

EMPREGO DO IMAGEAMENTO ELÉTRICO NO ESTUDO DA CONTAMINAÇÃO POR CEMITÉRIOS

Robson Willians da Costa SILVA ¹ & Walter MALAGUTTI FILHO ²

(1) Laboratório de Ecologia Isotópica, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo. Avenida Centenário, 303 – São Dimas. CEP 13416-000. Piracicaba, SP. Endereço eletrônico: robsonwillians@yahoo.com.br

(2) Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro. Avenida 24 - A, 1515 – Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: malaguti@rc.unesp.br

Introdução

Aspectos Ambientais de Cemitério
Fenômenos Transformativos de Cadáveres
Vulnerabilidade do Meio Físico de um Cemitério
Risco à Contaminação Subterrânea

Caracterização da Área de Estudos

Materiais e Métodos

Sondagem Elétrica Vertical (SEV)
Imageamento Elétrico (IE)

Resultados

Modelo Geoelétrico
IE da Contaminação

Conclusões

Agradecimentos
Referências Bibliográficas

RESUMO – Devido à falta de proteção ambiental com a qual o procedimento de enterrar os corpos foi conduzido ao longo das décadas, muitos dos cemitérios se tornaram áreas contaminadas, por substâncias orgânicas e inorgânicas, e microrganismos patogênicos. Neste trabalho são apresentados os resultados do imageamento elétrico na delimitação de áreas potencialmente contaminadas por necrochorume, no cemitério municipal de Vila Rezende, Piracicaba - SP. Os resultados indicam uma profundidade do nível freático entre 3,1 e 5,1 m, com duas direções de fluxo subterrâneo, uma a SW e outra a SE. Tanto as prováveis plumas de contaminação, que tem as mesmas direções de fluxo subterrâneo, quanto às anomalias condutivas verificadas nas seções geoelétricas, confirmam as suspeitas de contaminação na área. A provável pluma a SE prolonga-se para fora dos limites do cemitério. A localização das anomalias condutivas e das prováveis plumas de contaminação demonstrou que a contaminação tem ligação com a profundidade do nível freático e com o tempo de sepultamento.

Palavras-chave: imageamento elétrico, cemitério, necrochorume.

ABSTRACT – *R. W. da C. Silva & W. Malagutti Filho - Application of electrical imaging in the study of contamination from cemeteries.* Due to lack of environmental protection with which the process of burying the corpses was conducted over the decades, many cemeteries have become areas contaminated by organic and inorganic substances and pathogenic microorganisms. This paper presents the results of electrical imaging in delineation of areas potentially contaminated by necrochorume in the municipal cemetery of Vila Rezende, Piracicaba - SP. The results indicate a depth of water table among 3,1 and 5,1 m, with two flow directions, being one to SW and another to SE. So the probable contamination plume, that has the same directions of underground flow, as for the conductive anomalies verified at the geoelectrics sections confirm the suspicions of contamination in the area. The probable plume the SE is prolonged to out of the cemetery. The location of the conductive anomalies and likely contamination plumes demonstrated that the contamination is linked with the depth of water table level and the burial time.

Keywords: Electrical imaging, cemetery, necrochorume.

INTRODUÇÃO

Os cemitérios podem causar sérios impactos ao meio ambiente, por meio do aumento da concentração de substâncias orgânicas e inorgânicas nas águas subterrâneas e pela eventual presença de microrganismos patogênicos (Ucisik & Rushbrook, 1998).

A partir da resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 335 de 3 de abril de 2003 que dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitérios horizontais e verticais a serem implantados

no Brasil, os cemitérios são vistos como fontes de contaminação do ambiente, e sua implantação está sujeita ao atendimento dos critérios legais. Desta forma faz-se necessária a implantação de medidas de proteção ambiental para salvaguardar o solo e as águas subterrâneas. A contaminação do meio físico por líquido proveniente da decomposição de cadáveres, também conhecido como necrochorume, particularmente no primeiro ano do sepultamento, ocorre principalmente

devido à implantação inadequada de cemitérios, em locais que apresentam condições hidrogeológicas desfavoráveis, como pequena profundidade do nível freático, solos muito permeáveis, rochas com fraturas e zonas cársticas, principalmente.

A aplicação de métodos geofísicos geoeletricos nas investigações ambientais apresenta diversas vantagens, principalmente pela característica investigativa indireta e não destrutiva, na determinação da profundidade da zona saturada, identificação do sentido do fluxo da água, na investigação de contaminantes em subsuperfície. Este fato permite seu emprego em cemitérios, sem riscos para construções presentes como jazigos, lápides, mausoléus, etc.

Neste trabalho são apresentados os resultados do imageamento elétrico na delimitação de áreas potencialmente contaminadas por necrochorume, no cemitério municipal de Vila Rezende, Piracicaba - SP.

ASPECTOS AMBIENTAIS DE CEMITÉRIOS

O necrochorume é caracterizado por ser um líquido viscoso mais denso que a água ($1,23 \text{ g/cm}^3$), rico em sais minerais e substâncias orgânicas degradáveis, castanho-acinzentado, polimerizável, elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO), de cheiro acre forte e com grau variado de patogenicidade (Silva, 1998; Matos, 2001) (Figura 1). Pode conter resíduos de tratamentos

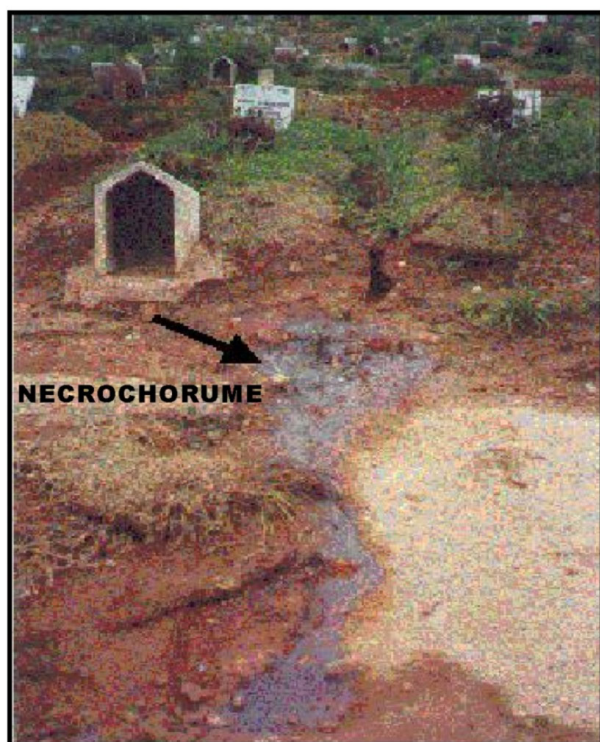


FIGURA 1. Vazamento de necrochorume no cemitério Vila Nova Cachoeirinha. Fonte: Pacheco & Matos (2000).

químicos hospitalares como de quimioterapia, formaldeído e metanol utilizados na embalsamação, cosméticos, corantes e enrijecedores utilizados no preparo e maquiagem do cadáver, patógenos associados a mortes por doenças infecto-contagiosas e óxidos metálicos como Ti, Cr, Cd, Pb, Fe, Mn, Ni, dentre outros e lixiviados dos adereços das urnas mortuárias. É constituído por 60% de água, 30% de sais e 10% de substâncias orgânicas. A relação necrochorume/massa corpórea é da ordem de 0,6 L/kg (Silva, 1995).

Em áreas próximas aos sepultamentos ocorre aumento da condutividade elétrica, pH, alcalinidade e dureza da solução do solo, devido à presença de compostos de nitrogênio e fósforo e de diversos sais (Cl^- , HCO_3^- , Ca^{+2} , Na^+) (Matos, 2001).

FENÔMENOS TRANSFORMATIVOS DE CADÁVERES

Sob certas condições ambientais, podem ocorrer fenômenos transformativos destrutivos como *autólise* e *putrefação*, ou conservativos como a *saponificação*. A ocorrência desses fenômenos depende de fatores intrínsecos e extrínsecos. Os intrínsecos relacionam-se ao próprio cadáver, tais como: idade, constituição física e *causa-mortis*, já os extrínsecos são pertinentes ao ambiente onde o corpo foi sepultado, tais como: temperatura, umidade, aeração, constituição mineralógica do solo, condutividade hidráulica, entre outros (França, 1985; Fávero, 1991).

A autólise se manifesta uma vez cessada a vida, anulando-se as trocas nutritivas das células levando a que o meio torne-se ácido. Sepultando o corpo, instalam-se os processos putrefativos de ordem físico-química, em que atuam vários microrganismos vivos (França, 1985).

O fenômeno de saponificação é a hidrólise da gordura com liberação de ácidos graxos, que pela acidez, inibem a ação das bactérias putrefativas, atrasando a decomposição do cadáver (Matos, 2001). Esse fenômeno ocorre em ambiente quente, úmido e anaeróbico, solos argilosos, baixa condutividade hidráulica, alta capacidade de troca catiônica (CTC) (Silva, 1995). Em geral, a saponificação leva de 5 a 6 meses após a morte (Fávero, 1991). O fenômeno é comum nos cemitérios brasileiros, tendo como causa a invasão das sepulturas por águas superficiais e subterrâneas.

VULNERABILIDADE DO MEIO FÍSICO DE UM CEMITÉRIO

A contaminação do subsolo num dado local ocorre se houver condições de vulnerabilidade no meio físico, cuja suscetibilidade é decorrência das características geológicas e hidrogeológicas.

A eficácia na retenção das bactérias e vírus depende da litologia, aeração, redução de umidade, nutrientes, etc (Miotto, 1990), e o mecanismo de

filtração tem sua maior importância para organismos maiores como as bactérias (Matos, 2001).

Nos terrenos destinados à implantação de cemitérios, a espessura da zona não saturada e o tipo de material geológico são fatores determinantes para a filtragem do necrochorume. A porcentagem ideal de argila no solo para que isso ocorra, situa-se na faixa de 20% a 40%, afim de que os processos de decomposição aeróbica e as condições de drenagem do necrochorume sejam favorecidos (Silva, 1995). Com base na Figura 2, pode-se estabelecer as seguintes relações:

- A situação A, em que o material geológico apresenta média condutividade hidráulica e profundidade do nível freático acima do recomendado, considera-se como de baixa vulnerabilidade de contaminação favorecendo os fenômenos transformativos destrutivos, sendo assim indicado o processo de sepultamento.
- A situação B, em que o material geológico apresenta baixa condutividade hidráulica e o nível freático quase aflorante, é considerada como de extrema vulnerabilidade à contaminação favorecendo fenômenos transformativos conservativos como da saponificação, sendo desfavorável o processo de sepultamento.
- Na situação C, o material geológico apresenta alta condutividade hidráulica e profundidade do nível freático abaixo do recomendado, apresentando situação de alta vulnerabilidade à contaminação não sendo favorável o processo de sepultamento.

RISCO À CONTAMINAÇÃO SUBTERRÂNEA

A implantação de cemitérios em locais inapropriados, nos quais os materiais geológicos propiciam fenômenos conservativos dos cadáveres ou materiais que propiciem menor retenção do contaminante em sua camada superficial, aliado à condições hidrogeológicas como pequena profundidade do aquífero freático, pode levar a contaminação da área.

Os túmulos em ruínas ou com rachaduras podem constituir um foco de contaminação das águas subterrâneas, tendo como principais causas a compactação dos solos, raízes de árvores e a negligência dos proprietários (Pacheco, 1986).

A resolução CONAMA nº 335 indica que a profundidade do aquífero freático medido no fim da estação de chuvas, deve estar, no mínimo, a 1,5 m da área de fundo das sepulturas. Não ocorrendo as condições naturais descritas anteriormente, a resolução prevê que os sepultamentos deverão ser feitos acima do nível natural do terreno, conforme a situação C da Figura 3.

Na Figura 3 é apresentado um modelo de quatro situações de sepultamento e seus respectivos riscos à contaminação do aquífero freático pela pluma de contaminação, conforme o local do sepultamento e a relação aos materiais geológicos, profundidade do nível freático e os aspectos ambientais externos ao meio físico como rachaduras nas sepulturas.

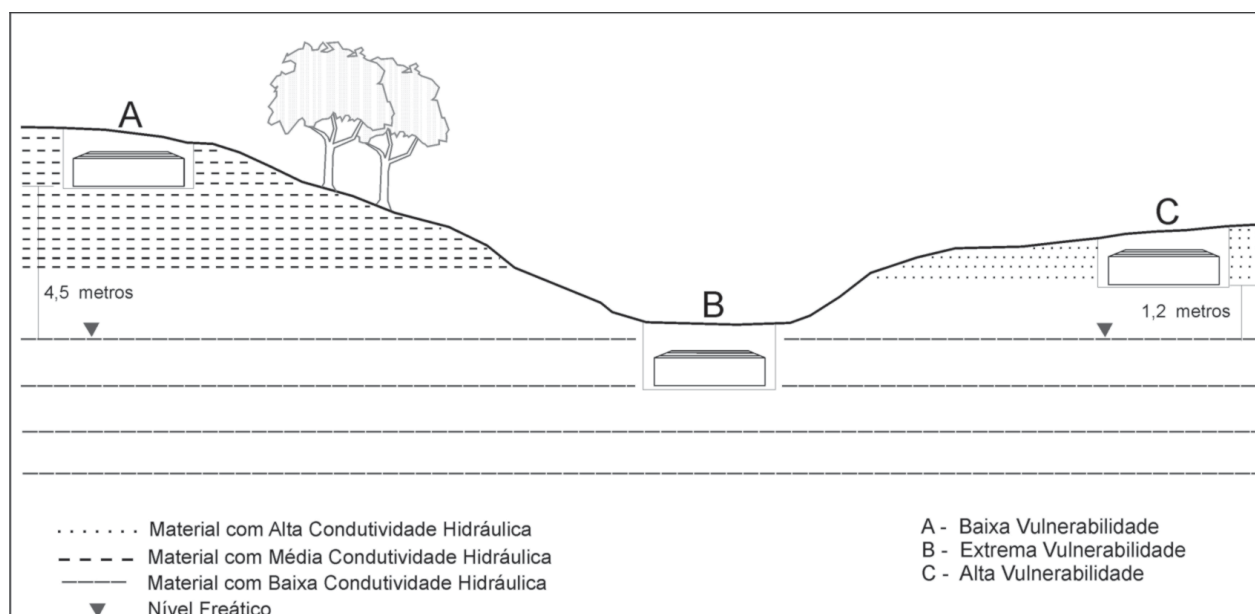


FIGURA 2. Modelo de níveis de vulnerabilidade do meio físico de subsuperfície em cemitérios.

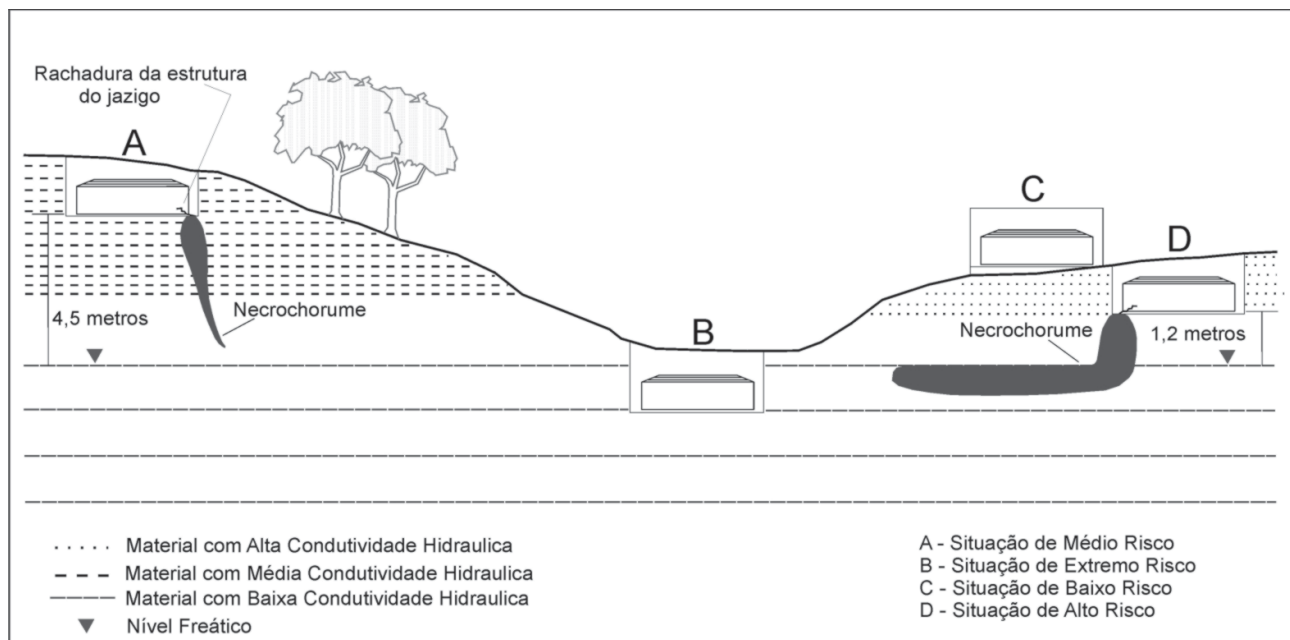


FIGURA 3. Modelo de risco à contaminação do aquífero freático.

- Na situação A ocorre uma lenta condução do contaminante devido à média condutividade hidráulica do material geológico, alta adsorção/retenção devido às características do material argiloso aliado a profundidade do nível freático favorável, o contaminante é interceptado na zona não saturada, sendo assim classificada como situação de médio risco à contaminação do aquífero freático.
- Na situação B a sepultura esta locada sob o nível freático podendo ser inundada. Uma vez que, de maneira geral as sepulturas não são impermeáveis, considera-se essa uma situação de extremo risco.
- Na situação D há um favorecimento na condução do contaminante a profundidades maiores, devido sua alta condutividade hidráulica aliada à baixa profundidade do nível freático, considera-se como situação de alto risco;
- Para evitar esse problema, objetivando a diminuição do risco à contaminação do aquífero, o sepultamento deve se realizar acima do nível natural do terreno, conforme a situação C, de acordo com a resolução CONAMA nº 335.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

O cemitério municipal de Vila Rezende está localizado na zona norte do município de Piracicaba, estado de São Paulo, Brasil, nas coordenadas geográficas 47°39'07"W; 22°41'37"S (Figura 4). Possui uma área de 75.324,48 m² e está em operação desde 15 de setembro de 1976. No local o encontram-se mais de 17.200 pessoas sepultadas a uma média de 2 sepultamentos/dia.

No cemitério, que está dividido em 11 quadras, predominou até o ano de 1988, o sepultamento por inumação, em covas simples cujas profundidades variam de 1,1 a 1,6 m, com simples recobrimento de solo, nas quadras 3, 5, 6, 7, 9, 10 e 11. A partir de 1993 o processo de sepultamento passou a ser por jazigos subterrâneos em alvenaria. Devido às condições hidrogeológicas desfavoráveis ao sepultamento subterrâneo, como a pequena profundidade do nível freático, e também em

respeito a legislações federais e estaduais, a partir de 1999 foi iniciado o processo de sepultamento em jazigos acima do nível do terreno. Como a resolução CONAMA nº 335 enfatiza que o nível freático deve distar 1,5 m da base da sepultura, a ocupação do cemitério iniciou-se nas quadras 1 e 11, e sucessivamente ao longo de 30 anos nas quadras 7, 6, 10, 9, 5, 2, 3, 4 e 8.

A geologia da área é representada por rochas da Bacia Sedimentar do Paraná, ocorrendo especificamente na área um siltito argiloso pertencente à Formação Corumbataí, com espessura local em torno de 15 m, sobreposto às rochas intrusivas básicas – diabásios associadas ao evento magmático correlato à Formação Serra Geral. As rochas são recobertas por Nitossolo Vermelho e Argissolo Amarelo, sendo o primeiro mais argiloso.

A área do cemitério está localizada na interface

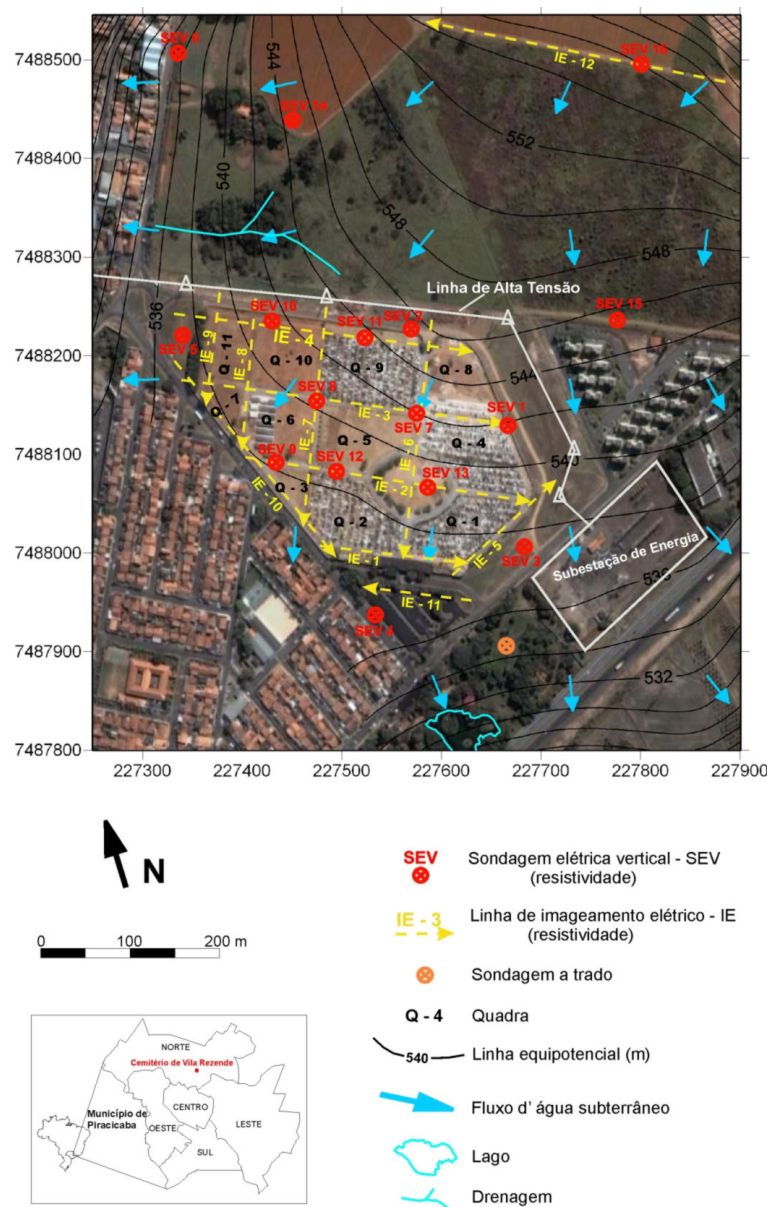


FIGURA 4. Mapa de localização da área de estudos.

de microbacias hidrográficas, ou seja, representa uma área de recarga do aquífero raso, com altitudes entre 535 e 546 m e declividades que variam entre 6 a 10%,

ambas acima da média do município. A condutividade hidráulica estimada da área é de $6,5 \cdot 10^{-7}$ cm/s (Cottas, 1983).

MATERIAIS E MÉTODOS

SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL (SEV)

Para estabelecer o modelo geoeletrico e posteriormente a elaboração do mapa potenciométrico da área do cemitério, foram realizadas 16 SEVs no mês de setembro de 2006, por meio do arranjo Schlumberger com espaçamento entre eletrodos de emissão de corrente elétrica de até 200 m. As SEVs foram distribuídas em toda área de estudo (Figura 4),

sendo executados 7 ensaios na área interna do cemitério (SEVs – 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13), e 9 ensaios na área externa do cemitério (SEVs – 1, 2, 3, 4, 5, 6, 14, 15 e 16). O equipamento utilizado foi o resistivímetro Bison modelo 2390 da BISON *Instruments Inc*.

Os resultados foram processados no programa IX1D v.3 da *INTERPEX Limited*, utilizando tanto o método direto como inverso. Obtidas as profundidades

dos níveis freáticos nos locais das SEVs e suas coordenadas UTM, foi elaborado o mapa potenciométrico da área, utilizando o *software* SURFER v.8 da *Golden Software*, com a interpolação geoestatística da mínima curvatura, pois, sendo este um método suavizador, é o que melhor representa a superfície potenciométrica. Detalhes sobre a fundamentação da técnica podem ser obtidos em Gallas (2000), Moura & Malagutti (2003), Silva (2008).

IMAGEAMENTO ELÉTRICO (IE)

A técnica do imageamento elétrico está baseada na realização de medidas da resistividade aparente ao longo de um perfil, com o objetivo de investigar suas variações em um ou mais níveis em profundidade (Gandolfo, 2007).

Foram realizadas 12 seções de IE no mês de fevereiro de 2007, por meio do arranjo dipolo-dipolo, com comprimento de até 390 m, com espaçamento entre eletrodos de 10 m e 5 níveis de investigação em profundidade (Figura 4). A distribuição dos perfis priorizou a área interna do cemitério da seguinte forma: 10 perfis distribuídos nas principais vias de acesso às quadras, e 2 perfis na área externa, sendo um a montante da área (IE – 12) para servir como seção de referência (*background*), e outro a jusante da área (IE – 11) para verificar o fluxo do possível contaminante, no caso necrochorume.

O equipamento utilizado foi o resistímetro Terrameter SAS 4000, fabricado pela sueca ABEM, com resolução de 1 μ V. Este equipamento é configurado para medidas de resistividade por meio de ciclos periódicos de corrente elétrica alternada e de baixa frequência, procedimento que permite a filtragem de ruídos do sinal adquirido. Detalhes sobre a técnica podem ser obtidos em Gallas (2000), Moura & Malagutti (2003), Gandolfo (2007), Silva (2008).

Os dados de campo foram processados no *software* RES2DINV (Loke & Barker, 1996), pelo qual se obtém um imageamento 2D do terreno, a partir de modelos de inversão, pelo método dos mínimos quadrados, para os cinco níveis de profundidade de cada perfil de aquisição. Os resultados da inversão foram exportados na forma de arquivos XYZ e interpolados por krigagem simples pelo *software* SURFER, para elaborar as seções geoeletricas.

Para gerar os mapas 3D de resistividade elétrica dos 5 níveis de investigação, foi realizada uma análise geoestatística de 274 dados por nível pelo *software* VARIOWIN 2.21 (Pannatier, 1996) (Figura 5). O modelo variográfico foi exportado para o *software* SURFER para a realização da interpolação pelo método da krigagem ordinária.

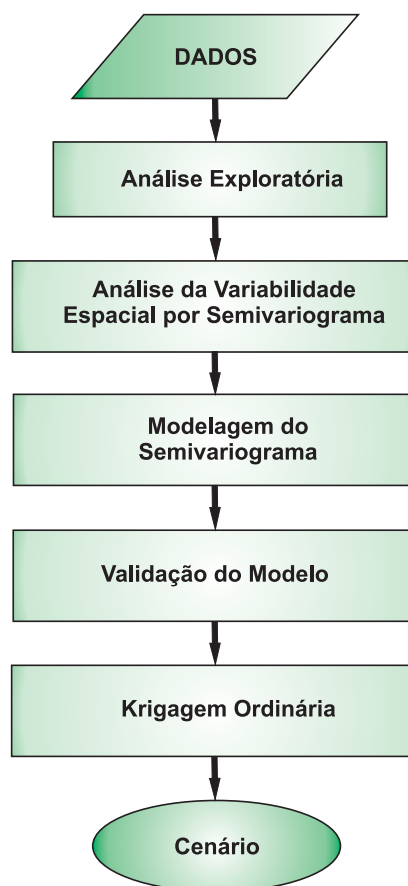


FIGURA 5. Etapas da análise geoestatística.

A profundidade dos níveis de investigação foi calculada pelo modelo do *software* RES2DINV, que segue o modelo de profundidade de Edwards (1977).

Para a delimitação das prováveis plumas de contaminação seguiu-se o critério de Orellana (1972), que define um valor ser considerado como anômalo aquele que diminuir ou ultrapassar em pelo menos duas ou três vezes o valor do *background*.

RESULTADOS

MODELO GEOELÉTRICO

O modelo geoeletrico da área interna do cemitério (Tabela 1), apresenta uma heterogeneidade de valores de resistividade entre 10 e 2960 ohm.m, sendo os níveis

mais condutivos interpretados como provável contaminação por necrochorume e os mais resistivos como horizontes areno-argilosos, aterro com sedimentos arenosos, cascalho de calcário, resíduos de construção

e demolição moído reciclado e tubulações e galerias de drenagem superficial.

As curvas apresentam padronização da segunda parte em diante, em profundidade e resistividade a partir de 4 m e 180 ohm.m, respectivamente, interpretado como siltitos argilosos da Formação Corumbataí. No entanto, em algumas SEVs o seu último nível – a partir de 18 m – apresentou resistividade 15 vezes maior em relação ao nível geoeletrico anterior, podendo ser correlacionadas com o diabásio. A Figura 6 apresenta curva típica (SEV - 7) da área interna com sua respectiva correspondência hidrogeológica.

Devido ao caráter arenoso das camadas superficiais (aterro) do cemitério, os líquidos provenientes da decomposição dos corpos – necrochorume - podem fluir perfeitamente. Já nas camadas mais profundas, os sedimentos apresentam condições físico-químicas como textura 60 argilosa, baixa condutividade hidráulica desfavoráveis para percolação do necrochorume, embora isso facilite o fenômeno de saponificação dos cadáveres.

O modelo geoeletrico da área externa do cemitério (Tabela 2) apresenta diversos tipos de materiais geológicos em subsuperfície. As SEVs a leste apresentaram estratos geoeletricos característicos da Formação Corumbataí, e as SEVs a oeste e ao norte do cemitério apresentaram estratos geoeletricos característicos da Formação Corumbataí e diabásio na profundidade acima de 15 m. A anomalia condutiva na zona saturada é referente a SEV - 3 que se localiza a montante da quadra 1 e 4. A Figura 7 apresenta curva típica da área interna com sua respectiva correspondência hidrogeológica.

A partir das profundidades da zona saturada obtidas pelas SEVs, foi calculado e elaborado o mapa potenciométrico da área do cemitério de Vila Rezende e seu entorno (Figura 4). Nota-se dois sentidos de fluxo subterrâneo, um para SW e outro para SE, e com profundidade do nível freático variando em época de estiagem entre 3 e 5,5 m. Nas quadras 1, 4, 8 e 9 as profundidades variam entre 3 e 4 m.

TABELA 1. Modelo geoeletrico proposto para a área interna do cemitério.

Zona	Descrição dos Materiais	Resistividade (ohm . m)
Aeração	Solo Argilo-arenoso	$157 \leq \rho \leq 628$
	Solo Areno-argiloso	$2070 \leq \rho \leq 2960$
	Anomalia condutiva - necrochorume	$13 \leq \rho \leq 75$
	Solo Areno-argiloso + aterro arenosos	$448 \leq \rho \leq 935$
	Tubulações e construções de concreto aterradas	$934 \leq \rho \leq 1720$
Saturação	Solo Argilo-arenoso	$110 \leq \rho \leq 373$
	Siltito argiloso (Fm. Corumbataí)	$10 \leq \rho \leq 455$
	Diabásio (Intrusivas Básicas)	$\rho > 110$

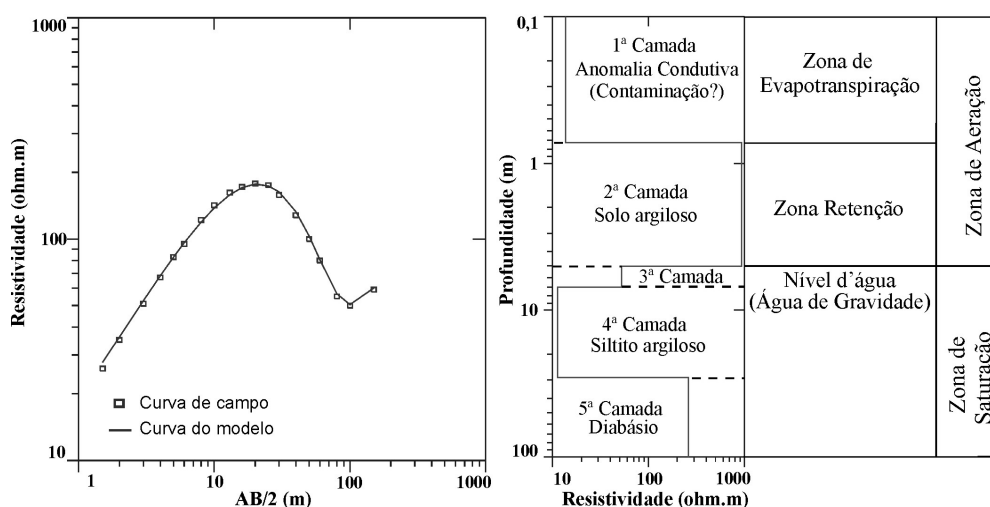


FIGURA 6. Curva típica da área interna e sua caracterização hidrogeológica.

TABELA 2. Modelo geoeétrico proposto para a área externa do cemitério.

Zona	Descrição dos Materiais	Resistividade (ohm.m)
Aeração	Solo Argilo-siltoso	$28 \leq \rho \leq 220$
	Solo Argilo-arenoso	$138 \leq \rho \leq 1093$
	Solo Areno-argiloso	$1100 \leq \rho \leq 2960$
Saturação	Siltito argiloso (Fm. Corumbataí)	$24 \leq \rho \leq 398$
	Anomalia condutiva - necrochorume	$\rho < 10$
	Siltito argiloso (Fm. Corumbataí)	$10 \leq \rho \leq 53$
	Diabásio (Intrusivas Básicas)	$\rho > 105$

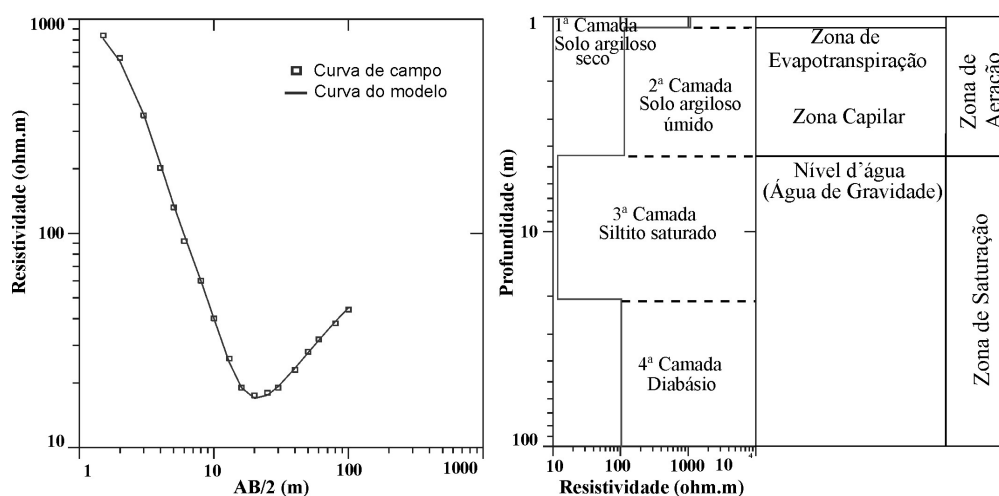


FIGURA 7. Curva típica da área externa e sua caracterização hidrogeológica.

IE DA CONTAMINAÇÃO

As seções de IE – 1, 2, 3 (Figura 8), apresentam altos valores de resistividade aparente entre 700 e 2600 ohm.m associados à tubulações e outras construções de concreto para drenagem superficial aterradas no local. Os valores de resistividade entre 150 e 700 ohm.m, correlacionam-se com uma camada de solo argilo-arenoso e o intervalo de resistividade, de 50 a 150 ohm.m correlaciona-se aos siltitos argilosos da Formação Corumbataí. No entanto, nessas seções ocorrem baixos valores (abaixo de 75 ohm.m) próximo a superfície, acima do nível freático correspondendo a uma anomalia condutiva, proveniente da influência do vazamento de necrochorume dos jazigos a montante. Essas anomalias ficam evidenciadas na seção de IE – 1 entre 55 e 68 m a jusante da quadra 2 e a partir de 110 m a jusante da quadra 1. Na seção de IE – 2 entre 70 e 145 m a jusante das quadras 6 e 5 e a partir de 200 m no canteiro central e a jusante da quadra 4. No IE – 3 entre 155 e 225 m e a partir de 195 m a jusante das quadras 9 e 8, respectivamente.

Observando as seções de IE – 1, 2 e 3, observam-se valores de resistividade menores a partir do terço final mais precisamente a jusante das quadras 1, 4 e 8 onde os solos são mais argilosos, portanto mais condutivos. Por meio das informações das SEV – 7 e 1 e por informações dos funcionários do cemitério, foi observado que o nível freático nessa área é mais raso, principalmente nos períodos de chuva, podendo ocorrer afloramento próximo ao muro. Sendo assim, a zona de aeração nessa área é menos espessa, sendo, portanto, mais vulnerável à contaminação, pois a zona não-saturada desempenha um papel de filtro dos contaminantes biológicos.

Na seção de IE – 5, ocorrem baixos valores de resistividade aparente (abaixo de 75 ohm.m) próximo a superfície, acima do nível freático correspondendo a uma anomalia condutiva, proveniente da influência do vazamento de necrochorume dos jazigos a montante.

A parte final das seções de IE – 2, 3 e toda a seção 5, mas precisamente a jusante das quadras 1, 4 e 8, apresentaram em todas as camadas resistividades

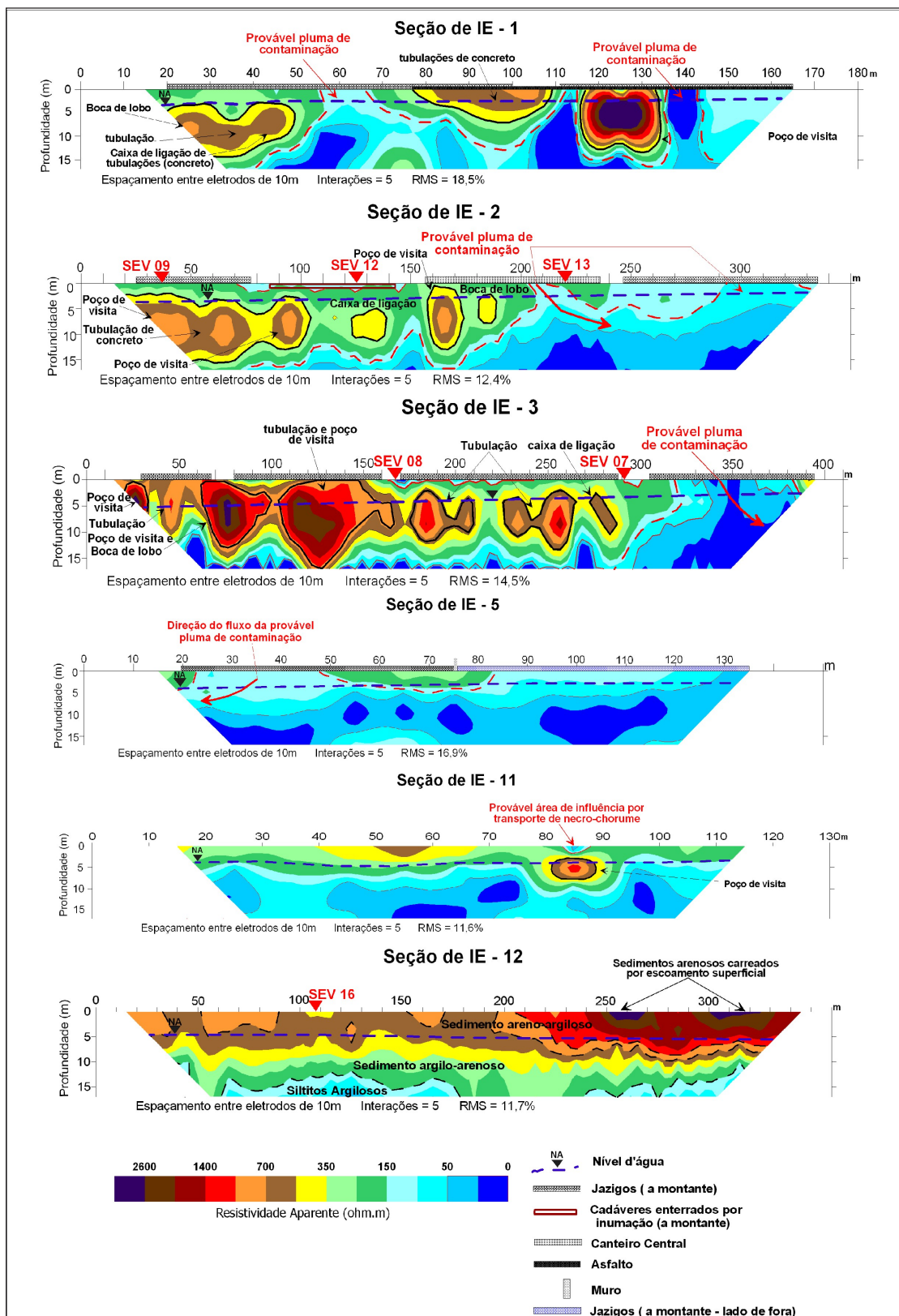


FIGURA 8. Seções geolétricas: linhas de IE – 1, 2, 3, 5, 11 e 12.

aparentes inferiores a 150 ohm.m. Essa área além de apresentar baixo nível freático, é a de maior intensidade de sepultamentos, havendo assim uma constante renovação da fonte contaminadora. Dent (1995) em um cemitério na Austrália e Matos (2001) no cemitério Nova Cachoeirinha em São Paulo constataram que há aumento da condutividade elétrica no lençol freático próximos de sepultamentos recentes. Migliorini (1994) no cemitério Vila Formosa em São Paulo, e Almeida & Macêdo (2005) em cinco cemitérios na cidade de Juiz de Fora - MG constataram aumento da condutividade elétrica no lençol freático através de altas concentrações de íons maiores, principalmente o cloreto e compostos nitrogenados.

Na superfície das quadras 1, 4 e 8 existem jazigos acima do nível do terreno com até quatro gavetas, preparados para alojar diversos cadáveres num mesmo

local ao longo dos anos, após o período de exumação. Desta forma, a principal fonte de contaminação são esses tipos de jazigos, nos quais continuamente ocorrem sepultamentos, e conseqüentemente renovação das fontes contaminadoras.

Na seção IE - 11 que está localizada na área externa do cemitério a aproximadamente 40 m da quadra 1, observa-se que as faixas de baixa resistividade estão abaixo de 7 m de profundidade, em zona saturada, a jusante do fluxo no cemitério, podendo estar com influência do necrochorume. Romero (1970, segundo Pacheco, 1986) afirma que o percurso de contaminantes biológicos em sedimentos com textura fina, que é o caso do necrochorume e o aquífero presente no cemitério, pode chegar a 30 m.

A seção IE - 12 foi realizada aproximadamente 320 m a NW e a montante da área cemitério, servindo assim como uma linha de comparação (*background*). Foi realizada a esta distância, devido à inexistência de uma área a montante próxima ao cemitério com dimensões suficientes para realização do ensaio e que fosse isenta de interferências causadas pela linha de alta tensão presente no entorno do cemitério.

Os altos valores de resistividade aparente que ocorrem na seção IE - 12 demonstraram que essa área é isenta de anomalias condutivas proveniente de contaminação por necrochorume. Os valores de resistividades entre 700 e 2600 ohm.m relacionam-se ao solo argilo-arenoso, areno-argiloso e aos sedimentos arenosos carregados por escoamento superficial e depositados em curvas de nível do local. Os valores de resistividade entre 150 e 700 ohm.m, correlacionam-se com uma camada de solo argilo-arenosa saturados. Os valores de resistividade elétrica inferiores a 150 ohm.m correlacionam-se aos siltitos argilosos da Formação Corumbataí.

A Figura 9 apresenta o mapa 3D de resistividade elétrica para o cinco níveis de investigação que corresponde a uma profundidade de 4,16 a 14,8 m.

Observam-se no mapa duas prováveis plumas de contaminação no primeiro nível de investigação, uma na direção SW e outra a SE, ambas seguindo a direção

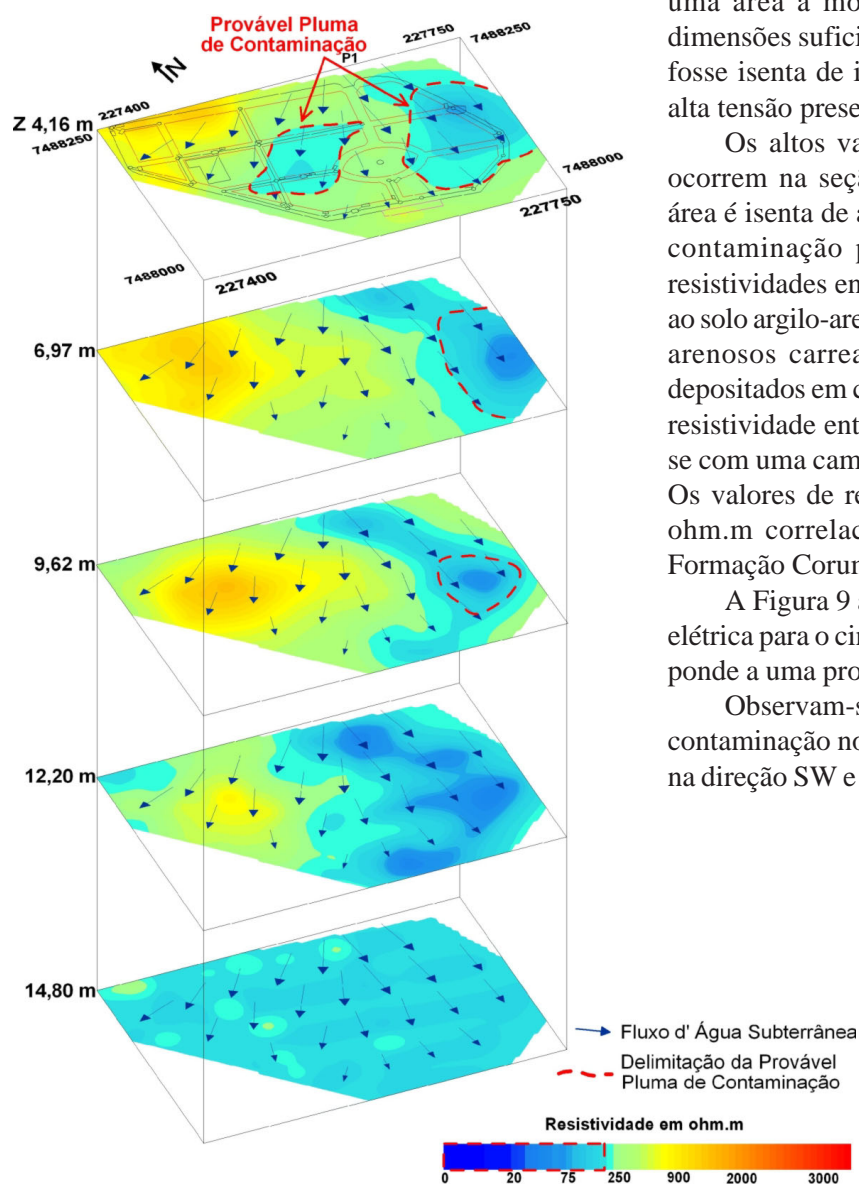


FIGURA 9. Mapa 3D de resistividade elétrica para os cinco níveis de investigação.

do fluxo subterrâneo. A provável pluma a SW, inicia-se sob a quadra 9 e se estende sob as quadras 5, 6, 3 e 2. As anomalias condutivas podem ser também observadas nas seções geolétricas das linhas de IE – 2, 3 e 7 e nos primeiros níveis geolétricos das SEVs – 7, 8 e 12. Já a provável pluma a SE, inicia-se sob a quadra 8 e se estende sob as quadras 4, 1, uma parte do canteiro central e fora dos limites do cemitério. Essas anomalias condutivas são observadas nas seções geolétricas IE – 2, 3 e 5.

No mapa do segundo nível de investigação há uma provável pluma de contaminação na direção SE, provavelmente a extensão da pluma do nível anterior. Essa pluma inicia-se entre a quadra 8 e 4 e se estende

até a quadra 1 e também para a área externa do cemitério.

Há uma provável pluma de contaminação na direção SE no terceiro nível de investigação, iniciando-se sob a quadra 4 e se estendendo sob a quadra 1 e fora dos limites do cemitério.

Observa-se, no mapa para o quarto nível de investigação, que na maioria das quadras ocorrem valores baixos de resistividade elétrica, que representam os materiais geológicos saturados da Formação Corumbataí. Já o mapa para o quinto nível apresenta valores baixos de resistividade elétrica em toda a área do cemitério, representando os materiais geológicos saturados da Formação Corumbataí.

CONCLUSÕES

O modelo geolétrico da área externa ao cemitério apresenta uma camada de 4 m de material argilo-siltoso a SE do cemitério, e material argilo-arenoso e areno-argiloso a NE, NW e SW. Na área interna há uma camada pouco espessa de aterro de sedimentos arenosos. Abaixo da camada de aterro, ocorre um material argilo-siltoso nas quadras a leste do cemitério e argilo-arenoso nas quadras a oeste do cemitério, em ambas as direções provenientes dos siltitos argilosos da Formação Corumbataí. Já o modelo geolétrico da área externa ao cemitério de Vila Rezende é constituído por uma camada de 4 m de material argilo-siltoso a SE do cemitério, e material argilo-arenoso e areno-argiloso a NE, NW e SW.

O cemitério apresenta condições desfavoráveis à percolação do necrochorume devido à predominância de um material argiloso. Mas existem condições favoráveis para ocorrência do fenômeno conservativo de saponificação, e a expansão em baixa profundidade da pluma de contaminante, devido à baixa profundidade do nível freático.

Há dois sentidos de fluxo subterrâneo no cemitério,

um sentido a SW e o outro a SE, com profundidade do nível freático no período de estagem, entre 3 e 5,5 m.

Pelas diversas anomalias condutivas em zona não saturada, e duas prováveis plumas de contaminação, uma na direção SW e outra a SE, a última se prolongando em grande profundidade, o cemitério de Vila Rezende passa de uma área suspeitamente contaminada para uma área confirmadamente contaminada por necrochorume.

No primeiro nível de investigação geolétrica que corresponde a uma profundidade aproximada de 4,2 m, há duas prováveis plumas de contaminação, uma na direção SW e outra a SE, ambas seguindo a direção do fluxo subterrâneo.

É possível concluir que o imageamento elétrico constitui uma importante e poderosa metodologia indireta para a avaliação da contaminação em cemitérios; principalmente no que diz respeito à investigação e delimitação de plumas de contaminação, para melhor orientar os ensaios invasivos como sondagens, poços de investigação e monitoramento para detecção efetiva dos eventuais contaminantes.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo auxílio na execução desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, A.M. DA & MACÊDO, J.A.B. DE. Parâmetros físico-químicos de caracterização da contaminação do lençol freático por necrochorume. In: SEMINÁRIO DE GESTÃO AMBIENTAL, 1, 2005, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: Instituto Viana Junior, 2005. (paginação irregular).
2. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 335**, de 3 de abril de 2003. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitérios. Disponível em: <<http://www.aguaseaguas.ufjf.br/RESOLUCAO%20conama335%20CEMITERIOS.pdf>>. Acesso em: 13set2006.

3. COTTAS, L.R. **Estudos geológicos-geotécnicos aplicados ao planejamento urbano de Rio Claro-SP**. São Paulo, 1983. 2 v., 171 p. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
4. DENT, B.B. **Hydrogeological Studies at Botany Cemetery**. Sydney, M.Sc. Proj. Rept. – University of Technology of Sydney, 673 p., 1995.
5. EDWARDS, L.S. A modified pseudo-section for resistivity and induced-polarization. **Geophysics**, v. 42, p. 1020-1036, 1977.
6. FÁVERO, F. **Medicina Legal**. 12. ed. Belo Horizonte: Vila Rica Editoras Reunidas, 1150 p., 1991.
7. FRANÇA, G.V. DE. **Medicina Legal**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 402 p., 1985.
8. GALLAS, J.D.F. **Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental**. Rio Claro, 2000. 174 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
9. GANDOLFO, O.C.B. **Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa**. São Paulo, 2007. 215 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
10. GOLDEN SOFTWARE. **Surfer version 8.0**: Surface Mapping System. Colorado, USA: Golden Software, 2002. CD-ROM.
11. INTERPEX LIMITED. **IX1D v.2.0**: User's manual. Colorado, USA: Golden, 2002. Paginação Irregular.
12. LOKE, M.H. & BARKER, R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. **Geophysical Prospecting**, v. 44, p. 131-152, 1996.
13. MATOS, B.A. **Avaliação da ocorrência e do transporte de microrganismo no aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, município de São Paulo**. São Paulo, 2001. 113 p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
14. MIGLIORINI, R.B. **Cemitérios como fonte de poluição em aquíferos: estudo do cemitério Vila Formosa na bacia Sedimentar de São Paulo**. São Paulo, 1994. 74 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
15. MIOTTO, S.L. **Aspectos geológico-geotécnicos da determinação da adequabilidade de áreas para implantação de cemitérios**. Rio Claro, 1990. 116 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
16. MOURA, H.P. & MALAGUTTI FILHO, W. Métodos da Eletrorresistividade e da Polarização Induzida Aplicados na Área de Disposição de Resíduos Urbanos: Aterro Controlado de Rio Claro-SP. **Geociências**, v. 22, n. Especial, p. 129-139, 2003.
17. ORELLANA, E. **Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua**. Madrid: Paraninfo, 523 p., 1972.
18. PACHECO, A. Os cemitérios como risco potencial para as águas de abastecimento. **Revista do Sistema de Planejamento e Administração Metropolitana**, n. 17, ano IV, p. 25-31, 1986.
19. PACHECO, A. & MATOS, B.A. Cemitérios e meio ambiente. **Tecnologias do Ambiente**, n. 33, p. 97-104, 2000.
20. PANNATIER, Y. **Variowin: software for spatial data analysis in 2D**. New York: Springer-Verlag, 90 p., 1996.
21. SILVA, L.M. **Os Cemitérios na Problemática Ambiental**. São Paulo: SINCESP & ACEMBRA, 88 p., 1995.
22. SILVA, L.M. Cemitérios: fonte potencial de contaminação dos aquíferos livres. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA, 4, 1998, Montevideo. **Memórias...** Montevideo: ALHSUD, 1998, v. 2, p. 667-681.
23. SILVA, R.W. DA. **Aplicação do método da eletrorresistividade na investigação e mapeamento da contaminação por cemitérios - o exemplo do cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP**. Rio Claro, 2008. 157 p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
24. UCISIK, A.S. & RUSHBROOK, P. **The impact of cemeteries on the environment and public health: an introductory briefing**. Denmark: WHO Regional Office for Europe, 11 p., 1998. (Rept. EUR/ICP/EHNA 01 04 01 (A)).

*Manuscrito Recebido em: 30 de janeiro de 2010
Revisado e Aceito em: 1 de julho de 2010*