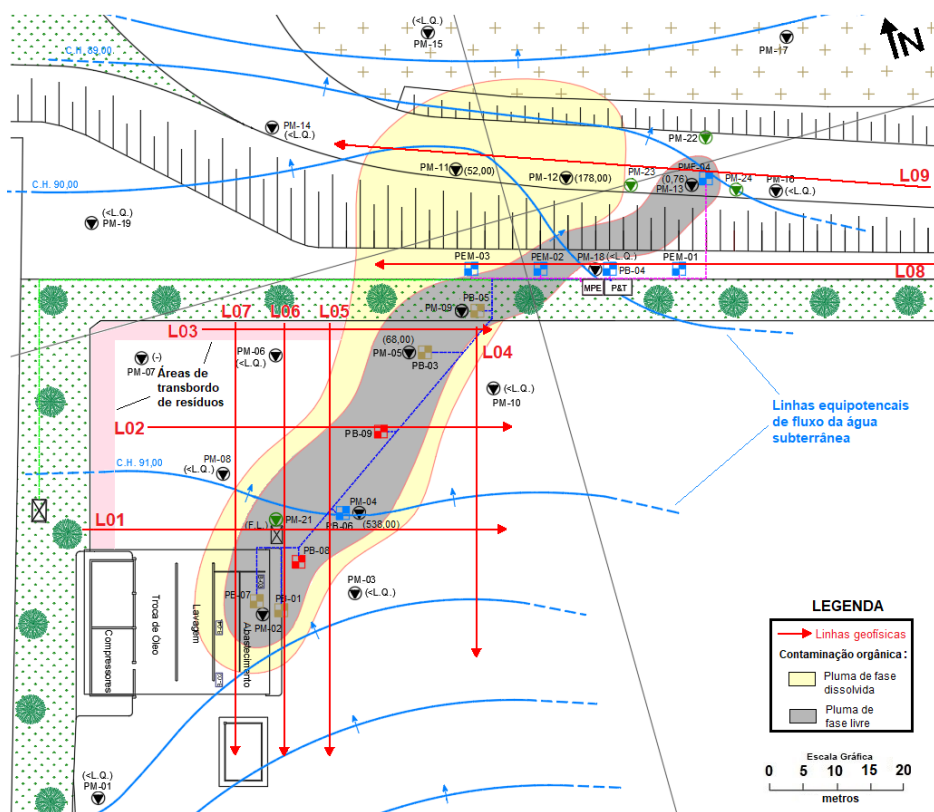


Figura 2 - Plumas orgânicas mapeadas e localização das linhas geofísicas.

Portanto, através do emprego desses métodos é possível se obter os valores de resistividade elétrica das estruturas geológicas de subsuperfície (em unidades de ohm.m), bem como se estimar a litologia, a profundidade e a espessura das camadas, além de definir as conformações dos corpos geológicos ou das feições ambientais presentes.

Segundo Braga (2006), a aplicação do método de Eletroresistividade se baseia na injeção de corrente elétrica no solo, nas variações medidas de diferença de potencial (ddp) e nas resistividades elétricas calculadas neste processo, com intuito de se estimar a tipologia dos materiais presentes em subsuperfície. Assim, quando uma corrente elétrica é emitida no terreno por meio de um par de eletrodos, os padrões de fluxo subsuperficial de corrente refletem a resistividade dos materiais constituintes em profundidade e podem ser mapeados na superfície através de outro par de eletrodos que mede as variações de potencial, cujas oscilações representam a energia que deve ser despendida para a passagem de um fluxo de corrente através do meio geológico, sendo que quanto maior for a separação entre os eletrodos de corrente, níveis mais profundos em subsuperfície podem ser alcançados.

Desta maneira, quando a corrente elétrica atravessa um corpo de baixa resistividade elétrica ou de alta resistividade, o potencial elétrico

diminui ou aumenta nesta ordem, sendo que o comportamento dos menores ou maiores valores anômalos de resistividade elétrica permitem em estudos ambientais, por exemplo, a detecção da presença de contaminação subterrânea inorgânica ou orgânica, respectivamente. Neste contexto, diversos são os artigos de utilização do método de Eletroresistividade na detecção de contaminação subterrânea por diferentes fontes, podendo ser citados os trabalhos de Elis & Zuquete (2002), Gallas et al. (2005), Braga & Cardinali (2005) e Moreira et al. (2019).

Método de Resistividade Capacitiva

Por ser mais recente, a bibliografia nacional não traz muitos exemplos de utilização do método de Resistividade Capacitiva, sendo aqui apontadas a dissertação de Cavenaghi (2017), que aplicou esta metodologia em sítio controlado para a detecção de alvos subterrâneos conhecidos, e a tese de doutoramento de Silva (2018), que, em conjunto com outros métodos geofísicos, a utilizou para locação de pontos de amostragens de solo na investigação confirmatória de contaminação por necrochorume em cemitério, além do levantamento de Carmona et al. (2018), que a empregou para avaliação da presença da contaminação do solo por creosoto.

Segundo Kuras (2002), o método de Resistividade Capacitiva é um método geofísico utilizado para caracterização não invasiva de subsuperfície

rasa por imageamento elétrico e é capaz de ampliar o escopo dos métodos de resistividade elétrica para os ambientes urbanos e outros locais onde o contato galvânico não pode ser efetuado ou onde altas impedâncias resultam em má qualidade dos obtidos, e é fundamentado no

conceito de acoplamento capacitivo entre o sensor e o terreno, sendo uma generalização do arranjo dipolo-dipolo de corrente contínua para medições de resistividade de subsuperfície, atuando numa faixa de frequência do método VLF, entre 10 a 18kHz.

Tabela 2 - Resistividades e condutividades elétricas de alguns materiais geológicos e de compostos potencialmente contaminantes (adaptado de Loke, 1999 e Borner et al., 1993).

Material	Resistividade Elétrica (ohm.m)	Condutividade Elétrica (siemens/m)
Solos e águas		
Argila (úmida e seca)	1 - 100	0,01 - 1
Areia (úmida e seca)	1 - 10 ⁴	10 ⁻⁴ - 1
Sedimentos de aluvião	10 - 800	1,25 x 10 ⁻³ - 0,1
Água subterrânea (doce)	10 - 100	0,01 - 0,1
Água do mar	0,2	5,0
Metais e Compostos Inorgânicos		
Ferro	9,074x10 ⁻⁸	1,102x10 ⁷
Chumbo	2,2x10 ⁻⁷	4,54x10 ⁶
Alumínio	2,92x10 ⁻⁸	3,42x10 ⁷
Cobre	1,72x10 ⁻⁸	5,81x10 ⁷
Níquel	6,99x10 ⁻⁸	1,43x10 ⁷
Cromo	1,27x10 ⁻⁷	7,87x10 ⁶
Manganês	1,6x10 ⁻³	625
Arsênio	3,0x10 ⁻⁷	3,33x10 ⁶
Cloreto de Potássio (0,01 M)	0,708	1,413
Cloreto de Sódio (0,01 M)	0,843	1,185
Ácido Acético (0,01 M)	6,13	0,163
Compostos Orgânicos		
Xileno	6,998x10 ¹⁶	1,429x10 ⁻¹⁷
Hexano	2,0x10 ³	5,0x10 ⁻⁴
Benzeno	9,09x10 ³	1,1x10 ⁻⁴
Metanol	2,63x10 ³	3,8x10 ⁻⁴
Diesel	4,0x10 ⁷	2,5x10 ⁻⁸
Óleo cru	1,76x10 ⁷	5,6x10 ⁻⁸
Querosene	5,88x10 ⁵	1,7x10 ⁻⁶
Etanol	1,0x10 ⁶	1,0x10 ⁻⁵

Na metodologia de Resistividade Capacitiva (RC), de acordo com esse autor, a injeção de corrente elétrica no solo se dá através de um transmissor de corrente elétrica alternada (*I*) em contato com o terreno, formando, portanto, um sistema capacitivo, e um ou dois receptores de tensão elétrica (ΔV), como visto na figura 3, sendo que o valor obtido de resistividade elétrica aparente (ρ_a), expresso em unidades de ohm.m, é calculado pela Lei de Ohm, através da fórmula:

$$\rho_a = K_{LA} \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

e onde K_{LA} é o fator geométrico de distância entre os dois dipolos capacitivos de corrente (A e B) e os dois de potencial (M e N) posicionados no mesmo alinhamento.

Como indicado anteriormente, a técnica de

Imageamento de Resistividade Capacitiva (IRC) segue os pressupostos físicos e geométricos do caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo do método de Eletrorresistividade galvânica de corrente contínua, onde a profundidade de investigação cresce com a separação *X* entre os pares de eletrodos de corrente e de potencial (Figura 3).

Porém, em função de diferentes concepções e disposições, o fator geométrico K_{LA} do arranjo dipolo-dipolo em linha da Resistividade Capacitiva é calculado de forma distinta do arranjo de corrente contínua, utilizando-se a seguinte equação (Kuras, 2002):

$$K_{LA} = \frac{\pi L}{\ln \left[\left(\frac{b^2}{b^2-1} \right)^{2b} \left(\frac{b^2+2b}{(b+1)^2} \right)^{b+2} \left(\frac{b^2-2b}{(b-1)^2} \right)^{b-2} \right]}$$

onde *X* é a separação entre os dipolos capaci-

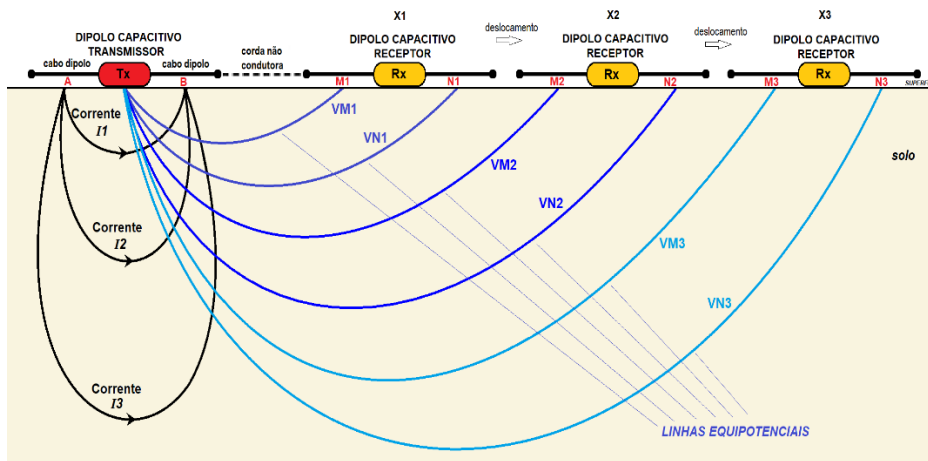


Figura 3 - Correntes e potenciais elétricos nos dipolos capacitivos alinhados.

tivos transmissor e o receptor, L é o comprimento desses e o parâmetro $b = \frac{2X}{L}$.

Neste trabalho, foi empregado o sistema Ohmmapper TR1 (Figura 4), fabricado pela Geometrics Inc. (EUA), derivado dos equipamen-

tos VCHEP e Ruscan idealizados e construídos por Timofeev et al. (1994), e que opera com cabos dipolares transmissores e receptores como eletrodos capacitivos (“antenas”), numa distribuição alinhada à direção do perfil a ser executado, constituindo, portanto, um arranjo dipolo-dipolo.

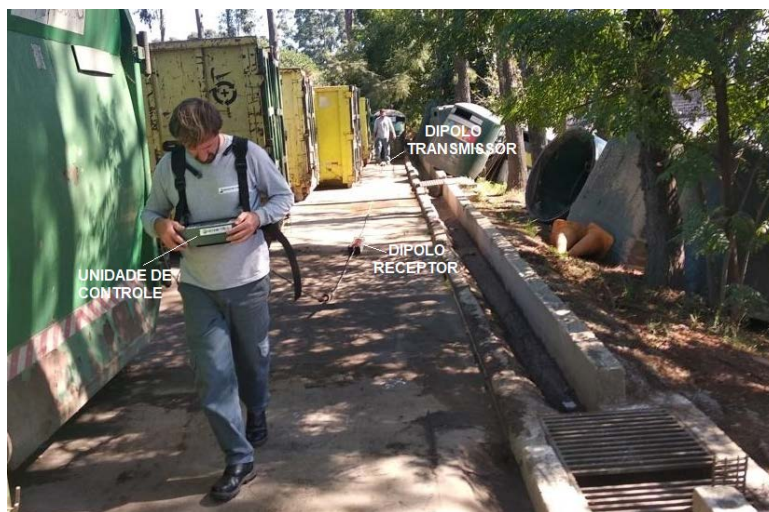


Figura 4 - Sistema capacitivo Ohmmapper TR1 sendo utilizado em campo.

Quando à emissão do sinal para a subsuperfície, o equipamento Ohmmapper provoca a passagem de corrente alternada através de um cabo coaxial que age como uma placa capacitadora enquanto a superfície do solo age como outra placa capacitadora, sendo que este acoplamento capacitivo de cabo-terra é caracterizado por uma capacitância elétrica variável, dependendo das condições de resistência do terreno. Neste processo, é transmitida uma corrente alternada (CA), numa frequência de sinal igual a 16,5 kHz, e que passará pelo cabo capacitor transmissor para o solo (Figura 5), carregando-o eletricamente por indução e não por contato, com a tensão medida nos receptores graças a um algoritmo que permite ao sistema sincronizar em torno da frequência do sinal transmitido (Yamashita et al., 2004).

Após a injeção de corrente de forma capaci-

tiva, o nível de tensão recebido (potencial elétrico) é convertido num sinal digital no receptor, sendo transferido para o registrador de dados para armazenamento e conversão interna em valores de resistividade elétrica.

É possível se parametrizar a aquisição de dados pela frequência de amostragem através da alteração do tempo de disparo do sinal, possibilitando a execução de medições contínuas, ou com intervalos menores que 30 centímetros conforme a necessidade, bem como permitir a variação das distâncias entre os dipolos transmissor e receptor para modificar a profundidade de investigação, possibilitando uma resolução vertical da ordem de 1,0 m ou menos dependendo desta separação (Geometrics, 2001).

Conforme o fabricante, a profundidade máxima que o Ohmmapper pode detectar mudanças de

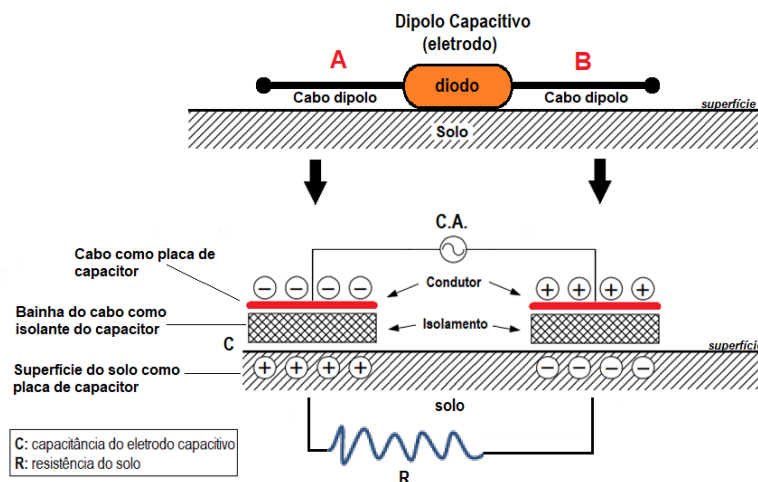


Figura 5 - Diagrama de eletrodo capacitivo (adaptado de Yamashita et al., 2004).

resistividade elétrica pode variar de 5,0 a 15,0 metros e depende da separação máxima entre o transmissor e o receptor, sendo que este alcance também depende da capacidade em que o sinal do transmissor pode ser detectado e decodificado com segurança pelo receptor. Além disso, segundo Kuras (2002), a resistividade elétrica de subsuperfície também influencia na profundidade de investigação do método Resistividade Capacitiva, sendo que para uma determinada corrente elétrica, se a resistência do terreno for alta (por exemplo solo arenoso), a tensão gerada também é alta, facilitando as medições, por outro lado, se a resistência do meio for baixa (por exemplo solo argiloso), a tensão resultante será baixa, dificultando a propagação da corrente em níveis mais profundos.

Aquisição e processamento de dados

Neste estudo, foram executadas linhas longitudinais e transversais, com perfis interceptando as plumas de contaminação mapeadas e se estendendo aos locais não contemplados pelos poços

de monitoramento ou de bombeamento, além da Linha L04 posicionada fora da área impactada representando a geologia local isenta de contaminação (*background*), como pode ser observado na Figura 2.

Na aquisição de dados de resistividade elétrica com o equipamento Ohmmapper TR1 de único receptor (Figura 4), é requerido pelo menos três passagens sucessivas na mesma linha com diferentes distâncias entre o transmissor e o receptor para se obter uma seção completa de resistividade elétrica com amostragens em profundidades distintas. Desta maneira, no levantamento aqui apresentado, foram utilizadas as separações entre as extremidades do cabo capacitivo transmissor e receptor de 1,0, 5,0 e 10,0m, dadas pelos comprimentos de “cordas não condutoras”, e que resultam num espaçamento total entre os módulos centrais de 6,0, 10,0 e 15,0m (Figura 6), sendo efetuadas as medidas por amostragem em tempo a cada 1,0 s, gerando dados de grande resolução lateral.

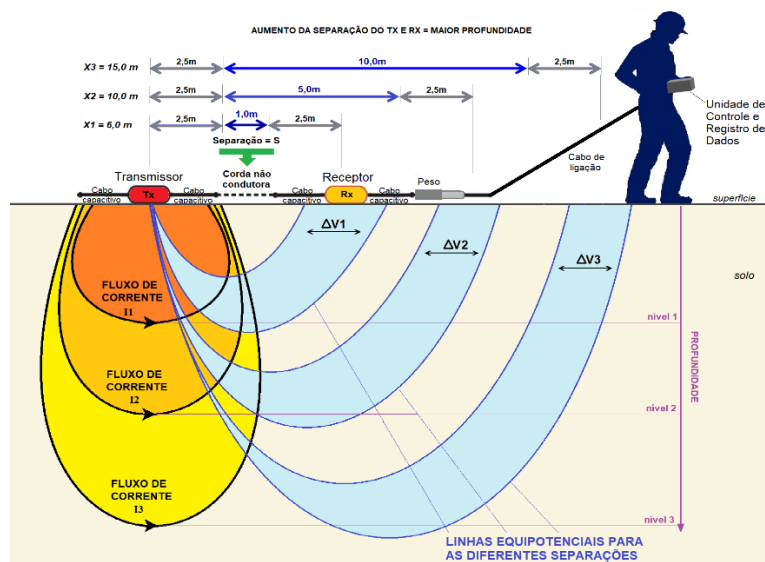


Figura 6 - Diagrama de separações adotadas do transmissor e receptor.

Após a aquisição e registro no sistema Ohmmapper, os dados dos perfis elétricos individuais (1D) de diferentes separações de transmissor e receptor de uma mesma linha de levantamento foram agrupados e convertidos em resistividade aparente por meio do programa Magmap2000 da Geometrics Inc., sendo

transformados em formatos compatíveis para que, numa etapa posterior de processamento, fossem geradas por interpolação as pseudo-seções de resistividade elétrica (2D) através de programa de inversão e modelamento geofísico (Figura 7), neste caso sendo utilizado o Res2Dinv, versão 3.54 (2004).

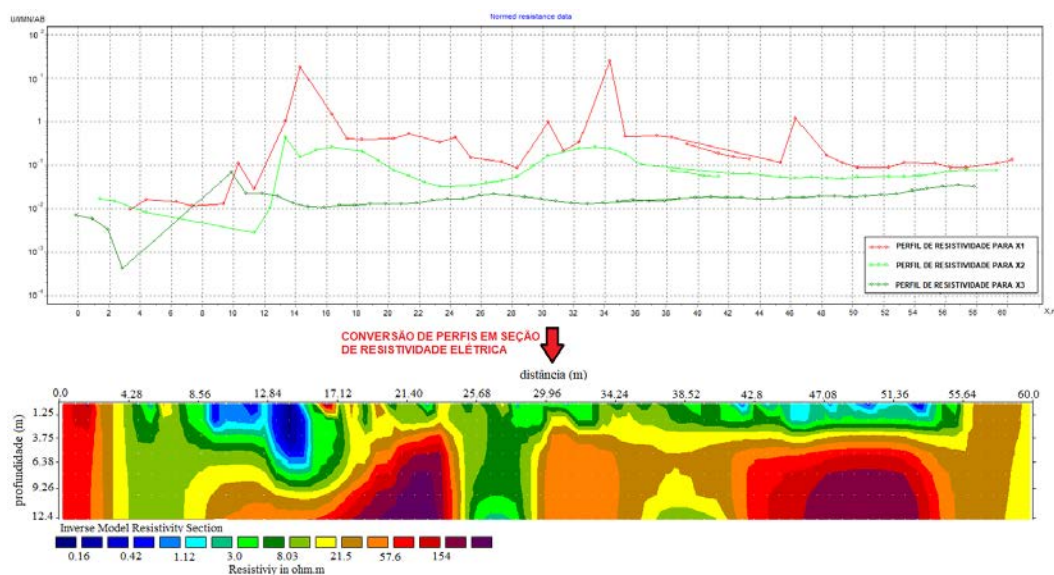


Figura 7 - Conversão de perfis de resistividade elétrica em seção interpolada.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir, são apresentadas as pseudo-seções de resistividade elétrica elaboradas a partir dos Imageamentos de Resistividade Capacitiva (IRC) executados e seus modelos geofísicos obtidos na inversão de dados pelo programa Res2Dinv, constando a interpretação da litologia local, cuja predominância é de presença de sedimentos aluvionares constituídos por argila e silte, além das indicações dos pontos principais de baixas e altas resistividades elétricas associados aos eventuais contaminantes de naturezas distintas.

De modo geral, as pseudo-seções obtidas no levantamento de Resistividade Capacitiva apresentaram grande perturbação do sinal elétrico e variações significativas nos valores de resistividade provocadas pelos contaminantes em subsuperfície quando comparadas à seção da linha L04 que mostra um padrão estratificado (horizontalizado) e mais uniforme das resistividades elétricas, representativo, portanto, do comportamento dos estratos geológicos naturais (sedimentos aluvionares) isentos dos efeitos da contaminação subterrânea (*background*), neste caso, representados pelas feições interpretadas como sendo argila, site e areia.

Assim, foram observadas nas pseudo-seções anteriores a existência de corpos geológicos

descontínuos e com contorno bem irregulares, sendo subdivididos, de acordo com a interpretação aqui efetuada, como sendo:

- Zonas de baixas resistividades elétricas: anomalias relacionadas às presenças prováveis compostos inorgânicos em subsuperfície, associadas ao chorume infiltrado.
- Zonas de maiores resistividades elétricas: anomalias correspondentes às presenças prováveis de compostos orgânicos em subsuperfície, associados à contaminação por combustível.
- Argila (sedimento aluvionar);
- Silte (sedimento aluvionar);
- Areia (sedimento aluvionar);
- Estruturas construídas contendo ou não ferragens (galerias, pavimentos, etc).

Portanto, do ponto de vista ambiental da aplicação do método de Resistividade Capacitiva neste ensaio, os menores e maiores valores anômalos de resistividade elétrica observados devem estar associados, respectivamente, à infiltração por derramamento de chorume no pavimento e aos focos de contaminação por vazamentos subterrâneos de combustíveis, tendo como fontes muito prováveis os locais de abastecimento, troca de óleo e lavagem existentes na área (Figura 2).

Quanto à correspondência da presença de chorume com as anomalias de baixos valores de resistividade elétrica, como constatado pela aplicação da Eletrorresistividade convencional (galvânica) por Moreira & Braga (2009), deve se atentar ao fato que, de forma geral, esta substância originada por degradação dos resíduos domiciliares pode apresentar elevadas concentrações de sólidos em suspensão, compostos orgânicos, amônia e compostos inorgânicos, sendo citados aqui o ácido acético e os metais pesados, sendo que as baixas resistividades destes compostos já haviam sido expressas na tabela 2.

Em referência aos maiores valores de resistividade elétrica e que podem estar correlacionados aos focos de contaminação por combustíveis, o que também é observado no artigo de Pellerin & Groom (2003) utilizando a Resistividade Capacitiva, salienta-se aqui que o diesel e alguns de seus compostos (naftaleno, antraceno, pireno e criseno) apresentam valores muito elevados, da ordem de mais de 10^7 ohm.m, como mostra a tabela 2, gerando, portanto, anomalias de alta resistividade quando presentes no meio geológico.

Desta forma, a partir da avaliação das seções obtidas, foi possível estabelecer as faixas de resistividade elétrica (em ohm.m) representativas

das feições ambientais e geológicas interpretadas nos modelos geofísicos e que são apresentadas a seguir na tabela 3.

Referente às anomalias de menores e maiores valores, associadas aos eventuais contaminantes inorgânicos e orgânicos, nesta ordem, estas se apresentam nos modelos geofísicos de forma irregular e descontínua e em níveis de profundidades diferentes, o que pode corresponder às fontes e processos de infiltração e contaminação distintos, com presença de eventuais focos na zona não saturada ou tendo atingindo a zona saturada.

Os resultados indicam a presença de várias anomalias rasas de maiores resistividades elétricas que podem ser correlacionadas aos vazamentos de instalações próximos à superfície, por exemplo tanques de armazenamento, linhas de abastecimento, caixas subterrâneas, sendo, portanto, as fontes primárias de contaminação.

Além dessas anomalias mais superficiais, verificam-se zonas anômalas mais profundas de maiores resistividades nas seções L01, L02, L03, L05, L06, L08 e L09, respectivamente figuras 8, 9, 10, 12, 13, 15 e 16, aqui interpretadas como sendo plumas de fase livre de combustível, constituindo, assim, as fontes secundárias de contaminação subterrânea.

Tabela 3 - Resistividades elétricas (em ohm.m) das feições interpretadas.

Linha	Litologia predominante na seção	Anomalia de menores resistividades	Argila	Silte	Areia	Anomalia de maiores resistividades
L01	argilosa	< 2,77	2,77 a 17,2	17,2 a 44,6	-	> 44,6
L02	argilosa	< 5,27	5,27 a 25,3	25,3 a 46,5	-	> 46,5
L03	argilosa	< 6,02	6,02 a 15,3	15,3 a 81,3	-	> 81,3
L04	arenosa	-	< 20,3	20,3 a 80,1	> 80,1	-
L05	argilosa	< 3,00	3,00 a 14,7	14,7 a 39,5	-	> 39,5
L06	argilosa	< 3,52	3,52 a 14,9	14,9 a 42,6	-	> 42,6
L07	argilosa	< 1,90	1,90 a 19,8	19,8 a 61,9	-	> 61,9
L08	argilosa	< 1,90	1,90 a 11,1	11,1 a 35,9	-	> 35,9
L09	arenosa	-	-	13,8 a 83,3	83,3 a 758,5	> 758,5

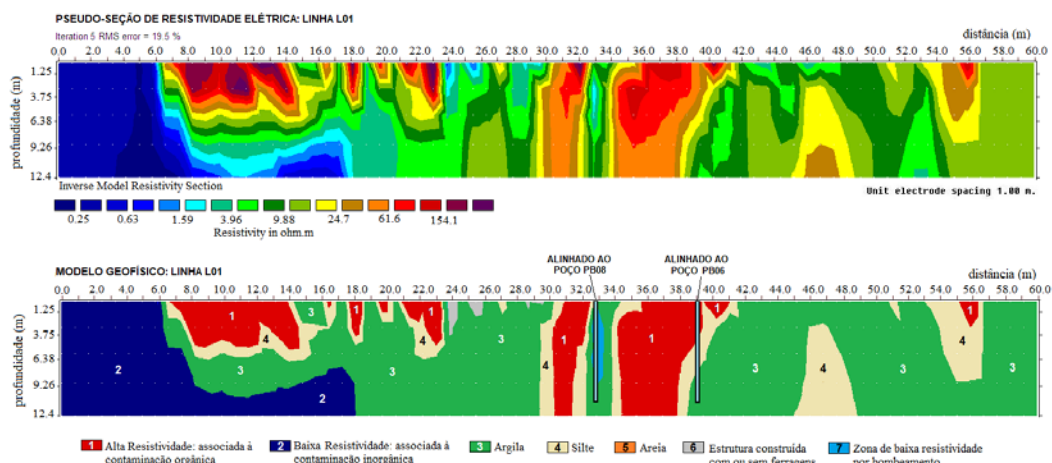


Figura 8 - Pseudo-seção de resistividade elétrica e modelo geofísico da Linha L01.

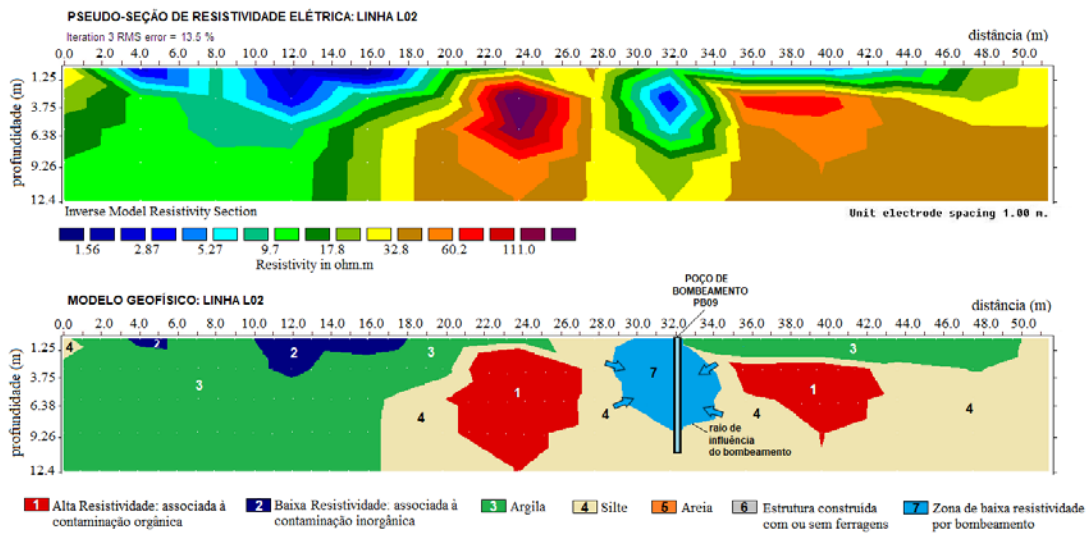


Figura 9 - Pseudo-seção de resistividade elétrica e modelo geofísico da Linha L02.

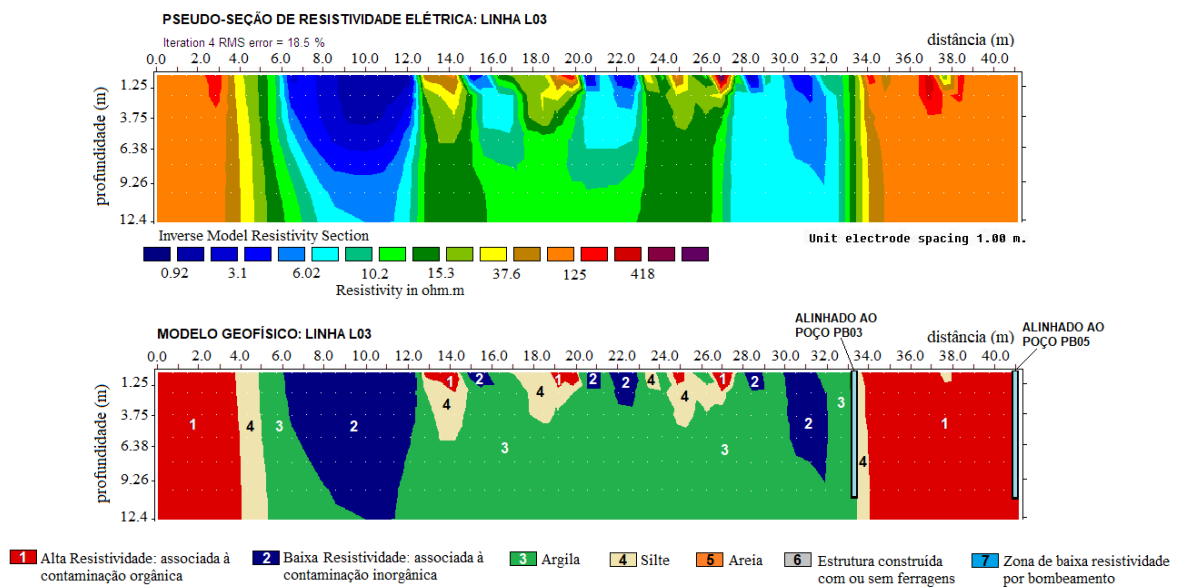


Figura 10 - Pseudo-seção de resistividade elétrica e modelo geofísico da Linha L03.

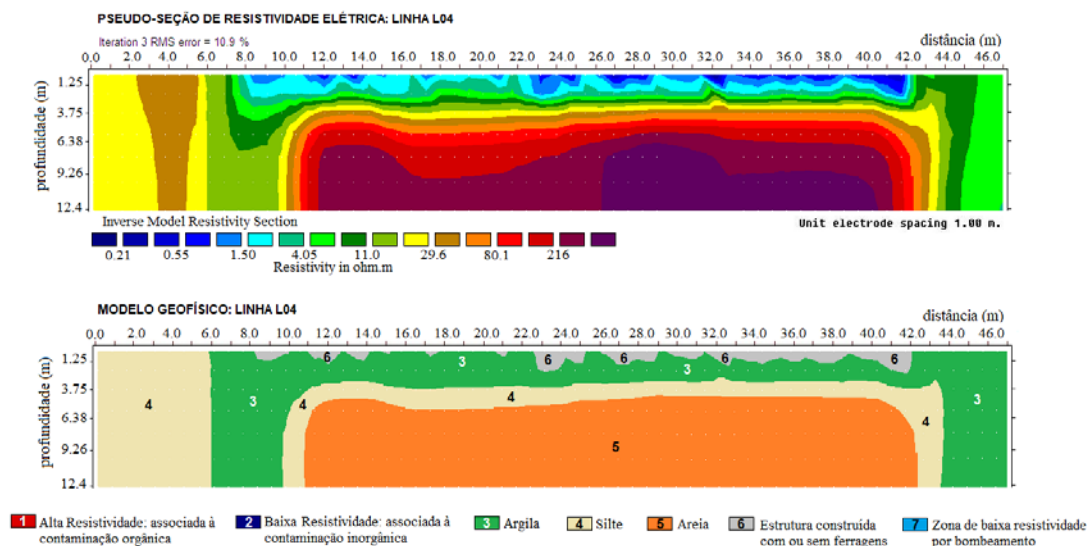


Figura 11 - Pseudo-seção de resistividade elétrica e modelo geofísico da Linha L04.

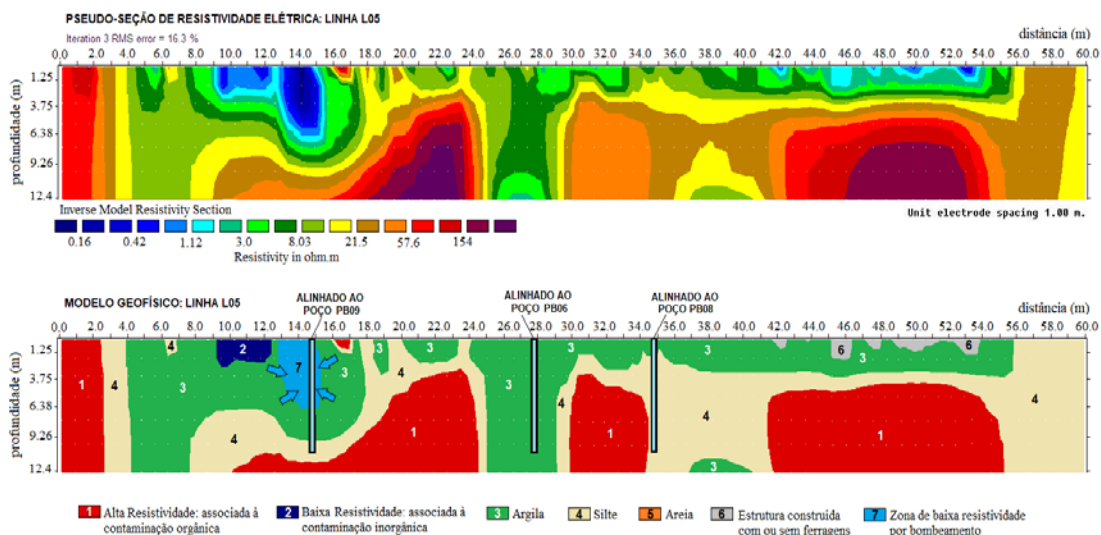


Figura 12 - Pseudo-seção de resistividade elétrica e modelo geofísico da Linha L05.

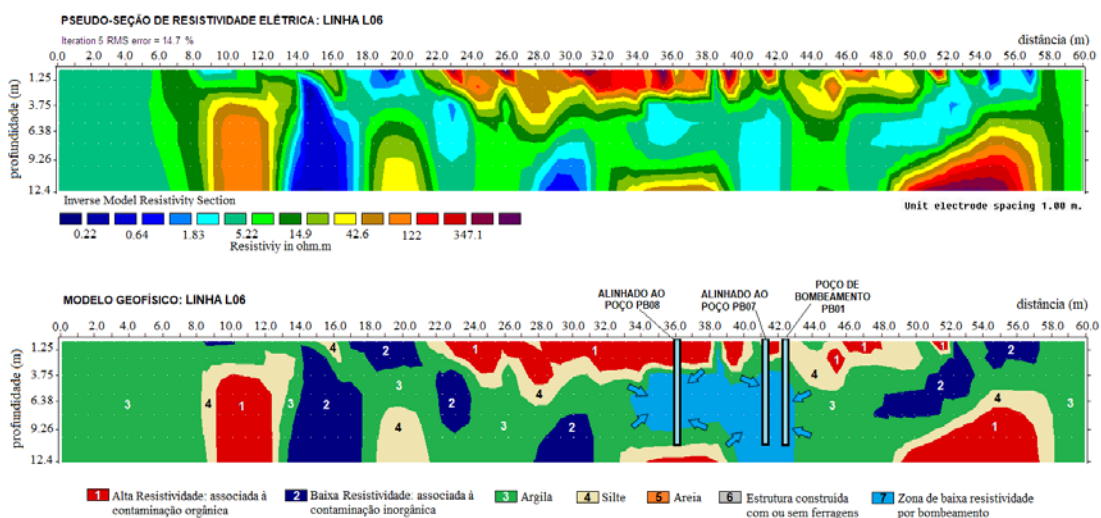


Figura 13 - Pseudo-seção de resistividade elétrica e modelo geofísico da Linha L06.

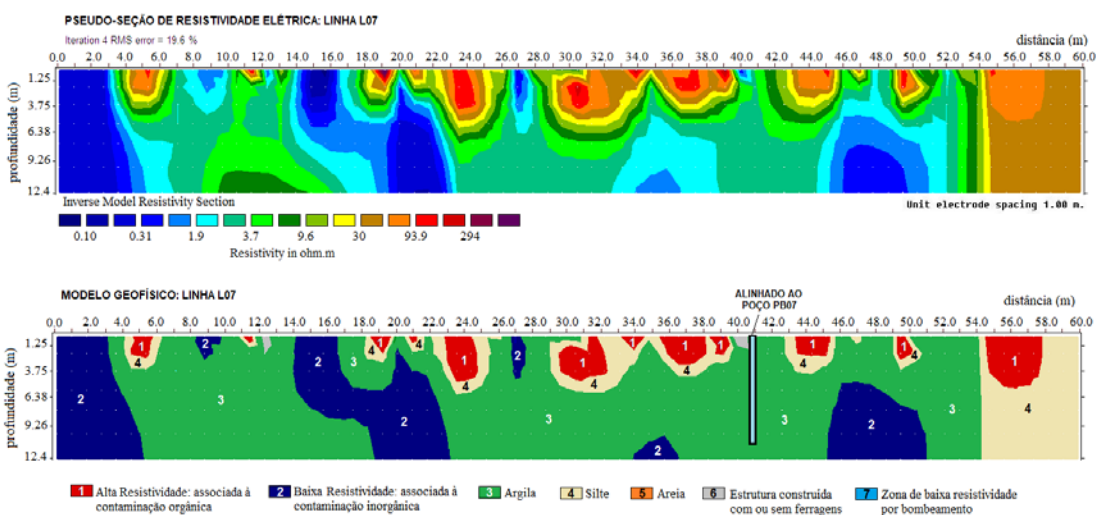


Figura 14 - Pseudo-seção de resistividade elétrica e modelo geofísico da Linha L07.

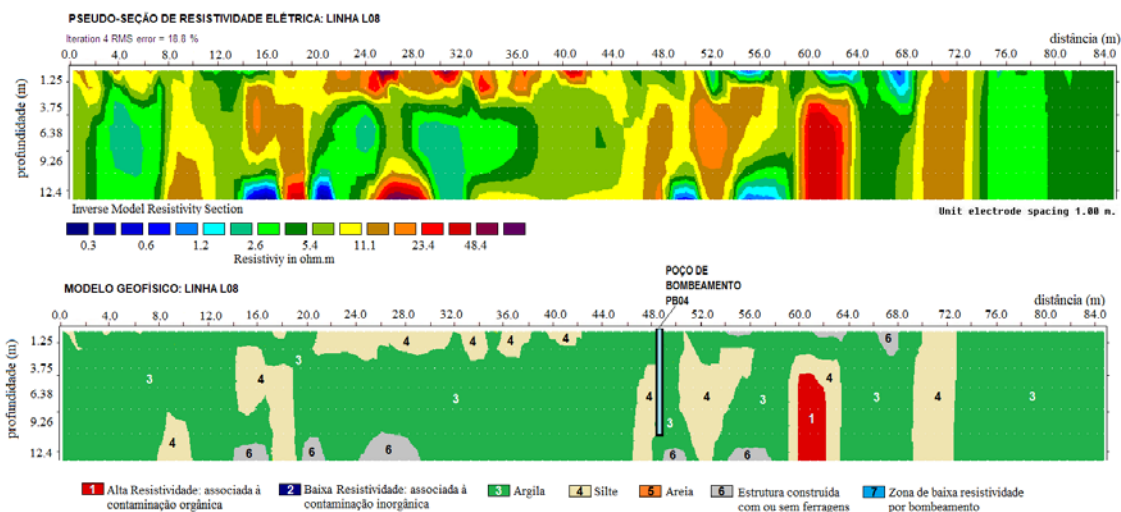


Figura 15 - Pseudo-seção de resistividade elétrica e modelo geofísico da Linha L08.

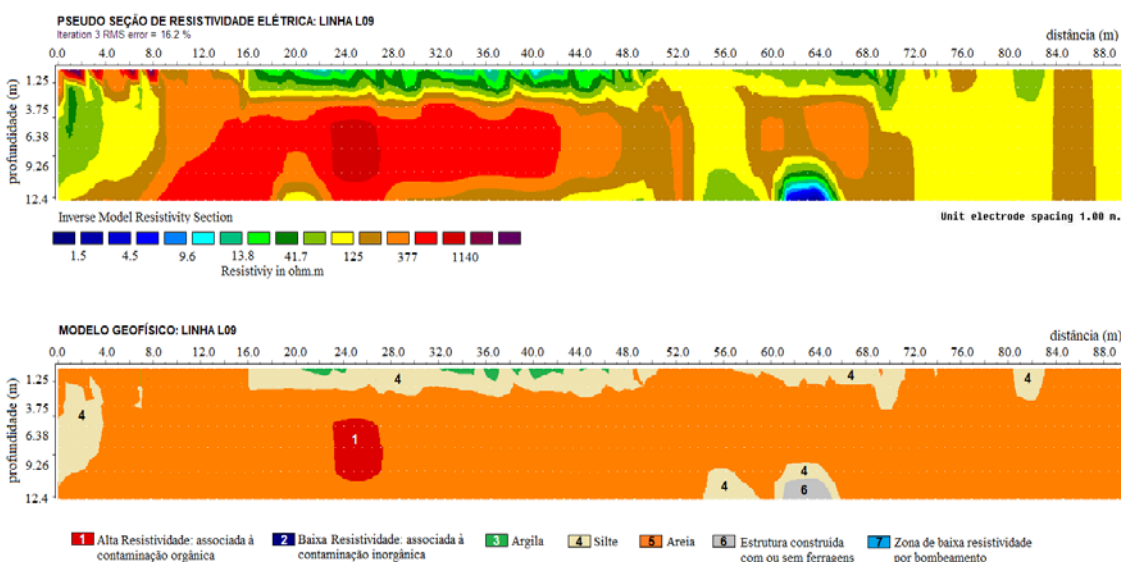


Figura 16 - Pseudo-seção de resistividade elétrica e modelo geofísico da Linha L09.

É importante se observar que algumas regiões de altas resistividades elétricas em níveis mais profundos, associadas às plumas de fase livre na água subterrânea, estão divididas pela influência dos poços de bombeamento, o que pode ser melhor visualizado nas pseudo-seções e modelos das linhas L01, L02 e L05 (Figuras 8, 9 e 12).

Este aspecto pode ser visualizado, principalmente, na pseudo-seção da Linha L02 (Figura 9) que apresenta uma zona de convergência de baixa resistividade elétrica no local exato onde está posicionado o poço PB09 e que foi interpretada aqui como o raio de influência de seu bombeamento, que aparentemente tem sido eficiente para retirada de combustível em fase livre, porém é limitado ao seu entorno, haja vista a presença duas zonas de alta resistividade a sua direita e a sua esquerda e que podem se constituir nas plumas de combustíveis ainda remanescentes

na água subterrânea.

Além da seção da Linha L02, as pseudo-seções das Linhas L05 e L06, respectivamente figuras 12 e 13, apresentaram o mesmo comportamento de convergência de baixas resistividades elétricas quando da presença ou proximidade com poços de bombeamento, sendo que a zona de influência na Linha L06 é decorrente da conjunção dos efeitos dos poços PB01, PB07 e PB08.

Outra consideração importante a se destacar se refere à constatação de anomalias rasas de maiores resistividades elétricas na pseudo-seção da linha L01 (Figura 8) entre as distâncias de 7,0 a 23,0 m, as quais podem corresponder aos processos de vazamentos de combustíveis provenientes das instalações ali existentes, uma vez que o perfil, neste trecho, cruza a frente da área de abastecimento, troca de óleo e lavagem,

como visto na figura 2, e que são as prováveis fontes principais da contaminação orgânica verificada na área.

De modo geral, às zonas anômalas de baixas resistividade elétricas associadas à eventual penetração de chorume através do piso local são observadas nas seções L01, L02, L03, L05, L06 e L07, seja nos níveis mais rasos, seja nos mais profundos, indicando a provável infiltração de contaminantes inorgânicos e que podem ter atingido a água subterrânea nas linhas L01, L03, L06 e L07 (Figuras 8, 10, 13 e 14).

Quanto às anomalias de baixa resistividade elétrica que se encontram nos trechos iniciais das seções das Linhas L01, L02, L05, L07 (Figuras 8, 9, 12 e 14) e ao longo da L03 (Figura 10), estas coincidem com o posicionamento da área de transbordo de resíduos, origem provável da infiltração de chorume que provocou os menores valores anômalos detectados nesses pontos.

Em relação ao ambiente geológico natural (*background*) e capacidade de detecção pelo aparato capacitivo das anomalias de baixas resistividades elétricas associadas aos contaminantes inorgânicos, observa-se que essas atingem valores muito reduzidos independentemente se o meio investigado é mais ou menos argiloso, e, de forma geral, se encontram numa mesma faixa de variação, como visto na tabela 3.

Ao se avaliar a correlação entre o meio geológico e os valores anômalos de maiores resistividades elétricas provocados por eventual presença de contaminantes orgânicos, constata-se que, neste caso, a faixa de variação de resistividade medida será dependente do tipo de litologia existente (*background*), diferentemente do efeito observado para a contaminação inorgânica.

Portanto, quando se observa o comportamento das anomalias de resistividades elétricas de maiores valores nas seções obtidas, constata-se que a contaminação orgânica até se evidencia de forma mais marcante nos locais com material mais argiloso, porém com valores medidos não tão elevados, por exemplo nas seções L01, L02, L03, L05 e L06 (Figuras 8, 9, 10, 12 e 13).

Por outro lado, quando o meio é constituído por material arenoso, cujos valores de resistividade elétrica já são naturalmente altos (*background*), os resultados desta pesquisa indicam que o contaminante orgânico presente mostrará um contraste não tão nítido, como é o caso da seção L09 (Figura 16), e se apresentará

numa faixa de valores de resistividade elétricas bem elevada, muito distinta daquela observada no ambiente argiloso.

Desta forma, é possível concluir que os valores anômalos de resistividade para que um composto orgânico apresente um contraste detectável no meio onde está inserido dependerá da resistividade elétrica do material geológico encaixante (*background*), sendo as anomalias numericamente menores quando presente no meio argiloso e maiores no meio arenoso.

Quanto a uma eventual interferência na aquisição de dados em função do pavimento local, que é constituído por concreto armado para suportar o movimento de caminhões, observou-se que este não interferiu nas medidas de resistividade elétrica obtidos pela aplicação da Resistividade Capacitiva, tampouco, a presença dos caminhões e contêineres próximos aos locais de execução dos perfis capacitivos, como visto na figura 4.

A partir da avaliação dos resultados das pseudo-seções anteriores, foi elaborada a tabela 4, na sequência, com os posicionamentos dos trechos anômalos de menores e maiores de resistividades elétricas nos níveis mais profundos (zona saturada) e que foram interpretados como sendo as plumas de contaminação da água subterrânea de caráter inorgânico, decorrente do chorume, e orgânico, representada pela fase livre de combustível.

Posteriormente, os trechos anômalos verificados de altas e baixas resistividade elétricas, e que constam da tabela 4, foram plotados na planta da área sobre as linhas executadas do levantamento capacitivo, sendo interpolados os contornos de anomalias que estivessem próximas, ou paralelas, para uma visualização mais representativa das porções contaminadas da água subterrânea na forma de plumas, cujos posicionamentos, sobrepostos às plumas orgânicas originais mapeadas, são apresentados na sequência na figura 17.

Ao se comparar as localizações das porções anômalas de maiores resistividades elétricas da figura 17 com o mapeamento da contaminação original, verifica-se uma mudança significativa da abrangência da eventual pluma de contaminação orgânica na data do levantamento geofísico, cujos resultados indicam a existência remanescente de zonas restritas de provável presença de fase livre, apontando que os trabalhos de remediação através de bombeamento surtiram efeito na área pesquisada, mas que não eliminaram total-

Tabela 4 - Trechos anômalos associados às plumas de contaminação.

Linha	Menores resistividades elétricas (pluma inorgânica)	Maiores resistividades elétricas (pluma orgânica)
L01	0,0 a 18,0 m	30,5 a 31,5 m
	-	34,5 a 38,0 m
L02	-	20,5 a 25,5 m
	-	38,0 a 41,0 m
L03	8,0 a 12,0 m	0,0 a 4,0 m
	-	34,0 a 41,5 m
L04	-	-
L05	-	0,0 a 2,5 m
	-	10,0 a 24,0 m
	-	30,0 a 34,0 m
	-	42,0 a 55,0 m
L06	13,5 a 17,5 m	9,5 a 12,5 m
	28,0 a 31,0 m	34,0 a 38,5 m
	-	49,0 a 57,0 m
L07	0,0 a 5,5 m	-
	19,0 a 23,0 m	-
	34,0 a 36,5 m	-
	45,0 a 50,5 m	-
L08	-	59,5 a 62,0 m
L09	-	23,0 a 27,0 m

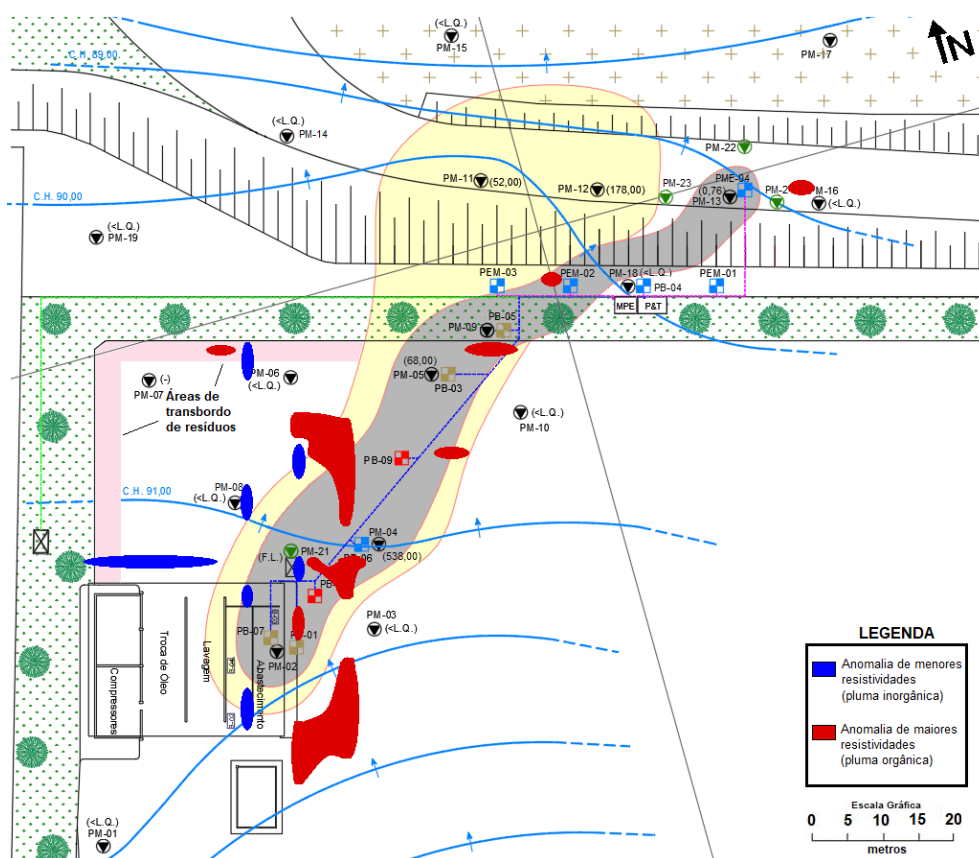


Figura 17 - Posicionamento das anomalias de resistividades elétricas na zona saturada.

totalmente os contaminantes orgânicos da água subterrânea, demandando remanejamento dos locais de extração e também a ampliação da rede de poços de monitoramento conforme as informações aqui expressas.

Quanto às dimensões das anomalias de altas resistividade elétrica, estas são maiores próximas

das fontes principais de contaminação do local (áreas de abastecimento, lavagem e troca de óleo), além de apresentar uma tendência de distribuição no sentido nordeste e que é concordante ao sentido de fluxo da pluma de contaminação original.

Em relação às plumas inorgânicas associadas

às anomalias de baixas resistividades elétricas, os resultados deste levantamento geofísico indicam suas presenças em pequenos pontos isolados, distribuídos de forma difusa no flanco leste da área, e que podem apontar a contaminação da água subterrânea nesta região decorrente da infiltração

de chorume a partir da movimentação frequente dos caminhões, principalmente próximos dos locais de transbordo de resíduos domiciliares e de abastecimento, troca de óleo e lavagem, devendo tais posicionamentos serem considerados nos trabalhos de monitoramento e remediação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da aplicação do método de Resistividade Capacitiva demonstraram um grande potencial para identificação de contaminação subterrânea, bem como para diferenciação das anomalias provenientes dos contaminantes orgânicos e inorgânicos presentes em subsuperfície, em função de sua capacidade de detecção e distinção de baixos e altos valores anômalos de resistividade elétrica.

As constatações de detalhes de diversas feições ambientais e geológicas apresentadas neste artigo só foram possíveis graças a alta resolução apresentada pela Resistividade Capacitiva, da ordem de centímetros em resolução lateral, e que não seria atingido pela aplicação do método convencional de Eletroresistividade, o qual seria de difícil emprego no local investigado pela necessidade de cravamento de eletrodos no pavimento existente de concreto armado.

Além da identificação das anomalias associadas à contaminação subterrânea, a metodologia aqui empregada possibilitou à identificação inusitada de feições hidrogeológicas correspondentes aos raios de influência dos poços de bombeamento para a remediação do local, o que não é comum aos demais métodos geofísicos.

Quanto aos valores e faixas de variações de resistividade elétricas obtidos neste levantamento geofísico, ressalta-se que estes não absolutamente determinísticos para a definição de feições ambientais e geológicas de outros locais, uma vez que as medidas realizadas pelo método de Resistividade Capacitiva podem variar de área para área em função, principalmente, das características da geologia local e das condições de contato com o terreno, como foi indicado nas discussões anteriores.

Em relação à detecção das anomalias de baixas resistividades elétricas associados aos contaminantes inorgânicos, foi constatado que os valores anômalos se apresentam de forma marcante e se encontram numa mesma faixa de variação de baixos valores, independentemente se o meio investigado é mais argiloso ou mais arenoso.

De outra forma, nesta pesquisa foi observado que os contaminantes orgânicos possuem comportamentos distintos em diferentes litologias, sendo que os contrastes anômalos pela presença deste tipo de contaminação não serão tão evidentes num solo mais arenoso de resistividade elétrica naturalmente alta, onde as anomalias só serão detectadas por meio de valores bem elevados.

Em contrapartida, foi verificado que, quando os contaminantes orgânicos se apresentam nos materiais mais argilosos, os contrastes são mais marcantes, porém as resistividades elétricas de suas anomalias são relativamente mais baixas quando comparadas as apresentadas num solo arenoso.

Deste modo, conclui-se que os valores anômalos de resistividade elétrica para que um composto orgânico apresente um contraste detectável no meio onde está inserido dependerá, além da sua concentração, como também da resistividade natural do material geológico encaixante (*background*), apresentando, assim, anomalias numericamente menores no meio argiloso e maiores no meio arenoso.

Pelos resultados obtidos e aqui discutidos, conclui-se que a metodologia inovativa de Resistividade Capacitiva apresenta possibilidades muito promissoras, não só neste tipo de aplicação de diagnóstico ambiental, mas também em outros estudos de caracterização geológica e hidrogeológica, decorrente da alta resolução dos dados obtidos e de sua capacidade de identificação de diferentes feições por meio dos contrastes nas medições geofísicas.

No caso específico desta área contaminada, a partir das informações derivadas deste levantamento geofísico, a aplicação do método de Resistividade Capacitiva permitiu comprovar a eficiência dos trabalhos de remediação já implementados por meio do bombeamento da água subterrânea, bem como nortear a adoção de readequações necessárias ao gerenciamento ambiental do caso, principalmente, no que se refere ao monitoramento de eventual contaminação inorgânica indicada neste levantamento.

REFERÊNCIAS

- BORNER F.; GRUHNE M.; SCHON J. Contamination indications derived from electrical properties in the low frequency range. **Geophysical Prospecting**, v. 41, p. 83-98, 1993.
- BORTOLIN, J.R.M. & MALAGUTTI FILHO, W. Monitoramento temporal da pluma de contaminação no aterro de resíduos urbanos de Rio Claro (SP) por meio do método geofísico da eletrorresistividade. **Revista do Instituto de Geociências - USP**, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 109-113, 2012.
- BRAGA, A.C.O. & CARDINALI, M.T. Aplicação da resistividade e cargabilidade em estudos de contaminação de sedimentos por derivados de hidrocarbonetos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n.2. p. 181-190, 2005.
- BRAGA, A.C.O. **Métodos de Eletrorresistividade e Polarização Induzida Aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática**. Rio Claro, 126 p, 2006. Tese (Livro Docência) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, SP, Brasil. 126p, 2006.
- CARMONA, E.A.F.; BARBOSA, A.M.; USTRA A.; ELIS V.; MENDONÇA, C. Aplicação do método resistivo-capacitivo para investigação de uma área contaminada por creosoto. **Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf)**, Salinópolis - PA. 4 p. 2018.
- CAVENAGHI, V.L.S. **Caracterização geolétrica de alvos rasos no Sítio Controlado de Geofísica Rasa II – IAG-USP através de resistividade capacitiva**. São Paulo. 148p. 2017. Dissertação (Mestrado) em Geofísica. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo.
- ELIS, V.R. & ZUQUETTE, L.V. Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólido urbanos. **Revista Brasileira de Geociências**, v.32, n.1, p. 119-134, 2002.
- FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**. 4 ed. University of Wisconsin, USA, Prentice Hall Inc. 598p, 2001.
- GALLAS, J.D.F.; TAIOLI, F.; SILVA, S.M.C.P.; COELHO, O.G.W.; PAIM, P.S.G. Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 1, p. 51-59, 2005.
- GEOMETRICS INC. **Manual de operação do equipamento OhmMapper TR1 29005-01**. Rev.F. 147 p. 2001.
- GURGEIRA, M.D. **Correlação de dados geológicos e geotécnicos na Bacia de São Paulo**. São Paulo, 80 p, 2013. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- KURAS, O. **The capacitive resistivity technique for electrical imaging of the shallow subsurface**. Tese de Doutorado. Universidade de Nottingham, Inglaterra. 286p, 2002.
- LOKE, M.H. **Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D survey**. 61 p, 1999.
- MOREIRA, C.A. & BRAGA, A.C.D.O. Anomalias de cargabilidade em aterro de resíduos sólidos domiciliares. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 1, p. 55-62, 2009.
- MOREIRA, C.A.; JUNQUEIRA, P.G., CASAGRANDE, M.F.S.; TARGA, D.A. Geophysical study in a diesel contaminated area due to a railway accident in Cerquilha (SP). **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 37, n. 4, 15p, 2019.
- MUÑOZ, S.I.S. **Impacto ambiental na área do aterro sanitário e incinerador de resíduos de Ribeirão Preto-SP: avaliação dos níveis de metais pesados**. São Paulo. 131 p, 2002. Tese (Doutorado em Saúde Pública) Universidade de São Paulo.
- PELLERIN, L. & GROOM, D. Characterization of an old diesel fuel spill? Results of a multi-receiver OhmMapper survey. **Proceedings of 73rd Annual Meeting of the Society of Exploration Geophysics**, Dallas, Texas, 4p, 2003.
- Res2Dinv, 3.54 version, for Windows 98/Me/2000/NT/XP. **Rapid 2D resistivity & IP inversion using the least-squares method**. Software Manual, 133p, 2004.
- SILVA, F.C. **Avaliação de metais potencialmente tóxicos em zona não saturada da necrópole de Nossa Senhora Aparecida, Piedade, SP**. Sorocaba. 249 p, 2018. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais). Universidade Estadual Paulista, Instituto de Ciência e Tecnologia.
- TIMOFEEV, V.M.; ROGOZINSKI, A.W.; HUNTER, J.A.; DOUMA, M., A new ground resistivity method for engineering and environmental geophysics. **Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP)**, Environmental and Engineering Geophysical Society, p. 701–715, 1994.
- YAMASHITA, Y.; GROOM, D.; INAZAKI, T.; HAYASHI, K. Rapid near surface resistivity survey using the capacitively-coupled resistivity system: OhmMapper, Proceeding of 7th SEGJ INTERNATIONAL SYMPOSIUM, p. 292-295. 2004.

Submetido em 3 de outubro de 2021

Aceito para publicação em 3 de fevereiro de 2022