

Emprego do método da eletrorresistividade no estudo da contaminação subsuperficial do cemitério de Piracicaba – SP

Walter Malagutti Filho, Depto. de Geologia Aplicada – IGCE-Unesp

Robson Willians da Costa e Silva, Mestre em Geociências e Meio Ambiente pela Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

This paper shows the investigation results of contamination for necro-chorume in the freatic aquifer of Vila Rezende's cemetery, located in the north area from Piracicaba - São Paulo, Brazil. For that, electrical resistivity method was carried out using vertical electric sounding (VES) and 2D electrical imaging techniques using schlumberger and dipole-dipole arrays respectively. The results of VES indicate a depth of water table among 3,1 and 5,1 m with two flow directions, being a the SW and another the SE. The results of the electrical imaging (2D) indicate two probable contamination plume in unsaturated zone, a in SW and another to SE direction, both following the groundwater flow. The general results shows that these methods, used in this work, are an important indirect instrument for evaluation of the environmental quality in cemeteries.

Introdução e objetivos

A contaminação do meio por líquidos provenientes da decomposição de cadáveres, também conhecida como necrochorume, particularmente no primeiro ano do sepultamento, ocorre devido à implantação inadequada de cemitérios, que apresentam condições hidrogeambientais desfavoráveis, como baixa profundidade do nível freático, solos muito permeáveis, rochas com fraturas e zonas cársticas.

O necrochorume pode veicular além de microrganismos oriundos do cadáver, restos ou resíduos de tratamentos químicos hospitalares (quimioterapia, p.ex.) e os compostos decorrentes da decomposição da matéria orgânica. Esses contaminantes incorporados ao fluxo de necrochorume são prejudiciais ao solo e às águas subterrâneas.

A aplicação de métodos geofísicos na caracterização subsuperficial, em cemitérios apresenta inúmeras vantagens técnico-econômicas, principalmente por serem técnicas investigativas indiretas, não causando dano às construções presentes como columbários, jazigos, lápides, e outros, e com um custo relativamente baixo em comparação com outras técnicas de prospecção, além da rapidez na aquisição dos dados. Os levantamentos geofísicos propiciam a execução de perfis contínuos, possibilitando a identificação com maior precisão das variações laterais decorrentes das mudanças litológicas

ou originadas pela presença da contaminação subterrânea. Pelo fato do meio se tornar mais condutivo nos casos de percolação do necrochorume em materiais de subsuperfície e mesmo no seu contato com o lençol freático, escolheu-se nesse estudo o método da eletrorresistividade por meio das técnicas de sondagem elétrica vertical (SEV) caminhamento elétrico (CE), na investigação e mapeamento elétrico da contaminação subterrânea por necrochorume.

Caracterização da área de estudos

O cemitério público de Vila Rezende está localizado na zona norte do município de Piracicaba (47°39'07"W; 22°41'37"S), estado de São Paulo, Brasil (Fig. 1). Está em operação desde 15 de setembro de 1976, com uma área de 75.324,48 m², acima de 16.500 pessoas sepultadas e média de 2 sepultamentos/dia. O cemitério está dividido em 11 quadras, predominando até ano de 1988, o sepultamento por inumação, em covas simples cuja profundidade varia de 1,1 a 1,6 m, com simples recobrimento de solo, nas quadras Q - 3, 5, 6, 7, 9, 10 e 11.

Em 1993 o processo de sepultamento passou a ser por jazigos subterrâneos em alvenaria. Devido às condições hidrogeambientais desfavoráveis ao sepultamento subterrâneo, como a pequena profundidade do nível freático, e também a legislações federais e estaduais, a partir de 1999 foi iniciado o processo de sepultamento em jazigos acima do nível do terreno. A resolução CONAMA nº 335 enfatiza que o nível freático deve distar 1,5 m da base da sepultura. Assim a ocupação do cemitério iniciou-se nas quadras Q - 1 e 11, e sucessivamente ao longo de 30 anos nas quadras Q - 7, 6, 10, 9, 5, 2, 3, 4 e 8.



Figura 1 – Localização esquemática do Cemitério da Vila Rezende

A geologia da área é representada por siltito argiloso pertencente à formação Corumbataí, com espessura local em torno de 15 m, e a partir desta profundidade ocorre o diabásio cinza das Intrusivas Básicas, correlata a Formação Serra Geral.

Encontra-se na área de estudo dois tipos de solo de alteração da rocha siltosa de até 6 m de profundidade, solo de textura mais argilosa - Nitossolo Vermelho, sob as quadras Q – 1, 4 e 8, e sob o restante das quadras o Argissolo Amarelo.

A área do cemitério especificamente está inserida num divisor de águas, com altitudes e declividades acima da média do município, entre 535 e 546 m e as declividades variam entre 6 a 10%, respectivamente. A condutividade hidráulica média da área é de $6,5 \cdot 10^{-7}$ cm/s (Cottas, 1983).

Metodologia

Nesse estudo foi aplicado o método da eletroresistividade, por meio das técnicas da sondagem elétrica vertical (SEV) e caminhamento elétrico (CE), com o emprego dos arranjos de campo Schlumberger e dipolo-dipolo, respectivamente.

A técnica da SEV consiste, basicamente, na análise e interpretação de um parâmetro geoeletrico - a resistividade no caso desse trabalho - obtido a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno, investigando, de maneira pontual, sua variação em profundidade. No arranjo Schlumberger os eletrodos de corrente AB apresentam uma separação crescente, e os eletrodos de potencial MN permanecem fixos – a uma distância $\leq AB/5$, durante o desenvolvimento do ensaio.

As SEVs foram realizadas para o estabelecimento do modelo geoeletrico e a elaboração do mapa potenciométrico da área. Foram executadas em 16 pontos, com espaçamento dos eletrodos AB de até 200 m. As SEVs foram distribuídas em toda área de estudo (Figura2), sendo executados 7 ensaios na área interna do cemitério (SEV – 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13), e 9 ensaios na área externa do cemitério (SEV – 1, 2, 3, 4, 5, 6, 14, 15 e 16). O equipamento utilizado foi o resistímetro Bison modelo 2390. O processamento das SEVs visando obtenção do modelo geoeletrico, foi realizado no programa IX1D v.3 da INTERPEX Limited, utilizando tanto o método direto como inverso. No método direto, admitiu-se um modelo inicial – baseado no conhecimento prévio da geologia local. O algoritmo do *software* calcula a curva de resistividade e após um ajuste razoável o modelo é refinado por meio da inversão, com base no método dos mínimos quadrados. Depois de 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 de mínima curvatura, pois, é um método suavizador, sendo o que melhor representa as linhas equipotenciais.

A técnica de caminhamento elétrico está baseada na realização de medidas de resistividade aparente ao longo de um perfil, com o objetivo de investigar variações em um ou mais níveis em profundidade (Telford et al., 1990).

O arranjo dipolo-dipolo é caracterizado por utilizar espaçamento igual entre MN e AB, com deslocamento do

centro de ambos os dipolos ao longo da linha. Foram utilizados 10 m de espaçamento entre eletrodos, com leituras em 5 níveis de profundidade no terreno.

Foram realizados 12 perfis de caminhamento elétrico no com comprimento de até 390 m. As linhas localizaram-se predominantemente na área interna (10 linhas), e apenas 2 linhas na área externa, uma a montante da área (CE – 12) para servir de referência (*background*), e outra a jusante da área (CE – 11) para verificar o fluxo do possível contaminante, no caso necrochorume (Figura. 2). O equipamento utilizado foi o resistímetro Terrameter SAS 4000/ABEM.

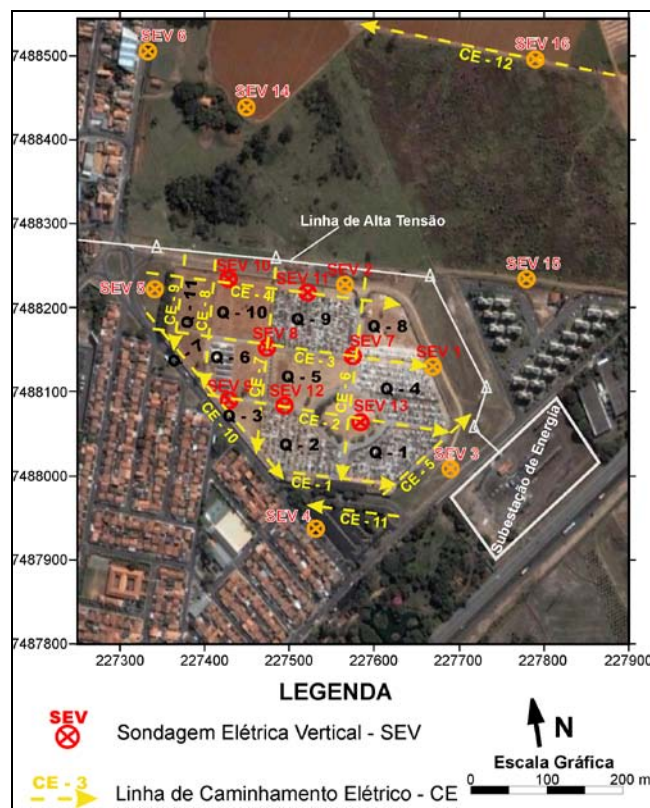


Figura 2 – Localização dos ensaios geofísicos

Os dados foram processados no *software* RES2DINV (Loke & Barker, 1996), pelo qual foram gerados modelos de inversão, pelo método dos mínimos quadrados, para os cinco níveis de profundidade de cada perfil de aquisição. Estes dados foram posteriormente integrados sob a forma de mapas de pseudo - 3D de resistividade elétrica, após tratamento geoestatístico.

Resultados – modelo geoeletrico

O modelo geoeletrico da área interna do cemitério reflete 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 a partir da profundidade de 4 m e da resistividade de 180 ohm.m, influenciadas pelos siltitos argilosos da Formação Corumbataí. No entanto, em algumas SEVs o último nível - a partir de 18 m - apresentou resistividade 15 vezes maior em relação ao nível geoeletrico anterior, devendo nesses casos ocorrer soleiras de diabásio, típicas nessa região. A Figura 3 mostra curva típica (SEV - 7) da área interna com sua respectiva correspondência hidrogeológica.

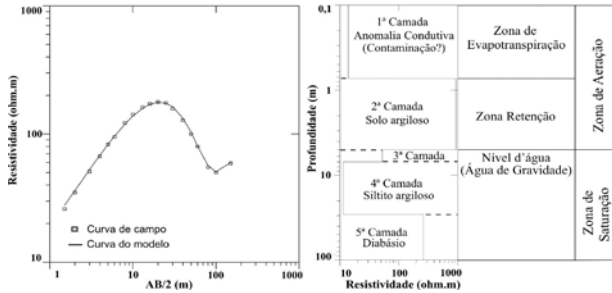


Figura 3 - Interpretação e modelo geoeletrico – SEV interna ao cemitério

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 argilosa, baixa condutividade hidráulica desfavoráveis para a percolação, embora isso facilite o fenômeno de saponificação dos cadáveres. Esse fenômeno refere-se à hidrólise da gordura com liberação de ácidos graxos, que pela acidez, inibem a ação das bactérias putrefativas, atrasando a decomposição do cadáver (Matos, 2001).

O modelo geoeletrico da área externa do cemitério reflete os diversos tipos de materiais geológicos em subsuperfície, que podem ocorrer na região (Figura 4). 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 dessa Formação e ainda o diabásio na profundidade abaixo de 15 m.

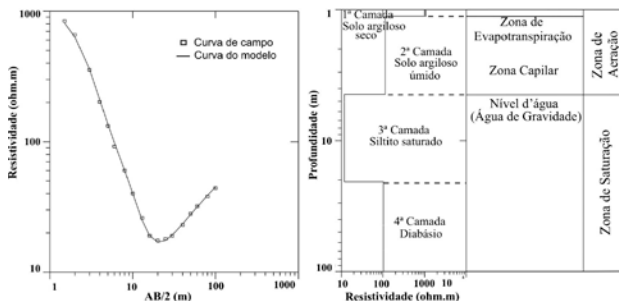


Figura 4 – Interpretação e modelo geoeletrico – SEV , externa ao cemitério

Depois de calculadas as profundidades da zona saturada obtidas pelas SEVs, foi elaborado o mapa potenciométrico da área do cemitério de Vila Rezende e

seu entorno (Figura 5). Nota-se dois sentidos de fluxo subterrâneo, (1) um para SW e (2) para SE. Foi visto que a profundidade do nível freático varia em época de estiagem entre 3 e 5,5 m. Nas quadras Q – 1, 4, 8 e 9 as profundidades variam entre 3 e 4 m.

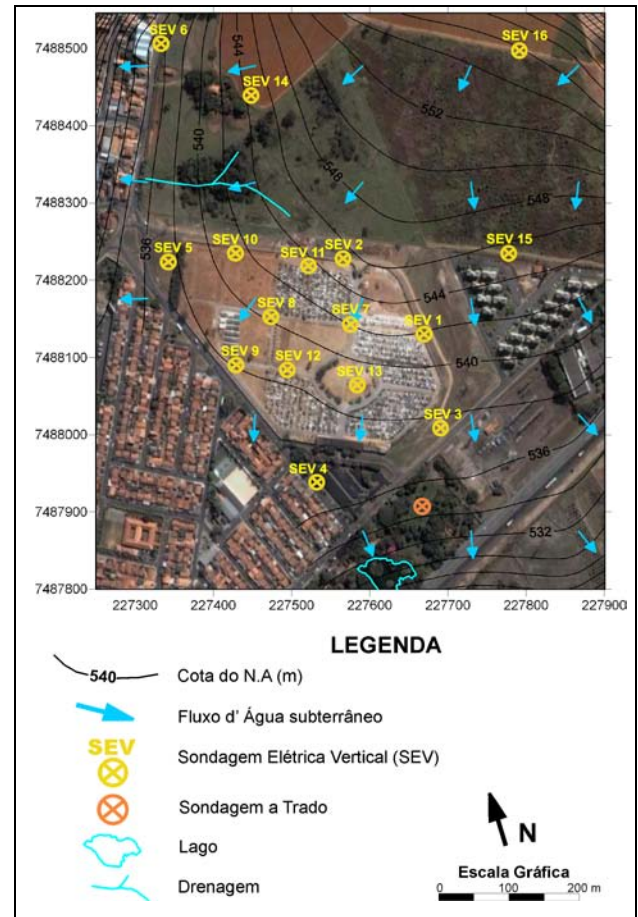


Figura 5 – Mapa potenciométrico do cemitério de Piracicaba

Investigação e mapeamento Elétrico da Contaminação

A linha de CE ao NE a montante da área do cemitério, apresentou altos valores de resistividade aparente, sem anomalias condutivas que seriam provenientes de contaminação por necrochorume. Dessa forma esse perfil serviu como *background* (Figura 6), para as demais comparações. Na correlação com a geologia, interpretou-se os valores de resistividades entre 700 e 2600 ohm.m relacionando-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 saturada. Os valores inferiores a 150 ohm.m referem-se aos siltitos argilosos da Formação Corumbataí.

No mapa de resistividade elétrica para o primeiro nível de investigação (Figura 6) que corresponde a uma

profundidade aproximada de 4,16 m, observa-se duas prováveis plumas de contaminação, com resistividades de até 200 ohm.m; (1) na direção SW e (2) a SE, ambas seguindo a direção do fluxo subterrâneo.

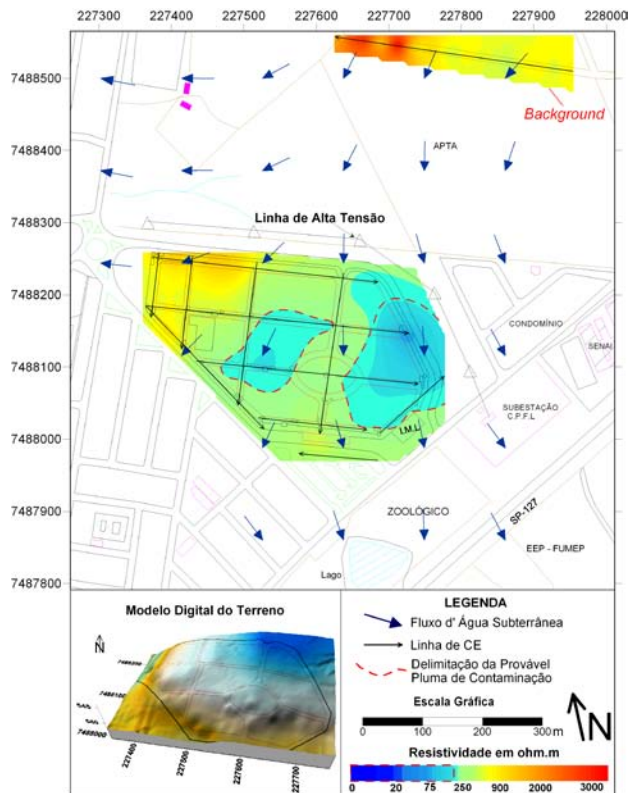


Figura 6 - Mapa de resistividade elétrica do primeiro nível de investigação geoeletrica.

A provável pluma a SW inicia-se sob a quadra Q – 9 e se estende sob as quadras Q – 5, 6, 3 e 2. As anomalias condutivas podem ser também observadas nos primeiros níveis geoeletricos das SEVs – 7, 8 e 12. O contorno de valores de resistividade elétrica inferior a 75 ohm.m, observada também no primeiro nível geoeletrico da SEV – 12, pode ser devido a vazamentos de necrochorume provenientes da quadra Q – 9 pois nesta quadra há somente cova simples. A anomalia condutiva presente entre as quadras Q – 2 e 3 pode ser devida a vazamentos de necrochorume proveniente de rachaduras ou até mesmo desmoronamentos de construções túmulares subterrâneas e/ou acima do nível do terreno presentes na quadra Q – 2.

A provável pluma a SE, inicia-se sob a quadra Q – 8 e se estende sob as quadras Q – 4, 1, uma parte do canteiro central e fora dos limites do cemitério. A anomalia condutiva pode ser observada no primeiro nível geoeletrico da SEV – 3 com valor de resistividade elétrica de 77 ohm.m, na área externa ao cemitério. Quase a totalidade da área das quadras Q – 1, 4 e 8, apresentou valores baixos de resistividade elétrica.

Para uma melhor visualização da expansão da provável pluma, apresenta-se na Figura. 7 o mapa de pseudo – 3D de resistividade elétrica, elaborado a partir dos dados 2D tratados pela análise geostatística. Após

a identificação das prováveis plumas recomenda-se a instalação de seis poços de monitoramento, nos locais designados na Figura. 7. O primeiro poço (P1) teria como função o controle da água subterrânea em meio não contaminado a montante do fluxo da água subterrânea.

Os poços P2 e P3 se localizariam onde foram mapeadas, as prováveis plumas de contaminação. Já os poços P4, P5 e P6 seriam localizados na área externa do cemitério a jusante na direção do fluxo subterrâneo e das plumas de contaminação.

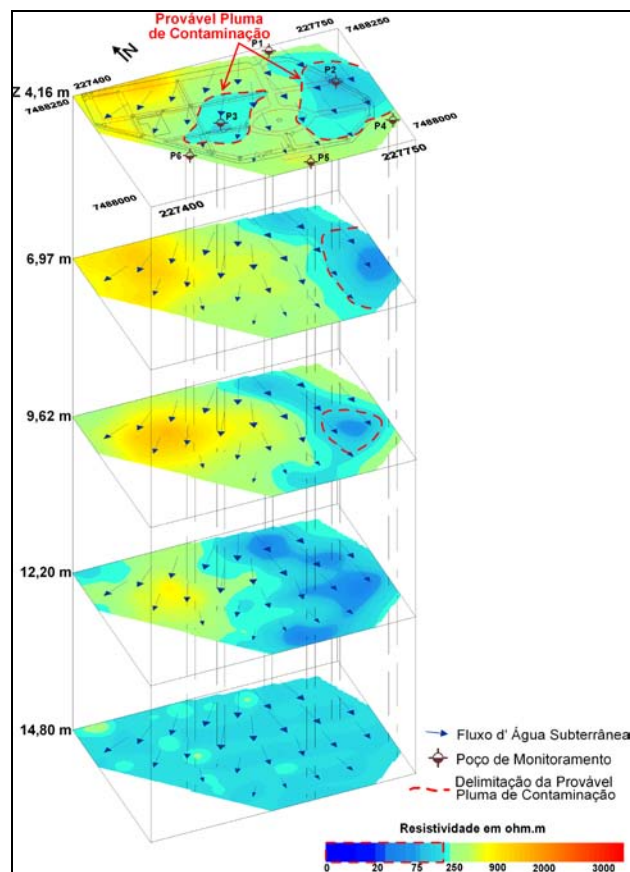


Figura 7 - Mapa de pseudo - 3D de resistividade elétrica para os níveis de investigação.

Conclusões

O modelo geoeletrico da área externa ao cemitério apresenta uma camada de 4 m de material argilo-siltoso a SE 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.

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 estiagem, entre 3,1 e 5,1 m.

Portanto, a área do cemitério apresenta zona de aeração de pouca espessura, devido à pequena profundidade do aquífero freático.

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.

Em função das anomalias condutivas em zona não saturada, e das prováveis plumas de contaminação - direção SW e outra a SE (essa se prolongando em profundidade) - pode-se concluir que o método da eletrorresistividade por meio da integração das técnicas usadas, constitui-se numa importante metodologia indireta para a avaliação ambiental em cemitérios; orientando melhor os ensaios invasivos como sondagens, poços de investigação e monitoramento para detecção efetiva dos eventuais contaminantes.

Referências

Cottas, L. R. – 1983 - Estudos Geológico-Geotécnicos aplicados ao planejamento urbano de Rio Claro-SP. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 171p.

Golden software – 2002 -. Surfer version 8.0: Surface Mapping System. Colorado, USA: Golden Software, CD-ROM.

Interpex Limited – 2002 - IX1D v.2.0: User's manual. Colorado - USA: Golden,. Paginação Irregular.

Loke, M. H.; Barker, R. D. – 1996 - Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, n. 44, p. 131-152.

Matos, B. A. – 2001 - Avaliação da ocorrência e do transporte de microrganismo no aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, município de São Paulo. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Escola Politécnica, USP, 113 p.

Silva, R.W.C – 2008 - Aplicação da eletrorresistividade na investigação e mapeamento da contaminação por cemitérios – o exemplo do cemitério de Vila Rezende – Piracicaba/SP. Dissertação de Mestrado, Geociências e Meio Ambiente, IGCE-Unesp, 142 p.

Telford, W.M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. – 1990 - Applied Geophysics. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 770 p.