

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DA ELETORRESISTIVIDADE
NA INVESTIGAÇÃO E MAPEAMENTO DA CONTAMINAÇÃO
POR CEMITÉRIOS - O EXEMPLO DO CEMITÉRIO DE VILA
REZENDE, PIRACICABA/SP**

ROBSON WILLIANS DA COSTA SILVA

Orientador: Prof. Dr. Walter Malagutti Filho

Dissertação de Mestrado elaborada junto ao
Programa de Pós - Graduação em Geociências e
Meio Ambiente para obtenção do título de Mestre
em Geociências e Meio Ambiente.

Rio Claro (SP)
2008

551 Silva, Robson Willians da Costa
S586a Aplicação do método da eletrorresistividade na
investigação e mapeamento da contaminação por cemitérios
– o exemplo do cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP /
Robson Willians da Costa Silva. - Rio Claro : [s.n.], 2008
156 f. : il., figs., quadros, fots., tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Walter Malagutti Filho

1. Geofísica. 2. Geofísica ambiental. 3. Meio ambiente.
4. Necrochorume. 5. Sondagem elétrica vertical (SEV)
I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Walter Malagutti Filho (orientador)

Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga

Prof. Dr. Alberto Pacheco

Robson Willians da Costa Silva

Aluno

Rio Claro, 10 de abril de 2008.

Resultado: APROVADO

Dedico este trabalho a Deus,
aos meus pais Irineu e Odete,
a minha irmã Eveline, a Simone
e aos meus queridos amigos.

“O temor do Senhor é o princípio da
sabedoria, e a ciência do santo a
prudência”. Pv 9:10

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Walter Malagutti Filho, pela orientação, apoio, incentivos, e conhecimentos transmitidos.

Ao Departamento de Geologia Aplicada, na pessoa do Prof. Dr. João Carlos Dourado, então chefe de departamento, que pelo uso de sua estrutura, equipamentos possibilitou a execução deste trabalho.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga e a Dra. Aurora Mariana Garcia de França Souza pelas valiosas sugestões transmitidas na qualificação.

Ao Prof. Dr. José Ricardo Sturaro pelo auxílio na análise geoestatística.

Aos Srs. Francisco Manoel Garcia Barrera, Cláudio Ribeiro da Silva e ao MSc. César A. Moreira, pelo inestimável auxílio prestado durante a execução dos trabalhos de campo.

À Secretaria Municipal de Defesa do Meio Ambiente do município de Piracicaba, na pessoa do secretário municipal Francisco Rogério Vidal e Silva, que permitiu a realização dos estudos nas dependências do cemitério de Vila Rezende.

Ao Instituto de Pesquisas e Planejamento de Piracicaba – IPPLAP, pela disponibilização de projetos, informações geográficas e sociais do cemitério de Vila Rezende.

Aos funcionários Adilson Gomes da Cruz e Maurício Angelocci que disponibilizaram informações históricas do cemitério de Vila Rezende.

Aos amigos e colegas pós-graduandos da UNESP pela ajuda, apoio, sugestões e amizade.

Enfim, meu agradecimento a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a concretização desta dissertação...

SUMÁRIO

ÍNDICE.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE FOTOS.....	x
LISTA DE QUADROS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xi
RESUMO.....	xii
<i>ABSTRACT</i>	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
4. ÁREA DE ESTUDO.....	31
5. METODOLOGIA.....	47
6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	75
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	124
8. REFERÊNCIAS.....	128
APENDICE.....	136

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	4
3.1 CEMITÉRIOS E MEIO AMBIENTE.....	4
3.1.1 Generalidades.....	4
3.2 ASPECTOS AMBIENTAIS DE CEMITÉRIOS.....	5
3.2.1 Aspectos Legais.....	8
3.2.1.1 <i>Âmbito Federal</i>	8
3.2.1.2 <i>Âmbito Estadual</i>	9
3.3 POLUIÇÃO AMBIENTAL DEVIDO AOS CEMITÉRIOS.....	10
3.3.1 Fenômenos Transformativos Destrutivos dos Cadáveres.....	11
3.3.2 Fenômenos Conservativos dos Cadáveres.....	14
3.3.3 Fatores que Contribuem para a Decomposição.....	14
3.3.4 Necrochorume.....	15
3.3.5 Vulnerabilidade do Meio Físico de Subsuperfície a Contaminação.....	17
3.4 RISCO DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS.....	22
3.4.1 Águas Superficiais.....	24
3.4.2 Águas Subterrâneas.....	25
3.5 MÉTODOS GEOELÉTRICOS APLICADOS NA INVESTIGAÇÃO DE CONTAMINAÇÃO EM CEMITÉRIOS.....	28
4 ÁREA DE ESTUDO.....	31
4.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO.....	31
4.2 ASPECTOS SOCIAIS DO MUNICÍPIO E HISTÓRICO DA ÁREA DE ESTUDO.....	32
4.3 GEOLOGIA.....	35
4.4 GEOMORFOLOGIA.....	39
4.5 SOLOS.....	41
4.6 ASPECTOS CLIMÁTICOS.....	43
4.7 ÁGUAS.....	44
4.7.1 Águas Superficiais.....	44
4.7.2 Águas Subterrâneas.....	45
5 METODOLOGIA.....	47
5.1 ELETORRESISTIVIDADE – FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	47
5.1.1 Propriedades Elétricas das Rochas.....	48
5.1.2 Definição de Resistividade Aparente.....	50
5.2 TÉCNICAS DE ENSAIOS DE CAMPO.....	51
5.2.1 Sondagem Elétrica Vertical.....	52

5.2.2 Imageamento elétrico	52
5.3 ARRANJOS ELETRÓDICOS EM LEVANTAMENTO DE CAMPO.....	54
5.3.1 Arranjo Schlumberger.....	54
5.3.2 Arranjo Dipolo-Dipolo.(D-D).....	56
5.4 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GEOELÉTRICOS.....	59
5.4.1 Interpretação Quantitativa Uni-dimensional.....	59
5.4.2 Obtenção de Mapas Potenciométrico em Aquíferos Livres.....	63
5.4.3 Interpretação Quantitativa Bi-dimensional.....	64
5.5 ANÁLISE GEOESTÁTISTICA.....	68
5.5.1 Modelagem Geoestatística.....	71
6 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	75
6.1 ENSAIOS GEOELÉTRICOS REALIZADOS NA ÁREA DE ESTUDO.....	75
6.2 INTERPRETAÇÃO DAS SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICAIS.....	78
6.2.1 Interpretação Qualitativa.....	78
6.2.2 Interpretação Quantitativa.....	84
6.2.3 Mapa Potenciométrico.....	95
6.3 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DE IMAGEAMENTO ELÉTRICO (2D).....	97
6.4 RESULTADOS DA ANÁLISE GEOESTATÍSTICA.....	106
6.4.1 Resultados da Krigagem.....	113
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	124
8 REFERÊNCIAS.....	128
APÊNDICE.....	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Extravasamento de necrochorume no cemitério Vila Nova Cachoeirinha.....	17
Figura 2	Distribuição das águas no solo (BRAGA, 2006).....	18
Figura 3	Modelo de níveis de vulnerabilidade do meio físico de subsuperfície em cemitérios (adaptado de PACHECO, 1986).....	22
Figura 4	Modelo de risco à contaminação da água subterrânea (adaptado de PACHECO, 1986).....	27
Figura 5	Métodos geofísicos de prospecção.....	29
Figura 6	Localização do cemitério de Vila Rezende.....	31
Figura 7	Aerofoto do cemitério de Vila Rezende e seu entorno.....	32
Figura 8	Localização das quadras no cemitério.....	33
Figura 9	Mapa geológico da zona norte do município de Piracicaba (adaptado de IPT, 1974).....	37
Figura 10	Descrição litoestratigráfica do poço da Fazenda Areão.....	38
Figura 11	Altimetria do cemitério de Vila Rezende.....	40
Figura 12	Mapa de solos da zona norte do município de Piracicaba (adaptado de VIDAL TORRADO, 2006).....	42
Figura 13	Dados da média mensal de pluviometria e temperatura em 30 anos no município de Piracicaba.....	44
Figura 14	Hidrografia no entorno do cemitério de Vila Rezende.....	45
Figura 15	Aplicação do método da eletrorresistividade (modificado de ROBINSON E ÇORUH, 1988).....	47
Figura 16	Ilustração de subsolo heterogêneo (modificado de ORELLANA, 1972).....	50
Figura 17	Geometria dos eletrodos de corrente AB, e de potencial MN.....	51
Figura 18	Arranjo Schlumberger (MOREIRA, 2005).....	55
Figura 19	Plotagem dos dados de SEV (BRAGA, 2006).....	55
Figura 20	Operação da embreagem em curvas de SEV (BRAGA, 2006).....	56
Figura 21	Arranjo D-D (MOREIRA, 2005).....	57
Figura 22	Forma de plotagem dos dados de campo em forma de pseudo-seção (modificada de HALLOF, 1957).....	58
Figura 23	Exemplos de morfologia de curvas de resistividade (BRAGA, 1999).....	61
Figura 24	Mapa potenciométrico (BRAGA, 2006).....	63
Figura 25	Arranjo de blocos retangulares usado no modelo 2D (modificado de LOKE e BARKER, 1996a).....	67
Figura 26	Modelo de blocos utilizado no RES2DINV, arranjo D-D (a=10m) e respectivos dados plotados de acordo com a profundidade estabelecidas por Edwards (1977).....	68
Figura 27	Etapas da análise geoestatística.....	70
Figura 28	Exemplo de semivariograma (CAMARGO et al., 2001).....	72
Figura 29	Representação gráfica dos três modelos semivariográficos transitivos mais utilizados (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989).....	73
Figura 30	Localização dos ensaios geolétricos realizados na área de estudo.....	77

Figura 31	Varição da resistividade em função da distribuição da água no solo (DAVINO, 1970).....	79
Figura 32	Análise morfológica e modelo de distribuição da água das curvas tipo “QH”...	80
Figura 33	Análise morfológica e modelo de distribuição da água das curvas tipo “QQH”	81
Figura 34	Localização das construções e tubulações de concreto do sistema de drenagem superficial aterrados no cemitério.....	82
Figura 35	Análise morfológica e modelo de distribuição da água das curvas tipo “KQH”.	83
Figura 36	Análise morfológica e modelo de distribuição da água das curvas tipo “KQ”...	84
Figura 37	Curva de campo e modelo da SEV – 01 pertencente ao subgrupo I – A.....	87
Figura 38	Curva de campo e modelo da SEV – 14 pertencente ao subgrupo I – B.....	88
Figura 39	Curva de campo e modelo da SEV – 05 pertencente ao subgrupo I – C.....	89
Figura 40	Curva de campo e modelo da SEV – 08 pertencente ao subgrupo II – A.....	92
Figura 41	Curva de campo e modelo da SEV – 11 pertencente ao subgrupo II – B.....	93
Figura 42	Curva de campo e modelo da SEV – 12 pertencente ao subgrupo II – C.....	94
Figura 43	Mapa potenciométrico da área do cemitério de Vila Rezende.....	96
Figura 44	Seções geoeletricas: linhas de IE – 01, 02, 03.....	98
Figura 45	Seções geoeletricas: linhas de IE – 04, 05, 06.....	100
Figura 46	Seções geoeletricas: linhas de IE – 07, 08, 09.....	103
Figura 47	Seções geoeletricas: linhas de IE – 10, 11, 12.....	105
Figura 48	Histogramas dos cinco níveis de investigação.....	108
Figura 49	Curva de resistividade elétrica x profundidade.....	109
Figura 50	Mapas variográficos dos níveis de investigação.....	111
Figura 51	Semivariogramas experimentais e seus modelos de ajuste.....	112
Figura 52	Mapa de resistividade elétrica do primeiro nível de investigação geoeletrica..	114
Figura 53	Mapa de resistividade elétrica do segundo nível de investigação geoeletrica..	117
Figura 54	Mapa de resistividade elétrica do terceiro nível de investigação geoeletrica....	119
Figura 55	Mapa de resistividade elétrica do quarto nível de investigação geoeletrica.....	121
Figura 56	Mapa de resistividade elétrica do quinto nível de investigação geoeletrica.....	122
Figura 57	Mapa de pseudo-3D de resistividade elétrica para os níveis de investigação..	123

LISTA DE FOTOS

Foto 1	Tipos de solos presentes no cemitério.....	43
Foto 2	Equipamento e acessórios para SEV.....	52
Foto 3	Equipamento TERRAMETER modelo SAS 4000, cabos e baterias.....	53
Foto 4	Execução de uma SEV no interior do cemitério.....	75
Foto 5	Execução de uma linha de imageamento elétrico 2D no interior do cemitério..	76
Foto 6	Jazigo subterrâneo e jazigo acima do nível do terreno presentes na quadra Q – 01.....	101
Foto 7	Linha de IE – 07 executada entre as quadras Q – 09 e 10.....	104
Foto 8	Resíduos de construções tumulares carregados pelo escoamento superficial..	115

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Composição aproximada do corpo de um homem adulto 70 kg.....	16
Quadro 2	Principais parâmetros e padrões de potabilidade da água destinada ao consumo humano.....	24
Quadro 3	Métodos geoeletricos com seus respectivos parâmetros físicos.....	29
Quadro 4	Síntese da geologia regional e unidades litoestratigráficas da Bacia Sedimentar do Paraná.....	36
Quadro 5	Avaliação de arranjos de eletroresistividade quanto à resolução (WARD, 1990).....	54
Quadro 6	Profundidade mediana de investigação (Z_e) para o arranjo D-D (EDWARDS, 1977).....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Valores de resistividade aparente dos níveis geoeletricos definidos pelas SEVs (em ohm.m), e suas respectivas classificação em grupos de subgrupos.....	86
Tabela 2	Modelo geoeletrico proposto para a subsuperfície pela SEV – 01 do subgrupo I - A.....	88
Tabela 3	Modelo geoeletrico proposto para a subsuperfície pela SEV – 14 do subgrupo I - B.....	88
Tabela 4	Modelo geoeletrico proposto para a subsuperfície pela SEV - 05 do subgrupo I – C.....	89
Tabela 5	Modelo geoeletrico proposto para a área externa do cemitério pelo GRUPO I.....	90
Tabela 6	Modelo geoeletrico proposto para a subsuperfície pela SEV - 08 do subgrupo II – A.....	92
Tabela 7	Modelo geoeletrico proposto para a subsuperfície pela SEV - 11 do subgrupo II – B.....	93
Tabela 8	Modelo geoeletrico proposto para a subsuperfície pela SEV - 12 do subgrupo II – C.....	94
Tabela 9	Modelo geoeletrico proposto para a área interna do cemitério pelo GRUPO II.....	95
Tabela 10	Estatística básica para os cinco níveis de investigação.....	107

RESUMO

Este trabalho investigou e mapeou a contaminação por necrochorume da água subterrânea no aquífero freático do cemitério de Vila Rezende, situado na zona norte do município de Piracicaba – São Paulo, Brasil. Para tanto, foi aplicado o método da eletrorresistividade, por meio das técnicas de sondagem elétrica vertical (SEV) e imageamento elétrico (2D), arranjos schlumberger e dipolo-dipolo respectivamente, sendo a primeira com objetivo de estudar a distribuição do parâmetro resistividade elétrica verticalmente (1D) e a outra verticalmente e horizontalmente (2D e 3D). Os resultados da SEV indicam uma profundidade do nível freático entre 3,1 e 5,1 m na época de estiagem, com dois sentidos de fluxo subterrâneo, sendo um sentido a SW e o outro a SE. A subsuperfície do cemitério apresenta uma camada pouco espessa de aterro com sedimentos de textura arenosa, predominando logo abaixo sedimentos argilosos da Formação Corumbataí e diabásio das Intrusivas Básicas respectivamente. O cemitério apresenta condições físico-químicas dos materiais em subsuperfície desfavoráveis para percolação do necrochorume, mas facilita o fenômeno de saponificação dos cadáveres. Os resultados obtidos das linhas de imageamento elétrico (2D) indicam duas prováveis plumas de contaminante em zona não-saturada, uma na direção SW e outra a SE, ambas seguindo a direção do fluxo subterrâneo. Mas em zona saturada predomina uma pluma a SE sob as quadras Q – 08, 04 e 01, e também fora dos limites do cemitério. As áreas com baixa resistividade (anomalia condutiva), apresentadas nas seções geoeletricas e nos mapas de resistividade elétrica, demonstram que a contaminação tem ligação com a profundidade do nível freático e com o tempo de sepultamento. Por meio dos resultados obtidos, como localização e expansão das prováveis plumas, foram locados seis poços de monitoramento. Os métodos aplicados neste trabalho demonstraram como um instrumento indireto importante para avaliação da qualidade ambiental em cemitérios.

Palavras Chaves: Método da Eletrorresistividade, Cemitérios e Meio Ambiente, Necrochorume.

ABSTRACT

This work investigated and mapped the contamination for necrochorume of the groundwater 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 applied using vertical electric sounding (VES) and 2D electrical imaging techniques, schlumberger and dipole-dipole arrays respectively, being the first with the objective to investigate the electric resistivity vertically (1D) and the other vertically and horizontally (2D and 3D). The results of VES indicate a depth of water table among 3,1 and 5,1 m in drought, with two flow directions, being a the SW and another the SE. Cemetery underground presents a fine layer of embankment with sediments of sandy texture, prevailing soon lowers clayey sediments of the Corumbataí Formation and diabase of the Basic Intrusive respectively. The cemetery presents physical-chemistry geological conditions unfavorable for percolation of the necrochorume, but facilitates the phenomenon of human corpse saponification. The obtained results of the lines of electrical imaging (2D) indicate two probable contamination plume in unsaturated zone, a in SW and another to SE direction, both following the groundwater flow. But in saturated zone prevails a plume at SE under the blocks Q - 08, 04 and 01, and also out of the cemetery of the limits. The areas with low resistivity (conductive anomaly), presented in the geoelectrical sections and in the electrical resistivity maps, demonstrate that the contamination has connection with the depth of the water table and time of burial. Through the obtained results, as location and expansion of the probable plumes, were suggested six monitoring wells. The applied methods in this work demonstrated as an important indirect instrument for evaluation of the environmental quality in cemeteries.

Keywords: Electrical Resistivity Method, Cemeteries and Environment, Necrochorume.

1 INTRODUÇÃO

A degradação das águas superficiais e subterrâneas por problemas de poluição vem agravando as dificuldades para seu aproveitamento, e intensificando sua escassez. A contaminação de aquíferos é mais preocupante do que a das águas superficiais, visto que, estas rapidamente se renovam e se recuperam após cessar o lançamento de efluentes. No caso de aquíferos subterrâneos é praticamente irreversível a curto e médio prazo, visto que as técnicas de despoluição são muito complexas, onerosas e demoradas, e muitas vezes, se dá o aquífero como perdido. A contaminação pode se dar a partir de infiltração de fossas sépticas, disposição final de resíduos sólidos como os lixões, vazamentos de tanques de armazenamento de produtos tóxicos como derivados de petróleo, de necrochorume em cemitérios, e outros.

Devido à falta de proteção ambiental com a qual o procedimento de aterrar os corpos foi conduzido ao longo das décadas, muitos dos cemitérios se tornaram áreas degradadas, sendo observado pelos órgãos ambientais e de saúde pública como um aspecto ambiental urbano importante.

Os cemitérios públicos no Brasil carecem de uma política de planejamento e de gestão ambiental.

A contaminação do meio pela água residuária proveniente da decomposição de cadáveres, também conhecida como necrochorume, ocorre devido à implantação inadequada de cemitérios que muitas vezes são implantados em locais que apresentam condições hidrogeoambientais desfavoráveis, como baixa profundidade do nível freático, solos muito permeáveis, rochas com fraturas terrenos cársticos.

A aplicação de métodos geofísicos na caracterização subsuperficial, em cemitérios apresenta inúmeras vantagens técnico-econômicas, principalmente por serem técnicas investigativas indiretas, não invasivas, portanto não destrutivas, 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.

A aplicação do método da eletrorresistividade em estudos ambientais reside na possibilidade de determinação da resistividade aparente do terreno em diversas

profundidades. As principais vantagens deste método são as facilidades de aquisição de dados, realização de leituras em diversas profundidades, detecção direta da contaminação subterrânea e subsidia a caracterização geológica e hidrogeológica da área.

Pesquisas sobre a relação “cemitério e meio ambiente” com conseqüências sérias sobre a saúde pública tem sido realizados nos EUA e na Europa a mais de 50 anos, mas no Brasil isso é recente. Com o pioneirismo do Professor Alberto Pacheco do Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (USP) coordenador de inúmeros projetos que visavam o conhecimento das relações do corpo morto, no seu processo de desintegração, com o meio ambiente – recursos naturais, como solo e água subterrânea. Outras instituições de pesquisa no Brasil e no exterior vêm desenvolvendo trabalhos na área.

Nesse âmbito, estudos estão sendo desenvolvidos pelo Departamento de Geologia Aplicada do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (UNESP) em Rio Claro/SP, usando a mesma temática da relação “cemitérios e meio ambiente”, aplicando métodos geofísicos, não somente para subsidiar a melhor locação de poços de monitoramento, mas como instrumento amplo de investigação e mapeamento preliminar da contaminação dos cemitérios por necrochorume.

Em operação desde 15 de setembro de 1976, com mais de 16.500 pessoas sepultadas e média de 2 sepultamentos por dia, o cemitério público de Vila Rezende é o maior cemitério do município de Piracicaba-SP. Escolhido para o presente estudo devido às condições hidrogeoambientais apresentadas como baixa profundidade do nível freático, dados históricos de sepultamentos por inumação, e outros.

O uso das técnicas geofísicas de investigação associado ao conhecimento do ambiente físico é importante para o planejamento da implantação de novos cemitérios e gestão ambiental de cemitérios durante sua operação.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é a investigação e mapeamento da contaminação da água subterrânea por necrochorume no aquífero freático do cemitério de Vila Rezende, situado na zona norte do município de Piracicaba-SP. Mais especificamente o trabalho visa:

- Caracterização geométrica dos materiais geológico-geotécnicos em subsuperfície;
- Determinação da profundidade do nível freático e, com isso, a obtenção do mapa potenciométrico da área;
- Definição da localização, extensão e sentido da migração da provável pluma de contaminante (necrochorume);
- Subsidiar a locação de poços de monitoramento das águas subterrâneas adjacentes ao cemitério.

Para tanto, foi aplicado o método da eletrorresistividade com suas respectivas técnicas de sondagem elétrica vertical (SEV), e imageamento elétrico (2D).

Este trabalho teve também como finalidade estudar a aplicação das técnicas geométricas em áreas possivelmente contaminada por necrochorume.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 CEMITÉRIOS E MEIO AMBIENTE

3.1.1 Generalidades

Tanto a palavra “cemitério” quanto a palavra “necrópole” tem origem grega. Cemitério deriva de *koumetèrian*, de *kcmão* (onde eu durmo, dormitório), e necrópole de *necrópolis* (cidade da morte ou dos mortos). Já a palavra “cadáver”, que também está nesse contexto, tem origem latina e significa – “carne dada aos vermes”, o que traduz o destino dessa matéria orgânica. Segundo Bayard (1993), na terminologia hebraica, o cemitério é designado por termos como: *Berth Olam* (casa da eternidade) e *Beth ha’ hayaim* (casa da vida).

Foi sob a influência do cristianismo que o termo tomou o sentido de “campo de descanso após a morte”, designando mais precisamente o local no quais os cadáveres eram enterrados. Mas segundo Pacheco (1986) o termo só pode ser corretamente utilizado para os locais em que se sepultam corpos por *inumação*¹, pois em algumas nações como as do oriente médio os sepultamentos ocorriam em sarcófagos em rochas sedimentares ou em sepulcros construídos em rocha.

Durante a Idade Média, instaurou-se o costume de sepultar os mortos, particularmente aqueles de maior poder sócio-econômico-político, nas igrejas ou nas suas imediações, desenvolvendo-se dessa forma uma relação de aproximação entre vivos e mortos.

Segundo Silva (1994), “em situações beligerantes dos mortos retiravam-se os tendões, que eram utilizados na confecção de cordoalha, e o restante era triturado, misturado com palha e estrume e utilizado como adubo”. Pacheco et al. (1993) comenta que tais fatos fizeram aumentar significativamente a incidência de tantas epidemias como tifo, peste negra entre outras, o que levou a população desses locais a desenvolverem uma atitude hostil à proximidade com os moribundos, durante o século XVIII.

¹ Sepultamento em covas simples cuja profundidade varia de 1,1 a 1,6 m, sem revestimento de alvenaria, com simples recobrimento de solo.

Foi a partir do século XVIII que a palavra começou a ter o sentido atual, quando por razões de saúde pública, se proibiu o sepultamento nas igrejas e se recomendou colocar os cadáveres em lugares adequados. Desde então, tornou-se costume a construção de cemitérios ao ar livre, o mais longe possível do perímetro urbano (PACHECO, 1986).

Silva (1994) cita que o fundamento para essa decisão de afastar os cemitérios das civilizações era “doutrina dos miasmas”; essa doutrina preconizava que a matéria orgânica em decomposição, especialmente aquela de origem animal, sob a influência de elementos atmosféricos, como temperatura, umidade e direção dos ventos, formavam vapores, ou miasmas danosos à saúde, infectando o ar que se respira. Entre essa matéria orgânica de origem animal formadora de miasmas e emissora de mau cheiro constavam especialmente os cadáveres humanos. Portanto, afastá-los era a solução.

Assim, os cemitérios passaram a ser construídos em áreas afastadas dos centros urbanos. Um exemplo descrito por Pacheco (1986) foi a implantação da primeira necrópole de São Paulo, o cemitério da Consolação, fundada em 1856 e ainda em uso. Silva (1994) comenta que muito se protestou contra a localização deste cemitério, porque se achava que o mesmo estava muito distante da cidade. Na época um jornal publicou sobre a sua localização a seguinte frase: “no fim do mundo, na beira da estrada para Sorocaba, ladeado por capinzais vacarias”, mas hoje esse cemitério encontra-se dentro da cidade.

Em muitos casos, os cemitérios que no passado estavam distantes da população, atualmente, acham-se no meio das cidades devido à urbanização explosiva e desordenada pela quais essas passaram.

3.2 ASPECTOS AMBIENTAIS DE CEMITÉRIOS

Aspecto ambiental pode ser entendido como conjunto de mecanismos através do quais ações humanas (atividades, produtos ou serviços) podem interagir com o meio ambiente causando um impacto ambiental (SÁNCHEZ, 2006). As atividades de sepultamento de cadáveres geram fontes poluidoras do meio físico, sendo assim podem ser consideradas como uma atividade - aspecto - ambiental.

Os cemitérios nunca foram incluídos nas listas de fontes tradicionais de contaminação ambiental, apesar da existência de alguns relatos históricos como os de Mulder, 1954 apud Bouwer, 1978; Schraps, 1972 apud Pacheco, 2000 sobre contaminação das águas subterrâneas e poços de abastecimento público.

Ucisik e Rushbrook (1998) se mostraram preocupados com o impacto que os cemitérios poderiam causar ao meio ambiente, por meio do aumento da concentração de substâncias orgânicas e inorgânicas nas águas subterrâneas e a eventual presença de microrganismos patogênicos, e enfatizaram a necessidade de mais pesquisa a respeito do assunto.

Em cemitérios, as águas subterrâneas podem ser contaminadas por microrganismos existentes nos corpos em decomposição. Se essa água for captada por poços, ocorre, eventualmente, riscos de saúde, pois este recurso pode veicular doenças como a febre tifóide, paratífóide, cólera e outras (MATOS, 2001).

Bergamo (1954) apud Matos (2001) e Menezes (1971) defendem a necessidade de estudos geológicos e sanitários das áreas de cemitérios e a verificação das possibilidades de contaminação das águas subterrâneas e superficiais. Pacheco (1986) alertou para a necessidade de implantação cuidadosa de cemitérios e fixação de faixas de proteção sanitária como forma de garantir a preservação das águas subterrâneas e o uso potável das mesmas.

Os estudos de Pacheco et al. (1991), podem ser considerados como um grande avanço nos estudos das problemáticas hidrogeoambientais dos cemitérios. Estudos realizados em dois cemitérios no município de São Paulo e num terceiro no município de Santos constataram a contaminação do aquífero freático por microrganismos – coliformes totais, coliformes fecais, estreptococos fecais, clostrídios sulfito redutores e outros – oriundos da decomposição dos corpos sepultados por inumação no solo.

Silva (1995) investigou a situação de 600 cemitérios do país (75% municipais e 25% particulares), observou a incidência de 15% a 20% de casos de contaminação e poluição do subsolo, carregada pelos resíduos da decomposição dos corpos e efluentes cadavéricos (necrochorume). Desse percentual, cerca de 60% dos cemitérios problemáticos era municipal.

Migliorini (1994) observou o aumento na concentração de íons e de produtos nitrogenados nas águas subterrâneas de cemitério de Vila Formosa em São Paulo.

Dent (1995) constatou o aumento da condutividade elétrica e sais minerais nas águas subterrâneas próximas de sepultamentos recentes no cemitério Botany, na Austrália.

Pequeno Marinho (1998) constatou a presença de bactérias e produtos nitrogenados no aquífero freático do cemitério São João Batista em Fortaleza - CE.

Braz et al. (2000) encontraram números elevados de coliformes totais e fecais em poços a jusante do cemitério do Bengui em Belém - PA.

Almeida e Macêdo (2005) observaram aumento da condutividade elétrica e de íons de cloreto a jusante do fluxo da água subterrânea de cinco cemitérios analisados na cidade de Juiz de Fora em Minas Gerais.

Matos (2001) encontrou em amostras de água do aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, bactérias heterotróficas, proteolíticas, clostrídios sulfito-redutores, enterovírus e adenovírus. O autor ainda acrescenta que os resultados da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e condutividade elétrica foram maiores nas águas próximas de sepulturas.

A falta de medidas reguladoras tanto na implantação, na operação e na desativação de cemitérios tem trazido grandes problemas ao meio ambiente e a saúde pública.

Os cemitérios têm que ser observados e analisados como um aspecto ambiental complexo, e não somente os seus problemas hidrogeoambientais. Menezes (1971) faz uma abordagem social, ambiental, política e administrativa dos cemitérios, alertando que as necrópoles podem causar diversos impactos como: psicológica, desvalorização imobiliária, contaminação do solo, contaminação das águas subterrâneas e superficiais e das redes de distribuição das mesmas, problemas no tráfego, poluição visual, e que a administração, seja particular e/ou municipal deve, sobretudo garantir – a prestação de serviços adequados, a defesa do interesse dos usuários, a justa remuneração do investimento, e as necessidades de manutenção e melhoramento dos serviços prestados.

As construções de cemitérios parques, desenvolvidos a partir de um novo conceito arquitetônico, leva em conta a introdução de elementos que atenuem as lembranças e fazem a convivência com esse tipo de instalações serem menos traumáticas. Segundo Miotto (1990), por esses cemitérios parques serem implantados em extensas áreas verdes, com muitas espécies arbóreas, dotadas de

edifícios de apoio à estrutura, como capela, velório e administração, esses provavelmente são uma resposta aos impactos psicológicos.

3.2.1 Aspectos Legais

3.2.1.1 Âmbito Federal

Dentro de uma política ambiental estabelecida pela Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que objetiva preservar, melhorar e recuperar a qualidade do solo, recursos hídricos superficiais e subterrâneos entre outros recursos. Essa lei objetiva de modo genérico, isto é, nada específico, a manutenção da qualidade ambiental dos recursos naturais da nação.

Alguns anos depois o CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA promulgou as resoluções nº 001, de 23 de Janeiro de 1986 e 237, de 19 de dezembro de 1997, que indicam as atividades ou empreendimentos com potencial poluidor sujeitos ao licenciamento ambiental e remetem ao órgão ambiental competente de cada estado a incumbência de definir os critérios de exigibilidade, e o detalhamento – esse conforme as especificidades, os riscos ambientais e outras características da atividade ou empreendimento, visando à obtenção de licença ambiental. Mesmo com diversos trabalhos comprovando que cemitérios são fontes de contaminação e poluição ambiental, até o ano de 2003, a legislação federal não considerava os cemitérios como atividades e/ou empreendimento passíveis a licenciamento ambiental. O que regia sobre o tema eram os códigos sanitários estaduais, atos e leis municipais - quase sempre enfocando as questões de saúde pública, e apenas dando orientações.

Em 28 de maio de 2003, foi promulgada a Resolução do CONAMA nº 335 que dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitérios horizontais e verticais e determina a necessária implantação de equipamentos de proteção ambiental para salvaguardar o solo e as águas subterrâneas.

Com a promulgação dessa resolução, os órgãos ambientais estaduais passam a ter a obrigação de licenciar e, portanto, fiscalizar a implantação de novos cemitérios.

A Resolução do CONAMA nº 335, nos seus artigos 11, parágrafo único e 12, parágrafo único, prevê que cemitérios implantados anteriormente à data de

promulgação deverão se ajustar ao instrumento legal, inclusive no que se refere à recuperação da área atingida.

3.2.1.2 Âmbito Estadual

As regulamentações em cemitérios no Estado de São Paulo iniciaram com o Decreto Estadual nº 12.342, de 27 de setembro de 1978, que regulamentava o Código Sanitário Estadual do Estado de São Paulo – regulamentando a promoção, preservação e recuperação da saúde – exigindo que os cemitérios apresentem o mínimo de condições de segurança à saúde e bem da população e ao meio ambiente. Hoje o Código Sanitário do Estado de São Paulo é regulamentado pela Lei Estadual nº 10.083, de 24 de setembro de 1998, que no seu capítulo VI, artigo 85, prevê que as atividades cemiteriais (Inumações, Exumações, Transladações e Cremações) deverão ser disciplinadas através de normas técnicas estaduais.

No estado de São Paulo, os cemitérios públicos que sempre estiveram sob a competência das Secretarias Municipais de Saúde e/ou de Obras Públicas, hoje em dia estão sob a competência das Secretárias Municipais de Meio Ambiente.

No entanto, já entendendo que cemitérios se apresentavam como fontes potencialmente poluidoras, a COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB elaborou em 1989 a norma técnica *L1.040*², que passou a dar orientação no que se refere à implantação de novas necrópoles. Essas orientações são requisitos e condições técnicas, como informações geográficas, geológicas e hidrogeológicas do meio físico, que deve constar no documento de caracterização da área. Esse documento, no Estado de São Paulo, deve ser entregue pelo empreendedor do cemitério ao órgão licenciador, no caso a CETESB.

Em 4 de dezembro de 2002 foi promulgada para o Estado de São Paulo o Decreto Estadual 47.397 que dá nova redação ao Título V – Das Licenças e ao anexo 5, e acrescenta os anexos 9 e 10, ao Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, aprovado pelo Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. Na nova redação, no Título V – Das Licenças, no Capítulo I, Artigo 57º, inciso XI - os

² Houve três revisões desta norma, em 1993, 1995 e 1999.

cemitérios horizontais e verticais são considerados como fontes de poluição passíveis de licenciamento ambiental.

3.3 POLUIÇÃO AMBIENTAL DEVIDO AOS CEMITÉRIOS

A principal causa da poluição ambiental pelos cemitérios é a eliminação do necrochorume pelos corpos, particularmente, no primeiro ano de sepultamento.

No entanto, outros poluentes, não menos importantes, levantados por Silva (1995 e 1998) não podem ser esquecidos, como, por exemplo, os óxidos metálicos (Ti, Cr, Cd, Pb, Fe, Mn, Hg, Ni e outros) lixiviados dos adereços das urnas mortuárias. O necrochorume pode veicular além de microrganismos oriundos do corpo, restos ou resíduos de tratamento químicos hospitalares (quimioterapia) e os compostos decorrentes da decomposição da matéria orgânica. O autor afirma que todos esses contaminantes incorporados ao fluxo de necrochorume são prejudiciais ao solo e as águas subterrâneas.

Matos (2001) e Barbosa e Coelho (2005) afirmam que os compostos orgânicos liberados no processo de decomposição dos cadáveres são degradáveis e devem causar um aumento da atividade microbiana no solo sob a área de sepultamentos. Os autores, também, afirmam que não deve ser descartada a contaminação causada por outros produtos químicos apontando que os efeitos mais prováveis dessa contaminação química são um aumento na presença de compostos de nitrogênio e fósforo, na concentração de sais (Cl^- , HCO_3^- , Ca^{+2} , Na^+) e consequentemente na condutividade elétrica, no pH e na alcalinidade e dureza da solução do solo.

Pacheco (1986) aponta os cemitérios como verdadeiros laboratórios de decomposição, sendo que a putrefação dos cadáveres inicia-se com as bactérias endógenas intestinais, seguindo-se uma fase aeróbia e anaeróbia facultativa.

Assim, para uma visão dos aspectos resultantes da decomposição de cadáveres na interação solo-água torna-se necessário conhecer os fenômenos transformativos que neles ocorrem. Miotto (1990) afirma que o conhecimento dos fatores que influem nesses fenômenos reforça o conceito da atuação do meio ambiente como acelerador ou retardador da decomposição.

3.3.1 Fenômenos Transformativos Destrutivos dos Cadáveres

A importância de uma metodologia para caracterizar a adequabilidade de terrenos destinados à implantação de cemitérios no contexto da Geologia de Planejamento do Meio Físico fica realçada na medida em que se conhece os processos transformativos dos cadáveres e as relações com o meio onde são sepultados.

Portanto, especial ênfase deve ser dada ao conhecimento desses processos.

Os corpos sepultados em cemitérios, normalmente, estão sujeitos aos fenômenos transformativos destrutivos, a **autólise**, **putrefação** e a **maceração**.

Autólise - a autólise se manifesta uma vez cessada a circulação sanguínea. França (1985) cita que as células do sangue, prejudicadas pela ausência de trocas nutritivas de novos elementos que deixam de receber pela corrente plasmática, sofrem pela ação dos fermentos a acidificação. Esse fato é explicado como fenômeno resultante da predominância de íons H^+ sobre os íons OH^- nos tecidos e líquidos do cadáver, sendo assim, a variação do pH dos tecidos é um evidente sinal de morte.

Putrefação - após a autólise, começa a putrefação do corpo, iniciando-se pelos intestinos. Essa fase é regida por fenômenos biológicos e físico-químicos em que atuam microrganismos vivos que podem ser aeróbios, anaeróbios ou facultativos.

Segundo Fávero (1991), os principais microrganismos da fase putrefativa são: o bacilo coli, o bacilo proteus, bacilo "*sibitillis*", o bacilo burítico, o bacilo "*perfringens*" e o bacilo "*purificus*". Ainda segundo o autor, o fenômeno de putrefação compreende quatro períodos distintos: de *coloração*, *gasoso*, *coliquativo* e de *esqueletização*.

O início da putrefação se dá pelo *período da coloração*, no qual ocorre o surgimento de manchas verdes na fossa ilíaca direita, devido aos gases produzidos pelos microrganismos alocados no início do intestino grosso, a qual posteriormente se difunde pelo tronco, cabeça e membros.

A coloração esverdeada escura é um aspecto típico e deve-se a reação do gás sulfídrico (H_2S) com a hemoglobina, formando a sulfometemoglobina nos *tegumentos*³ (SILVA, 1995). Segundo Fávero (1991) e França (1985) a ocorrência

³ Tecidos que recobrem o corpo de homens e animais, como a derme e a epiderme.

desse aspecto é precoce, entre 18 e 22 horas após a morte, sendo grandemente influenciada pelo clima. É mais morosa nos cadáveres inumados do que nos conservados ao ar livre, e mais ligeira na água. O autor salienta que em geral, este período pode durar até sete dias após o óbito.

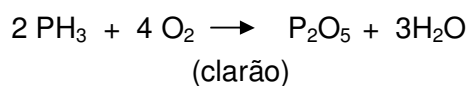
O *período gasoso* inicia-se com o surgimento de gases no interior do cadáver, expandindo-se por todo o corpo, gerando bolhas de conteúdo leucocitário hemoglobínico na epiderme. O acúmulo destes gases faz com que o cadáver aumente seu volume, principalmente na face, no abdômem e nos órgãos genitais masculinos.

Silva (1995) afirma que em função da pressão dos gases putrefativos, ocorre a ruptura das paredes abdominais, liberando os gases e o necrochorume do período coliquativo. O autor ainda salienta que nos 600 cemitérios estudados do país, estabeleceu-se a seguinte relação do volume gasoso liberado/peso do corpo: 0,57 L/kg, sendo os principais gases funerários identificados por processos analíticos foram o gás sulfídrico (H₂S), o dióxido de carbono (CO₂), as mercaptanas, o gás metano (CH₄), a amônia (NH₃) e o fosfina (PH₃) – hidrato de fósforo, gasoso, incolor e inflamável.

Uma parte dos gases liberados pelos corpos inumados permanece adsorvida no solo, o restante atinge de maneira geralmente imperceptível a atmosfera (SILVA, 1995). No caso dos corpos enterrados em túmulos, os gases liberados chegam à atmosfera, após os mesmos escaparem das urnas funerárias e dos túmulos, por meio de suas juntas, sendo por vezes perceptíveis ao olfato.

No caso do fosfano (trihidreto de fósforo - PH₃), o seu desprendimento na atmosfera somente é perceptível se ocorrer à noite, pois ao se inflamar instantaneamente pela reação com o oxigênio atmosférico, forma um clarão súbito característico (“flash”, “flare”) (SILVA, 1995). Segundo Emsley (1993) o fosfano entra em combustão espontânea em contato com o ar e “detona” o metano presente, que em alta concentração forma uma luz espectral, muito parecido com o fenômeno da aurora boreal.

De acordo com Silva (1995) a reação química básica do fenômeno de oxidação do fosfano, é a seguinte:



por vezes associada a uma reação secundária de queima do metano (“detonação”):



Segundo Fávero (1991) esse período tem um prazo mínimo de duração de três semanas.

O *período coliquativo*, é o período da dissolução pútrica do cadáver, devido à desintegração progressiva dos tecidos, no qual as partes moles diminuem de volume, que resulta num efluente líquido intermitente, denominado de produto de coliquação, líquido humoroso ou necrochorume, sendo o último mais utilizado.

De acordo com França (1985), neste período o corpo perde sua forma, o esqueleto fica recoberto por uma massa de putrilagem, e surge um grande número de insetos, larvas e germes, que trabalham pela destruição do cadáver, dependendo das condições do corpo e do terreno, podendo estender-se por vários anos.

O *período de esqueletização* é determinado pela ação continuada dos germes e insetos e da ação do meio ambiente. Os tecidos reduzem-se ainda mais, até que o cadáver apresente os ossos livres, unidos apenas pelos ligamentos (MIOTTO, 1990). Dependendo de algumas condições ambientais os ossos podem resistir por dezenas e centenas de anos, mas com o passar do tempo, esses perdem sua estrutura típica, tornando-se friáveis e mais leves.

Maceração - é um processo especial de transformação que ocorre na morte de fetos do sexto ao nono mês no útero materno. Segundo França (1985) pode ser *séptico* ou *asséptico*, dependendo das condições do meio onde o corpo permanece:

- é *asséptico*, isto é, isento de germes patogênicos, para os fetos retirados do útero *post-mortem*;
- é *séptico*, isto é, que produz putrefação por germes patogênicos, nos cadáveres que permanecem em meio líquido sob a ação dos germes, como nos casos de afogados.

3.3.2 Fenômenos Conservativos dos Cadáveres

Sob certas condições ambientais, podem ocorrer fenômenos transformativos conservadores, como a **mumificação** e **saponificação** (PACHECO e BATELLO, 2000).

Mumificação - é a dessecação ou desidratação dos tecidos. Aparece em condições de clima quente, seco, com correntes de ar. Existem determinados tipos de solos que propiciam a mumificação, como os arenosos das regiões desérticas. Em solos calcários, os corpos inumados podem sofrer uma fossilização incipiente, graças à substituição catiônica de sódio e potássio pelo cálcio. Assim, têm sido encontradas múmias naturais, muito bem conservadas, sem atarídes, depositadas no solo, em cavernas e catacumbas (PACHECO e MATOS, 2000).

Saponificação - é a hidrólise da gordura com liberação de ácidos graxos, os quais, pela acidez, inibem as bactérias putrefativas, atrasando a decomposição do cadáver (MATOS, 2001). A adipocera é a massa branca, mole, quebradiça, de aspecto céreo, que se forma nos diversos tecidos dos órgãos do cadáver, que é resultante da saponificação. Segundo Silva (1995), um ambiente quente, úmido e anaeróbio, assim como a presença de bactérias endógenas, favorece a saponificação. O solo argiloso, pouco permeável, alta retenção de água, alta capacidade de troca catiônica (CTC), quando saturado de água facilita esse tipo de fenômeno.

3.3.3 Fatores que Contribuem para a Decomposição

Do ponto de vista de saúde pública, o processo de decomposição de cadáveres deve ser facilitado pelas condições e características dos solos, de modo que ocorra naturalmente sem oferecer riscos de contaminação ao sistema solo – água.

Cabe notar que o desenvolvimento da putrefação está relacionado a **fatores intrínsecos** do cadáver como a *idade*, a *constituição do corpo* e a *causa da morte*, e **fatores extrínsecos**, isto é característica físico-químicas do ambiente do sepultamento como *temperatura*, *umidade*, *aeração* e *condições do solo*.

Com relação à *idade*, Fávero (1991) registra que os recém-nascidos e as crianças se putrefazem mais rapidamente que os adultos.

A *constituição do corpo* age semelhantemente, transformando os indivíduos corpulentos e obesos mais rapidamente pela putrefação (FÁVERO, 1991).

A *causa da morte* tem grande influência no processo transformativo, pois grandes mutilações, estados gangrenosos e vítimas de infecções, putrefazem-se mais rapidamente (FRANÇA, 1985).

A *temperatura* processa a putrefação, pois Fávero (1991) afirma que temperatura muito alta ou muito baixa, retarda ou até interrompe a evolução do fenômeno. A temperatura favorável para a ação dos germes putrefativos vai de 20°C a 30°C. Segundo França (1985), temperaturas abaixo do 0°C não permitem o início do fenômeno, podendo conservar-se naturalmente o cadáver.

O teor de *umidade* do ambiente é de extrema importância na decomposição, pois climas muito secos interrompem a putrefação, favorecendo a mumificação, o contrário favorece a maceração até a saponificação.

O ambiente precisa ter *aeração*, embora certos germes sejam anaeróbicos. É necessário que a umidade e a temperatura do ar atendam às exigências dos germes. Ambientes quentes e fortemente ventilados podem mumificar por processo natural.

As *condições do solo* têm grande mérito na evolução do fenômeno, principalmente quando o sepultamento se dá por inumação.

A importância do solo na decomposição de cadáveres é pertinente a duas características físicas: condutividade hidráulica e estrutura granular, pois é através dessas duas características que determinará as condições de arejamento, umidade e temperatura do ambiente. Dessa forma, Fávero (1980) afirma que há tipos de solo que destroem prontamente os cadáveres enquanto outros conservam, mumificando-os ou saponificando-os.

3.3.4 Necrochorume

O termo necrochorume, é um neologismo que designa o líquido liberado intermitentemente pelos cadáveres em putrefação. Segundo Miotto (1990), tal neologismo tomou emprestado o significado intrínseco do termo “chorume”, largamente empregado para designar o resíduo líquido resultante da decomposição da matéria orgânica presente nos lixos domésticos dispostos em aterros sanitários,

que tem como características a cor negra, o mau cheiro e elevada demanda bioquímica de oxigênio (D.B.O).

A composição do corpo de um homem adulto de 70 kg é mostrado no Quadro 1; a da mulher situa-se entre um quarto e dois terços da do homem (DENT e KNIGHT, 1998). Segundo Silva (1995) a relação necrochorume/massa corpórea é da ordem de 0,6 L/kg.

Quadro 1 – Composição aproximada do corpo de um homem adulto de 70 kg (DENT e KNIGHT, 1998).

Substância	Quantidade
Carbono	16.000g
Nitrogênio	1.800g
Cálcio	1.100g
Fósforo	500g
Enxofre	140g
Potássio	140g
Sódio	100g
Cloreto	95g
Magnésio	19g
Ferro	4,2g
Água	70 – 74%

O necrochorume corresponde a um líquido viscoso mais denso que a água (1,23 g/cm³), rico em sais minerais e substâncias orgânicas degradáveis, de coloração castanho-acinzentado, polimerizável, de cheiro acre forte e com grau variado de patogenicidade (SILVA, 1994 e MATOS, 2001). Silva (1998) afirma que o necrochorume é constituído por 60% de água, 30% de sais e 10% de substâncias orgânicas. Com a decomposição das substâncias orgânicas presentes no necrochorume, são geradas diversas diaminas, mas as mais preponderantes são as mais tóxicas: a putrescina (C₄H₁₂N₂) e a cadaverina (C₅H₁₄N₂), que podem ser degradadas, gerando amônio (NH₄⁺).

Devido à heterogeneidade da composição química do necrochorume, encontra-se no mesmo, números elevados de bactérias degradadoras de matéria orgânica (bactérias heterotróficas), de proteínas (bactérias proteolíticas) e lipídios (bactérias lipolíticas). Encontram-se também bactérias que são normalmente excretadas por humanos (e animais), pois vivem nos seus tratos intestinais, como

Escherichia coli, *Enterobacter*, *Klebsiella* e *Citrobacter* (as quatro formam o grupo coliforme total) e a *Streptococcus faecalis* – essas ao serem ingeridas provocam diarreias e dores abdominais. E microrganismos patogênicos como *Clostridium perfringes*, *Clostridium welchii* – essas causam tétano, gangrena gasosa e toxinfecção alimentar; *Salmonella typhi* que causa a febre tifóide e *paratyphi* a febre paratífóide, *Shigella* que causa a desintéria bacilar e o vírus da hepatite A.

A Figura 1 apresenta o extravasamento de necrochorume no cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, devido ao período de chuvas mais intensas e elevação do nível do lençol freático, submergindo assim as sepulturas com o contaminante.

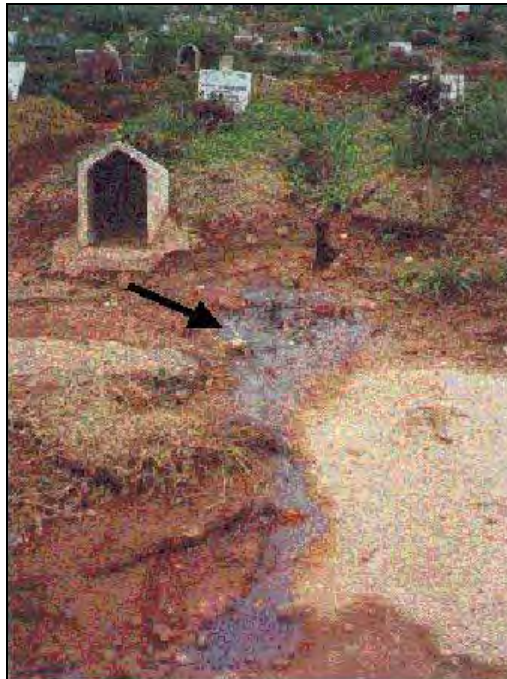


Figura 1 – Extravasamento de necrochorume no cemitério Vila Nova Cachoeirinha (PACHECO E MATOS, 2000).

3.3.5 Vulnerabilidade do Meio Físico de Subsuperfície à Contaminação

Conforme Silva (1995), os processos de contaminação do subsolo somente se instalam, num dado local, se houver condições de vulnerabilidade no meio físico. Esta suscetibilidade é decorrência das características geológicas, hidrogeológicas,

*geoambientais*⁴ e *geossanitárias*⁵, bem como das condições de oferta e atividade dos vetores impostos da contaminação.

As características geológicas são determinantes nos aspectos qualitativas, quantitativas e de vulnerabilidade ambiental na hidrogeologia de uma dada área. A água contida no solo e nas formações geológicas abaixo da superfície do terreno é dividida basicamente em duas zonas conforme apresentado na Figura 2: a **zona não saturada**, também chamada zona de aeração ou vadosa, e a **zona saturada** ou zona de saturação.

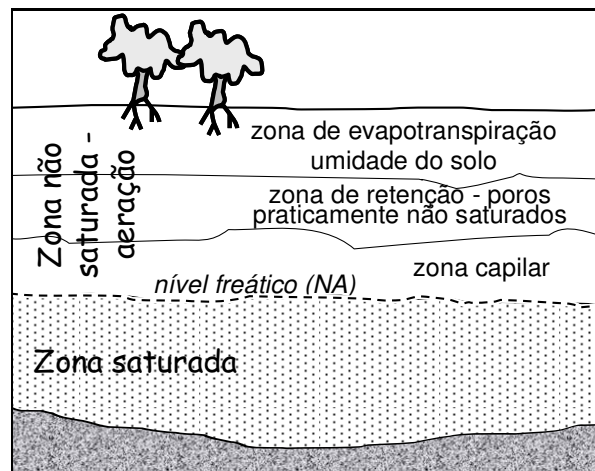


Figura 2 - Distribuição das águas no solo (BRAGA, 2006).

Água na zona não saturada – a zona não saturada se situa entre a superfície freática e a superfície do terreno, e nela os poros estão parcialmente preenchidos por gases (principalmente ar e vapor d'água) e por água. De baixo para cima, essa zona se divide em três partes:

- **Zona capilar**, que se estende da superfície freática até o limite de ascensão capilar da água, sendo que sua espessura depende principalmente da distribuição de tamanho dos poros e da homogeneidade do terreno;

⁴ Representações superficiais do terreno devido às formações geológicas, como por exemplo: classe de declividade e formas de relevo, padrões e densidade de drenagens, etc.

⁵ Capacidade do material geológico não-saturado de interceptar, adsorver, biodegradar, etc. os contaminantes presentes.

- **Zona intermediária**, compreendida entre o limite de ascensão capilar da água e o limite de alcance das raízes das plantas;
- **Zona de água do solo ou zona de evapo-transpiração**, situada entre os extremos radiculares da vegetação e a superfície do terreno (MANOELFILHO, 1997).

Água na zona saturada – a zona saturada fica situada abaixo da superfície freática e nela todos os vazios existentes no terreno estão preenchidos com água.

A zona não-saturada ou de aeração é composta de partículas sólidas e de espaços vazios. Esses poros são ocupados por porções variáveis de ar e água. O fluxo das águas intersticiais da zona não-saturada tende a se movimentar dos níveis de potencial hidráulico mais elevado para os mais baixos. Normalmente esse fluxo tem direção vertical.

Esse processo de fluxo continua na zona saturada, contudo com velocidades de percolação muito menores e com direção predominantemente horizontal.

O solo, e em especial a zona não-saturada, desempenha um papel muito importante na retenção dos microrganismos patogênicos, mediante um conjunto de fatores físicos, químicos e ambientais, a infiltração e o movimento dos mesmos podem ser afetados ou até anulados.

Tal importância não se deve apenas à posição de filtro da zona não-saturada, mas principalmente pelo fato de seu ambiente (solo, ar e água) ser benéfico para o abrandamento ou eliminação de contaminante. Devido algumas características físico-químicas como alta aeração, baixa alcalinidade, alto índice de vazios entre as partículas sólidas e a grande superfície específica dos poros presentes, cria segundo Miotto (1990) algumas condições para:

- Interceptar, adsorver e eliminar bactérias e vírus;
- Adsorver e biodegradar muitos compostos orgânicos.

Pacheco (1986) afirma que a filtração mecânica e absorção são os processos mais importantes na retenção dos organismos. A eficácia destes processos tem sido estudada pelos vários especialistas que têm posto em evidência a importância do tipo de solo na retenção das bactérias e vírus.

Bluter et al. (1954) apud Pacheco (1986), baseando-se em estudos de infiltração realizados na Califórnia, verificaram que a percolação de águas residuais

em solos areno-argilosos permitiu a remoção de níveis potenciais perigosos de bactérias por meio de uma profundidade de 1,5 m.

Schrops (1972) apud Pacheco (1986), em estudo feito na Alemanha, revelou que determinado cemitério localizado em terrenos de aluvião não-consolidado constituía um risco efetivo para as águas subterrâneas. Este autor observou pelas análises químico-bacteriológicas realizadas a cada 0,5 m, que a diminuição no número de bactérias somente se inicia a partir de 3 m da base do túmulo, havendo uma redução de 97% do número de bactérias a 5,5 m, sendo praticamente nula o número de bactérias a 6 m.

De acordo com Silva (1995) a porcentagem ideal de argila no solo é na faixa de 20 a 40%, para que os processos de decomposição aeróbica e as condições de drenagem do necrochorume sejam favorecidos.

Gilbert et al. (1976) apud Pacheco (1986) constataram que 99,9% do total de bactérias patogênicas podem ser removidas de águas residuais por filtração por meio de uma fina camada superficial de areia (0,6 a 0,9 m de espessura), logo abaixo de uma sucessão de estratos de areia grosseira e de cascalho. No entanto, o total de bactérias encontrada foi ainda de $10^5/100$ ml, tendo os coliformes fecais atingindo $10^2/100$ ml na água removida de um poço situado a 27 m do local de infiltração.

A capacidade de retenção dos microrganismos é inversamente proporcional à condutividade hidráulica. As propriedades físicas do solo como textura, estrutura, índices de vazios e outras, afetam a capacidade de retenção. Solos de textura mais fina como siltes e argilas retêm maior quantidade de água que os de textura mais grossa como cascalho, areias grossas a fina. Esse fato se deve a maior área superficial dos primeiros. A CETESB (1999), reporta que o subsolo de cemitérios deve ser constituído por materiais com condutividade hidráulica entre 10^{-3} e 10^{-7} cm/s, coeficientes diferentes a essa faixa só devem ser aceitos, condicionados a estudos geológicos e hidrogeológicos, concomitante com a tecnologia de sepultamento empregada.

A maior retenção ocorre no primeiro centímetro do solo. Com o tempo, alguns microrganismos poderão ficar presos entre os grãos a maiores profundidades. Os mecanismos de retenção, principalmente o de filtração, têm sua maior importância para organismos maiores como as bactérias (MATOS, 2001). Para os vírus que são

bem menores, o mecanismo de adsorção é mais importante, não sendo mais a condutividade hidráulica, mas a capacidade de troca iônica da argila e da matéria orgânica presente no solo, que aumenta a sorção desses microrganismos nos seus colóides, evitando que os mesmos cheguem à zona saturada.

Nos terrenos destinados à implantação de cemitérios, a espessura da zona não saturada é fator determinante para a filtragem dos líquidos resultantes da decomposição de cadáveres (MIOTTO, 1990). A capacidade de retenção do solo é função de um conjunto de condições onde se destacam a litologia, a aeração, a redução de umidade, os nutrientes, etc. Quando estas condições não são favoráveis, há uma diminuição na eficiência da eliminação dos microrganismos patogênicos oriundos dos cadáveres (PACHECO, 1986; MIOTTO, 1990).

Sendo assim, estabelecem-se condições propícias à contaminação das águas, a qual será facilitada em épocas chuvosas, devido à lixiviação dos contaminantes e principalmente pela elevação do nível freático. Solos com baixa condutividade hidráulica são bons retentores de contaminantes, mas faz com que o lençol freático se aproxime das regiões superficiais rapidamente, entrando diretamente em contato com as sepulturas e/ou camadas contaminadas do solo.

Romero (1970) apud Pacheco (1986) demonstrou que o percurso máximo em águas subterrâneas dos contaminantes biológicos em condições ordinárias varia entre 15 a 30 m em zona saturada, podendo ocorrer maiores distâncias em águas com nutrientes; em condições favoráveis, estes podem sobreviver até cinco anos, mas em geral morrem antes de sessenta ou cem dias. Isto ocorre em meios de textura fina. Em meios de textura grosseira e em rochas fraturadas, os percursos do contaminante são maiores e, em áreas carstificadas, estes podem percorrer centenas de metros.

A Figura 3 apresenta um modelo de níveis de vulnerabilidade do meio físico de subsuperfície conforme o local de sepultamento e sua relação com a litologia e o nível freático.

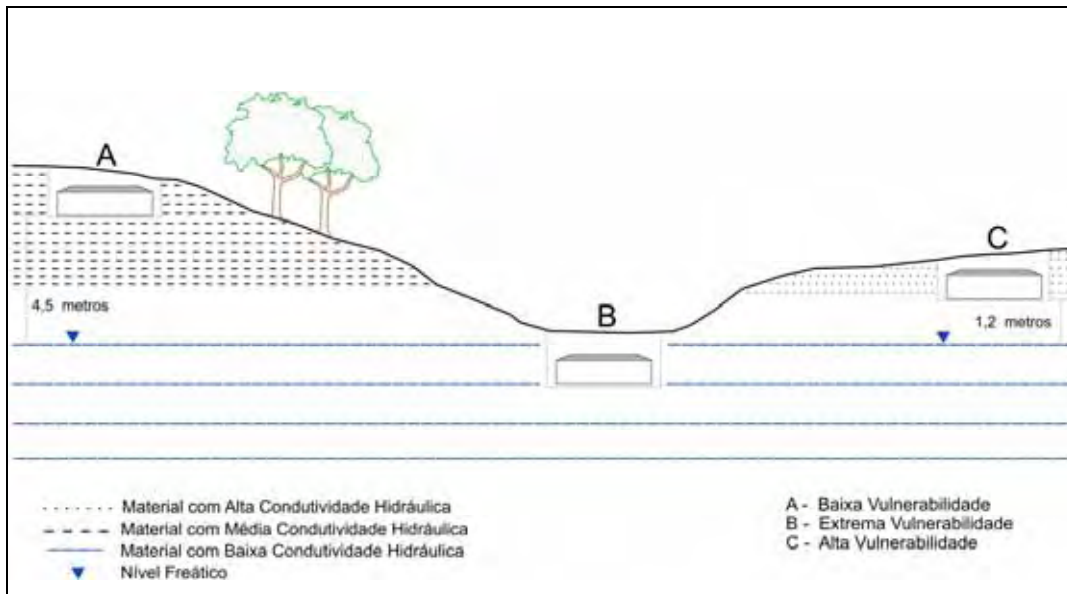


Figura 3 – Modelo de níveis de vulnerabilidade do meio físico de subsuperfície em cemitérios (adaptado de PACHECO, 1986).

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

3.4 RISCO DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS

Conforme Branco (1986), a qualidade das águas é um conceito relativo. Uma determinada água considerada de boa qualidade não é necessariamente pura do ponto de vista químico. A qualidade é função do uso que lhe é desejado ou previsto.

Mesmo para a água potável, toleram-se algumas impurezas como o oxigênio e gás carbônico dissolvidos. Também em pequenas proporções de sais minerais que são imprescindíveis para o melhor aproveitamento fisiológico.

No Brasil, os padrões de potabilidade são definidos pelo Ministério da Saúde. A partir de 25 de março de 2004 passou a vigorar a Portaria do Ministério da Saúde nº 518, que estabelece os procedimentos e responsabilidades relativas ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, definindo água potável como aquela cujos parâmetros microbiológicos, físicos, químicos e radioativos atendam ao padrão de potabilidade e que não oferecem risco à saúde.

O Quadro 2 mostra os principais parâmetros e padrões de potabilidade adotados pela Portaria nº 518 do Ministério da Saúde.

Quadro 2 – Principais parâmetros e padrões de potabilidade da água destinada ao consumo humano.

Padrões	Parâmetro	Unidade	Valor Máximo Permitido (VMP)
I	<i>Escheriachia coli</i> ou Coliformes termotolerantes	org/100 ml	Ausência em 100 ml
	Coliformes Totais ⁽¹⁾	org/100 ml	Ausência em 100 ml
II	Alumínio	mg/L	0,2
	Amônia (como NH ₃)	mg/L	1,5
	Cloreto	mg/L	250
	Cor aparente	µH ⁽²⁾	15
	Dureza	mg/L	500
	Etilbenzeno	mg/L	0,2
	Ferro	mg/L	0,3
	Manganês	mg/L	0,1
	Monoclorobenzeno	mg/L	0,12
	Nitrato ³ (como N)	mg/L	10
	Odor	-	Não objetável ⁽⁴⁾
	Gosto	-	Não objetável ⁽⁴⁾
	pH	-	6,0 – 9,5 ⁽⁵⁾
	Sódio	mg/L	200
	Sólidos dissolvidos totais	mg/L	1.000
	Sulfato	mg/L	250
	Sulfeto de hidrogênio (não ionizáveis)	mg/L	0,05
	Surfactantes	mg/L	0,5
Tolueno	mg/L	0,17	
Turbidez	UT ⁽⁶⁾	5	
Zinco	mg/L	5	
Xileno	mg/L	0,3	

Notas:

I – Padrão microbiológico de potabilidade da água para consumo humano.
 II – Padrão de aceitação para consumo humano.

(1) Nas análises, tolera-se somente a presença de coliformes totais, na ausência de *Escherichia coli* e/ou Coliforme termotolerantes.
 (2) Unidade Hazen (mg – PtCo/L).
 (3) Padrão de potabilidade para substâncias químicas que representam riscos à saúde.
 (4) Critério de referência.
 (5) Valor recomendado.
 (6) Unidade de Turbidez.

Fonte: BRASIL (2004).

3.4.1 Águas superficiais

Nos cemitérios onde os terrenos estão impermeabilizados pelas construções funerárias e pela pavimentação das ruas, esta situação associada à declividade do piso e a um sistema de drenagem obsoleta favorece o escoamento superficial das águas pluviais.

Nos períodos de alta pluviosidade, este escoamento inunda os túmulos mais vulneráveis e, após a lavagem da área do cemitério, estas águas são lançadas na rede pluvial urbana e canalizadas para os corpos de água existentes na região, contaminando-os com contaminantes oriundos do interior de cemitérios. Sendo assim, um bom projeto de drenagem neste tipo de empreendimento é de suma importância do ponto de vista sanitário. Segundo a CETESB (1999), o perímetro e o interior do cemitério deverão ser providos de um sistema de drenagem adequado e eficiente, além de outros dispositivos (terraceamentos, taludamentos, etc.) destinados a captar, encaminhar e dispor de maneira segura o escoamento das águas pluviais e evitar erosões, alagamentos e movimentos de terra.

Na Resolução CONAMA nº 335, no seu artigo 5º, inciso IV, estabelece que a área de sepultamento deverá manter um recuo mínimo de 5 m em relação ao perímetro do cemitério, recuo que deverá ser ampliado, caso necessário, em função das características hidrogeológicas desfavoráveis da área, como baixa distância do nível do aquífero freático, baixa condutividade hidráulica, etc. A CETESB (1999), reporta que o cemitério deverá ser contornado por uma faixa com largura mínima de 5 m, destituída de qualquer tipo de pavimentação ou recobertura de alvenaria, destinada à implantação de uma cortina constituída por árvores e arbustos adequados, preferencialmente de espécies nativas. Esses procedimentos servem como barreiras naturais do escoamento superficial nesse tipo de empreendimento, diminuindo assim a velocidade de escoamento e contribuindo para infiltração; mas deve-se ressaltar que a mesma norma aconselha que em zona de sepultamento, devem ser plantadas árvores de raízes pivotantes, a fim de evitar invasões de jazigos, destruição do piso e túmulos ou danos às redes de água, de esgoto e drenagem.

3.4.2 Águas Subterrâneas

Em geral, os reservatórios de água subterrânea são bem mais resistentes à introdução de substâncias que possam alterar as características originais de suas águas, que os reservatórios superficiais, pois a camada de solo subjacente atua como filtro físico e químico. A vulnerabilidade de contaminação das águas subterrâneas é função da eficiência do filtro físico e químico (solo), atividades

antrópicas passíveis de contaminação, medidas de controle ambiental, etc., sendo essas, variáveis para realização de gerenciamento do meio físico urbano como plano diretor, zoneamento ambiental urbano, etc. Todavia, o mau ou a inexistência do gerenciamento do meio físico urbano, pode comprometer esse recurso.

A implantação de cemitérios em lugares inapropriados, isto é, que apresentem condições geológicas - materiais geológicos que propiciem fenômenos conservativos dos cadáveres ou materiais que propiciem menor retenção do contaminante em sua camada superficial, e hidrogeológicas – baixa profundidade do nível do lençol freático, podem levar a uma alteração nas características físico-química e bacteriológica destas águas, contaminando-as.

A contaminação dos aquíferos por contaminantes biológicos que é o caso do necrochorume dependem de um número complexo de fatores, que diz respeito à vulnerabilidade natural do meio, como medida preventiva. Pacheco (1986) sugere que cemitérios sejam construídos em área com nível de lençol freático mínima de 3,5 m para sepultamentos em cova simples, isto é, com 1,55 m de profundidade de cova e 4,5 m para sepultamentos em túmulos (tipo catacumba) com 3,8 m de profundidade. Aqui, as construções deverão ter o fundo em concreto, tendo assim, uma espessura filtrante de 1,45 e de 0,7 m, respectivamente.

Pacheco (1986) salienta que túmulos em ruínas podem constituir um foco de contaminação das águas subterrâneas, tendo como principais causas: o abatimento de solos, que provoca o deslocamento das construções funerárias e aparecimento de rachaduras - que por sua vez podem ser inundados em épocas de chuvas; a presença de árvores de grande porte no interior de cemitérios, que com suas raízes não pivotantes são responsáveis pela destruição dos túmulos; e a negligência dos proprietários. O autor ainda afirma que estes problemas, mais a baixa profundidade do nível freático podem ser evitados mediante correta planificação quanto à construção e utilização das necrópoles.

Tanto a resolução CONAMA nº 335 quanto a CETESB (1999) reporta que na caracterização hidrogeológica da área para implantação de um cemitério deve constar a profundidade dos níveis do aquífero freático medido no fim da estação de cheia, constando a 1,5 m da área de fundo das sepulturas. Não ocorrendo às condições naturais descrita anteriormente, a resolução CONAMA nº 335 prevê no seu Artigo 5º, inciso II, que os sepultamentos deverão ser feitos acima do nível

natural do terreno. A CETESB (1999), prevê o rebaixamento artificial do nível freático através da instalação de um sistema de drenagem subterrânea; prevê ainda que se o nível freático for inferior a 10 m de profundidade medido no fim da estação de cheia, será necessário à confecção do mapa potenciométrico com indicação do sentido de fluxo das águas subterrâneas e indicação dos atributos existentes num raio entorno de 30 m, como fontes, surgências, córregos, drenos, poços ou cacimbas de abastecimento de água.

Schrops (1972) apud Pacheco (1986) recomenda para proteção sanitária, a fim de evitar contaminação das águas subterrâneas, que cemitérios localizados em áreas de solos de textura média o nível freático deve estar a uma profundidade de 2,5 m, levando em conta que os túmulos têm, em média, 1,8 m de profundidade, sendo assim, a seção filtrante será de apenas 0,7 m, julgado pelo autor suficiente.

A Figura 4 apresenta um modelo de quatro situações de sepultamento e seus respectivos riscos à contaminação da água subterrânea, 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 nos jazigos.

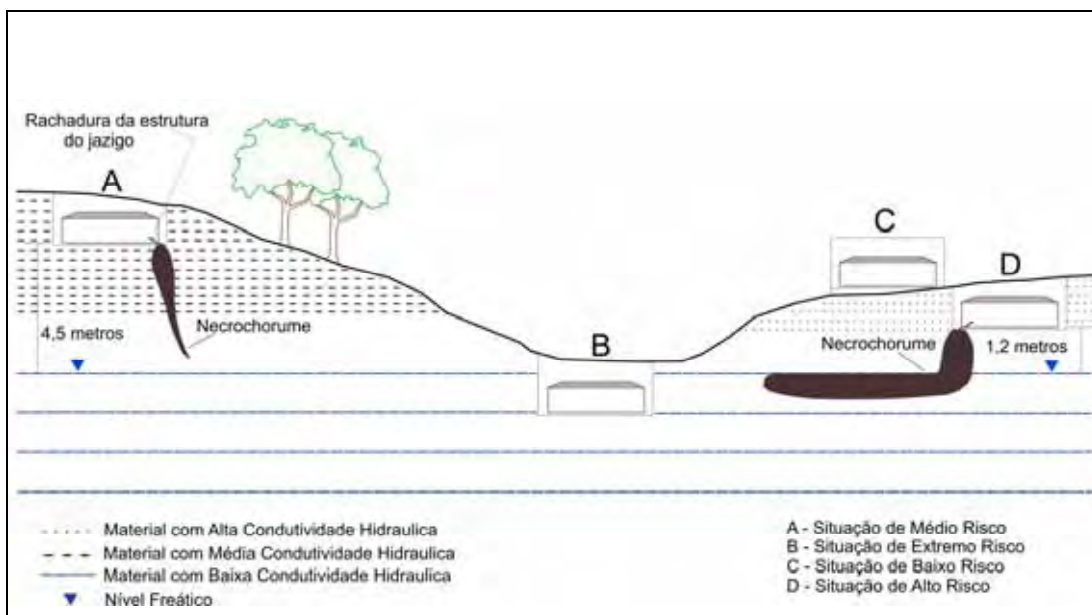


Figura 4 – Modelo de risco à contaminação da água subterrânea (adaptado de PACHECO, 1986).

Na situação A ocorre uma lenta condução do contaminante devido à média condutividade hidráulica do material geológico, alta adsorção/retenção devido às características geossanitárias 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 da água subterrânea. Já situação B o jazigo esta locado sob o nível freático podendo ser inundado, pois de maneira geral os jazigos não são impermeáveis, considera-se como situação de extremo risco. Na situação D há um favorecimento na condução do contaminante a profundidades maiores, devido sua alta condutividade hidráulica aliada a baixa profundidade do nível freático, considera-se como situação de alto risco; para resolver esse tipo de situação objetivando a diminuição do risco a contaminação da água subterrânea, a resolução CONAMA nº 335 exige o sepultamento acima do nível natural do terreno, conforme a situação C.

3.5 MÉTODOS GEOELÉTRICOS APLICADOS NA INVESTIGAÇÃO DE CONTAMINAÇÃO EM CEMITÉRIOS

Dentre os principais métodos geofísicos de prospecção (Figura 5), para o estudo das estruturas geológicas da parte superior da crosta terrestre, destacam-se os métodos geoeletricos, os quais se fundamentam no uso de campos elétricos e eletromagnéticos no subsolo (BRAGA, 1999). Os métodos geoeletricos são métodos indiretos de rastreamento em subsuperfície, não invasivos e, portanto, não destrutivos, empregados em diversas áreas, tais como na hidrogeologia – na determinação da profundidade da zona saturada, identificação do sentido do fluxo da água; em meio ambiente - na investigação de contaminantes em subsuperfície, etc.

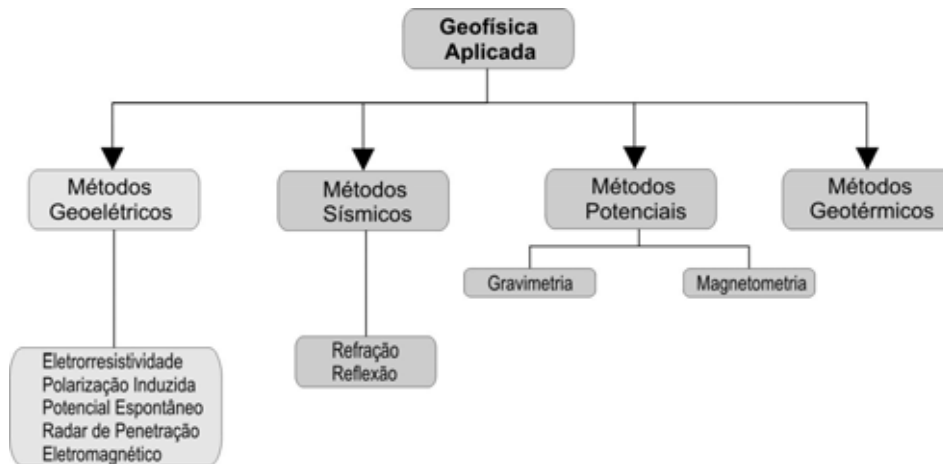


Figura 5 – Métodos geofísicos de prospecção.

Essa metodologia permite avaliar as variações litológicas ou qualquer anomalia natural ou não que alterem as propriedades físicas, como a resistividade ou condutividade elétrica, cargabilidade, constante e permissividade dielétrica, dos materiais em subsuperfície, como apresenta o Quadro 3.

Quadro 3 - Métodos geoeletricos com seus respectivos parâmetros físicos.

Métodos Geoeletricos	Parâmetros Físicos Envolvidos	Unidade de Medida
Eletrorresistividade	Resistividade elétrica	ohm.metro
Polarização Induzida	Varição de voltagem em função do tempo ou freqüência (cargabilidade)	mV/V
Potencial Espontâneo	Potencial natural	mV
Eletromagnético	Condutividade elétrica	mS/m
Radar de Penetração	Constante dielétrica/permissividade	cm/ns

A CETESB (2001) apresenta como principal objetivo do emprego de métodos geofísicos nos diagnósticos ambientais a possibilidade de identificação da presença da contaminação subterrânea, além da definição das feições geológicas e hidrogeológicas dos locais investigados.

Mendes et al. (1989) citam o emprego de métodos geoeletricos para obtenção de informações sobre os aspectos geológicos do local e para a determinação dos pontos de implantação de poços de monitoramento na avaliação de contaminação nos cemitérios de Vila Formosa e de Vila Nova Cachoeirinha, ambos no município

de São Paulo. Para o primeiro foi utilizado o método da eletrorresistividade, por meio da sondagem elétrica, e para o segundo o método eletromagnético indutivo, aplicando a técnica do caminhamento eletromagnético.

Pacheco et al. (1991) em estudos comparativos nos cemitérios de Vila Nova Cachoeirinha, de Vila Formosa e de Areia Branca na cidade de Santos utilizaram o método da eletrorresistividade, para determinação do modelo geométrico da área, nível freático, sentido do fluxo subterrâneo, com isso determinando a localização dos poços de monitoramento e piezômetros, e também o método eletromagnético no mapeamento das anomalias condutivas.

Migliorini (1994) empregou os métodos da eletrorresistividade e eletromagnético, para investigar anomalias de condutividade características de mudanças localizadas, sendo que os mapas de isocondutividade que puderam ser elaborados a partir dos dados de caminhamento eletromagnético evidenciaram áreas anômalas de condutividade. Essas áreas serviram para orientar a fase de investigação confirmatória com a instalação dos poços de monitoramento nesses locais.

Em investigação na encosta do cemitério Vila Nova Cachoeirinha, Pacheco (1996) utilizou métodos geométricos para instalação de nove poços de monitoramento.

Carvalho Jr. e Costa e Silva (1997), empregaram os métodos da eletrorresistividade e potencial espontâneo na determinação das direções de fluxos d'água no subsolo, bem como topo e base dos aquíferos no cemitério São José, em Belém/PA.

Matos (2001) aplicou os métodos da eletrorresistividade e eletromagnético para obter informações sobre a litologia, topo da camada saturada, anomalias condutivas, como orientação na instalação de poços monitoramento para investigar a ocorrência e transporte de microorganismos no aquífero freático do cemitério Vila Nova Cachoeirinha.

São raros os trabalhos internacionais na investigação da contaminação ambiental por cemitérios com aplicação de métodos geofísicos, predominando-se assim métodos diretos de hidrogeoquímica. Os métodos geofísicos, principalmente os geométricos, eletromagnéticos e os potenciais, são muito utilizados internacionalmente na arqueologia de cemitérios.

4 ÁREA DE ESTUDO

4.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

O cemitério de Vila Rezende está localizado ao norte do município de Piracicaba ($47^{\circ}39'07''$ W; $22^{\circ}41'37''$ S) na região centro-leste do Estado de São Paulo, como apresentado na Figura 6. O cemitério localiza-se no bairro Jardim Primavera na macro região de Vila Rezende cerca de 4 km do centro da cidade, na Avenida Marechal Costa e Silva, ao lado do km 32 da rodovia estadual Fausto Santomauro (SP 127), que interliga os municípios de Rio Claro e Piracicaba.

Localizado na saída norte do município, em uma região de intensa urbanização e industrialização, o entorno do cemitério é constituído por residências e condomínios prediais de pequeno porte; Escola SENAI; parque de diversões municipal – Paraíso da Criança; Zoológico Municipal; Subestação da CPFL; Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA Regional); rodovia SP-127; Escola de Engenharia de Piracicaba (EEP/FUMEP); Indústria Siderúrgica de grande porte (Figura 7).



Figura 6 - Localização do cemitério de Vila Rezende.



Figura 7 - Aerofoto do cemitério de Vila Rezende e seu entorno.
Fonte: BASE (2000).

4.2 ASPECTOS SOCIAIS DO MUNICÍPIO E HISTÓRICO DA ÁREA DE ESTUDO

Segundo dados de 2005 do Instituto de Pesquisa e Planejamento de Piracicaba – IPPLAP, o município de Piracicaba, conta com uma população estimada em 330.000 habitantes, com um crescimento anual de 1,65%, sendo que 95% desta população encontra-se na área urbana; e, uma taxa de natalidade de 14,88 por mil habitantes e taxa de mortalidade de 6,44 por mil habitantes.

Em operação desde 15 de setembro de 1976, o cemitério de Vila Rezende é um dos três cemitérios públicos administrados pela Secretária de Defesa do Meio Ambiente de Piracicaba - SEDEMA.

O cemitério possui uma área de 75.324,48 m² incluindo administração, recepção, velório, necrotério, depósitos de materiais e ferramentas, vestiários, instalações sanitárias para os empregados e para o público.

Como mostra a Figura 8 o cemitério está dividido em 11 quadras.

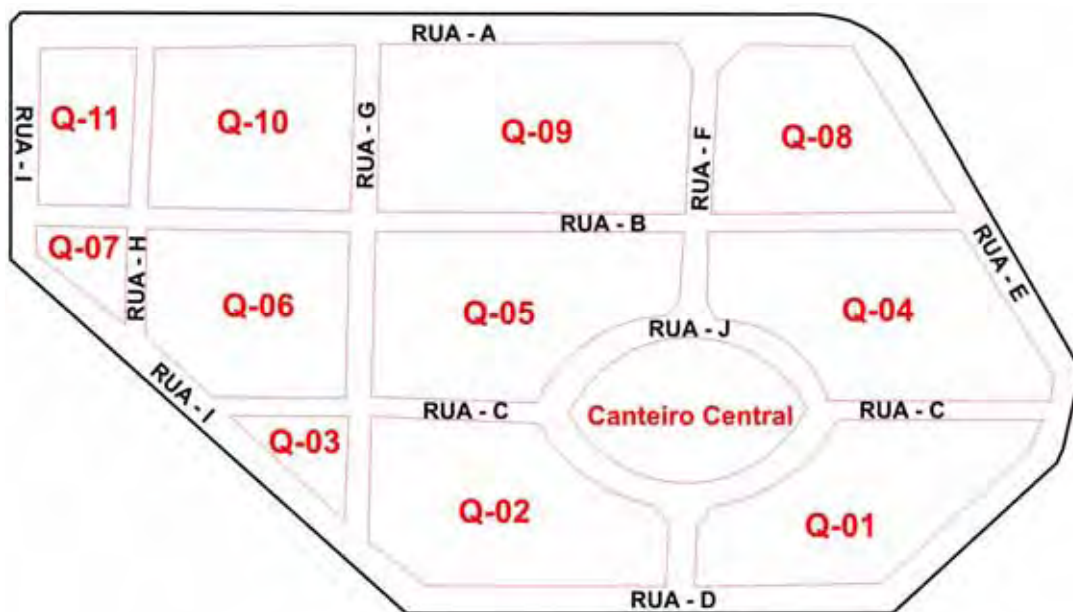


Figura 8 – Localização das quadras no cemitério.

Até 1998 aplicou-se nas quadras Q - 03, 05, 06, 07, 09, 10 e 11 o processo de sepultamento por inumação, em sepulturas simples, e duplas que contêm duas vagas em cada sepultura. Este processo de sepultamento era utilizado em enterros de pessoas que não possuíam terrenos. Após esse período, nas mesmas quadras, o sepultamento começou a ser realizado em construção tumulares subterrâneas em alvenaria, dotadas de compartimentos como jazigos e gavetas.

Há presença de mausoléu no cemitério, somente em construção tumular em terrenos apossados por compra.

A ocupação do cemitério iniciou-se na quadra Q - 01 conjuntamente com a quadra Q - 11, predominando na primeira o sepultamento de pessoas que possuíam

terrenos. A ocupação ocorreu ao longo de 30 anos sucessivamente nas quadras Q – 07, 06, 10, 09, 05, 02, 03, 04 e 08. Nas quadras Q – 10, 09 e 05, até o ano de 1986, predominaram sepultamentos de crianças de famílias que não possuíam terrenos. Em 2000, iniciou-se a ocupação da quadra Q-04, e em 2004, iniciou-se a ocupação da quadra Q-08, ambas as quadras estão em processo de ocupação e venda de terrenos simples e duplos.

Em 1987, foi realizado pela Escola de Engenharia de Piracicaba – EEP e supervisionado pela Secretaria dos Serviços Públicos de Piracicaba, hoje Secretária de Obras, um projeto de drenagem superficial no cemitério. Este projeto visava diminuir alguns problemas hidrogeoambientais como escoamento superficial, e também levantar informações do nível do aquífero freático, através da implantação de poços piezométricos dispersos em todas as quadras. As informações obtidas sobre o nível do aquífero freático no cemitério demonstraram que o mesmo era extremamente raso, como era o caso da quadra Q-09 com 0,8 m de profundidade e das quadras Q - 01, 02, 03, 04, 05, e 06 com profundidade do nível freático de 2 m. Já na quadra Q-08 havia afloramento do aquífero freático na época chuvosa, por isso que essa quadra foi a última a iniciar a ocupação. Foi concluído neste trabalho que havia necessidade da impermeabilização das superfícies de sepultamento a fim de que a realimentação do aquífero fosse diminuída.

Devido às condições hidrogeoambientais desfavoráveis ao sepultamento subterrâneo, principalmente nas quadras Q – 01 e 02 onde os jazigos ficavam imersos em água na época de alta pluviosidade, a partir de 1999, foi iniciado no cemitério o processo de sepultamento acima do nível natural do terreno. Logo depois, a resolução CONAMA nº 335, no seu Artigo 5º, inciso I e II, veio a exigir que o processo de sepultamento deva ser acima do nível natural do terreno se, a base da sepultura não manter uma distância mínima de 1,5 m do nível máximo do aquífero freático em época de alta pluviosidade.

Até 24 de setembro de 2007, foram sepultadas 16.540 pessoas no local, 13.289 adultos e 3.251 crianças (entre 0 e 6 anos), com média de aproximadamente 2 sepultamentos/dia, isto é 730 sepultamentos/ano.

As sepulturas do cemitério de Vila Rezende que foram ocupadas por pessoas que não possuíam terrenos, não são perpétuas, havendo reutilização das sepulturas. Já no caso das sepulturas que estão em terrenos apossados por compra

são perpétuas. Após um período mínimo de três anos para adultos e dois para crianças menores de sete anos, é feita a exumação, colocando os ossos em sacos pretos e dispendo no canto da mesma gaveta. Caso o corpo não esteja totalmente decomposto, caracterizando um estado de conservação (saponificação ou mumificação), o mesmo permanece no local por mais algum tempo até o processo de decomposição ser efetivado.

Conforme a administração do cemitério, até 1999 quando o processo de sepultamento era subterrâneo, ocorria fenômeno conservativo de saponificação em cadáveres sepultados a SW da quadra Q - 01, devido ao nível do aquífero freático estar próximo a base da sepultura e a má conservação das construções tumulares apresentando rachaduras em sua estrutura, acarretando a inundação dos jazigos.

4.3 GEOLOGIA

A cidade de Piracicaba localiza-se no flanco nordeste da bacia sedimentar do Paraná. Afloram na região várias formações de idade paleozóica e mesozóica, proporcionando uma grande variedade litológica e o aparecimento de inúmeras feições estruturais. As unidades litosestratigráficas regional e local são aqui descritas com base em IPT (1981a).

A bacia sedimentar do Paraná é representada por rochas sedimentares e vulcânicas das eras Paleozóica (Formações Itararé, Tatuí, Irati e Corumbataí), Mesozóica (Formações Pirambóia, Botucatu, Intrusivas Básicas e Itaqueri) e Cenozóica (Formação Rio Claro e Depósitos Recentes). O Quadro 4 mostra as principais características litológicas destas unidades e sua ocorrência no local de estudo.

Na zona norte do município de Piracicaba predominam as Formações Corumbataí, Irati e Intrusivas Básicas. O cemitério está assentado sobre a Formação Corumbataí, conforme apresentado na Figura 9.

Quadro 4 - Síntese da geologia regional e unidades litoestratigráficas da Bacia Sedimentar do Paraná.

Idade ERA	Unidade		Características Litológicas	Ocorrência Local
	Grupo	Formação		
Cenozóico	(1)	Depósitos Cenozóicos	(1) Areias e argilas associadas a várzeas; materiais arenosos e lateríticos de cobertura.	(1) Aluviões do Rio Corumbataí e Córrego do Guamium.
	(2)	Rio Claro	(2) Arenitos pouco consolidados, com lentes de argilas e níveis conglomeráticos na base.	(2) Região de Rio Claro (centro urbano)
Mesozóica	Bauru	Itaqueri	Arenito silificado ou com crostas ferruginosas, alternados com lamitos e conglomerados.	Não ocorre na proximidade da área de estudo.
	São Bento	Serra Geral (Intrusivas Básicas)	Derrames de basaltos com lentes de arenitos interderrames na base. Intrusões de diques e soleiras de diabásio estão associados.	Afloram no vale do Rio Corumbataí. Soleira, encontrada em poços tubulares sob a cidade (base da Fm. Corumbataí/junto a Fm. Irati).
		Botucatu	Arenitos Vermelhos, bem selecionados, com grãos bem arredondados e bem esféricos, com estratificações cruzadas de grande porte.	Não ocorrem nas proximidades da área de estudo.
		Pirambóia	Arenitos, níveis de lamitos, com estratificação cruzadas de médio a grande porte.	
Paleozóico	Passa Dois	Corumbataí	Argilitos e siltitos arroxeados e marrom avermelhados, com intercalações de arenitos, leitos carbonáticos e coquinas.	Cemitério de Vila Rezende. Ocorrem ao longo do vale do Rio Corumbataí.
		Irati	Folhelhos pirobetuminosos, calcários dolomíticos e siltitos.	Afloram no Distrito de Assistência no sul do município de Rio Claro.
	Tubarão	Tatuí (Palermo/Rio Bonito)	Siltitos e siltitos arenosos. Podem ocorrer arenitos, conglomerados e calcários.	Não ocorrem nas proximidades da área de estudo
		Itararé/Aquidauana	Arenitos, siltitos, varvitos, diamictitos.	
Pré – Cambriano – Granitos, gnaisses, xistos, quartzitos.				

Fonte: modificado de Zaine (2000).



Figura 9 - Mapa geológico da zona norte do município de Piracicaba (adaptado de IPT, 1974).

A Figura 10 apresenta a descrição litoestratigráfica de um poço tubular construído pela SONDAGUA Poços Artesianos na fazenda Areão da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ (7487,87 km N; 228697 km E),

distando cerca de 1,3 km a NE do cemitério ao lado da SP – 127 mostra que até 6 m de profundidade encontra-se solo de alteração da rocha siltosa, e de 6 a 15 m de profundidade encontra-se siltito argiloso, ambos materiais geológico da Formação Corumbataí, e a partir de 15 m o diabásio cinza-escuro das Intrusivas Básica, correlata a Formação Serra Geral.



Figura 10 – Descrição litoestratigráfica do poço da Fazenda Areão.
Fonte: SONDAGUA Poços Artesianos.

A Formação Corumbataí, unidade superior do Grupo Passa Dois, no estado de São Paulo, quando não interrompida por “sills” de diabásio ou falhas, aflora continuamente do divisor de águas dos rios Tietê e Piracicaba para norte, até os limites com Minas Gerais.

Esta formação apresenta geralmente espessura inferior a 150 m, se adelgando para norte, até se anular próximo aos limites com Minas Gerais, recobrimdo em discordância erosiva, os sedimentos do Grupo Tubarão (IPT, 1973).

A Formação Corumbataí encontra-se em concordância com a Formação Irati até a zona norte da Depressão Periférica, quando esta última desaparece, passando a repousar em discordância erosiva sobre os sedimentos do Grupo Tubarão.

Em sua parte inferior, os sedimentos são constituídos por siltitos, argilitos e folhelhos cinzentos a roxo acinzentado nos afloramentos (bacia hidrográfica do rio Corumbataí), podendo possuir cimentação calcária. Segue-se uma sucessão de camadas siltosas, ritmicamente alternadas com lâminas ou delgadas camadas de arenito de granulometria fina e argilitos até o topo da formação. Nas partes média e superior, encontram-se também lentes e bancos calcários com espessura máxima de 0,5 m (ANDRADE e SOARES, 1971 apud COTTAS, 1984).

Como estruturas sedimentares, observam-se estratificação plano-paralela, cruzada de baixo ângulo, estruturas flaser, estratificação rítmica, marcas de corrente, fraturas de ressecamento e brechas intraformacionais (PEJON, 1992).

A condutividade hidráulica da Formação Corumbataí possui valor médio de $6,5 \times 10^{-7}$ cm/s (COTTAS, 1984).

Na região em estudo ocorrem também rochas Intrusivas Básicas, que são relacionadas com os derrames basálticos da Formação Serra Geral. São rochas faneríticas, de granulação média (1 a 5 mm), com textura ofítica, de cor preta esverdeada (IPT, 1973). Segundo Almeida (1953) apud IPT (1973) uma sondagem no bairro de Vila Rezende, na cidade de Piracicaba, atravessou um sill de diabásio com espessura de 130 m ao nível da Formação Irati. O diabásio aparece margeando o rio Corumbataí, o córrego Guamium e o rio Piracicaba .

4.4 GEOMORFOLOGIA

Segundo a divisão geomorfológica do Estado de São Paulo (IPT, 1981b), a quase totalidade da área de Piracicaba localiza-se na Província denominada de Depressão Periférica, e segundo Almeida (1964) na zona do Médio Tietê.

O município de Piracicaba apresenta uma depressão maior na parte central de seu território. A amplitude da altitude é de 360 m com as regiões mais baixas com cerca de 420 m e as mais elevadas com 780 m. A altitude média é de 528 m. A declividade média foi calculada em 7,8% com uma mediana de 6,3%; indicando a assimetria negativa da distribuição de freqüências. Ou seja, os valores menores predominam sobre os maiores. A porção leste do município e a região sudoeste apresentam os menores valores de declividade. A porção central e norte apresentam situação intermediária e a região oeste apresenta os valores mais elevados, predominando ali, as classes acima de 12% (BARRETO et al., 2006).

Segundo Pejon (1992) o município de Piracicaba possui um sistema de drenagem de média a baixa, apresentando padrão dendrítico a subdendrítico, com tendência a ravinamentos em vales fechados de relevo de colinas médias.

O cemitério de Vila Rezende encontra-se no divisor de águas dos córregos Guamium e Capim Fino, em terrenos onde predominam relevos de colinas amplas e colinas médias com topos convexos, com altitudes e declividades acima da média do município. No local, as altitudes estão entre 535 e 546 m e as declividades variam entre 6 a 10% (Figura 11).

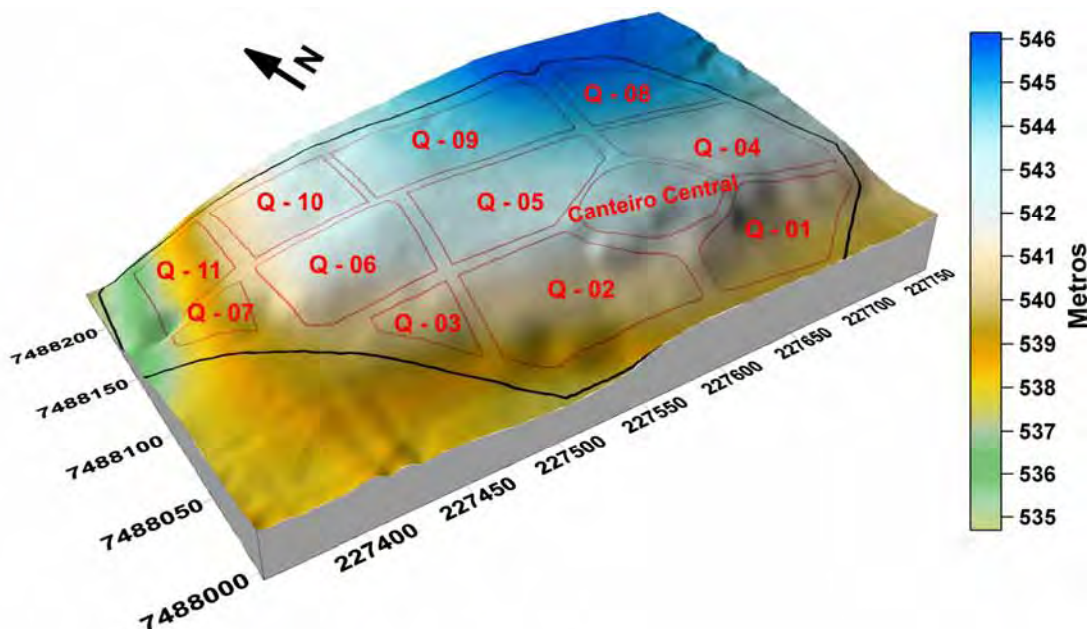


Figura 11 - Altimetria do cemitério de Vila Rezende.

4.5 SOLOS

Há uma grande diversidade de solos no município de Piracicaba, constituindo 51 unidades diferentes, ocorrendo um predomínio de solos podzólicos segundo a classificação de Camargo (1987), correspondendo a aproximadamente 50% da área, provenientes principalmente das Formações Corumbataí e Pirambóia (PEJON, 1992).

Na porção norte do município que drena para o Rio Corumbataí, segundo Barreto et al. (2006) e Pejon (1992) é ocupada por associações de argissolos preenchidas com manchas menores de uma grande diversidade de solos (Latosolos, Neossolos e Nitossolos) (Figura 12).

O cemitério de Vila Rezende encontra-se sobre dois tipos de solos conforme ilustrado na Foto 1. Segundo a nova classificação de solos EMBRAPA (1999), as quadras Q - 01, 04 e 08 encontram-se em Nitossolo Vermelho eutrófico - NVe, e o restante das quadras encontram-se em Argissolo Amarelo distrófico - PAd. Devido à relação solo/relevo, os limites entre os solos estão sobre o divisor de águas ao leste do canteiro central do cemitério.

O Nitossolo Vermelho eutrófico – NVe se origina dos argilitos e siltitos avermelhados da Formação Corumbataí. Segundo Prado (2003), o horizonte B é nítico nos 0,5 m, isto é apresenta acréscimo de argila do horizonte A para o B, porém insuficiente para caracterizar-se como horizonte B textural (Bt). Apresenta V ≥ a 50% na maior parte dos primeiros 1 m incluindo os horizontes A e B, CTC < 27 cmol_c/kg de argila, contém argilominerais do tipo hematita e gibsita além da caulinita, média a baixa flocculação, balanço de cargas elétricas próximo à zero, sua estrutura prismática favorece o armazenamento de água e a baixa condutividade hidráulica. Como características geotécnicas, o NVe apresenta granulometria fina, alta plasticidade e compactibilidade, cerosidade, densidade de 1,35 kg/m³ (EMBRAPA, 1999). No projeto de drenagem superficial do Cemitério de Vila Rezende realizado em 1987 pela Escola de Engenharia de Piracicaba – EEP, o solo das quadras Q - 01, 04 e 08 foi classificado geotecnicamente como solo argilo silto arenoso, com 55% de argila, 25% de silte e 20% de areia.

O Argissolo Amarelo distrófico – PAd se origina dos argilitos, siltitos e intercalações de arenitos de granulação fina da Formação Corumbataí. Segundo

Prado (2003), esse tipo de solo apresenta uma espessura do horizonte A e B de 1 m, com alta textura de argila no horizonte B, caracterizando-se como horizonte Bt. Apresenta $V <$ de 50% na maior parte dos primeiros 1 m incluindo os horizontes A e B, $CTC <$ 27 $cmol_c/kg$ de argila, acentuado nível de Al^{+3} , baixo grau de floculação, a argila podendo ser ativa ou inativa, dependendo dos argilominerais predominantes, estruturas em forma de blocos ou prismática, média disponibilidade de água, saturam-se com facilidade, baixa condutividade hidráulica.

Como características geotécnicas, o PAd apresenta granulometria fina, alta plasticidade, cerosidade, baixa compressibilidade, expansibilidade nula a moderada, fácil à moderada escavabilidade, moderada a alta erodibilidade, moderada resistência ao desmoronamento e compactibilidade, densidade de $1,35 kg/m^3$ (EMBRAPA, 1999). Em 1987, a EEP classificou os solos das quadras Q - 02, 03, 05, 06, 07, 09, 10 e 11 como solo argilo areno siltoso, com 50% de argila, 20% de silte e 30% de areia.

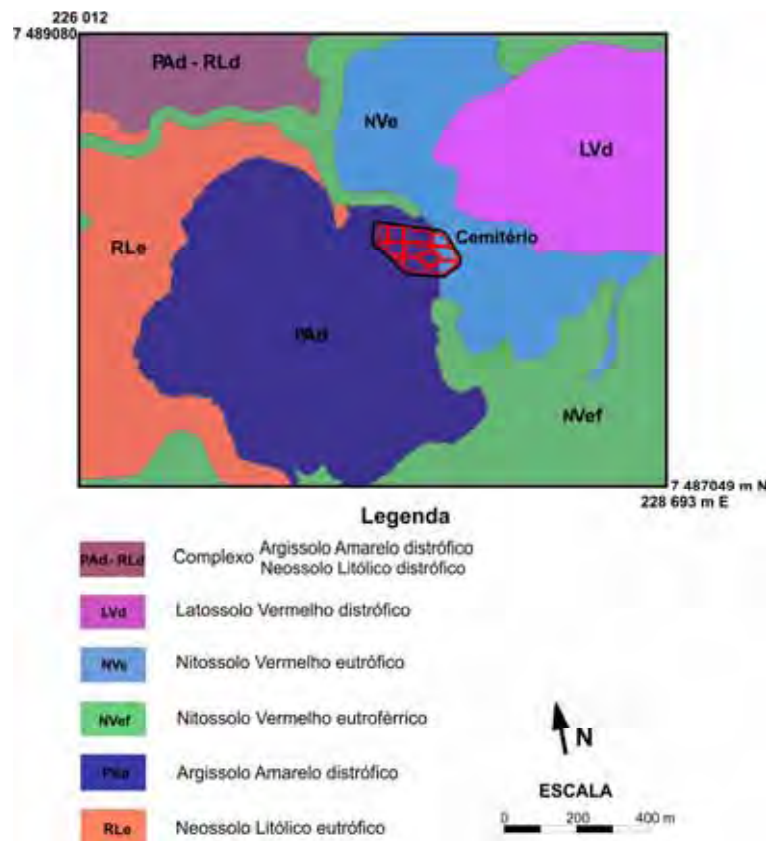


Figura 12 - Mapa de solos da zona norte do município de Piracicaba (adaptado de VIDAL TORRADO, 2006).

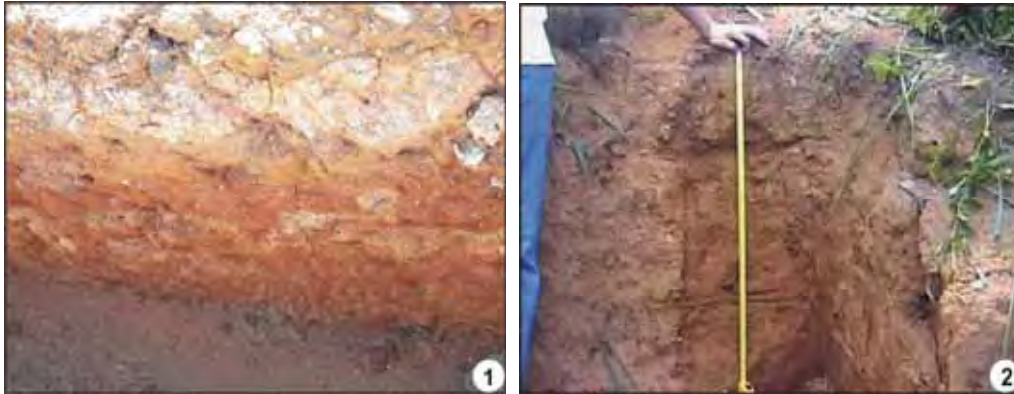


Foto 1 - Tipos de solos presentes no cemitério: 1 – Nitossolo Vermelho eutrófico - NVe; 2 – Argissolo Amarelo distrófico - PAd.

4.6 ASPECTOS CLIMÁTICOS

De acordo com a classificação de KÖPPEN, o clima do município de Piracicaba é do tipo “Cwa”, sendo \underline{C} a média do mês mais frio (3° a 18°C); \underline{w} corresponde à precipitação total média anual com inverno seco (junho/julho/agosto), e \underline{a} ao mês mais quente com temperatura superior a 22°C , com característica mesotérmico, isto é, com invernos secos e verões quentes.

O ano mais seco no município de Piracicaba foi o de 1921, com 812 mm de chuva, e o mais chuvoso o de 1976, com 1960 mm de chuva.

Na Figura 13, observam-se os dados de pluviometria e temperatura média mensal entre os anos 1976 e 2006, coletados na estação meteorológica da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP, situada a 4 km do cemitério de Vila Rezende.

A distribuição anual de chuvas é caracterizada por um período seco, entre abril e setembro, com 30% do volume médio anual de precipitação; e, um período chuvoso, entre outubro e março, com 70% das precipitações anuais com média de 1260 mm. As temperaturas médias anuais situam-se entre 18 e 24°C .

Os ventos dominantes são oriundos do sudeste e sudoeste, com velocidade média de $2,2$ m/s. A umidade relativa do ar média é de 74% e insolação média de 201,5 horas/ano.

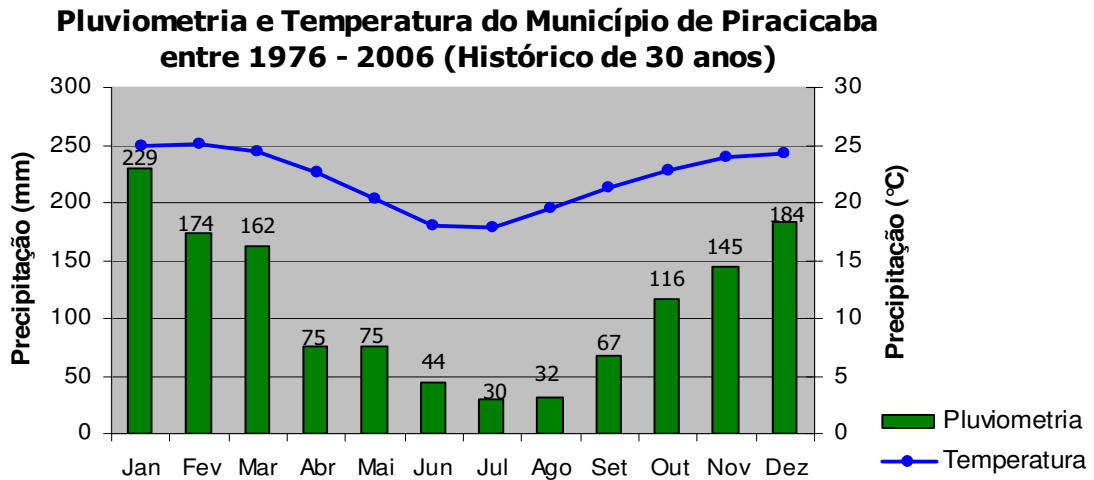


Figura 13 – Dados da média mensal de pluviometria e temperatura em 30 anos no município de Piracicaba.

4.7 ÁGUAS

4.7.1 Águas Superficiais

O principal rio que corta o município é o Piracicaba tendo como seu principal afluente o Rio Corumbataí, ambos com fluxo a oeste e, constituintes da Bacia do Rio Tiête.

A Figura 14 apresenta a hidrografia no entorno do cemitério de Vila Rezende. O cemitério está situado a 300 m da margem esquerda do córrego Guamium, afluente do Rio Piracicaba, à margem direita. A bacia hidrográfica do córrego Guamium tem aproximadamente 70,5 km², sua drenagem – e de seus pequenos tributários – tem baixa influência urbana, mas alta influência agrícola, principalmente, da irrigação, pois 60% da bacia encontra-se fora da área urbanizada, isto é, em área rural.

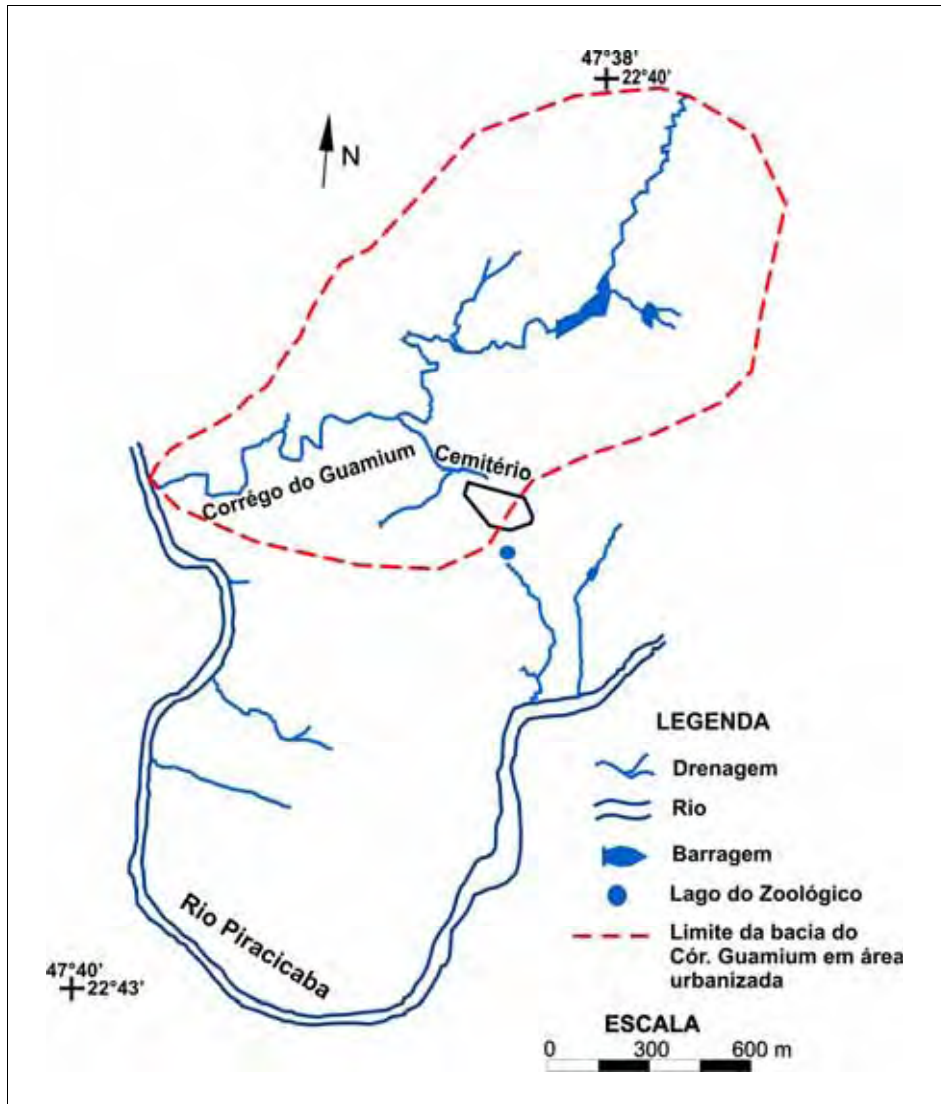


Figura 14 - Hidrografia no entorno do cemitério de Vila Rezende.

4.7.2 Águas Subterrâneas

As melhores fontes de água subterrânea são representadas pelos arenitos da Formação Pirambóia, que ocorrem em grande extensão no município de Piracicaba. São ainda explorados poços nos diabásios e nas rochas do Subgrupo Itararé, mas, em geral, com baixas vazões. As litologias do Grupo Passa Dois apresentam vazões muito pequenas e água de qualidade ruim, não sendo normalmente utilizadas (PEJON, 1992).

As zonas aquíferas existentes nas rochas do Grupo Passa Dois, representado pelas formações Irati e Corumbataí, correspondem localmente a unidades calcárias, a bancos de arenitos, em geral carbonáticos, e a zonas fraturadas junto a lineamentos estruturais (DAEE, 1981).

Os sedimentos da Formação Corumbataí possuem elevada porosidade primária, porém baixa condutividade hidráulica, regionalmente comportando-se como um aquítarde com vazão máxima de 18 m³/h (LEO, 2005). Foram encontrados valores de capacidade específica que variaram de 0,05 a 1,25 m³/h/m e valores de transmissividade abaixo de 10 m²/dia, nestes sedimentos (DAEE, 1981).

Conforme as informações de profundidade do nível freático em época de alta precipitação pluviométrica obtidas no projeto de drenagem superficial realizado no cemitério em 1987, há possivelmente na área do cemitério um aquífero suspenso. Em quadras de maior altitude como Q – 08 e 09 apresentaram profundidades do nível freático inferiores de 0,8 e 0,2 m respectivamente, mas quadras de menor altitude como Q – 01, 02, 03 apresentaram profundidades do nível freático em torno de 2 m.

5 METODOLOGIA

5.1 ELETORRESISTIVIDADE – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O método geofísico da eletrorresistividade é usado para determinar o parâmetro físico da resistividade elétrica real ou aparente de materiais em subsuperfície como os solos, as rochas, águas subterrâneas, etc. O princípio físico baseia-se no fato de que a distribuição em subsuperfície do potencial elétrico gerado no terreno é função das resistividades elétricas dos diferentes materiais e/ou camadas que compõem o meio investigado (WARD, 1990).

Esse método emprega uma corrente elétrica artificial contínua ou alternada de baixa frequência (inferior a 10 Hz) no terreno por meio de dois eletrodos localizados na superfície, com o objetivo de medir o potencial gerado entre dois eletrodos nas proximidades do fluxo de corrente, conforme mostra a Figura 15.

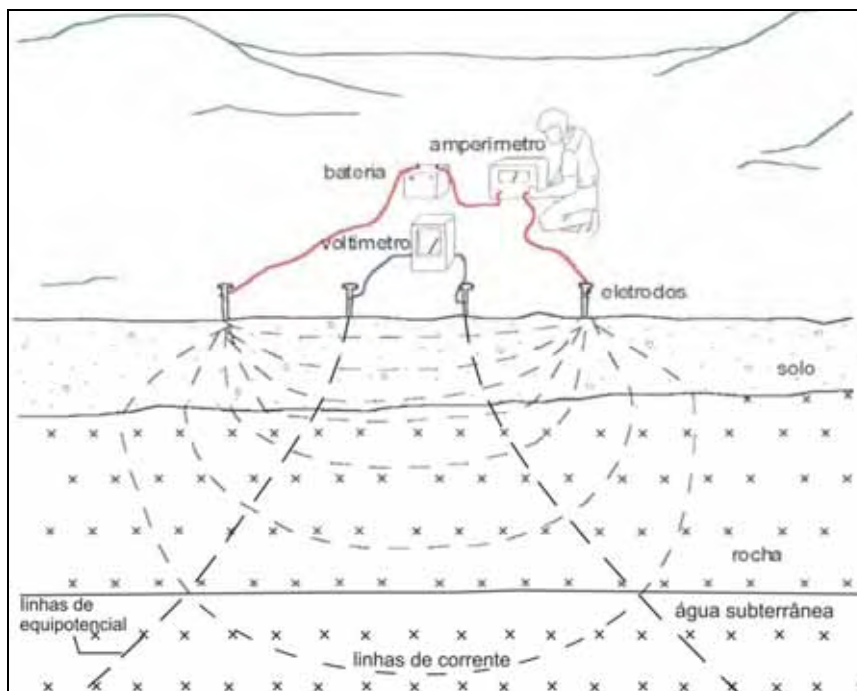


Figura 15 - Aplicação do método da eletrorresistividade (modificado de ROBINSON e ÇORUH,1988).

Conhecendo – se a intensidade da corrente elétrica transmitida, a diferença de potencial medida e através da geometria de distribuição dos eletrodos de corrente e de potencial, é possível calcular-se as resistividades laterais e/ou verticais do semi-espaço em subsuperfície.

5.1.1 Propriedades Elétricas das Rochas

Nas rochas, os mecanismos de propagação da corrente elétrica podem ser: as conduções eletrônica (ôhmica), eletrolítica (iônica) e dielétrica, as duas primeiras são governadas pelo parâmetro físico resistividade elétrica.

A condução eletrônica é a aquela que se verifica nos materiais que possuem elétrons livres na matriz da rocha, governada pelo modo de agregação dos minerais e do grau de impurezas na rede cristalina, o que se dão principalmente nos condutores como nos minerais metálicos ou dos sulfetos metálicos. A condução eletrolítica é aquela que ocorre em um eletrólito, na qual o fluxo da corrente se processa por meio de íons dissolvidos, contidos nos poros e fissuras das rochas. E a condução dielétrica é aquela que ocorre em materiais de baixas condutividades ou dielétricas, dos quais os elétrons estão fortemente ligados aos núcleos dos átomos da rede cristalina.

Segundo Telford et al. (1990), a resistividade elétrica (ρ), definida como a resistência dos materiais em conduzir corrente elétrica, depende da natureza e do estado físico do material, e pode ser expressa na forma da resistência elétrica R de um cilindro condutor e homogêneo de comprimento L unitário e seção transversal A unitária:

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (1)$$

onde a unidade da área A é dada em metros quadrados (m^2), L em metros (m) e R em ohm (Ω). Substituindo-se na Equação, a Lei de Ohm ($R=\Delta V/I$), onde ΔV é a diferença de potencial em volt (V) aplicada entre as extremidades do cilindro condutor e I a corrente elétrica em unidades de ampère (A) que flui através dele, tem-se a resistividade elétrica ρ , na forma:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{A}{L} \quad (2)$$

sendo $\Delta V/I$ dado em volt/ampère (definição da resistência R em Ω) e A/L em metros, assim a resistividade elétrica (ρ) é expressa em unidades de resistência x comprimento, isto é, $\Omega.m$ ou $ohm.m$.

Dentre todas as propriedades físicas das rochas e dos minerais, a resistividade elétrica é a que apresenta o maior intervalo de variações: pode atingir valores tão pequenos quanto $10^{-5} \Omega.m$, para minerais metálicos (condutores), como o cobre, ouro, platina e prata, como valores intermediários (semicondutores) de 10^{-5} a $10^5 \Omega.m$, como para a grafita, maioria dos sulfetos e alguns óxidos, e até maiores valores de $10^5 \Omega.m$ (dielétricos), como para os silicatos, rochas metamórficas e ígneas (MOURA, 2002).

Na grande maioria das litologias encontradas na natureza a condução será eletrolítica, sendo o meio condutor uma solução de água e sais comuns distribuídos de maneira complexa na estrutura dos poros da rocha (GALLAS, 2000). Assim, a resistividade é inversamente proporcional a quantidade de água presente, a salinidade da mesma e a maneira como a água distribui-se na rocha – no caso a permeabilidade.

Os valores de resistividade para as rochas são bem menores que os valores de resistividade dos seus minerais, pois a condução elétrica é feita pela água intersticial, que são eletrólitos nos poros das rochas. A condução elétrica em rochas sedimentares, e em rochas próximas a superfície, é basicamente eletrolítica, por terem maior porosidade, com isso maior fluxo de água em seus poros. Em rochas argilosas, além dos eletrólitos, há a participação da condução iônica que a argila proporciona pela sua grande capacidade de troca iônica. Sendo assim, a presença de argila faz diminuir a resistividade das rochas. Na ausência de minerais de argila, a porosidade e a permeabilidade passam a ser fatores de extrema importância na determinação da resistividade elétrica do meio.

5.1.2 Definição de Resistividade Aparente

O conceito de resistividade aparente, representada por ρ_a , é um dos conceitos mais importantes na prospecção geolétrica. Os dados físicos medidos em um levantamento de campo de eletrorresistividade são a corrente I , emitida por meio de dois eletrodos A e B e a diferença de potencial ΔV , usualmente medida com os eletrodos de potencial ditos M e N . A partir destes parâmetros é possível obter-se a resistividade ρ . Em substratos homogêneo e isotrópico esta resistividade será constante para quaisquer disposições de eletrodos que sejam empregadas nas medições.

Sabe-se, que na prática, a situação no ambiente natural de homogeneidade e isotropia em substratos rochosos não se verifica. Normalmente os substratos são heterogêneos e anisotrópicos. Se considerarmos que os quatro eletrodos citados acima estão posicionados em locais de resistividade ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 e ρ_4 , conforme a Figura 16, a resistividade resultante medida não será a verdadeira e sim um resistividade dita aparente ρ_a (ORELLANA, 1972). Esta, normalmente não será igual a nenhuma das quatro, mas terá influência de todas elas e de suas respectivas configurações e geometrias.

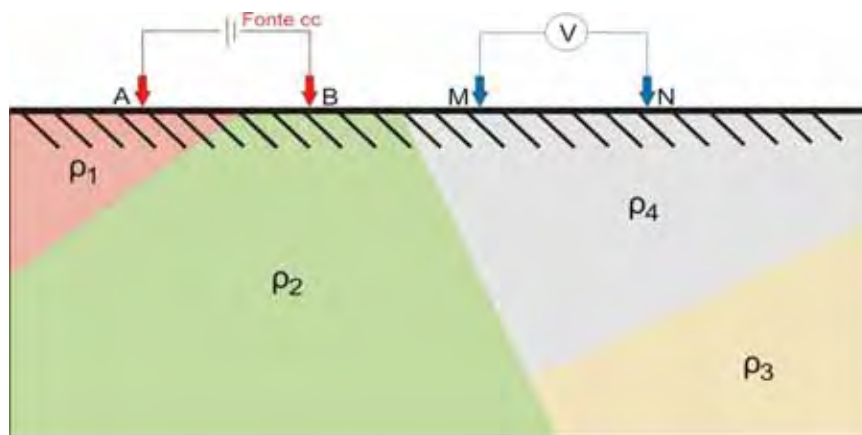


Figura 16 – Ilustração de subsolo heterogêneo (modificado de ORELLANA, 1972).

Esta resistividade também não pode ser entendida como média e nem média ponderada das quatro resistividades, podendo acontecer que seja maior ou menor que qualquer uma das quatro (ORELLANA, 1972).

A resistividade aparente é obtida a partir de medidas realizadas sobre um meio heterogêneo e anisotrópico aplicando-se a expressão válida para meios homogêneos.

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

Os valores de ρ_a são calculados em função da separação entre eletrodos por meio do fator geométrico K , como é mostrado na Figura 17, e expressado na Equação 4 como:

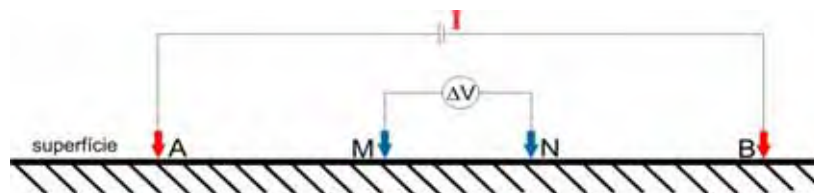


Figura 17 – Geometria dos eletrodos de corrente AB, e de potencial MN.

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (4)$$

5.2 TÉCNICAS DE ENSAIOS DE CAMPO

As técnicas de ensaio de campo dos métodos geoeletricos podem ser de três tipos principais: sondagem elétrica, imageamento elétrico e perfilagem elétrica. A diferença entre estas técnicas, está no procedimento dos ensaios, ou seja, na disposição dos eletrodos na superfície do terreno ou interior de furos de sondagens e na maneira de desenvolvimento da investigação.

Neste trabalho utilizou-se as técnicas da sondagem elétrica vertical (1D) e imageamento elétrico (2D), sendo a primeira com objetivo de estudar a distribuição do parâmetro resistividade elétrica verticalmente, a segunda verticalmente e horizontalmente.

5.2.1 Sondagem Elétrica Vertical

A técnica da sondagem elétrica vertical (SEV) consiste em uma sucessão de medidas de um parâmetro físico (no caso a resistividade), efetuadas, a partir da superfície do terreno, investigando de maneira pontual, mantendo-se a disposição e separação crescente entre os eletrodos de emissão de corrente e recepção de potencial (BRAGA, 1997).

À medida que se expande à distância entre os eletrodos de emissão de corrente (AB) em relação aos eletrodos de recepção de potencial (MN), aumenta a profundidade investigada.

Nos levantamentos de campo nesse trabalho, utilizou-se o equipamento *BISON* modelo 2390 da *BISON Instruments Inc.* (USA), composto de um conjunto transmissor e um conjunto receptor. Os acessórios utilizados para os circuitos de emissão de corrente e recepção de potencial, tais como bobinas de AB, eletrodos, cabos de MN, etc., além do equipamento (Foto 2), são de propriedade do Departamento de Geologia Aplicada – IGCE/UNESP – Rio Claro.



Foto 2 – Equipamento e acessórios para SEV: 1 – conjunto transmissor e receptor; 2 – bobinas AB, eletrodos e cabos MN utilizados na realização dos ensaios de SEV.

5.2.2 Imageamento Elétrico

A técnica do imageamento elétrico (IE) consiste na análise e interpretação de um parâmetro físico (no caso a resistividade), obtido a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno, investigando, ao longo de um perfil, sua variação na horizontal, a uma ou mais profundidades determinadas. O procedimento de

campo consiste em deslocar constantemente o arranjo de eletrodos, e medir a diferença de potencial (ΔV) entre os eletrodos gerados pela passagem da corrente.

O imageamento elétrico (2D) proporciona a possibilidade de identificação de contatos geológicos verticais ou inclinados, mudanças laterais de fácies ou estruturas, como fraturamentos e falhamentos, diques, contaminação de aquíferos a partir de fontes poluidoras, prospecção de aquíferos em meio saturado, etc. (ELIS, 1998), ou quaisquer outras feições que apresentem heterogeneidades laterais.

Nas últimas décadas, a técnica de imageamento elétrico vem sendo empregada de maneira sistemática, fato que pode ser verificado pelas inúmeras publicações recentes em periódicos nacionais e internacionais, utilizando e abordando aspectos dessa técnica. Devido à evolução dos equipamentos, das técnicas e algoritmos de inversão e da saída gráfica dos softwares, o produto final é uma “imagem” gerada do processamento dos dados, daí a justificativa da adoção dessa nova terminologia chamada “imageamento elétrico” para levantamentos 2D de resistividade.

Nos levantamentos de campo nesse trabalho, utilizou-se o equipamento *TERRAMETER* modelo SAS 4000 da *ABEM Instruments* (Suécia) (Foto 3). Tanto o equipamento, quanto os acessórios utilizados, de propriedade do Departamento de Geologia Aplicada – IGCE/UNESP – Rio Claro.



Foto 3 - Equipamento TERRAMETER modelo SAS 4000, cabos e bateria.

5.3 ARRANJOS ELETRÓDICOS EM LEVANTAMENTO DE CAMPO

Os arranjos eletródicos mais utilizados pelos métodos da eletrorresistividade, nas mais variadas aplicações, utilizando as técnicas de SEV, imageamento elétrico 2D e 3D, são: gradiente, dipolo-dipolo (D-D), pólo-dipolo (P-D), Schlumberger e Wenner (WARD, 1990).

No quadro 5 é apresentada a análise de Ward (1990) ao desempenho de diversos arranjos quanto à resolução, tanto lateral como vertical.

Quadro 5 – Avaliação de arranjos de eletrorresistividade quanto à resolução (WARD, 1990).

Arranjos	Resolução Lateral	Resolução Vertical
Gradiente	1	5
D-D	2	2
P-D	3	2
Schlumberger	4	1
Wenner	5	1

1 – melhor; 2 – segundo melhor; 3 – terceiro melhor; 4 – quarto melhor; 5 - pior

A escolha da configuração dos eletrodos ou arranjo de superfície dos mesmos em levantamento de campo, depende dos propósitos do levantamento, situação geológica e do tipo e qualidade de informações desejadas.

Neste trabalho, foram escolhidos os arranjos Schlumberger para SEV e o dipolo-dipolo para o IE (2D), descritos nos próximos itens.

5.3.1 Arranjo Schlumberger

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 (Figura 18). O objetivo básico deste arranjo é fazer com que a distância que separa os eletrodos M e N , tenda a zero em relação à distância crescente entre A e B , portanto, devido a esses procedimentos de campo, o erro produzido por esse tipo de arranjo, pode ser considerado insignificante (ORELLANA, 1972).

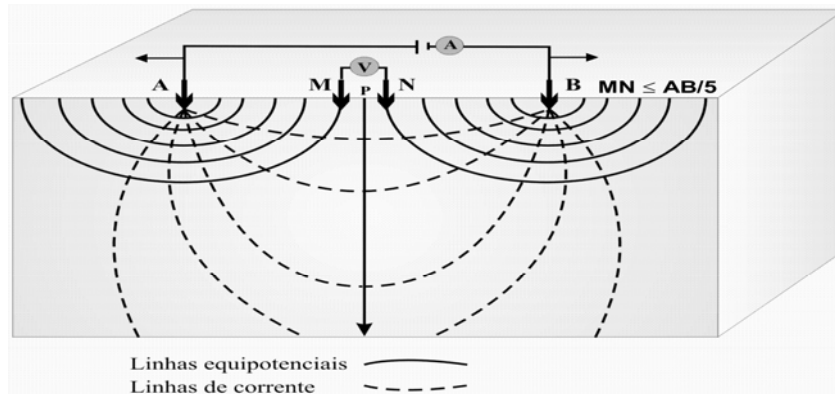


Figura 18 - Arranjo Schlumberger (MOREIRA, 2005).

Para o cálculo do valor da resistividade aparente utilizando o arranjo Schlumberger, o fator geométrico K_s , é dado por:

$$K_s = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN} \quad (5)$$

O ponto de atribuição das medidas é o ponto médio P entre os eletrodos de recepção de potencial, sendo os resultados de resistividade aparente (ohm.m), apresentados em forma de curva em base bi-logarítmica em função das distâncias entre os eletrodos correspondentes ($AB/2$), conforme ilustrado na Figura 19.

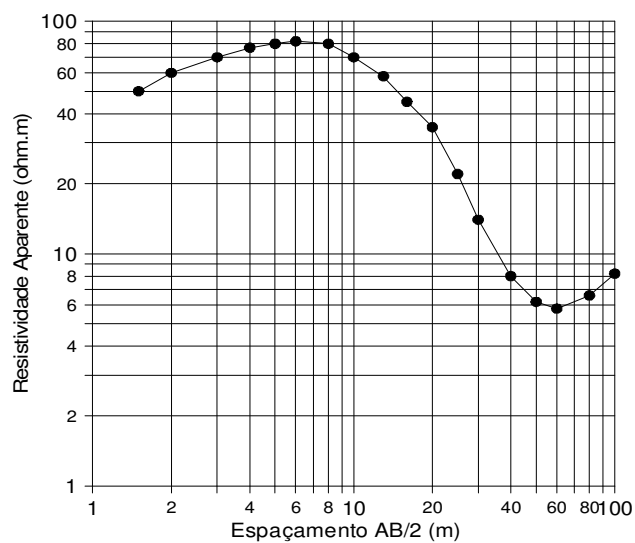


Figura 19 – Plotagem dos dados de SEV (BRAGA, 2006).

Ao aumentar sucessivamente a distância AB com objetivo de aumentar a profundidade investigada, a diferença de potencial, dependendo da sensibilidade do equipamento, torna-se muito pequena, acentuando assim a imprecisão da medida. Para corrigir esse efeito, é necessária a repetição de pelo menos duas leituras com diferentes distâncias MN , numa operação denominada de “embreagem”, conforme apresenta a Figura 20.

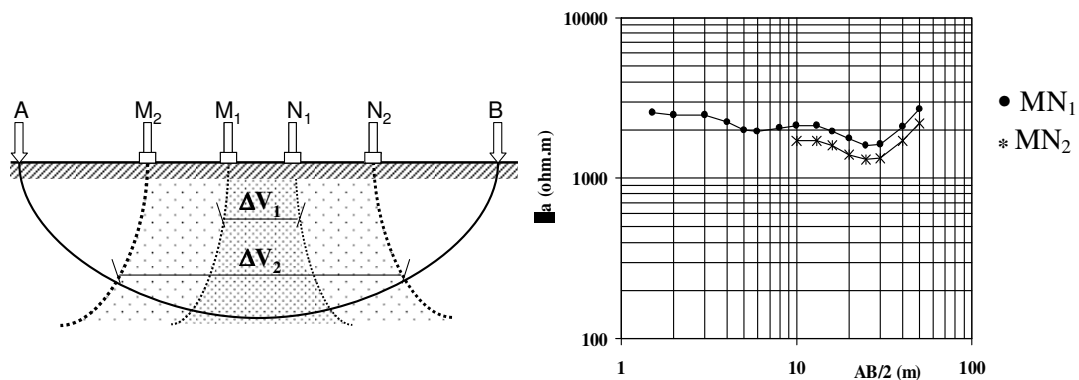


Figura 20 – Operação da embreagem em curvas de SEV (BRAGA, 2006).

A profundidade teórica de investigação (h) pode ser relacionada à distância AB , e normalmente é considerada como:

$$h \cong AB/5 = 0,2 AB \quad (6)$$

Segundo Elis (1998), o arranjo de campo Schlumberger é o mais utilizado em SEVs, devido a qualidade das curvas de campo, facilidade e rapidez na execução do ensaio e menor susceptibilidade as variações laterais de resistividade e ruídos, como correntes naturais no subsolo, linhas de alta tensão, etc.

5.3.2 Arranjo Dipolo-Dipolo (D-D)

No arranjo D-D (Figura 21), a configuração é de dois eletrodos A e B de emissão de corrente e de dois eletrodos M e N de potencial com igual abertura “ x ”, estando os eletrodos dispostos em um mesmo alinhamento. A profundidade de

investigação é a intersecção das linhas que partem do centro de AB e MN com ângulo de 45°.

Observa-se na Figura 21 que o espaçamento R varia nos múltiplos de abertura do dipolo, na forma $x(n + 1)$, onde $x = 1,2,3,\dots$ é o número de dipolos MN . Assim, o nível teórico de investigação progressivamente cresce com o crescimento de R , que teoricamente corresponde a $x(n + 1)/2$.

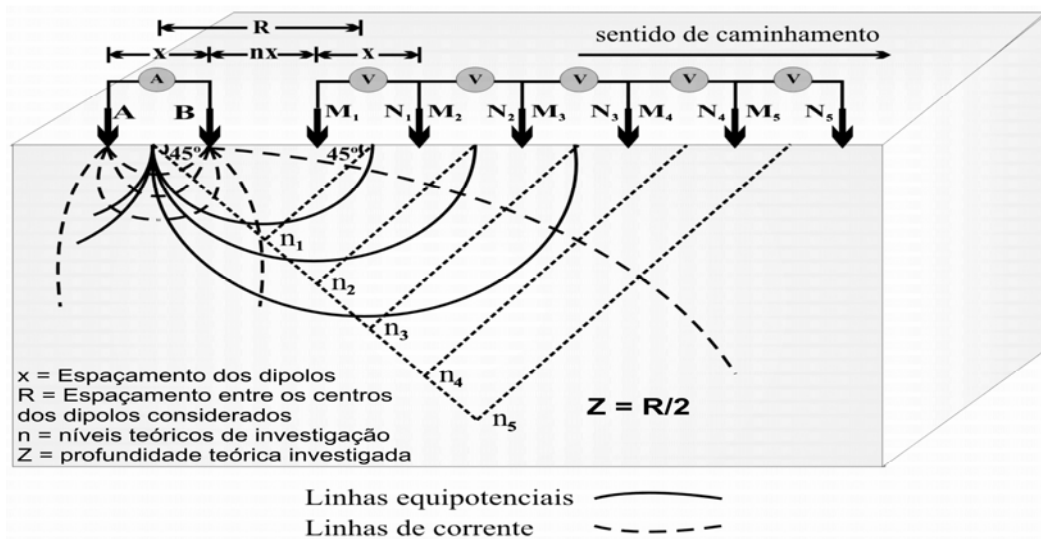


Figura 21 - Arranjo D-D (MOREIRA, 2005).

Para o cálculo do valor da resistividade aparente utilizando o arranjo dipolo-dipolo, o fator geométrico K_{dd} é dado por:

$$K_{dd} = 2\pi x \frac{1}{\left(\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}\right)} \quad (7)$$

Uma forma de representação dos dados largamente utilizada no meio técnico é a pseudo-seção ou plotagem convencional, sendo introduzida por Hallof (1957). Pelo arranjo D-D, a forma de plotagem dos dados é efetuada da seguinte forma: os valores de resistividade elétrica aparente são atribuídos a um ponto em subsuperfície, localizado na intersecção de duas retas a 45° partindo do centro dos dipolos AB e MN (Figura 22). A projeção deste ponto no eixo das abscissas

(distância) corresponde ao ponto médio do arranjo, considerando os eletrodos extremos do mesmo (A e N).

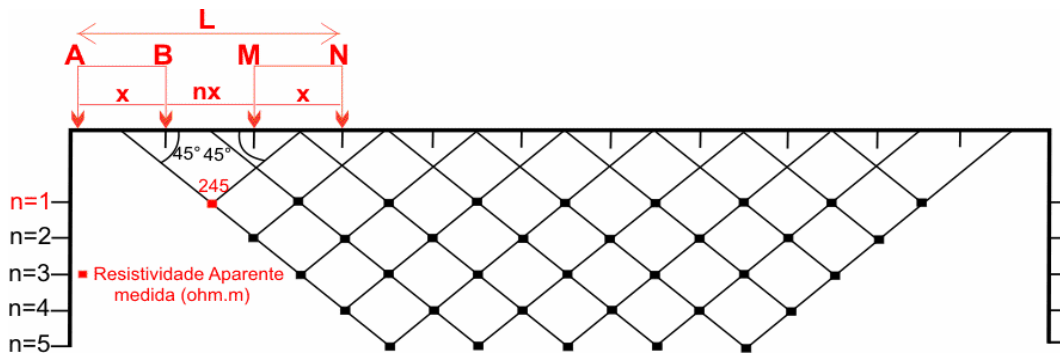


Figura 22 – Forma de plotagem dos dados de campo em forma de pseudo-seção (modificada de HALLOF, 1957).

Cada linha horizontal na pseudo-seção esta associada a um valor de “n” e também a uma “profundidade teórica de investigação ou nível teórico de investigação”, resultando numa apresentação apenas qualitativa, isto é não real, das variações verticais de resistividade aparente (GANDOLFO, 2007).

Outro método de plotagem é o da profundidade mediana de investigação (Z_e) (EDWARDS, 1977), ou também chamado de pseudoprodifundidade do arranjo utilizado. Os valores da profundidade mediana de investigação está baseado nos valores de sensibilidade do meio ou da derivada de Frechet, para meios homogêneos. O Quadro 6 mostra a profundidade mediana de investigação (Z_e) para cada nível de investigação do arranjo D-D. A partir de bases matemáticas, este método também é utilizado para plotagem dos dados de resistividade obtidos no campo.

Quadro 6 – Profundidade mediana de investigação (Z_e) para o arranjo D-D (EDWARDS, 1977).

Níveis	Z_e/x	Z_e/L
n = 1	0,416	0,139
n = 2	0,697	0,174
n = 3	0,962	0,192
n = 4	1,220	0,203
n = 5	1,476	0,211
n = 6	1,730	0,216
n = 7	1,983	0,220
n = 8	2,236	0,224

x = espaçamento entre eletrodos; L = espaçamento total do arranjo.

O arranjo D-D, é um dos mais utilizados na investigação de contaminantes, pela precisão nos resultados e rapidez na execução em campo. Segundo Ward (1990), D-D é o arranjo de melhor resolução, apresentando anomalias mais intensas, considerando relações verticais.

5.4 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GEOELÉTRICOS

A interpretação geofísica dos dados pode ser qualitativa, semiquantitativa e quantitativa. As interpretações qualitativas e semiquantitativas têm por objetivo apresentar uma primeira idéia ou aproximação da estrutura do subsolo estudado, não utilizando modelos matemáticos específicos. Já na interpretação quantitativa, buscam-se os parâmetros quantitativos do modelo geoeletrico da área de estudo.

Os métodos de interpretação de dados geofísicos utilizados neste trabalho são apresentados a seguir.

5.4.1 Interpretação Quantitativa Uni-dimensional

A interpretação quantitativa uni-dimensional (1D) consiste em interpretar as SEVs levando em consideração um modelo geoeletrico isotrópico e homogêneo, onde as resistividades variam somente com a profundidade. Neste tipo de interpretação, usam-se os métodos **comparativos, direto e inverso**.

Neste trabalho utilizou-se o método comparativo com o objetivo de realizar uma interpretação preliminar dos dados observando a morfologia da curva, estabelecendo assim a curva teórica inicial (modelo geoeétrico inicial).

O princípio do **método comparativo** tem como base o método de Ebert (BRAGA, 1988), que consiste em reduzir artificialmente o número de camadas da curva de campo, substituindo as duas primeiras por uma só camada equivalente a elas, e assim sucessivamente, utilizando uma ou mais das quatro cartas que apresentam as famílias de curvas auxiliares (carta H, carta A, carta Q, carta K). Como o problema de múltiplas camadas é progressivamente reduzido a um simples caso de duas camadas, utiliza-se o método da superposição, que consiste na comparação da curva de campo com as curvas teóricas auxiliares de duas camadas acima citadas, publicadas por Bahattacharya e Patra (1968).

As SEVs podem ser classificadas segundo seu número de camadas geoeétricas, isto é, de uma, duas, três, quatro camadas, etc.. As seções de resistividade de três camadas podem ser denominadas de:

Tipo K: $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$

Tipo H: $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$

Tipo A: $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$

Tipo Q: $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$

Entretanto, as SEVs com quatro ou mais camadas, são combinações resultantes dos tipos ilustrados acima, como por exemplo: HK, QK, AK, etc. Na Figura 23, são ilustradas alguns exemplos existentes, com duas, três e quatro camadas, mostrando as variações das resistividades em função das espessuras. Neste trabalho, as SEVs foram classificadas com quatro, cinco e seis camadas.

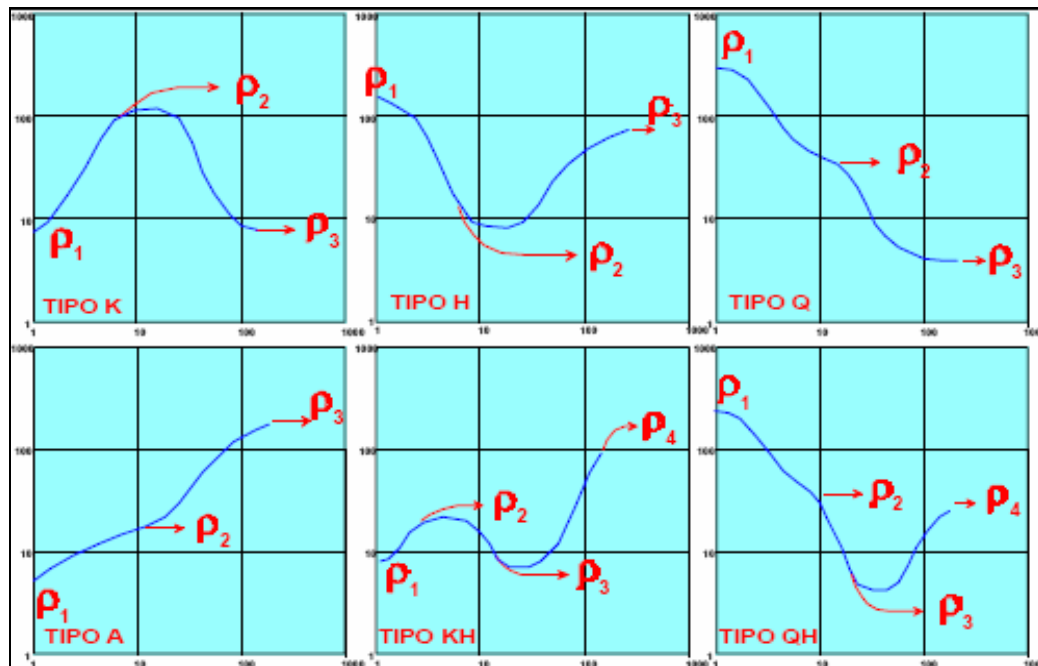


Figura 23 – Exemplos de morfologia de curvas de resistividade (BRAGA, 1999).

Após o estabelecimento de uma curva teórica inicial através do método comparativo. Realizou-se as interpretações mais refinadas utilizando tanto o método direto como inverso.

No **método direto**, admite-se um modelo inicial (curva teórica inicial) e calcula-se a curva teórica correspondente com auxílio de programas computacionais, comparando-se com a curva de campo. Nesse trabalho empregou-se o *software* IX1D v.3, produzido pela *INTERPEX Limited*. O algoritmo do programa calcula a curva de resistividade aparente, com base na teoria da filtragem linear (INTERPEX, 1993). Enquanto as curvas não se ajustam os parâmetros são modificados, segundo um bom controle geológico e hidrogeológico.

Após um ajuste confiável, o modelo foi refinado por meio do **método inverso**. Esse método busca uma convergência da curva teórica para a curva de campo, até que um ajuste mínimo seja alcançado, modificando os parâmetros iniciais automaticamente. O algoritmo do programa IX1D v.3 baseia-se no método dos mínimos quadrados⁶ (INMAN, 1975):

⁶ É uma técnica de otimização matemática que procura encontrar o melhor ajustamento para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre a curva ajustada e os dados.

$$\Delta p = (A^t A)^{-1} A^t \Delta \rho_a \quad (8)$$

onde $\Delta \rho_a$ é o vetor de variação entre as resistividades aparentes observadas e as calculadas pelo método direto, gerada pelo modelo geoeétrico inicial (vetor de parâmetro ρ_o); A é a matriz sensibilidade, sendo que os seus elementos são as derivadas parciais das resistividades aparentes com relação aos parâmetros do modelo desconhecido (vetor de parâmetro p); A^t é a matriz transposta; $(A^t A)^{-1}$ é a matriz inversa $A^t A$ e Δp é o vetor de variação entre os vetores p e ρ_o ao ajustar o mínimo.

A Equação 8 mostra que se a variação $\Delta \rho_a$, entre as resistividades aparentes observadas e as calculadas, é pequena, a variação entre os parâmetros Δp que ajustam os dados também é pequena, conseqüentemente, o modelo inicial é próximo do real. A Equação 8 mostra também, que a solução Δp é única, se o determinante de $A^t A$ é diferente de zero. Em problemas práticos, é sempre diferente de zero devido ao arredondamento numérico. No entanto, o determinante é freqüentemente muito pequeno de modo que a Equação 8 é instável na presença de ruído, podendo, muitas vezes, convergir para um modelo irreal. Nesse caso, seria necessário que os dados estivessem com um mínimo de ruído e os modelos iniciais muito próximos do real (RIJO, 1977). Esses recursos disponíveis no programa IX1D v.3 foram utilizados nas interpretações das SEVs, concomitante com as informações da geologia e da hidrogeologia da região, com o objetivo de diminuir a ambigüidade dos resultados.

Nos processos interpretativos de uma SEV, cada camada obtida, com seus valores de resistividade e espessura, constitui um *nível geoeétrico*. Nas SEVs, normalmente, obtêm-se vários níveis geoeétricos, tais como os apresentados nos modelos geoeétricos no APENDICE. Mas a associação destes níveis geoeétricos com a geologia da área, resulta nos *estratos geoeétricos*. Um estrato geoeétrico, formado por um ou mais níveis associados, corresponde a um tipo litológico específico.

5.4.2 Obtenção de Mapas Potenciométricos em Aquíferos Livres

Para Feitosa (1997), uma superfície potenciométrica ou piezométrica é o lugar geométrico dos pontos que marcam as alturas potenciométricas de um aquífero, referida a uma dada profundidade ou cota (Figura 24).

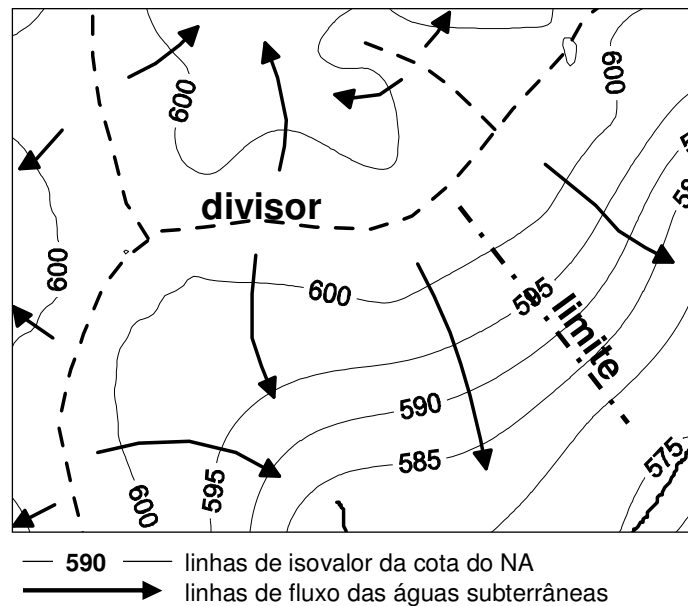


Figura 24 - Mapa potenciométrico (BRAGA, 2006).

A obtenção da distribuição espacial dos níveis potenciométricos de um aquífero, se dá através da medição da profundidade do nível freático, por meio de técnicas diretas como poço, ou indiretas como a aplicação de métodos geofísicos. Uma vez obtidos alguns valores do nível potenciométrico, pode-se construir mapas de curvas de isovalores (mapas potenciométricos).

Os mapas potenciométricos permitem estabelecer: o padrão do fluxo subterrâneo; definir os gradientes hidráulicos; diferenciar áreas com diferentes graus de permeabilidade; determinar os limites e divisores de bacias hidrogeológicas; identificar as áreas de recarga, descarga e as perdas de carga de um aquífero (SOUZA, 2001). Segundo Braga (1999), expressam o comportamento geral do escoamento subterrâneo, evidenciado pelas redes de fluxo, que possibilitam a determinação do sentido e da direção do fluxo.

Na obtenção dos níveis potenciométricos por meio das interpretações das SEVs, é atribuído o nível geométrico que correspondem ao topo da zona saturada com sua respectiva profundidade.

A partir das coordenadas planialtimétricas das SEVs e profundidade dos níveis freáticos da área, foi possível determinar o mapa potenciométrico da área, utilizando o *software* SURFER v.8 da *GOLDEN SOFTWARE* com a interpolação geoestatística de mínima curvatura. Esse método de interpolação geoestatística, é um método suavizador (*spline*) (LANDIM e STURARO, 2002a), sendo o que melhor representa as linhas eqüipotencias.

5.4.3 Interpretação Quantitativa Bi-dimensional

Após a interpretação qualitativa por meio da comparação das pseudo-seções das linhas de IE, foi realizada a interpretação quantitativa, pois a elaboração da pseudo-seção é o método normalmente utilizado para representar a distribuição dos valores de resistividade. Vale lembrar que a pseudo-seção é uma medida inicial para estabelecer interpretações quantitativas e não uma imagem final da resistividade verdadeira de subsuperfície. A interpretação qualitativa consiste, então, da busca de anomalias, onde o parâmetro medido alcance valores que reduzem ou superem o *background*. Segundo Orellana (1972) um valor anômalo deve diminuir ou ultrapassar em pelo menos duas ou três vezes o valor de *background*.

O processamento e interpretação quantitativa bi-dimensional (2D) consiste em interpretar os dados obtidos no ensaio de IE, com o objetivo de realizar o modelamento 2D.

Para a seqüência de modelagem 2D dos dados de resistividade elétrica deste trabalho, foi utilizado o *software* RES2DINV v.3.53 da *ABEM Instruments*. Esse *software* executa um imageamento do terreno, empregando o método de inversão por mínimos quadrados com suavização restringida (*smoothness-constrained least-square inversion method*) (deGROOT-HEDLIN e CONSTABLE, 1990; SASAKI, 1992; LOKE e BARKER, 1996a). É baseado seguindo a equação:

$$(J^t J + \mu F)d = J^t g \quad (9)$$

onde: $F = f_x f_x^t + f_z f_z^t =$ matriz de suavização;

$f_x =$ filtro de achatamento horizontal;

$f_z =$ filtro de achatamento vertical;

$J =$ matriz de Jacob de derivadas parciais;

$\mu =$ fator de amortecimento (ruído);

$d =$ vetor de perturbação do modelo;

$g =$ vetor de discrepância.

O vetor de discrepância (g) é a diferença entre a resistência medida e os valores de resistividade aparente calculados. A magnitude deste vetor é representada pelos valores de RMS (Root-Mean-Square), que o método de inversão procura reduzir para produzir um modelo aperfeiçoado. O fator de amortecimento de ruído (μ - *damping factor*) tem como objetivo intensificar ou não a capacidade de filtragem no modelo matemático, isto é, realizar um processo de suavização do modelo. Para dados com baixo ruído o fator deve ser baixo (exemplo 0,1), e para dados com alto ruído o valor deve ser acima de 0,1. Como os dados de resistividades neste trabalho são de baixo ruído, foi utilizado um *damping factor* de 0,1. Depois de duas inversões, o *damping factor* é reduzido pela metade se o mesmo ainda for maior que o mínimo escolhido. Se o processo de inversão não reduzir o erro RMS, o *damping factor* deve ser aumentado, pois segundo Loke e Barker (1996a) o processo de inversão reduz em torno de 5% o erro RMS.

Como o método dos mínimos quadrados não linear necessita de interatividades de algoritmos genéricos de otimização. O *software* RES2DINV v.3.53 apresenta três opções de algoritmos de otimização na realização das inversões (cálculos de convergência): algoritmo Gauss-Newton, Quasi-Newton ou a interação dos dois métodos, isto é algumas inversões são utilizada o Gauss-Newton e outras o Quasi-Newton.

O algoritmo Gauss-Newton é um método convencional de otimização que utiliza derivadas parciais para calcular a resistividade aparente. Este algoritmo pode ser usado para determinar a resistividade dos blocos retangulares (parâmetros do modelo), minimizando as diferenças entre os valores de resistividade calculado e medido, e ainda, apresenta maior acurácia nos resultados devido ao processo de

inúmeros recálculos da matriz Jacobiana (J), mas é sugerido usar em número reduzido de dados (menos que 200) (LOKE e BARKER, 1996a).

O algoritmo Quasi-Newton, ao contrário do Gauss-Newton, evita recálculos da matriz Jacobiana (J) utilizada por ambos, atualizando a matriz em cada inversão (LOKE e BARKER, 1996a). Esse método é eficiente e robusto em cálculos com grande número (acima de 200) de dados apresentando alta velocidade nas convergências, utilizando pouca memória do computador.

No uso combinado dos algoritmos Gauss-Newton e Quasi-Newton a matriz Jacobiana (J) é recalculada nas primeiras interações utilizando Gauss-Newton, já para as próximas interações é utilizado o método Quasi-Newton, na estimação da matriz Jacobiana (J) (LOKE e DAHLIN, 2002).

Nesse trabalho foi utilizado somente o método Gauss-Newton, devido à acurácia nos cálculos e o pequeno número de dados de cada linha de IE.

O software apresenta ainda dois métodos de otimização, com objetivo de realizar refinamento de malha (linha de blocos): elemento finito e diferença finita, o primeiro faz cálculos considerando formas irregulares, sendo aplicável para dados com topografia, utilizando mais memória do computador; já o segundo é mais rápido, pois realiza cálculos desconsiderando formas irregulares, utilizando assim pouca memória do computador. O refinamento de malha pode ser realizado usando: malha normal, malha fina ou finíssima, com divisão dos blocos em 2 ou 4 nós.

Neste trabalho, para o refino de malha foi utilizado o método de diferença finita, por não apresentar dados com topografia, com malha fina de 2 nós.

Ao utilizar neste trabalho um método mais acurado de otimização dos cálculos e malha mais refinada que geram bom resultados para delinear anomalias resistivas em subsuperfície maior que 20:1, mas que tende a produzir blocos no modelo, foi necessário reduzir severamente o efeito de blocos, pois o modelo gerado apresentou muitas discrepâncias com a realidade.

O modelo 2D usado pelo programa de inversão, que consistem em vários blocos retangulares, é mostrada na Figura 25. O arranjo dos blocos é amarrado livremente à distribuição dos dados na pseudo-seção. A distribuição e tamanho dos blocos são gerados automaticamente pelo *software* que usa a distribuição dos dados por um procedimento irregular.

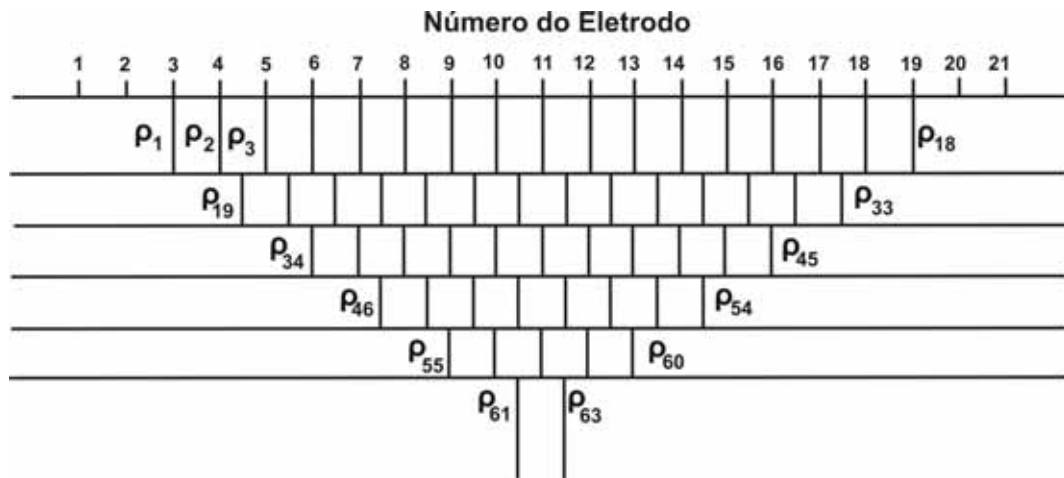


Figura 25 – Arranjo de blocos retangulares usado no modelo 2D (modificado de LOKE e BARKER, 1996a).

O RES2DINV adota os coeficientes empíricos estabelecidos por Edwards (1977) na plotagem dos pontos com relação às profundidades, conforme o arranjo utilizado. A espessura da primeira fileira de blocos para o arranjo D-D é 0,3 vezes o espaçamento entre eletrodos.

Na Figura 26 é apresentado um típico modelo de blocos utilizado pelo RES2DINV, arranjo D-D. Os dados da seção são plotados nos pontos médios entre o dipolo emissor e receptor. Em cor vermelha estão as respectivas profundidades adotadas pelo programa. Em azul encontra-se as espessuras dos blocos. Neste exemplo, a espessura do primeiro bloco é igual a 3 m, que corresponde a 0,3 vezes a distância entre eletrodos (10 m). A espessura dos blocos inferiores subsequentes é aumentada em 10%, acarretando uma inerente perda da resolução com a profundidade. Em preto esta a profundidade de cada bloco.

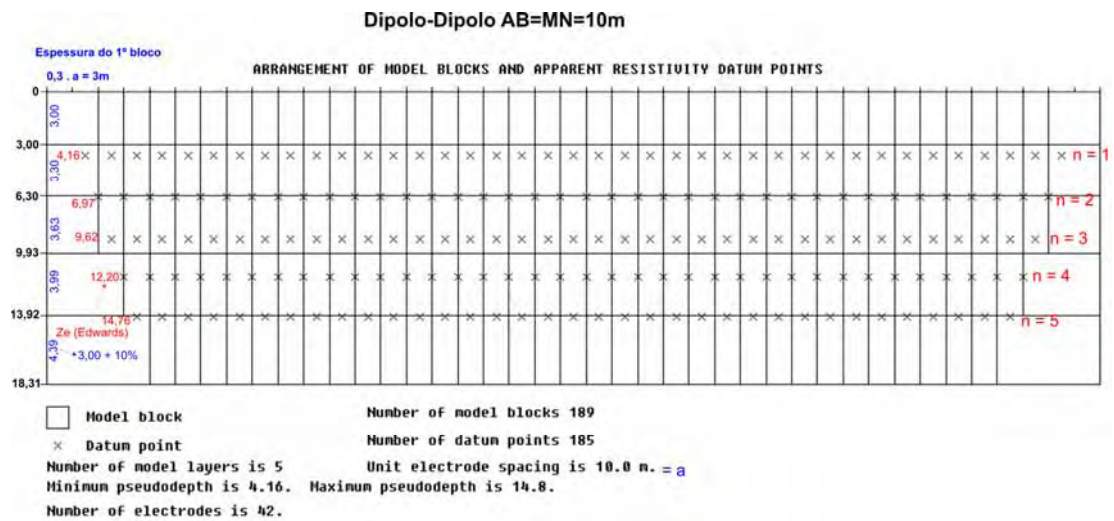


Figura 26 – Modelo de blocos utilizado no RES2DINV, arranjo D-D (a = 10m) e respectivos dados plotados de acordo com a profundidade estabelecidas por Edwards (1977).

Após obter o modelo de resistividade (modres) no *software* RES2DINV v.3.53, condizente com a realidade, o mesmo foi exportado para o *software* SURFER v.8, para realização de uma interpolação geoestatística de krigagem simples. A krigagem simples minimiza a variância do modelo prévio (no caso o modres exportado), que leva em conta a dependência estocástica (probabilidade) entre os dados distribuídos no espaço (LANDIM, 1998).

5.5 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

A análise exploratória dos dados por meio de métodos estatísticos básicos constitui uma etapa muito importante, principalmente quando se trabalha com aquisição de uma quantidade significativa de dados. Os métodos que podem ser utilizados são: medidas de tendência central, medidas de dispersão e sua representação gráfica, distribuição de probabilidades e correlações. Como neste trabalho há apenas uma variável – no caso a resistividade elétrica, foi utilizado medidas de tendência central como mínimo e máximo, média e mediana, e medidas de dispersão como variância, desvio-padrão, coeficiente de variação, assimetria, curtose, e sua representação gráfica – histograma. O *software* utilizado para este fim, foi o XLSTAT versão 2007, da ADDINSOFT.

O termo “*Geoestatística*”, com significado de estatística de dados georreferenciados, segundo Sturaro (1994) tem por objetivo a aplicação da teoria das variáveis regionalizadas desenvolvida por Matheron (1963) em seu trabalho metodológico sobre comportamento espacial de variáveis. Esta teoria é baseada em modelos probabilísticos, que usualmente são utilizados onde os fenômenos naturais não são conhecidos suficientemente para permitir um enfoque determinístico. Ou seja, os modelos probabilísticos propiciam uma avaliação da variável juntamente com a inevitável incerteza (ISSAKS E SRIVASTAVA, 1989).

Segundo Oliva (2006), em geociências, a maioria das variáveis estudadas são consideradas como regionalizadas, como por exemplo: espessura de camadas geológicas, profundidade do nível d’água subterrâneo, espessuras resistivas de camadas geoeletricas, etc.

As características de variabilidade e distribuição espacial em fenômenos naturais podem ser isotrópicas – as propriedades não variam em relação à direção; ou anisotrópicas – as propriedades variam conforme a direção.

A isotropia em fenômenos naturais é um caso pouco freqüente de ser observada, mas pode ocorrer, por exemplo, em áreas contaminadas, devido à homogeneização das características físico-químicas pelo contaminante no meio físico. Neste caso, um único modelo é suficiente para descrever a variabilidade espacial do fenômeno em estudo.

Já a anisotropia é mais freqüente em fenômenos naturais. Quando se observa anisotropia, é necessário que o modelo proposto represente bem a variabilidade espacial da propriedade em estudo. Procedimentos determinísticos para este caso são limitados, pois não consideram a estrutura de autocorrelação espacial, bem como a anisotropia presente.

Por isso, a utilização de procedimentos geoestatísticos na análise exploratória requer um estudo cuidadoso de como a variabilidade espacial da propriedade em estudo depende da orientação relativa das localizações dos dados observados. Se a dependência espacial entre observações em duas localizações quaisquer é função somente da distância entre essas localizações, então a variabilidade espacial é isotrópica, caso contrário é anisotrópica (CAMARGO et al., 2001).

As técnicas geoestatísticas podem ser usadas para descrever e modelizar padrões espaciais (variografia), para prever valores locais não amostrados

(krigagem), para obter a incerteza associada a um valor estimado em locais não amostrados (variância de krigagem) e para otimizar malhas de amostragem (ANDRIOTTI, 2003).

A Figura 27 apresenta o fluxograma da análise geoestatística realizada neste trabalho.

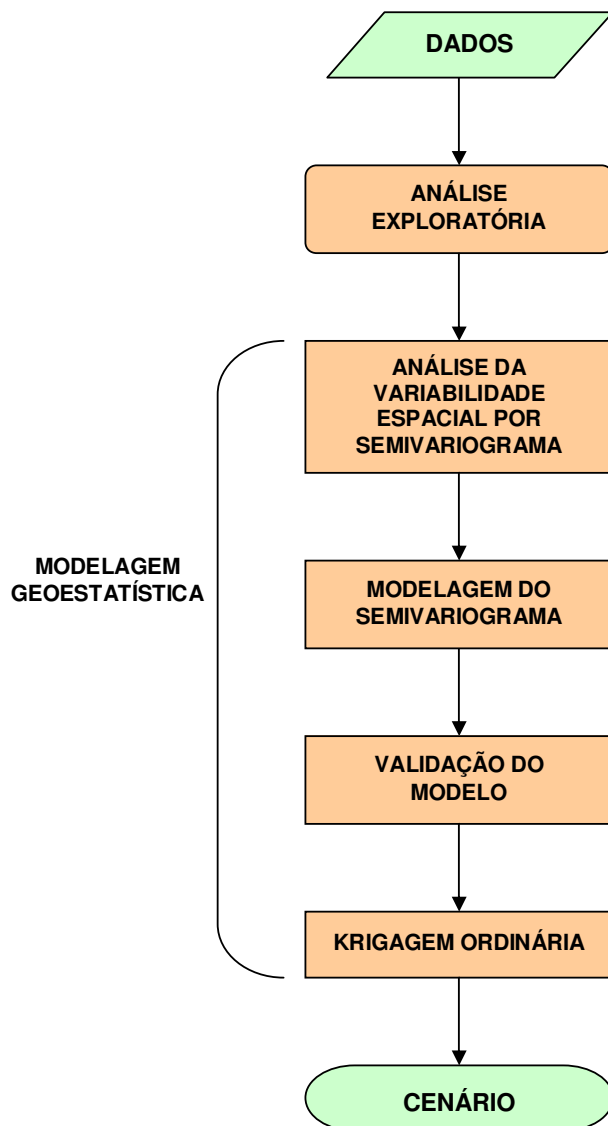


Figura 27 – Etapas da análise geoestatística.

5.5.1 Modelagem Geoestatística

O variograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem, que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (CAMARGO et al., 2001).

A bibliografia especializada utiliza extensivamente as palavras variograma e semivariograma, muitas vezes se referindo à mesma quantidade. O mais comum é a utilização da palavra variograma ($2\gamma(h)$) quando, na realidade, se está tratando de semivariograma ($\gamma(h)$) (ANDRIOTTI, 2003).

Segundo Landim (1998), se uma variável regionalizada $x(i)$ for coletada em diversos pontos i , o valor de cada ponto estará relacionado com valores obtidos a partir de pontos situados a uma certa distância Δh e a influência será tanto maior quanto menor for a distância entre os pontos. O grau de relação entre pontos numa certa direção pode ser expresso pela covariância, sendo os pontos regularmente espaçados por múltiplos inteiros de Δh .

Para uma distância Δh infinitamente pequena a covariância e a variância se tornam muito próximas, porém para Δh maiores, a covariância diminui enquanto a variância aumenta, ou seja, ocorre progressivamente maior independência entre os valores obtidos a distância cada vez maiores (LANDIM, 1998).

Sendo $x(1), x(2), \dots, x(i), \dots, x(n)$, realizações de uma variável regionalizada, a estimativa não tendenciosa da semivariância é dada por:

$$\gamma(h) = 1/2n \sum \{x(i+h) - x(i)\}^2 \quad (10)$$

Os parâmetros do semivariograma podem ser observados diretamente da Figura 28:

- *Alcance (a)*: distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente;
- *Patamar (C)*: é o valor do semivariograma correspondente a seu *alcance (a)*; mostra a variabilidade máxima entre pares de valores, isto é, a variância dos dados e, conseqüentemente, covariância nula;

- *Efeito Pepita* (C_0): idealmente, $\gamma(0) = 0$. Entretanto, na prática, à medida que h tende para 0 (zero), $\gamma(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado *Efeito Pepita* (C_0), que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Parte desta descontinuidade pode ser também devida a erros de medição (ISSAKS e SRIVASTAVA, 1989), mas é impossível quantificar se a maior contribuição provém de erros de medição ou da variabilidade de pequeno escala não captada pela amostragem;
- *Contribuição* (C_1): é a diferença entre o Patamar (C) e o Efeito Pepita (C_0).

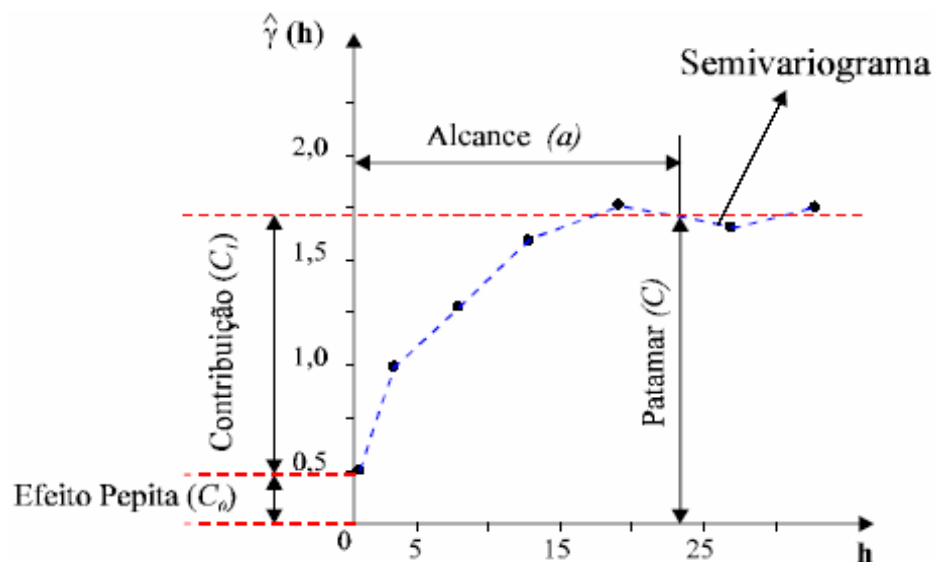


Figura 28 – Exemplo de semivariograma (CAMARGO et al., 2001).

O procedimento de ajuste do semivariograma experimental não é direto e automático, mas sim interativo, pois nesse processo o intérprete faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico. Dependendo do ajuste obtido, pode ou não redefinir o modelo, até obter um que seja considerado satisfatório.

Os modelos aqui apresentados são considerados modelos básicos, denominados de modelos isotrópicos por ISSAKS e SRIVASTAVA (1989). Estão divididos em dois tipos: modelos com patamar e modelos sem patamar. Modelos do primeiro tipo são referenciados na geoestatística como modelos transitórios. Alguns dos modelos transitivos atingem o *patamar* (C) assintoticamente. Para tais modelos,

o *alcance* (a) é arbitrariamente definido como a distância correspondente a 95% do patamar. Modelos do segundo tipo não atingem o patamar, e continua aumentando enquanto a distância aumenta. Tais modelos são utilizados para modelar fenômenos que possuem capacidade infinita de dispersão (CAMARGO et al., 2001). Os modelos transitivos mais utilizados são: modelo esférico (Sph), modelo exponencial (Exp) e modelo gaussiano (Gau). Estes modelos estão apresentados na Figura 29 com o mesmo *alcance* (a).

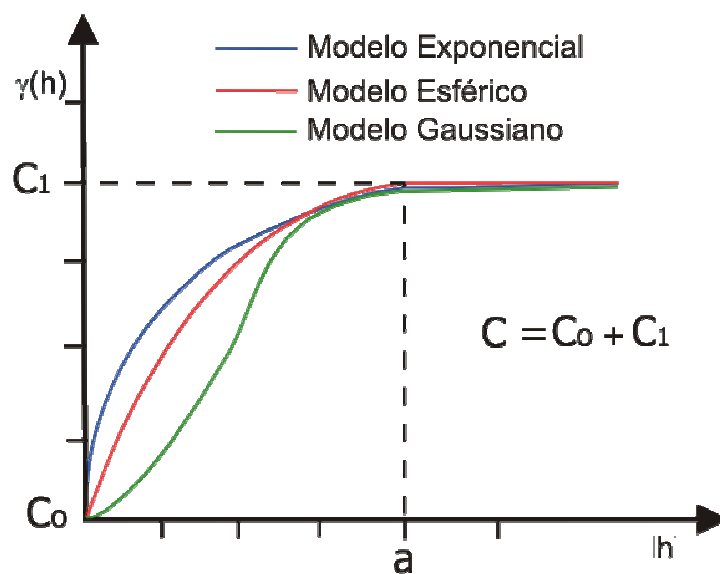


Figura 29 – Representação gráfica dos três modelos semivariográficos transitivos mais utilizados (ISAAKS e SRIVASTAVA,1989).

De uma forma geral, a metodologia geoestatística procura extrair, de uma aparente aleatoriedade dos dados coletados, as características estruturais do fenômeno regionalizante, ou seja, uma função da correlação ou da covariância entre os valores situados numa determinada vizinhança e direção no espaço amostrado. O método de estimação utilizado é o da krigagem.

A krigagem é um procedimento geoestatístico avançado que gera uma superfície calculada de um conjunto disseminado de pontos com valores de Z . Envolve uma investigação interativa do comportamento espacial do fenômeno representado pelos valores de Z , antes do usuário selecionar o melhor método de estimação e gerar a superfície contínua (KOZCIAK et al., 1999).

Na krigagem, o procedimento de interpolação é determinado através de pesos calculados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Além disso, a krigagem fornece em média, estimativas não tendenciosas e com variância mínima, o que significa que, em média, a diferença entre os valores estimados e os verdadeiros para o mesmo ponto deve ser nula; e a variância mínima significa que estes estimadores possuem a menor variância dentre todos os estimadores não tendenciosos (SANSONOWSKI, 2003).

O que diferencia a krigagem de outros métodos é a estimação de uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado (KOZCIAK et al., 1999).

As formas mais usuais de krigagem entre os métodos lineares são a *krigagem simples* e a *krigagem ordinária*.

Segundo Landim (1998), a *krigagem simples* é utilizada quando a média é assumida como estatisticamente constante para toda a área, diferentemente da krigagem ordinária, que considera a média flutuante ou móvel por toda a área.

Os mapas variográficos, a análise da variabilidade espacial por semivariograma e a modelagem do mesmo foi efetuada com o software VARIOWIN 2.21 de autoria de Pannatier (1996). O modelo variográfico foi exportado para o software SURFER versão 8 da *GOLDEN SOFTWARE*, para a realização da interpolação pelo método da *krigagem ordinária*.

6 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 ENSAIOS GEOELÉTRICOS REALIZADOS NA ÁREA DE ESTUDO

Foram realizadas 16 sondagens elétricas verticais de resistividade, em arranjo Schlumberger, com espaçamento dos eletrodos de corrente AB máximo de 200 m, durante o mês setembro de 2006. As SEVs foram distribuídas em toda área de estudo, sendo executados 7 ensaios na área interna do cemitério (SEV – 07, 08, 09, 10, 11, 12 e 13), e 9 ensaios na área externa do cemitério (SEV – 01, 02, 03, 04, 05, 06, 14, 15 e 16). Os ensaios realizados na área de estudo forneceram dados dos diversos materiais em subsuperfície, bem como as posições da zona saturada, permitindo assim a elaboração do modelo geológico final e do mapa de fluxo da água subterrânea. A Foto 4 ilustra uma execução de SEV no interior do cemitério.



Foto 4 – Execução de uma SEV no interior do cemitério.

Foram realizadas 12 linhas de imageamento elétrico 2D de resistividade, com o arranjo D-D, espaçamento dos eletrodos de 10 m e cinco níveis de investigação,

durante o mês de fevereiro de 2007. A distribuição das linhas de IE 2D predominou na área interna do cemitério, realizando uma malha de ensaios, mas foram executadas 02 linhas de IE na área externa (IE - 11 e 12), como parâmetro comparativo. As ruas do cemitério que nas quais foram realizadas as linhas de IE foram: rua A (IE – 04), rua B (IE – 03), rua C (IE – 02), rua D (IE – 01), rua E (IE – 05), rua F (IE – 06), rua G (IE – 07), rua H (IE – 08), rua I (IE – 09) e na continuação da rua I (IE – 10).

Com as linhas de IE tornou-se possível o mapeamento 2D por meio de mapas de resistividade dos materiais aterrados, heterogeneidades geológicas e principalmente anomalias condutivas que diz respeito a contaminação por necrochorume. A Foto 5 ilustra a execução de IE no interior do cemitério.



Foto 5 – Execução de uma linha imageamento elétrico 2D no interior do cemitério.

A localização desses ensaios geofísicos realizados na área de estudo é apresentada na Figura 30.

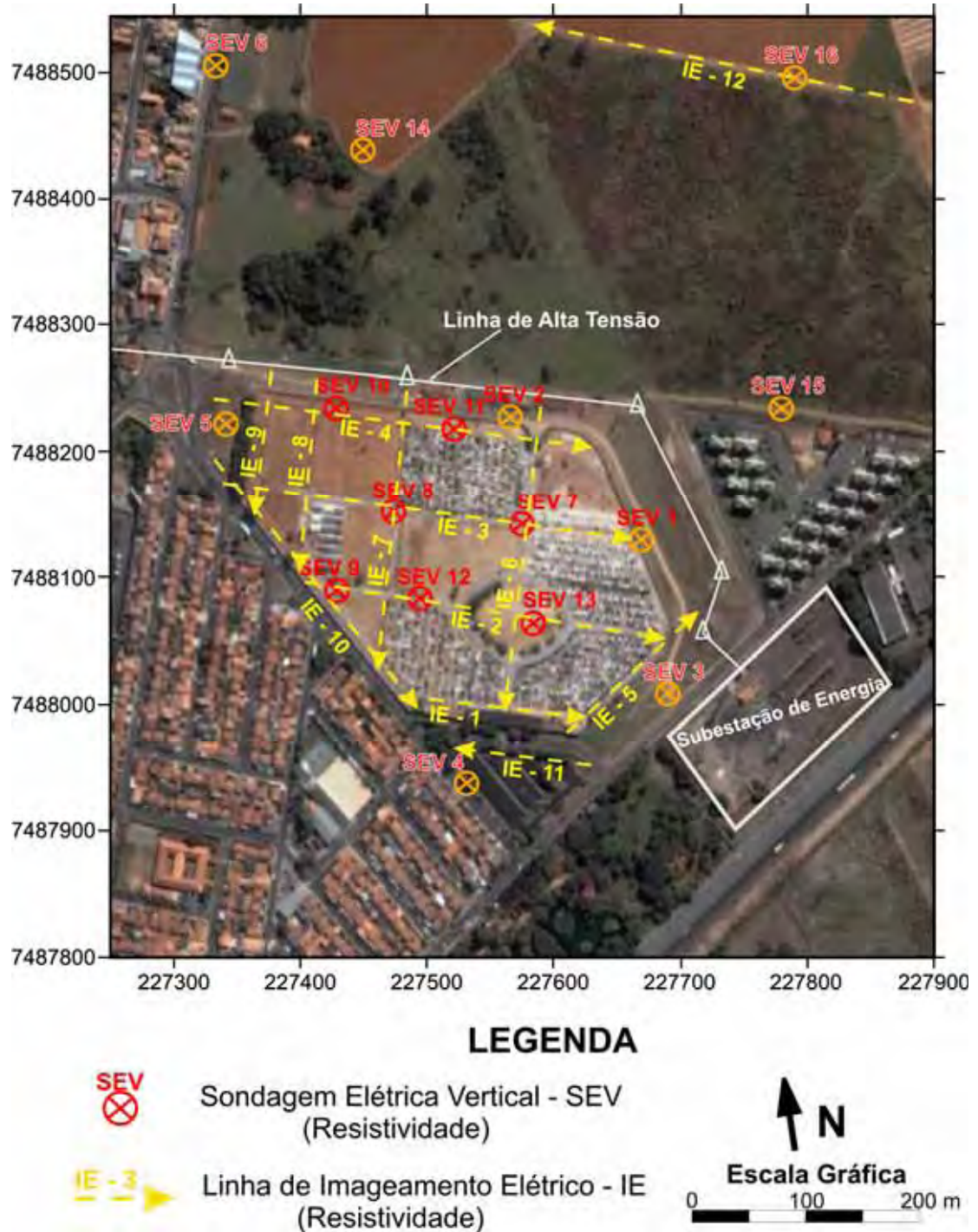


Figura 30 – Localização dos ensaios geoeletricos realizados na área de estudo.

6.2 INTERPRETAÇÃO DAS SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICAIS

As SEVs foram interpretadas primeiramente, de forma qualitativa, que segundo Rijo (1977) baseia-se em caracterizar domínios geoeletricos, observando a morfologia das curvas que representa as características comuns da geologia e hidrogeologia do local. A seguir, foi realizada uma interpretação quantitativa levando em consideração informações geológicas, hidrogeológicas e do possível contaminante, no caso o necrochorume.

No APENDICE deste trabalho, são apresentados os resultados obtidos nos levantamentos de campo das SEVs, que contém as curvas de campo e curvas do modelo teórico, com a resistividade e espessura de cada camada, e o modelo geoeletrico interpretado.

6.2.1 Interpretação Qualitativa

As SEVs executadas na presente pesquisa apresentaram um padrão morfológico de curva de resistividade aparente bem definido, com quatro tipos de curva: QH, KQ, QQH e KQH.

Segundo Braga (1997), em ensaios geofísicos pelo método da eletrorresistividade, desenvolvidos a partir da técnica da sondagem elétrica vertical – arranjo Schlumberger, executadas em áreas de ocorrência de rochas sedimentares, normalmente obtém-se para os níveis geoeletricos superficiais, uma curva de campo tipo “KQ”, onde $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$, mas podendo ocorrer com as três primeiras camadas curva de campo tipo “Q” ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$). O mesmo autor, concluiu em seus estudos que o padrão morfológico das curvas de resistividade aparente na Formação Corumbataí é “KQ”, “QQ”, “AKQ” e “HK”.

Conforme o modelo sugerido por Davino (1970), estes níveis geoeletricos correspondem à repartição da água no solo, ou seja, respectivamente, às zonas de evapotranspiração (ρ_1), retenção (ρ_2), capilar (ρ_3) e de saturação (ρ_4). Na Figura 31, é ilustrada a relação entre a variação da resistividade e as zonas de distribuição da água no solo.

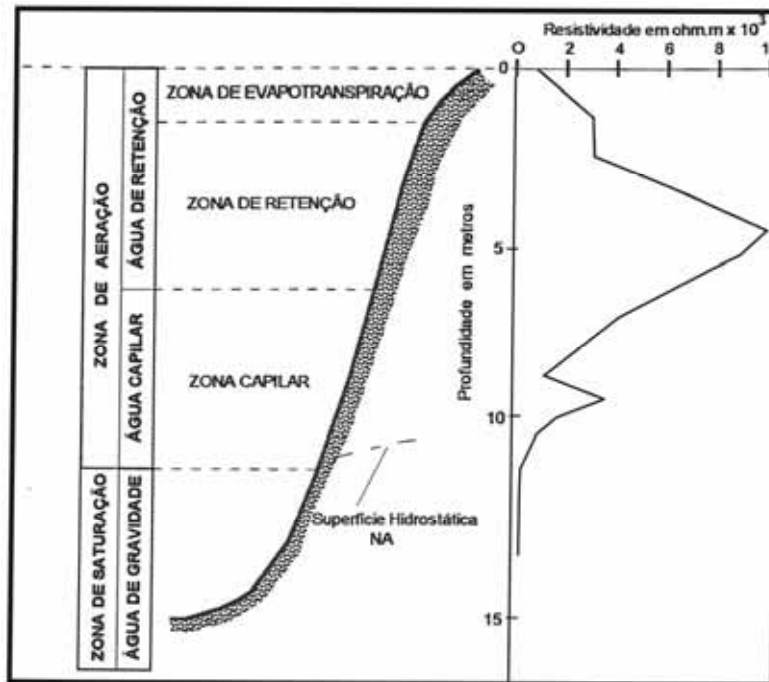


Figura 31 – Variação da resistividade em função da distribuição da água no solo (DAVINO, 1970).

Nas SEV – 01, 02, 03, 04 e 15 as curvas de resistividades aparentes são do tipo “QH”, apresentando quatro níveis geoeletricos sendo $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$. Nesses ensaios, o nível geoeletrico mais resistivo no início das curvas, reflete a sedimentos argilosos com baixa saturação, representando assim as zonas de evapotranspiração e capilar somente, havendo também um aumento gradativo da condutividade em profundidade devido a maior saturação e a presença da rocha argilosa, no caso o siltito argiloso da Formação Corumbataí, nos últimos níveis. Nesse tipo de curva a zona de evapotranspiração é menos espessa em relação à zona capilar, devido as característica físico-química dos solos presentes nestas áreas - no caso o Nitossolo Vermelho e o Argissolo Amarelo, conforme apresentado no mapa de solo (item 4.5 – Figura 8). Segundo a EMBRAPA (1999) estes dois tipos de solos apresentam acréscimo de argila do horizonte A (zona de evapotranspiração) para o horizonte B (zona de retenção e/ou capilar) – processo mais evidenciado nos Argissolos, aumentando a retenção de água nos microporos do horizonte B.

A Figura 32 apresenta o resultado da análise morfológica e modelo de distribuição da água da SEV – 15, que representa as curvas do tipo “QH”.

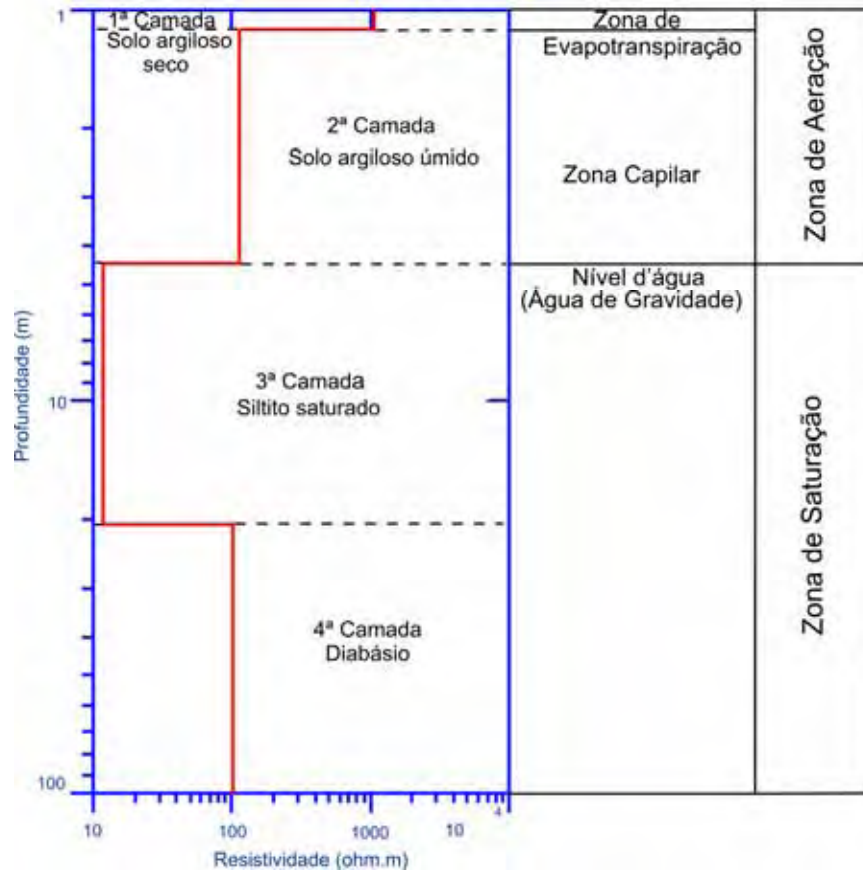


Figura 32 – Análise morfológica e modelo de distribuição da água das curvas tipo “QH”.

Nas SEV – 11 e 13 as curvas são do tipo “QQH”, com a $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4 < \rho_5$. Ambas as SEVs foram localizadas na área interna do cemitério, e por sua vez apresentaram altas resistividades no primeiro nível (zona de evapotranspiração), devido ao solo argiloso seco com textura mais grosseira - no caso o Argissolo Amarelo para a SEV – 11, já para a SEV – 13 a alta resistividade correlaciona-se com o aterro com material de textura arenosa. A zona capilar é mais espessa do que o primeiro nível, devido ao acréscimo de argila do nível superior, mantendo-se sempre úmido. Nos últimos níveis, já como zona saturada, as SEVs – 11 e 13 apresentam características morfológicas da Formação Corumbataí, indo do siltito

alterado até à rocha consistente, sendo que na SEV – 11 o último nível é caracterizado como sendo o diabásio correlato da Formação Serra Geral.

A Figura 33 apresenta o resultado da análise morfológica e modelo de distribuição da água da SEV – 11, que representa as curvas do tipo “QQH”.

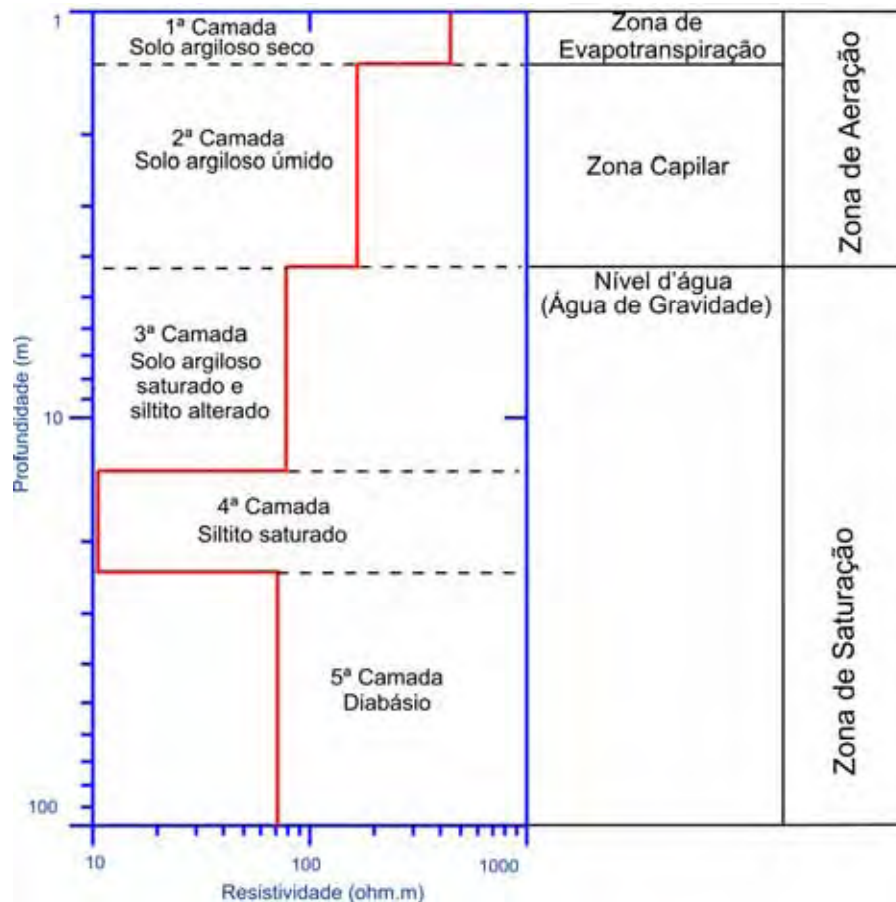


Figura 33 – Análise morfológica e modelo de distribuição da água das curvas tipo “QQH”.

As SEV – 06, 07, 08, 09, 10, 14 e 16, apresentaram curvas do tipo “KQH”, sendo $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4 < \rho_5$, mas a SEV – 09 apresentou seis níveis geoeletricos ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4 > \rho_5 < \rho_6$). Nestas sondagens, há um aumento gradativo da resistividade até no final da zona de retenção, mas após esta zona há um decréscimo abrupto na resistividade, principalmente para as SEVs executadas na área interna do cemitério, devido aos materiais aterrados, presentes acima da zona saturada. As SEV – 07 e 08 apresentaram valores baixos de resistividade no primeiro nível, correspondendo

uma anomalia condutiva, podendo ser correlacionado com a contaminação por necrochorume, sendo que este tópico será abordado mais adiante. As SEV – 09 e 10 apresentaram no segundo nível alta resistividade que não corresponde a sedimentos da Formação Corumbataí, mas sim tubulações e construções de concreto aterradas no local para a drenagem superficial, conforme é ilustrado na Figura 34, onde as mesmas ocultaram a zona capilar. A partir da zona saturada, todas as curvas apresentam características morfológicas da Formação Corumbataí.

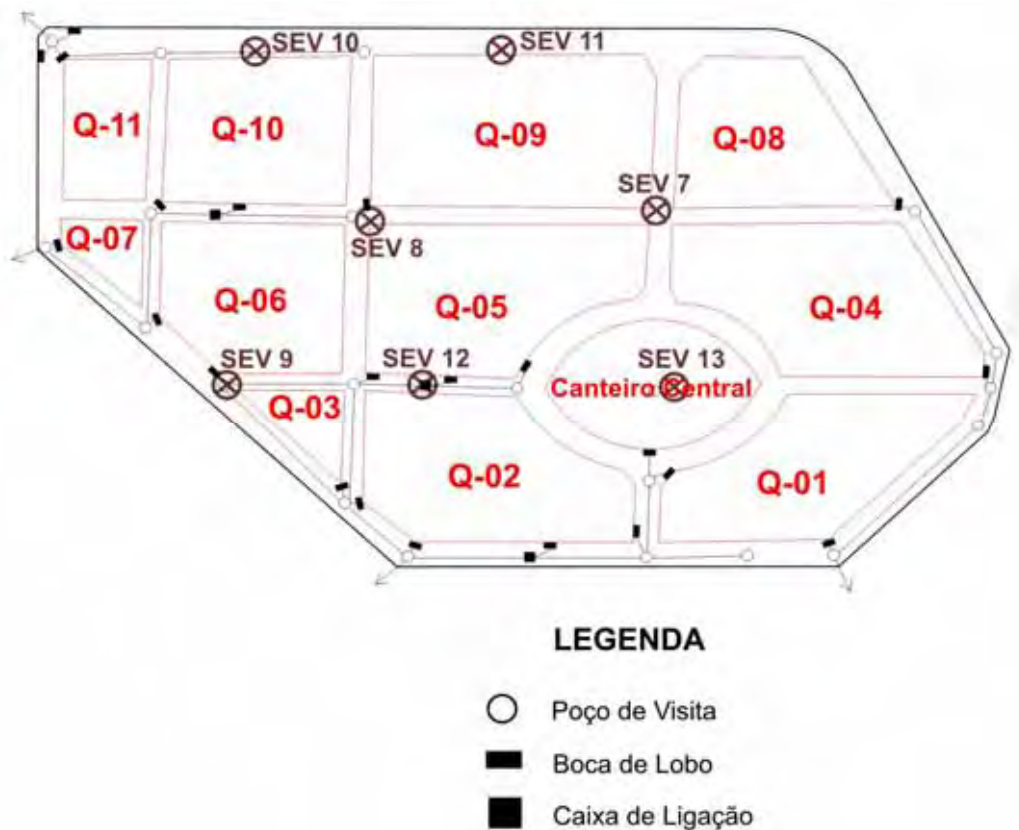


Figura 34 – Localização das construções e tubulações de concreto do sistema de drenagem superficial aterradas no cemitério.

A Figura 35 apresenta o resultado da análise morfológica e modelo de distribuição da água da SEV – 09, que representa as curvas do tipo “KQH”.

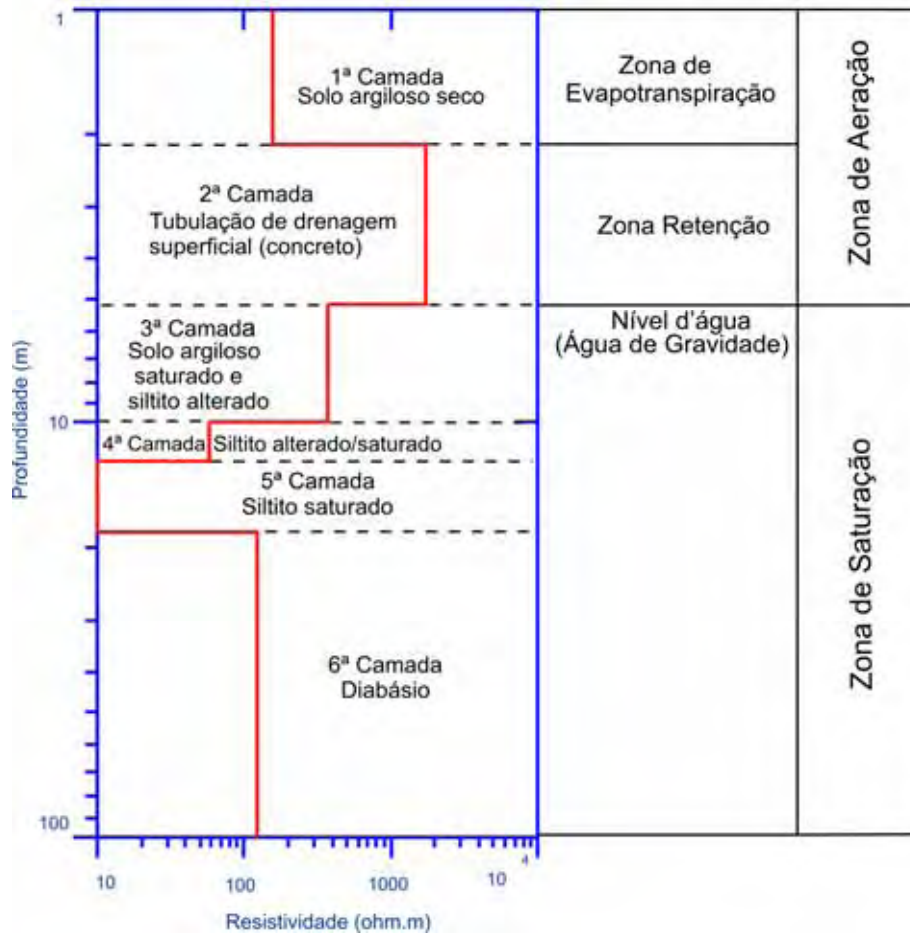


Figura 35 – Análise morfológica e modelo de distribuição da água das curvas tipo “KQH”.

Já as SEVs – 05 e 12, apresentaram curvas do tipo “KQ”, com quatro níveis geoeletricos ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$). Nesses ensaios, seguiu a padronização sugerida por Braga (1997) para curvas do tipo “KQ”:

- 1ª camada (ρ_1) e 2ª camada (ρ_2), correspondem ao solo seco (respectivamente, zonas de evapotranspiração e retenção);
- 3ª camada (ρ_3), correspondem aos sedimentos saturados;
- 4ª camada (ρ_4), correspondem aos sedimentos consistentes da Formação Corumbataí.

A SEV – 12 apresentou no segundo nível altíssima resistividade, que corresponde a caixa de concreto de ligação das tubulações subterrâneas de drenagem.

A Figura 36 apresenta o resultado da análise morfológica e modelo de distribuição da água da SEV – 05, que representa as curvas do tipo “KQ”.

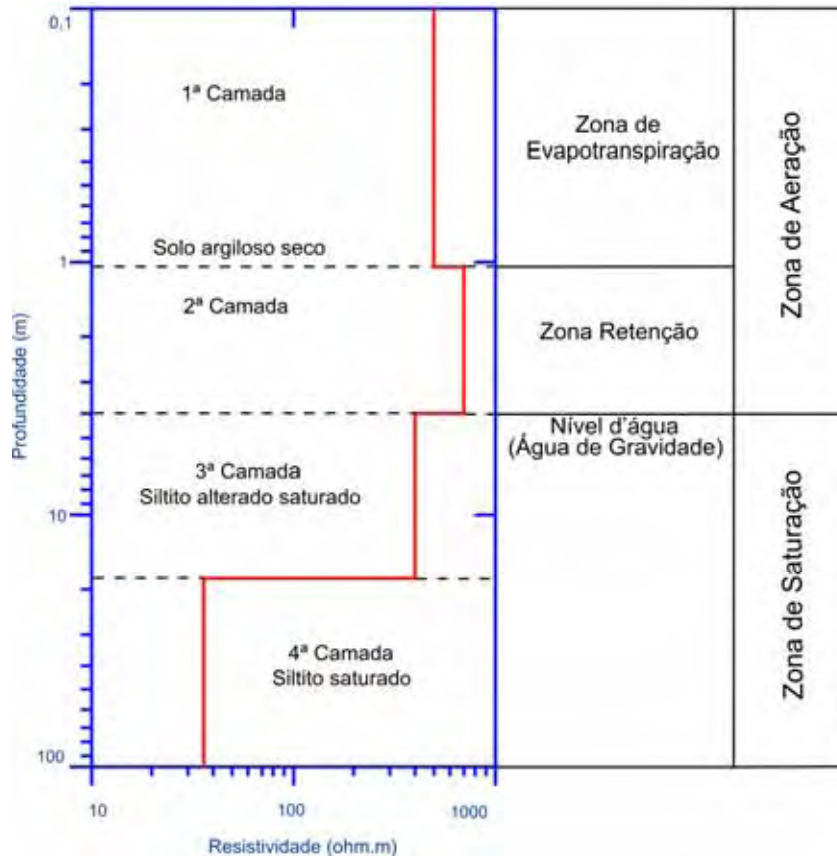


Figura 36 – Análise morfológica e modelo de distribuição da água das curvas tipo “KQ”.

Houve um aumento da resistividade no último nível geológico das SEV – 02, 03, 06, 08, 09, 11, 14, e 15, que corresponde ao diabásio, que é correlato à Formação Serra Geral.

6.2.2 Interpretação Quantitativa

As SEVs foram divididas inicialmente em dois grupos: **Grupo I** - ensaios realizados fora da área do cemitério do cemitério (SEV – 01, 02, 03, 04, 05, 06, 14, 15, 16) e **Grupo II** - ensaios realizados dentro do cemitério (SEV – 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13).

No Grupo I, há heterogeneidade em todas as partes das curvas, devido ao grande espaçamento na localização das SEVs, levantando diversos tipos de materiais geológicos em subsuperfície. Portanto, as SEVs a leste do cemitério 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.

Nas SEVs do Grupo II, há também uma heterogeneidade, devido ao maior ou menor acréscimo de resistividade aparente, de 10 a 3566 ohm.m, sendo os níveis mais condutivos interpretados como provável contaminação por necrochorume e mais resistivos como horizontes areno-argilosos, aterro com sedimentos arenosos, cascalho de calcário com sílex, resíduos de construção e demolição moído reciclado e tubulações e galerias de drenagem superficial. As curvas começam apresentar padronização na segunda parte em diante, em profundidade e resistividade a partir de 4 m e 180 ohm.m, respectivamente, interpretado como siltitos argilosos alterados e/ou fraturados e consistentes da Formação Corumbataí. No entanto, três ensaios apresentaram no seu último nível a partir de 18 m de profundidade, resistividade 15 vezes maior em relação ao nível geoeletrico anterior, correlacionadas com o diabásio.

Por meio da análise qualitativa de cada grupo, correlacionando a morfologia das curvas e a geologia local, optou-se por separá-las em três subgrupos: Grupo I (I-A, I-B e I-C); Grupo II (II-A, II-B e II-C).

A tabela 1 apresenta os valores de resistividade aparente dos níveis geoeletricos das SEVs realizadas na área de estudo, com sua classificação em grupos e subgrupos.

Tabela 1 – Valores de resistividade aparente dos níveis geoeletricos definidos pelas SEVs (em ohm.m), e suas respectivas classificação em grupos e subgrupos.

Sondagem	1º nível	2º nível	3º nível	4º nível	5º nível	6º nível	Grupo e subgrupo
SEV - 01	218,50	28,80	14,22*	43,90	-----	-----	I - A
SEV - 02	532,35	349,00	10,10*	210,20	-----	-----	I - A
SEV - 03	77,00	41,80	6,50*	152,10	-----	-----	I - A
SEV - 04	300,60	183,00	24,00*	54,05	-----	-----	I - A
SEV - 05	495,00	701,80	398,90*	35,80	-----	-----	I - C
SEV - 06	188,40	548,00	139,80	21,00*	215,30	-----	I - B
SEV - 07	27,10	690,00	110,50*	13,30	31,20	-----	II - A
SEV - 08	13,70	934,40	52,50*	11,40	258,90	-----	II - A
SEV - 09	157,90	1720,00	372,30*	58,10	10,10	125,00	II - A
SEV - 10	2071,10	3566,20	454,80*	18,20	85,00	-----	II - A
SEV - 11	627,30	320,10	239,90*	14,25	110,50	-----	II - B
SEV - 12	74,90	2355,10	108,90*	39,40	-----	-----	II - C
SEV - 13	448,55	166,50	77,60*	10,50	72,10	-----	II - B
SEV - 14	160,20	2960,70	155,70*	11,85	127,50	-----	I - B
SEV - 15	1070,00	115,10	11,75*	105,85	-----	-----	I - A
SEV - 16	430,35	1093,10	233,20*	10,10	52,80	-----	I - B

* nível geoeletrico que corresponde ao nível freático.

As SEVs do **subgrupo I-A**, apresentaram no seu primeiro nível geoeletrico resistividade de 77 a 1070 ohm.m, até 2 m de profundidade, interpretado como sendo solos argilo-siltoso e arenoso. No segundo e terceiro nível, o meio é mais condutivo com resistividade de até 6,5 ohm.m, devido aos materiais argilosos saturados. A SEV - 03 localizada a SE do cemitério apresentou nos três primeiros níveis valores baixos de resistividade aparente, que provavelmente seja contaminação por necrochorume. As SEV - 02, 03 e 15 apresentaram no último nível valores de resistividade acima de 105 ohm.m, correlacionando-se com a intrusão de diabásio.

As SEVs do **subgrupo I-B**, apresentaram valores de resistividade e características dos materiais geológicos no primeiro nível geoeletrico semelhantes ao subgrupo anterior, não apresentando indícios de contaminação em seus estratos, devido à localização das mesmas a montante do cemitério, sendo a SEV - 06 e 14 a NW e a SEV - 16 a NE. Há um estrato geoeletrico altamente resistivo no segundo e terceiro nível na profundidade de 1 a 4 m, com valores de resistividade que variam

de 140 a 2960,7 ohm.m, que representa materiais geológicos de textura mais grossa e granular, como solo argilo-arenoso e areno-argiloso, provenientes dos latossolos vermelhos, diferentemente dos nitossolos e argissolos, a SE e SW do cemitério respectivamente. Na zona saturada a resistividade se apresenta como materiais saturados da Formação Corumbataí. A alta resistividade no quinto nível geoeletrico das SEV – 06 e 14, com 215,3 e 127,5 ohm.m e 18,1 e 18,8 m de profundidade, respectivamente, caracteriza-se como o diabásio.

O **subgrupo I-C**, representado somente pela SEV – 05 e situado a SW do cemitério, apresentou valores de resistividade e características dos materiais geológicos no primeiro e segundo nível geoeletrico semelhantes ao subgrupo anterior. A alta resistividade no terceiro nível, com 398,9 ohm.m mesmo na zona saturada é devido ao solo argilo-arenoso de textura mais grosseira.

As Figuras 37, 38 e 39 e as Tabelas 2, 3 e 4 apresentam um exemplo de curva e modelo interpretado para cada subgrupo, do grupo I.

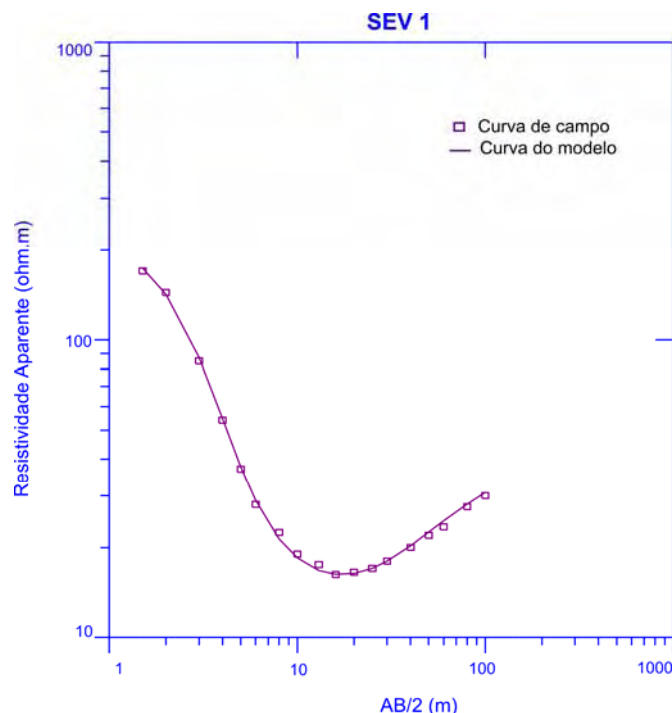


Figura 37 – Curva de campo e modelo da SEV - 01 pertencente ao subgrupo I-A.

Tabela 2 – Modelo geoeétrico proposto para a subsuperfície pela SEV - 01 do subgrupo I-A.

Nível Geoeétrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	218,50	1,20	-	545,00	Solo Argilo-silto- arenoso (seco)
2	28,80	2,30	1,20	543,80	Solo Argilo-silto- arenoso (úmido)
3*	14,20	18,50	3,50	541,50	- Nível d'Água
4*	43,90	-	22,00	522,70	Siltito argiloso

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

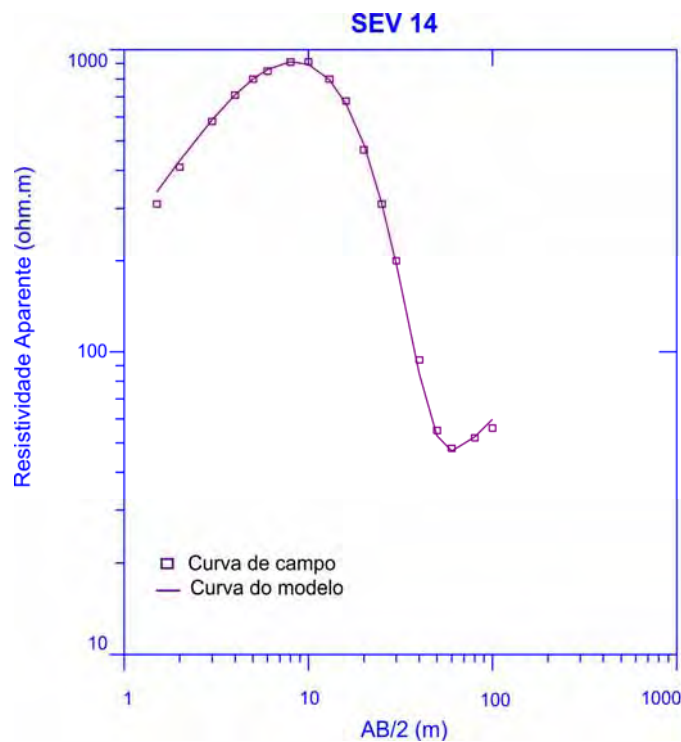


Figura 38 – Curva de campo e modelo da SEV - 14 pertencente ao subgrupo I-B.

Tabela 3 – Modelo geoeétrico proposto para a subsuperfície pela SEV - 14 do subgrupo I-B.

Nível Geoeétrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	160,20	0,60	-	548,00	Solo Argilo-areno-siltoso (seco)
2	2960,70	2,80	0,60	547,40	Solo Argilo-areno-siltoso (seco)
3	155,70	3,80	3,40	544,60	Solo Argilo-areno-siltoso -Nível d'Água
4*	11,85	11,60	7,20	540,80	Siltito argiloso
5**	127,50	-	18,80	529,20	Diabásio

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

** Nível relacionado ao contato com a intrusão de diabásio (Intrusivas Básicas).

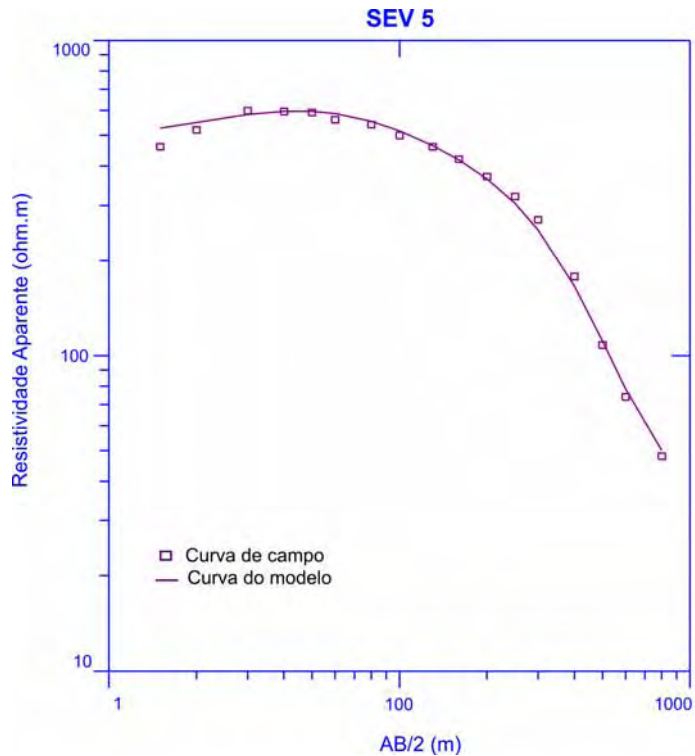


Figura 39 - Curva de campo e modelo da SEV - 05 pertencente ao subgrupo I-C.

Tabela 4 - Modelo geoeletrico proposto para a subsuperfície pela SEV - 05 do subgrupo I-C.

Nível Geoeletrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	495,00	1,00	-	541,00	Solo Argilo-areno-siltoso (seco)
2	701,80	3,00	1,00	540,00	
3*	398,90	13,70	4,00	537,00	-Nível d'Água Siltito argiloso alterado
4*	35,80	-	17,70	523,30	Siltito argiloso

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

A Tabela 5 apresenta o modelo geoeletrico final proposto pelo GRUPO I, correlacionando os estratos geoeletricos dos modelos dos subgrupos I-A, I-B e I-C.

Tabela 5 – Modelo geoeétrico proposto para a área externa do cemitério pelo GRUPO I.

Zona	Descrição dos Materiais	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)
Aeração	Solo Argilo-silto-arenoso	$28 \leq \rho \leq 220$	$1,20 \leq E \leq 5,00$
	Solo Argilo-areno-siltoso	$138 \leq \rho \leq 1093$	$0,60 \leq E \leq 4,30$
	Solo Areno-argilo-siltoso	$1100 \leq \rho \leq 2960$	$E \leq 2,80$
Saturação	Siltito argiloso alterado e/ou fraturado (Fm. Corumbataí)	$24 \leq \rho \leq 398$	$13,70 \leq E \leq 21,20$
	Sedimentos Argilo-siltosos (Fm. Corumbataí) com anomalia condutiva (necrochorume)	$\rho < 10$	$E \leq 20,00$
	Siltito argiloso consistente (Fm. Corumbataí)	$10 \leq \rho \leq 53$	$10,30 \leq E \leq 23,00$
	Diabásio (Intrusivas Básicas – Fm. Serra Geral)	$\rho > 105$	-----

Bem como o Grupo I e seus respectivos subgrupos, as SEVs do Grupo II com seus subgrupos, obtidas nos ensaios realizados dentro do cemitério, possibilitaram a caracterização das diversas camadas do solo, da posição do nível freático, assim como outras informações geológicas.

Nas SEVs do **subgrupo II-A**, há heterogeneidade nos estratos geoeétricos interpretados até a zona saturada. As SEV – 07, 08 apresentaram no seu primeiro nível, até 0,73 m de profundidade, um estrato geoeétrico condutivo com resistividade inferior a 30 ohm.m, que provavelmente seja vazamentos de necrochorume dos jazigos. Já as SEV – 09 e 10 apresentaram no primeiro nível resistividades de 157,9 e 2071,1 ohm.m, correspondendo a solo argilo-arenoso seco e solo areno-argiloso seco, respectivamente. No segundo nível, com resistividade de 690 e 934,4 ohm.m para as SEV – 07 e 08, respectivamente, foi interpretado como solo argilo-arenoso com aterro de cascalho de rocha e resíduos de construção civil moído reciclado e, a SEV – 10 com resistividade de 3566 ohm.m foi interpretado como solo areno-argiloso. Pela localização da SEV – 09 e o crescimento da resistividade do primeiro nível para segundo nível, a resistividade de 1720 ohm.m em 2 m de profundidade, foi interpretada como sendo tubulação e o poço de visita presente abaixo do local de execução do ensaio, conforme apresentado na Figura 34. A partir da zona saturada, inicia certa homogeneidade nos valores de resistividade e estratos geoeétricos presentes, representados pelos materiais da

Formação Corumbataí. As SEV – 08 e 09 apresentaram resistividades acima de 125 ohm.m a partir de 18 m de profundidade, interpretado como sendo o diabásio.

O **subgrupo II-B**, contém no seu primeiro e segundo nível, até 4,2 m de profundidade, com resistividade de 166 a 627 ohm.m, interpretado como solo argilo-arenoso seco e para o primeiro nível da SEV - 13 solo argilo-arenoso com aterro de resíduo de construção moído reciclado. No terceiro, quarto e para a SEV – 13 o quinto nível os valores de resistividade representam os materiais da Formação Corumbataí com resistividade de 241 a 77 ohm.m que correspondem ao siltito argiloso alterado e/ou fraturado, e as resistividades de 14 a 10 ohm.m que representam siltito consistente saturado. A SEV – 11 apresentou no quinto nível crescimento na resistividade com 110,5 ohm.m, interpretado como sendo o diabásio.

O **subgrupo II-C**, representado somente pela SEV – 12, apresentou no primeiro nível até 2,2 m de profundidade valor baixo na resistividade, com 75 ohm.m, interpretado como uma camada de anomalia condutiva do vazamento de necrochorume dos jazigos das quadras a montante, pois essa área apresenta solo argilo-arenoso com resistividade entre 150 e 650 ohm.m. A resistividade de 2355 ohm.m no segundo nível, representa a caixa de ligação de concreto que interliga as tubulações do sistema de drenagem superficial, apresentado na Figura 34. No terceiro nível, com resistividade de 108 ohm.m, e no quarto nível com resistividade de 39 ohm.m, foram interpretados como sendo siltito argiloso alterado e siltito argiloso consistente, respectivamente.

As Figuras 40, 41 e 42 e as Tabelas 6, 7 e 8 apresentam um exemplo de curva e modelo interpretado para cada subgrupo.

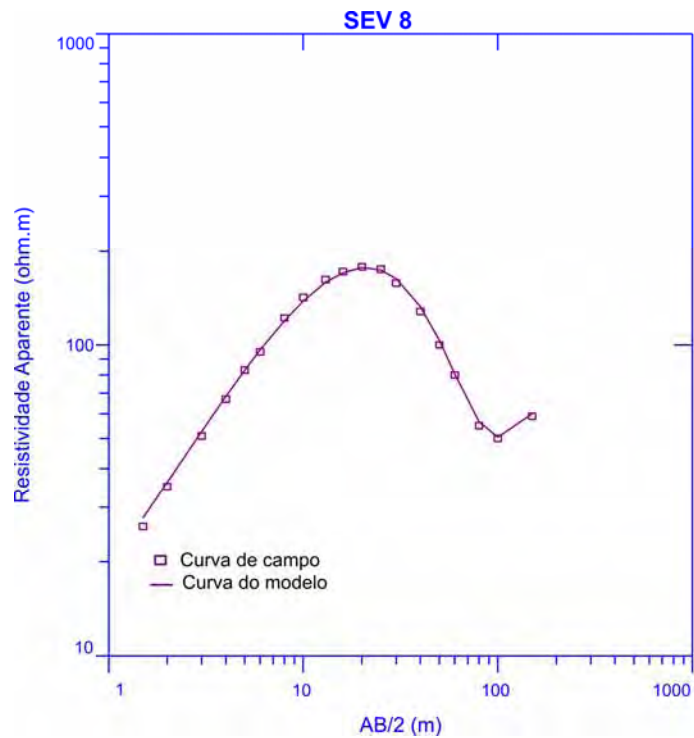


Figura 40 – Curva de campo e modelo da SEV - 08 pertencente ao subgrupo II-A.

Tabela 6 - Modelo geoeletrico proposto para a subsuperfície pela SEV - 08 do subgrupo II-A.

Nível Geoeletrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	13,70	0,73	-	545,00	Anomalia Condutiva (contaminação?)
2	934,40	4,32	0,73	544,27	Solo Argilo-areno-siltoso + aterro com cascalho de rocha
3*	52,50	1,95	5,05	539,95	- Nível d'Água Siltito argiloso alterado
4*	11,40	21,90	7,00	538,00	Siltito argiloso
5**	258,90	-	28,90	516,10	Diabásio

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

** Nível relacionado ao contato com a intrusão de diabásio (Intrusivas Básicas).

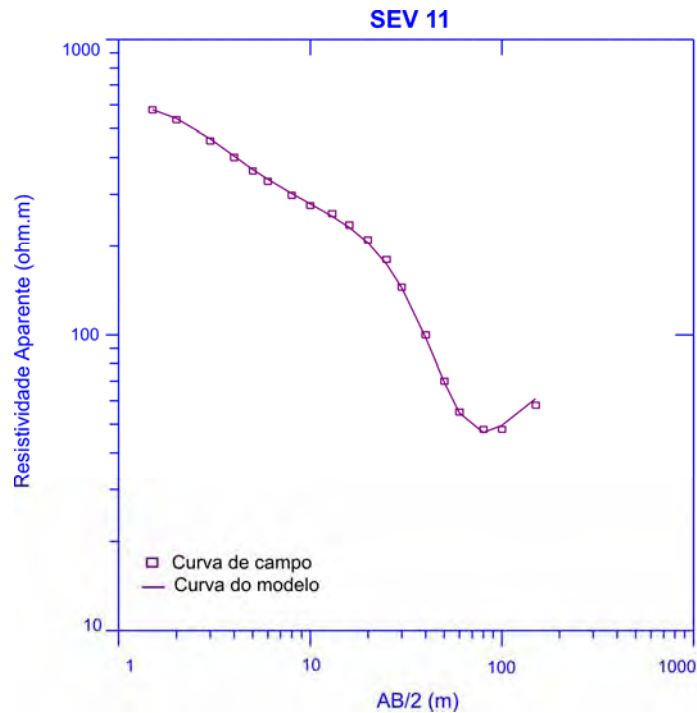


Figura 41 – Curva de campo e modelo da SEV - 11 pertencente ao subgrupo II-B.

Tabela 7 - Modelo geoeletrico proposto para a subsuperfície pela SEV - 11 do subgrupo II-B.

Nível Geoeletrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	627,30	1,30	-	548,00	Solo Argilo-areno-siltoso (seco)
2	320,10	2,80	1,30	546,70	Solo Argilo-areno-siltoso (úmido)
3	239,90	14,00	4,10	543,90	-Nível d'Água Siltito argiloso alterado e/ou fraturado
4*	14,25	18,00	18,10	529,90	Siltito argiloso
5**	110,50	-	36,10	511,90	Diabásio

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

** Nível relacionado ao contato com a intrusão de diabásio (Intrusivas Básicas).

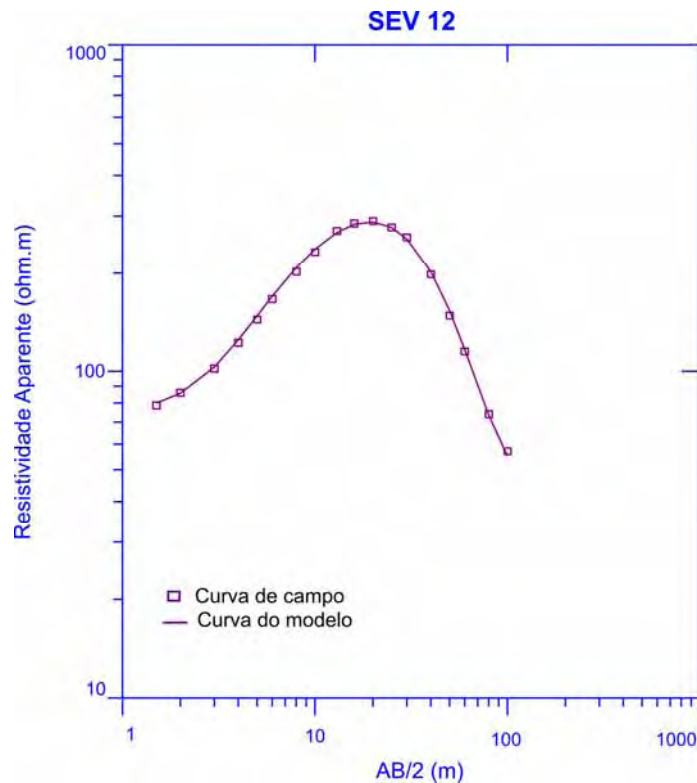


Figura 42 – Curva de campo e modelo da SEV - 12 pertencente ao subgrupo II-C.

Tabela 8 - Modelo geoeletrico proposto para a subsuperfície pela SEV - 12 do subgrupo II-C.

Nível Geoeletrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	74,90	2,20	-	542,50	Anomalia Condutiva (contaminação?)
2	2355,10	2,05	2,20	540,30	Caixa de ligação das tubulações (concreto)
3*	108,90	10,75	4,25	538,25	-Nível d'Água Siltito argiloso alterado
4*	39,40	-	15,00	527,50	Siltito argiloso

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

A Tabela 9 apresenta o modelo geoeletrico final proposto pelo GRUPO II, correlacionando os estratos geoeletricos dos modelos dos subgrupos II-A, II-B e II-C.

Tabela 9 – Modelo geoeétrico proposto para a área interna do cemitério pelo GRUPO II.

Zona	Descrição dos Materiais	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)
Aeração	Solo Argilo-areno-siltoso	$157 \leq \rho \leq 628$	$1,30 \leq E \leq 2,80$
	Solo Areno-argilo-siltoso	$2070 \leq \rho \leq 2960$	$E \leq 2,35$
	Solo Argilo-areno-siltoso com anomalia condutiva (necrochorume)	$13 \leq \rho \leq 75$	$0,45 \leq E \leq 0,75$
	Solo Areno-argilo-siltoso + aterro de sedimentos arenosos	$448 \leq \rho \leq 935$	$1,35 \leq E \leq 4,32$
	Tubulações e caixas de concreto de drenagem aterradas na área	$934 \leq \rho \leq 1720$	$2,05 \leq E \leq 3,10$
Saturação	Solo Argilo-areno-siltoso	$110 \leq \rho \leq 373$	$4,25 \leq E \leq 4,80$
	Siltito argiloso alterado e/ou fraturado (Fm. Corumbataí)	$52 \leq \rho \leq 455$	$1,95 \leq E \leq 10,75$
	Siltito argiloso consistente (Fm. Corumbataí)	$10 \leq \rho \leq 85$	$5,85 \leq E \leq 21,90$
	Diabásio (Intrusivas Básicas – Fm. Serra Geral)	$\rho > 110$	-----

6.2.3 Mapa Potenciométrico

Com a interpretação qualitativa e quantitativa das 16 SEVs realizadas na área de estudo, foram definidas as relações dos parâmetros elétricos com o meio geológico e anomalias condutivas provenientes de uma provável contaminação por necrochorume e, principalmente, a posição da zona saturada. Por meio das profundidades da zona saturada obtidas pelas SEVs e por uma sondagem a trado realizada pela Prefeitura Municipal de Piracicaba no interior do Zoológico Municipal, obteve-se o mapa potenciométrico da área do cemitério de Vila Rezende e seu entorno, conforme apresentado na Figura 43, havendo dois sentidos de fluxo subterrâneo, um para SW e outro para SE.



Figura 43 – Mapa potenciométrico da área do cemitério de Vila Rezende.

6.3 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DO IMAGEAMENTO ELÉTRICO

A análise das medidas obtidas com os caminhamentos elétricos foi realizada de forma qualitativa e quantitativa. O procedimento de análise qualitativa e quantitativa foi realizado com os subsídios de informações geológicas e hidrogeológicas da área, e informações obtidas no projeto de drenagem superficial e subterrânea realizado no cemitério em 1987.

No processo de modelagem das seções geoeletricas do IE, foi priorizado o modelo que corroborava com as informações geológicas, hidrogeológica e com os modelos das SEVs realizadas no local.

Com os objetivos de mapear bidimensionalmente os materiais em subsuperfície e a provável pluma de contaminação por necrochorume na área em estudo, foram executadas e interpretadas 12 linhas de IE, sendo as linhas de IE – 11 e 12 na área externa e o restante das linhas na área interna do cemitério. A escolha da localização das linhas de IE baseou-se nos modelos geoeletricos propostos por meio das SEVs realizadas, bem como o sentido do fluxo subterrâneo com o mapa potenciométrico.

As linhas de IE – 01, 02, 03 conforme apresentado na Figura 44, apresentam altos valores de resistividade aparente entre 700 e 2600 ohm.m associados a 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-arenosa. O intervalo de resistividade, de 50 a 150 ohm.m correlaciona-se aos siltitos argilosos da Formação Corumbataí. No entanto, nessas seções geoeletricas, há também baixos valores de resistividade aparente (abaixo de 75 ohm.m) próximo a superfície, acima do nível freático correspondendo como uma anomalia condutiva, proveniente da influência do vazamento de necrochorume dos jazigos a montante. Essas anomalias ficam evidenciadas na linha de IE – 01 entre 55 e 68 m a jusante da quadra Q – 02 e a partir de 110 m a jusante da quadra Q – 01. Na linha de IE – 02 entre 70 e 145 m a jusante das quadras Q – 06 e 05 e a partir de 200 m no canteiro central e a jusante da quadra Q – 04. E na linha de IE – 03 entre 155 e 225 m e a partir de 195 m a jusante das quadras Q – 09 e 08, respectivamente.

Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP

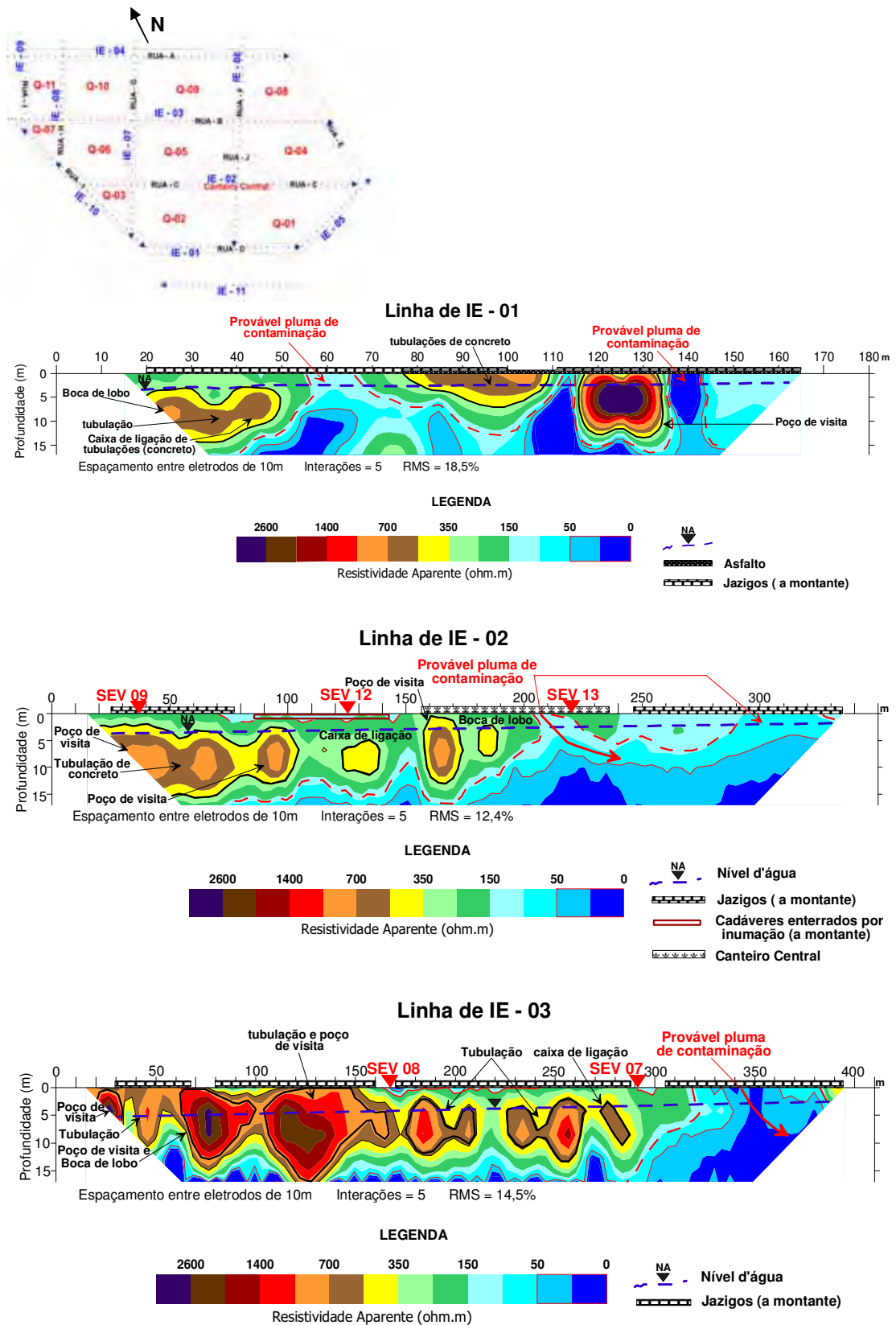


Figura 44 – Seções geolétricas: linhas de IE – 01, 02 e 03.

Observando as linhas de IE – 01, 02 e 03, encontram-se valores de resistividade menores a partir do terço final das seções, mais precisamente a jusante das quadras Q – 01, 04 e 08 onde os solos são mais argilosos, portanto mais condutivos. Por meio das informações das SEV – 07 e 01 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, portanto, é mais vulnerável à contaminação, pois a zona não-saturada desempenha um papel de filtro dos contaminantes biológicos.

As linhas de IE – 04, 05, 06 conforme apresentado na Figura 45, apresentam altos valores de resistividade aparente entre 700 e 2600 ohm.m associados a tubulações e outras construções de concreto para drenagem superficial aterradas sob a linha de IE – 04 e 06, e solo areno-argiloso na linha de IE – 04 (entre 70 e 150 m). Os valores de resistividade entre 150 e 700 ohm.m, correlaciona-se com uma camada de solo argilo-arenosa. O intervalo de resistividade, de 50 a 150 ohm.m correlaciona-se aos siltitos argilosos da Formação Corumbataí.

Nas linhas de IE – 05 e 06, há baixos valores de resistividade aparente (abaixo de 75 ohm.m) próximo a superfície, acima do nível freático correspondendo como uma anomalia condutiva, proveniente da influência do vazamento de necrochorume dos jazigos a montante. Essas anomalias ficam evidenciadas na linha de IE – 05 entre 22 e 48 m a jusante da quadra Q – 01 e a partir de 83 m no lado de fora do cemitério; na linha de IE – 06 em vários pontos, sendo mais evidente a partir 200 m próximo às quadras Q – 04 e 01. Não há anomalia condutiva proveniente de necrochorume na linha de IE – 04, devido à inexistência de fontes de contaminação (jazigos) a montante, e sim baixa resistividade pela saturação do material geológico, pois a profundidade do nível freático nessa região é baixa.

Como os ensaios de imageamento elétrico foram realizados no período de chuva, há um aumento, nesta época, da quantidade de água infiltrada tanto nos jazigos seja subterrâneo ou acima do nível do terreno, conforme observado na Foto 6, bem como no solo, aumentando assim o volume de necrochorume gerado e a água no aquífero local.

Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP

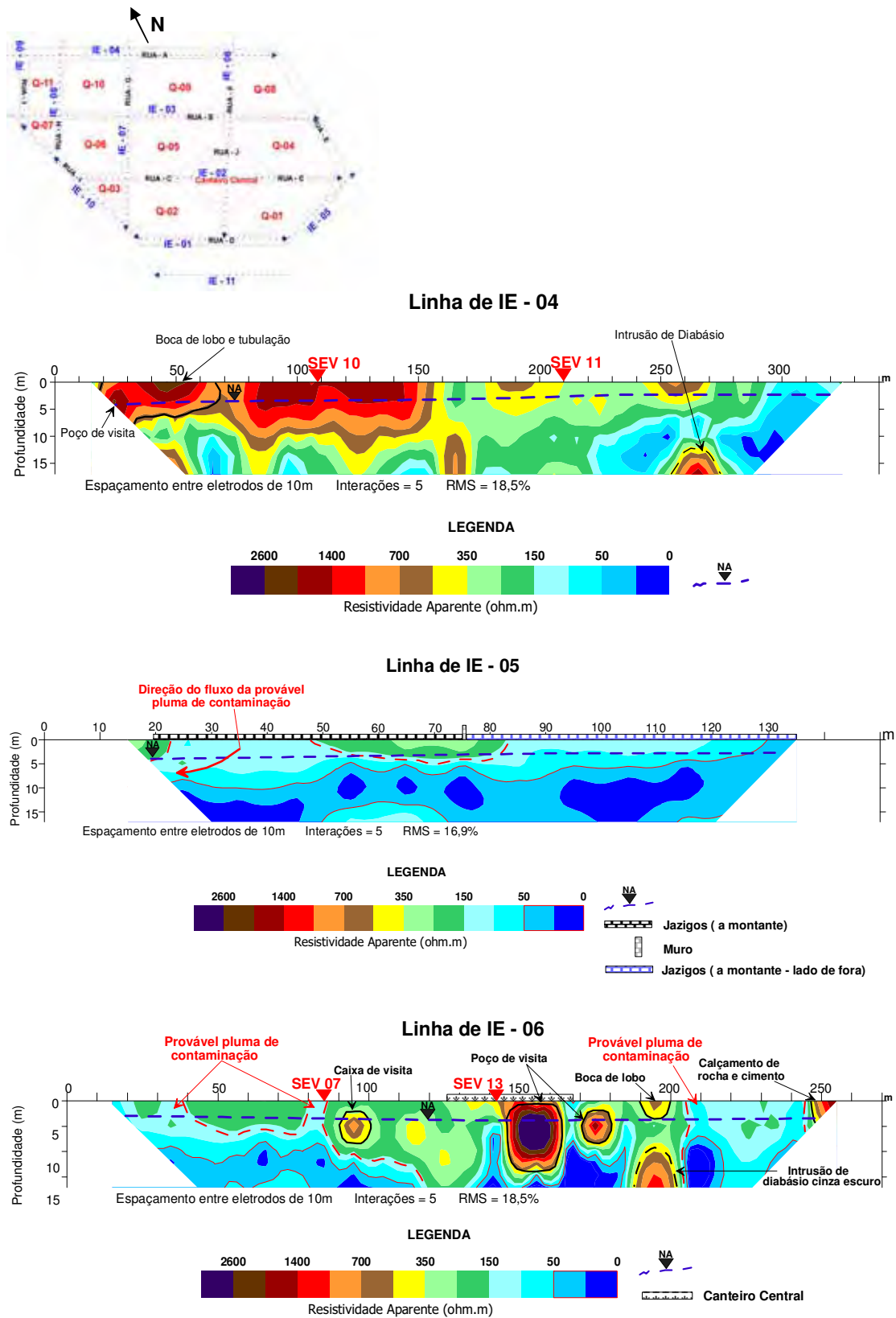


Figura 45 – Seções geoeletricas: linhas de IE – 04, 05 e 06.



Foto 6 – Jazigo subterrâneo e jazigo acima do nível do terreno presentes na quadra Q – 01.

As prováveis plumas de contaminação têm o mesmo sentido do fluxo da água subterrânea a SW e SE.

As linhas de IE – 01, 02, 03, 04, 05, 11 e 12 são perpendiculares ao fluxo subterrâneo (W – E), os restantes das linhas estão no mesmo sentido do fluxo (N – S).

A parte final das linhas de IE – 02, 03 e toda seção 05, mas precisamente a jusante das quadras Q – 01, 04 e 08, apresentaram em todas as camadas resistividades 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 de Vila Nova Cachoeirinha na Grande São Paulo, constataram que há aumento da condutividade elétrica no lençol freático próximos de sepultamentos recentes. Migliorini (1994) no cemitério Vila Formosa na Grande São Paulo e Almeida e 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 Q – 01, 04 e 08 há presença de jazigos acima do nível do terreno com até quatro gavetas, que são jazigos familiares 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.

Barbosa e Coelho (2005) afirmam que os sais presentes no necrochorume (Cl^- , HCO_3^- , Ca^{+2} , Na^+) aumentam drasticamente a condutividade elétrica da água. Isso pode ser confirmado em toda seção IE - 05 que é perpendicular ao fluxo subterrâneo e em sentido transversal as seções de IE – 01, 02 e 03.

As linhas de IE – 07, 08, 09 conforme apresentado na Figura 46, apresentam altos valores de resistividade aparente entre 700 e 2600 ohm.m associados a tubulações e outras construções de concreto para drenagem superficial aterradas. Os valores de resistividade entre 150 e 700 ohm.m, correlacionam-se com uma camada de solo argilo-arenosa. O intervalo de resistividade, de 50 a 150 ohm.m correlaciona-se aos siltitos argilosos da Formação Corumbataí. No entanto, na linha de IE – 07, há 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 Foto 7 mostra a execução da linha de IE – 07 entre as quadras Q – 09 e 10, 05 e 06, 02 e 03. As quadras Q – 02 e 09 apresentam jazigos acima do nível do terreno de até 3 gavetas, as quadras Q – 03, 05 predominam covas simples, e metade da área da quadra Q – 06 é cova simples e outra metade jazigos acima do nível do terreno de até 4 gavetas.

Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP

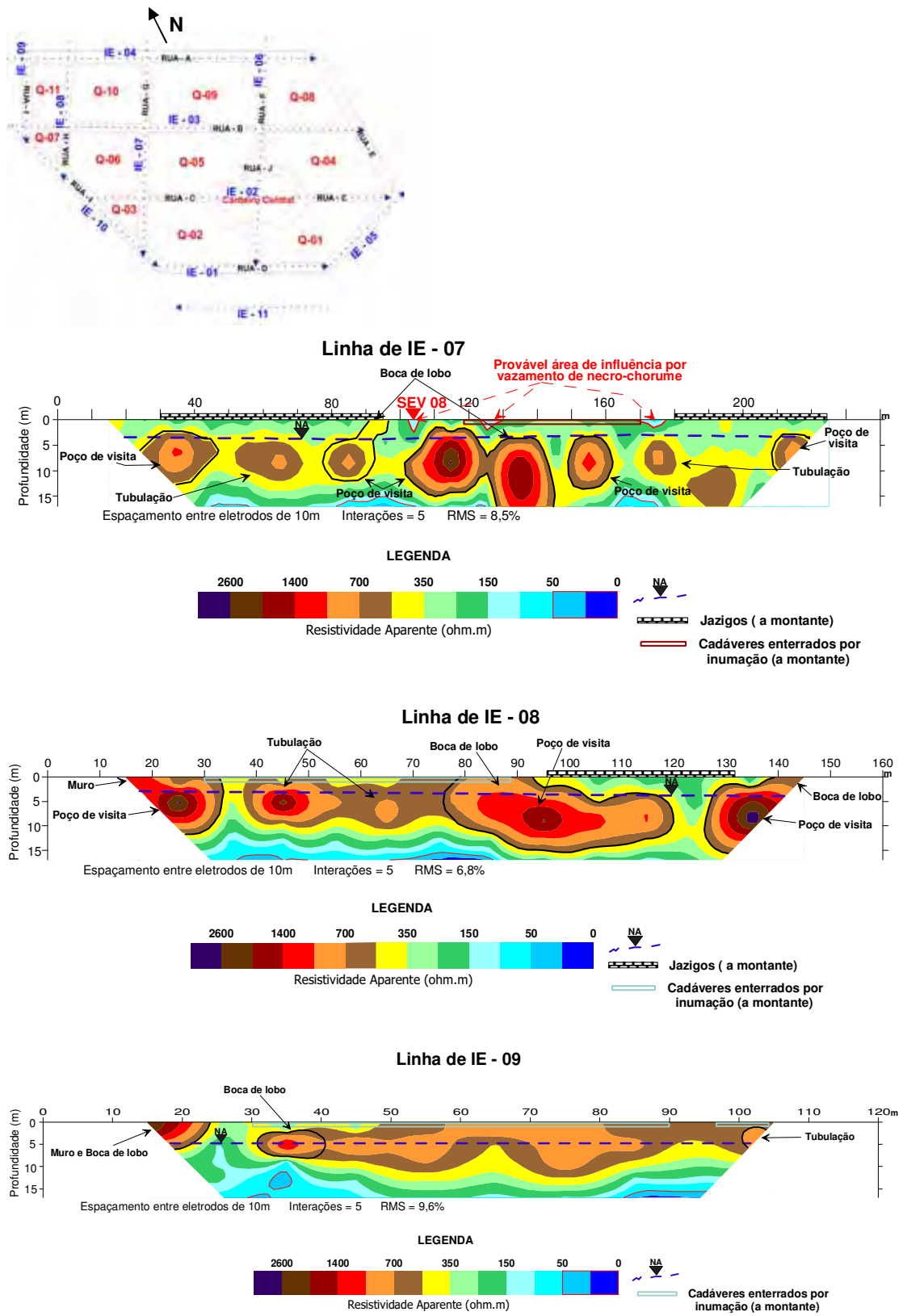


Figura 46 – Seções geoeletricas: linhas de IE – 07, 08 e 09.

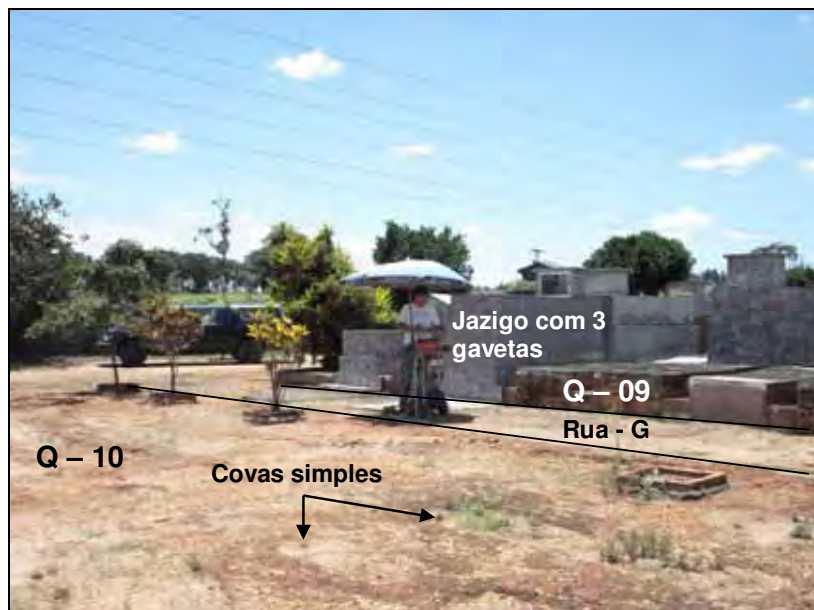


Foto 7 – Linha de IE – 07 executada entre as quadras Q – 09 e 10.

As áreas das quadras Q - 07, 10 e 11 onde há covas simples com cadáveres enterrados sem proteção de alvenaria somente com solo, isto é, sepultamento por processo de inumação, não apresentaram anomalias condutivas, devido ao tempo de encerramento desse processo, quase 10 anos. Outra explicação da não ocorrência de anomalias condutivas, é que nessas áreas o processo de sepultamento é pouco intenso, permanecendo meses e até anos sem ocorrer algum, não havendo assim a renovação da fonte de contaminação, ocorrendo na área o processo de recuperação ambiental natural. Nas áreas das quadras Q – 05, 06 e 03 também há covas simples com cadáveres enterrados por inumação e é raro a ocorrência de processo de sepultamento, mas essas quadras apresentaram anomalias condutivas, que serão comentadas adiante.

As linhas de IE – 10, 11 e 12 conforme apresentado na Figura 47, apresentam altos valores de resistividade aparente entre 700 e 2600 ohm.m associados a tubulações e outras construções de concreto para drenagem superficial aterradas no local, e a solos areno-argilosos. Os valores de resistividade entre 150 e 700 ohm.m, correlacionam-se com uma camada de solo argilo-arenosa. O intervalo de resistividade, de 50 a 150 ohm.m correlaciona-se aos siltitos argilosos da Formação Corumbataí.

Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP

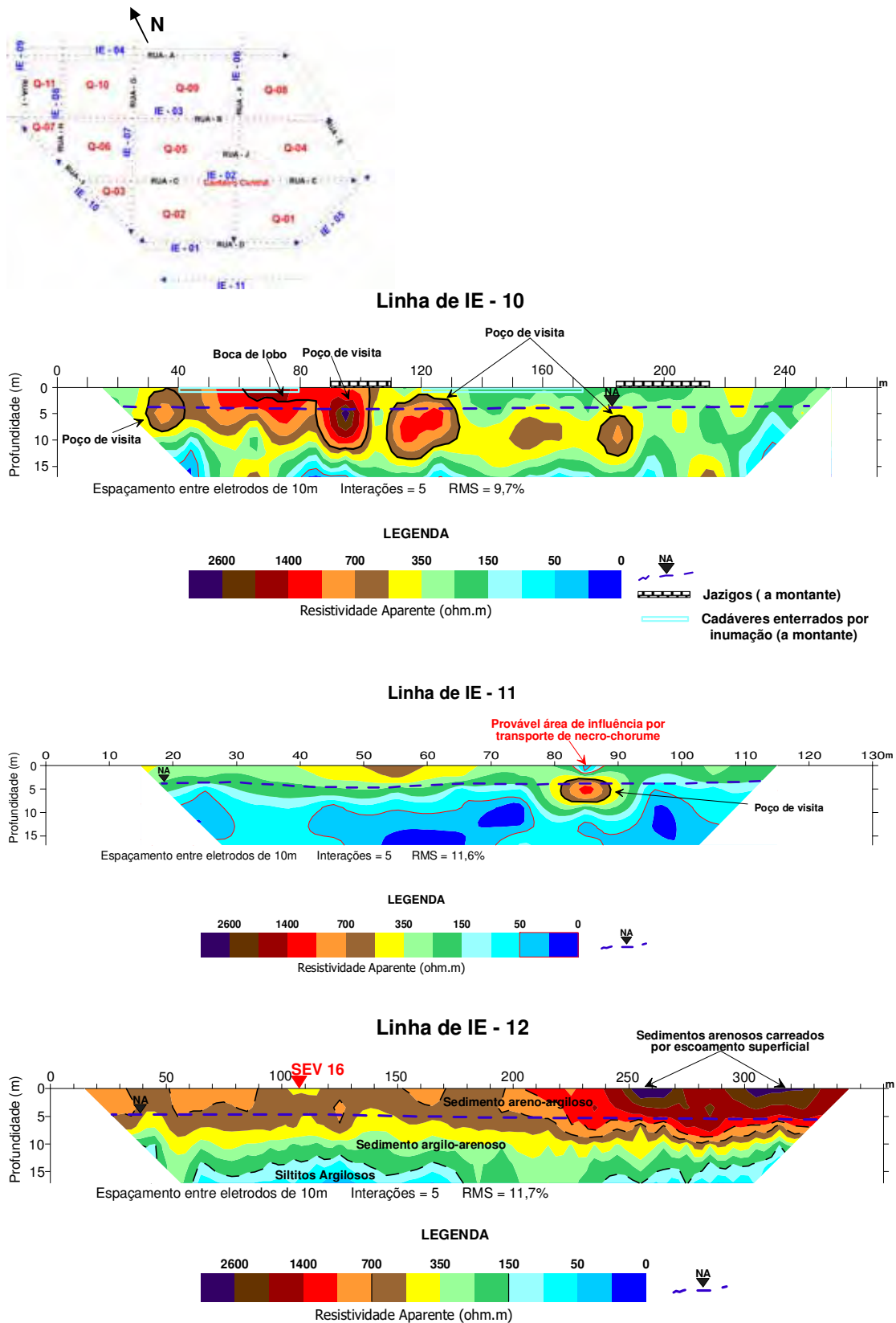


Figura 47 – Seções geolétricas: linhas de IE – 10, 11 e 12.

Analisando a seção de IE - 11 que está localizada na área externa do cemitério a aproximadamente 40 m da quadra Q - 01, 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) apud Pacheco (1986) demonstrou que o percurso de contaminantes biológicos em sedimentos com textura fina, que é o caso do necrochorume e o aquífero presente no cemitério, esse percurso em zona saturada sobre condições ordinárias varia entre 15 e 30 m, sendo que as bactérias presentes nesse tipo de contaminante podem percorrer distâncias maiores em águas com nutrientes; em condições favoráveis, estes podem sobreviver até cinco anos, mas em geral morrem antes de sessenta ou cem dias.

A linha 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 apresentados na linha 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 carreados 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. E os valores de resistividade elétrica inferiores a 150 ohm.m correlacionam-se aos siltitos argilosos da Formação Corumbataí.

6.4 RESULTADOS DA ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

Os dados de resistividade elétrica obtidos pelo IE foram inicialmente analisados por meio da análise exploratória de estatística básica e a verificação da distribuição espacial por meio dos mapas variográficos. As informações obtidas

foram as medidas de tendência central como mínimo e máximo, média e mediana, as medidas de dispersão como variância, desvio-padrão, coeficiente de variação, assimetria, curtose, e a representação gráfica - histogramas das freqüências de resistividade elétrica, e também a variografia (isotropia ou anisotropia).

A Tabela 10 apresenta os resultados da estatística básica para os cinco níveis de investigação geolétrica.

Tabela 10 – Estatística básica para os cinco níveis de investigação.

Estatística	Resistividade (ohm.m)				
	1ª Nível	2ª Nível	3ª Nível	4ª Nível	5ª Nível
Mínimo	15,38	6,73	4,32	4,06	3,89
Máximo	3330,30	3528,70	3473,80	2130,40	1207,60
Mediana	255,90	377,91	290,25	134,80	67,65
Média	487,13	575,27	441,82	208,80	130,09
Variância	335437,11	360601,48	298969,91	76031,18	38000,65
Desvio-padrão	579,17	600,50	546,78	275,74	194,94
Coeficiente de variação	1,19	1,04	1,24	1,32	1,50
Assimetria	2,52	2,03	2,55	3,47	3,33
Curtose	6,89	5,17	8,13	17,02	12,78

N° total de amostras = 274

Todos os valores de medidas de tendência central tendem a diminuir com o aumento da profundidade de investigação. Diferentemente, os valores das medidas de dispersão não seguem essa tendência, demonstrando assim aumento da variabilidade com o aumento da profundidade.

A Figura 48 apresenta os histogramas de freqüências de distribuição dos cinco níveis de investigação.

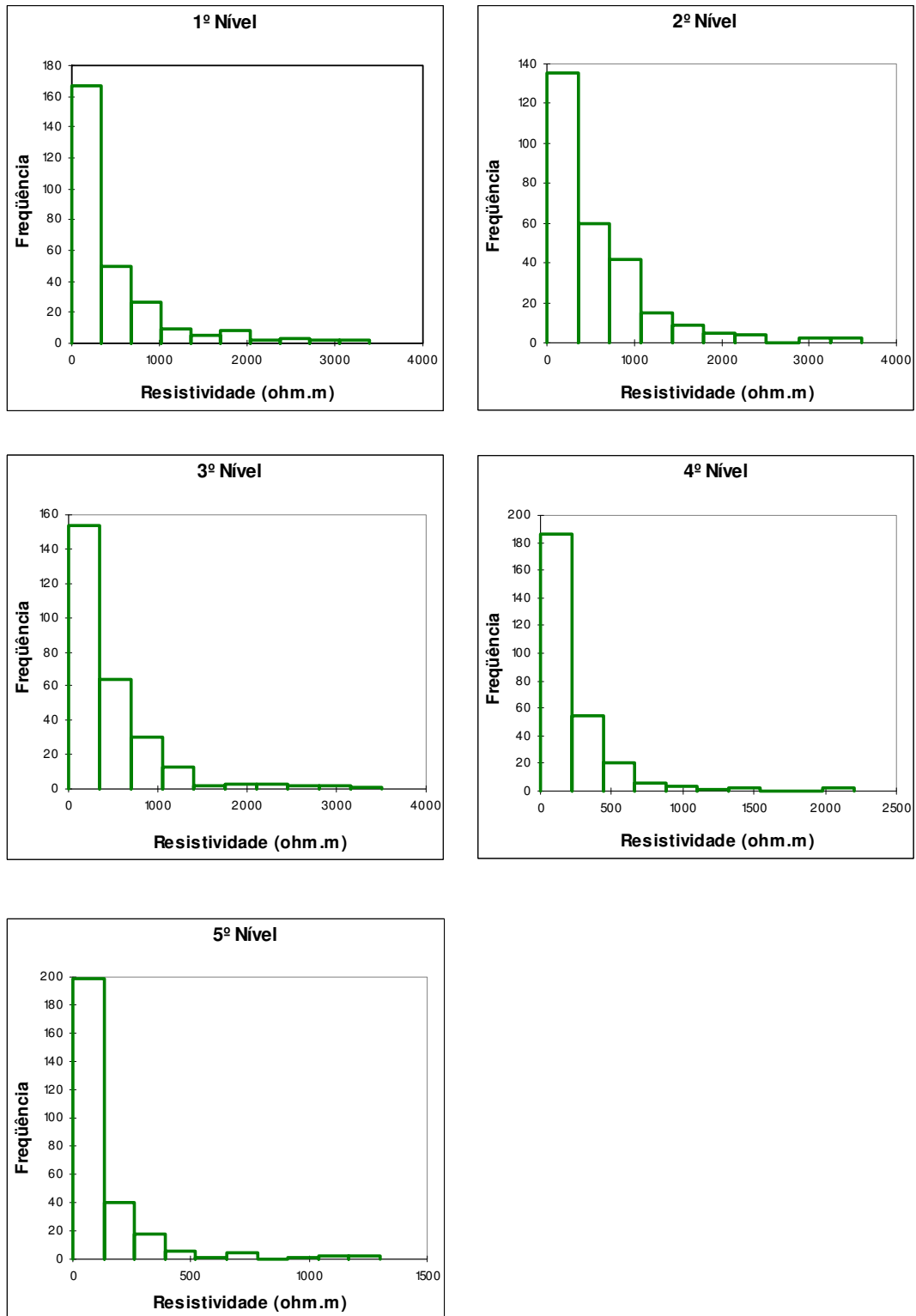


Figura 48 – Histogramas dos cinco níveis de investigação.

Observando a Tabela 10 e analisando os cinco histogramas, observa-se que os histogramas apresentaram assimetria positiva. Neste caso, é assimétrica porque tanto a média quanto a mediana recaem em pontos diferentes da distribuição, isto é, apresentam valores diferentes, e é positiva porque a média aritmética apresenta valor maior que a mediana, e a freqüência decresce bruscamente da esquerda para direita, com baixos valores à direita, produzindo assim “caudas” longas no mesmo sentido.

O grau de achatamento ou também chamado de curtose, para as cinco curvas é do tipo leptocúrtica, isto é, apresenta curvas de freqüências com alto grau de afilamento, superior ao da normal, com um único pico elevado.

A Figura 49 apresenta a curva de relação entre a mediana da resistividade elétrica x profundidade dos cinco níveis de investigação. Foi escolhida a mediana dos dados, pelo fato da mesma não levar em conta os valores extremos (ruídos) representando assim o padrão da amostra.

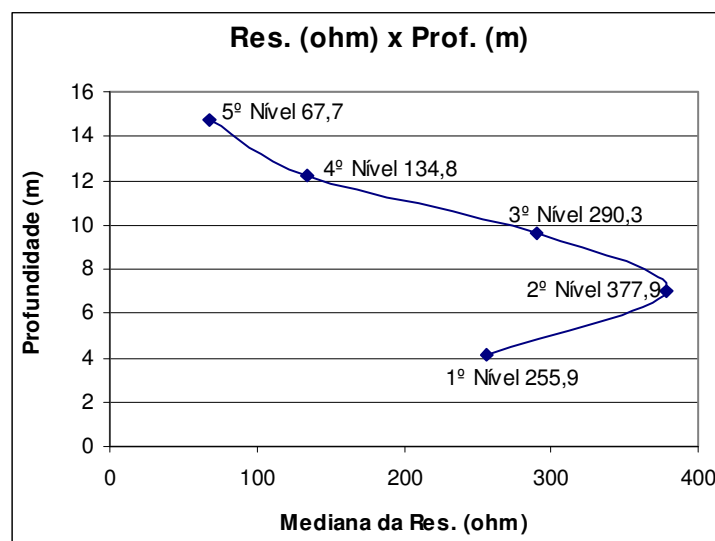


Figura 49 – Curva de resistividade elétrica x profundidade.

Observa-se na curva de relação entre a resistividade elétrica x profundidade para os níveis de investigação, que o primeiro nível apresenta uma mediana dos valores de resistividade inferior ao segundo e terceiro nível, sendo que o primeiro encontra-se em zona não saturada e o terceiro em diante encontra-se em zona

saturada. Assim o primeiro nível, em condições normais, deve apresentar valores de resistividade elétrica superiores a todos os outros níveis, por estarem na mesma litologia. Sendo assim, a posição da mediana dos valores de resistividade para o primeiro nível evidencia sua contaminação por material condutivo – no caso o necrochorume. O alto valor da mediana de resistividade elétrica do segundo nível é devido às tubulações e outras construções de concreto aterradas neste nível de profundidade, e os materiais geológicos não saturados. E no restante dos níveis, as medianas de resistividade elétrica decrescem devido à saturação e o aumento da consistência do material geológico.

Na estatística exploratória também foram elaborados mapas variográficos para identificação das características de distribuição espacial dos valores na superfície. A Figura 50 apresenta os mapas variográficos para cada nível de investigação.

Todos os níveis de investigação apresentaram isotropia – a resistividade elétrica não varia em relação à direção. A isotropia nos três primeiros níveis é devida à contaminação, que tende a homogeneizar os valores de resistividade elétrica. Já para os dois últimos níveis é devida aos siltitos argilosos saturados da Formação Corumbataí presente em toda área do cemitério.

Uma vez quantificada a dependência espacial dos valores de resistividade elétrica nos níveis de investigação, por meio da aplicação da geoestatística exploratória, pode-se mapear a resistividade elétrica no cemitério em seus níveis de investigação, por meio da krigagem ordinária.

Para a utilização do método de krigagem ordinária, inicialmente foi necessária a elaboração de semivariogramas experimentais, seguidos da etapa que consiste em ajustar um modelo matemático que represente, da melhor forma possível, a configuração das curvas do variograma.

Os mapas variográficos demonstraram que todos os níveis de investigação são isotrópicos, havendo grande similaridade em todas as direções - fenômeno esse confirmado obtendo-se semivariogramas nas direções de 0°, 45°, 90° e 135°. Sabendo da isotropia na variabilidade espacial dos valores de resistividade elétrica, foram elaborados os semivariogramas omnidirecionais.

A Figura 51 apresenta os modelos para o ajuste dos semivariogramas experimentais e seus respectivos parâmetros.

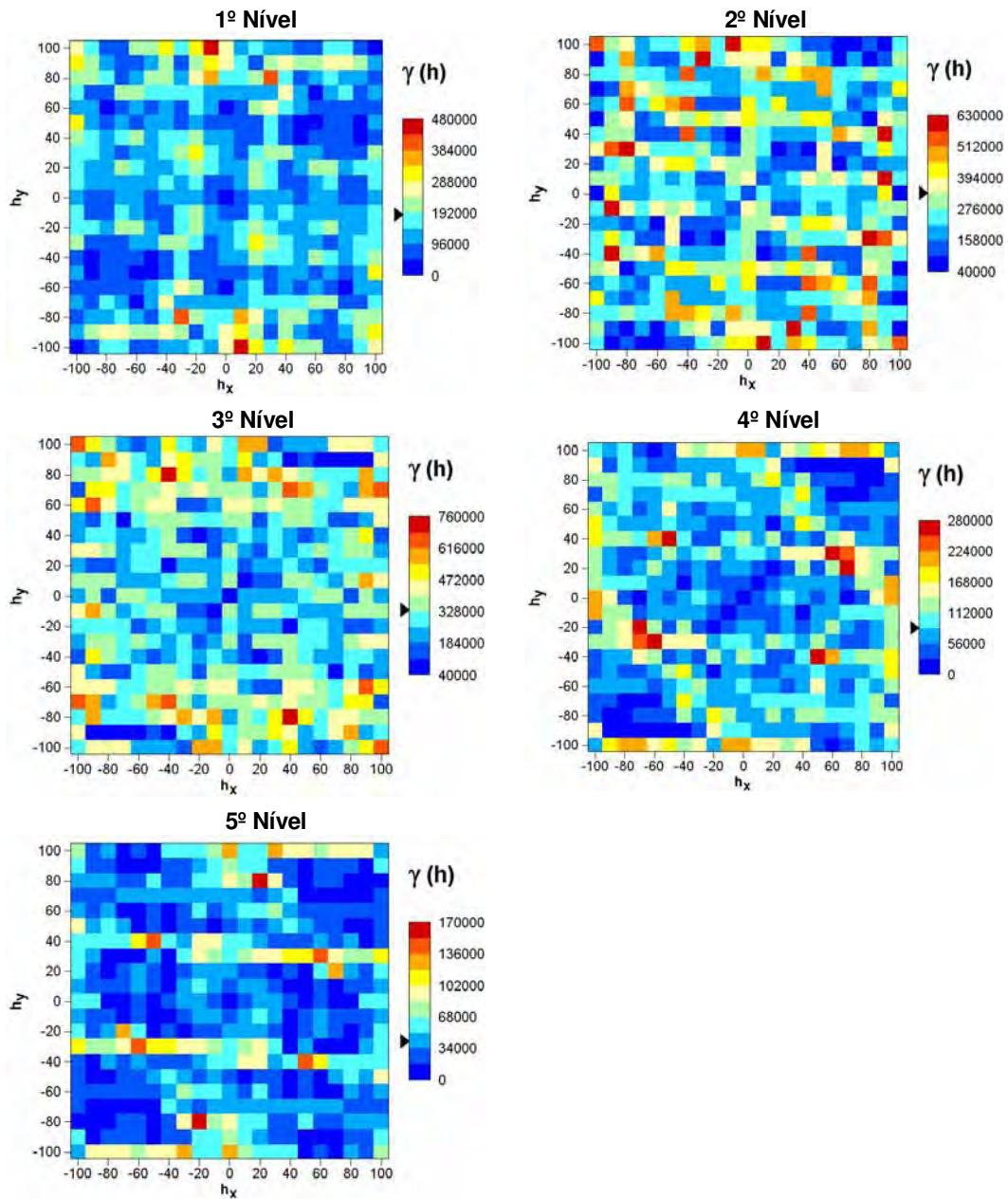


Figura 50 – Mapas variográficos dos níveis de investigação.

Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP

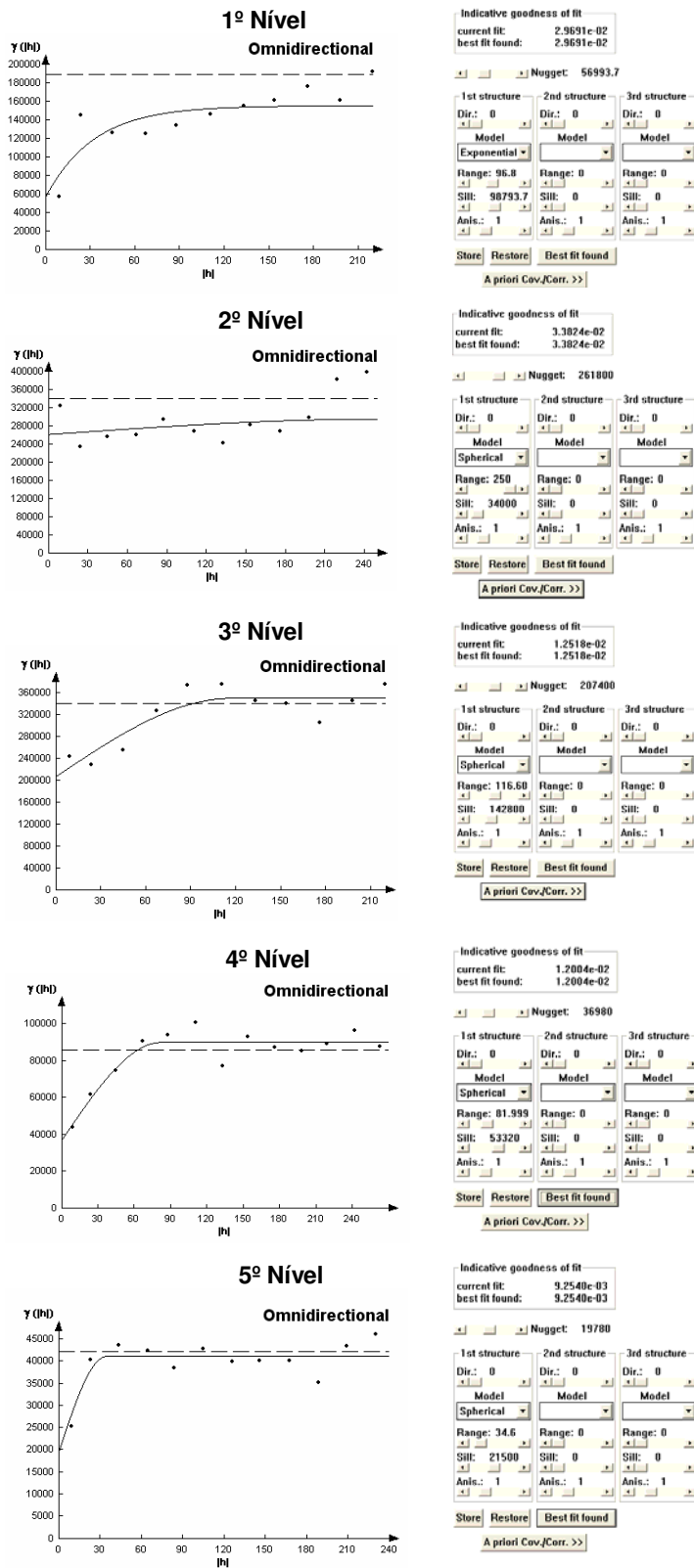


Figura 51 – Semivariogramas experimentais e seus modelos de ajuste.

6.4.1 Resultados da Krigagem

Após a obtenção do modelo matemático de melhor ajuste e mais coerente com a realidade, foram elaborados os mapas de resistividade elétrica para os cinco níveis de investigação por meio do método de interpolação da krigagem ordinária dos dados. 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 modelo de Orellana (1992), que para um valor ser considerado como anômalo deve diminuir ou ultrapassar em pelo menos duas ou três vezes o valor do *background*.

A Figura 52 apresenta o mapa de resistividade elétrica para o primeiro nível de investigação que corresponde a uma profundidade aproximada de 4,2 m. Observa-se no mapa duas prováveis plumas de contaminação uma na direção SW e outra a SE, ambas seguindo a direção do fluxo subterrâneo.

A provável pluma a SW, inicia-se sob a quadra Q – 09 e se estende sob as quadras Q – 05, 06, 03 e 02. As anomalias condutivas podem ser também observadas nas seções geoeletricas das linhas de IE – 02, 03 e 07 e nos primeiros níveis geoeletricos das SEVs – 07, 08 e 12. O contorno de valores de resistividade elétrica inferior a 75 ohm.m, observada também no primeiro nível geoeletrico da SEV – 12 a jusante da quadra Q – 05, pode ser devido a vazamentos de necrochorume provenientes da quadra Q – 09 a montante da quadra Q – 05, pois na quadra Q – 05 há somente cova simples sendo raro o processo de sepultamento no local. A anomalia condutiva presente entre as quadras Q – 02 e 03 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 - 02. A Foto 8 mostra resíduos de jazigos, mausoléus e lapides da quadra Q - 02 carreados pelo escoamento superficial, demonstrando que essa área sofre com erosões laminares acarretadas por elevado escoamento superficial, deteriorando assim as construções presentes.

Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP

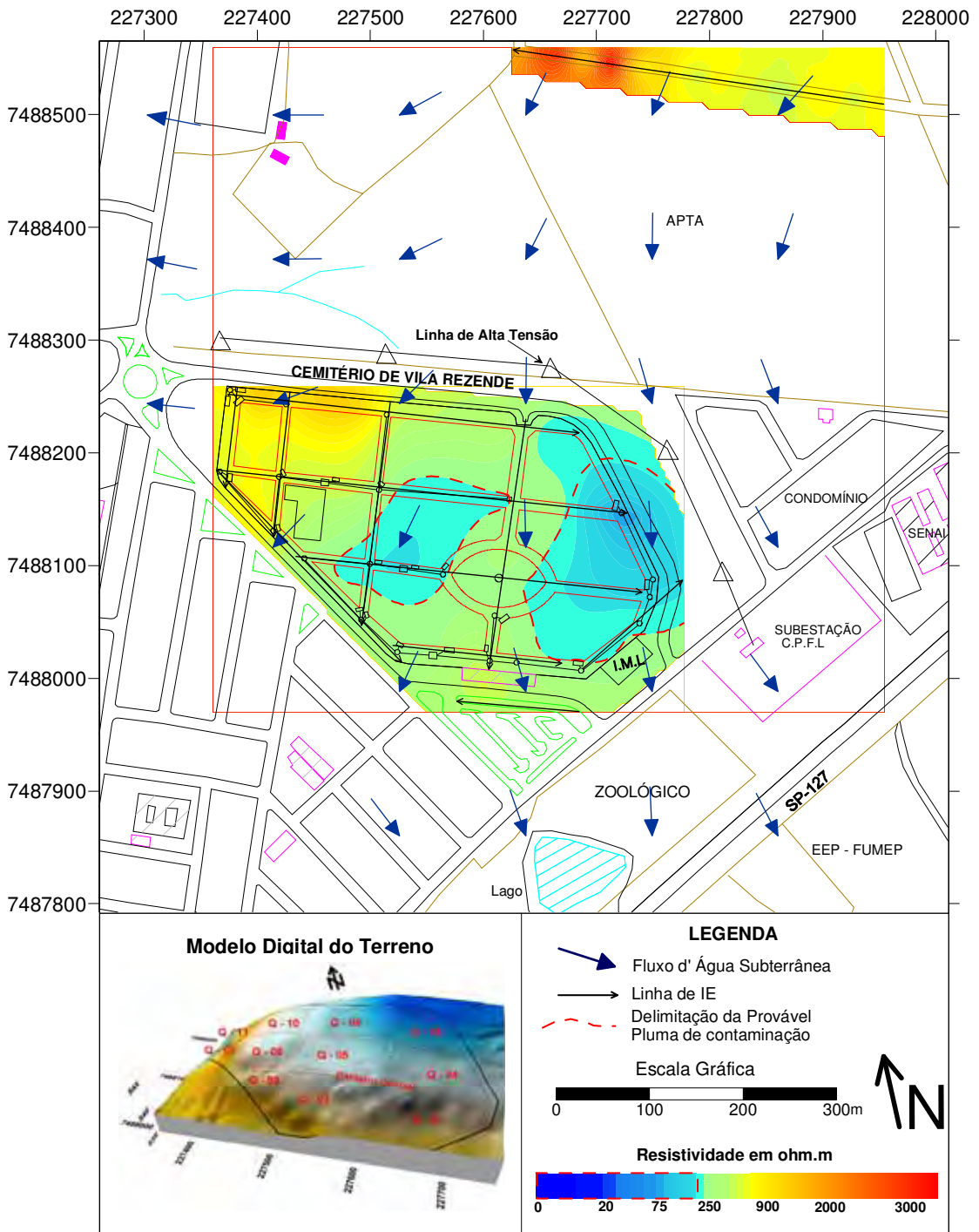


Figura 52 – Mapa de resistividade elétrica do primeiro nível de investigação geolétrica.



Foto 8 – Resíduos de construções tumulares carreados pelo escoamento superficial.

A provável pluma a SE, inicia-se sob a quadra Q – 08 e se estende sob as quadras Q – 04, 01, uma parte do canteiro central e fora dos limites do cemitério. As anomalias condutivas podem ser também observadas nas seções geoeletricas das linhas de IE – 02, 03 e 05 e no primeiro nível geoeletrico da SEV – 03 com valor de resistividade elétrica de 77 ohm.m, na área externa ao cemitério próximo ao Instituto Médico Legal - IML. Quase a totalidade da área das quadras Q – 01, 04 e 08, apresentou valores baixos de resistividade elétrica, no entanto a quadra Q – 08 somente apresentou na época da execução dos ensaios geoeletricos jazigos em sua parte inferior, mais ao sul da quadra, desta forma na delimitação da provável pluma considerou-se como o início da mesma nesta localização. Cabe lembrar, que são nessas três quadras citadas que ocorrem o maior número de sepultamentos.

Observa-se na parte superior do mapa próximo ao APTA a linha de IE – 12 (*background*) com resistividade superiores a 700 ohm.m, representando o padrão de resistividade elétrica da região para este nível de profundidade.

A Figura 53 apresenta o mapa de resistividade elétrica para o segundo nível de investigação que corresponde a uma profundidade aproximada de 7 m. Observa-se no mapa uma provável pluma de contaminação na direção SE, provavelmente a extensão da pluma do mapa anterior. Essa pluma inicia-se entre a quadra Q – 08 e 04 e se estende até a quadra Q – 01 e também para a área externa do cemitério. As anomalias condutivas podem ser observadas nas linhas de IE – 02, 03 e 05.

Como o material geológico nessa profundidade apresenta-se saturado, a resistividade elétrica padrão do meio natural é menor, então, para delimitação da provável pluma de contaminação considerou-se uma resistividade elétrica inferior à pluma a SE do primeiro nível geoeletrico de investigação, que por outro lado estava em zona não saturada com material geológico insaturado e resistividade padrão maior.

A resistividade elétrica das quadras a SE é inferior as demais quadras do cemitério devido ao material geológico mais argiloso presente nesta área (item 4.3 e 4.5).

Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP

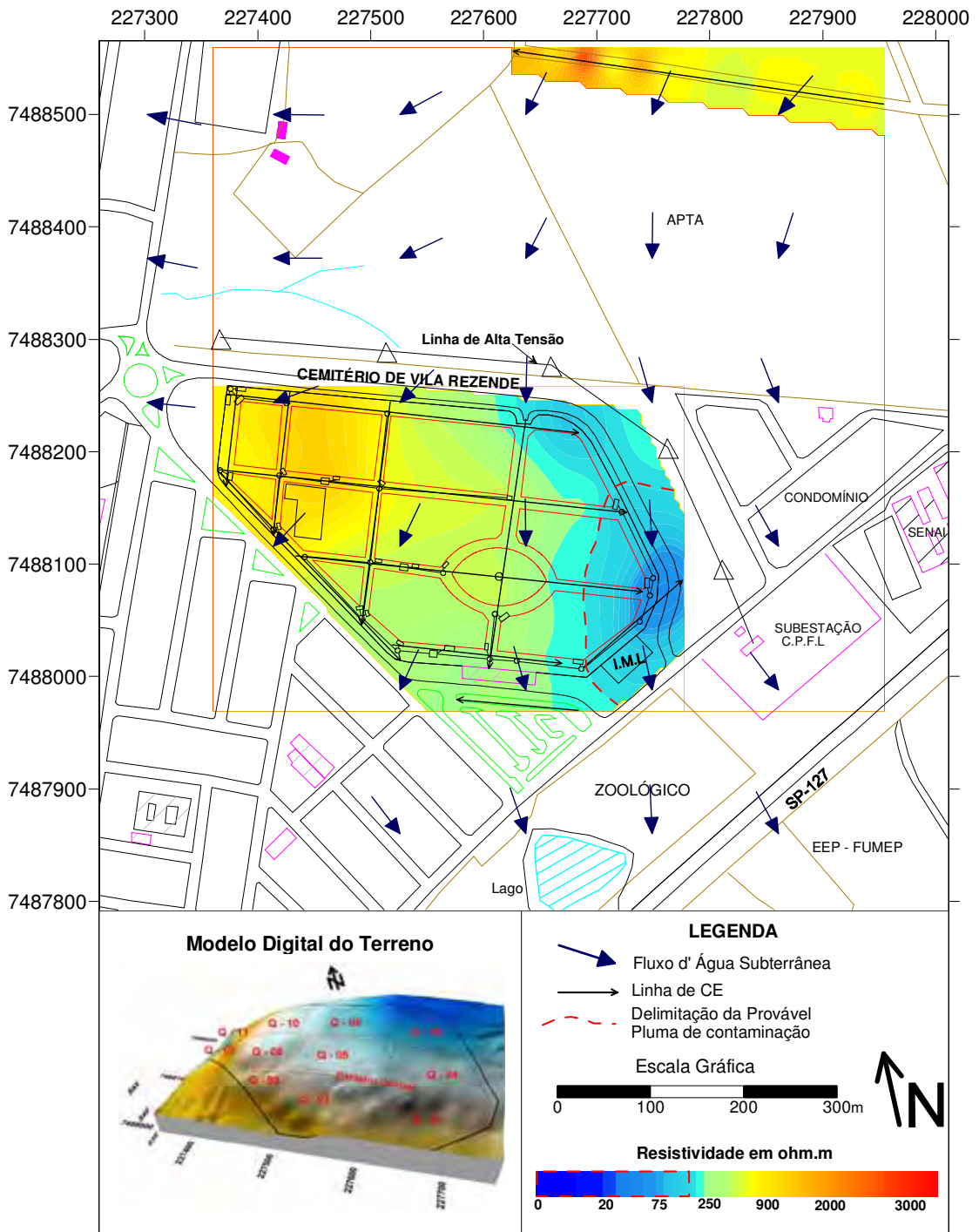


Figura 53 - Mapa de resistividade elétrica do segundo nível de investigação geolétrica.

A Figura 54 apresenta o mapa de resistividade elétrica para o terceiro nível de investigação que corresponde a uma profundidade aproximada de 9,65 m. Observa-se no mapa uma provável pluma de contaminação na direção SE, iniciando-se sob a quadra Q – 04 e se estendendo sob a quadra Q – 01 e fora dos limites do cemitério. Essas anomalias condutivas podem ser observadas nas linhas de IE – 02 e 05.

Observa-se a linha de IE – 12 (*background*) com resistividade inferiores a 250 ohm.m, demonstrando que o padrão de resistividade elétrica da região tende a ser baixo a partir desse nível geométrico, devido aos materiais geológicos argilosos saturados da Formação Corumbataí. Essa característica é evidente também a SW da quadra Q – 01 e na entrada do cemitério, que não apresentaram baixos valores de resistividade em níveis superiores.

Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP

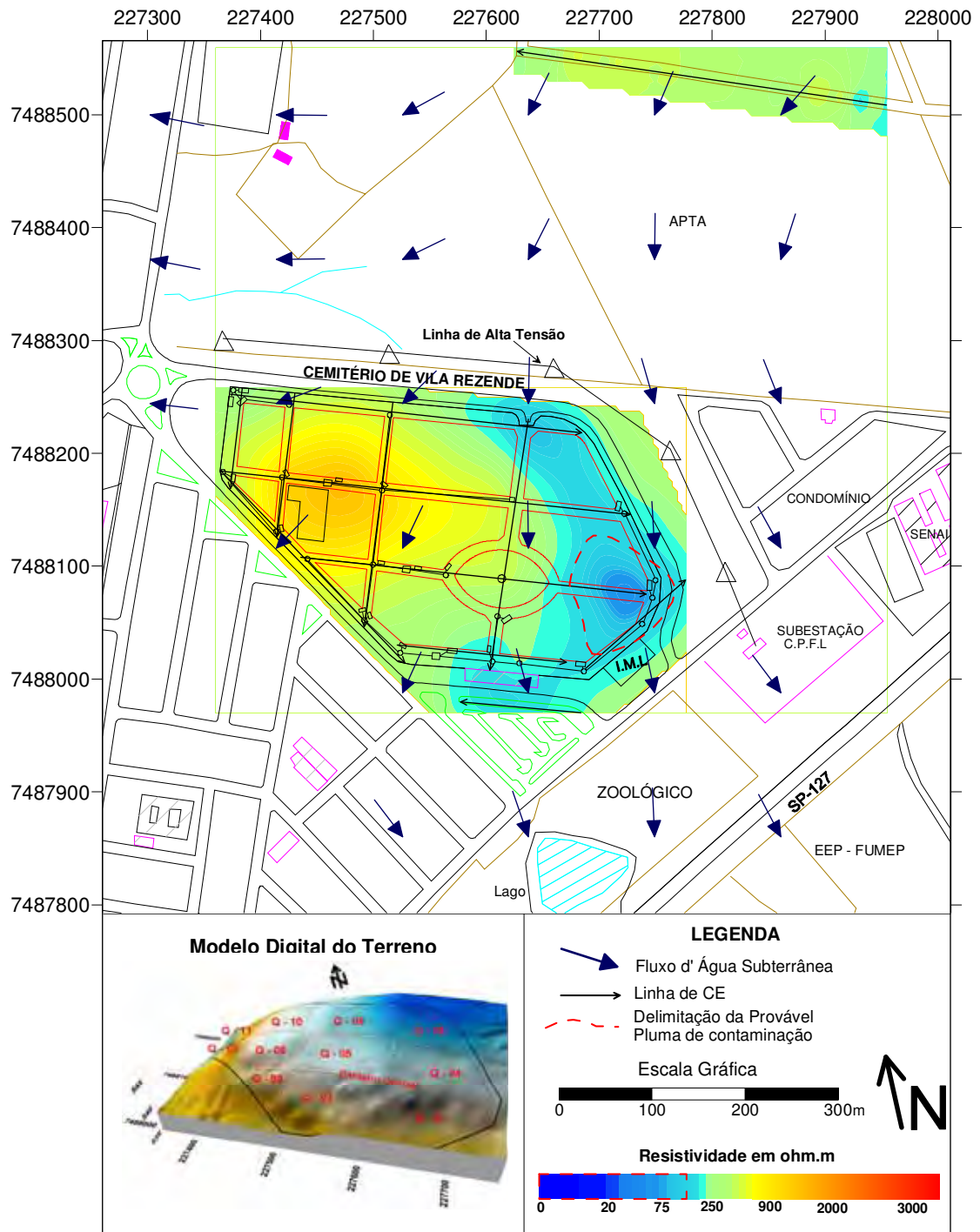


Figura 54 - Mapa de resistividade elétrica do terceiro nível de investigação geolétrica.

As Figuras 55 e 56 apresentam os mapas de resistividade elétrica para os quarto e quinto níveis de investigação, que correspondem a profundidades aproximadas de 12,2 e 14,8 m, respectivamente.

Observa-se no mapa para o quarto nível de investigação que a maioria das quadras apresenta valores baixos de resistividade elétrica, que representa os materiais geológicos saturados da Formação Corumbataí. Já o mapa para o quinto nível de investigação apresenta valores baixos de resistividade elétrica em toda a área do cemitério, bem como na área que foi realizado a linha de IE – 12 (*background*), esses valores de resistividade representam os materiais geológicos saturados e consistentes da Formação Corumbataí.

A Figura 57 apresenta o mapa de pseudo – 3D de resistividade elétrica, realizado a partir dos dados 2D tratados pela análise geoestatística. O mapa de pseudo – 3D foi gerado por meio do método de interpolação da krigagem ordinária de 274 dados por nível. Os dados utilizados na confecção do mapa foram os x, y, z e g, sendo x, y e z as coordenadas UTM e profundidade respectivamente de cada ponto de medida, com a variável g representando o valor de resistividade elétrica. Esse tipo de mapa permite uma melhor visualização da expansão em 3D da provável pluma de contaminação.

Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP

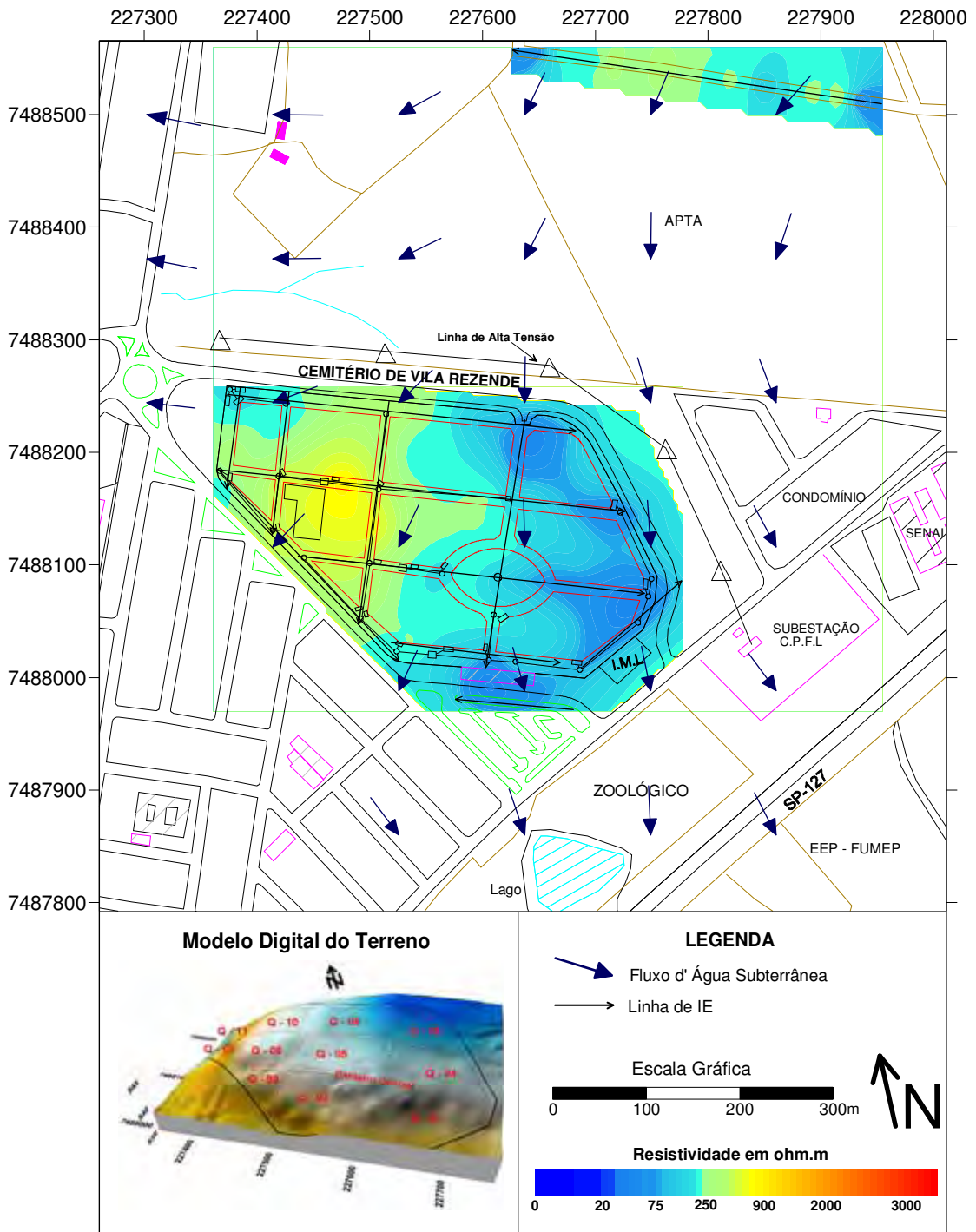


Figura 55 - Mapa de resistividade elétrica do quarto nível de investigação geolétrica.

Aplicação do Método da Eletroresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP

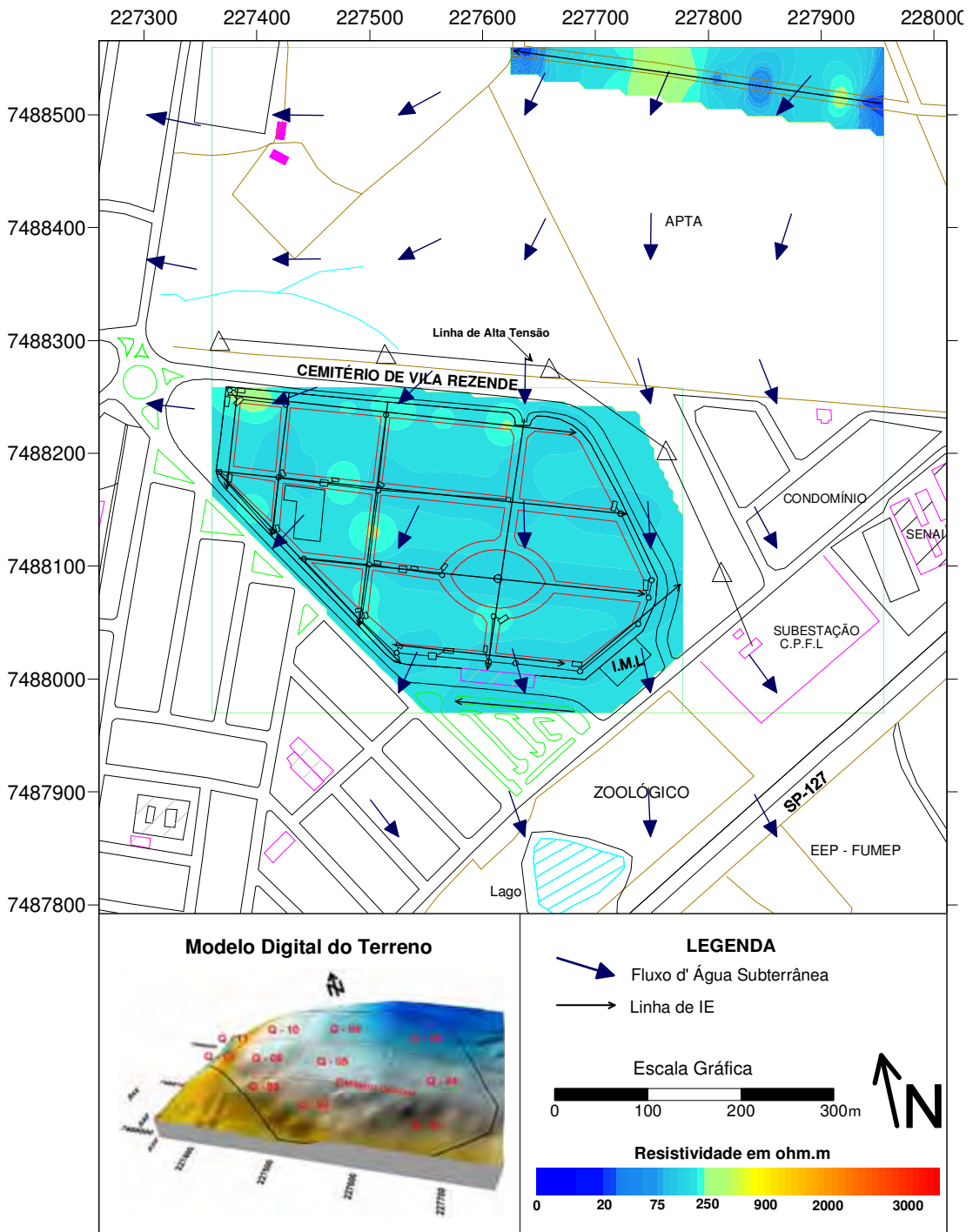


Figura 56 - Mapa de resistividade elétrica do quinto nível de investigação geolétrica.

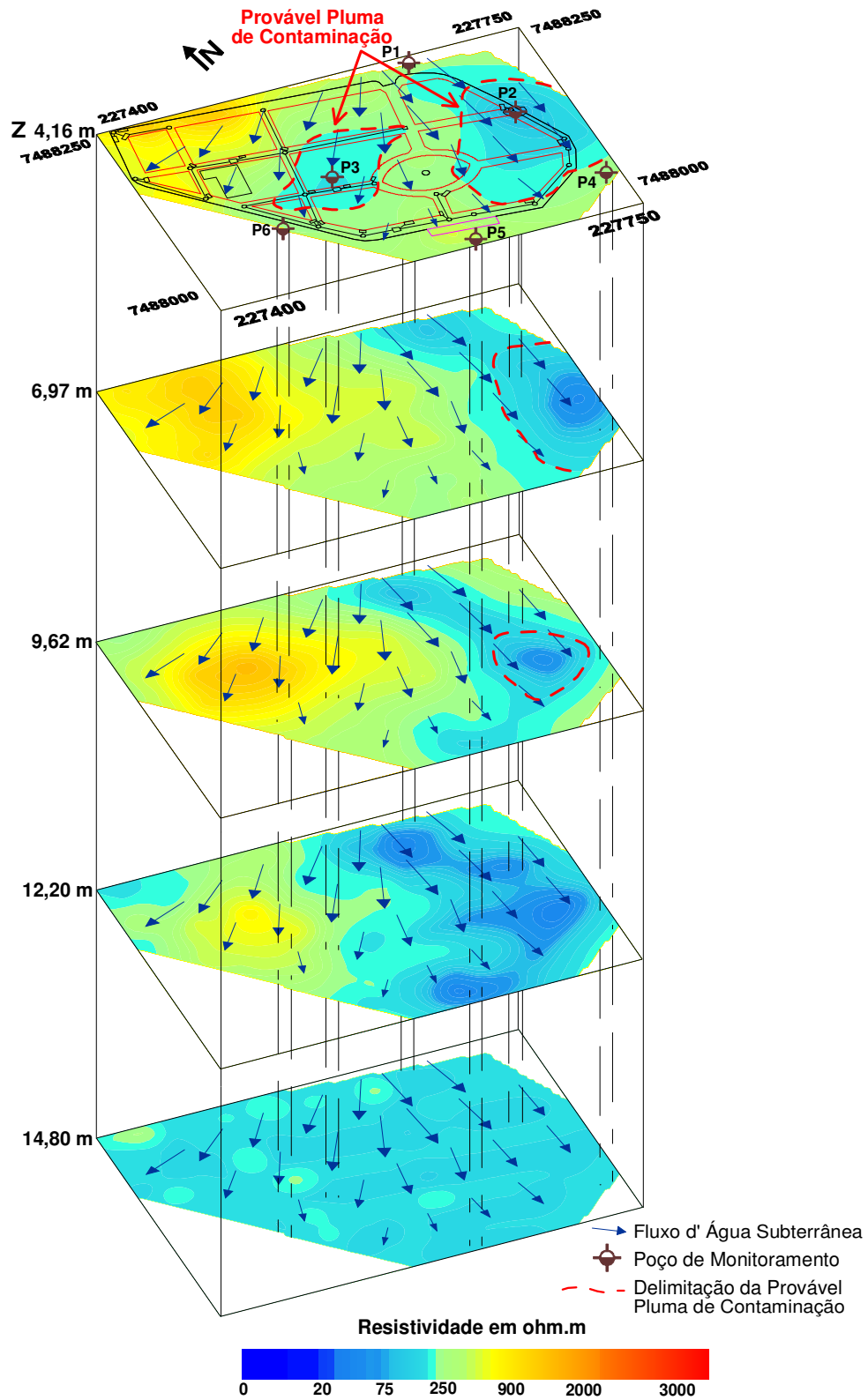


Figura 57 - Mapa de pseudo - 3D de resistividade elétrica para os níveis de investigação.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em conformidade com os objetivos propostos para o estudo, pode-se considerar que os resultados obtidos evidenciam a potencialidade de aplicação do método da eletrorresistividade para investigar e mapear a contaminação da água subterrânea no aquífero freático do cemitério de Vila Rezende, situado no município de Piracicaba.

Os resultados alcançados pela técnica da SEV possibilitaram definir as profundidades dos diferentes estratos geoeletricos e estabelecer os modelos geoeletricos da área, assim como, a identificação litológica dos materiais em subsuperfície, que compõem as Formações Corumbataí e as Intrusivas Básicas – correlatas a Serra Geral.

Pelas análises das curvas das SEVs, foi elaborado o mapa potenciométrico, pelo qual foram identificados dois sentidos de fluxo subterrâneo, concordantes com o gradiente topográfico, sendo um sentido a SW e o outro a SE, com profundidade do nível freático em 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.

Foram estabelecidos dois modelos geoeletricos para área de estudo, um modelo da área externa ao cemitério e outro da área interna ao cemitério. O modelo geoeletrico de subsuperfície da área externa apresenta uma camada pouco espessa de até 4 m de material argilo-siltoso a SE do cemitério, e material argilo-arenoso e areno-argiloso a NE, NW e SW do cemitério, em ambas as direções provenientes dos siltitos argilosos da Formação Corumbataí. O modelo geoeletrico de subsuperfície da área interna apresenta em algumas ruas como as A, B, C, E, F e J e no canteiro central, uma camada pouco espessa de aterro de resíduo de construção civil moído e sedimentos de textura arenosa. 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.

Pelas características geoeletricas dos materiais geológico-geotécnicos em subsuperfície no cemitério, é possível concluir que o mesmo apresenta condições

desfavoráveis para percolação do necrochorume devido às suas características físico-químicas. Mas pela pequena profundidade do nível freático, a pluma desse contaminante pode ser expandida pela zona saturada em baixa profundidade.

Essas características físico-químicas do material geológico presente no cemitério são intrínsecas aos siltitos argilosos da Formação Corumbataí, como baixa permeabilidade, alta retenção de água, alta capacidade de troca catiônica (CTC), que por sua vez facilita o fenômeno conservativo de saponificação de cadáveres ainda enterrados abaixo do nível do terreno. Relatos de funcionários do cemitério confirmam esse fenômeno conservativo em cadáveres sepultados na quadra Q – 01.

A técnica do IE mostrou grande potencial na determinação da presença de anomalias condutivas, e as variações texturais das litologias, em subsuperfície.

Com base nos resultados das linhas de IE e mapas de resistividade elétrica obtidos, foi possível também a elaboração das seguintes considerações:

- Os resultados obtidos nas seções geoeletricas IE – 01, 02, 03, 05, 06, 07 e 11 apresentaram valores anômalos de resistividade elétrica, representando anomalias condutivas proveniente de vazamentos de necrochorume dos jazigos e sepulturas a montante;
- O resultado obtido na linha de IE – 12 (*background*) demonstrou que a área a montante do cemitério é isenta de anomalias condutivas proveniente de contaminação por necrochorume.
- Os jazigos e sepulturas em cova simples a montante dos valores anômalos de resistividade são pertencentes às quadras Q – 01, 02, 04, 05, 08 e 09;
- As ruas onde foram realizadas as linhas de IE e que apresentaram anomalias condutivas são: ruas B, C, D, E, F e G;
- No primeiro nível de investigação geoeletrica 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. A provável pluma a SW, inicia-se sob a quadra Q – 09 e se estende sob as quadras Q – 05, 06, 03 e 02. E a provável pluma a SE, inicia-se sob a quadra Q – 08 e se estende sob as quadras Q – 04, 01, uma parte do canteiro central e fora dos limites do cemitério;

- No segundo nível de investigação geolétrica que corresponde a uma profundidade aproximada de 7 m, há uma provável pluma de contaminação na direção SE, devendo ser a extensão da pluma do mapa anterior. Essa pluma inicia-se entre a quadra Q – 08 e 04 e se estende até a quadra Q – 01 e também para a área externa do cemitério;
- No terceiro nível de investigação que corresponde a uma profundidade aproximada de 9,65 m, há uma provável pluma de contaminação na direção SE, iniciando-se sob a quadra Q – 04 e se estendendo sob a quadra Q – 01 e fora dos limites do cemitério.
- Nos quarto e quinto níveis de investigação que correspondem a profundidades aproximadas de 12,2 e 14,8 m, respectivamente, não há pluma de contaminação, e sim valores baixos de resistividade elétrica relativos aos siltitos argilosos saturados da Formação Corumbataí;
- As prováveis plumas de contaminação têm relação direta com a quantidade e tempo de sepultamento e a profundidade do nível freático, pois são nas quadras Q-01, 04 e 08, onde ocorrem o maior número de sepultamento, que essas características se destacam;

Visando controlar a qualidade das águas subterrâneas adjacentes ao cemitério, recomenda-se a instalação de seis poços de monitoramento, nos locais designados na Figura 57. O primeiro poço (P1) teria como função o controle da água subterrânea em meio não contaminado a montante do cemitério (*background*), os poços P2 e P3, se localizariam onde se mapearam, pela investigação geolétrica, as prováveis plumas de contaminação. E 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.

Recomenda-se o rebaixamento do lençol freático, aumentando assim a espessura da zona de aeração e diminuindo a probabilidade de contaminação da água subterrânea.

Recomenda-se também a recuperação do sistema de drenagem superficial que se encontra assoreado e entupido, e construção de novas galerias na rua A próxima a quadra Q – 08 e 09, na rua B entre as quadras Q – 08 e 04, na rua C

entre as quadras Q – 04 e 01. É necessária a realização de manutenção periódica no sistema de drenagem.

Com os resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que o método da eletrorresistividade por meio da integração das técnicas da sondagem elétrica vertical e o imageamento elétrico constituem uma importante metodologia indireta para a avaliação ambiental em cemitérios; principalmente no que diz respeito, a investigação e delimitação de plumas de contaminação, orientando melhor os ensaios invasivos como sondagens, poços de investigação e monitoramento para detecção efetiva dos eventuais contaminantes.

8 REFERÊNCIAS

- ADDINSOFT Inc. **XLSTAT v. 8.02**. Campinas: Easystat Soluções Estatísticas Ltda, 2007.
- ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Boletim do Instituto Geográfico e Geológico**, São Paulo, n. 41, p. 169-262, 1964.
- ALMEIDA, A. M. de; MACÊDO, J. A. B. de. Parâmetros físico-químicos de caracterização da contaminação do lençol freático por necrochorume. In: SEMINÁRIO DE GESTÃO AMBIENTAL – Um convite a Interdisciplinariedade, 2005, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: Instituto Viana Junior, 2005.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo/RJ: UNISINOS, 2003. 165 p.
- BHATTACHARYA, P. K.; PATRA, H. P. **Direct - current geoelectric sounding - Principles and interpretation**. New York: Elsevier Publishers, 1968. 139 p.
- BARBOSA, M. C.; COELHO, H. **Impacto ambiental dos cemitérios horizontais e sua relação com o controle sanitário nas áreas urbanas**. Disponível em: <<http://www.biossegurancahospitalar.com.br>>. Acesso em: 07 dez. 2005.
- BARRETTO, A. G. O. P.; SPAROVEK, G.; GIANNOTTI, M. A. **Atlas rural de Piracicaba**. Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais - IPEF, 2006. 74 p.
- BASE AEROFOTOGRAMETRIA E PROJETOS S/A. **Citrus**: foto aérea. Piracicaba, 2000. 1 fotografia aérea. Escala 1: 30.000. Fx 34, n. 0080.
- BAYARD, J. P. **Le sens caché des rites mortuaires**. France: Dangle, 1993. 330 p.
- BERGAMO, H. Os cemitérios – Um problema de engenharia sanitária. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 4., 1954, São Paulo. **Anais...** São Paulo: AIES, 1954. p. 333-339.
- BOUWER, H. **Groundwater hydrology**. New York: Mc Graw Hill, 1978. 480 p.
- BRAGA, A. C. O. **Geofísica aplicada a Geologia de Engenharia, segmentos e métodos elétricos**: sondagem elétrica vertical, caminhamento elétrico. São Paulo: Instituto de pesquisas Tecnológicas – IPT, 1988. 81 p. (Apostila de Curso de aperfeiçoamento em Geologia de engenharia e Mineração).
- BRAGA, A. C. O. **Métodos geoelétricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – Formação Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro – SP**. 1997. 169 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1997.
- BRAGA, A. C. O. **Curso Básico de Geofísica Aplicada Módulo 1: Métodos Geoelétricos Aplicados a Hidrogeologia**. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP, 1999. 1 CD-ROM.
- BRAGA, A. C. O. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de água subterrâneas**: uma abordagem metodológica e prática. 2006. 121 f. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

BRANCO, S. M. Poluição das Águas. In: DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **CURSO DE CONTROLE DE POLUIÇÃO NA MINERAÇÃO: ALGUNS ASPECTOS**, Brasília, 1986. v.2, p. 55-60. (Apostila)

BRASIL. **Lei Federal nº 6938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. 1981. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/ccivil/Leis/L6938.htm>>. Acesso em: 01 ago. 2006.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 001, de 23 janeiro de 1986**. Dispõe das definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como instrumento da Política Nacional do Meio Ambiente. 1986. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res>>. Acesso em: 13 set. 2006.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997**. Dispõe sobre licenciamento ambiental; competência da União, Estado e Municípios; listagem de atividades sujeitas ao licenciamento; Estudos Ambientais, Estudos de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental. 1997. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res>>. Acesso em: 13 set. 2006.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 335, de 03 de abril de 2003**. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitérios. 2003. Disponível em: <<http://www.aquaseguas.uff.br>>. Acesso em: 13 set. 2006.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 518, de 25 de março de 2004**. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. 2004. Disponível em: <<http://dtr2001.saude.gov.br/sas/PORTARIAS/Port2004/GM/GM-518.htm>>. Acesso em: 30 ago. 2007.

BRAZ, V.; BECKMANN, L. de C. M.; COSTA e SILVA, L. Integração de resultados bacteriológicos e geofísicos na investigação da contaminação de águas por cemitérios. In: CONGRESSO MUNDIAL INTEGRADO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1., 2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABAS, 2000. 1 CD-ROM.

CAMARGO, G. C. E.; FELGUEIRAS, A. C.; MONTEIRO, V. M. A. A importância da modelagem da anisotropia na distribuição espacial de variáveis ambientais utilizando geoestatística. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2001. p. 395 – 402.

CAMARGO, M. N.; KLANT, E.; KAUFFMAN, J. H. Classificação de solos usada em levantamento pedológico no Brasil. **Boletim informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n.1, p.11-33, 1987.

CARVALHO JUNIOR, M. A. F.; COSTA E SILVA, L. M. SP e eletrorresistividade aplicados ao estudo hidrogeológico de um cemitério. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 5., 1997, São Paulo. **Resumo Expandido...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geofísica, 1997. v.1, p. 471-474.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Implantação de cemitérios**: Norma L1.040. São Paulo, 1999. 6 p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. Programa CETESB/GTZ. São Paulo, 2001. 385p.

COTTAS, L. R. **Estudos geológicos-geotécnicos aplicados ao planejamento urbano de Rio Claro-SP**. 1983. 2 v. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

DAHLIN, T.; LOKE, M. H. Quasi - 3D resistivity imaging-mapping of three dimensional structures using two dimensional DC resistivity techniques. In: MEETING OF THE ENVIRONMENTAL AND ENGINEERING GEOPHYSICAL SOCIETY, 3., 1997, Aarhus, Denmark. **Proceedings...** Aarhus: EEGS-ES, 1997. p. 143 – 146.

DAVINO, A. Importância do método de eletroresistividade na determinação da natureza do manto de decomposição em rochas cristalinas. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, São Paulo, n.19, p. 99-101, 1970.

deGROOT-HEDLIN, C.; CONSTABLE, S. C. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. **Geophysics**, n. 55, p. 1613-1624. 1990.

DENT, B. B. **Hydrogeological Studies at Botany Cemetery**. 1995. M.Sc. Proj. Rept. – University of Technology of Sydney, Sydney, 1995.

DENT, B. B.; KNIGHT, M. J. K. Cemeteries: A special kind of landfill. In: INTERNACIONAL ASSOCIATION OF HYDROGEOLOGISTS CONFERENCE ON GROUNDWATER SUSTAINABLE SOLUTION, 1998, Melbourne. **Proceedings...** Kenilworth, Austrália: International Association of Hydrologists, 1998.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. **Estudo de Águas Subterrâneas**. Região Administrativa 5 Campinas, São Paulo, 1981. 607 p.

ELIS, V. R. **Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos**. 1998. 264 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1998.

EMSLEY, J. Químicos explicam visão de espectros em cemitérios. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 26 de jul. 1993.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412 p.

EDWARDS, L. S. A modified pseudo-section for resistivity and induced-polarization. **Geophysics**, n. 42, p. 1020-1036, 1977.

FÁVERO, F. **Medicina Legal**. 11. ed. Belo Horizonte: Itatiaia, 1980. v.1 p. 500-566.

FÁVERO, F. **Medicina Legal**. 12. ed. Belo Horizonte: Vila Rica Editoras Reunidas, 1991.

FEITOSA, E. C. Pesquisa de Água Subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: CPRM, 1997. cap. 4, p. 53-80.

FRANÇA, G. V. de. **Medicina Legal**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1985. 402p.

GALLAS, J. D. F. **Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental**. 2000. 174 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

GANDOLFO, O. C. B.; GALLAS, J. D. F. Eletroresistividade 3D – uma avaliação preliminar da técnica. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 2, p. 191-198, 2005.

GANDOLFO, O. C. B. **Um estudo do imageamento geométrico na investigação rasa**. 2007. 215 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer version 8.0**: Surface Mapping System. Colorado, USA: Golden Software, 2002. 1 CD-ROM.

HALLOF, P. G. **On the interpretation of resistivity and induced-polarization measurements**. 1957. Thesis (Ph. D.) – MIT, Cambridge, 1957.

INMAN, J. R. Resistivity inversion with ridge regression. **Geophysics**, Tulsa, n. 40, p. 789-817, 1975.

INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO DE PIRACICABA – IPPLAP. **Banco de dados**. Disponível em: <http://www.ipplap.com.br/acidade.php>. Acesso em: 02 mar. 2007.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA – IPT. Estudos geológico-geotécnicos preliminares do Canal Hidroviário do Rio Piracicaba – Trecho Piracicaba – Barragem de Santa Maria da Serra. In: _____. **Ante-projeto do Canal Hidroviário do Rio Piracicaba n. 7.597**. São Paulo: DNPVNT/IPT, 1973. 34 p.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA – IPT. Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis. Ante-projeto do Canal Hidroviário do Rio Piracicaba. **Mapa geológico: Trecho Piracicaba – Santa Maria da Serra**. São Paulo, 1974. 1 mapa, 91 cm x 71 cm. Escala 1:50.000

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA – IPT. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1981a. 1 mapa, 68 cm x 98 cm. Escala 1:500.000. Nota explicativa. 126 p. (monografias,6).

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA – IPT. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1981b. 1 mapa, 91 cm x 71 cm. Escala 1:1.000.000. Nota explicativa. (Série monografias, 5, 2 v).

INTERPEX LIMITED. **Resistivity and induced polarization data interpretation software: RESIX-IP v.2.0**, User's manual. Colorado, USA: Golden Software, 1993. Paginação Irregular.

INTERPEX LIMITED. **IX1D v.2.0**: User's manual. Colorado - USA: Golden, 2002. Paginação Irregular.

ISAAKS, H. E.; SRIVASTAVA, M. R. **An introduction to applied geostatistics**. Oxford: Oxford University Press, 1989. 561 p.

KOZCIAK, S.; ROSTIROLLA, S. P.; FIORI, A. P. Análise comparativa entre métodos de interpolação para construção de modelos numéricos de terreno. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, v. 47, p. 19 – 30, 1999.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. Rio Claro: Editora Unesp, 1998. 226 p.

LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R. **Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos**. DGA, IGCE, UNESP/ Rio Claro, Lab. Geomatématica, Texto Didático 06, 19 p. 2002a. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 12 abr. 2007.

LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R. MONTEIRO, R. C. **Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada**. DGA, IGCE, UNESP/ Rio Claro, Lab.

Geomatemática, Texto Didático 07, 12 p. 2002b. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 12 abr. 2007.

LEO, G. P. **Caracterização hidrogeológica do município de Piracicaba**. 2005. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

LOKE, M. H.; BARKER, R. D. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. **Geophysics**, Tulsa, n. 60, p. 1682-1690. 1995.

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

LOKE, M. H.; BARKER, R. D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. **Geophysical Prospecting**, Houten, n. 44, p. 499-523. 1996b.

LOKE, M. H.; DAHLIN, T. A comparison of the Gauss-Newton and Quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, n. 49, p. 149 – 162. 2002.

LOKE, M. H. **RES2DINV v. 3.53 Rapid 2-D resistivity and IP inversion using the least square method**: Manual. Penang (Malaysia): Geotomo Software, 2003.

MANOEL FILHO, J. Água Subterrânea: Histórico e Importância. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: CPRM, 1997. cap. 6, p. 109-132.

MARTINS, M. T. et al. Qualidade bacteriológica de águas subterrâneas em cemitérios. **Revista de Saúde Pública**, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 47-52, 1991.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Ottawa, v. 58, p. 1246-1266, 1963.

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

MENDES, J. M. B.; PACHECO, A.; HASSUDA, S. Cemitérios e meio ambiente – a geofísica como método auxiliar na avaliação de sua influência nas águas subterrâneas. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS SOBRE MEIO AMBIENTE, 2., 1989, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 1989. v. 1, p. 50-57.

MENEZES, T. L.C. **Sistema urbano de cemitérios**: necessidades de pesquisas. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Administração Municipal – IBAM, 1971. 20 p. (Série Estatística Urbanas).

MIGLIORINI, R. B. **Cemitérios como fonte de poluição em aquíferos: estudo do cemitério Vila Formosa na bacia Sedimentar de São Paulo**. 1994. 74 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

MIOTTO, S. L. **Aspectos geológico-geotécnicos da determinação da adequabilidade de áreas para implantação de cemitérios**. 1990. 116 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1990.

MOREIRA, C. A. **Aplicação do método eletromagnético transiente em área contaminada sob atenuação natural**. 2005. 172 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

MOURA, H. P. **Emprego da eletroresistividade e da polarização induzida na caracterização geolétrica de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos**. 2002. 231 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

OLIVA, A. **Estudo hidrofaciológico do aquífero Rio Claro no município de Rio Claro - SP**. 2006. 196 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

ORELLANA, E. **Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua**. Madrid: Paraninfo, 1972. 523 p. (Biblioteca Técnica Philips).

PACHECO, A. Os cemitérios como risco potencial para as águas de abastecimento. **Revista do Sistema de Planejamento e Administração Metropolitana**, São Paulo, n. 17, ano IV, p. 25-31, 1986.

PACHECO, A. et al. Cemeteries – a potencial risk to groundwater. **Water Science and Technology**, Oxford, v. 24, n.11. p. 97-104, 1991.

PACHECO, C. E. M. et al. **Programa de minimização da contaminação das águas subterrâneas causadas por cemitérios**. São Paulo: FSP/USP, 1993. Seminário apresentado na conclusão do curso Saneamento Ambiental e Ecologia Aplicada. 1993, 23 p. (Apostila).

PACHECO, A. A visão da Problemática Ambiental que Envolve os Cemitérios. In: SEMINÁRIO: CEMITÉRIOS, UMA QUESTÃO AMBIENTAL, 1., 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Faculdade de Saúde Pública/USP, 1996.

PACHECO, A. **Cemitérios e meio ambiente**. 2000. 102 f. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000.

PACHECO, A.; MATOS, B. A. Cemitérios e meio ambiente. **Tecnologias do Ambiente**, Lisboa, n. 33, p. 97-104, 2000.

PACHECO, A.; BATELLO, E. A influência de fatores ambientais nos fenômenos transformativos em cemitérios. **Revista Engenharia e Arquitetura**, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 32-39, 2000.

PANNATIER, Y. **Variowin**: software for spatial data analysis in 2D. New York: Springer-Verlag, 1996. 90 p.

PEJON, O. J. **Mapeamento geotécnico da folha de Piracicaba-SP (Escala 1: 100.000)**: estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos. 1992. 2 v. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

PEQUENO MARINHO, A. M. C. **Contaminação de aquíferos por instalação de cemitérios**: estudo de caso do cemitério São João Batista. 1998. 88 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1998.

PIRACICABA. Prefeitura do Município de Piracicaba. Secretaria dos Serviços Públicos. **Projeto de drenagem superficial do cemitério de Vila Rezende**. Piracicaba: Fundação Municipal de Ensino de Piracicaba, 1987. (Projeto Completo).

PIRACICABA. Prefeitura do Município de Piracicaba. Secretaria Municipal de Planejamento e Meio Ambiente. **Planta planialtimétrica do cemitério de Vila Rezende**. Piracicaba: Prefeitura Municipal de Piracicaba, 2002. 1 CD-ROM. Escala 1:500. (Projeto de Sistema de Captação de Água Fluvial).

PRADO, H. **Solos do Brasil: gênese, morfologia, classificação, levantamento, manejo**. 3. ed. revisada e ampliada. Piracicaba: H. do Prado, 2003. 275 p.

RIJO, L. **Modeling of electric and electromagnetic data**. 1977. 242 f. Thesis (Ph.D.) – University of Utah.

ROBINSON, E. S.; ÇORUH, C. **Basic exploration geophysics**. 13^{ed}. New York: Wiley, 1988. 653 p.

SÁNCHEZ, L.H. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SANSONOWSKI, R.C. **A modelagem numérica como instrumento de apoio à avaliação ambiental**. 2003. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Petróleo) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria Estadual de Saúde. **Decreto de Lei Estadual nº 12.342, de 27 de setembro de 1978**: dispõe sobre normas de promoção, preservação e recuperação da saúde no campo de competência da Secretaria de Estado da Saúde (revisto e atualizado até dezembro de 1990). Disponível em: <http://www.cevisa.ibiuna.sp.gov.br/Leis/Decreto12.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2007.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria Estadual de Saúde. **Lei nº 10.083, de 23 de setembro de 1998**. Dispõe sobre o Código Sanitário do Estado. São Paulo, SP: Imprensa Oficial do Estado. Disponível em: http://ww2.prefeitura.sp.gov.br/arquivos/secretarias/saude/legislacao/0005/LeiEstadual_1998_10083.pdf. Acesso em: 10 ago. 2007.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria Estadual de Meio Ambiente. **Decreto de Lei Estadual nº 47.397, de 4 de dezembro de 2002**. Dá nova redação ao Título V e ao Anexo 5 e acrescenta os anexos 9 e 10, ao Regulamento da Lei Estadual nº 997, de 31 de maio de 1976, aprovado pelo Decreto Estadual nº 8.468, de 8 de setembro de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. Disponível em: http://sigam.ambiente.sp.gov.br/C3%A3o%20ambiental/Decreto%20Estadual%202002_47.397.pdf. Acesso em: 10 ago. 2007.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Economia e Planejamento. **Folha SF-23 Piracicaba**: mapa topográfico de Piracicaba V – (SF-23-Y-A-IV-2-SO-D). São Paulo, 1979. 1 mapa, 91 cm x 71 cm. Escala 1:10.000. (Plano Cartográfico do Estado de São Paulo).

SASAKI, Y. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. **Geophysical Prospecting**, Houten, n. 40, p. 453-464. 1992.

SILVA, L. M. Degradação Ambiental Causada por Cemitérios. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL, 1., 1994, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 1994.

SILVA, L. M. Os Cemitérios na Problemática Ambiental. In: SINCESP & ACEMBRA: **Seminário Nacional “Cemitérios e Meio Ambiente”**, São Paulo, 1995. 1., 1995. (Apostila).

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.

SOUZA, M. P. de. **Caracterização do lençol freático do conjunto habitacional Manoel Julião Rio Branco – AC.** 2001. 85 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001.

STURARO, R. J. **Mapeamento geoestatístico de propriedade geológico-geotécnicas obtidas de sondagens de simples reconhecimento.** 1994. 183 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

TELFORD, W.M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics.** 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 770 p.

UCISIK, A. S.; RUSHBROOK, P. **The impact of cemeteries on the environment and public health:** an introductory briefing. Denmark: WHO Regional Office for Europe. 1998. 11 p. (Rept. EUR/ICP/EHNA 01 04 01 (A)).

VIDAL TORRADO, P. et al. Levantamento pedológico do perímetro urbano de Piracicaba. Escala 1:10.000. In: BARRETO, A. G. O. P.; SPAROVEK, G.; GIANNOTTI, M. **A. Atlas rural de Piracicaba;** Piracicaba: IPEF, 2006.

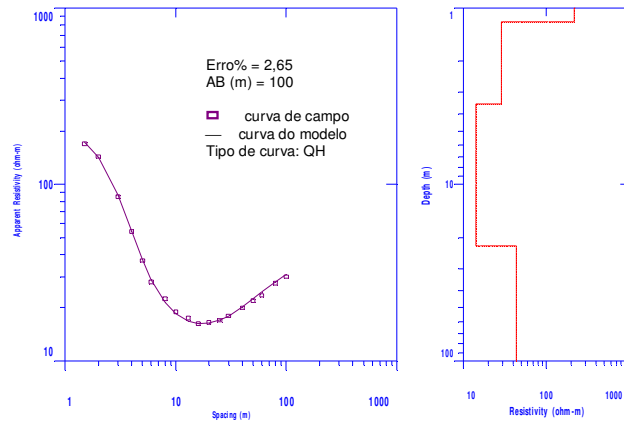
WARD, S. H. Resistivity and polarization methods. In: _____. **Geotechnical and environmental geophysics.** Tulsa: SEG, 1990. v.3, p. 147-189.

ZAINE, J. E. **Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método de detalhamento progressivo:** ensaio de aplicação na área urbana do município de Rio Claro (SP). 2000. 128 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

APÊNDICE

Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP

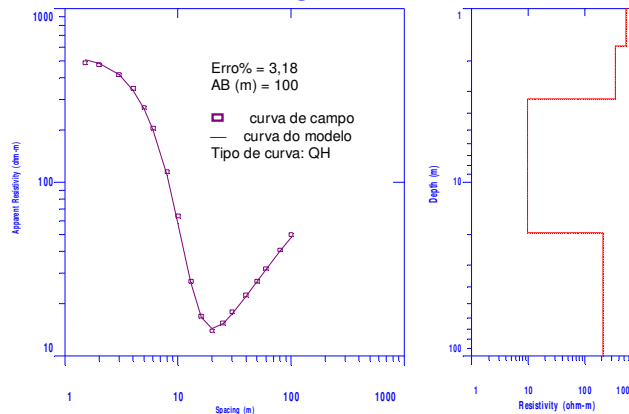
SEV 1



Nível Geométrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	218,50	1,20	-	545,00	Solo Argilo-silto- arenoso (seco)
2	28,80	2,30	1,20	543,80	Solo Argilo-silto- arenoso (úmido)
3	14,20	18,50	3,50	541,50	- Nível d'Água
4*	43,90	-	22,00	522,70	Siltito argiloso

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

SEV 2

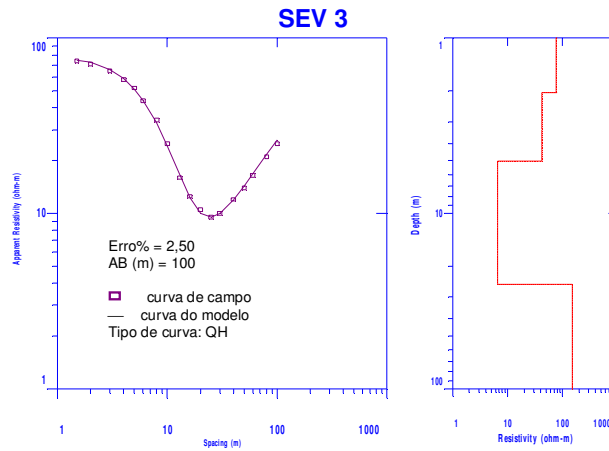


Nível Geométrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	532,35	1,55	-	549,00	Solo Argilo-areno- siltoso (seco)
2	349,00	1,60	1,55	547,45	Solo Argilo-areno- siltoso (úmido)
3*	10,10	16,20	3,15	545,85	- Nível d'Água Siltito argiloso
4**	210,20	-	19,35	529,65	Diabásio

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

** Nível relacionado ao contato com o topo da intrusão de diabásio (Intrusivas Básicas).

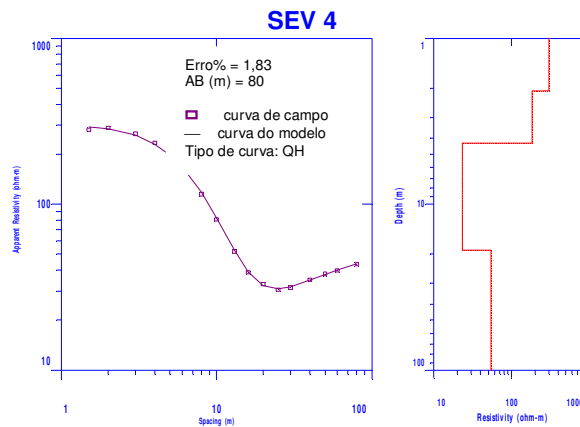
Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP



Nível Geolétrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	77,00	2,00	-	542,00	Solo Argilo-silto- arenoso (seco)
2	41,80	3,00	2,00	540,00	Solo Argilo-silto-arenoso (úmido)
3*	6,50	20,00	5,00	537,00	- Nível d'Água Siltito argiloso (Contaminação?)
4**	152,10	-	25,00	517,00	Diabásio

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

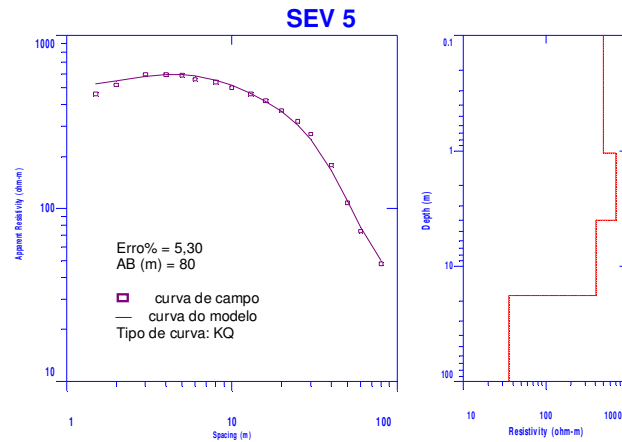
** Nível relacionado ao contato com a intrusão de diabásio (Intrusivas Básicas).



Nível Geolétrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	300,60	2,10	-	541,00	Solo Argilo-areno-siltoso (seco)
2	183,00	2,20	2,10	538,90	Solo Argilo-areno-siltoso (úmido)
3*	24,00	14,60	4,30	536,70	- Nível d'Água Siltito argiloso alterado
4*	54,05	-	18,90	522,10	Siltito argiloso

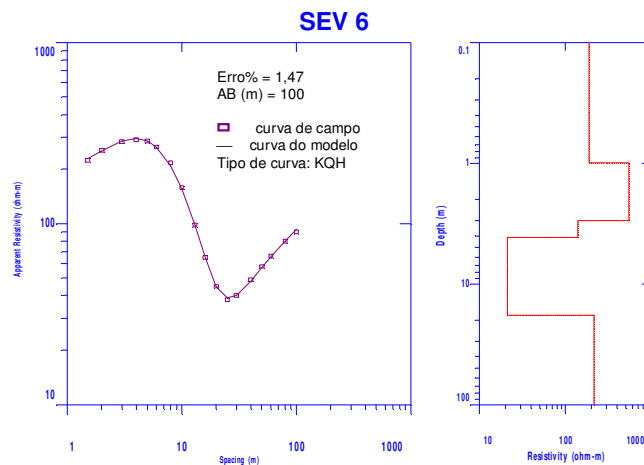
* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP



Nível Geolétrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	495,00	1,00	-	541,00	Solo Argilo-areno-siltoso (seco)
2	701,80	3,00	1,00	540,00	
3*	398,90	13,70	4,00	537,00	-Nível d'Água Siltito argiloso alterado
4*	35,80	-	17,70	523,30	Siltito argiloso

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

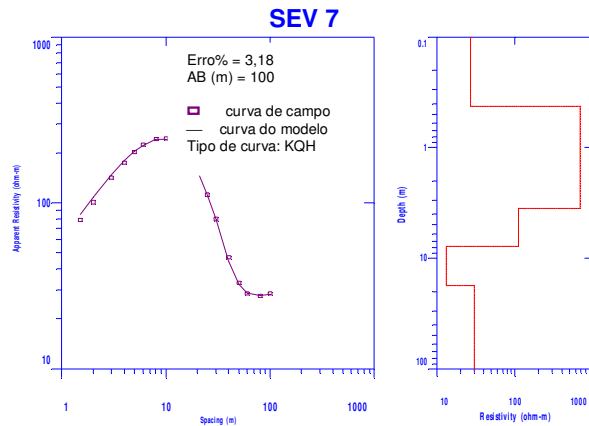


Nível Geolétrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	188,40	1,00	-	537,00	Solo Argilo-areno-siltoso (seco)
2	548,00	2,00	1,00	536,00	
3	139,80	1,10	3,00	534,00	Solo Argilo-areno-siltoso (úmido)
4*	21,00	14,00	4,10	532,90	-Nível d'Água Siltito argiloso
5**	215,30	-	18,10	518,90	Diabásio

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

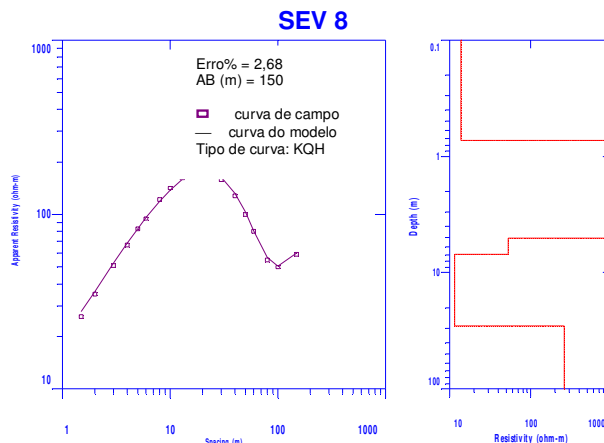
** Nível relacionado ao contato com a intrusão de diabásio (Intrusivas Básicas).

Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP



Nível Geoeletrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	27,10	0,45	-	546,00	Anomalia Condutiva (contaminação?)
2	690,00	3,10	0,45	545,55	Solo Argilo-areno-siltoso + aterro com cascalho
3*	110,50	4,25	3,55	542,45	- Nível d'Água Solo Argilo-areno-siltoso
4*	13,30	9,80	7,80	538,20	Siltito argiloso
5*	31,20	-	17,60	528,40	

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

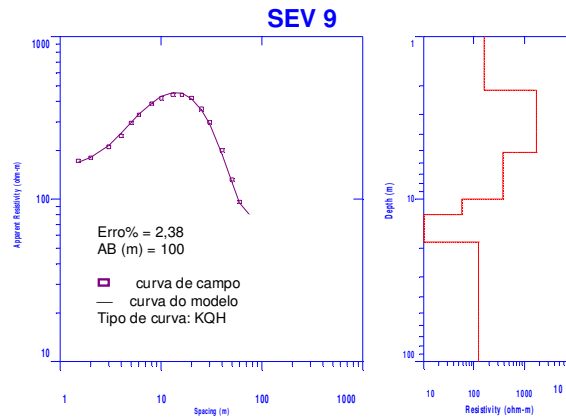


Nível Geoeletrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	13,70	0,73	-	545,00	Anomalia Condutiva (contaminação?)
2	934,40	4,32	0,73	544,27	Solo Argilo-areno-siltoso + aterro com cascalho
3*	52,50	1,95	5,05	539,95	- Nível d'Água Siltito argiloso alterado
4*	11,40	21,90	7,00	538,00	Siltito argiloso
5**	258,90	-	28,90	516,10	

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

** Nível relacionado ao contato com a intrusão de diabásio (Intrusivas Básicas).

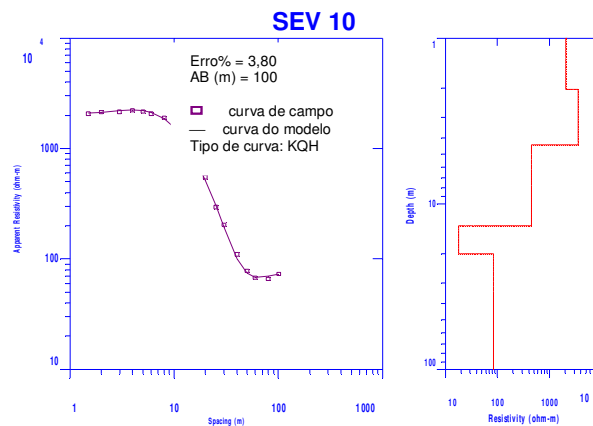
Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP



Nível Geométrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	157,90	2,00	-	543,00	Solo Argilo-areno-siltoso (seco)
2	1720,00	3,10	2,00	541,00	Tubulação de drenagem superficial (concreto)
3	372,30	4,80	5,10	537,90	Solo Argilo-areno-siltoso -Nível d'Água
4*	58,10	2,45	9,90	533,10	Siltito argiloso alterado
5*	10,10	5,85	12,35	530,65	Siltito argiloso
6**	125,00	-	18,20	524,80	Diabásio

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

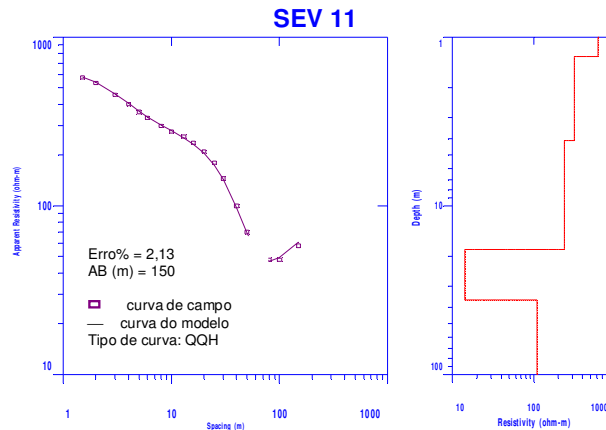
** Nível relacionado ao contato com a intrusão de diabásio (Intrusivas Básicas).



Nível Geométrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	2071,10	2,00	-	546,00	Solo Argilo-areno-siltoso (seco)
2	3566,20	2,35	2,00	544,00	
3*	454,80	9,10	4,35	541,65	-Nível d'Água Siltito argiloso alterado
4*	18,20	6,40	13,45	532,55	Siltito argiloso
5*	85,00	-	19,85	526,15	

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

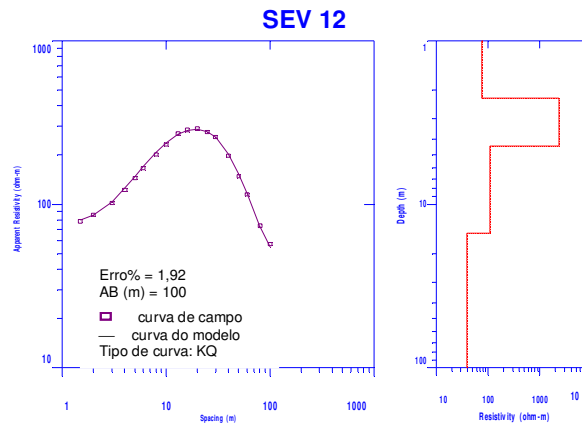
Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP



Nível Geométrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	627,30	1,30	-	548,00	Solo Argilo-areno-siltoso (seco)
2	320,10	2,80	1,30	546,70	Solo Argilo-areno-siltoso (úmido)
3	239,90	14,00	4,10	543,90	-Nível d'Água Siltito argiloso alterado e/ou fraturado
4*	14,25	18,00	18,10	529,90	Siltito argiloso
5**	110,50	-	36,10	511,90	Diabásio

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

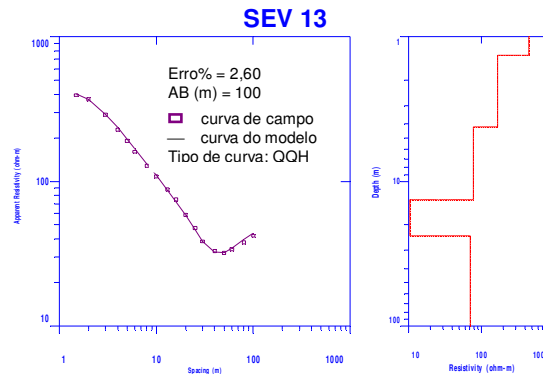
** Nível relacionado ao contato com a intrusão de diabásio (Intrusivas Básicas).



Nível Geométrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	74,90	2,20	-	542,50	Anomalia Condutiva (contaminação?)
2	2355,10	2,05	2,20	540,30	Caixa de ligação das tubulações (concreto)
3*	108,90	10,75	4,25	538,25	-Nível d'Água Siltito argiloso alterado
4	39,40	-	15,00	527,50	Siltito argiloso

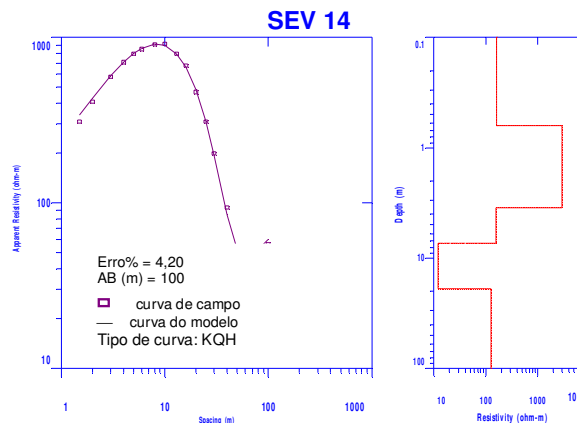
* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP



Nível Geolétrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	448,55	1,35	-	543,00	Solo Argilo-areno-siltoso + Aterro com material de construção civil reciclado moído
2	166,50	2,85	1,35	541,65	Solo Argilo-silto-arenoso (úmido)
3*	77,60	9,10	4,20	538,80	-Nível d'Água Siltito argiloso alterado
4*	10,50	10,30	13,30	529,70	Siltito argiloso
5*	72,10	-	23,60	519,40	

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

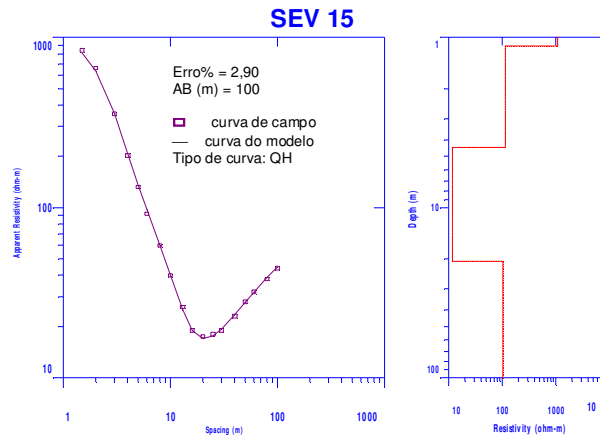


Nível Geolétrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	160,20	0,60	-	548,00	Solo Argilo-areno-siltoso (seco)
2	2960,70	2,80	0,60	547,40	Solo Areno-argilo-siltoso (seco)
3	155,70	3,80	3,40	544,60	Solo Argilo-areno-siltoso -Nível d'Água
4*	11,85	11,60	7,20	540,80	Siltito argiloso
5**	127,50	-	18,80	529,20	Diabásio

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

** Nível relacionado ao contato com a intrusão de diabásio (Intrusivas Básicas).

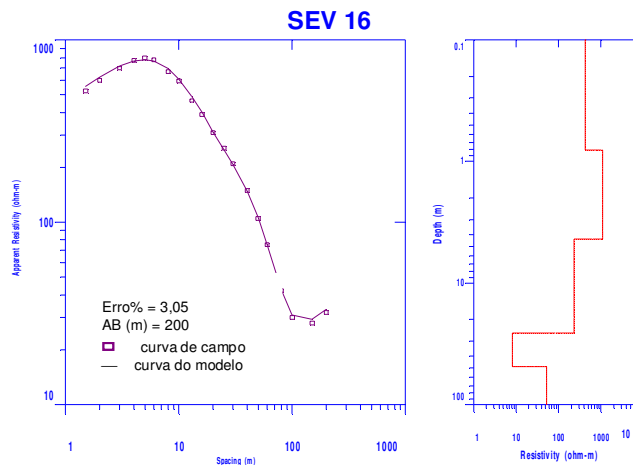
Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação e Mapeamento da Contaminação por Cemitérios - o Exemplo do Cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP



Nível Geométrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	1070,00	1,20	-	550,00	Solo Argilo-areno-siltoso (seco)
2	115,10	3,50	1,20	548,80	Solo Argilo- siltoso- arenoso (úmido)
3*	11,75	16,00	4,70	545,30	- Nível d'Água Siltito argiloso
4**	105,85	-	20,70	529,30	Diabásio

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.

** Nível relacionado ao contato com a intrusão de diabásio (Intrusivas Básicas).



Nível Geométrico	Resistividade (ohm. m)	Espessura (m)	Profundidade ao Topo (m)	Cota do Topo (m)	Descrição dos Materiais
1	430,35	0,95	-	560,00	Solo Argilo-areno-siltoso (seco)
2	1093,10	3,75	0,95	559,05	Solo Argilo-areno-siltoso (seco)
3*	233,20	21,20	4,70	555,30	Siltito argiloso alterado - Nível d'Água
4*	10,10	23,00	25,90	534,10	Siltito argiloso
5*	52,80	-	48,90	511,10	Siltito argiloso

* Nível relacionado com a Formação Corumbataí.