

INVESTIGAÇÃO AMBIENTAL DE CEMITÉRIO UTILIZANDO O MÉTODO GEOFÍSICO DE RESISTIVIDADE CAPACITIVA

ENVIRONMENTAL INVESTIGATION OF CEMETERY USING THE CAPACITIVE RESISTIVITY GEOPHYSICAL METHOD

Wagner França AQUINO, Francisco Carlos da SILVA, Paulo Sérgio TONELLO

Universidade Estadual Paulista. Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba. Avenida Três de Março, 511 - Alto da Boa Vista, Sorocaba – SP. E-mails: wagnergr@gmail.com; fracarlos@hotmail.com; paulo.tonello@unesp.br

Introdução
Descrição da área
Metodologia
 Contaminação de solo em necrópoles
 Métodos geofísicos aplicados em cemitérios
 Método de Resistividade Capacitiva
 Aquisição de dados de resistividade elétrica
Resultados e discussões
Conclusões
Referências

RESUMO - O objetivo do presente estudo é demonstrar a aplicabilidade do método geofísico de Resistividade Capacitiva para detecção de anomalias de baixas resistividades elétricas associadas à contaminação do solo por metais-traço em área utilizada como cemitério. O levantamento geofísico foi realizado em porção da Necrópole Nossa Senhora Aparecida, localizada no município de Piedade (SP), como parte integrante de investigação ambiental confirmatória do local, adotando-se os pontos com anomalias de resistividades mais proeminentes para definir o posicionamento das sondagens para coletas de solo e determinação das concentrações dos metais-traço através de análises químicas. Os resultados obtidos apontaram a correspondência entre as maiores concentrações dos contaminantes metálicos em subsuperfície e a reduções dos valores de resistividade elétrica verificadas pela Resistividade Capacitiva, apontando a capacidade desta metodologia de rastreamento subterrâneo como ferramenta de apoio em avaliação confirmatória de locais suspeitos de contaminação para tomada de decisão quanto à definição dos pontos mais adequados à realização de sondagens e amostragens de solo.

Palavras-chave: Cemitério. Resistividades elétricas. Metais-traço. Contaminação.

ABSTRACT - The objective of the present study is to demonstrate the applicability of the geophysical method of Capacitive Resistivity for the detection of anomalies of low electrical resistivities associated with possible contamination by trace metals in the soil of an area used as a cemetery. The geophysical survey was carried out in a portion of the Necropolis Nossa Senhora Aparecida, located in the municipality of Piedade (SP), as part of confirmatory environmental investigation of the site, with the points with the most prominent anomalies of resistivities used to define the positioning of the soundings for soil collection and determination of trace metal concentrations through chemical analyses. The results obtained indicated the correspondence between the highest concentrations of metallic contaminants in the subsurface and the reductions in the electrical resistivity values verified by Capacitive Resistivity, pointing out the ability of this underground tracking methodology as a support tool in confirmatory evaluation of suspected contamination sites for decision making regarding the definition of the most suitable points for carrying out soundings and soil samplings.

Keywords: Cemetery. Electrical resistivities. Trace metals. Contamination.

INTRODUÇÃO

Inúmeros são os esforços que as autoridades e os órgãos de controle ambiental têm dispendido na tentativa de prevenir ou minimizar os impactos negativos ao solo, água e ar e que envolvam as atividades antrópicas, tendo sido bem perceptível, nas últimas décadas, o incremento de leis e normas técnicas para garantir que essas atividades, mesmo que sejam necessárias, não agridam o meio ambiente.

Dentre os vários tipos de intervenções antropogênicas com potencial de gerar contaminação, merecem destaque aquelas cujos processos de descarte de materiais e de infiltração no meio subterrâneo podem comprometer tanto a qualidade do solo, como da água subterrânea,

impedindo, dessa forma, o uso pleno desses bens naturais (Prestes da Silva et al., 2019).

Apesar das questões religiosas e culturais, não se pode deixar de abordar o delicado tema dos cemitérios como fontes potenciais de contaminação subterrânea, onde os sepultamentos humanos de maneira inadequada podem apresentar risco decorrente da infiltração no solo de substâncias orgânicas, inorgânicas ou metálicas, principalmente em áreas onde faltam medidas de proteção ambiental, podendo se agravar em caso de alta vulnerabilidade do meio físico.

Diante deste quadro, é preocupante o aumento verificado do número de sepultamentos registrados nos dois últimos anos em função do acréscimo de

óbitos proveniente da epidemia de Covid-19, conforme dados da Prefeitura Municipal de São Paulo (2022), o que pode potencializar uma eventual contaminação subterrânea em cemitérios desprovidos de instalações de controle ambiental.

Em geral, os cemitérios públicos no Brasil foram implantados de uma forma aleatória durante muitos anos, sobre terrenos imprestáveis para qualquer outro uso e sem levar em consideração os aspectos técnicos construtivos para preservação da qualidade do meio físico, cuja consequência é a contaminação do solo local e o aquífero freático por necrochorume, este oriundo da decomposição de cadáveres e degradação dos invólucros (caixões) e dos adereços que acompanham os mesmos, como aponta Silva (2018).

De maneira agravante a essa situação, este mesmo autor cita o reaproveitamento de sepulturas de algumas necrópoles do município de São Paulo como fonte de recarga constante de substâncias potencialmente contaminadoras no solo, onde, findado o prazo de sepultamento, em torno de três a cinco anos, têm-se a exumação dos restos cadavéricos e caixões, dando espaços e condições de reutilização às covas para a mesma finalidade.

Neste contexto, é de conhecimento que os corpos humanos desprovidos de vida entram, rapidamente, em decomposição pela atuação de microrganismos, com liberação de substâncias tóxicas, que podem afetar à qualidade do solo e água subterrânea e, consequentemente, à saúde pública, tornando, portanto, imprescindível que os cemitérios sejam implantados, adequadamente, em termos sanitário e ambiental, sem prejuízo ao

ambiente onde se encontram, o que é preconizado nos objetivos da Resolução CONAMA nº 335 de 28 de maio de 2003.

A capacidade do solo em acumular compostos aponta sua importância como compartimento para avaliação do nível de contaminação subterrânea, uma vez que, no caso de cemitérios, os indicadores de desconformidades ambientais podem ser contaminantes orgânicos e/ou inorgânicos e metais-traço, estes últimos com tendência a ficarem retidos em uma fração da matriz do solo ou serem carregados para o aquífero freático (Kemerich et al., 2012).

Assim, de acordo com Silva & Malagutti Filho (2010), é de suma importância investigar a contaminação de solos de necrópoles por meio da aplicação de métodos geofísicos que se utilizam de medições de resistividade elétrica, uma vez que em suas pesquisas com o método de Eletrorresistividade foram observadas correlações diretas entre a presença de necrochorume e os baixos valores de resistividade medidos. Dentro desse escopo, este trabalho tem por objetivo avaliar a capacidade do método de Resistividade Capacitiva, que opera com injeção de corrente elétrica de forma distinta da metodologia empregada pelos autores anteriores, quanto à detecção de anomalias geofísicas de resistividade elétrica associadas à eventual presença de contaminação por metais-traço no solo subsuperficial do cemitério Nossa Senhora Aparecida, a fim de contribuir com a seleção dos locais mais adequados à realização de sondagens confirmatórias e amostragens de material para diagnóstico ambiental.

DESCRIÇÃO DA ÁREA

A Necrópole Nossa Senhora Aparecida, local do levantamento geofísico, se situa no município de Piedade, sudeste no estado de São Paulo, possuindo como coordenadas centrais de posicionamento no sistema UTM 23K 253.337,02 m E e 7.375.265,78 m S e, topograficamente, apresenta declividade de sul para norte, com cotas variando entre 812 e 838 m.

Este cemitério é bem antigo, tendo sido utilizado para sepultamentos há mais de 120 anos, e, no presente, se encontra dentro da área urbana do município em questão, onde é circundado por residências, estabelecimentos comerciais e locais ainda remanescentes com vegetação mais ao sul (Figura 1), ocupando em sua totalidade aproximadamente 17.000 m².

No local, existem dois tipos de sepultamento,

que são por inumação, que são os enterramentos propriamente ditos, e por tumulação, quando os caixões são dispostos dentro dos jazigos construídos em concreto armado, podendo ser constatado que quase a totalidade da área do cemitério é densamente ocupada por sepulturas, não existindo áreas de ampliação dentro de seus limites, mas apenas o reaproveitamento dos túmulos já existentes, havendo poucas ruas no interior de suas quadras, as quais são revestidas com pavimento de concreto e bloquetes na maior parte (Figura 2), ou asfalto.

Ressalta-se que esta condição de quase total impermeabilização do terreno, por exemplo, apresentaria dificuldade à execução do método geofísico de Eletrorresistividade galvânica, que necessita de cravamento de eletrodos para injeção

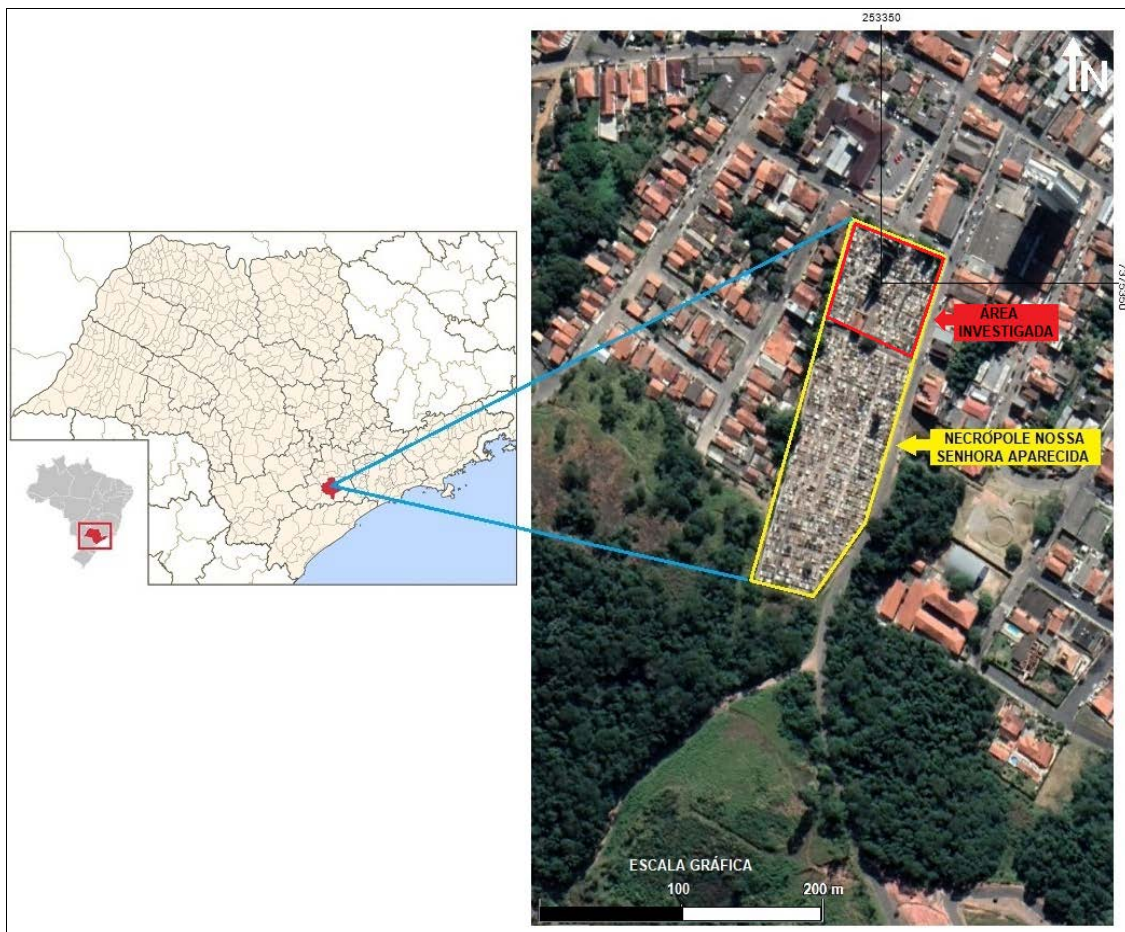


Figura 1 – Localização do município de Piedade e da Necrópole Nossa Senhora Aparecida.



Figura 2 – Interior do cemitério Nossa Senhora Aparecida.

de corrente elétrica no solo, como também a presença de objetos metálicos existentes no local, tais como portinholas, cruzes, grades e outros adereços dos jazigos, poderia afetar as medidas de condutividade elétrica pelo método Eletromagnético Indutivo (EM), o que não seriam, a princípio, impeditivos à aplicação da Resisti-

vidade Capacitiva.

Quanto à geologia da região, o município de Piedade se localiza ao sul da zona de cisalhamento Taxaquara, onde se encontram rochas de alto grau metamórfico do Domínio Embu e os batólitos Ibiúna e Piedade (Godoy et al., 2010), sendo que as descrições de material extraídos de sondagens

realizadas na área investigada do cemitério (porção norte) apontaram, de modo geral, predominância de solo de argila média até cerca de 1,0 m de profundidade e material mais arenoso

abaixo deste nível, cujas amostras coletadas e analisadas indicaram uma permeabilidade hidráulica da ordem de 10^{-4} cm/s, o que é condizente a um material mais permeável.

METODOLOGIA

Contaminação por metais em solo de necrópole

Como descrito anteriormente, o necrochorume possui substâncias orgânicas, inorgânicas e metálicas em sua total composição, porém, neste estudo de caso, são os metais-traço os potenciais

contaminantes de interesse a serem investigados, uma vez que poderão apresentar contrastes nas medidas geofísicas realizadas de resistividade elétrica em função de suas baixas resistividades elétricas (Tabela 1).

Tabela 1 - Resistividade e condutividade elétricas de metais potencialmente contaminantes (adaptado de Borner et al., 1993 e Loke, 2004).

	Resistividade Elétrica	Condutividade Elétrica
Metais	(ohm.m)	(siemens/m)
Ferro	$9,09 \times 10^{-8}$	$1,10 \times 10^7$
Chumbo	$2,2 \times 10^{-7}$	$4,54 \times 10^6$
Alumínio	$2,92 \times 10^{-8}$	$3,42 \times 10^7$
Cobre	$1,72 \times 10^{-8}$	$5,81 \times 10^7$
Níquel	$6,99 \times 10^{-8}$	$1,43 \times 10^7$
Cromo	$1,27 \times 10^{-7}$	$7,87 \times 10^6$
Manganês	$1,6 \times 10^{-3}$	625
Arsênio	$3,0 \times 10^{-7}$	$3,33 \times 10^6$
Mercúrio	$9,6 \times 10^{-7}$	$1,04 \times 10^6$
Cádmio	$6,8 \times 10^{-8}$	$1,47 \times 10^7$
Zinco	$5,9 \times 10^{-8}$	$1,69 \times 10^7$
Bário	$3,57 \times 10^{-7}$	$2,80 \times 10^6$
Cobalto	$5,81 \times 10^{-8}$	$1,72 \times 10^7$
Molibdênio	$5,78 \times 10^{-8}$	$1,73 \times 10^7$

Tanto os caixões usados em enterros, como suas peças metálicas, são passíveis de sofrerem degradação e corrosão liberando substâncias potencialmente tóxicas que poderão ser transportadas a partir das sepulturas através de infiltração difusa, podendo, daí, contaminar as águas subterrâneas e implementar risco à saúde dos residentes em áreas ao redor das necrópoles, como apontado por Kemerich et al. (2012)

O tempo necessário para estes metais contaminarem o meio físico a partir da decomposição dos materiais dependerá de vários fatores, tais como níveis de precipitação pluviométrica, taxa de infiltração de água no local de enterramento, temperatura em subsuperfície, características do solo, em destaque a capacidade de troca catiônica, entre outros (Baum et al., 2021).

Segundo Silva (2018), metais como o bronze, chumbo, níquel, prata, ouro, zinco, cobre, ferro e selênio são normalmente utilizados durante a construção de caixões para decoração e melhoria da durabilidade, especialmente chumbo, zinco,

cobre, cromo e níquel e ferro para as alças e ornamentos. Além desses, outros produtos químicos nocivos compõem tintas, vernizes, seladores e conservantes usados em caixões de madeira, podendo conter em sua composição chumbo, mercúrio, cádmio, cromo, cobre, arsênio, manganês, bário e níquel, sendo que o arsênio é usado como um pigmento, conservante de madeira e como ingrediente contra a incrustação, enquanto o bário é usado também como pigmento e inibidor de corrosão para os metais.

Vários dos metais apontados anteriormente como potenciais contaminadores foram identificados nas investigações de solo em cemitérios por diversos pesquisadores, tais como Spongberg & Becks (2000), Barros et al. (2008), Jonker & Olivier (2012), Neckel et al. (2016) e Prestes da Silva et al. (2019), tendo sido muito frequentemente detectados chumbo e cromo nas análises químicas desses estudos e até mesmo elementos não tão comuns, tais como rubídio, estrôncio e cério.

Métodos geofísicos aplicado em cemitérios

Os métodos geofísicos se constituem em metodologias indiretas de investigação subterrânea, a partir de medidas por instrumentos, caracterizando-se, portanto, como métodos não invasivos ou não destrutivos, permitindo, assim, avaliar as condições geológicas locais através dos contrastes das diferentes propriedades físicas dos materiais de subsuperfície e que podem ter como origem as heterogeneidades naturais ou por efeito de ações antrópicas (Aquino et al., 2021).

No caso da determinação de contaminação por necrochorume por métodos geofísicos, as variações das propriedades elétricas do solo são aquelas que têm apresentado os melhores resultados, sendo que os precursores no Brasil foram Mendes et al. (1989) ao utilizarem o método Eletromagnético Indutivo (EM) para correlacionar anomalias de condutividade elétrica aparente com a contaminação procedente de sepultamentos em pesquisa desenvolvida pelo Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (CEPAS) da Universidade de São Paulo.

Posteriormente, outras pesquisas relativas a este tema foram desenvolvidas, devendo ser registrado o trabalho de Bastianon et al. (2000), que empregaram os métodos de Eletrorresistividade, Eletromagnético Indutivo e GPR (Ground Penetrating Radar) em levantamentos no Cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, município de São Paulo (SP), tendo sido reportadas, respectivamente para esses métodos, as presenças de anomalias de menores resistividades elétricas, de maiores condutividades e de atenuação da reflexão do sinal quando da presença de maior contaminação subterrânea.

Em Portugal, Senos Matias et al. (2004) utilizaram os mesmos métodos anteriores para comparar seus desempenhos na investigação de dois cemitérios e onde correlacionaram as plumas de contaminação definidas no levantamento geofísico com os compostos inorgânicos e metais presentes na água subterrânea.

Reporta-se, também, o levantamento de Silva & Malagutti Filho (2010) aplicando a Eletrorresistividade, por meio de sondagem elétrica vertical e imageamento elétrico no Cemitério Municipal de Vila Rezende em Piracicaba (SP), bem como o trabalho de Xavier (2015) para diagnóstico do Cemitério Municipal de Rio Claro, aplicando essas mesmas técnicas, além do método Eletromagnético Indutivo, cujos baixos valores obtidos de resistividade elétrica em ambos os casos determinaram os locais potencialmente impactados.

Além desses estudos, cita-se aqui a pesquisa

de Saraiva (2010) sobre os efeitos nos dados geofísicos obtidos pelo enterramento e decomposição de corpos e carcaças de animais, que simulam os sepultamentos humanos, aplicando os métodos de Eletrorresistividade, Potencial Espontâneo (SP), Eletromagnético Indutivo e GPR, tendo como melhor resposta as medidas de resistividades elétricas do primeiro método. Apesar de diversos exemplos da Eletrorresistividade em casos de contaminação por cemitérios, até o momento, não existe publicação mais completa em periódico sobre a aplicação da Resistividade Capacitiva neste tema, mas apenas registro de resultados parciais no trabalho de Aquino et al. (2021) e que se refere à apresentação geral dos métodos geofísicos nos estudos de contaminação subterrânea.

Método de Resistividade Capacitiva

O método de Resistividade Capacitiva (RC) se caracteriza por se constituir num sistema de acoplamento capacitivo que provoca a passagem de corrente alternada, numa frequência de sinal igual a 16,5 kHz, através de um cabo coaxial que age como uma placa capacitadora, enquanto a superfície do terreno age como a outra placa capacitadora, onde o acoplamento de cabo-terra é caracterizado por uma capacitância elétrica variável e que depende das condições de resistência do solo (Yamashita et al. 2004).

Após a injeção de corrente de forma capacitiva no solo (Figura 3), o nível de tensão recebido no receptor é convertido num sinal digital e transferido para o registrador de dados para armazenamento e conversão interna em valores de resistividade elétrica (Kuras, 2002).

Deste modo, a resistividade aparente do terreno (ρ_a) é calculada pela equação:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} ,$$

onde I é a corrente elétrica injetada pelo transmissor, ΔV é a tensão elétrica medida no receptor e K é o fator geométrico do arranjo dipolo-dipolo capacitivo e que se relaciona ao comprimento individual do dipolo L e à distância X entre os centros dos dipolos transmissor e receptor (Figura 3).

Na realização da técnica de imageamento elétrico, são executadas varreduras em níveis de profundidades diferentes ao longo de um perfil de interesse (Figura 4), com intuito de se investigar as variações laterais de resistividade elétrica associadas à continuidade das feições ou estruturas e de se apresentar os resultados em forma de seções de subsuperfície.

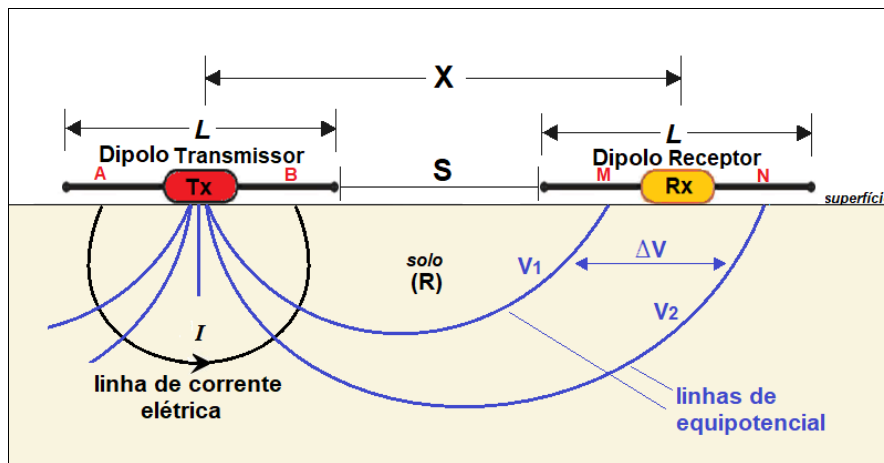


Figura 3 - Corrente e potenciais elétricos nos dipolos capacitivos.

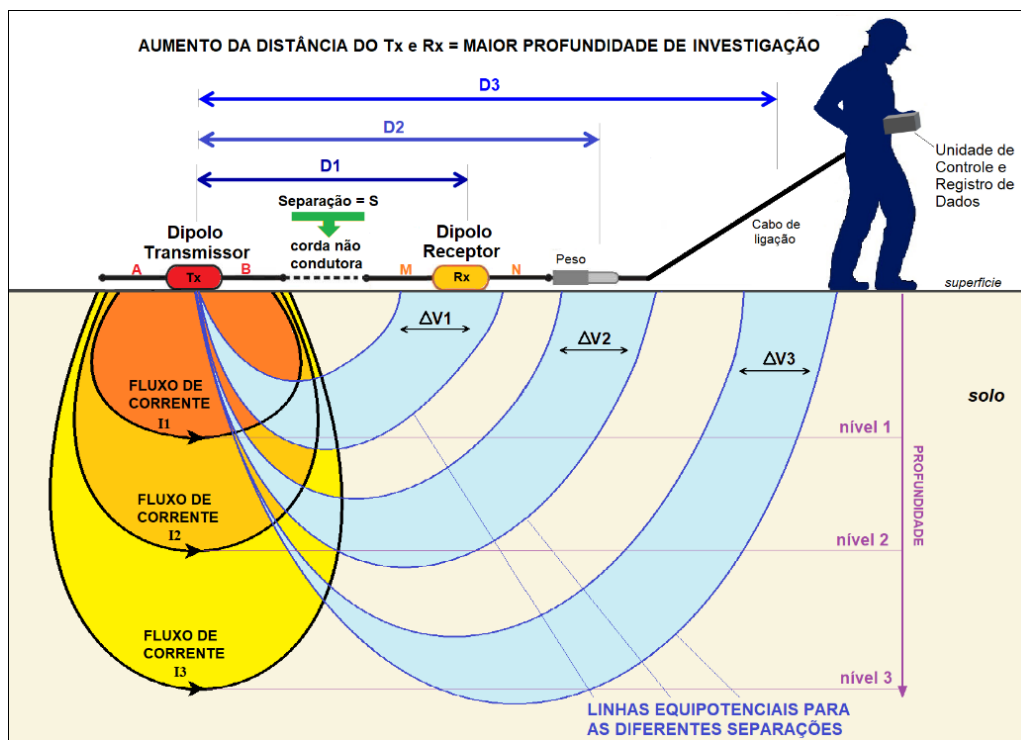


Figura 4 - Diagrama de execução de imageamento elétrico.

Aquisição de dados de Resistividade Elétrica

No levantamento geofísico e investigação confirmatória posterior, foi selecionada a porção norte do Cemitério Nossa Senhora Aparecida, com aproximadamente 4.900 m², que é a área mais antiga desta necrópole, onde foram executadas linhas geofísicas perpendiculares nas ruas de acesso internas, contornando as diferentes quadras, além da realização da linha L9 adjacente ao muro externo, cujos posicionamentos podem ser vistos a seguir na figura 5. Em função do instrumento Ohmmapper TR1 utilizado ser monorreceptor, foi necessária a repetição de mais vezes a mesma linha de medidas com separações sucessivamente maiores entre o dipolo transmissor e o dipolo receptor para possibilitar amostragens de porções geológicas gradativamente mais profundas.

Desta maneira, na aquisição de dados em campo, foram utilizadas as separações entre as extremidades dos dipolos transmissor e receptor de 1,0, 5,0 e 10,0 m (comprimentos dos “cabos não condutores”), que resultam num espaçamento entre os centros dos dipolos de 6,0, 10,0 e 15,0 m considerando a extensão de dipolo de 5,0 m, tendo sido adotada medidas por amostragem em tempo a cada 1,0 s.

Após o levantamento, os dados dos perfis elétricos individuais de diferentes separações foram agrupados e convertidos em resistividade aparente para a mesma linha de levantamento por meio do programa Magmap2000 da Geometrics Incorporated (2001). Numa etapa posterior de processamento, foram geradas as pseudo-seções de resistividade elétrica pela interpolação desses dados e, finalmente, as seções de modelamento



Figura 5- Localização dos perfis geofísicos executados na área investigada.

geofísico para interpretação, através do emprego do programa de inversão Res2Dinv, versão 3.54 (2004).

Neste levantamento, foi empregado o equipamento Ohmmapper modelo TR1, marca Geometrics Inc., que, além do dipolo transmissor, possui apenas um dipolo receptor de tensão (Figura 6).

Para visualização em planta da variação das resistividades elétricas na área e elaboração dos mapas de anomalias em níveis de corte de profundidade (*slice*) a serem apresentados, foi utilizado o programa Oasis Montaj, versão 6.4, da Geosoft Latinoamerica (2007), através da plotagem dos pontos de medidas e da interpolação dos valores medidos pelo método de krigagem.



Figura 6 - Equipamento Ohmmapper TR1 utilizado.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na sequência, são apresentadas as seções de resistividade elétrica obtidas a partir da inversão e modelamento de dados (Figuras 7 e 8), dando-se ênfase aqui à verificação de zonas anômalas de baixas resistividades elétricas, conforme as

escalas cromáticas de valores abaixo de cada imagem gerada, e na determinação de seus focos principais e que podem corresponder aos locais com maiores concentrações de metais-traço em subsuperfície.

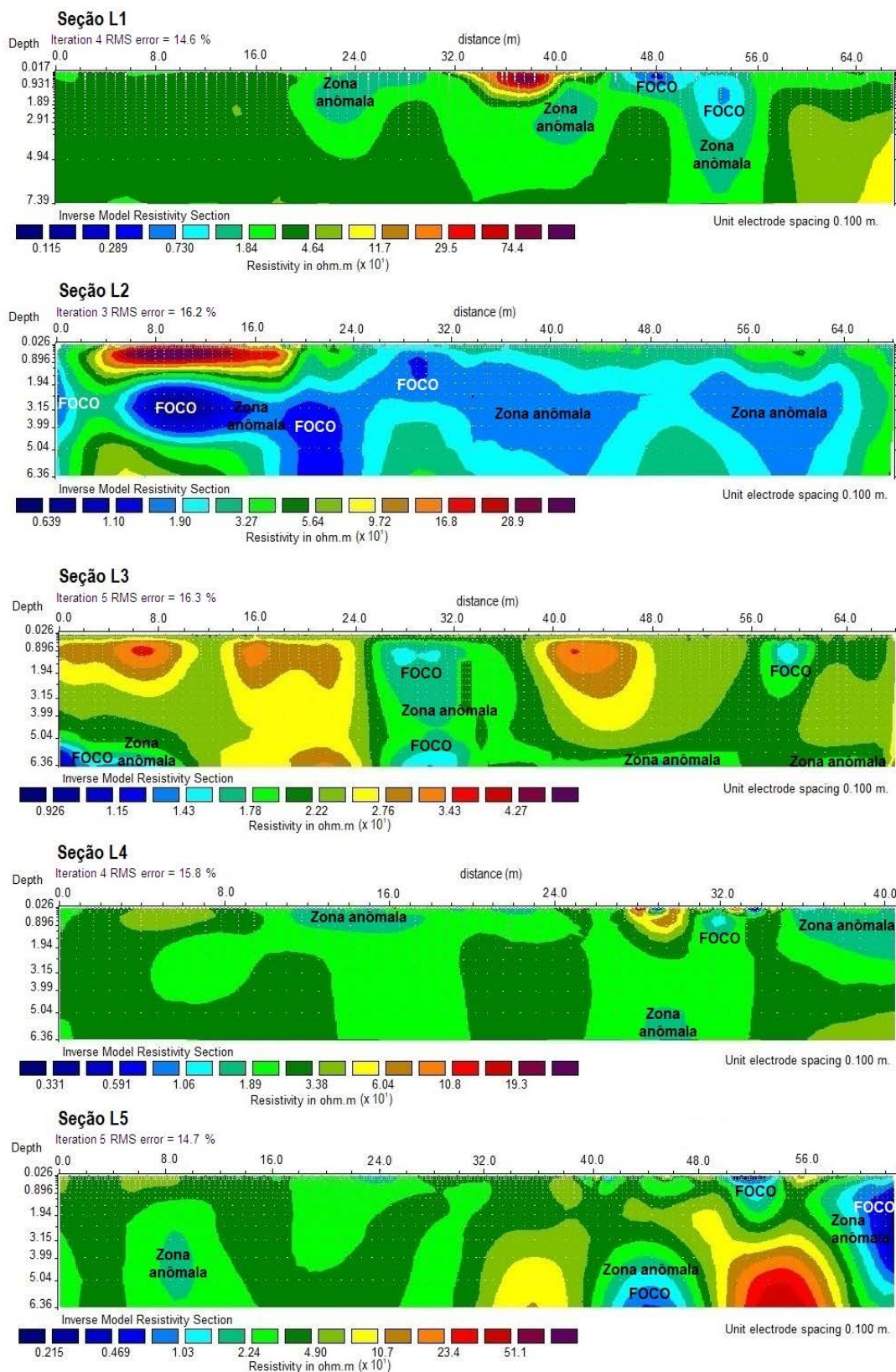


Figura 7 - Seção de resistividade das linhas L1 a L5 e interpretações.

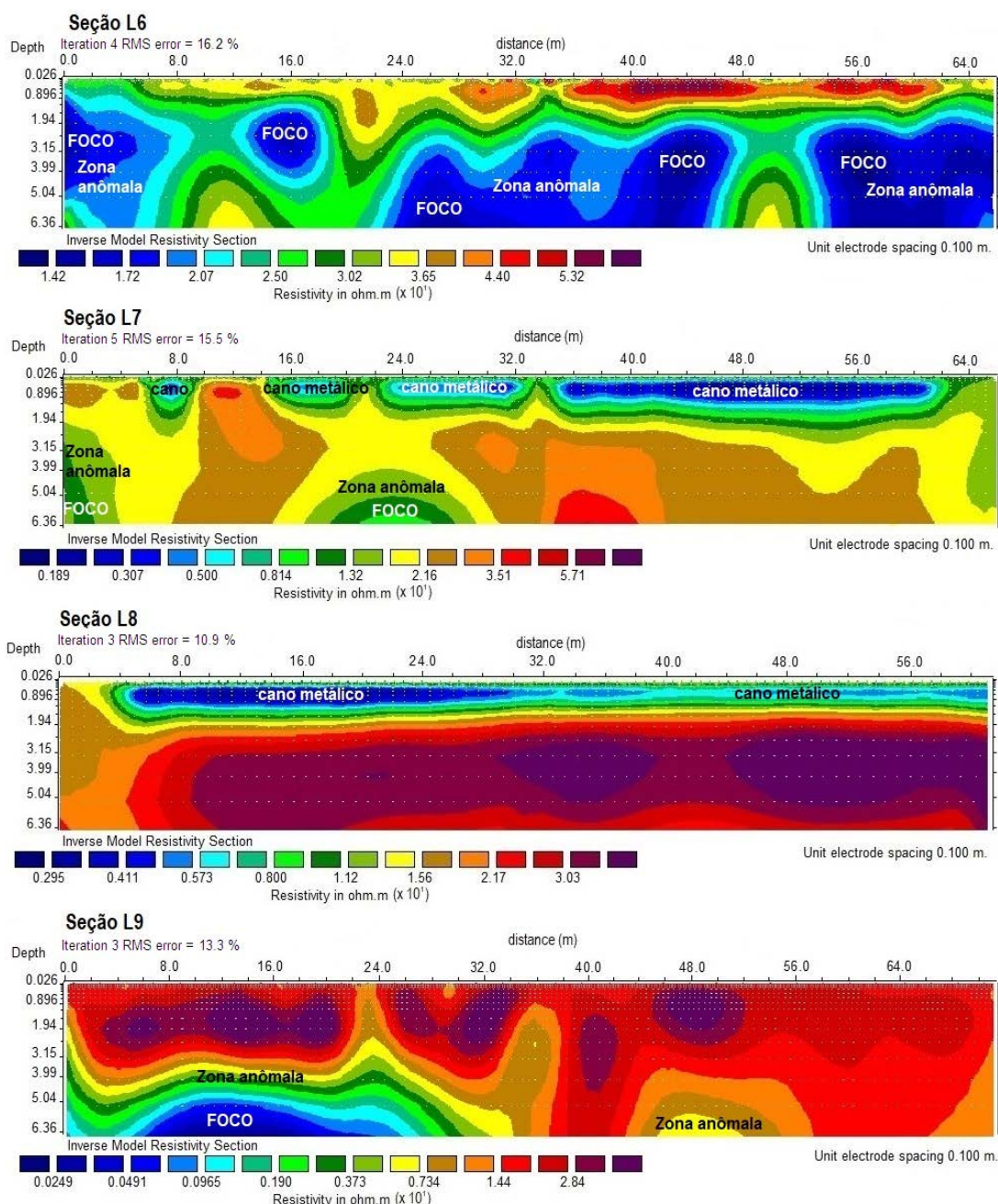


Figura 8 - Seção de resistividade das linhas L6 a L9 e interpretações.

De modo geral, ao se observar as seções anteriores constata-se um comportamento bem variável e irregular das resistividades elétricas de subsuperfície, bem contrastante ao apresentado de forma mais homogênea para a linha L8, que foi realizada mais ao sul fora da área dos jazigos (Figura 8).

Essas heterogeneidades do sinal obtido, representadas pelas zonas anômalas e focos de baixos valores de resistividades elétricas nesta interpretação, indicam a existência de fator proeminente causador das alterações das propriedades elétricas subterrâneas na área de sepultamento, o que, muito provavelmente, está associado a contaminação de caráter inorgânico do necropercolado. É importante frisar que as sondagens da área indicaram a presença de solo de alteração, variando

de material argiloso raso à mais arenoso um pouco mais profundo, condizente ao comportamento verificado na seção L8, mas que, no entanto, não provocariam as intensas oscilações de resistividade elétrica constatadas e nem tampouco valores anômalos tão baixos verificados nas demais seções.

Outra observação em destaque diz respeito ao apresentado na linha L9, que é externa ao cemitério, onde não se verificam anomalias rasas como na área de sepultamentos, mas apenas anomalias pouco mais profundas, o que indica uma eventual migração da contaminação nos níveis inferiores para o exterior no sentido leste da área.

Assim, tomando-se como referência as variações de resistividade elétrica verificadas nas seções, é possível estabelecer intervalos de valores

representativos das feições ambientais interpretadas (anomalias e focos principais) e do material

geológico presente no local (solo de alteração), os quais constam da Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Resistividades elétricas das feições identificadas nas seções.

Seção	Anomalias (ohm.m)	Focos principais (ohm.m)	Solo de alteração (ohm.m)	Observação
L1	$< 1,84 \times 10^1$	$< 0,73 \times 10^1$	$> 1,84 \times 10^1$	-
L2	$< 1,90 \times 10^1$	$< 1,50 \times 10^1$	$> 1,90 \times 10^1$	-
L3	$< 2,00 \times 10^1$	$< 1,60 \times 10^1$	$> 2,00 \times 10^1$	-
L4	$< 1,89 \times 10^1$	$< 1,47 \times 10^1$	$> 1,89 \times 10^1$	-
L5	$< 2,24 \times 10^1$	$< 1,03 \times 10^1$	$> 2,24 \times 10^1$	-
L6	$< 2,07 \times 10^1$	$< 1,57 \times 10^1$	$> 2,07 \times 10^1$	-
L7	$< 1,74 \times 10^1$	$< 1,32 \times 10^1$	$> 1,74 \times 10^1$	cano metálico superficial
L8	-	-	$> 1,56 \times 10^1$	cano metálico superficial
L9	$< 1,09 \times 10^1$	$< 0,28 \times 10^1$	$> 1,09 \times 10^1$	executada na parte externa

Para avaliação do comportamento das resistividades elétricas na área e locação das sondagens confirmatórias com coleta de solo para análises, foram elaborados mapas de dados interpolados para as profundidades de corte de 2,0 e 5,2 m, sendo este primeiro nível selecionado por estar

logo abaixo do fundo das sepulturas onde o necrochorume poderia ter sido infiltrado de imediato, e o segundo nível referente à possibilidade de migração de contaminação para profundidades inferiores, cujos resultados são apresentados na sequência nas figuras 9 e 10.

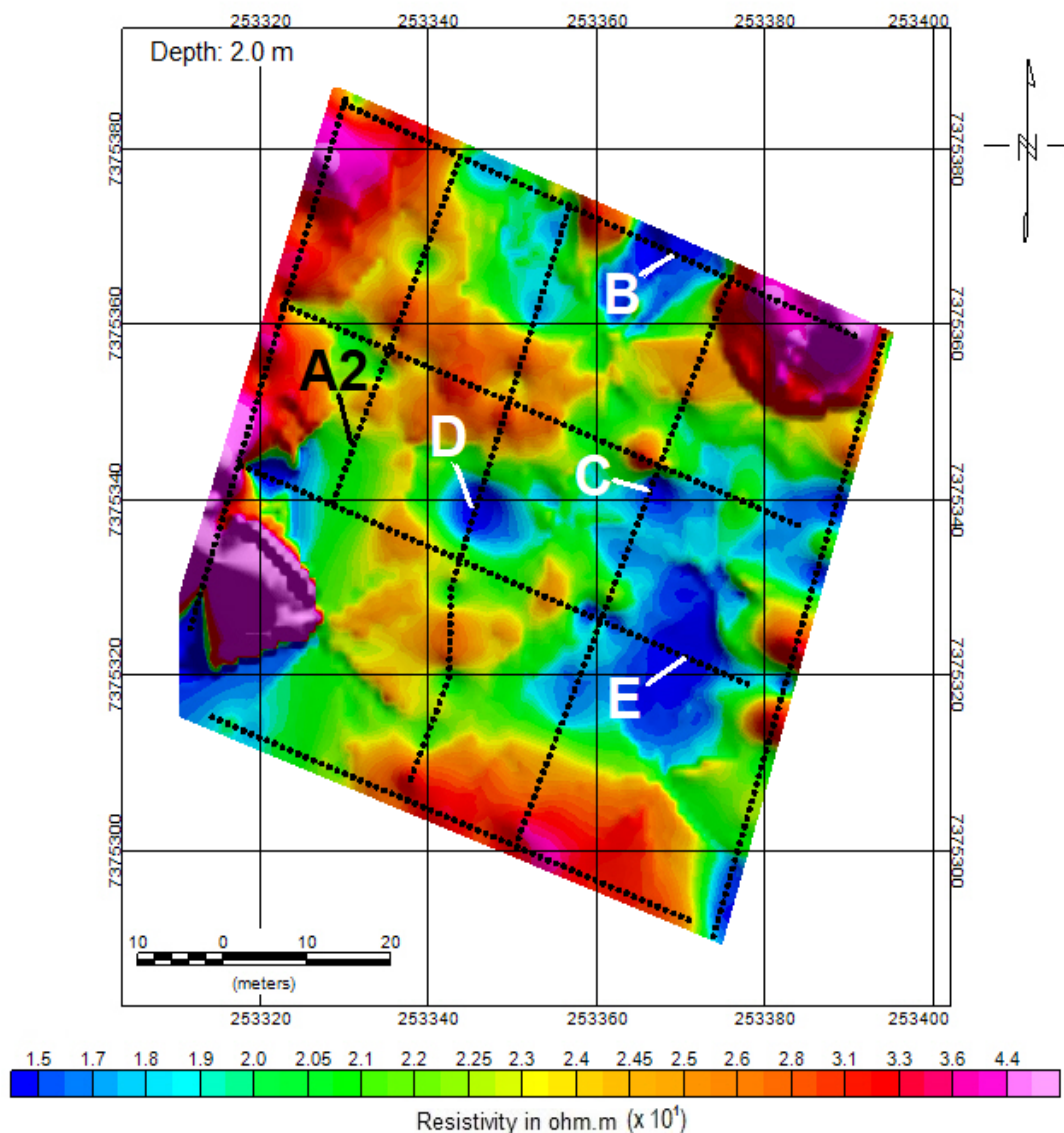


Figura 9 – Mapa de resistividade na profundidade de corte de 2,0 m e locais de menores valores (letras).

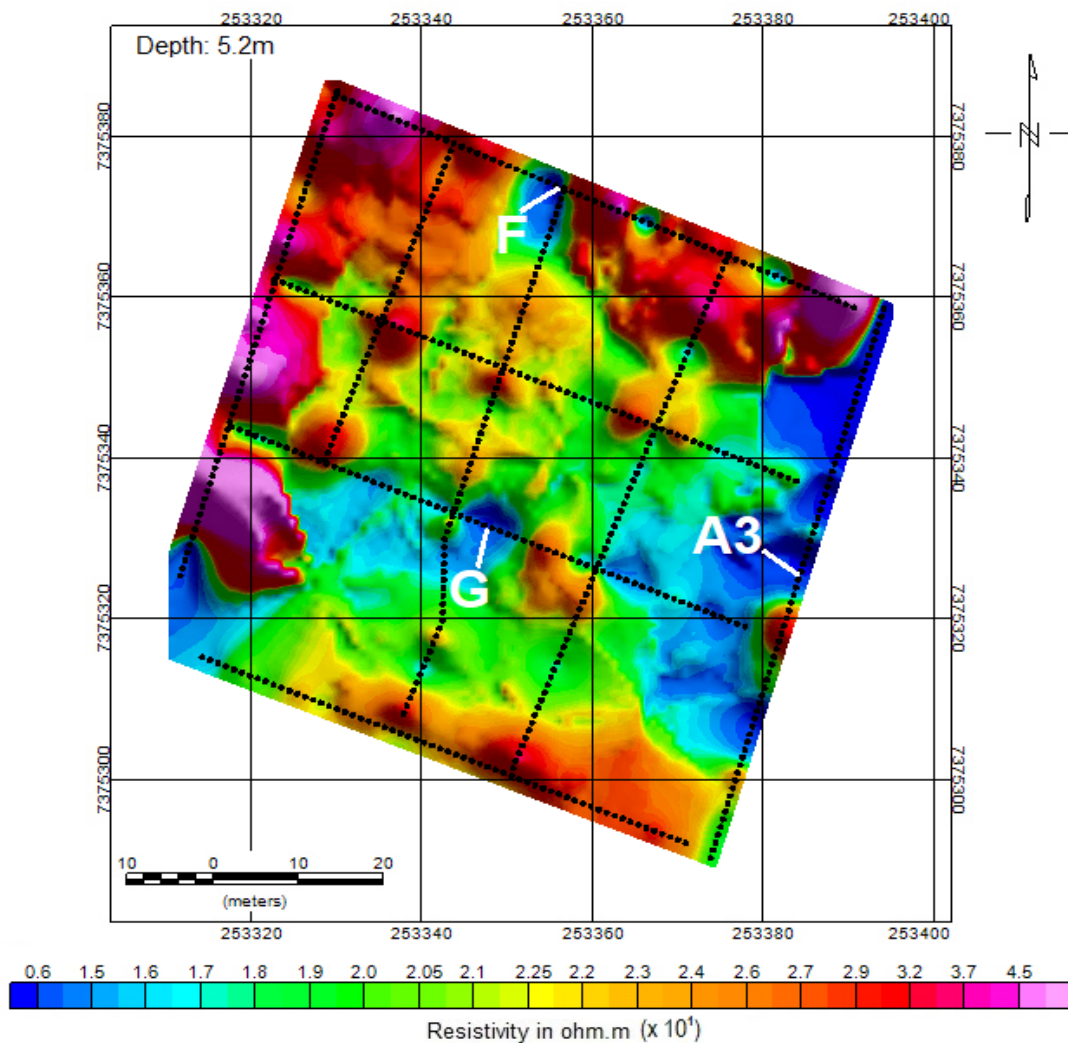


Figura 10 – Mapa de resistividade na profundidade de corte de 5,2 m e locais de menores valores (letras).

Nos mapas anteriores (Figuras 9 e 10), se observa que parte significativa do local investigado apresenta resistividades elétricas abaixo de $2,1 \times 10^1$ ohm.m (valor de *background*), abrangendo cerca de 60% da área total, o que, a princípio já indica alterações anômalas desta propriedade elétrica nos níveis de corte considerados.

Destaca-se que as resistividades elétricas acima deste valor indicado são condizentes ao previsto para os solos de alteração argiloso e arenoso, que foram constatados na análise do material amostrado nas sondagens da área, ressaltando aqui que quanto maior forem as resistividades nos mapas anteriores, maiores serão os teores da fração areia.

Mais detalhadamente nesses mapas, é possível verificar a existência de algumas regiões com anomalias geofísicas mais proeminentes, com resistividades elétricas menores que $1,5 \times 10^1$ ohm.m, as quais foram denominadas de regiões B, C, D, E, F, G e A3, constituindo-se, possivelmente, nos locais principais com maior grau de contaminação, ocupando posições mais ao norte, central e mais a leste.

Assim, é possível se inferir que esses pontos anômalos de baixas resistividade elétrica apresentem maior concentração subterrânea pela presença de metais-traço, passíveis, portanto, à investigação confirmatória por sondagens, amostragens de solo e análises químicas do material coletado.

Outra verificação importante ao se observar as imagens anteriores diz respeito ao posicionamento da região anômala A3 do mapa de corte de 5,2 m de profundidade e que indica a possibilidade de migração da contaminação nos níveis inferiores para porções externas no sentido leste da área, o que exige um diagnóstico e um monitoramento mais detalhado nesta direção.

Deste modo, foram selecionados cinco locais para sondagens e coleta de material, tendo sido quatro desses pontos posicionados nos diferentes quadrantes dentro da região investigada (A2, A3, B e C) e um mais ao sul fora dos limites do cemitério (R1), em local arborizado sem influência dos sepultamentos e que seria o ponto de referência (*background*) para comparação dos resultados.

Dos quatro pontos locados para sondagens no interior da área investigada, A3, B e C são aqueles que apresentaram os menores valores de resistividade elétrica, enquanto que na região do ponto A2 é perceptível alteração de resistividade, mas não tão intensa, conforme observado na Figura 9, o que serviu para correlacionar a amplitude das anomalias geofísicas verificadas e os resultados das análises químicas das concentrações dos metais-traço.

Assim, em cada ponto de sondagem foi coletado cerca de 5,5 kg de solo por meio de trado manual e realizadas amostragens compostas nas profundidades de 0-0,1 m; 0,4-0,5 m; 0,9-1,0 m; 1,4-1,5 m, 1,9-2,0 m, 2,4-2,5 m, 2,9-3,0 m. Posteriormente, essas amostras foram submetidas às análises seguindo os métodos m e Standard Methods, 22^a

edição, Método 3120-B, respectivamente, utilizando-se o equipamento Thermo Scientific mod. iCAP 6300 Duo de Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) para detecção dos parâmetros bário, cádmio, cobalto, cromo, cobre, manganês, molibdênio, níquel, chumbo e zinco, com concentração final expressa em unidades de mg kg⁻¹ de solo.

Dentre esses metais, bário, cobalto e zinco foram aqueles que as análises químicas indicaram concentrações no solo acima dos valores de prevenção (VP) indicados pela CETESB (2016), que são de 120,0 mg/kg, 25,0 mg/kg e 86,0 mg/kg respectivamente, cujos resultados são apresentados nos gráficos a seguir (Figuras 11, 12 e 13).

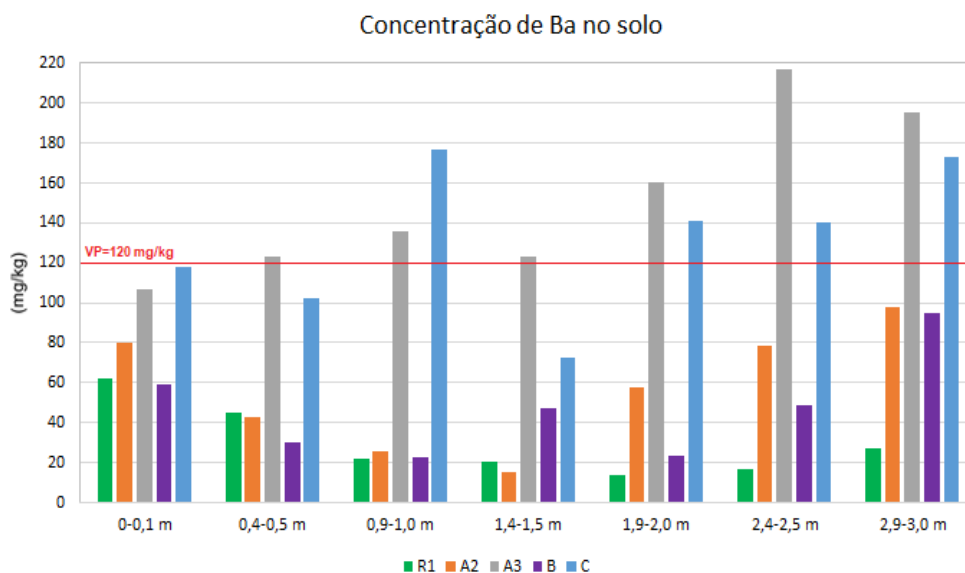


Figura 11 – Concentrações de bário nas amostras de solo.

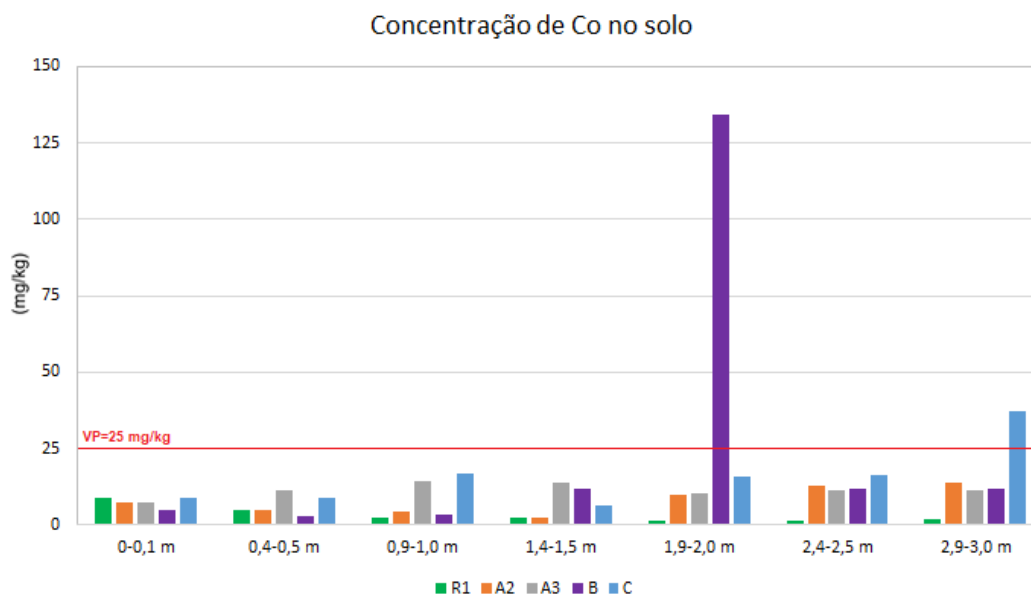


Figura 12 – Concentrações de cobalto nas amostras de solo.

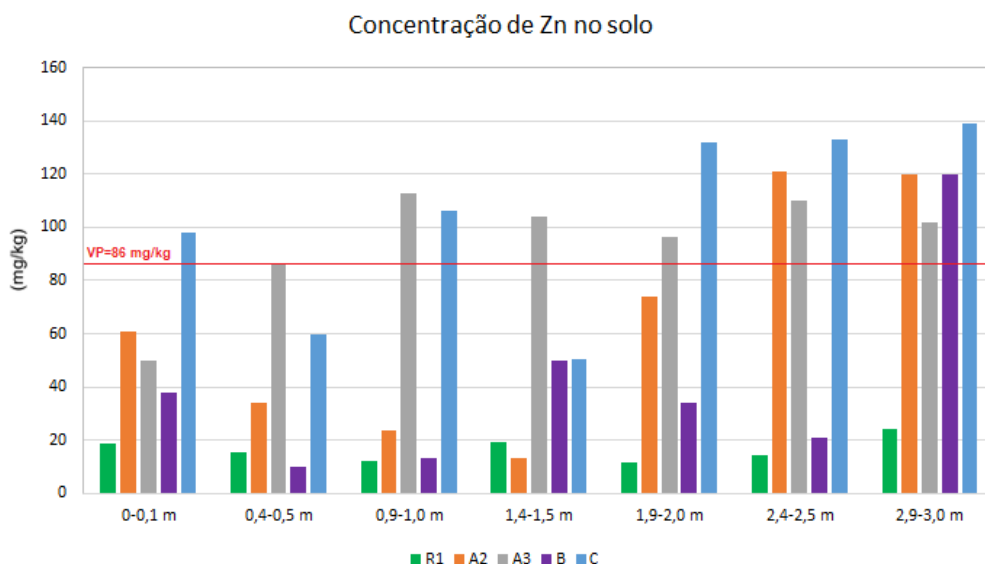


Figura 13 – Concentrações de zinco nas amostras de solo.

Neste caso, os valores desses três elementos que ultrapassaram os limites ambientais anteriores, comumente, se referem às concentrações desses metais-traço que podem implicar em alterações prejudiciais à qualidade do solo e da água subterrânea.

Adicionalmente, são apresentados os resultados

analíticos para manganês (Figura 14), os quais apontaram discrepâncias significativas nas leituras que, apesar de não ter padrões estabelecidos, podem apontar alterações geoquímicas locais e acréscimos na concentração deste metal no solo de forma anômala.

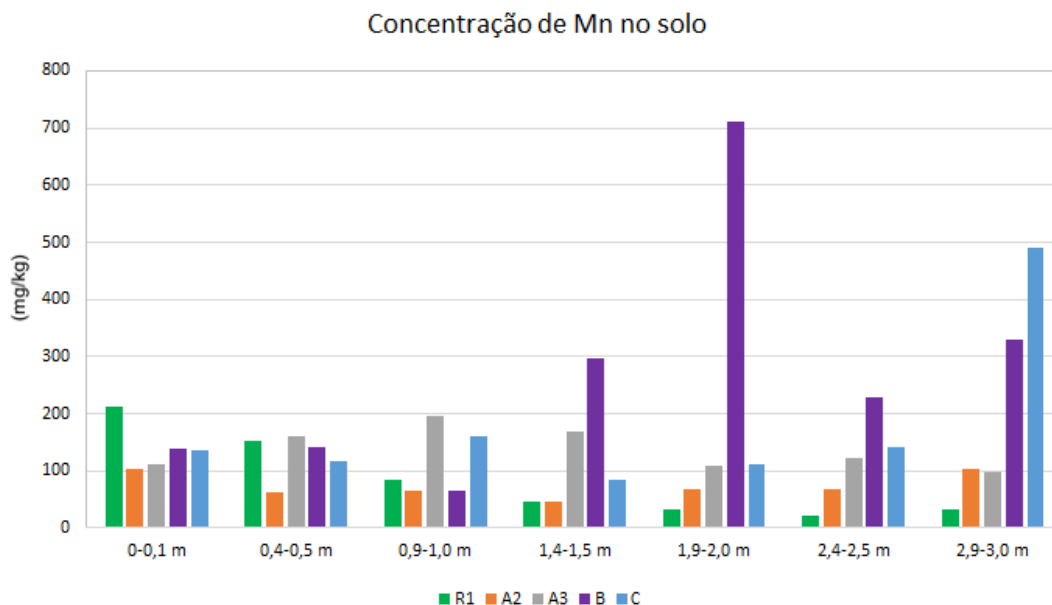


Figura 14 – Concentrações de manganês nas amostras de solo.

De acordo aos gráficos anteriores (Figuras 11 a 14), as concentrações de metais-traço acima dos valores de prevenção (VP) se dão, comumente, a partir de 1,0 m de profundidade, sendo mais expressivos à medida que se aprofundam, o que aponta uma contaminação a partir dos níveis dos sepultamentos, indicando, conseqüentemente, que os jazigos deste cemitério se constituem em fontes de contaminação subterrânea como previsto e com provável infiltração

dos contaminantes no material mais permeável (solo arenoso) logo abaixo.

Verifica-se, também, que as presenças mais frequentes dos metais ocorrem nos pontos A3, B e C e que correspondem aos focos das anomalias de menores de resistividade elétricas, com valores abaixo de $1,5 \times 10^1$ ohm.m indicados no mapeamento geofísico das figuras 9 e 10.

Em contrapartida, a ocorrência acima do valor de prevenção só é observada no ponto A para o

elemento zinco (Figura 13) e é restrita às maiores profundidades amostradas, o que pode ser correlacionado aos valores não tão discrepantes de resistividade elétrica (anomalias geofísicas menos intensas) determinados neste local (Figura 9).

Assim, comparando os dados adquiridos pelas metodologias indireta e direta aplicadas nesta pesquisa, é possível constatar que as análises químicas do material coletado em subsuperfície apontaram a existência de metais-traço em desconformidade acima dos limites ambientais nos pontos indicados pelas anomalias geofísicas

deste levantamento.

Portanto, esses resultados apontam a correlação inversa entre as maiores concentrações verificadas dos metais-traço no solo e os decréscimos dos valores de resistividade elétrica que foram observados nas medidas obtidas pelo método de Resistividade Capacitiva, tendo esta metodologia proporcionado, de maneira adequada, a escolha dos locais para a execução da investigação confirmatória e aferição da presença de contaminação subterrânea na área, o que acabou se comprovando.

CONCLUSÃO

Inicialmente, destaca-se o ineditismo deste estudo pela aplicação do método geofísico de Resistividade Capacitiva na investigação ambiental de cemitério e também nenhuma intercorrência de alteração nas condições locais ou das instalações avaliadas em função da metodologia utilizada ser não invasiva, adequada, portanto, a uma área onde os aspectos religiosos e culturais devem ser preservados obrigatoriamente. Neste contexto, as condições de superfície encontradas na área avaliada, tanto pela impermeabilização do local, como pela presença de objetos metálicos nos jazigos, não se mostraram empecilhos ao emprego do método geofísico em questão, como apontam os resultados obtidos, o que demonstra sua potencialidade de aplicação neste tipo de cenário.

Quanto à correlação dos resultados apresentados, estes apontaram a correspondência entre as maiores concentrações dos contaminantes metálicos oriundos das sepulturas e a redução anômala dos valores de resistividade elétrica verificadas pelo sistema capacitivo, apontando

sua capacidade como metodologia de rastreamento em investigação ambiental confirmatória para a tomada de decisão quanto aos locais mais adequados às sondagens e amostragens de solo.

Outra observação importante a partir da observação do posicionamento das anomalias deste levantamento geofísico, é a indicação de uma eventual migração da contaminação em níveis inferiores para pontos externos, em sentido leste da área investigada, necessitando, assim, da ampliação de diagnóstico e monitoramento para avaliar sua dispersão em subsuperfície.

Conclui-se, assim, que a metodologia de Resistividade Capacitiva aqui apresentada demonstra sua importância como método de varredura (*screening*) no gerenciamento ambiental de áreas contaminadas, destacando que, a partir do aumento de sepultamentos provocados pela epidemia de Covid-19, poderá ocorrer uma maior incidência de casos de contaminação subterrânea provenientes de cemitérios, o que demandará a utilização de diversos tipos de técnicas e métodos de diagnóstico, como é o caso.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio proporcionado a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AQUINO, W.F.; SILVA, M.C.; BASTIANON, D.; TONELLO, P.S. Métodos da Geofísica Ambiental aplicados à investigação de contaminação subterrânea. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – RBGEA**, v. 11, n.1, p.74-97, 2021.
- BARROS, Y.J.; MELO, V.D.; ZANELLO, S.; ROMANO, E.N.D.; LUCIANO, P.R. Heavy metal contents and mineralogical characterization of soils from the Santa Candida Municipal Cemetery, in Curitiba (PR, Brazil). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1763-1773, 2008.
- BASTIANON, D.; MATOS, B. A.; AQUINO, W. F.; PACHECO, A.; MENDES, J. M. Geophysical surveying to investigate groundwater contamination by a cemetery. In: SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, Arlington, 2000. **Actas...** Arlington: Environmental and Engineering and Geophysical Society, 2000, p. 709-718.
- BAUM, C.A.; BECEGATO, V.A.; LAVNITCKI, L.; VILELA, P.B.; DUMINELLI, E.C.; BECEGATO, V.R.; ROBAZZA W.S.; PAULINO A.T. Evaluation of soil contamination by heavy metals at public cemeteries in the municipality of Lages, southern Brazil. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 5, p. 883-891, 2021
- BRASIL - Ministério do Meio Ambiente (MMA), Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 335, de 3 de abril de 2003**. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitérios. 2003.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Valores orientadores para solo e água subterrânea no**

- estado de São Paulo. São Paulo, 3p, 2016. <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/valores-orientado-res-para-solo-e-agua-subterranea/>
- GEOMETRICS INCORPORATED. **Manual de operação do equipamento OhmMapper TR1 29005-01**. Rev. F, 147 p, 2001.
- GEOSOFT LATINOAMERICA. **Oasis-Montaj Standart Edition**, versão 6.4, Software Manual, CD Rom, 2007.
- GODOY, A.M.; HACKSPACHER, P.C.; OLIVEIRA M.A.F.; ARAÚJO, L.M.B. Evolução geológica dos batólitos granitoides neoproterozoicos do sudeste do estado de São Paulo. São Paulo, UNESP, **Revista Geociências**, v. 29, n. 2, p. 171-185, 2010.
- Jonker C. & Olivier, J. Mineral Contamination from Cemetery Soils: Case Study of Zandfontein Cemetery, South Africa. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 9, p. 511-520, 2012.
- KEMERICH, P.D.C.; SILVA, J.L.S.; BARROS, G.; BORBA, W.F.; UCKER, F.E.; FOLETTO, C.V. Qualidade da água subterrânea em área ocupada por cemitério: uso da técnica de espectrometria de fluorescência de raios-x por energia dispersiva (EDXRF). **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 7, n. 3, p. 166-18, 2012.
- KURAS O. **The capacitive resistivity technique for electrical imaging of the shallow subsurface**. Tese (Doutorado). Inglaterra, Universidade de Nottingham, 286p, 2002. http://eprints.nottingham.ac.uk/10171/1/PhD_Kuras_Oliver_2002.pdf.
- NECKEL, A.; GONÇALVES JUNIOR, A.C.; RIBEIRO, L.A.; SILVA, C.C.O.A.; CARDOSO, G.T. Cemeteries heavy metals concentration analysis of soils and the contamination risk for the surrounding resident population. **International Journal of Engineering Research and Application**, v. 6, n. 4, p. 30-35, 2016.
- PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Boletim diário de sepultamento**, 2022. https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/subprefeituras/servico_funerario/ace_sso_a_informacao/index.php?p=299555. Acesso em 20/02/2022.
- PRESTES DA SILVA, R.B.; CAMPOS, M.C.C.; SILVA, L.S.; BRITO FILHO, E.G.; LIMA, A.F.L.; PINHEIRO, E.N.; CUNHA, J.M. Concentration of heavy metals in soils under cemetery occupation in Amazonas, Brazil. **Soil and Sediment Contamination: An International Journal**, v. 29, p. 192-208, 2019.
- 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.
- SENOS MATIAS, M. J.; MARQUES DA SILVA, M.; GONÇALVES, L.; PERALTA, C.; GRANJEIA, C.; MARTINHO, E. An Investigation into the use of geophysical methods in the study of aquifer contamination by graveyards. **Near Surface Geophysics**. European Association of Geoscientists & Engineers, p. 131-136, 2004.
- SILVA, F.C. **Avaliação de metais potencialmente tóxicos em zona não saturada da necrópole de Nossa Senhora Aparecida, Piedade, SP**. Rio Claro. 249 p, 2018. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais), Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista.
- SILVA, R. W. & MALLAGUTTI FILHO, W. Emprego do imageamento elétrico no estudo da contaminação por cemitérios. São Paulo, UNESP, **Revista Geociências**, v.29, n.3, p.343-354, 2010.
- XAVIER, F.V. **Métodos geoeletricos aplicados ao diagnóstico ambiental subsuperficial do Cemitério Municipal de Rio Claro, SP**. Rio Claro. 180 p, 2015. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista.
- YAMASHITA, Y.; GROOM, D.; INAZAKI, T.; HAYASHI, K. Rapid near surface resistivity survey using the capacitively-coupled resistivity system: OhmMapper. In: 7TH SEGJ INTERNATIONAL SYMPOSIUM, Sendai, Japão, 2004. **Actas...**Sendai: 2004, p. 292-295.

*Submetido em 10 de dezembro de 2021
Aceito para publicação em 15 de outubro de 2022*