

LUCAS SCHETTINI

Avaliação de aspectos geológicos e geotécnicos na implantação do Aterro Sanitário de São Carlos – SP, com o auxílio da geofísica.

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr.

Osni José Pejon

Versão corrigida

Original se encontra disponível na Unidade em que aloja o Programa.

São Paulo

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Sa Schettini, Lucas  
Avaliação de aspectos geológicos e geotécnicos na  
implantação do Aterro Sanitário de São Carlos - SP, com  
o auxílio da geofísica. / Lucas Schettini; orientador  
Osni José Pejon. São Carlos, 2016.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação  
e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2016.

1. Geofísica. 2. Eletroresistividade. 3. Aterro  
Sanitário. 4. Caminhamento Elétrico. 5. Sondagem  
Elétrica Vertical. 6. Arranjo Dipolo-Dipolo. 7. Arranjo  
Schlumberger. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Geólogo **LUCAS SCHETTINI**.

Título da dissertação: "Avaliação de aspectos geológicos e geotécnicos na implantação do Aterro Sanitário de São Carlos - SP".

Data da defesa: 08/08/2016.

### Comissão Julgadora:

### Resultado:

Prof. Titular **Osni José Pejon (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Profa. Dra. **Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Vagner Roberto Elis**  
(Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas/IAG-USP)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:  
Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Dedico este trabalho aos meus pais Domenico e Marli, pelo apoio, amor e dedicação; ao meu irmão Domenico Schettini Filho, a minha amiga Bianca Kancelkis por todo o incentivo, compreensão e companheirismo.

## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos à Instituição pela estrutura prestada, a todas as pessoas do Departamento de Geotecnia e ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas pelo apoio nas horas mais difíceis e pelo compartilhamento de informação, aprendizado e momentos de alegria.

Ao professor e orientador Dr. Osni José Pejon pela orientação, empenho, dedicação, paciência e atenção dedicada a esta pesquisa. Uma grande pessoa, um excelente orientador e um grande amigo.

Ao professor Dr. Vagner Elis do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas pela paciência, pelos ensinamentos, pela disponibilidade, por toda a maravilhosa atenção dada durante minhas viagens para São Paulo e orientações no trabalho de campo e nas fases de processamento no RE2DINV.

Aos técnicos do departamento de Geotecnia em especial, Oscar dos Santos, pela explicação dos ensaios e sempre disponibilidade em ajudar. A todos os técnicos do IAG durante o trabalho de campo, o auxílio para tirar dúvidas, as descontrações e alegrias no campo que contribuiu para o desenvolvimento da pesquisa e novas amizades conquistadas.

Aos meus amigos e colegas Amanda Almeida, Tati Oliveira, Moisés Failache, Breno Rocha, as gêmeas Ana Cláudia e Ana Paula, Monique Neves e em especial a minha grande amiga Bianca Simoni Kancelkis no compartilhamento de conselhos e dicas em momentos alegres, difíceis e pela maravilhosa amizade que eu conquistei durante o mestrado.

Aos funcionários do Departamento de Geotecnia, Álvaro Nery, Neiva Cardoso, Maristela Aparecida pelas informações prestadas, pela educação e hospitalidade durante todos os momentos em que estive no departamento.

Aos meus pais Domenico e Marli Schettini, pelos conselhos ao longo destes anos, pela superação de cada dificuldade, unidos, tudo o que sou devo a vocês, desde o amor me ensinado até a valorização de cada passo conquistado. A cada dificuldade que meus pais tinham e superavam, me fez enxergar de que eu posso sempre chegar mais adiante e conseguir meus objetivos na vida, amo vocês.

Ao meu irmão Domenico Schettini Filho, pela paciência prestada, pelos momentos compartilhados de alegria e dificuldade, por cada superação de problemas de saúde que porventura nossa família passou e acima de tudo sempre me fez me tornar uma pessoa melhor, obrigado.

“A sabedoria não vem do acerto, mas do aprendizado com os erros.”

Monja Coen

## RESUMO

Schettini, L. **Avaliação de aspectos geológicos e geotécnicos na implantação do aterro sanitário de São Carlos-SP, com o auxílio da Geofísica.** 2016. 187 p. Dissertação de Mestrado (Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

A caracterização geológica e geotécnica dos locais de implantação de aterros sanitários é fundamental, tanto para fornecer subsídios adequados ao projeto de instalação das células de deposição dos resíduos sólidos urbanos (RSU), quanto para que se conheçam as características da área antes de ser modificada pela obra. Neste sentido, o presente trabalho visou mostrar a contribuição que a geofísica, com o uso da técnica da eletrorresistividade e do potencial espontâneo, associado a informações de investigação geotécnica direta pode dar para o estabelecimento de um *background* da área de instalação do aterro sanitário da cidade de São Carlos-SP. Foram realizados 7 caminhamentos elétricos (CE) com o arranjo dipolo-dipolo com eletrodos espaçados de 10 metros e três sondagens elétricas verticais (SEV), utilizando o arranjo Schlumberger, com profundidade de investigação de até 100 metros. Para processamento dos modelos bidimensionais dos CE utilizou-se o programa RES2DINV, e enquanto que para as SEV foi utilizado o modelo unidimensional. A interpretação dos modelos geoeletricos foi aperfeiçoada pela confrontação com informações geológico-geotécnicas prévias da área, obtidas nos estudos de impacto ambiental (EIA/RIMA) e resultados de sondagens de simples reconhecimento (SPT), realizadas na fase de estudo para implantação do aterro sanitário. Com isso foi possível definir com clareza a profundidade do topo rochoso e das zonas de maior umidade nos CE e SEV. O conjunto de seções de CE foi georeferenciada com o auxílio de GPS de precisão, o que permitiu o tratamento espacial das informações e o estabelecimento dos mapas da superfície do topo rochoso, das zonas de fluxo de água subterrânea e da espessura dos materiais inconsolidados. O conjunto de informações obtido permitiu identificar locais possíveis para a instalação futura de poços de monitoramento, assim como os dados geoeletricos das várias camadas servirá como padrão para identificar eventuais contaminações do solo ou da água subterrânea no futuro. A identificação da presença do topo rochoso em pequena profundidade, em algumas áreas do aterro, permite o melhor planejamento das escavações para instalação das células de deposição do RSU.

Palavra Chave: Aterro Sanitário, Resistividade Elétrica, Caminhamento Elétrico, Sondagem Elétrica Vertical, Inversão Geofísica, Modelo Geológico.

## ABSTRACT

Schettini, L. **Evaluation of Geological and Geotechnical aspects in the implementation of the landfill of São Carlos-SP, with the help of Geophysics. 2016.** 187 p. Dissertação de Mestrado (Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

The geological and geotechnical characterization of landfill implantation areas is crucial; even to provide appropriate subsidies of urban solid residues (USR) installation project of deposition cells and for knowing the characteristics of the area before being modified by the work. In this sense, the present work aimed to show the contribution that the geophysics, with the use of electrical resistivity technique and the spontaneous potential, associated with direct geotechnical investigation information can give to the establishment of a background of landfill installation area from São Carlos-SP city. Were performed 7 electrical imaging (EI) with the dipole-dipole array with electrodes spaced by 10 meters and three vertical electrical sounding (VES), using the Schlumberger array with depth research up to 100 meters. For processing of two-dimensional models of the EI was used the RES2DINV program and while for the vertical electrical sounding (VES)-was used one-dimensional model. Interpretation of geoelectric models was enhanced by the confrontation with geological and geotechnical information of prior area, obtained in the environmental impact assessment (EIA) and results of a simple reconnaissance probes, performed in the study phase for the landfill implementation. It was possible to clearly define the depth of the bedrock and the higher humidity areas in the EI and VES. The set of sections electrical Imaging (EI) was georeferenced with the aid of GPS accuracy that allowed the spatial treatment of Information and the setting maps of the bedrock surface, the groundwater flow zones and the thickness of the unconsolidated materials. The obtained set of information enabling identification of possible locations for the wells future monitoring installation, as well as the geoelectrical data from several layers will be use as a standard to identify possible contamination of the soil or groundwater in the future. The identification of bedrock presence in small depth, in some areas of landfill, allows better planning of excavation for installation of MSW deposition cells.

Keywords: Landfill, Electrical Resistivity, Electric Traverse, Vertical Electrical Sounding, Geophysical Inversion, Geological Model.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Organograma de pesquisa de diretrizes de RSU .....	25
Figura 2 - Comparativo de distribuição adequada e inadequada de resíduos sólidos no Brasil ao longo dos anos de 2013 e 2012 .....	28
Figura 3 - Tipos de aterro sanitário quanto à forma de construção. a-) Trincheira ; b-) Superfície/Planar; c-) Rampa.....	31
Figura 4 - Esquema típico de um aterro sanitário.....	32
Figura 5 - Interações relacionadas do aterro sanitário com o meio físico.....	33
Figura 6 - Operação do lixo em células com a rampa na proporção 1:3.....	35
Figura 7 - Cobertura final da camada de argila (60 cm) e cobertura diária de um solo mais fino (20 cm) 35	
Figura 8 - Relação entre resistividade e resistência em um corpo cilíndrico de um condutor homogêneo.40	
Figura 9 - Esquema que mostra a propagação das linhas de corrente elétrica em um determinado espaço..41	
Figura 10 - Configuração entre os eletrodos utilizados em campo.....	42
Figura 11 - Esquema de propagação da resistividade em a-) meios homogêneos e b-) meios heterogêneos.43	
Figura 12 - Representa um modelo esquemático das quatro camadas com diferentes valores de resistividade a partir de um substrato heterogêneo.....	45
Figura 13 - Mostra o arranjo Schlumberger típico para o uso da técnica da Sondagem Elétrica Vertical..48	
Figura 14 - Esquema do arranjo dipolo - dipolo.....	50
Figura 15 - Esquema de etapas envolvendo a inversão dos dados de resistividade elétrica. ....	55
Figura 16 - Operação do aterro sanitário de São Carlos.....	65
Figura 17 - Mapa de localização do aterro sanitário do município de São Carlos - SP.....	66
Figura 18 - Vista aérea, localização do aterro sanitário de São Carlos.....	66
Figura 19 - Mapa que mostra as principais unidades hidrográficas do município de São Carlos.....	70
Figura 20 - Mapa Geológico da área próxima ao aterro sanitário).....	73
Figura 21 - Mapa geológico da área de instalação do aterro sanitário de São Carlos .....	74
Figura 22 - Exemplos de blocos de diabásio vistos durante a visita de campo no aterro sanitário. Os blocos se encontram mais na porção oeste da imagem. ....	77
Figura 23 - Equipamento Syscal R2 da IRIS Instruments - com conversor e o módulo de emissão de leitura. Utilizado para as sondagens elétricas verticais.....	80
Figura 24 - Equipamento Syscal R2 da IRIS Instruments utilizados para os levantamentos das linhas de caminhamento elétrico.....	80
Figura 25 - Localização do aterro sanitário com as posições das linhas de caminhamento elétrico.....	82
Figura 26 - Levantamento de campo das linhas de caminhamento elétrico. ....	84
Figura 27 - Mapa de localização das SEVs. ....	85
Figura 28- Levantamento de campo da Sondagem Elétrica Vertical.....	88
Figura 29 - Esquematização dos procedimentos realizados para a interpretação das SEVs. ....	90
Figura 30 - Esquema que mostra as etapas durante a fase de tratamento e processamento dos dados. ....	91
Figura 31 - Distribuição das frações granulométrica das duas amostras de solo ensaiadas.....	97
Figura 32 - Mapa de localização das sondagens SPT e ensaios de permeabilidade de campo.....	100
Figura 33 - Posicionamento das linhas de caminhamento elétrico ao longo da área do aterro sanitário. .	103

Figura 34 - Seção de Caminhamento Elétrico A com espaçamento em X de 10 metros e elevações em Y que variam 727 a 710 metros. Linha em tracejado indica o topo rochoso. ....	104
Figura 35 - Seção de Caminhamento Elétrico A com espaçamento em X de 20 metros. ....	104
Figura 36 - Seção de Caminhamento Elétrico D com espaçamento em X de 10 metros e elevações em Y que variam 719 a 702 metros. Linha em tracejado indica o topo rochoso. ....	105
Figura 37 - Seção de Caminhamento Elétrico C com espaçamento em X de 10 metros e elevações em Y que variam 707 a 690 metros. ....	106
Figura 38 - Seção de Caminhamento Elétrico E com espaçamento em X de 10 metros e elevações em Y que variam 697,5 a 682,5 metros. O topo rochoso está indicado pela linha tracejada. ....	107
Figura 39 - Seção de Caminhamento Elétrico F com espaçamento em X de 10 metros e elevações em Y que variam 682,5 a 665 metros. O topo rochoso está indicado pela linha tracejada. ....	108
Figura 40 - Seção de Caminhamento Elétrico B com espaçamento em X de 10 metros e elevações em Y que variam 666 a 646 metros. ....	109
Figura 41 - Seção de Caminhamento Elétrico G com espaçamento em X de 10 metros e elevações em Y que variam 664 a 642 metros. ....	111
Figura 42 - Mapa de localização das sondagens SPT e linhas de caminhamento elétrico. ....	112
Figura 43 - Comparação entre o perfil Geoelétrico da seção A e a sondagem SP – 18. ....	114
Figura 44 - Comparação entre o perfil Geoelétrico da seção D com a sondagem SP – 13. ....	115
Figura 45 - Comparação entre o perfil Geoelétrico da seção D com a sondagem SP – 12. ....	116
Figura 46 - Comparação entre o perfil geoeletrico C1 e a sondagem SP – 10. ....	117
Figura 47 - Comparação entre o perfil Geoelétrico da seção C2 com a sondagem SP – 09. ....	118
Figura 48 - Comparação entre o perfil geoeletrico E1 e a sondagem SP - 11. ....	119
Figura 49 - Comparação do perfil geoeletrico E2 com a sondagem SP - 10. ....	121
Figura 50 - Comparação entre o perfil geoeletrico F e a sondagem SP - 06. ....	122
Figura 51 - Comparação entre perfil geoeletrico B1 e a sondagem SP - 03. ....	123
Figura 52 - Comparação entre o perfil geoeletrico B2 e a sondagem SP - 02. ....	124
Figura 53 - Comparação entre o perfil geoeletrico G e a sondagem SP - 03. ....	125
Figura 54 - Foto que mostra a distribuição das sondagens SPT ao longo da área do aterro sanitário (Sondagens SP 04, SP09 e SP10 indicam rocha a pequena profundidade). Fonte: Retirado de FIPAI, 2010. ....	126
Figura 55 - Visita de campo que mostra blocos de diabásio nas proximidades da célula de disposição de resíduos sólidos urbanos, proximidade da linha de caminhamento elétrico B. ....	127
Figura 56 - Sequência das seções de cargabilidade obedecendo à sequência das linhas de caminhamento elétrico de sul para norte. Linha A -> Linha D -> Linha C -> Linha E. ....	131
Figura 57 - Sequência das seções de cargabilidade obedecendo à sequência das linhas de caminhamento elétrico. Linha F -> Linha B -> Linha G. ....	132
Figura 58 - Seção de Eletrorresistividade e Cargabilidade da Linha G. ....	135
Figura 59 - Mapa de localização da área do aterro sanitário com as localizações dos pontos das sondagens elétricas verticais com as sondagens SPT e o limite do aterro sanitário. ....	138
Figura 60 - Sondagem elétrica Vertical 1 com as diferentes camadas interpretadas. ....	139
Figura 61 - Sondagem elétrica Vertical 2 mostrando o gráfico com as diferentes camadas interpretadas. ....	140

Figura 62 - Sondagem elétrica Vertical 3 mostrando o gráfico com as diferentes camadas interpretadas.	142
Figura 63 - Comparação das unidades geoeletricas da SEV - 1 com as camadas descritas na sondagem SP – 12. .....	146
Figura 64 - Comparação das unidades geoeletricas interpretadas pela SEV - 2 com a descrição das unidades descritas pela sondagem SP - 05.....	147
Figura 65 - Comparação das unidades geoeletricas da SEV - 3 com as unidades descritas pela sondagem SP – 11 .....	148
Figura 66 - Mapa interpolado com valores de resistividade característicos do maciço rochoso. ....	151
Figura 67 - Modelo Digital de Elevação da Superfície Topográfica.....	153
Figura 68 - Modelo Digital de Elevação do topo rochoso.....	154
Figura 69 - Mapa interpolado de profundidade do topo rochoso.....	156
Figura 70 - Mapa Interpolado com valores de resistividade característicos da Zona de Umidade.....	159
Figura 71 - Modelo Digital de Elevação Superfície Topográfica Topo da Zona de Umidade.....	160
Figura 72 - Modelo Digital de elevação com a indicação da direção de fluxo preferencial.....	161
Figura 73 - Mapa da profundidade da superfície do topo da zona de umidade.....	162

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de resistividade elétrica para alguns tipos de materiais. ....	39
Tabela 2 - Arranjo Schlumberger com as configurações dos eletrodos AB/2 e MN/2 utilizados durante o levantamento de campo. ....	86
Tabela 3- Representa a escala de valores de resistividade utilizadas para a interpretação das seções de caminhamento elétrico.....	92
Tabela 4 - Tamanho dos grids em função de cada linha de caminhamento elétrico e dos mapas extrapolados para além da área do aterro sanitário. ....	93
Tabela 5 - Pontos de sondagem SPT e suas respectivas coordenadas UTM. ....	98
Tabela 6 - Pontos de sondagem SPT e suas respectivas coordenadas UTM. ....	101
Tabela 7- Coeficiente de permeabilidade (K) medido em campo. ....	102
Tabela 8 - Resumo de faixas de resistividade e suas respectivas interpretações servindo como base para o modelo geoeletrico. ....	129
Tabela 9 - Intervalos de cargabilidade interpretados com base nas diversas seções analisadas. ....	135
Tabela 10 - Coordenadas topográficas das três sondagens elétricas verticais. ....	137
Tabela 11- Modelo geoeletrico da SEV – 1 realizada no final da Linha D. ....	140
Tabela 12 - Modelo geoeletrico da SEV – 2 realizada no final da Linha E.....	141
Tabela 13 - Modelo geoeletrico da SEV – 3 realizada no início da Linha C.....	143
Tabela 14 - Modelo geoeletrico com o resumo das 3 SEVs indicando as variações de resistividade. ....	145
Tabela 15 - Unidades classificadas pelas sondagens elétricas verticais. ....	149

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB – Eletrodos de Corrente

ABNT – Associação Brasileiras de Normas Técnicas

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpezas Públicas

CE – Caminhamento Elétrico

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

EM - Eletromagnético

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

FIPAI – Fundação para o Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial

IAG – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

MN – Eletrodos de Potencial

N.A. – Nível d'água

NBR – Norma Brasileira

PM – Poço de Monitoramento

PNMA – Política Nacional do Meio Ambiente

PNRS – Política Nacional dos Resíduos Sólidos

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental

RMS – *Root Mean Square* (média quadrática)

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SEV – Sondagem Elétrica Vertical

SPT – *Standard Penetration Test* (ensaio de penetração padrão)

USP – Universidade de São Paulo

UTM – Universal Transverse Mercator

1D – Uma dimensão

2D – Duas dimensões

## LISTA DE SÍMBOLOS

G – Fator Geométrico para o arranjo dipolo – dipolo

I – Corrente Elétrica (mA ou A)

K – Fator Geométrico

$K_{sch}$  – Fator Geométrico para o Arranjo Schlumberger

L – Comprimento

n – Fator que dimensiona o posicionamento dos eletrodos

R – Constante de Proporcionalidade

r – Raio

S – Área da seção transversal de um corpo condutor

t – Tempo (em ms)

V – Potencial Elétrico

$V_m$  – Potencial Elétrico no ponto M

$V_n$  – Potencial Elétrico no ponto N

x – Espaçamento dos Dipolos

Z – Profundidade Teórica de Investigação

$\rho$  - Resistividade Elétrica (ohm.m)

## Sumário

1 - INTRODUÇÃO .....	20
Objetivos.....	21
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 - Resíduos Sólidos .....	22
2.1.1 - Norma NBR 10.004 (2004) e Classificação dos Resíduos Sólidos Urbanos .....	22
2.1.2 - Resíduos Sólidos no Brasil.....	23
2.1.3 - Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) .....	25
2.1.4 - Formas de disposição de Resíduos Sólidos Urbanos .....	26
2.2 - Funcionamento de um aterro sanitário .....	29
2.2.1 - Implantação de um aterro sanitário .....	29
2.2.2 – Critérios de Seleção e Avaliação de Áreas para Aterro Sanitário .....	30
2.2.3 – Tipo de Aterro Sanitário .....	32
2.2.4 – Impacto do Aterro Sanitário no Meio Físico .....	34
2.2.5 – Construção do Aterro Sanitário .....	34
2.3 - Aplicação da Geofísica.....	36
2.3.1 - Métodos de Eletorresistividade.....	37
2.3.1.1 - Conceitos.....	37
2.3.1.2 - Respostas das propriedades elétricas nos materiais .....	38
2.3.1.3 - Fundamentos Teóricos do Método de Eletorresistividade.....	40
2.3.1.4 - Conceito geofísico de resistividade aparente .....	44
2.3.1.5 - Configuração de arranjos dos eletrodos .....	46
Técnica de Sondagem Elétrica Vertical.....	47
Técnica do Caminhamento Elétrico .....	49
2.4 - Interpretação de dados de Eletorresistividade (ER) e Polarização Induzida (IP) .....	51

2.4.1 - Método Teórico da Polarização Induzida.....	51
2.4.2 - Inversão Geofísica.....	52
2.4.3 - Tratamento quantitativo dos dados .....	54
2.4.4 - Inversão 1D de dados de eletrorresistividade.....	56
2.4.5 – Inversão (2D) de dados de eletrorresistividade .....	58
2.4.6 - Modelo de Inversão com a utilização do software RES2DINV .....	59
2.5 - Algumas aplicações de trabalhos que envolvem as técnicas de eletrorresistividade em aterro sanitário .....	62
3 - LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO .....	65
3.1 – Localização.....	65
3.2 – Clima .....	67
3.3 - Geomorfologia .....	67
3.4 – Vegetação .....	68
3.6 - Hidrologia .....	69
3.6.1 - Águas Superficiais .....	69
3.6.2 – Águas Subterrâneas .....	70
Aquífero Serra Geral .....	71
- Aquífero Guarani.....	71
3.7 - Geologia.....	72
3.7.1 - Grupo São Bento .....	75
3.7.2 - Formação Pirambóia .....	75
3.7.3 - Formação Botucatu .....	76
3.7.4 - Formação Serra Geral.....	76
3.7.5 - Formação Itaqueri .....	77
4 - MATERIAIS E MÉTODOS .....	79
4.1 - Equipamentos Utilizados nos trabalhos de campo.....	79
4.2 - Levantamento de campo - caminhamento elétrico (CE).....	81

4.4 - Levantamento de Campo – Sondagem Elétrica Vertical .....	84
4.5 - Processamentos dos dados nos <i>Softwares</i> .....	88
4.5.1 – Processamento dos dados topográficos .....	89
4.5.2 - Processamento dos dados das SEVs no <i>Software</i> IX1D .....	89
4.5.3 - Tratamento e processamento dos dados de CE do <i>software</i> RES2DINV .....	90
4.5.3.1 - Tratamento dos Dados.....	91
4.5.3.2 - Exportação dos dados para o Surfer.....	92
4.5.3.3 - Importação dos dados de resistividade do RES2DINV para as seções interpoladas no Surfer.....	94
5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	96
5.1 - Ensaios Geotécnicos prévios fornecidos pela empresa que administra o Aterro .....	96
5.1.1 - Ensaios de Laboratório.....	96
5.1.2 - Ensaios de Campo .....	98
5.2 - Resultados obtidos com os trabalhos Geofísica realizados na área do aterro .....	102
5.2.1 - Caminhamento Elétrico (CE).....	102
5.2.1.1 – Descrição das seções de caminhamento elétrico .....	104
5.2.2 - Comparação das linhas de caminhamento elétrico com os dados de sondagem SPT .....	111
5.2.2.1 - Sondagem SP – 18 e Linha de Caminhamento Elétrico A.....	113
5.2.2.2 - Sondagens SP – 13 e SP – 12 e a Linha de Caminhamento Elétrico D .....	115
5.2.2.3 - Sondagens SP – 10 e SP – 09 e a Linha de Caminhamento Elétrico C .....	117
5.2.2.4 - Sondagens SP – 11 e SP – 10 e a Linha de Caminhamento Elétrico E.....	119
5.2.2.5 - Sondagem SP – 06 e a Linha de Caminhamento Elétrico F .....	121
5.2.2.6 - Sondagens SP – 03 e SP - 02 e a Linha de Caminhamento Elétrico B .....	123
5.2.2.7 - Sondagem SP – 03 e a Linha de Caminhamento Elétrico G.....	125
5.2.2.8 - Correlação com as informações das sondagens SPT contidas no EIA/RIMA .....	126
5.3 - Considerações sobre a correlação dos perfis geoeletricos com as sondagens SPT....	128

5.3.1 - Modelo Geoelétrico com base na comparação dos dados de sondagem SPT com as seções de resistividade .....	129
5.4 - Seções de Cargabilidade .....	130
5.5 - Sondagens Elétricas Verticais (SEV).....	136
5.5.1 - Comparação entre as três SEVs .....	143
5.5.2 - Comparação entre as SEVs e as sondagens SPT próximas.....	145
5.5.2.1 - Comparação entre a SEV – 1 e a sondagem SP – 12 .....	145
5.5.2.2 - Comparação entre a SEV – 2 e a sondagem SP – 05 .....	146
5.5.2.3 - Comparação entre a SEV – 3 e a sondagem SP – 11 .....	147
5.5.2.4 – Comparação com os resultados das SEVs realizadas no relatório de impacto ambiental .....	149
5.6 - Determinação da superfície do Topo Rochoso .....	150
5.6.1 - Obtenção de modelo digital de elevação (MDE) com os dados de superfície do topo rochoso .....	152
5.6.2 - Mapas da superfície interpolada da Zona Úmida.....	157
6 - CONCLUSÕES.....	163
6.1 - Sondagens Elétricas Verticais (SEV).....	163
6.2 - Caminhamento Elétrico.....	164
6.3 - Importância da Geofísica integrada com os métodos indiretos de investigação.....	165
6.4 - Importância da Geofísica para a caracterização do aterro sanitário de São Carlos....	166
7 - RECOMENDAÇÕES .....	168
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	169

## 1 - INTRODUÇÃO

Com o crescente avanço das atividades industriais e o aumento da população do município de São Carlos a quantidade de resíduos sólidos urbanos que são produzidos aumentou em grandes proporções, sendo uma das grandes preocupações na atualidade, devido ao seu alto potencial poluidor, como também pelo risco potencial representado à população e degradação ambiental. Em locais sem o tratamento adequado, como lixões, o contaminado pode infiltrar no solo e atingir as águas subterrâneas, especialmente se for áreas próximas ao aquífero, onde a circulação é mais lenta, comprometendo a qualidade do solo e da água.

Os aterros sanitários são obras de engenharia que visam a disposição e o tratamento adequado dos resíduos sólidos urbanos. As informações geológico-geotécnicas são fundamentais, tanto na fase de escolha do local mais adequado, quanto na implantação do aterro e na instalação das barreiras protetoras. Em geral, aterros sanitários são a forma de disposição final dos resíduos sólidos. Os métodos geofísicos tem mostrado eficácia em identificar áreas contaminadas pela disposição de resíduos sólidos urbanos, contribuindo para tornar mais efetivos os programas de sondagem voltados à coleta de amostras e a instalação de sistemas de monitoramento.

O método da eletrorresistividade permite identificar anomalias dentro da zona saturada, que caracterizam a presença da contaminação gerada pela migração do percolado proveniente da disposição dos resíduos sólidos. Os métodos elétricos podem ainda auxiliar na avaliação das propriedades e características do solo, principalmente no que diz respeito à distribuição espacial, podendo assim fornecer informações importantes para orientar e compreender melhor os possíveis fluxos de contaminantes no solo.

O uso dos métodos geofísicos, principalmente dos métodos elétricos, desde a fase de implantação do aterro, deverá permitir definir as condições prévias do terreno antes da deposição dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Informações importantes, como espessura do solo, profundidade do nível da água subterrânea e características desta água, deverão permitir o estabelecimento de um *background* que servirá de base para estudos futuros sobre a eficiência das barreiras protetoras e do desempenho do aterro como um todo.

O aterro sanitário de São Carlos iniciou suas atividades há três anos e está ainda em suas primeiras células de deposição de lixo. Portanto se constitui uma área excelente para a realização da pesquisa. Em primeiro lugar os estudos poderão auxiliar a empresa que está implantando o aterro na localização das cavas e na definição das medidas de proteção. Além disso, os estudos visam permitir o estabelecimento de parâmetros de comparação para estudos futuros após a disposição dos RSU na área.

### **Objetivos**

O objetivo desta pesquisa foi avaliar os parâmetros físicos, geológicos e geotécnicos como critérios de avaliação da área de instalação do aterro sanitário do município de São Carlos, com o auxílio do método geofísico da eletroresistividade. Este trabalho visou também comparar estes resultados com os obtidos nos estudos do EIA-RIMA e com os ensaios realizados pela empresa que opera o aterro atualmente.

## **2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 - Resíduos Sólidos**

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR (Norma Brasileira Registrada) 10.004 (2004) define resíduos sólidos como “Resíduos de estado sólido e semissólido que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição”, ou seja, a definição de resíduos envolve desde sistemas de tratamento de água, passando por resíduos gerados por atividades poluidoras, além da contaminação de líquidos que não são miscíveis com água de esgoto.

A ABNT informa na legislação qual é o tratamento adequado através de determinados equipamentos que buscam uma solução técnica para o correto tratamento e coleta de resíduos sólidos urbanos, no entanto, não existe uma norma específica que se refere a como deve ser feito o tratamento de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos).

#### **2.1.1 - Norma NBR 10.004 (2004) e Classificação dos Resíduos Sólidos Urbanos**

A Norma NBR 10.004 classifica os resíduos sólidos em:

- A-) resíduos de classe I – Perigosos;
- B-) resíduos de classe II – Não Perigosos;
  - resíduos de classe II A – Não Inertes e;
  - resíduos de classe II B – Inertes

De acordo com a norma, os resíduos de classe I são classificados quanto à periculosidade em função especialmente de suas propriedades físicas, químicas e infectocontagiosas, onde tais propriedades representam grandes riscos à saúde humana e ao meio ambiente, a norma também descreve estes tipos de resíduos, quanto à periculosidade em relação às características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Quanto aos resíduos de classe II, classificados como não inertes, têm como principais propriedades a biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água. Já os resíduos de

classe II classificados como inertes se referem a quaisquer tipos de resíduos em que nenhum de seus constituintes são solubilizados a concentrações acima dos padrões determinados de potabilidade de água, em outras palavras são resíduos de demorada decomposição, como a borracha, pneu, vidro, etc.

A aplicação da Norma é dificultada devido ao problema da disposição de resíduos sólidos no Brasil pela falta de controle na coleta destes, com a frequente mistura durante o despejo de resíduos perigosos com resíduos domésticos, pois não se consegue separar os resíduos por classes. Alguns exemplos de resíduos potencialmente perigosos são utilizados em atividades agrícolas (como pesticidas), na indústria automotiva (como de óleo lubrificante) e em produtos eletrônicos (como pilhas e baterias).

### **2.1.2 - Resíduos Sólidos no Brasil**

O aumento da geração de RSU é acompanhado pelo crescimento econômico e pelo aumento de consumo e de concentração urbana que o Brasil atravessou durante os anos de 2005 até 2013, no entanto a incorreta disposição dos resíduos acarretou problemas diretamente na gestão dos mesmos (Besen et al., 2010).

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública (ABRELPE, 2012) divulgou alguns dados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, a tendência mostrada por tais dados é da geração de 65 milhões de toneladas por ano de resíduos sólidos, onde a partir deste montante menos de 50% dos resíduos tiveram seu destino adequado, no caso de resíduos sólidos urbanos (aterros sanitários). O Panorama dos RSU é importante, pois antecedeu a regulamentação da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) que já alertava quanto ao tratamento e disposição inadequada dos resíduos na maior parte dos municípios brasileiros.

Com a regulamentação da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) instituída pela Lei Nº 12.305/2010, houve uma melhora na definição dos mecanismos de disposição de resíduos sólidos através de uma política de gestão, tratamento e disposição final destes, por meio de diretrizes específicas auxiliando os municípios a se empenharem em melhores soluções quanto à abordagem e tratamento dos resíduos, na tentativa de representar uma melhora do quadro de distribuição de aterros sanitários no país.

As proposições que nortearam a criação da PNRS tiveram como base políticas de resíduos sólidos de outros países (como Japão, Estados Unidos e algumas nações europeias). Um dos principais agravantes de se embasar nestas proposições é o contraste entre os municípios brasileiros e destes países, conflitante em diversos setores, como o político, socioeconômico, cultural, aspectos fisiográficos, etc. Outro problema concomitante com a Política Nacional de Resíduos Sólidos é quanto à ineficácia dos principais órgãos públicos em verificar de modo eficaz as condições tecnológicas essenciais e necessárias para o correto controle e gerenciamento destes resíduos.

Jucá (2014) propôs uma metodologia que correlacionava às diretrizes da política de resíduos sólidos no Brasil, com as diretrizes da política de resíduos encontrada em outros países. Com isso o autor, dividiu sua metodologia em três etapas:

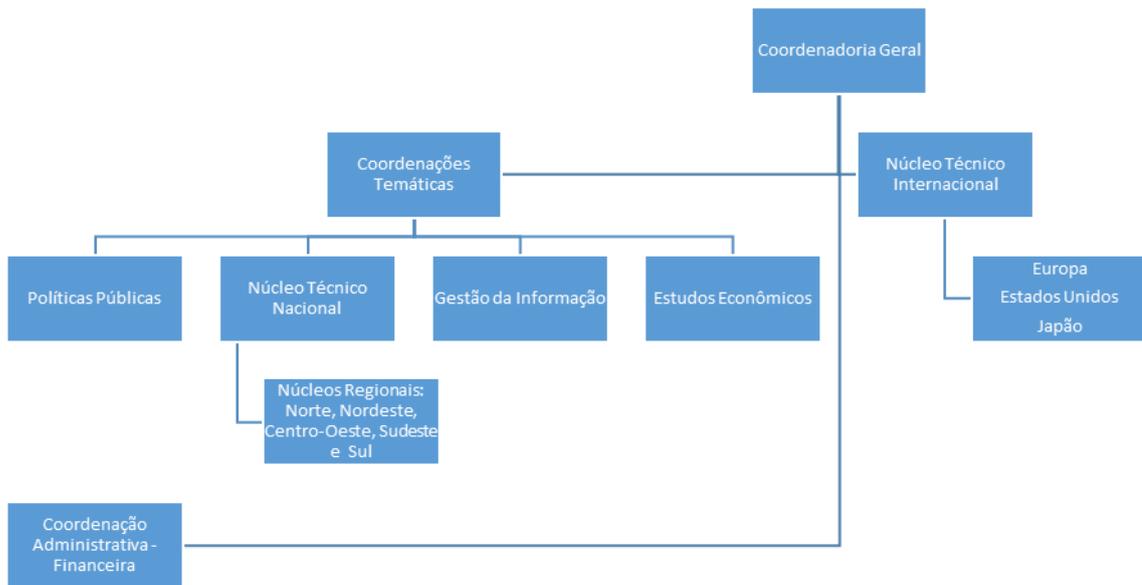
A-) Ter conhecimento do funcionamento das políticas internacionais de resíduos sólidos urbanos, analisando a extensão do controle dos utensílios legais na adoção de práticas, domínios tecnológicos e estratégias de tratamento e disposição de resíduos;

B-) Pesquisar o atual prognóstico da política de resíduos sólidos urbanos no Brasil, além de considerar as diferenças entre cada região do país, estabelecendo o marco regulatório;

C-) O tema RSU deve ser discutido sistematicamente através de seminários e eventos de divulgação.

O resultado da metodologia proposta por Jucá (2014) permitiu uma comparação entre as políticas públicas, além de tecnologia e instituições existentes no exterior com as existentes no Brasil, sendo possível explicitar as diferenças nas políticas de tratamento e disposição dos resíduos sólidos, identificando os principais pontos de diferença entre as regiões analisadas e estabelecendo as diretrizes das políticas de gestão de resíduos sólidos no Brasil.

O organograma de diretrizes de tratamento e tratamento final dos resíduos (observados na Figura 1), estabelecido por Jucá (2014), envolve cada etapa para a discussão do cenário de gestão de resíduos sólidos no Brasil através de seminários, com participação de pessoas e órgãos públicos nas esferas federais, estaduais e municipais.



**Figura 1** - Organograma de pesquisa de diretrizes de RSU. Fonte: Jucá (2014).

### 2.1.3 - Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS)

A criação da Política Nacional dos Resíduos Sólidos veio da necessidade de direcionar todos os Estados e Municípios por meio de uma política integrada de tratamento e disposição dos resíduos sólidos. A Política Nacional dos Resíduos Sólidos foi criada de maneira conjunta com a Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB), Política Nacional da Educação e a Lei de Consórcios Públicos (LCP), de maneira que todas as três leis funcionem de forma integrada e auxiliem de uma forma complementar na gestão de resíduos sólidos (Brasil, 2010a).

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos – PNRS ou Lei Nº 12.305/2010 tem como principal propósito estabelecer uma diretriz com regime de medidas que são adotados no âmbito federal com cooperação com as demais instituições públicas (Estados e Municípios) uma administração integrada quanto à questão de gerenciamento dos resíduos sólidos, atribuindo responsabilidades aos geradores de resíduos, podendo ser ou não órgãos governamentais com devidas aplicações econômicas (Brasil, 2010a).

A PNRS é a primeira lei que estabelece uma política adequada para o tratamento de RSU, estabelecendo diretrizes voltadas para a coleta, tratamento e disposição de resíduos, minimizando a geração destes (Brasil, 2010a). No entanto, a aplicação desta lei está longe de ser o ideal, os municípios terão que se empenhar em uma gestão integrada de resíduos sólidos

de tal forma que minimize os danos negativos ao meio ambiente e maximize os impactos ambientais positivos, através da PNRS como principal instrumento para criar um Plano Municipal de Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos (PMGIRS) (Maeda, 2013).

A PNRS é regulamentada pelo Decreto nº 7.404/10 que previu a elaboração do Plano Nacional dos Resíduos Sólidos (Maeda, 2013). A Política Nacional dos Resíduos Sólidos foi uma evolução da Lei Nº 6.938/1981 que é a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) (Mele et al, 2006). Após a criação da PNMA, surgiram leis e decretos, como a Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB) até o estabelecimento da PNRS em 2010 que é a legislação mais clara quanto ao manejo e regulamentação dos resíduos sólidos urbanos (Yoshida, 2012).

Segundo Windhan - Bellord e Souza, (2011) muitos municípios brasileiros apresentam problemas econômicos devido ao alto custo de implementação de aterro sanitário, além de baixa capacitação técnica e resistência das pessoas em receber resíduos de municípios vizinhos. Grande parte é composta por municípios de pequeno porte e na maioria dos casos apresentam deficiências nas formas de recuperação de matéria e energia.

Um dos grandes desafios futuros para políticas de gestão de resíduos como a PNRS é estabelecer um modelo conjunto de gestão de resíduos sólidos de tal forma que minimizem a geração destes, incentive a reciclagem e práticas de reuso, tratamento adequado da disposição final dos resíduos sólidos urbanos e a maximização de serviços de limpeza urbana (Lima, 2002). A Política Nacional dos Resíduos Sólidos deve funcionar de maneira conjunta nos diferentes âmbitos federais, estaduais e municipais para que o número de municípios com aterro sanitário aumente.

#### **2.1.4 - Formas de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos**

As principais formas de disposição de resíduos sólidos ocorrem através de lixões, aterros controlados e aterros sanitários. A maior parte das formas de despejo destes resíduos são incorretas e irregulares com intensa falta de controle o que pode implicar na contaminação como consequência destas atividades (Castilhos Jr., 2003).

O aterro sanitário é a forma mais correta de disposição final dos resíduos sólidos, pois o tratamento e o controle destes resíduos são adequados o que garante um sistema mais

apropriado quanto ao destino final e maior controle de algum remanescente que possa gerar possíveis danos ambientais (Catapreta, 2008).

As diferenças entre lixão, aterro controlado e aterro sanitário são:

- Lixão: representa a forma mais obsoleta de despejo de resíduos sólidos, este processo é caracterizado pela descarga de resíduos sólidos a céu aberto, sem qualquer tipo de proteção. Os resíduos são simplesmente amontoados impactando de forma negativa o local, sendo propício para a contaminação de solos e lençol freático, além de ser uma área propensa a vetores de doença e proporcionar um aspecto visual negativo para a sociedade (IBGE, 2000).

- Aterro Controlado: é uma categoria intermediária entre o lixão e o aterro sanitário, apresenta certo controle na disposição dos resíduos e recebe algum tipo de cobertura. Entretanto, não há nenhum tipo de controle nas dispersões de gases, além de não receber uma adequada impermeabilização do solo e de não haver tratamento do chorume gerado pelos resíduos. Devido à falta de controle na impermeabilização do solo, o aterro controlado também é considerado uma forma inadequada de disposição de resíduos. Geralmente, o aterro controlado é uma célula próxima a áreas onde é o lixão com algum tipo de cobertura (IBGE, 2000).

- Aterro Sanitário: é a forma mais correta de tratamento e disposição final de resíduos sólidos, onde há a impermeabilização do solo, compactação e cobertura das células de lixo, sistemas de coleta e tratamento de gases e chorume. O tratamento do chorume em um aterro sanitário é feito através de um sistema de drenagem, onde após o tratamento ele é devolvido ao ambiente, com riscos mínimos de contaminação (Manahan, 1999).

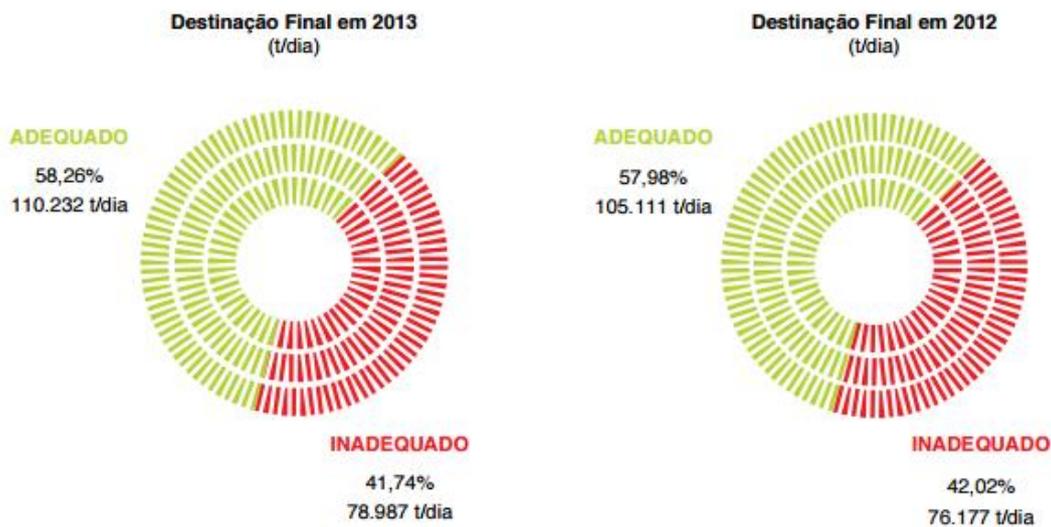
Segundo Schalch et al. (2002), a implantação do aterro sanitário não elimina a necessidade da coleta seletiva do lixo e da correta reciclagem deste. Os resíduos tratados em aterros devem ser combinados com uma intensa campanha de coleta seletiva e reciclagem, de tal forma que aumente consideravelmente a vida útil do aterro, além de criar uma cultura de conscientização na sociedade e, por conseguinte, uma maior participação desta no tratamento e coleta do lixo gerando respostas positivas quanto à preservação do meio ambiente.

Schalch et al. (2002) ressalta que em obras de aterro sanitário deve-se ter cuidados quanto ao sistema de drenagem superficial para o desvio de águas da bacia de contribuição para fora de áreas do aterro sanitário, cuja principal finalidade é de diminuir o volume de líquido percolado.

O Panorama Nacional de Resíduos Sólidos, referente ao ano de 2013, realizado pela ABRELPE (2014) mostra que 189.219 toneladas de lixo por dia são produzidos no Brasil, dos quais 52,4% dos despejos de resíduos são na região sudeste, 22,1% na região Nordeste, 10,9% na região Sul, 8,2% na região Centro-Oeste e 6,4 % na região Norte.

Do total de resíduos sólidos produzidos, 58,3% corresponde à disposição em aterro sanitário, porém ainda há 28,8 milhões de toneladas de resíduos por ano que ainda vão para lixões ou aterros controlados o que representa um quadro grave na distribuição dos resíduos sólidos, mesmo após a instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (ABRELPE, 2014).

A Figura 2 mostra um comparativo referente aos anos de 2013 e 2012 em relação ao destino de resíduos sólidos classificados como adequado e inadequado no Brasil. (ABRELPE, 2014)



**Figura 2** - Comparativo de distribuição adequada e inadequada de resíduos sólidos no Brasil ao longo dos anos de 2013 e 2012. Fonte: ABRELPE, 2014.

Segundo, Menezes et al. (1995) as áreas que correspondem aos antigos lixões e aterros controlados no Brasil são desprovidas de qualquer cuidado ambiental, além de terem sido implantadas em locais inapropriados, o posterior tratamento ou o emprego de algum material de cobertura na área não elimina o risco de emissão de poluentes.

Portanto, é de extrema importância a implantação de aterros sanitários juntamente com um adequado programa de coleta de resíduos, além de uma efetiva participação da sociedade para diminuir o risco de poluentes no meio ambiente.

## **2.2 - Funcionamento de um aterro sanitário**

### **2.2.1 - Implantação de um aterro sanitário**

Segundo Langer *apud* BROLLO (2001), para a implantação de um aterro sanitário deve-se considerar alguns aspectos, tais como:

- Baixo fluxo de água subterrânea nos arredores da área de disposição, especialmente em áreas onde o nível d'água é profundo e principalmente em áreas com solo arenoso;
- Baixa permeabilidade, grande espessura e homogeneidade do material geológico;
- Alta capacidade de retenção/adsorção de compostos;
- Baixa solubilidade química e;
- Baixa erodibilidade do substrato

A principal preocupação em um aterro sanitário é quanto à degradação ambiental, pois se refere às áreas que são o local de disposição final de RSU, pois sempre deve ser considerado o risco de contaminação de águas superficiais e subterrâneas por materiais lixiviados (Kjeldsen; Christophersen, 2001) que costumam apresentar elevadas concentrações de compostos orgânicos, amônia e sais inorgânicos (Ganigué et al. 2007). A produção de gás metano é uma das maiores preocupações no tratamento de efluentes, havendo a necessidade de um sistema adequado de coleta e extração para este tipo de gás (Tolmasquim, 2003).

Segundo Cunha e Consoni (1995) é necessário levar sempre em consideração o tempo de vida útil de um aterro sanitário, mesmo após o seu fechamento é importante o monitoramento contínuo e a manutenção destes durante as diversas etapas de um aterro sanitário (fases de projeto, instalação, operação, encerramento e pós-fechamento).

### **2.2.2 – Critérios de Seleção e Avaliação de Áreas para Aterro Sanitário**

Para a implementação de uma obra como (um aterro sanitário) existem vários critérios que precisam ser estabelecidos com o principal intuito de maximizar o tempo de vida útil do empreendimento.

Alguns critérios iniciais costumam ser levados em consideração durante a implantação de um aterro sanitário, tais como a distância do aterro sanitário de centros urbanos, a dificuldade de acesso e gastos operacionais com o empreendimento. Além disso, existe uma série de requisitos e critérios que estão sujeitos a aprovação de Estudos de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) e de órgãos ambientais como a (CETESB).

No entanto, para a seleção de áreas para aterros sanitários outros fatores devem ser levados em consideração e cada critério varia em função do método adotado. Alguns métodos de seleção e avaliação de áreas consideram critérios geológico – geotécnicos, com a classificação de parâmetros correspondentes aos diferentes atributos analisados, como os métodos propostos por Leite (1995) e de Zuquette et al. (1994).

### **2.2.3 – Tipos de Aterro Sanitário**

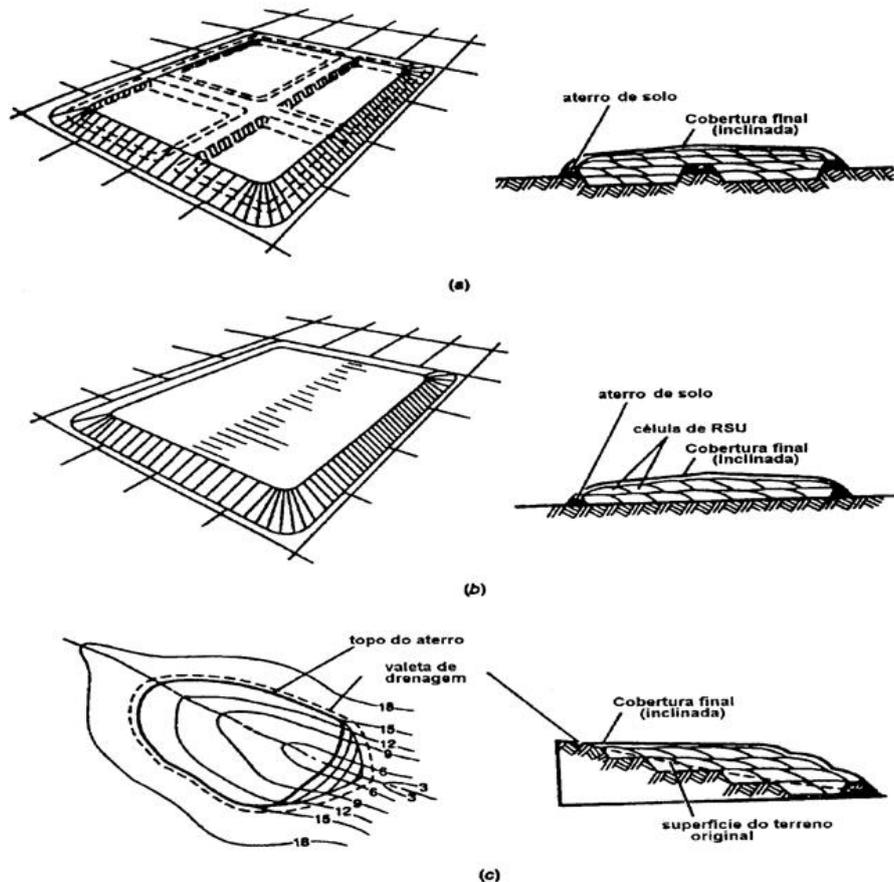
Os aterros sanitários são classificados quanto ao método de construção em aterros de trincheira, de rampa e ou em área.

Conforme Lima (2001) o método de rampa é feito em terrenos com certo declive, onde os resíduos são depositados e compactados, tendo sucessivos recobrimentos de um solo argiloso com espessura de 20 cm até atingir o topo do declive, sendo que em sua parte superior e em sua lateral todo o declive estará recoberto pelo material (geralmente argiloso). Conforme as rampas vão preenchendo as células e os patamares são complementados e superpostos, formam áreas planas configurando um aterro tipo pirâmide.

Ainda segundo Lima (2001) no método de trincheira refere-se a escavação de dois a três metros de profundidade, podendo se estender até cinco metros, variando de acordo com a profundidade do lençol freático, sendo recoberto pelo próprio material escavado. Conforme os resíduos são compactados a tendência é de que a vida útil do aterro aumente.

O aterro do tipo área ou superfície é implantado em áreas onde a topografia é plana, e, portanto, inadequadas para a criação de células, a disposição de resíduos é feita através de dique de terra ou mesmo através dos próprios resíduos. Este tipo de aterro tem como desvantagem ser de alto custo (Carmo Junior, 2012).

A Figura 3 mostra a classificação do aterro sanitário quanto à forma de construção, segundo Tchobanouglos et al. (1993).

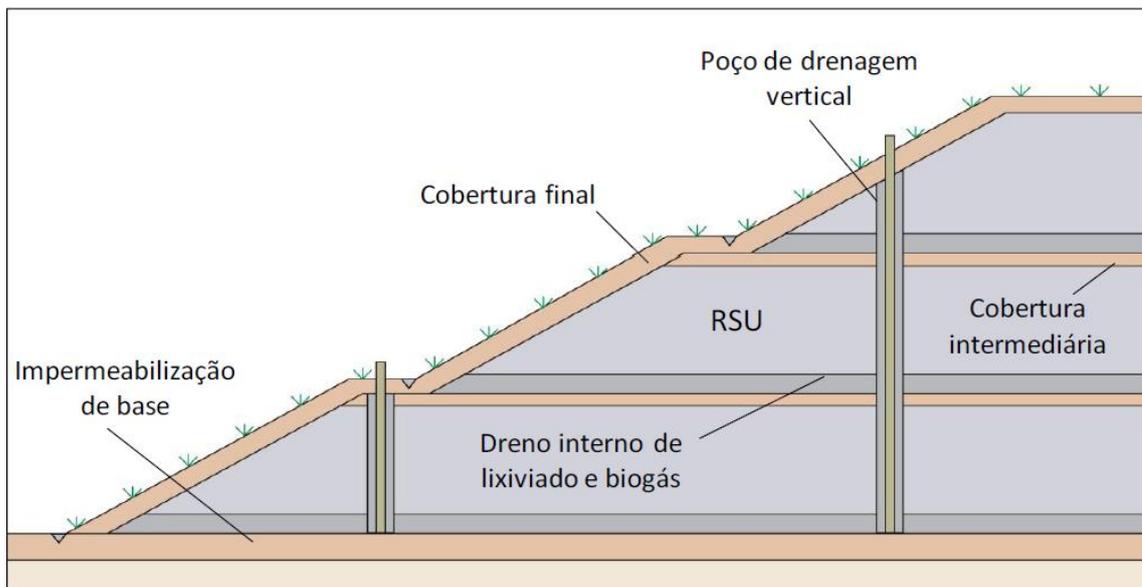


**Figura 3** - Tipos de aterro sanitário quanto à forma de construção. a-) Trincheira ; b-) Superfície/Planar; c-) Rampa. Fonte: Tchobanouglos et al., 1993.

Um aterro sanitário apresenta três segmentos, o material de cobertura, preenchimento e o liner. A cobertura em um aterro sanitário tem como principal objetivo evitar ou minimizar o fluxo de umidade para a célula de ativação do aterro sanitário (Carmo Junior, 2012). O material que serve como preenchimento é feito por uma série de camadas de solos que são compactados, sendo separados por solos intermediários. Enquanto que os sistemas de liner

servem para isolar os resíduos sólidos depositados no aterro sanitário e agem como uma barreira impermeabilizante que barra a migração de efluentes potencialmente perigosos ao meio ambiente (Oakley, 1987).

A Figura 4 representa um esquema simplificado de um aterro sanitário indicando uma seqüência de cobertura, solo compactado e uma camada de impermeabilização. Com camadas de solo representando cobertura intermediária, além de drenos para o material lixiviado e gás.



**Figura 4** - Esquema típico de um aterro sanitário. Fonte: Maldaner, L.S (2011).

#### 2.2.4 - Impacto do Aterro Sanitário no Meio Físico

Segundo Bitar et al. (1993) os impactos ambientais causados por uma obra como a de um aterro sanitário podem causar modificação relativa no ambiente, podendo ser uma variação negativa, positiva, intensa ou superficial. A distribuição destas alterações não se dá de maneira uniforme e acaba sendo ao longo do ciclo de vida do empreendimento que abrange as fases de operação, utilização e encerramento. O autor distingue ainda três fases de operação distintas no ciclo de vida de um aterro sanitário e estabelece as diferenças dos impactos nas diferentes fases do aterro sanitário, tais impactos são:

- Impactos causados na fase de implantação do aterro sanitário;
- Impactos causados na fase de operação do aterro e;
- Impactos causados na fase de encerramento do aterro

Bitar et al. (1993) consideram que o impacto nas diferentes fases do aterro sanitário deve estimar os fatores intensidade (com alguns impactos nas fases iniciais) e duração (com alguns impactos relacionados ao fim do ciclo de vida útil) e outros se manifestando mesmo após a desativação do mesmo.

Fornasari Filho et al. (1992) estabelecem uma série de parâmetros e processos do meio físico que são alterados pela implantação de obras como um aterro sanitário. Os impactos no meio físico, considerados pelos autores, são divididos segundo as fases de implantação, funcionamento e encerramento do aterro.

Zuquette et al. (1998) menciona que o aterro sanitário deve ser entendido como o centro modificador do meio no qual atua, mostrando diferentes interações entre o aterro sanitário e o ambiente. Conforme o observado na Figura 5.



**Figura 5** - Interações relacionadas do aterro sanitário com o meio físico. Simplificado de Zuquette et al. 1998.

Cada interação corresponde a uma importante mudança no ambiente e dentro de cada fator analisado (fundações, atmosfera, balanço hídrico, alterações das características dos componentes do meio físico, material para cobertura e estabilidade de taludes) existe uma série de critérios que envolvem todas as fases de operação de um aterro sanitário e toda a sua interação com o meio físico.

### 2.2.5 - Construção do Aterro Sanitário

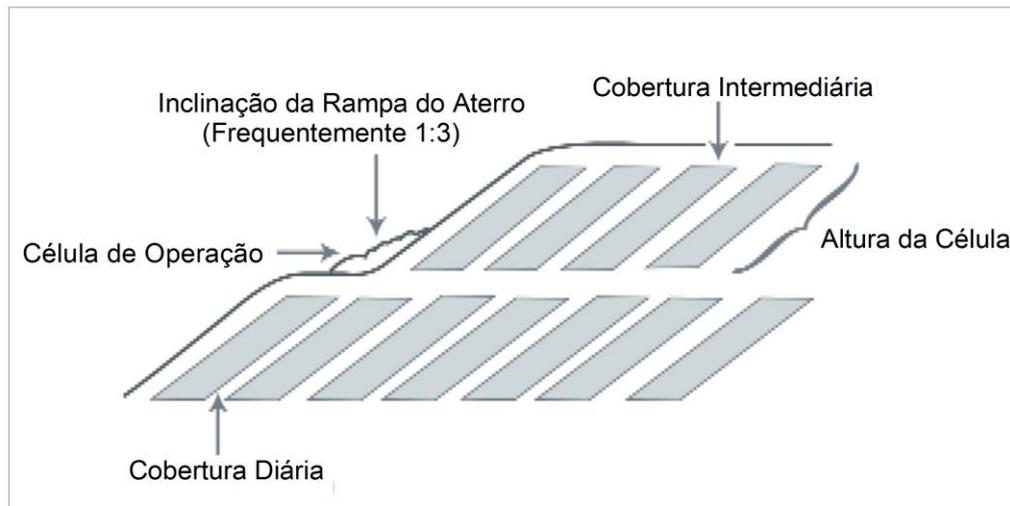
Os resíduos são dispostos em células, tendo como o início da operação do aterro sanitário, toda a deposição do lixo se processa do fundo da célula que geralmente é impermeabilizada com uma camada de argila compactada.

De acordo com Carmo Junior (2012) o lixo é espalhado em uma rampa, em uma proporção que varia de 1 unidade na vertical para 3 unidades na horizontal (1:3). Nessa rampa o trator da esteira compacta o lixo com uma frequência de 3 a 5 vezes. Sempre ao final do processo o lixo deverá ser recoberto por uma cobertura de solo (camada de argila de 15 a 20 cm de espessura).

À medida que se tem a capacidade do aterro esgotada, a cobertura final apresenta 60 cm de espessura. Geralmente, após o recobrimento há a plantação de gramas nos taludes e platôs definitivos, onde tende a evitar processos erosivos (Carmo Junior, 2012).

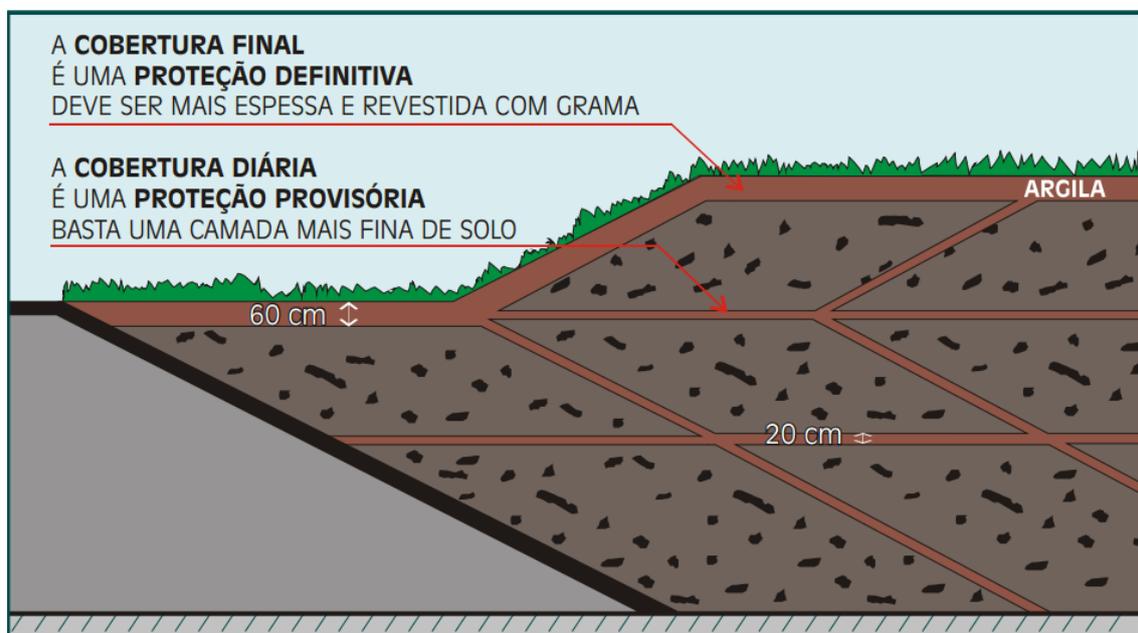
Com as camadas de lixo formando as células é comum a construção de drenos internos nas posições horizontais e verticais que dependem da altura do aterro sanitário e de uma distribuição espacial adequada destes drenos, ambos são interligados para drenar de modo eficiente os gases e chorumes gerados na decomposição do lixo (CETESB, 1992).

A Figura 6 representa o esquema de disposição de resíduos em célula, com a inclinação da rampa (proporção 1:3) a cobertura do material.



**Figura 6** - Operação do lixo em células com a rampa na proporção 1:3. Fonte: Retirado de McBean et al., 1995.

A Figura 7 mostra a cobertura final (onde indica a camada de argila com 60 cm de espessura), além da cobertura diária de uma camada mais fina de solo (de cerca de 20 cm de espessura).



**Figura 7** - Cobertura final da camada de argila (60 cm) e cobertura diária de um solo mais fino (20 cm). Fonte: <http://www.unipacvaledoaco.com.br/ArquivosDiversos/Cartilha%20Operação%20Aterro%20Sanitário%20CONDER.pdf>. Acessado em 12/01/2016.

### 2.3 - Aplicação da Geofísica

Segundo Gandolfo (2007), os métodos geofísicos consistem na investigação do subsolo através de técnicas de medidas indiretas, em grande parte realizada sobre a superfície do terreno. Ainda segundo este autor, a geofísica mede as propriedades físicas do meio a ser investigado e uma boa resposta do método está relacionada com as anomalias relativas que se tornam evidências interessantes na busca de respostas de um determinado alvo.

De acordo com Vogelsang (1995), um dado geofísico é sempre relativo, mesmo com métodos indiretos relativamente precisos e com uma boa qualidade dos dados com maior precisão física e matemática. A principal ambiguidade se dá na maior parte das vezes na complexidade e variabilidade dos dados.

Souza et al. (1998), mencionam que a obtenção das medidas geofísicas são precisas e que a ambiguidade e divergências surgem na interpretação dos dados pelo usuário. De fato, Gandolfo (2007) chama a atenção pelo fato da solução geofísica não ser única e que esta unicidade não elimina a necessidade dos métodos indiretos serem relacionados aos métodos diretos de investigação (como poços e sondagens).

Os autores Dobecki & Romig (1985); Greenhouse (1981); Steeples (1981) relatam que as técnicas de geofísica sempre buscam melhores resoluções, acurácias, precisão dos dados com o menor custo possível associado ao advento da tecnologia, como forma de auxiliar as técnicas investigativas.

Gandolfo (2007) chama a atenção pelo constante desenvolvimento da geofísica estar atrelado ao aprimoramento tecnológico e interesses geológicos e cada vez mais o uso dos métodos investigativos em diferentes áreas de conhecimento como petróleo e recursos minerais antes da década de 1970 e as maiores aplicações das técnicas em diferentes áreas, como engenharia e meio ambiente, principalmente nas décadas posteriores a 1980.

## 2.3.1 - Métodos de Eletrorresistividade

### 2.3.1.1 - Conceitos

Segundo os autores Ward (1990) e Zhdanov & Keller (1994), os métodos geofísicos de investigação são categorizados em sísmicos, geoeletricos e potenciais, no qual os métodos geoeletricos são constituídos pelos métodos elétricos e eletromagnéticos.

Gandolfo (2007) elenca que os métodos geoeletricos de investigação determinam a resposta dos alvos de interesse após serem excitados por campos elétricos ou eletromagnéticos. O mesmo autor menciona que o principal parâmetro físico medido pelos métodos elétricos é a resistividade e que as investigações geoeletricas conseguem determinar a distribuição das resistividades em subsuperfície.

Segundo Lago (2009), a resistividade elétrica se propaga nos materiais (solos e substratos geológicos) de duas formas, uma pela condução eletrônica e a outra pela condução eletrolítica. Gandolfo (2007) menciona que a resistividade é o parâmetro físico marcado pela dificuldade da corrente elétrica se propagar em um determinado meio.

Dobeck & Romig (1985) relatam que a resistividade elétrica é um objeto importante de estudo, pois é a propriedade que apresenta o maior intervalo de variações em termos de magnitude dentre todas as propriedades físicas de minerais e rochas, sendo, portanto um importante parâmetro para identificação de alvos de interesse.

O método de eletrorresistividade consiste em empregar uma fonte geralmente artificial de corrente contínua ou de baixa frequência que é introduzida nos solos em superfície através de um par de eletrodos (AB) no qual a diferença de potencial se dá como resposta à introdução de corrente através de outros dois eletrodos (MN) (Gandolfo, 2007).

A eletrorresistividade é utilizada em grande parte dos trabalhos de geofísica, conforme mencionado por Elis (1999), por exemplo, a eletrorresistividade tende a apresentar melhores resultados se comparada aos outros métodos geoeletricos, como potencial espontâneo e polarização induzida em relação aos resultados de monitoramento e caracterização das áreas pesquisadas por este autor.

### 2.3.1.2 - Respostas das propriedades elétricas nos materiais

Dobrin & Savit (1988) definem que a resistividade é a resistência elétrica de um cilindro de seção transversal e comprimento igual à unidade, ou seja, o parâmetro de resistividade elétrica comumente é medido através da passagem da corrente elétrica em um determinado material.

Dependendo do alvo de interesse, solos ou rochas, o comportamento da resistividade elétrica será diferente. Para estes alvos, a resistividade apresenta uma variabilidade em função da porosidade, composição mineralógica dos materiais, grau de saturação, resistividade do fluido, tamanho e forma das partículas sólidas, condições de metamorfismo e outros fatores (Lago, 2009 e Braga, 2006).

A forma como a corrente se propaga nos respectivos alvos não se dá de maneira uniforme, o mecanismo de condução eletrônica é realizado principalmente na matriz da rocha, enquanto que o mecanismo iônico/eletrolítico ocorre através dos espaços vazios, índices de porosidade, grau de fraturamento do substrato rochoso, sendo, portanto, bem identificadas pelos métodos de eletrorresistividade (Lago, 2009 e Gandolfo, 2007).

Segundo Gandolfo (2007), os minerais de composição semi-metálica e os sulfetos metálicos são bons condutores de corrente elétrica, representando uma pequena parte de todo o conjunto de minerais existentes na natureza. O autor menciona que a principal forma de condução elétrica é através de condução eletrolítica através de um eletrólito e água contendo íons em solução.

De acordo com Braga (2006), os solos argilosos tendem a conduzir melhor a corrente elétrica em relação aos solos arenosos de textura mais grosseira, devido à principal característica química das partículas argilosas de manter a água por adesão.

Gandolfo (2007) menciona que grandes variações nos valores de resistividade tendem a ocorrer em solos mais superficiais, principalmente com a variação no teor de umidade e de compactação nas camadas mais superficiais do solo.

Existem valores de resistividade típicos para alguns tipos litológicos e de solos (Tabela 1). No entanto, variações como o grau de intemperismo da rocha, porosidade, fraturas, condições de metamorfismo, entre outros afetam esses valores.

**Tabela 1** – Valores de resistividade elétrica para alguns tipos de materiais.

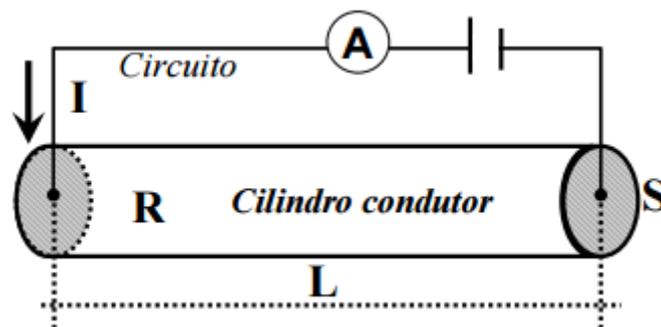
Tipo Litológico		Resistividade (ohm.m)
Zona não saturada		100 a 30000
Zona saturada	Argiloso	$\leq 20$
	Argilo-arenoso	20 a 40
	Areno-argiloso	40 a 60
	Siltito Argiloso	10 a 60
	Siltito Arenoso	
	Arenoso	$\geq 60$
	Argilito	10 a 20
	Arenito	80 a 200
Águas	De lagos	$1 \times 10^3$ a $3 \times 10^3$
	Doces superficiais	10 a $1 \times 10^3$
	Salobras superficiais	2 a 10
	Subterrâneas	1 a 20
	De lagos salgados	0,1 a 1
	Marinhas	0,2
Grafita		$1 \times 10^{-4}$ a 0,3
Basalto		10 a $1,3 \times 10^7$
Diabásio		20 a $5 \times 10^7$
Calcário		50 a $1 \times 10^7$
Gnaisse		3000 a 5000
Granito		5000 a $1 \times 10^6$
Sal gema		10000 a $1 \times 10^6$
Quartzo		$> 1 \times 10^6$

Fonte: Braga, (2001); Orellana, (1972); Parasnis, 1972; Telford, Geldart, Sheriff, (2004).

### 2.3.1.3 - Fundamentos Teóricos do Método de Eletroresistividade

De acordo com Braga (2006), o método da eletroresistividade determina a resistividade elétrica em diferentes materiais, além de outros parâmetros eletromagnéticos que estão relacionados aos diferentes tipos de solo e rocha.

Uma das grandes vantagens da resistividade elétrica é expressar mudanças no grau de alteração, fraturamento, saturação, diferentes tipos de litologia e mudança na composição do solo, diminuindo a necessidade de uma maior quantidade de métodos investigativos diretos (Braga, 2006). Ainda segundo o autor, para entender o método da eletroresistividade é necessária a compreensão da Lei de Ohm, que é definida por uma relação entre resistividade e resistência (constante de proporcionalidade  $R$ ) de um condutor homogêneo (Equação 1), cuja forma varia entre cilíndrica ou prismática (Figura 8).



**Figura 8** - Relação entre resistividade e resistência em um corpo cilíndrico de um condutor homogêneo. Fonte: Retirado de Braga, 2006.

$$R = \rho \frac{L}{S} \text{ (unidade em ohms)} \quad (1)$$

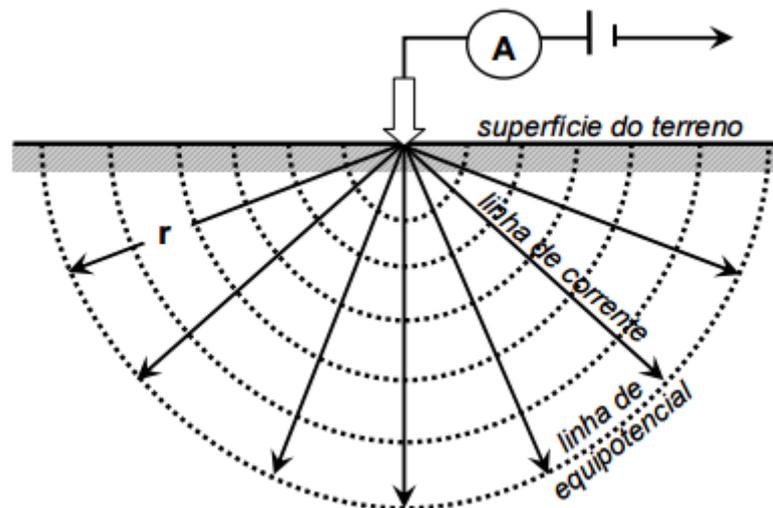
O elemento  $R$  da equação varia em função da dimensão do material, portanto o valor de resistência elétrica apresenta diferenças dependendo do corpo material (Bortolin, 2009). A constante de proporcionalidade  $R$  é dada pelas unidades volt por ampére (V/A) ou ohm ( $\Omega$ ). O parâmetro resistividade ( $\rho$ ) independe da utilização de fatores geométricos para a capacidade de transmissão de corrente elétrica e é uma grandeza que depende da natureza e do estado físico do material considerado (Bortolin, 2009 e Braga, 2006).

Matematicamente, a equação da resistividade, definida em um corpo homogêneo, apresenta relação com o comprimento (L) e a área da seção transversal do corpo condutor (S). A resistividade elétrica é definida pela (equação 2) (Bortolin, 2009).

$$\rho = R \frac{S}{L}; \text{ (unidade em ohm.m) } \quad (2)$$

Pelas equações 1 e 2, se pode deduzir que a resistividade elétrica é um parâmetro que varia em função da resistência elétrica por uma determinada longitude de um dado corpo. A unidade deste parâmetro é dada em ohm.m (Braga, 2006; Bortolin, 2009; Lago, 2009).

De acordo com Braga (2006), a corrente elétrica não flui por um caminho único e sim por vários caminhos, conforme mostrado na Figura 9. A bateria é conectada ao solo através de cabos e eletrodos, dependendo do arranjo dos eletrodos e da distância destes, a corrente elétrica gerada é conduzida pela bateria, considerando que a Terra não é um isolante perfeito (Braga, 2006).



**Figura 9** - Esquema que mostra a propagação das linhas de corrente elétrica em um determinado espaço. Fonte: Retirada de Braga (2006).

A densidade de corrente flui de maneira radial em função de uma determinada área de uma semiesfera homogênea representada pela (equação 3) em função de um dado valor de ( $\pi$ ) e raio (r). O potencial elétrico é calculado substituindo a equação 3 em função da resistividade ( $\rho$ ) e do comprimento ( $2\pi r$ ), representado pela (equação 4) (Braga, (2006); Lago, (2009)).

$$R = \frac{\rho r}{2\pi r^2} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (3) \text{ e}$$

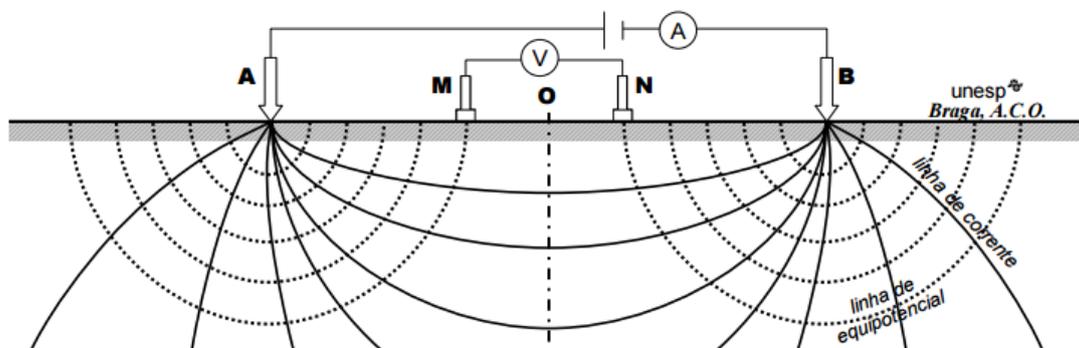
$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (4)$$

Isolando a resistividade ( $\rho$ ) na equação 4, considerando que o subsolo tenha um valor de resistividade constante, a expressão matemática da resistividade em função do potencial ( $V$ ) é dada pela (equação 5).

$$\rho = 2\pi r \frac{V}{I} \quad (5)$$

Onde  $V$  = potencial,  $I$  = corrente,  $\rho$  = resistividade e  $r$  = distância entre o eletrodo de corrente e o potencial medido.

A partir das equações 4 e 5 que são equações que fornecem relações matemáticas fundamentais para os métodos de prospecção elétrica realizados na superfície terrestre, o valor de intensidade de corrente elétrica é medido pelos pares de eletrodos que são conectados em superfície. Geralmente são utilizados quatro eletrodos denominados de (AMNB), de tal forma que a distância entre os eletrodos de corrente determinam a diferença de potencial, conforme ilustrado na Figura 10 (Braga, 2006).



**Figura 10** - Configuração entre os eletrodos utilizados em campo. Fonte: Retirado de Braga (2006).

Os eletrodos A e B introduzem a corrente elétrica em subsuperfície, enquanto que os eletrodos M e N medem o potencial elétrico resultante. As equações 6 e 7 definem matematicamente o cálculo do potencial elétrico em função do posicionamento dos quatro eletrodos utilizados em superfície. Estas expressões matemáticas são simplificadas para a superfície de um sólido condutor em um meio isotrópico (Lago, 2009).

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (6) \text{ e}$$

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (7)$$

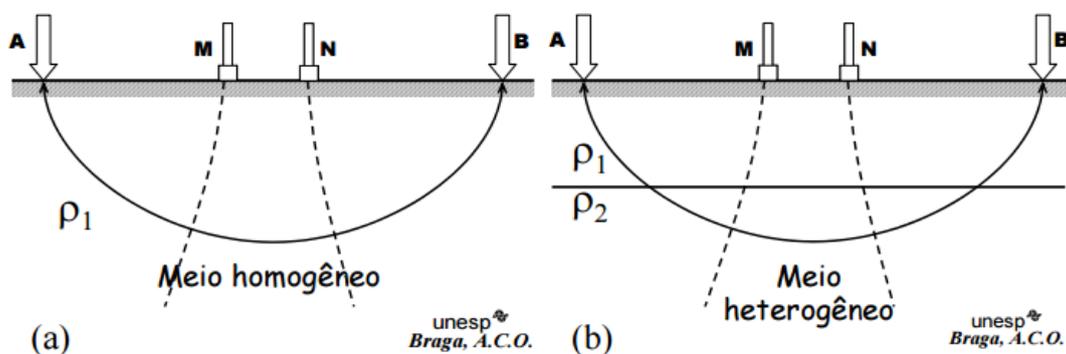
O que é medido na prática pelo equipamento é a diferença de potencial que é dada pela posição dos eletrodos de potencial MN, a partir do arranjo formado por quatro eletrodos, matematicamente expressa pela equação 8 (Lago, 2009).

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (7)$$

A equação 8 pode ser reescrita em função da resistividade elétrica expressa pela diferença de potencial entre os eletrodos AMNB (equação 9) (Lago, 2009; Braga, 2006; Bortolin, 2009).

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}, \text{ onde, } K = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (8)$$

Braga (2006) compara a diferença de potencial entre um meio homogêneo e heterogêneo e menciona que o valor de resistividade se altera dependendo do meio em que se encontra, visto que a resistividade elétrica se comporta de modo diferente em função dos litotipos, conforme esquematizado pela Figura 11.



**Figura 11** - Esquema de propagação da resistividade em a-) meios homogêneos e b-) meios heterogêneos. Fonte: Retirado de Braga (2006).

Em parte dos casos a resistividade é função da condução eletrolítica ou iônica, que depende da concentração e da natureza de íons presentes na água contida em fissuras ou porosidades do substrato rochoso ou do solo (Souza et al, 1998). A condução iônica é o principal modo de condução de eletricidade e consequentemente o responsável mais significativo pela variabilidade da resistividade em subsuperfície (Gallas et al., 2005).

A maioria dos minerais existentes na crosta terrestre são isolantes, sendo poucos os minerais bons condutores de corrente elétrica. Grande parte da condutividade e da propagação

de correntes elétricas se deve aos poros preenchidos total ou parcialmente com eletrólitos (porosidade intergranular para rochas sedimentares e porosidade por fissuras para rochas ígneas), grau de faturamento, estruturas tectônicas (Keller e Frischknecht, 1996; Orellana, 1972).

Para solos também pode se encontrar uma grande variação de resistividade, uma vez que segundo Braga (2006), para solos secos as resistividades podem variar da ordem de 100 a 10.000 ohm.m, sendo que a resistividade consegue identificar com boa precisão a variação do grau de saturação em solos.

#### **2.3.1.4 - Conceito geofísico de resistividade aparente**

A Terra não é um meio homogêneo e isotrópico, com isso o valor de resistividade elétrica varia de maneira pontual tanto lateralmente quanto em profundidade e o arranjo de eletrodos efetuam medições sobre um meio heterogêneo. A diferença de potencial de um meio heterogêneo difere de um meio homogêneo em função das alterações deste de acordo com a heterogeneidade do meio, do substrato rochoso, solo, nível freático, alteração do solo, etc. (Lago, 2009). Como principal característica o valor de resistividade elétrica medido pelos principais métodos investigativos varia para cada posição e também depende do tipo de arranjo geofísico usado e do posicionamento entre os eletrodos em campo (Gandolfo, 2007).

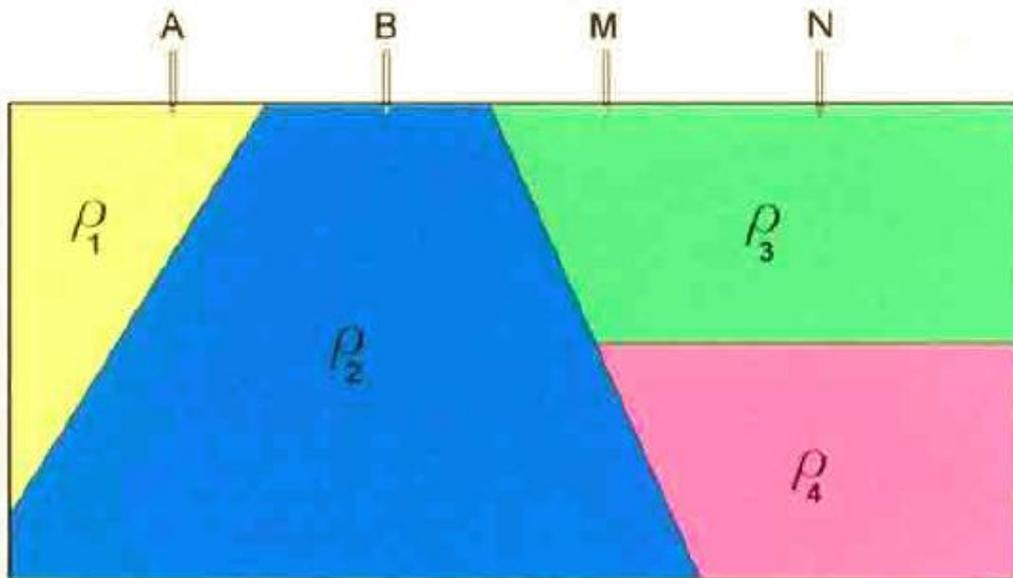
A resistividade que é obtida nos equipamentos geofísicos é a resistividade aparente que varia de acordo com a posição e direção dos eletrodos utilizados em campo. Assim, cada medida de resistividade em subsuperfície informada pelo equipamento é amostrado para um semi-espaço homogêneo e indica a resistividade aparente, não estabelecendo uma relação com a resistividade real. A resistividade aparente indica as diferentes propriedades dos materiais pelo qual a corrente passou em subsuperfície (Lago, 2009).

A principal unidade da resistividade aparente é em ohm.m, que é a mesma unidade da resistividade elétrica “final” gerada após o processamento das inversões geofísicas (Gandolfo, 2007).

De acordo com Orellana (1972), a resistividade aparente não é considerada uma média entre as resistividades em subsuperfície, ou seja, a resistividade não pode ser considerada um parâmetro físico do meio e sim significa um valor que representa um efeito de integração de um determinado espaço, a partir do qual a medida é realizada.

Desta forma as variabilidades nas medidas da resistividade podem ser interpretadas como desvios de um meio uniforme, devido às estratificações geolétricas nos diferentes meios investigados (Lago, 2009).

De acordo com Gallas (2000), para um determinado volume de um substrato heterogêneo de quatro camadas de resistividades ( $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$  e  $\rho_4$ ), o valor da resistividade aparente não será igual a nenhum valor de resistividade destas quatro camadas. No entanto, a resistividade aparente tem influência de todas as resistividades das camadas, dependendo também da geometria dos corpos e da distribuição destes em subsuperfície, conforme Figura 12.



**Figura 12** - Representa um modelo esquemático das quatro camadas com diferentes valores de resistividade a partir de um substrato heterogêneo. Fonte: Retirado de (Gallas, 2000).

A resistividade aparente se torna importante nos métodos geofísicos, pois ao longo das diferentes seções, apresenta variações, identificando heterogeneidades resistivas e condutivas. O padrão dos valores de resistividade aparente em uma determinada estrutura/feição geológica é de grande complexidade e geralmente não apresenta relação com os valores de resistividade obtidos após os processamentos de inversão geofísica (Gandolfo, 2007).

### 2.3.1.5 - Configuração de arranjos dos eletrodos

Existem vários tipos de arranjos de eletrodos utilizados em estudos de geofísica, muitos destes métodos são bons indicadores para a determinação de parâmetros característicos de rochas e solos. Os tipos de técnicas utilizadas são variadas, podendo ter técnicas de propriedade elétrica, propagação de ondas acústicas, dentre outras.

Os principais métodos geofísicos comumente utilizados em trabalhos são o método sísmico (fenômenos da refração, perfilagem sísmica, etc), de resistividade e de potenciais (técnicas de magnetometria e gravimetria).

A utilização de métodos geofísicos para fases de reconhecimento em aterro sanitário são de suma importância, especialmente quando o interesse é servir de *background* e caracterização física da localidade. Uma das principais vantagens de se utilizar métodos geofísicos em relação a métodos investigativos tradicionais, como sondagens SPT, perfis, poços de monitoramento, etc é a rapidez com que as informações são obtidas em subsuperfície em grandes áreas a um custo relativamente baixo (CETESB, 1999). Além disso, métodos geofísicos são excelentes no sentido de avaliar e caracterizar diferentes problemas ambientais e tais métodos tem como vantagem não ser de natureza invasiva e de não alterar o meio físico (Bortolin e Malaguti Filho, 2010).

Com o desenvolvimento instrumental da geofísica, técnicas de tratamento de dados se tornam cada vez mais confiáveis na solução de problemas geológico-geotécnicos, desde fases iniciais até fases mais avançadas de um projeto. As técnicas geofísicas são importantes para observar através de técnicas de processamento os dados coletados em subsuperfície na tentativa de identificar certas anomalias que podem indicar algum tipo de irregularidade ou diferentes propriedades físicas dos materiais e, aliados a informações geológicas e de diferentes tipos de ensaios diretos, auxiliar a determinar diferenças entre litotipos, profundidade do corpo rochoso, etc (Chiassi, 1975).

É importante salientar que os métodos geofísicos sempre são auxiliares às informações que são obtidas através dos métodos diretos de investigação e não devem ser interpretados como substitutos de métodos de investigação convencionais, como sondagens, mapeamento e etc. Os ensaios geofísicos devem ser muito bem delimitados como parte do desenvolvimento de um determinado estudo, para se ter a devida caracterização da área de subsuperfície de

interesse, reduzindo os custos do projeto, permitindo uma eventual interpolação com dados geológicos preexistentes.

### **Técnica de Sondagem Elétrica Vertical**

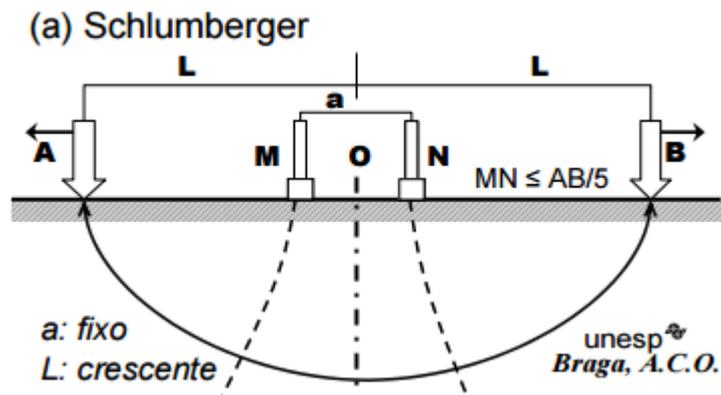
De acordo com Lago (2009), a técnica de sondagem elétrica vertical é comumente utilizada quando se deseja obter uma informação pontual, com observação da variação vertical da resistividade. A medida que os eletrodos de corrente ficam mais distantes, as profundidades alcançadas pela técnica ficam cada vez maiores. Ainda segundo o autor, para esta técnica a resistividade varia de acordo com a profundidade e não no sentido horizontal, fazendo com que o modelo unidimensional obtido seja de maneira aproximada, o modelo verdadeiro.

Segundo Braga (2006), o arranjo mais utilizado para as técnicas de Sondagem Elétrica Vertical é o arranjo Schlumberger. A razão disto é que este tipo de arranjo apresenta uma série de vantagens, tais como: praticidade em campo, exigindo apenas o deslocamento dos eletrodos metálicos de corrente (AB); baixa interferência e produção de ruídos, mantendo uma boa confiabilidade nos dados gerados e menor susceptibilidade para terrenos homogêneos que podem levar a algum tipo de erro interpretativo.

De acordo com Gandolfo (2007), o arranjo Schlumberger é feito a partir de um ponto central, com os eletrodos de corrente (AB) posicionados de maneira mais externa do que os eletrodos potenciais (MN). Braga (2006) menciona que a distância (denominada como “a”) se mantém fixa e cada vez mais deve tender a zero, à medida que a distância entre a origem “O” e os eletrodos M e N aumenta. O arranjo é montado, a partir do ponto central “O” (Figura 13).

Gandolfo (2007) menciona que o espaçamento entre a abertura dos eletrodos MN deve ser menor ou igual a um quinto a abertura dos eletrodos AB, portanto estabelecendo uma relação matemática de  $\left(\frac{AB}{MN} \geq 5\right)$ . Segundo Orellana (1972), o erro que é produzido por este tipo de arranjo, à medida que se obtêm os dados de campo é pequeno, uma vez em que se devem fazer os ajustes necessários para as equações básicas do método, o que não é caracterizado segundo este autor como desvantagem.

A Figura 13 mostra a configuração típica utilizada para as técnicas de Sondagem Elétrica Vertical, no arranjo Schlumberger em que mostra a posição dos eletrodos AB e MN e sua relação comumente estabelecida.



**Figura 13** - Mostra o arranjo Schlumberger típico para o uso da técnica da Sondagem Elétrica Vertical. Fonte: Retirado de Braga (2006).

De acordo com Iakubovskii & Liajov (1980); Kunetz (1966); Orellana (1972) são usadas curvas bilogárítmicas como formas de representação e interpretação dos dados obtidos em campo. O principal objetivo destas curvas de campo é realçar, da melhor maneira possível, às estruturas geológicas, reduzindo o traçado das curvas-modelos como forma de simplificar os cálculos teóricos.

Segundo Braga (2006), o fator geométrico  $K$  é obtido em função do cálculo de resistividade aparente utilizado no arranjo Schlumberger para a SEV. A equação (10) apresenta o cálculo do fator geométrico ( $K$ ) apresentado por Braga (2006), enquanto que a equação (11) apresentadas por Gandolfo (2007), o cálculo do fator geométrico ( $K$ ) é dado em função do arranjo Schlumberger pelo valor da metade da distância entre os eletrodos de corrente ( $AB/2$ ):

$$K = \frac{\pi(\overline{AM \ AN})}{MN} \quad (9) \text{ apresentada por Braga (2006) e;}$$

$$K_{SCH} = \frac{\pi}{a} \left[ \left( \frac{L}{2} \right)^2 - \left( \frac{a}{2} \right)^2 \right] \quad (10) \text{ apresentada por Gandolfo (2007)}$$

Segundo Braga (2006), o fator geométrico é dependente do arranjo dos eletrodos de corrente e de potencial e através deste fator ( $K$ ) e o aumento da distância dos eletrodos de corrente ( $AB$ ), consegue-se alcançar cada vez maiores profundidades.

## Técnica do Caminhamento Elétrico

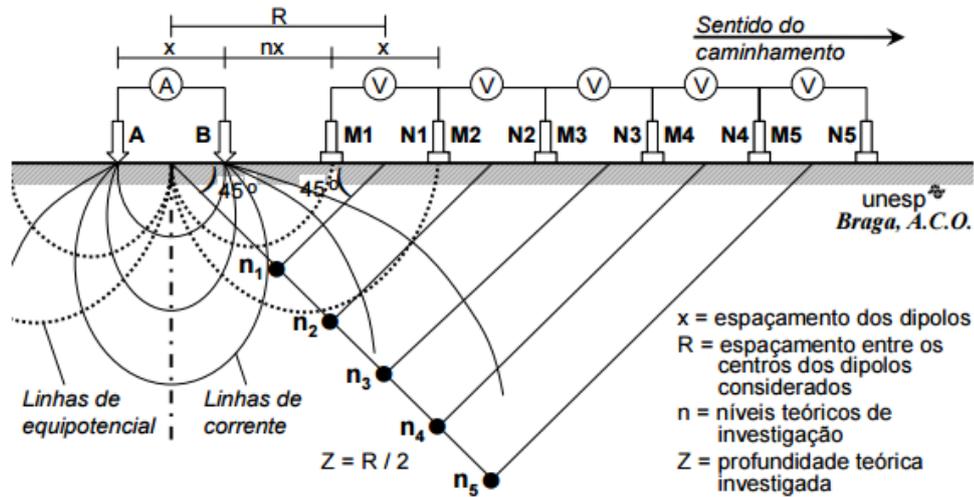
De acordo com Braga (2006), a técnica de caminhamento elétrico (CE) obtém em superfície medidas de parâmetros (como cargabilidade aparente/resistividade aparente) para posteriormente serem analisados e interpretados, onde são geradas seções com variação horizontal a uma determinada profundidade.

O arranjo dipolo – dipolo é dos mais comuns para o levantamento de dados nas linhas de caminhamento elétrico. De acordo com Orellana (1972), o arranjo dipolo-dipolo também pode ser denominado como “dispositivo dipolar axial”, outro termo usado para este tipo de arranjo e descrito na literatura geofísica pelos autores Dobrin & Savit (1988), sendo esse definido como “axial”.

De acordo com Gandolfo (2007), os eletrodos são dispostos em linha, onde o espaçamento e abertura referentes aos eletrodos de corrente e de potencial permanecem fixos ao longo do levantamento. Braga (2006) menciona que uma das vantagens desta técnica é dispor de vários eletrodos de potencial (MN) ao longo da linha realizada em campo.

Gandolfo (2007) menciona que ao manter fixo o espaçamento entre os eletrodos, os diferentes níveis de investigação em profundidade serão dados em função do fator “n.a”, onde o termo “a” seria a distância entre os dois eletrodos de corrente e os eletrodos de potencial. Já Braga (2006) estabelece uma relação de profundidade, a partir da relação  $Z = R/2$ , onde Z é dado em metros e R corresponde a uma distância entre o centro dos dipolos (AB e MN), entretanto este autor também cita que uma relação muito usual seria  $R/4$ .

De acordo com Braga (2006) o arranjo dipolo-dipolo, apresenta eletrodos espaçados de maneira constante e conforme a variação de espaçamento entre os eletrodos muda, também influencia diretamente nos níveis de profundidades a serem investigados. Outro fator que regula também a profundidade máxima obtida pelo método é a quantidade de dipolos introduzida em superfície. Ainda segundo este autor, uma vez feito o arranjo de campo na superfície do terreno, há o deslocamento deste para estaca seguinte sendo que o equipamento faz a leitura do parâmetro em questão, onde este procedimento é repetido até o final de cada seção de CE (Figura 14).



**Figura 14** - Esquema do arranjo dipolo - dipolo. Fonte: Retirado de Braga (2006).

Gandolfo (2007) relata que o produto final é uma pseudoseção de resistividade aparente referente à linha de caminhamento elétrico efetuada.

De acordo com Zhou & Dahlin (2003), a principal vantagem de se utilizar o arranjo dipolo-dipolo é que este arranjo é mais sensível a erros, quanto maior for a separação entre os eletrodos, o fator geométrico para este método é proporcional a  $n^3$ .

Matematicamente, o fator geométrico para o arranjo dipolo-dipolo é determinado em função da profundidade teórica de investigação (Equações 12,13 e 14), onde se obtém o valor de “G” e posteriormente do fator geométrico (K) (Gandolfo, 2007):

$$\frac{R}{2} = \frac{\alpha(n+1)}{2} \quad (11);$$

$$G = \frac{1}{\left(\frac{1}{n}\right) - \left(\frac{2}{n+1}\right) + \left(\frac{1}{n+2}\right)} = \frac{n \cdot (n+1) \cdot (n+2)}{2} \quad (12) \text{ e};$$

$$K_{D-D} = \pi \alpha n(n+1)(n+2) \quad (13)$$

Ward (1990) menciona que o fator “n” que dimensiona o posicionamento dos eletrodos pode ser calculado a partir de um número não inteiro do fator “n” para o arranjo dipolo-dipolo, desde que o custo do método não seja elevado.

Para Gandolfo (2007), o arranjo dipolo-dipolo apresenta suas vantagens e desvantagens. Um dos principais aspectos favoráveis elencados é o da delimitação de uma

anomalia nas pseudoseções de resistividade aparente com relativa precisão em comparação a outros métodos, além de identificar estruturas verticais de forma satisfatória e um dos aspectos negativos elencados é que o arranjo dipolo-dipolo não é mais adequado, mas permite identificar estruturas horizontalizadas.

## **2.4 - Interpretação de dados de Eletroresistividade (ER) e Polarização Induzida (IP)**

### **2.4.1 – Método Teórico de Polarização Induzida**

Summer (1976) menciona que o pesquisador Conrad Schlumberger foi o primeiro a ter descrito a “resposta IP”. De acordo com Braga (2006) a polarização induzida é medida de acordo com uma variação de voltagem no domínio do tempo e da frequência, este menciona que estes diferentes domínios são apresentados na literatura como IP – Domínio do Tempo e IP – Domínio da Frequência.

De acordo com Braga (2006), a polarização induzida no domínio do tempo acontece por meio da emissão dos eletrodos de corrente (A e B) que são cravados em superfície, onde a emissão de corrente provoca uma diferença de potencial ( $\Delta V$ ) que é formada devido à polarização do meio.

Braga (2006) menciona que a diferença de potencial ( $\Delta V_p$ ) não é obtida instantaneamente, ou seja, a diferença de potencial não é estabelecida e nem anulada por meio de pulsos e cortes de corrente elétrica. Este autor menciona ainda que o comportamento da diferença de potencial pode ser explicado pela curva de descarga IP no domínio do tempo. O  $\Delta V_p$  cresce exponencialmente quando há uma emissão de corrente elétrica e quando há o corte de corrente (repouso), o  $\Delta V_p$  decresce exponencialmente.

De acordo com Braga (2006) cada amplitude de  $\Delta V_{IP}(t)$  é relacionada com a capacidade que os diferentes tipos de materiais têm de se polarizarem, portanto, a capacidade de polarização é constituída pela sensibilidade de IP destes materiais.

De acordo com Braga (2006) existem basicamente dois tipos de fenômenos físico-químicos que explicam a polarização induzida, um deles é o fenômeno de polarização metálica ou eletrônica e o outro é a polarização de membrana. Na polarização metálica as

concentrações de íons são produzidas pela passagem da condução iônica para a condução eletrônica, ou vice – versa, através da emissão de corrente elétrica (Braga, 2006).

A polarização por membrana ocorre devido à presença de minerais argilosos que provocam uma diferença de mobilidade iônica, isto é entre cátions e ânions, tal fenômeno ocorre com mais frequência em rochas carentes de substâncias metálicas (Braga, 2006).

De acordo com Draskovits et al. (1990) as variações de litologias e cargabilidades nos materiais foram obtidas por correlações geológicas e geoelétricas, onde este conclui que materiais que apresentam misturas de argila e areia se obtêm maior resposta IP quanto mais argiloso for o material. Para argilas puras, estas tendem a apresentar baixa polarização e resistividade, para camadas arenosas a resistividade costuma ser alta e a cargabilidade ocupa valores intermediários, enquanto que camadas siltosas apresentam alta polarização e resistividade intermediária.

De acordo com Braga (2006) o parâmetro de IP medido no domínio do tempo é chamado de cargabilidade e pode ser medido em porcentagem, em mV/V ou ms.

#### **2.4.2 - Inversão Geofísica**

A inversão geofísica é um modelo que representa um conjunto finito de dados em subsuperfície, ou seja, um modelo matemático gerado através de ajustes de um modelo inicial homogêneo (evidenciado pelas pseudoseções), ajustado com os dados obtidos em campo.

Três etapas são fundamentais para a realização do processo de inversão geofísica. O primeiro conceito é o entendimento de como funciona o modelo de inversão, como o *software* quantifica os dados de campo e ajusta com as pseudoseções iniciais. O segundo conceito seriam as etapas que envolvem a elaboração do modelo de inversão, enquanto que o terceiro e último conceito é o resultado final obtido pela inversão geofísica e adequação com as características geológico-geotécnicas da área de estudo.

O conjunto de relações matemáticas na inversão é importante no sentido de avaliar a distribuição de um determinado fenômeno a ser observado. O modelo de inversão geofísica representa um conjunto de relações matemáticas que avaliam a distribuição de um determinado fenômeno observado. As principais propriedades físicas interpretadas pelos

métodos geofísicos são a resistividade elétrica, cargabilidade, propagação de ondas sísmicas, etc. O intérprete tem como principal objetivo estabelecer uma correlação entre as variações dos dados analisados no programa com interpretações geológicas que se adequem às variações observadas nas seções invertidas.

Existe uma série de parâmetros que são necessários para realizar o processamento da inversão geofísica. Tais parâmetros são obtidos através de funções lineares e não lineares.

Os modelos de inversão que são relacionados às distribuições de dados por funções lineares têm como principal característica o processamento por modelagem direta, onde o conjunto de dados obedece a uma configuração prévia em subsuperfície com base nas propriedades de leis físicas.

O ponto chave durante a inversão é a comparação do modelo teórico com os dados de campo. Para o modelo atingir uma boa convergência, o objetivo principal é minimizar as diferenças encontradas entre os dados observados e os dados calculados, através do uso de algoritmos, a otimização será ajustada cada vez mais aos dados de campo, até o processo convergir em uma solução.

Outro tipo de modelos de inversão são os que são relacionados com distribuições de dados por funções não lineares, como a maioria dos dados de resistividade elétrica por exemplo. Este tipo de modelamento ocorre quando se correlaciona o conjunto de dados com o modelo homogêneo (teórico) através de iterações. O principal funcionamento do modelo de inversão é através de algoritmos de otimização para processos iterativos do modelo. A otimização é feita até ocorrer uma convergência entre os dados, de tal modo que o modelo inicial deva estar o mais próximo possível da solução verdadeira através da comparação com os dados de resistividade medidos em campo. Em processos não lineares, a inversão somente é aplicada após a existência de um modelo inicial previamente definido pelo usuário em *softwares* de geofísica.

Para um problema geofísico ser considerado mal-posto, de acordo com Jakson (*apud* Treitel & Lines, 2001) é devido ao tipo de problema em que o intérprete necessita de uma maior quantidade de informações do que as informações contidas nos dados, ou seja, as interpretações dos dados geofísicos seriam descritas como imprecisas, inconsistentes e insuficientes, deve-se considerar que uma solução geofísica geralmente não é homogênea, única, estável e em grande parte das vezes inexistentes, estando atrelado à interpretação feita

pelo usuário. Em um problema mal-posto, não costuma existir relação entre unicidade, existência e estabilidade dos dados, fato este que também deve ser considerado durante o processamento da inversão geofísica.

De acordo com Gandolfo (2007) para transformar um problema mal-posto em um problema bem-posto, existem somente duas alternativas, uma é reduzir a quantidade de informações, outra é a introdução de informações para refinar o modelo de inversão. É comum, que as soluções geofísicas sejam transformadas em um problema bem-posto, através de estabilizadores ou outras formas de equacionar matematicamente ao adicionar algum tipo de informação a priori ao modelo a ser tratado em questão.

Para Gandolfo (2007), a inversão dos dados geofísicos tem como principal objetivo determinar novos parâmetros calculados a partir do ajuste do modelo inicial com os dados observados, sendo que a correlação ocorre dentro de um limite pré-estabelecido pelo *software*. Dizer que o conjunto de dados é numericamente finito, é analisar um determinado parâmetro e para este parâmetro mais do que uma solução atende este mesmo problema. Como, por exemplo, para um mesmo parâmetro físico (resistividade elétrica), indicar informações referentes ao topo rochoso e zona de umidade, tendo mais do que uma solução para um parâmetro analisado. Os modelos gerados nas seções de eletrorresistividade podem ser de dois tipos, modelo unidimensional e modelo bidimensional.

### **2.4.3 - Tratamento quantitativo dos dados**

As seções de resistividade elétrica e polarização induzida são geradas nos *softwares* através de dados geofísicos que são interpretados de maneira quantitativa e qualitativa. A interpretação quantitativa dos resultados geofísicos e das pseudoseções de resistividade elétrica/cargabilidade aparente ocorrem pelo processo conhecido como inversão.

Para o processamento de inversão, uma primeira interpretação quantitativa é de extrema importância, à medida que os resultados gerados para as diferentes seções de resistividade conseguem uma boa convergência, se torna possível delimitar e diferenciar zonas ou faixas de diferentes valores de resistividade/cargabilidade (anômalos ou não).

De acordo com Minozzo (2009), as principais técnicas de interpretação quantitativas, a partir dos dados de campo de resistividade/cargabilidade, dão como resultado modelos gerados que são apresentados na forma de seções bidimensionais (2D), com boas resoluções

espaciais e boa definição da geometria do alvo de interesse, cuja principal finalidade é obter uma maior exatidão na profundidade investigada pelo método quando comparada às profundidades teóricas das pseudoseções iniciais. O método de inversão tem como principal finalidade utilizar modelos numéricos, na qual o *software* estabelece, a partir dos dados obtidos em campo, um modelo que tenta se adequar e convergir de maneira muito próxima aos dados reais.

Durante o processamento, através do método de inversão, o que o intérprete efetua é uma comparação entre os dados de resistividade/cargabilidade, obtidos em campo, com os dados das pseudoseções. De acordo com Loke (1999) o modelo pode ser considerado como adequado quanto menor for a diferença entre os dados de campo e os dados das pseudoseções. A determinação das resistividades verdadeiras somente é efetuada através do processo de inversão geofísica em determinados *softwares* (como o RES2DINV), geralmente o processamento é rápido e gera uma grande quantidade de informações (Loke, 2000).

Fachin (2007), determina que é necessária uma sequência de etapas para a realização do processo de inversão através de um algoritmo específico (Figura 15).



**Figura 15** - Esquema de etapas envolvendo a inversão dos dados de resistividade elétrica. Fonte: Adaptado de (Fachin, 2007).

De acordo com Olayinka & Yaramanci (2000) os tipos de inversão mais comuns durante a interpretação dos valores de resistividade e cargabilidade são a inversão por suavização e a inversão por blocos de polígonos. O *software* mais utilizado para a inversão de dados de resistividade elétrica e cargabilidade é o RES2DINV, sendo que o modelo de suavização utilizado, por padrão, é o do método de mínimos quadrados. Loke & Barker (1996) descrevem que o método de inversão do programa modela a subsuperfície na forma de blocos retangulares, onde cada bloco é representado pelos valores constantes de resistividade ou cargabilidade.

O modelo final pode variar a quantidade de blocos retangulares em função das diferentes seções que estão relacionadas com o número de pontos formados em subsuperfície. A quantidade de pontos é determinada na pseudoseção, tendo como base a relação entre a distância dos eletrodos em X e as profundidades teóricas em Y (Loke & Barker, 1996).

A profundidade teórica é determinada pelo espaçamento dos eletrodos e pelo tipo de arranjo elétrico utilizado em campo. Se o espaçamento entre os eletrodos e o arranjo eletródico para todas as seções de eletrorresistividade forem o mesmo, a profundidade teórica será a mesma para todas as seções.

Loke & Barker (1996) relatam que a seção bidimensional de resistividade/cargabilidade é formada por uma malha regular, definida por blocos retangulares, tais blocos indicam o número de pontos e suas posições que simulam a subsuperfície terrestre. O cálculo matemático para a definição das malhas é através da matriz de dados do programa em função dos métodos Gauss – Newton e quase – Newton (Loke & Barker, 1996).

#### **2.4.4 - Inversão 1D de dados de eletrorresistividade**

A modelagem unidimensional é utilizada para apresentar os resultados da técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV). Os parâmetros obtidos pela modelagem 1D são a resistividade verdadeira e a espessura das camadas. No modelo de inversão apresenta planos estratificados, com camadas horizontais de comprimento lateral infinito, que apresentam características homogêneas e isotrópicas, o que indica que os valores de resistividade elétrica somente se alteram em profundidade. O tempo de processamento do modelo unidimensional é mais rápido do que o tempo de processamento de modelos bidimensionais, devido à principal

característica de somente variar em profundidade, o que torna o processo de inversão muito simples e rápido.

As primeiras técnicas de inversão (1D) de eletrorresistividade foram desenvolvidas por Inman et al. (1973) e Inman (1975). Após a introdução destas técnicas por parte destes autores, o uso da modelagem unidimensional passou a se tornar um padrão para aplicações em geofísica. De acordo com Kofoed, *apud* Basokur (1990), as principais técnicas utilizadas em programas de sondagem elétrica vertical são as técnicas de ajuste de curvas e pelo método de um ponto auxiliar, sendo divididas em dois grupos:

- a-) interpretação iterativa e;
- b-) métodos de interpretação direta de dados

O método mais usado é o da interpretação de processos iterativos, no qual programas de geofísica, através do método de mínimos quadrados, costumam ajustar os valores observados com os valores teóricos que são definidos pelo modelo inicial. É feita uma correlação entre os dados observados e os dados teóricos, em que esse procedimento de comparação é realizado diversas vezes até se atingir uma convergência entre ambos os dados. Quanto mais próximo o modelo inicial estiver do modelo de inversão, mais rápida será a solução e a velocidade de convergência entre os processos iniciais e finais.

De acordo com Basokur (1990) o método de interpretação direta é baseado na função transformada da resistividade, sendo o modelo inicial necessário para sucessivas iterações, não precisando ser estipulado pelo usuário, para esta interpretação o número mais comum de camadas é inferior ao número de seis camadas.

Zohdy (1989) propôs um método que funciona de maneira automática para a interpretação de curvas de sondagem elétrica vertical (para os tipos de arranjos Schlumberger e Wenner). O modelo gerado tem como característica estabelecida que o número de camadas é proporcional ao número de pontos na curva de sondagem, de tal maneira que o modelo seja suavizado.

As principais dificuldades encontradas na modelagem unidimensional são devido à complexidade de informações de resistividade encontradas no modelo, ou seja, uma unidade litológica pode ser representada por várias unidades geoeletricas, enquanto que uma unidade geoeletrica pode ser representada por uma ou mais unidades litológicas. Um bom fator para a

diferenciação de camadas é a presença de água ou então mudanças de dois litotipos (como o arenito e basalto/diabásio, por exemplo).

#### **2.4.5 – Inversão (2D) de dados de eletrorresistividade**

As principais técnicas de inversão bidimensional para os dados de eletrorresistividade são as técnicas conhecidas como “*ridge regression*” e a técnica de otimização através dos métodos de mínimos quadrados.

Pelton et al. (1978) descreve a técnica “*ridge regression*” como um algoritmo que realiza a inversão dos dados de eletrorresistividade, este algoritmo difere do que é utilizado pelo método de mínimos quadrados. De acordo com Sazakai (1989), de-Groot-Hedlin & Constable (1990), Oldenburg & Li (1994), Loke & Barker (1996 a), o método de otimização por mínimos quadrados é mais comumente utilizado, tendo como principal vantagem a de ser uma técnica de uso para inversão de dados 2D e 3D de eletrorresistividade.

De acordo com Ellis & Oldenburg (1994), uma maior quantidade de informações a priori melhora de maneira considerável o modelo geofísico, ou seja, a principal vantagem do método de mínimos quadrados é de permitir que se acrescente informações adicionais de subsuperfície, estas podem ser restritivas durante o procedimento de inversão de dados, o que permite um maior controle durante o processo de modelagem, adequando melhor o modelo invertido com a geologia do local em questão.

Olayinka & Yaramanci (2002) relatam que para os *softwares* de geofísica, os principais grupos de inversão através da técnica de mínimos quadrados são a inversão por polígonos ou inversão por suavização.

Olayinka & Yaramanci (2000b) denominam que a inversão por polígonos nada mais são do que algoritmos na forma de polígonos utilizados para representar corpos e camadas, uma vez que cada elemento geométrico é representado por um valor de resistividade elétrica constante. A principal característica do modelo geológico por blocos é que o modelo inicial deve ser construído pelo intérprete e a inversão é feita a partir deste modelo. A técnica de inversão por polígonos também é conhecida como “*true polygon inversion*” ou “*block inversion*”.

A técnica de inversão por suavização possui algoritmos que trabalham com um conjunto de dados, variando como base o tamanho de células. Uma das vantagens desta técnica é que o modelo geológico inicial é feito automaticamente por um programa de geofísica e fornece um modelo automático de imageamento, sendo que este modelo de suavização auxilia a elaboração do modelo inicial, diminuindo tempo de operação e consequentemente aumentando para o processo de inversão.

#### **2.4.6 - Modelo de Inversão com a utilização do software RES2DINV**

De acordo com Loke & Barker (1995), a inversão bidimensional dos dados de resistividade é um problema do tipo não linear, o qual necessita de um processo iterativo a partir da introdução do modelo inicial. Essa característica permite que o modelo inicial não dependa da introdução dos dados medidos para a realização de pseudoseções de resistividade aparente.

A principal vantagem do programa RES2DINV é a não entrada dos dados no modelo inicial por parte do intérprete, assim o processamento do modelo de inversão é rápido, com a entrada dos dados obtidos posteriormente para o mecanismo de inversão do modelo a ser tratado. O modelo inicial é construído como um espaço homogêneo em subsuperfície onde os valores de resistividade constante são iguais à média dos logaritmos dos valores da resistividade aparente da pseudoseção. A propriedade de trabalhar com valores de resistividade constantes em forma de blocos nas pseudoseções limita o processo inicial da inversão bidimensional.

Quando a variabilidade entre os valores de resistividade elétrica medidos em comparação com os valores do modelo inicial for pequena, significa que essa comparação acarretará em um menor erro de ajuste através do método de mínimos quadrados.

Quando a variabilidade entre os valores de resistividade elétrica medidos e os valores do modelo inicial for divergente, o erro de ajuste do método de mínimos quadrados apresentados pelo modelo final de inversão geofísica é maior.

A sensibilidade nos valores de resistividade está relacionada com o tipo de arranjo eletrodico utilizado no ensaio, ou seja, por exemplo, se o arranjo for dipolo-dipolo, a

sensibilidade nos valores de resistividade tende a ser maior do que nos arranjos Schlumberger e Wenner.

Quando o conjunto de dados apresenta uma pequena variação nos valores de resistividade, o erro RMS é baixo. Para a matriz jacobiana, cada iteração processada na modelagem de inversão, uma matriz é estimada. A matriz jacobiana mostra o contraste das resistividades do modelo gerado, realçado pela diferença entre a matriz jacobiana estimada e a matriz jacobiana verdadeira.

Os principais parâmetros a serem considerados durante a modelagem de inversão é quanto ao tipo de suavização, o fator de amortecimento, quanto à forma de discretização em blocos retangulares, quanto ao processamento da matriz jacobiana, quanto ao erro RMS, fator e filtro de aplainamento.

Para o parâmetro do tipo de suavização na modelagem de inversão, existem dois tipos principais de suavização, sendo a inversão robusta e a inversão por vínculo de suavidade. Segundo Gandolfo (2007), a inversão robusta é o processo que matematicamente minimiza a norma  $L_1$ , enquanto que a otimização feita através do método por vínculo de suavidade da norma  $L_2$ , faz parte do processo de inversão por vínculo de suavidade.

A suavização do modelo de inversão é extremamente sensível a qualquer tipo de ruídos nos dados, isto é se o conjunto de dados tiver uma grande quantidade de ruídos, a inversão por suavização é mais influenciável, enquanto que se o nível de ruído for baixo, o processo de suavização retratará os diferentes intervalos de resistividade de maneira gradual, de tal maneira que não exista uma variação abrupta na resistividade em subsuperfície, sendo, portanto um modelo com variação gradual de resistividade em subsuperfície e sem saltos nestes valores.

Em um dado pouco ruidoso e com boa qualidade nas informações, qualquer tipo de método de suavização das técnicas de inversão satisfaz o modelo final (da imagem a ser interpretada), sendo, portanto um modelo que pode ser usado por qualquer tipo de suavização das técnicas de inversão.

A discretização do modelo de inversão é feita na forma de blocos retangulares em subsuperfície com profundidades teóricas definidas pelo arranjo de eletrorresistividade utilizado, cada bloco retangular apresenta um valor de resistividade elétrica. Os blocos são

apresentados em pseudoseções bidimensionais, onde o arranjo dos blocos segue de maneira aproximada a distribuição dos dados nas pseudoseções de resistividade aparente (Gandolfo, 2007).

Quanto ao cálculo e processamento da matriz jacobiana é dado como uma resposta do modelo em relação aos dados de cada resistividade, onde cada bloco do modelo é discretizado. O uso principal da matriz jacobiana é através dos métodos Gauss-Newton e quasi-Newton que são dois diferentes tipos de soluções através do método de mínimos quadrados (Gandolfo, 2007).

De acordo com Gandolfo (2007) o método Gauss-newton apresenta uma desvantagem e uma vantagem em relação ao método quasi-Newton. A principal vantagem é que o número de iterações necessárias para o modelo de inversão convergir é geralmente baixo, enquanto que a principal desvantagem é de requerer maior processamento computacional e uma maior quantidade de dados, o que leva mais tempo quando se compara com o método quasi-Newton.

Gandolfo (2007) menciona que a principal desvantagem do método quasi-Newton é a necessidade de um número maior de iterações para o processo de inversão convergir, sendo que a principal vantagem é o menor tempo computacional para processar uma maior quantidade de dados.

De acordo com Loke & Dahlin (2002) a técnica comumente utilizada em programas de geofísica é uma intermediária que se utiliza da combinação dos métodos Gauss-Newton e quasi-Newton, de tal forma que o tempo de convergência e o erro de ajuste fique entre os resultados de ambos os métodos de mínimos quadrados.

O erro RMS (*root mean square*) é apresentado a cada iteração durante o processo de inversão de dados e a medida que o número de iterações prossegue, o erro RMS diminui (Gandolfo, 2007). Quando o modelo de inversão converge, o erro RMS se torna o menor possível para aquele determinado conjunto de dados.

De acordo com Gandolfo (2007) o erro RMS é dado pelo cálculo da diferença entre o logaritmo das resistividades aparentes medidas com as resistividades aparentes calculadas. O erro de ajuste é dado em porcentagem.

No entanto vale ressaltar que mesmo tendo um baixo erro RMS não significa que o modelo geofísico é o mais adequado para representar a realidade do local. As vezes o erro

RMS “mascara” possíveis variações anômalas das resistividades elétricas, cabendo ao usuário decidir o número de iterações necessário com seu respectivo erro RMS para o modelo convergir.

De acordo com Sazasaki (1992), o fator de amortecimento representa certo equilíbrio entre a resolução e a estabilidade, sendo usado para controlar a suavização de uma imagem. De acordo com Constable et al. (1987), o fator de amortecimento é um parâmetro que suaviza o modelamento geofísico, ou seja, quando o fator de amortecimento é pequeno, consegue-se detectar variações de resistividade que são discrepantes, em contrapartida quando o fator de amortecimento é grande, as discrepâncias entre os valores de resistividade não são bem identificadas, por causa da suavização destes valores.

O filtro de aplainamento é um outro parâmetro que é relacionado com o fator de amortecimento, adequando melhor o modelo geofísico à realidade do local, pois permite adicionar informações geológicas que se tornam importantes na tentativa de enriquecer a modelagem geofísica (Gandolfo, 2007).

## **2.5 - Algumas aplicações de trabalhos que envolvem as técnicas de eletrorresistividade em aterro sanitário**

Na literatura existem inúmeros trabalhos que relatam o uso de métodos geofísicos em estudos de contaminação ambiental em áreas de disposição de resíduos, em especial para a aplicação dos métodos de eletrorresistividade, como a sondagem elétrica vertical (SEV) e o caminhamento elétrico, associado com outros métodos complementares ou não.

Cavalcanti, Salto e Lima (2001), utilizaram a sondagem elétrica vertical (SEV) em estudos preliminares no Aterro Metropolitano Centro, localizado em Salvador, Bahia. Tais autores utilizaram os dados de resistividade elétrica, cargabilidade e potencial natural dos dados que foram coletados, com isso definiram e localizaram o lençol freático e também do topo rochoso, auxiliando assim a instalação de poços de monitoramento. Com o auxílio das técnicas geofísicas foram indicadas análises químicas em amostras de águas de poços e superficiais que confirmaram que tais águas não estavam contaminadas, corroborando os resultados dos ensaios geofísicos.

Shiraiwa et al. (2002), realizaram estudos em um lixão desativado em Cuiabá (Mato Grosso). Tais autores analisaram os dados levantados por um dos métodos de

eletrorresistividade, através de dados eletromagnéticos e radar de penetração no solo, com isso eles detectaram a contaminação pelo chorume da superfície até a profundidade da zona saturada, localizando a contaminação do lençol freático, com valores de baixa resistividade (<20 ohm.m) e associados a altos valores de condutividade (<60 mS/m).

Shiraiwa et al. (2002) atentam para o fato de que o uso de geofísica (como métodos de eletrorresistividade e GPR) pode minimizar muito dos problemas relacionados à disposição final dos resíduos, uma vez que a geofísica pode auxiliar na seleção de áreas apropriadas para o depósito e também seu monitoramento. Ainda ressalta que, os métodos de eletrorresistividade e GPR se tornam eficientes na localização e monitoramento de águas subterrâneas, especialmente se considerar a rapidez com que a informação da subsuperfície é obtida e o custo relativamente baixo que há na aplicação dos métodos geofísicos.

Silva et al. (2002) utilizaram estudos de eletrorresistividade (sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico), para verificar a existência de contaminação no subsolo, atingindo o lençol freático, no lixão desativado na região de Ribeirão Preto. As linhas geoeletricas geradas em cima da cava de resíduos indicaram valores de resistividade baixos (20  $\Omega$ .m) e altos valores de condutividade (20 mS/m). Estes autores compararam ainda com os resultados da linha de referência, que foi executada na porção jusante do aterro e concluíram em termos gerais que há a contaminação por chorume.

Moura e Malagutti Filho (2003, 2007), utilizaram conjuntamente os métodos da eletrorresistividade e polarização induzida, aplicados em caminhamento elétrico e sondagem elétrica vertical, com o objetivo de investigar a contaminação do lençol freático nas áreas dos aterros controlados de Rio Claro e Piracicaba, São Paulo. De um modo geral, tais autores identificaram zonas de baixa resistividade, confirmando a contaminação com chorume. Análises químicas de poços de monitoramento confirmam elevadas concentrações de íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), sódio ( $\text{Na}^+$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^{2-}$ ).

De acordo com Moura e Malagutti Filho (2003, 2007) os principais métodos geofísicos empregados, são os métodos da eletrorresistividade e da polarização induzida.

Lago, Elis e Giacheti (2006) utilizaram técnicas de eletrorresistividade (caminhamento elétrico e sondagem elétrica vertical), combinando tais métodos com polarização e potencial espontâneo, para estudar a contaminação do solo no município de Bauru, São Paulo. De maneira geral a utilização das técnicas permitiu separar as cavas que foram contaminadas

(valores de resistividade menores do que  $20 \Omega.m$ ), de materiais naturais (valores acima de  $100 \Omega.m$ ). Tais técnicas, auxiliadas com o potencial espontâneo permitiram definir o tipo de resíduo existente em subsuperfície. Os autores concluíram que a integração destes três métodos geofísicos permitiu obter um grande número de informações a respeito da interação entre a área contaminada por resíduos e o meio físico em geral.

Bortolin (2009) desenvolveu um trabalho interessante no sentido de utilizar a geofísica como acompanhamento do que está ocorrendo na região de estudo, monitorando temporalmente o local através de ensaios repetidos, de tal forma que se consiga comparar os resultados obtidos ao longo do tempo. O autor conseguiu obter um bom entendimento de como o contaminante se comporta, além de propor soluções para o problema de contaminação na área. No trabalho realizado no aterro sanitário em Rio Claro, o autor através de linhas de caminhamento elétrico interpretadas determinou um background de resistividade para a região de  $140 \Omega.m$ , sendo que valores superiores a este indicavam um ambiente natural sem contaminação por chorume, enquanto que valores abaixo indicavam contaminação por chorume.

### 3 - LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1 – Localização

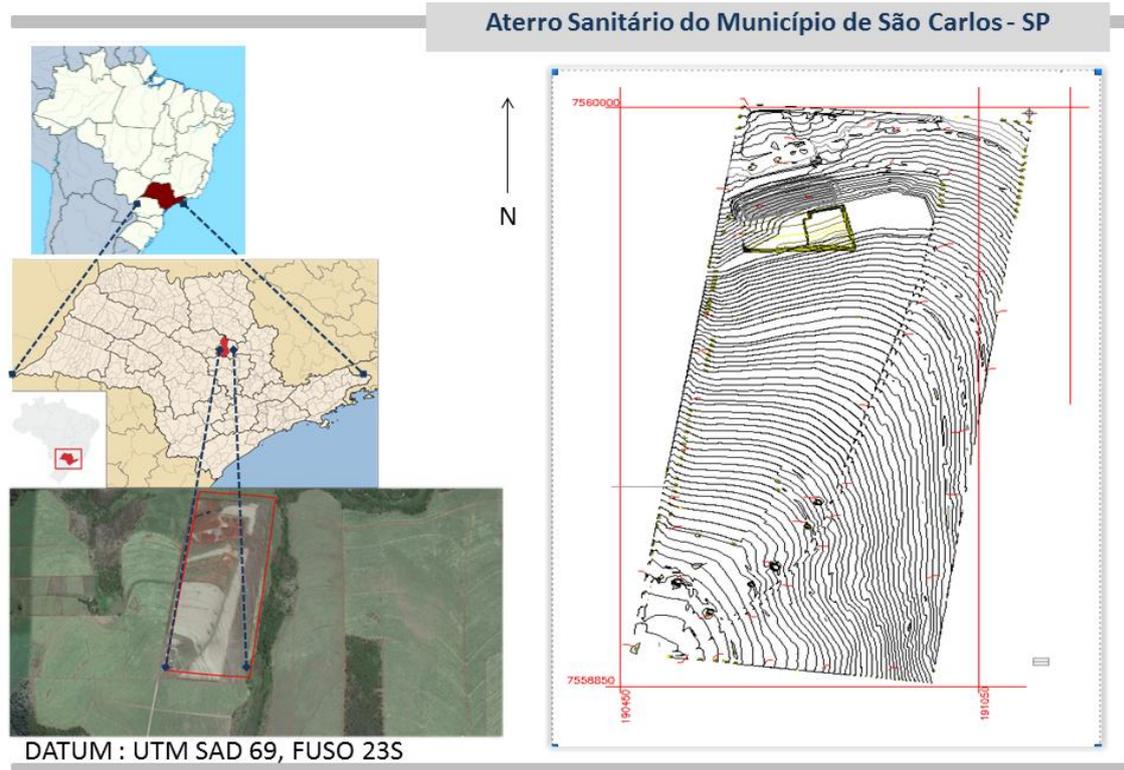
A área de estudo, na qual se insere o aterro sanitário de São Carlos, localiza-se entre os municípios de São Carlos e Ribeirão Bonito, no Estado de São Paulo. Fica situada entre as coordenadas UTM 7558850 mN e 190450 mE e 7560000 mN e 191100 mE segundo o Datum SAD-69 fuso 23S (Figuras 16, 17 e 18).

O município de São Carlos é limitado geograficamente com os seguintes municípios: ao norte Rincão, Luís Antônio e Santa Lúcia; ao sul Ribeirão Bonito, Brotas e Itirapina; a leste Descalvado e Analândia e a oeste com Ibaté, Araraquara e Américo Brasiliense.

O aterro sanitário localiza-se na área rural a cerca de 10 km em linha reta do centro da cidade de São Carlos. O principal acesso ao aterro é no Km 162 da rodovia SP – 215 que liga os municípios de São Carlos e Ribeirão Bonito. Segundo a Prefeitura Municipal de São Carlos, a área do atual aterro sanitário foi declarada de utilidade pública através do decreto (Nº415/2008), conforme mencionado no Relatório de Impacto Ambiental do empreendimento (FIPAI, 2010)



**Figura 16** - Operação do aterro sanitário de São Carlos.



**Figura 17** - Mapa de localização do aterro sanitário do município de São Carlos - SP.



**Figura 18** - Vista aérea, localização do aterro sanitário de São Carlos. Fonte: Retirada do Google, 2016.

### **3.2 – Clima**

A área de estudo localiza-se na zona considerada como clima tropical de altitude, no domínio de clima Cwa, que é clima quente com inverno seco, definido a partir da classificação de Koeppen, no qual a temperatura média do mês mais frio é de 18°C e a do mês mais quente ultrapassa 22°C (Miranda, 2005). Segundo a classificação de Thornthwaite, o município corresponde à região BB'w, que seria de mesotérmico úmido com deficiência de água no inverno (Tolentino, 1967). O total de pluviosidade do mês mais seco é inferior a 30 mm e nos meses mais chuvosos, os valores de pluviosidades chegam a ser dez vezes maiores (FIPAI, 2010).

Segundo Nimer (1977) o período seco corresponde aos meses entre junho e agosto, o que corresponderia ao período de inverno, no entanto, a deficiência hídrica no município pode variar por um período de 6 meses, variando de junho a novembro ou de abril a setembro.

Segundo Miranda (2005) e FIPAI (2010) podem ocorrer variações significativas na temperatura na região de São Carlos, com médias mensais de 17,3 a 26,3 °C e anuais de 20,8 a 21,7 °C. Nos períodos em que a precipitação pluvial é máxima, pode atingir um valor mensal de até 470 mm, enquanto que a maioria dos dias no mês são chuvosos (cerca de 26 dias), com máxima precipitação diária chegando a 104 mm. Os valores anuais de chuva acumulada podem atingir faixas entre 1.138 mm e 1.593 mm. Ainda segundo os autores, as principais direções de ocorrência de ventos são a nordeste, sudeste, leste e norte. A umidade relativa do ar, média diária, varia entre 30 e 100%, enquanto que as médias mensais se situam entre 53 e 89% e as médias anuais entre 71 a 77%.

### **3.3 - Geomorfologia**

A geomorfologia é um importante parâmetro para entender processos que envolvem a dinâmica externa da Terra, como feições erosivas, alteração de uma área e relações entre água, pedologia e litotipo. A área de estudo é constituída pela província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista e corresponde a unidade morfoescultural Planalto Residual de São Carlos (IPT, 1997).

De acordo com o IPT (1997), a unidade Planalto Residual de São Carlos se localiza entre o Planalto Ocidental e a Depressão Periférica Paulista. As principais formas de relevo são denudacionais, constituídas por colinas de topos convexos e tabulares.

As cotas altimétricas variam entre 600 e 900 metros, as vertentes apresentam declividade que variam de 2 a 20% em grande parte da área, podendo atingir valores superiores a 30% nas porções mais dissecadas do relevo (IPT, 1997).

FIPAI (2010) classifica o relevo da área de estudo como colinoso, na forma de Colina, Colina Ampla com topo extenso e aplainado e vertentes com declividade média entre 8 e 10%. A maior cota altimétrica é de 736 metros e a menor é de 653 metros.

### **3.4 – Vegetação**

Os principais tipos de vegetação na região de São Carlos são: savana, floresta estacional, floresta secundária, áreas de reflorestamento e vegetação ripária (Miranda, 2005). Segundo FIPAI (2010) a área de estudo recebe a influência das vegetações da floresta estacional semidecidual, floresta estacional semidecidual ribeirinha ao longo dos cursos d'água, vegetação de mata ciliar, além de algumas espécies arbustivas, herbáceas e trepadeiras.

Segundo SMA/SP (2004) na área próxima do aterro sanitário do município de São Carlos, a vegetação predominante é classificada de acordo com o inventário como Floresta Estacional Semidecidual. No período chuvoso não há queda de folhas e as temperaturas tendem a ter valores mais elevados do que nos períodos de seca, à medida que nos períodos de seca a vegetação pode perder cerca de 20 a 50% das folhas, por isto é correto afirmar que este tipo de vegetação está condicionado à estabilidade climática.

Atualmente na área de estudo, e nas proximidades do aterro sanitário as terras estão ocupadas predominantemente com o plantio de cana-de-açúcar, tendo a vegetação natural sido quase totalmente dizimada.

### **3.5 – Pedologia**

Os solos predominantes na área do aterro sanitário pertencem a classe dos Latossolos Vermelhos e secundariamente a classe dos Gleissolos Hápicos (FIPAI, 2010). A classe dos Latossolos Vermelhos (LV) é dividida em: Latossolos vermelhos escuros e Latossolos Vermelho Amarelos. Estes dois grupos apresentam como característica comum a sequência de horizontes A – B – C com pequena diferenciação entre eles (Lepsch, 1994).

FIPAI (2010) descreve que a classe dos Latossolos Vermelhos está relacionada geologicamente aos solos coluvionares. São solos cuja as propriedades físicas e químicas são boas para o manejo agrícola.

Ocorrem ainda na área de estudo os Gleissolos Hápicos, distribuídos nos fundos dos vales e nas várzeas e relacionados aos aluviões encontrados nas proximidades das drenagens na porção leste da área, localizados fora da área prevista para instalação do aterro sanitário (FIPAI, 2010).

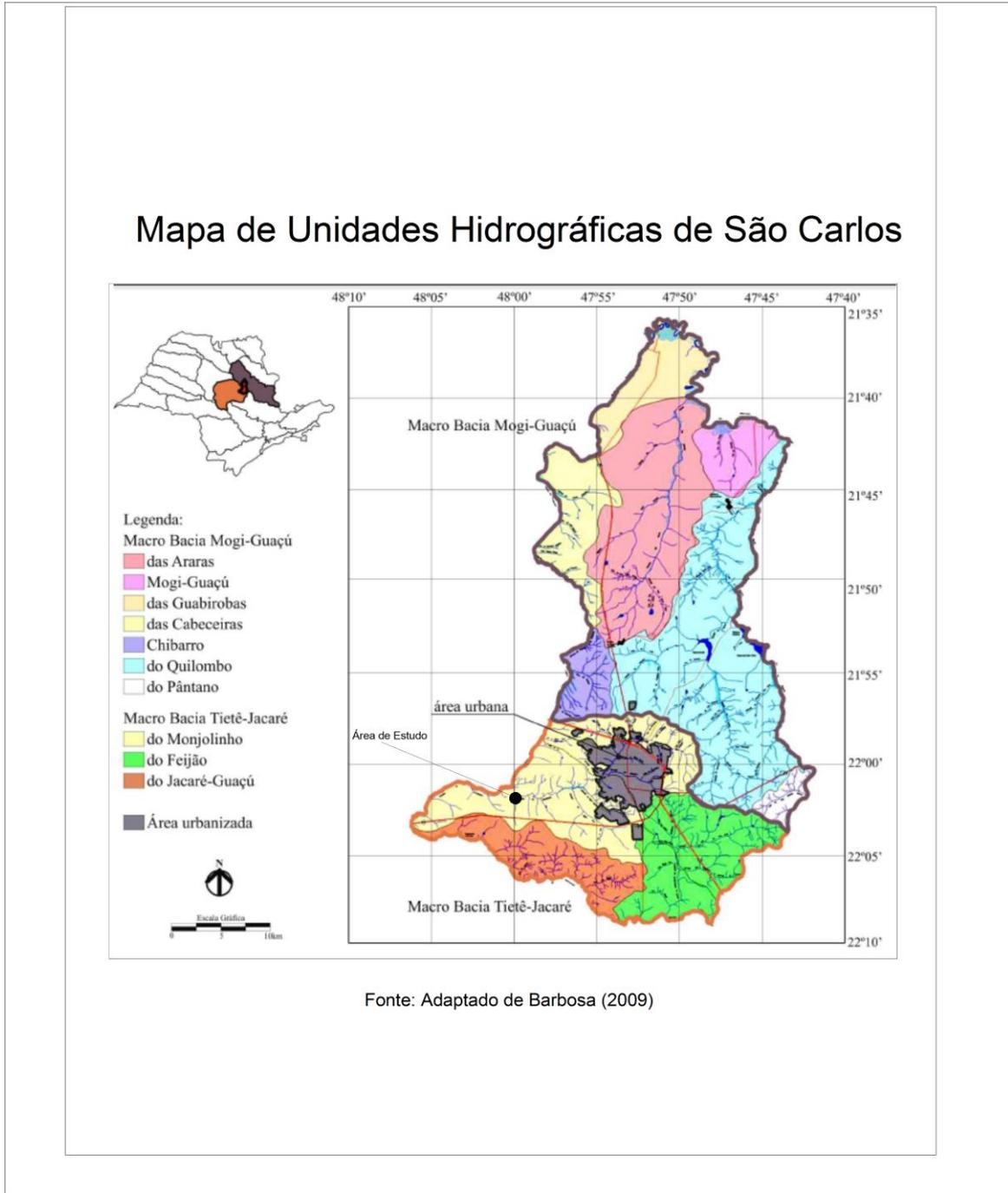
### **3.6 - Hidrologia**

#### **3.6.1 - Águas Superficiais**

O município de São Carlos, por estar localizado em uma região de divisores de água, ocupa áreas pertencentes a duas grandes bacias hidrográficas do Estado de São Paulo, que são as unidades hidrográficas da macro bacia do Tietê – Jacaré e a unidade hidrográfica da macro bacia Mogi – Guaçú.

A área de estudo localiza-se na bacia hidrográfica do Rio Monjolinho que pertence à bacia hidrográfica da macro bacia Tietê – Jacaré.

A Figura 19 mostra um mapa retirado de Barbosa (2009) que indica a distribuição geográfica da macro bacia Tietê – Jacaré e Mogi – Guaçú e suas respectivas micro bacias, localizadas no município de São Carlos.



**Figura 19** - Mapa que mostra as principais unidades hidrográficas do município de São Carlos. Fonte: Adaptado de Barbosa, 2009.

### 3.6.2 – Águas Subterrâneas

Os principais tipos de aquíferos presentes na área de estudo são o aquífero freático, o aquífero Guarani e o aquífero fissurado do diabásio da Formação Serra Geral. O aquífero Guarani é constituído pela Formação Botucatu e Pirambóia, representando o grande

manancial subterrâneo regional e o aquífero Serra Geral é formado pela água acumulada nos sistemas de fraturas do diabásio (FIPAI, 2010).

O aquífero freático tem o nível de água próximo do contato entre o latossolo de menor coesão e o solo de alteração, tendo um comportamento hidrogeológico de um aquíclode (FIPAI, 2010).

De acordo com FIPAI (2010) o aquífero freático possui baixo potencial para exploração de água subterrânea e apresenta pequena espessura e baixa permeabilidade.

### **Aquífero Serra Geral**

O aquífero Serra Geral, na área de estudo, é representado pelos diabásios, no qual a principal forma de armazenamento e transmissão de água é através de sistemas de fraturas. O aquífero se forma quando há o preenchimento de água em um meio fraturado, descontínuo, anisotrópico com comportamento livre a confinado (FIPAI, 2010).

O diabásio apresenta fraturas de sentido sub-horizontal e sub-vertical. Com isso, o comportamento do aquífero fissurado, derivado deste litotipo, depende do grau de fraturamento da rocha (FIPAI, 2010).

### **- Aquífero Guarani**

O principal sistema de abastecimento de água subterrânea do Estado de São Paulo é o aquífero Guarani que tem grande importância na captação de água e no abastecimento de diversas cidades do Estado.

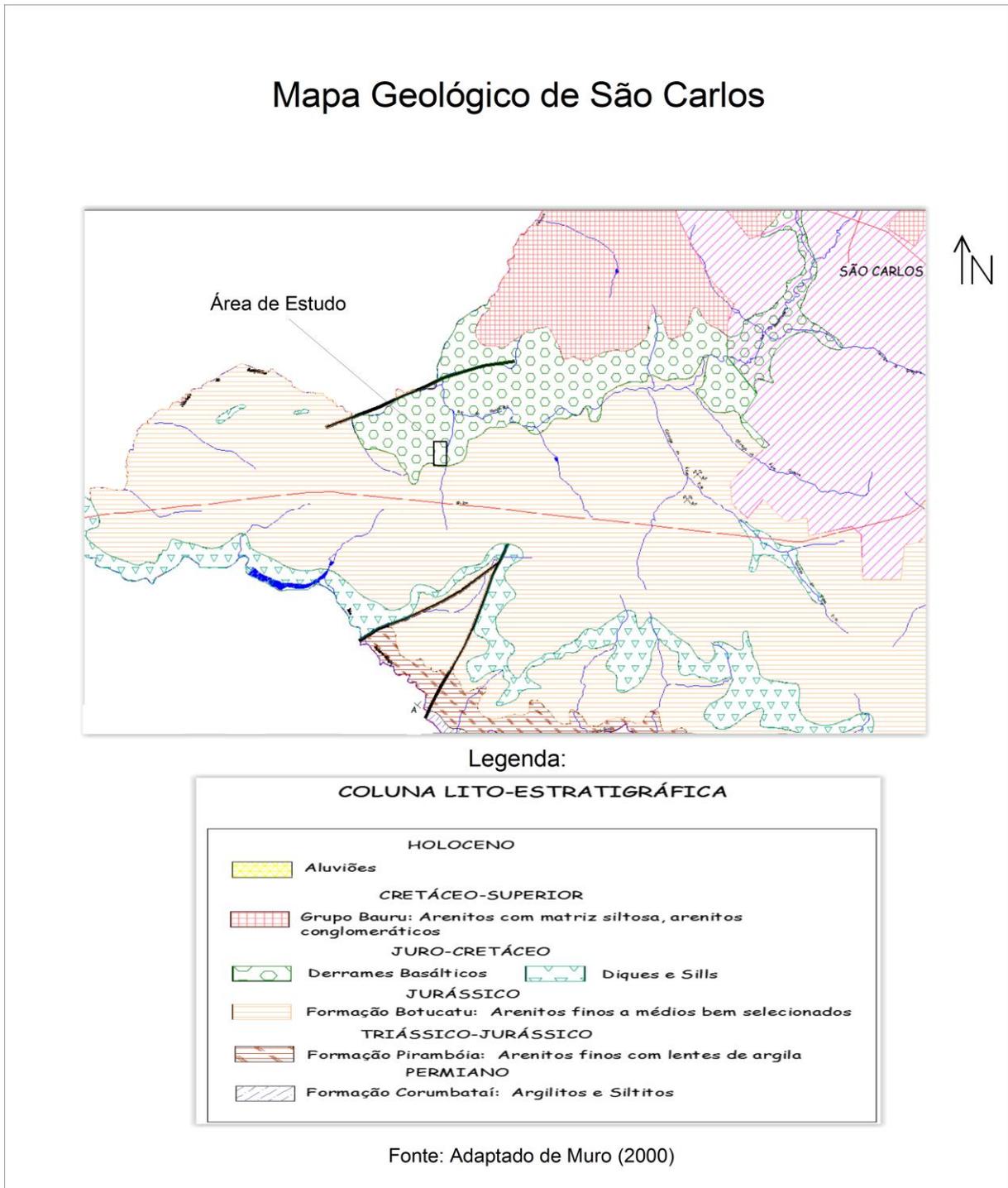
Segundo a EMBRAPA (2004), a água subterrânea, contida no sistema Aquífero Guarani, é de excelente qualidade e teria potencialidade para abastecer grande parte da população brasileira por cerca de 2.500 anos. A sua área de extensão é de mais de 1,15 milhões de quilômetros quadrados, sendo que a maior parte do aquífero está localizada no Brasil, com mais de 70% de toda a extensão do aquífero.

Na área de estudo, o Aquífero Guarani é constituído pela Formação Pirambóia, sendo este o principal aquífero nas proximidades da área do aterro sanitário. O aquífero apresenta grande importância para o abastecimento público na área do município de São Carlos (FIPAI, 2010).

As principais características do aquífero é a de que este é poroso, contínuo, homogêneo e isotrópico, variando de livre a confinado. Segundo estudos realizados na área de estudo (FIPAI, 2010), o aquífero Guarani encontra-se em profundidades superiores a 70 metros, sendo recoberto pelos diabásios da Formação Serra Geral. Ainda de acordo com FIPAI (2010), o aquífero apresenta fluxos de água subterrânea na direção noroeste.

### **3.7 - Geologia**

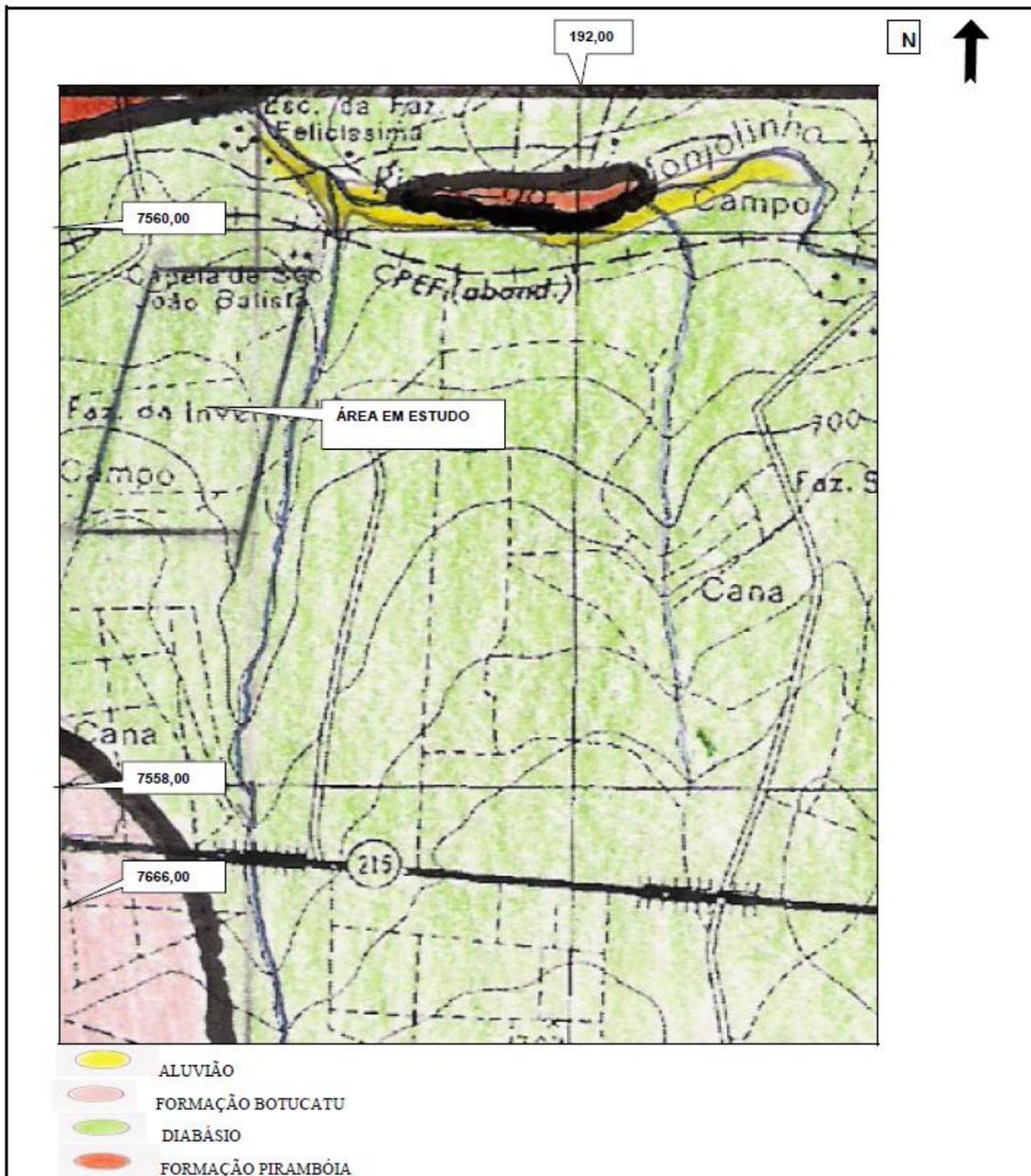
A região do município de São Carlos, no contexto geológico regional, está inserida na Bacia Sedimentar do Paraná (Milani et al., 1994). As principais formações geológicas pertencem ao grupo São Bento, constituído pelas formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral, além de rochas pertencentes a Formação Itaqueri, de idade Cenozóica. A Figura 20 mostra o mapa geológico da cidade de São Carlos feito pelo Muro (2000), com a localização da área do aterro sanitário. De acordo com a classificação de Muro (2000), a área do aterro sanitário de São Carlos, se localiza entre os derrames basálticos da Formação Serra Geral.



**Figura 20** - Mapa Geológico da área próxima ao aterro sanitário. Fonte: Mapa Geológico do Município de São Carlos (Muro 2000). Escala original 1:50.000.

Como se observa na Figura 20 parte da área destinada ao aterro sanitário estaria localizada próximo ao contato com os arenitos da Formação Botucatu. No entanto, estudos de detalhe conduzidos durante a realização do RIMA do empreendimento (FIPAI, 2010),

demonstraram que na área de instalação do aterro sanitário ocorre extenso corpo de rocha intrusiva do tipo diabásio, conforme mostrado no mapa apresentado na Figura 21.



**Figura 21** - Mapa geológico da área de instalação do aterro sanitário de São Carlos – Escala original 1:20.000. Fonte: Fipai (2010).

### **3.7.1 - Grupo São Bento**

Segundo Milani e Ramos (1998), o Grupo São Bento encontra-se estratigraficamente acima do Grupo Passa Dois e corresponde aos períodos do Triássico médio e Cretáceo Inferior.

As unidades geológicas do Grupo São Bento são as Formações Pirambóia na porção inferior, a Formação Botucatu que está estratigraficamente acima da Formação Pirambóia e a Formação Serra Geral que é a unidade geológica que corresponde ao topo do Grupo São Bento. Os litotipos predominantes das formações inferiores (Pirambóia e Botucatu) são arenitos de origem continental, arenosos e a porção superior do Grupo é representada pelos basaltos da Formação Serra Geral. Associado a Fm. Serra Geral ocorrem também, com certa frequência, os diabásios, em formas de soleiras e diques.

### **3.7.2 - Formação Pirambóia**

Segundo Milani et al. (1994), a Formação Pirambóia tem como principal litotipo os arenitos de coloração esbranquiçada, amarelada, avermelhada e rósea, cuja granulometria varia de muito fina à fina. De acordo com FIPAI (2010), os arenitos apresentam matriz argilosa, onde localmente ocorrem intercalações de siltitos e argilitos. Milani et al. (1994) afirmam que há uma variação no conteúdo de argila que se apresenta intercalada com finas camadas de lamitos argilosos, com estratificação cruzada planar, acanalada e plano-paralela. Alguns autores, como Soares (1973), relatam que a Formação Pirambóia é segmentada em dois membros, sendo que a porção basal é mais argilosa, com estratificações de pequeno porte, enquanto que a porção superior é uma mistura de bancos de arenitos com pouca quantidade de argila. Nas porções mais arenosas prevalecem estratificações cruzadas, enquanto que nas porções mais argilosas prevalecem estratificações plano-paralelas.

### **3.7.3 - Formação Botucatu**

Segundo Caetano-Chang e Wu (1993), os principais litotipos que compõem a Formação Botucatu tem sua origem ligada a deposição de sedimentos em ambiente desértico e são representados predominantemente por quartzo-arenitos e subarcóseos, com grau de seleção gradando de bom a muito bom e uma variedade textural de maduro a supermaduro. Há variações locais de arenitos argilosos, entretanto a porcentagem de silte-argila não supera os 5% e ocorre a presença de conglomerados e arenitos conglomeráticos subordinadamente.

Milani (1997) menciona que os materiais da Formação Botucatu são típicos de áreas de relevo pouco acentuado, muitos destes materiais são oriundos de rochas cristalinas e sedimentares preexistentes depositados em bacia estável e transporte relativamente prolongado, fortemente retrabalhados por abrasão seletiva típicas de clima semi-árido e árido de ambiente desértico, eventual e temporariamente cortado por rios. Para os arenitos conglomeráticos e conglomerados encontrados na formação, o ambiente deposicional é oriundo de correntes torrenciais efêmeras (Caetano-Chang e Wu, 1993).

Estratigraficamente, Milani (1997) descreve que a Formação Botucatu é limitada por uma inconformidade regional ao longo de toda a bacia, gerando grande superfície de deflação eólica, estabelecida durante a aridez do Gondwana ocidental. Esta formação é sobreposta por rochas vulcânicas básicas e ácidas, com predominância de basaltos e diabásios, pertencentes a Formação Serra Geral.

### **3.7.4 - Formação Serra Geral**

Os litotipos predominantes são as rochas vulcânicas de caráter básico (diabásio, basalto), com grande distribuição em toda a área da Bacia do Paraná, quer seja na forma de derrames ou de corpos intrusivos (Pfeiffer, 1993). De acordo com FIPAI (2010), os basaltos se encontram na forma de derrame de espessuras variadas, enquanto que os diabásios geralmente são encontrados na forma de diques, sills e corpos de formas semelhantes à lacólitos e lopólitos. Milani (1997) afirma que os diabásios são em geral de granulação fina, e de cor variando de cinza escuro a negro, estrutura maciça, onde podem ser encontradas ripas de plagioclásio. A principal composição dos derrames vulcânicos continentais é de cerca de

90% de basaltos toleíticos e andesito basáltico, com vesículas e amígdalas no topo do derrame basáltico (Milani, 1997).

Os solos residuais do atual aterro sanitário do município de São Carlos são derivados dos diabásios da Formação Serra Geral. A Figura 22 mostra a presença de blocos de diabásio encontrados durante a visita de campo no aterro sanitário.

Segundo FIPAI (2010), as rochas básicas encontradas no aterro sanitário têm estrutura compacta, com minerais bem cristalizados, com piroxênios e plagioclásios vistos a olho nu, com textura do tipo “sal e pimenta”.



**Figura 22** - Exemplos de blocos de diabásio vistos durante a visita de campo no aterro sanitário. Os blocos se encontram mais na porção oeste da imagem.

### 3.7.5 - Formação Itaqueri

De acordo com Almeida & Barbosa (1953), a Formação Itaqueri é comumente designada em relação aos depósitos areno-conglomeráticos que recobrem as serras de Itaqueri, Santana, São Carlos e Cuzcuzzeiro, tais autores mencionam que, estratigraficamente,

estão sob a Formação Marília, com a qual seria constituída pelo Grupo Bauru. Entretanto, Cottas & Barcelos (1981); Ponçano et al. (1982); Brandt Neto (1984) se referem à unidade como cenozoica, pós-Grupo Bauru.

Segundo Riccomini (1997), os processos erosivos após os derrames basálticos foram propícios para a deposição do substrato da Formação Itaqueri, com isso promoveu um aplainamento, que removeu as irregularidades na superfície deixadas pela intensa atividade tectônica da formação precedente. A formação é desenvolvida sobre uma superfície regular, da qual foi desenvolvida nos basaltos da Formação Serra Geral e de maneira local nos arenitos eólicos da Formação Botucatu.

## 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

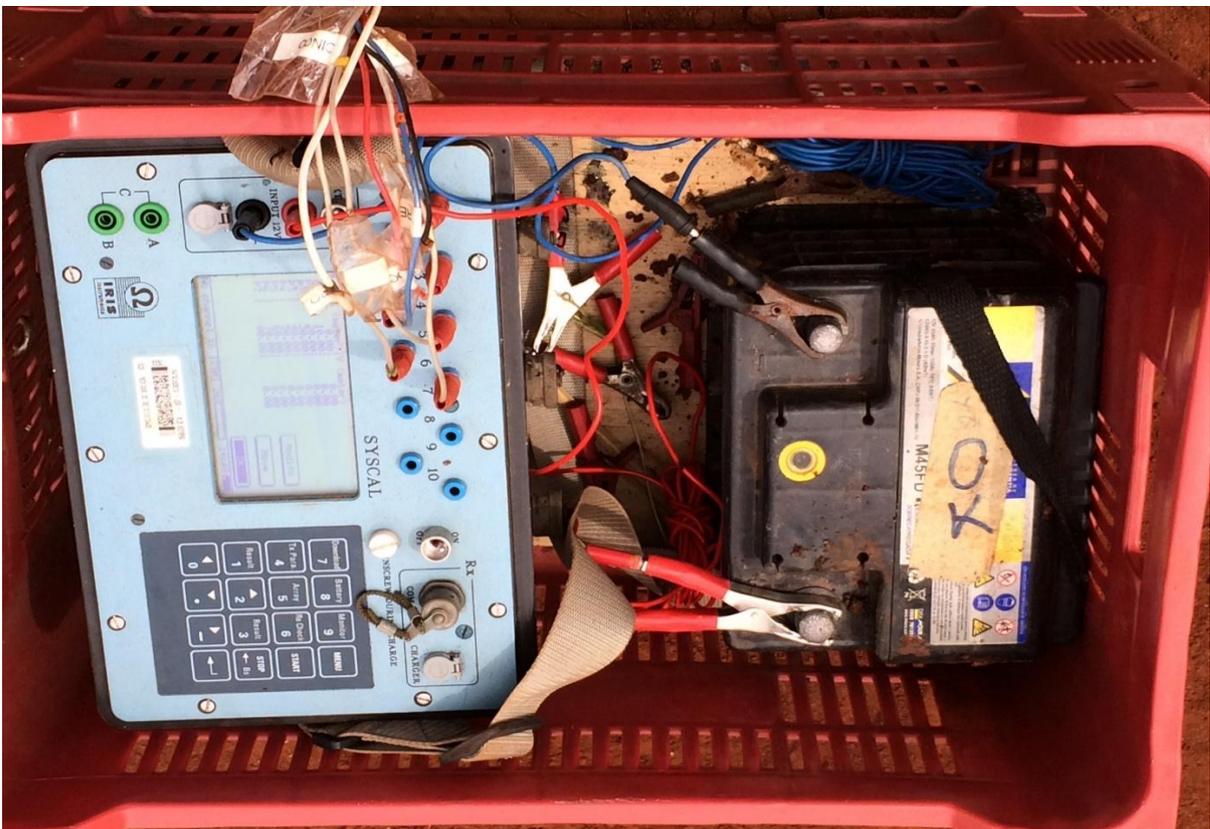
A descrição dos materiais e métodos utilizados neste trabalho está dividida em duas etapas, sendo que a primeira envolve os levantamentos de campo e os equipamentos necessários para a realização das sondagens elétricas verticais (SEV) e os caminhamentos elétricos (CE), enquanto que a segunda etapa descreve os procedimentos de tratamento dos dados em softwares específicos.

### 4.1 - Equipamentos Utilizados nos Trabalhos de Campo

Para a obtenção dos dados foram utilizados os resistivímetros de marcas *Syscal R2*, *Syscal Pro*. Estes equipamentos são desenvolvidos pela empresa francesa *IRIS Instruments*. O equipamento *Syscal R2* com conversor (Figura 23) foi utilizado para a realização das sondagens elétricas verticais, enquanto que o equipamento *Syscal Pro* (Figura 24) foi utilizado para o levantamento das seções de caminhamento elétrico. Ambos os equipamentos são patrimônios da Universidade do Estado de São Paulo (USP) sendo cedidos para o desenvolvimento desta pesquisa pelos departamentos de Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP) e pelo Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).



**Figura 23** - Equipamento Syscal R2 da IRIS Instruments - com conversor e o módulo de emissão de leitura. Utilizado para as sondagens elétricas verticais.



**Figura 24** - Equipamento Syscal R2 da IRIS Instruments utilizados para os levantamentos das linhas de caminhamento elétrico.

O equipamento *Syscal R2*, utilizado na sondagem elétrica vertical, funciona como um módulo de recepção/transmissão e, segundo os dados do fabricante utiliza um conversor de 250 W DC/DC. O equipamento apresenta uma função denominada de módulo de transmissão de corrente elétrica, abreviada pela sigla em inglês *TX* e *RX* no domínio do tempo que permite fazer leituras da resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente. Este equipamento apresenta 10 canais de leitura, que permitem fazer leituras rápidas e precisas de acordo com as diferentes posições dos eletrodos AB e MN.

O equipamento *Syscal PRO*, utilizado no caminhamento elétrico, tem como principal vantagem possuir 10 canais e em um sistema que traz as funções *Tx* e *Rx* no domínio do tempo, tornando a aquisição no campo mais rápida e mais fácil.

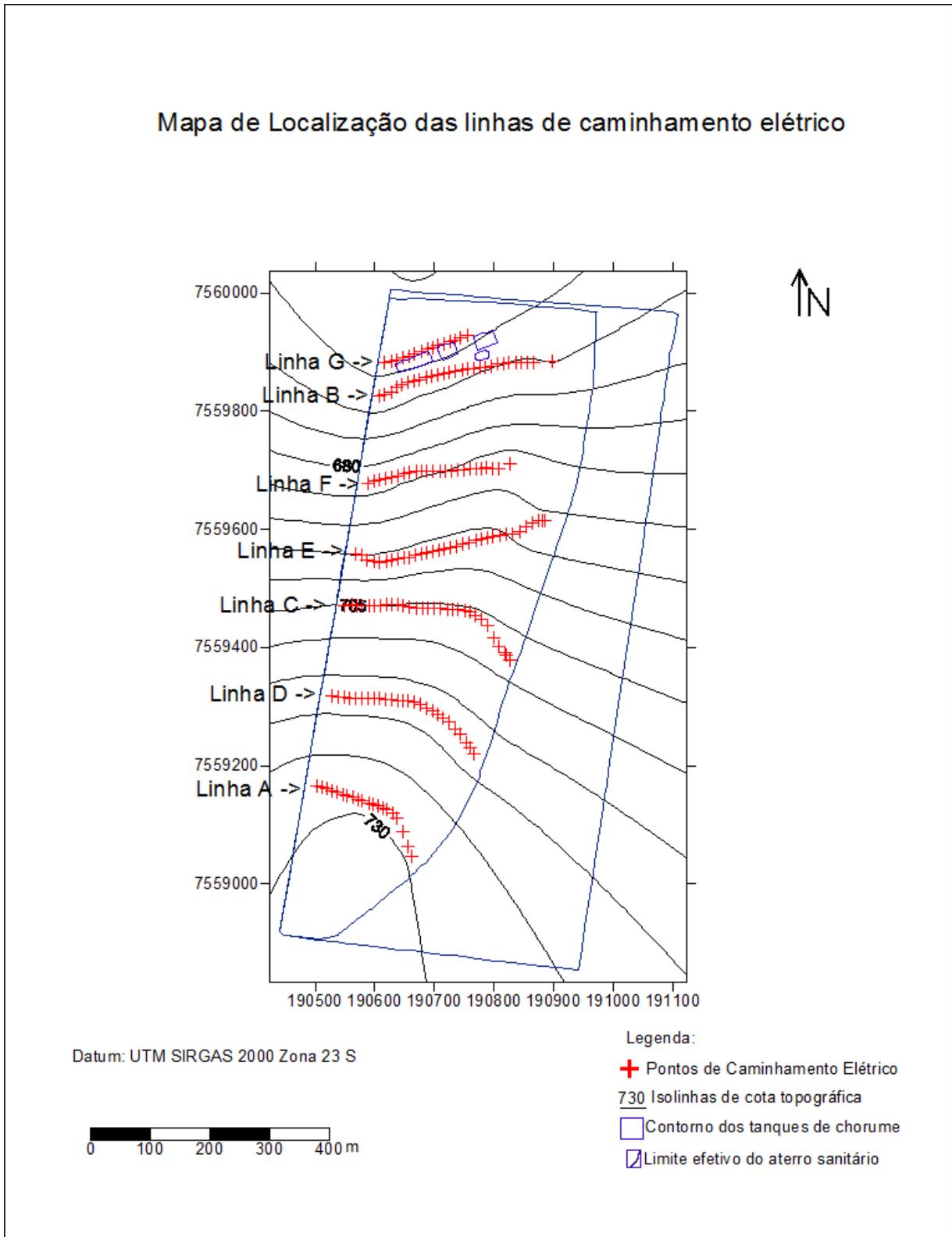
Para o caminhamento elétrico (CE), além dos equipamentos principais, uma série de equipamentos auxiliares foram utilizados durante o trabalho de campo. Tais equipamentos são bateria de 12 V, eletrodos metálicos necessários para a injeção de corrente elétrica, eletrodos não polarizáveis (porosos) necessários para a realização da medida de potencial elétrico, além de cabos que foram utilizados para a conexão dos eletrodos, marretas e martelos para a fixação dos eletrodos metálicos, cabos para injeção de corrente elétrica, cabos para a medida do potencial elétrico, além da utilização da solução saturada de sulfato de cobre diluída com água ( $\text{CuSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ ) para os eletrodos porosos, além de soluções de NaCl para os eletrodos metálicos e por fim as trenas para marcar as posições dos eletrodos (metálicos e porosos).

#### **4.2 - Levantamento de Campo - Caminhamento Elétrico (CE)**

Foram feitas 7 linhas de caminhamento elétrico distribuídas ao longo da área do aterro sanitário. Tais linhas foram posicionadas de modo a fornecer uma boa cobertura de toda a área e também de maneira a facilitar o acesso para poder realizar a montagem dos eletrodos e o posicionamento dos fios. A posição das linhas de CE de sul para norte, foram na seguinte ordem Linha A -> Linha D -> Linha C -> Linha E -> Linha F -> Linha B -> Linha G. Todas foram realizadas segundo a direção aproximada oeste-leste.

A linha A está localizada topograficamente acima das demais (cota 726 metros), enquanto que as linhas B e G, localizadas próximas ao tanque de chorume, são as linhas em cotas topográficas menores (entre 670 e 660 metros respectivamente).

A Figura 25 mostra a localização das linhas de caminhamento elétrico ao longo da área do aterro sanitário.



**Figura 25** - Localização do aterro sanitário com as posições das linhas de caminhamento elétrico.

As linhas de caminhamento elétrico sempre foram orientadas de oeste para leste, sendo oeste o começo e o leste o término de cada linha.

O arranjo utilizado para o caminhamento elétrico foi do tipo dipolo – dipolo, com o espaçamento entre os eletrodos variando de 10 em 10 metros. As linhas de caminhamento elétrico possuem extensões horizontais que variam de 160 até 320 metros. Entretanto em uma seção de caminhamento elétrico (Linha A), utilizou-se também o espaçamento dos eletrodos de 20 em 20 metros, com o objetivo de se investigar uma profundidade maior.

O posicionamento das linhas de caminhamento elétrico foi feito com o auxílio de um GPS topográfico de precisão GTR G2 da TechGeo. Os pontos topográficos referentes a cada linha de caminhamento elétrico foram coletados usando a Rover (uma mochila com a unidade de GPS móvel) com uma haste acoplada a uma antena que dista de uma altura de cerca de 2 metros em relação ao solo. As coordenadas topográficas de cada ponto foram armazenadas com o auxílio da coletora de dados de mão através do *software* EZField, utilizando o método semicinemático a uma velocidade média de 3 a 4 km/h e velocidade de coleta de cada ponto em 0,1 s.

Em todos os caminhamentos elétricos foram utilizados eletrodos porosos para recepção de corrente, de maneira a melhorar a sensibilidade e permitir também as leituras de cargabilidade. Para emissão de corrente foram utilizados eletrodos metálicos, onde acrescentou-se solução de NaCl para melhorar o contato do eletrodo com o solo.

Os dados de resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente foram medidos de forma semi-automatizada, sendo que as medidas dos parâmetros físicos em questão se estendem em até 17 metros de profundidade, de acordo com o arranjo eletródico utilizado em cada linha de caminhamento elétrico. As leituras de resistividade foram feitas em até 10 canais simultaneamente.

O outro parâmetro que foi medido ao longo das linhas de caminhamento elétrico foi a cargabilidade elétrica, onde a aquisição de dados é feita pelo método de Polarização Induzida. O padrão utilizado para a aquisição dos dados de cargabilidade foi feito no domínio do tempo, com os seguintes parâmetros de aquisição: janela de integração de 2 s, *delay time* de 0,2 s, empilhamento mínimo de 5 leituras e máximo de 15 leituras e a definição do desvio padrão menor do que 3%. A Figura 26 ilustra o procedimento utilizado durante o levantamento de

campo do caminhamento elétrico, com o posicionamento dos eletrodos porosos de 10 em 10 metros.



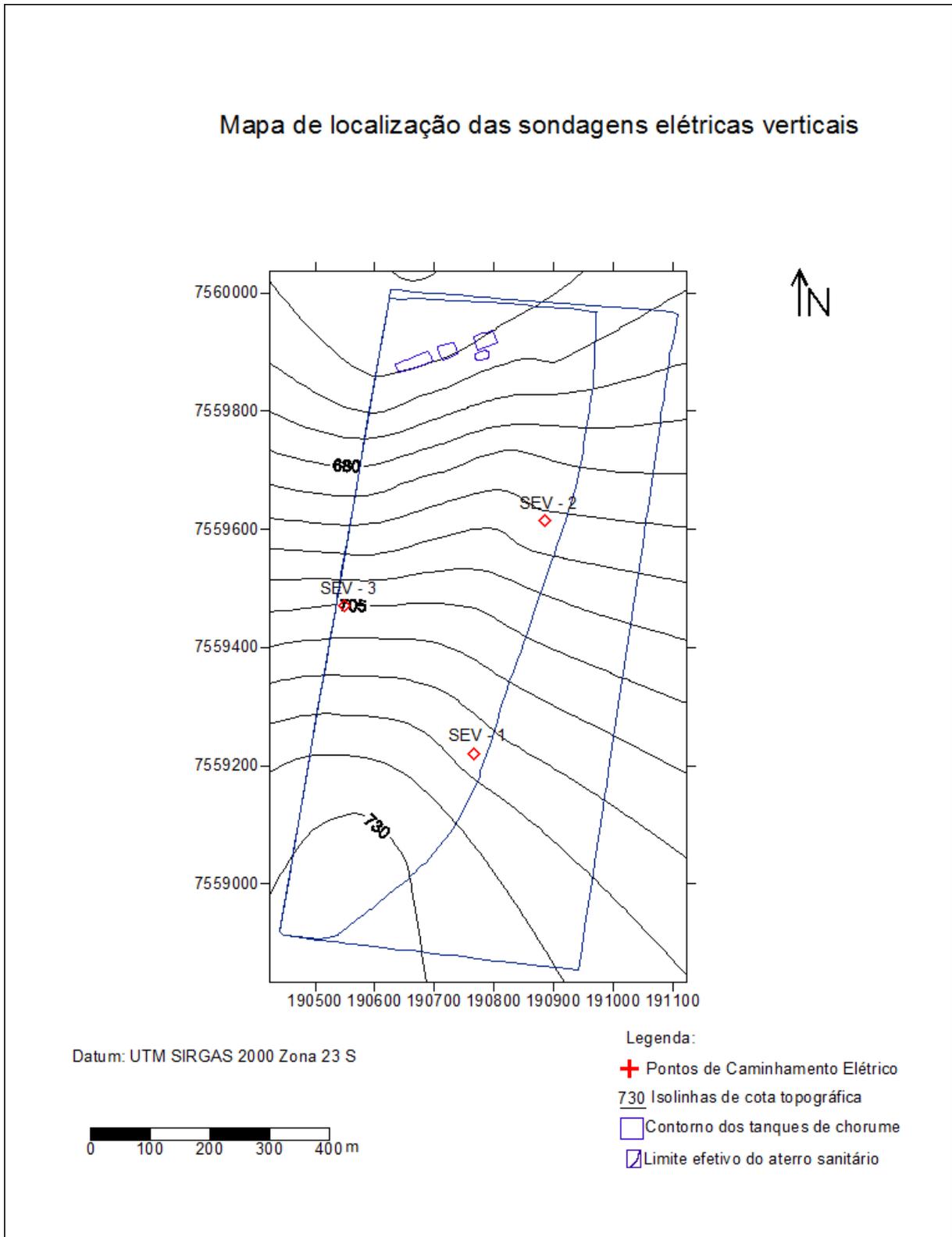
**Figura 26** - Levantamento de campo das linhas de caminhamento elétrico.

#### **4.4 - Levantamento de Campo – Sondagem Elétrica Vertical**

Foram realizadas três sondagens elétricas verticais, na área de estudo. A SEV – 1 está localizada ao final da linha de caminhamento elétrico D, a SEV – 2 no início da linha C, enquanto a SEV – 3 localiza-se ao final da seção E.

O ponto central das sondagens elétricas verticais foi localizado através do GPS Garmin Map 76S. Duas das três sondagens elétricas verticais foram feitas em uma estrada de terra onde os caminhões tem acesso para levar os resíduos na célula de deposição. As sondagens elétricas verticais tiveram o intuito de complementar as informações obtidas pelas linhas de caminhamento elétrico, fornecendo dados em maiores profundidades, de maneira a investigar a espessura do corpo do diabásio e permitir uma melhor caracterização geológica

da área. A Figura 27 mostra a localização das sondagens elétricas verticais ao longo da área do aterro.



**Figura 27** - Mapa de localização das SEVs.

O método da sondagem elétrica vertical consiste em injetar corrente elétrica através de dois eletrodos de corrente metálicos (A e B) e medir a diferença de potencial entre os outros dois eletrodos também metálicos (M e N) localizados entre os eletrodos A e B, de acordo com o arranjo Schlumberger.

A resistividade elétrica aparente foi obtida a partir da diferença de potencial ( $\Delta V$ ), a partir da corrente elétrica (I) e de um fator geométrico (k) definido por Bhattacharya e Patra (1968).

Nas 3 SEVs executadas foi utilizado uma abertura máxima AB/2 de 200 metros e o arranjo dos eletrodos potenciais na abertura MN/2. A configuração utilizada no levantamento de campo permitiu investigar o subsolo até atingir uma profundidade média de cerca de 100 metros, estabelecendo esta profundidade como limite para a identificação da espessura do corpo de diabásio.

Durante o procedimento dos ensaios de sondagem elétrica vertical, o processo denominado de “embreagem” foi utilizado. Este procedimento refere-se a realização de várias leituras para a mesma abertura dos eletrodos de emissão de corrente AB e diferentes posicionamentos dos eletrodos de recepção MN. Esse procedimento é comumente utilizado para melhorar a qualidade do sinal e a qualidade dos dados obtidos durante o levantamento de campo, por isso a curva de campo é importante para determinar se o levantamento e aquisição dos dados estão sendo feitos de forma satisfatória.

O arranjo utilizado em campo e adicionado no programa apresenta as configurações AB/2 e MN/2 conforme as posições apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2** - Arranjo Schlumberger com as configurações dos eletrodos AB/2 e MN/2 utilizados durante o levantamento de campo.

Pontos	AB/2 (metros)	MN/2 (metros)
1	1,5	0,5
2	2	0,5
3	3	0,5
4	4	0,5
5	5	0,5
6	6	0,5
7	6	1
8	8	0,5
9	8	1
10	10	0,5
11	10	1
12	12	1
13	15	1

**Tabela 2** - Arranjo Schlumberger com as configurações dos eletrodos AB/2 e MN/2 utilizados durante o levantamento de campo (continuação).

Pontos	AB/2 (metros)	MN/2 (metros)
14	15	2
15	20	1
16	20	2
17	25	2
18	30	2
19	40	2
20	40	5
21	50	2
22	50	5
23	60	5
24	60	10
25	80	5
26	80	10
27	100	5
28	100	10
29	150	5
30	150	10
31	200	5
32	200	10

A Figura 28 mostra o arranjo de campo feito para o levantamento das sondagens elétricas verticais.



**Figura 28-** Levantamento de campo da Sondagem Elétrica Vertical.

#### **4.5 - Processamentos dos dados nos *Softwares***

Para esta etapa utilizaram-se dois *softwares* para realizar o tratamento e inversão dos dados de resistividade elétrica aparente. Para o processo de inversão unidimensional usou-se o programa IX1D, com o qual se fez o processamento dos dados das sondagens elétricas verticais, enquanto que para a inversão bidimensional foi utilizado o programa RES2DINV, que permitiu tratar os dados de resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente obtidos nas seções de caminhamento elétrico.

Para o processamento dos dados topográficos das seções de caminhamento elétrico foi utilizado o programa GTR Processor 2.71.

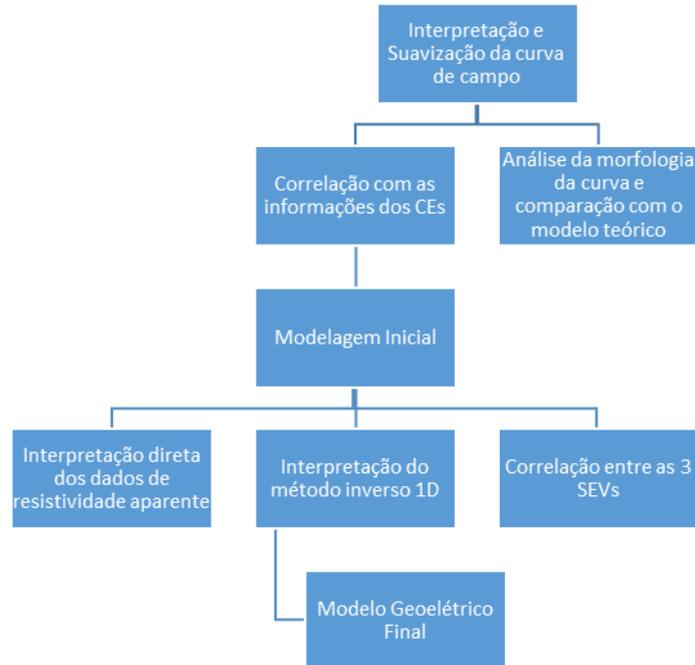
#### **4.5.1 – Processamento dos dados topográficos**

Para as sete linhas de caminhamento elétrico, foram coletadas informações de coordenadas topográficas em UTM e Z sendo o valor de altitude. Estes dados, armazenados no próprio equipamento (GPS-GTR-G2 – móvel) ou na coletora de dados foram posteriormente descarregados e tratados com o software de processamento de dados GTR Processor 2.71.

Para melhorar a precisão dos dados executou-se o pós-processamento, considerando os dados da Estação Base Homologada pertencente do Departamento de Engenharia de Transporte da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), que dista cerca de 10 km do aterro sanitário de São Carlos. Com isso, foi possível obter-se um croqui georreferenciado da base e das linhas de caminhamento elétrico, com um erro máximo de 0,5 metros nas coordenadas UTM e de 1,2 metros nas altitudes. Após o pós - processamento os pontos topográficos das linhas de caminhamento elétrico foram exportados em formato do ArcGis (.shp) e do Autocad (.dxf).

#### **4.5.2 - Processamento dos dados das SEVs no *Software IX1D***

O processamento posterior ao levantamento de campo para a sondagem elétrica vertical envolveu as etapas apresentadas na Figura 29. O processamento no programa de inversão unidimensional envolveu etapas como a interpretação e suavização da curva de campo, a correlação com os caminhamentos elétricos próximos das três sondagens elétricas verticais, além da etapa de análise da morfologia da curva e comparação com o modelo teórico. Posteriormente, as etapas envolveram a modelagem direta dos dados de resistividade elétrica aparente, a definição do número de camadas geoeletricas, a interpretação do modelo inverso e conseqüentemente a elaboração do modelo geoeletrico final.



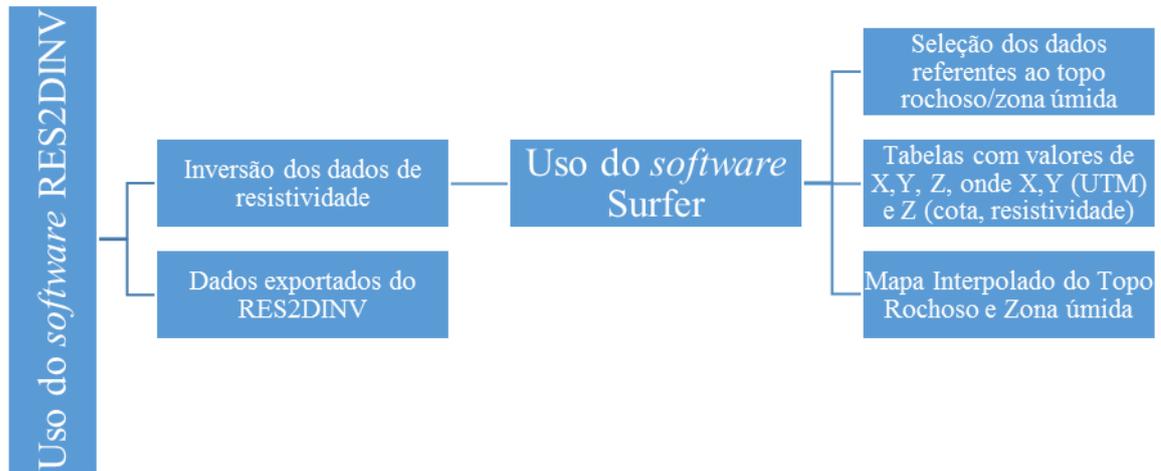
**Figura 29** - Esquematização dos procedimentos realizados para a interpretação das SEVs.

Para o tratamento dos dados de campo e a elaboração do modelo geofísico final foi utilizado o *software* da Interpex Limited, chamado IX1D, onde se estima um modelo inverso de camadas horizontalizadas com diferentes valores de resistividade aparente e/ou cargabilidade aparente. Para o ajuste curva linear no *software* as camadas para os valores de resistividade são baseadas na teoria de filtragem descrita por Davis et al. (1980) *apud* Interpex (1993).

#### 4.5.3 - Tratamento e processamento dos dados de CE do *software* RES2DINV

Para o tratamento e processamento dos dados foram utilizados dois *softwares*, o RES2DINV e o *Surfer*. O primeiro permitiu armazenar e tratar os dados brutos coletados em campo, enquanto que o segundo permitiu a obtenção dos mapas finais interpolados, com as informações de resistividade e profundidade do topo rochoso, da zona de umidade e a definição das linhas preferenciais de fluxo da água subterrânea.

A Figura 30 mostra o fluxograma que apresenta a sequência do tratamento e processamento dos dados em diversas etapas até se chegar a etapa final que consiste na obtenção dos mapas interpolados.



**Figura 30** - Esquema que mostra as etapas durante a fase de tratamento e processamento dos dados.

#### 4.5.3.1 - Tratamento dos Dados

O processamento dos dados no programa RES2DINV foi feito por meio do procedimento de inversão geofísica. Para o procedimento de inversão de todas as 7 linhas de caminamento elétrico foram utilizadas 5 iterações e definida a mesma escala de valores de resistividade para todas as seções. O número de iteração não é padrão do *software*, este faz iterações até que o erro de ajuste entre um modelo e o seguinte para de diminuir para um valor estabelecido. O valor adotado neste trabalho foi o erro *default* do programa que é de 5%. Quanto à definição da escala de cores, esta foi planejada para realçar os alvos de interesse. Foi adotada essa escala para mostrar as camadas de solo (mais condutoras) e o gradiente do topo do basalto, quando passa a ficar resistivo, conforme a Tabela 3.

**Tabela 3-** Representa a escala de valores de resistividade utilizada para a interpretação das seções de caminhamento elétrico.

<b>Escala de valores de resistividade (em ohm.m)</b>	<b>Intervalos em Cores</b>
<b>20 a 35,4</b>	<b>Azul Escuro/Roxo</b>
<b>35,4 a 62,6</b>	<b>Roxo/Azul Claro</b>
<b>62,6 a 111</b>	<b>Azul Claro</b>
<b>111 a 196</b>	<b>Verde Claro/Verde Escuro</b>
<b>196 a 346</b>	<b>Verde Escuro/Amarelo</b>
<b>346 a 613</b>	<b>Amarelo/Laranja</b>
<b>613 a 1084</b>	<b>Laranja/Vermelho</b>

O *software* automaticamente faz o processo de inversão transformando a resistividade aparente em valores de resistividade. Após a escolha do intervalo de resistividade, a seção final foi representada com os dados de resistividade ao longo da distância dos eletrodos (X), equidistantes de 10 em 10 metros e em profundidade (Y), para os valores fixos de 0 m, 1,71 m, 5,13 m, 8,72 m, 12,7 m e 17,0 m.

#### **4.5.3.2 - Exportação dos dados para o Surfer**

Uma vez feito o processamento dos dados para todas as linhas de caminhamento elétrico com o RES2DINV, o próximo passo foi exportar estes dados para serem tratados no *software* Surfer.

Os dados exportados para o Surfer são apresentados em uma tabela (extensão. xls) na forma de três colunas, sendo a primeira referente à posição de cada eletrodo ao longo da linha de caminhamento, a segunda constitui os diferentes níveis de profundidade e a terceira apresenta os valores pontuais de resistividade (em valores absolutos) em cada ponto. Tal procedimento foi feito para as 7 linhas de caminhamento elétrico (Linhas A, B, C, D, E, F e G).

O *grid* para cada linha de caminhamento elétrico foi inicialmente gerado definindo como método interpolador a krigagem simples. O tamanho dos *grids* é diferente para cada

linha de caminhamento elétrico, pois as diferentes seções apresentam distâncias horizontais maiores ou menores entre si, tendo portanto diferentes valores de espaçamento em X e Y. A Tabela 4 mostra o tamanho dos grids em função do espaçamento em X (posição dos eletrodos) e Y (posição em profundidade), associados ao número de linhas em função do espaçamento XY de cada *grid*.

**Tabela 4** - Tamanho dos grids em função de cada linha de caminhamento elétrico e dos mapas extrapolados para além da área do aterro sanitário.

<b>Tamanho dos Grids</b>		
<b>Caminhamento Elétrico</b>	Espaçamento em X e Y	Número de Linhas em X e Y
<b>Linha A</b>	X = 1,91 e Y = 1,88	X = 100 e Y = 10
<b>Linha B</b>	X = 2,72 e Y = 2,83	X = 100 e Y = 7
<b>Linha C</b>	X = 2,92 e Y = 2,83	X = 100 e Y = 7
<b>Linha D</b>	X = 2,52 e Y = 2,42	X = 100 e Y = 8
<b>Linha E</b>	X = 3,23 e Y = 3,40	X = 100 e Y = 6
<b>Linha F</b>	X = 2,32 e Y = 2,42	X = 100 e Y = 8
<b>Linha G</b>	X = 1,41 e Y = 1,41	X = 100 e Y = 13
<b>Mapas Interpolados</b>	X = 15,90 e Y = 12,13	X = 45 e Y = 100

Para a geração dos mapas interpolados foi utilizado o mesmo *grid*, pois considerou-se a mesma área em todos os mapas, com os limites de coordenadas em UTM (X mínimo 190422,66, Y mínimo 7558834,67 e X máximo 191122,66 e Y máximo 7560036,42), extrapolado para além da área do aterro sanitário. Foi feita uma comparação entre os resultados de cada seção de caminhamento elétrico interpolada no *Surfer*, utilizando a krigagem, com os resultados das respectivas seções geradas pelo RES2DINV. A principal finalidade desta análise foi identificar os pontos de topo rochoso e zona de umidade para as sete seções de resistividade.

#### **4.5.3.3 - Importação dos dados de resistividade do RES2DINV para as seções interpoladas no Surfer**

A principal preocupação entre as fases iniciais e intermediárias no tratamento dos dados foi definir a profundidade do topo rochoso e da zona de umidade para cada linha de caminhamento elétrico. Portanto, foram elaboradas sete tabelas reduzidas em relação às aquelas previamente exportadas para o *Surfer*, contendo apenas os valores de topo rochoso. Ao identificar cada ponto do topo rochoso em uma dada posição e profundidade, o contorno do topo rochoso para cada seção de caminhamento elétrico foi sendo traçado. O mesmo procedimento foi feito para a identificação do topo das zonas de umidade.

Para a elaboração das tabelas utilizadas para as interpolações (para todas as linhas de caminhamento elétrico) foram selecionados diferentes pontos com valores de resistividade caracterizados como topo rochoso e também do topo da zona de umidade.

A etapa seguinte consistiu em obter, para cada posição dos eletrodos nas linhas de CE, as coordenadas topográficas (UTM), com o auxílio do GPS de precisão da TechGeo. Assim, por exemplo, em uma linha de 335 metros, com os eletrodos posicionados de 10 em 10 metros, têm-se 33 pontos ao longo desta seção, com as coordenadas topográficas com valores em UTM e seus respectivos valores de resistividade em diferentes profundidades.

Às planilhas com dados em UTM foi adicionada uma nova coluna com os valores da cota para cada ponto considerado como topo rochoso. A cota destes pontos foi obtida a partir da subtração do valor de profundidade de topo rochoso, definida em cada ponto, do valor da cota topográfica do ponto em superfície. O mesmo procedimento foi adotado para as profundidades do topo da zona úmida em cada uma das seções.

Para a etapa final de processamento dos dados, foram criadas quatro tabelas para cada seção de caminhamento elétrico (28 no total), sendo que duas contêm os dados de resistividade, característicos do topo rochoso e da zona úmida e as outras duas os valores das respectivas cotas. Em seguida todas essas informações foram reagrupadas, respeitando a sequência topográfica das seções de CE (Linha A -> Linha D -> Linha C -> Linha E -> Linha F -> Linha B -> Linha G).

O produto final são 4 mapas interpolados, sendo um deles indicativo do topo rochoso, o outro indicativo do topo da zona de umidade (com isovalores de resistividade em ohm.m) e

os demais referentes à topografia do topo rochoso e do topo da zona úmida (com isovalores em metros).

## 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados e discutidos em quatro partes principais:

1ª Parte - apresentação dos dados prévios de ensaios de laboratório e de campo, realizados pela empresa responsável pela administração do Aterro Sanitário de São Carlos, para determinar as principais características geológicas – geotécnicas presentes na área de estudo e poder comparar com os métodos indiretos que foram feitos neste trabalho.

2ª Parte - envolve a apresentação das seções de resistividade geradas para cada linha e a comparação dos valores de resistividade com a descrição das camadas nas sondagens SPT mais próximas.

3ª Parte - apresentação das sondagens elétricas verticais (SEV) e interpretação das unidades geoeletricas. Análise conjunta das informações obtidas nas SEVs, sondagens SPT e caminhamentos elétricos.

4ª Parte - A última etapa envolveu a determinação do topo rochoso e da zona de maior umidade e sua representação na forma de mapas interpolados, com o auxílio do programa *Surfer*. Para isto houve a geração de mapas com os dados de resistividade para o topo rochoso, zona úmida e modelo digital de elevação do topo rochoso e da zona de umidade, além de mapas com a representação da topografia do topo rochoso e do topo da zona úmida.

### 5.1 - Ensaios Geotécnicos Prévios Fornecidos Pela Empresa que Administra o Aterro

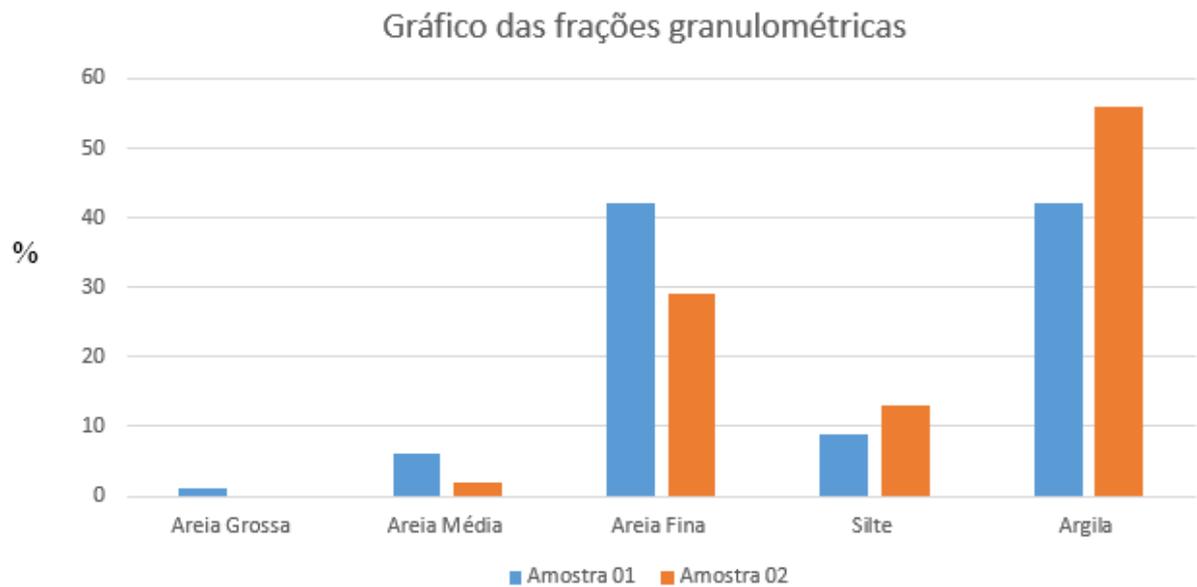
#### 5.1.1 - Ensaios de Laboratório

Os dados de granulometria foram realizados com duas amostras de solos coletadas no aterro sanitário de São Carlos. As duas amostras de solo foram descritas como argila silto-arenosa, marrom.

Os dados de granulometria foram classificados segundo a escala granulométrica da ABNT (norma NBR 7181/84). A amostra 01 apresenta predominância da fração argila (cerca de 42%) e areia fina (42%) e em menores proporções porcentagens de fração silte (cerca de 9%), areia média (cerca de 6%) e areia grossa (1%). Em relação à amostra 02 a fração argila corresponde a 56%, dentre a fração areia, as porcentagens da areia fina são de 29%, areia

média de 2% e areia grossa 0%, enquanto que a percentagem de silte é de 13%. Comparativamente, a amostra 02 tem maior percentagem das frações argila e silte (fração de finos), em contrapartida a percentagem da fração areia da amostra 01 é mais acentuada.

O gráfico da Figura 31 apresenta as variações em percentagens relativas às frações entre as amostras 01 e 02, indicando em quais frações granulométricas há maiores variações entre materiais mais finos e materiais mais grosseiros.



**Figura 31** - Distribuição das frações granulométrica das duas amostras de solo ensaiadas.

A umidade ótima obtida pelo ensaio de compactação Proctor Normal para as amostras 01 e 02 foi de 16,8% e 22,8% respectivamente. Enquanto que a massa específica aparente seca máxima para a amostra 01 foi de 1,83 g/cm<sup>3</sup> e para a amostra 02 de 1,65 g/cm<sup>3</sup>. A umidade ótima é maior na amostra 02 do que na amostra 01, compatível com a maior proporção da fração argila da amostra 02.

As medidas de condutividade hidráulica, realizadas para as amostras de solos compactados (amostra 01 e amostra 02), variaram de 1,17 x 10<sup>-7</sup> cm/s a 3,76 x 10<sup>-7</sup> cm/s, respectivamente. Os valores de condutividade hidráulica para as duas amostras compactadas estão na ordem de 10<sup>-7</sup> cm/s, no entanto a amostra com maior percentagem de materiais finos (argila + silte) apresenta um valor de condutividade hidráulica um pouco maior do que o obtido na amostra 01.

Apesar da relativa homogeneidade dos solos encontrados na área do aterro sanitário, é interessante notar que um perfil de solo argiloso pode apresentar certa heterogeneidade em suas características e uma maior proporção de areia fina pode alterar características geotécnicas como a condutividade hidráulica.

Tais heterogeneidades geotécnicas podem ser usadas para refinar o modelamento geoeletrico, pois diferenciações nestas propriedades comumente indicam alterações na resistividade elétrica em subsuperfície e algumas mudanças nos valores de resistividade elétrica em pontos específicos pode ser melhor compreendido devido à heterogeneidade dos solos.

### 5.1.2 - Ensaios de Campo

Os ensaios de campo referem-se às 18 sondagens SPT, distribuídas ao longo de toda a área do aterro sanitário. As sondagens foram alocadas de maneira a cobrir toda a área do aterro. A companhia contratada pela empresa Solveu para fazer as sondagens SPT foi a empresa Prospec.

A Tabela 5 e Figura 32 mostram a localização das 18 sondagens SPT com suas respectivas coordenadas e pontos alocados ao longo da área de estudo.

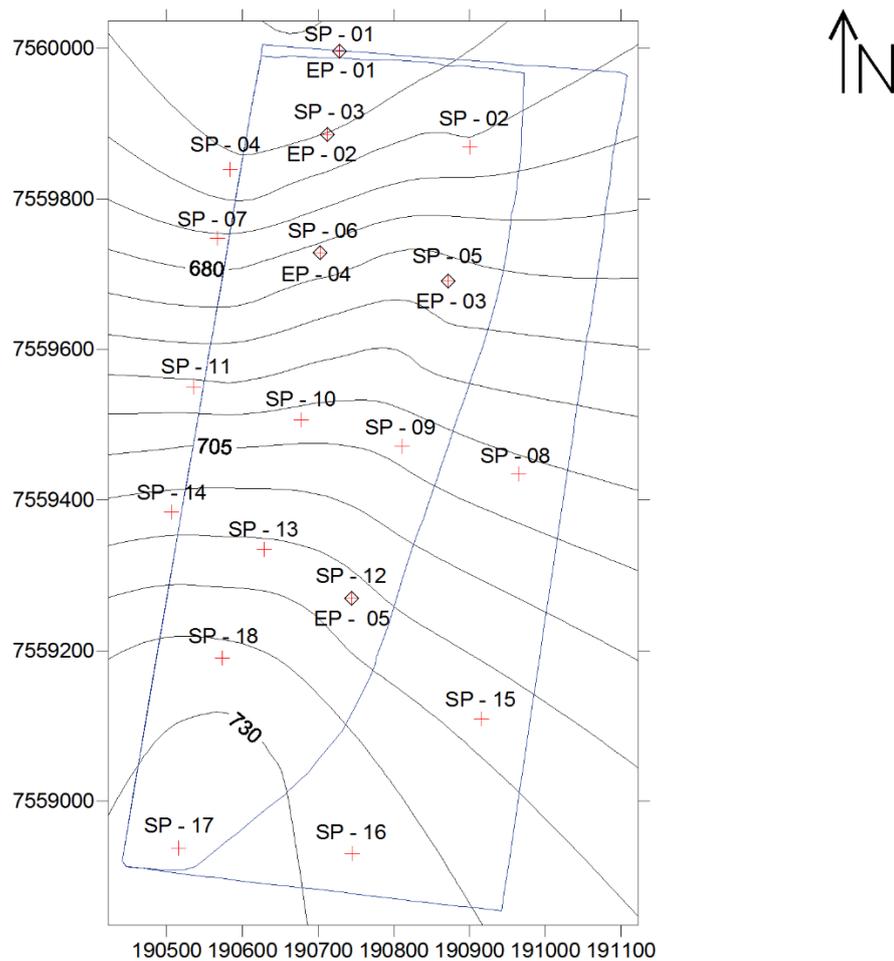
**Tabela 5** - Pontos de sondagem SPT e suas respectivas coordenadas UTM.

Sondagens	Coordenada Y (m N)	Coordenada X (m E)
SP – 01	7.559.995,977	190.728,408
SP – 02	7.559.868,406	190.900,404
SP – 03	7.559.885,78	190.711,886
SP – 04	7.559.839,479	190.584,182
SP – 05	7.559.690,988	190.871,331
SP – 06	7.559.728,603	190.702,492
SP – 07	7.559.748,018	190.567,058
SP – 08	7.559.434,304	190.964,347

**Tabela 5** - Pontos de sondagem SPT e suas respectivas coordenadas UTM (continuação).

Sondagens	Coordenada Y (m N)	Coordenada X (m E)
SP – 09	7.559.471,275	190.810,560
SP – 10	7.559.506,842	190.677,728
SP – 11	7.559.549,485	190.535,594
SP – 12	7.559.269,047	190.743,881
SP – 13	7.559.333,864	190.628,756
SP – 14	7.559.384,185	190.506,149
SP – 15	7.559.109,423	190.915,395
SP – 16	7.558.930,313	190.745,216
SP – 17	7.558.937,902	190.515,778
SP – 18	7.559.189,870	190.573,517

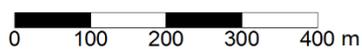
## Mapa de Localização das Sondagens e Ensaios de Permeabilidade de Campo



### Legenda:

- + Sondagem SPT (SP)
- ◇ Ensaio de Permeabilidade de Campo (EP)
- ▭ Limite Efetivo do Aterro Sanitário
- 730 Isovalores de cotas (m)

Datum: UTM SIRGAS 2000 Zona 23 S



**Figura 32** - Mapa de localização das sondagens SPT e ensaios de permeabilidade de campo.

As sondagens basicamente mostram variações de perfis de solos argilosos, cuja profundidade varia de 10 até 14 metros aproximadamente. As descrições mais comuns nos relatórios das sondagens referem-se a camadas de solo como argila siltosa pouco arenosa, marrom avermelhada e argila silto-arenosa com fragmentos de rocha variegada (marrom amarelada).

Os valores médios dos ensaios SPT mostram que, em termos de consistência/compacidade, a camada mais superficial é comumente classificada como muito mole, mole e médio, onde o número de golpes varia de 1 a 5 e entre 6 a 8 golpes, respectivamente. Para o material de alteração, que corresponde à parte do saprólito, a classificação de consistência/compacidade é classificada como média, dura e rija, com o número de golpes variando entre 6 a 10 (média), 10 a 18 (dura) e >18 (rija). A profundidade média do impenetrável nas sondagens SPT situa-se entre 13 a 14 metros o que a indica a proximidade do topo rochoso.

Em alguns locais foram realizados também ensaios de permeabilidade *in situ*. Estes ensaios são identificados respectivamente como EP – 01, EP – 02, EP – 03, EP – 04 e EP – 05. A Figura 31 mostra a localização desses pontos na área de estudo e a Tabela 6 as suas coordenadas UTM.

**Tabela 6** - Pontos de sondagem SPT e suas respectivas coordenadas UTM.

Ensaio de Permeabilidade de Campo	Coordenada Y (m N)	Coordenada X (m E)
EP – 01	7.559.995,977	190.728,408
EP – 02	7.559.885,78	190.711,886
EP – 03	7.559.690,988	190.871,331
EP – 04	7.559.728,603	190.702,492
EP – 05	7.559.269,047	190.743,881

Os ensaios de campo mostraram um coeficiente de permeabilidade médio da ordem de  $10^{-5}$  cm/s. A Tabela 7 mostra os resultados do coeficiente de permeabilidade medido nos cinco pontos ensaiados.

**Tabela 7-** Coeficiente de permeabilidade (K) medido em campo.

Ensaio de Permeabilidade Campo	Coeficiente de Permeabilidade (K) em cm/s
EP – 01	$1,54 \times 10^{-5}$
EP – 02	$2,18 \times 10^{-5}$
EP – 03	$3,33 \times 10^{-5}$
EP – 04	$1,92 \times 10^{-5}$
EP – 05	$2,18 \times 10^{-5}$

## 5.2 - Resultados obtidos com os trabalhos Geofísica realizados na área do aterro

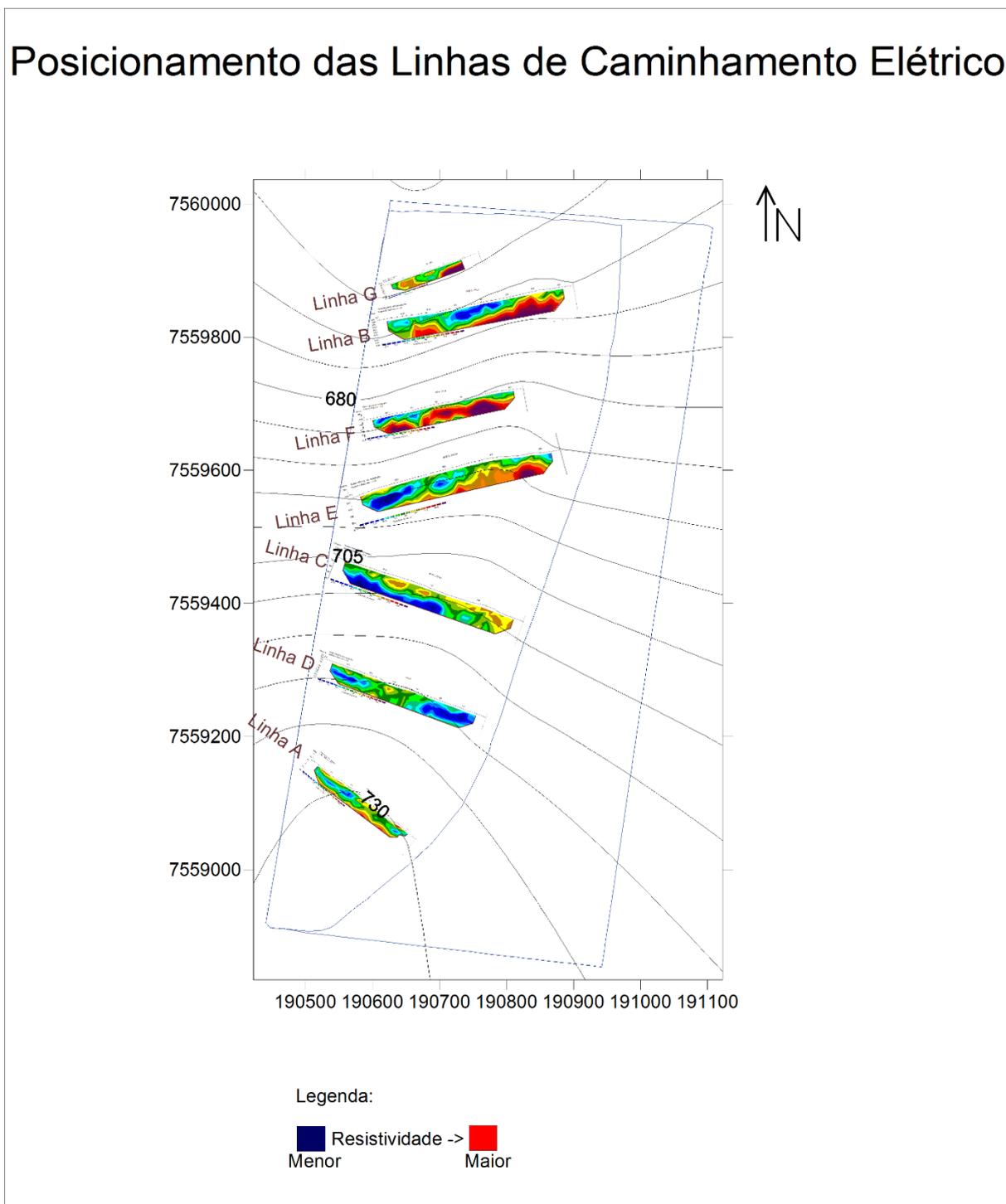
### 5.2.1 - Caminhamento Elétrico (CE)

Os dados coletados de CE em campo foram processados e filtrados com o uso do *software* RES2DINV, o qual forneceu as seções de resistividades modeladas. São 7 linhas de CE, todas de direção W – E, marcando o início e o fim de cada seção respectivamente, sendo dispostas na seguinte ordem de sul para norte, Linha A -> Linha D -> Linha C -> Linha E -> Linha F -> Linha B -> Linha G, conforme a Figura 24 apresentada no capítulo de materiais e métodos.

Como sedimentos argilosos apresentam uma mistura complexa de teor de água, variação nas proporções no teor de argila e areia, as resistividades podem variar muito para diferentes regiões. Em função disso, foi necessário estabelecer um modelo teórico, com os valores de resistividade elétrica na área, de maneira a identificar, com relativa precisão, as zonas mais condutivas (de menor resistividade) e o gradiente do topo rochoso.

Procurou-se também padronizar um sistema de cores para representar todas as seções de CE, para assim permitir a comparação visual dos resultados entre elas. As cores em tons de roxo e azul indicam as zonas de menor resistividade, enquanto que as cores amarelo, marrom e vermelho representam as zonas de resistividades mais altas, acima de 196 ohm.m, podendo superar valores de 1084 ohm.m.

A Figura 33 mostra todas as seções de resistividade realizadas, devidamente posicionadas em suas respectivas posições e em escala ao longo da área do aterro sanitário. Na sequência será apresentada uma descrição detalhada, com a análise e interpretação dos resultados de cada uma dessas seções.

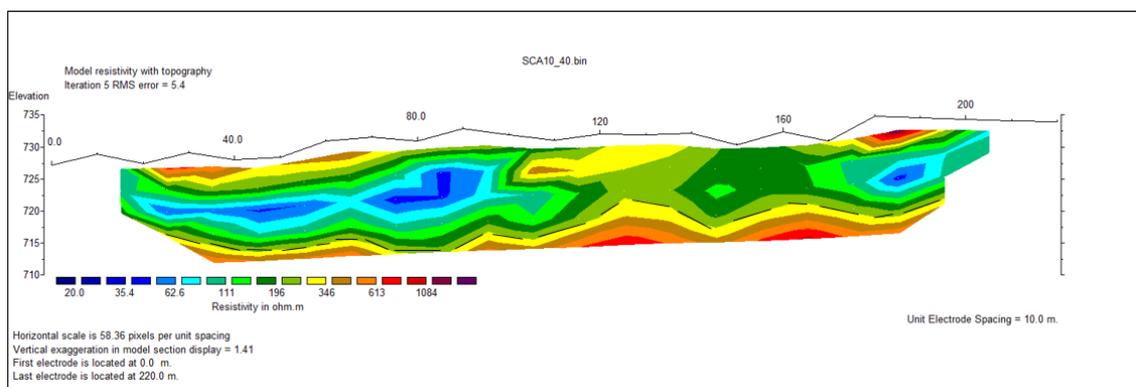


**Figura 33** - Posicionamento das linhas de caminhamento elétrico ao longo da área do aterro sanitário.

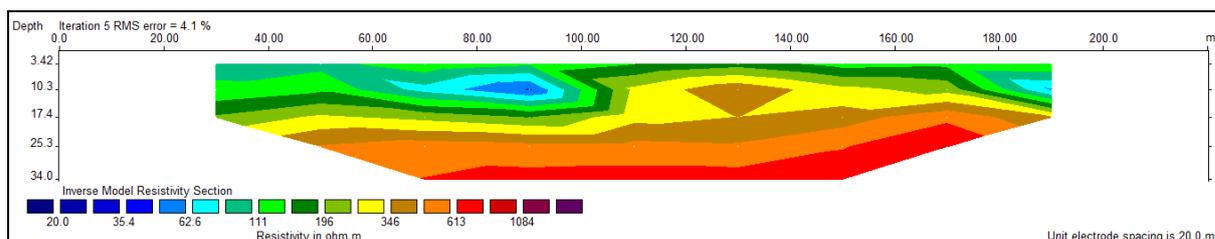
### 5.2.1.1 – Descrição das seções de caminhamento elétrico

#### Linha A

Para a Linha A, localizada na porção sul do aterro sanitário, foram feitas duas linhas de caminhamento elétrico, uma com espaçamento de eletrodos 20 em 20 metros sem informações de topografia (Figura 35) e outra seção com espaçamento entre os eletrodos de 10 em 10 metros (Figura 34). Para a seção de 10 metros de equidistância, se observam valores de resistividade da ordem de 196 a 346 ohm.m, para as elevações de 727,5 a 725 metros, valores correspondentes a de um solo seco. Os valores de baixa resistividade ( $< 70$  ohm.m) ocorrem entre as elevações de 725 a 717,5 metros, formando duas zonas, uma mais ampla que ocupa as posições de 15 a 115 metros (de W para o centro da seção) e uma outra zona menor, localizada entre as posições de 165 a 205 metros. Tais áreas foram interpretadas como zonas de maior umidade no solo, que nesta seção ocupam profundidades intermediárias, de aproximadamente 5,1 a 8,7 metros. Enquanto que a terceira faixa de valores de resistividade ( $> 300$  ohm.m), notadamente marcada pela faixa em amarelo, ocorre entre as elevações de 717,5 a 710 metros de maneira contínua. A linha tracejada indica o limite que foi interpretado como topo rochoso.



**Figura 34** - Seção de Caminhamento Elétrico A com espaçamento em X de 10 metros e elevações em Y que variam 727 a 710 metros. Linha em tracejado indica o topo rochoso.



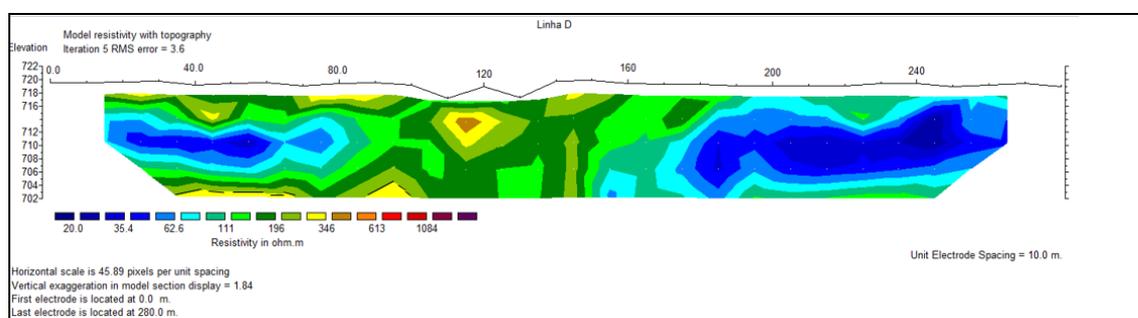
**Figura 35** - Seção de Caminhamento Elétrico A com espaçamento em X de 20 metros.

Com espaçamento dos eletrodos em 20 metros, o método geofísico atinge profundidades de até 34 metros e confirma a tendência vista na seção com espaçamento de 10 metros, cujo topo do diabásio se encontra entre 10,3 a 17,4 metros de profundidade e para valores acima de 17,4 metros, os intervalos de resistividade elétrica são típicos da rocha sã de diabásio (entre 613 a 1084 ohm.m).

## Linha D

A Linha subsequente, Linha D (Figura 36), está localizada a norte da Linha A. O que se observa nesta seção é que entre as elevações de 718 a 716 metros, na distância horizontal em X de 15 até 185 metros, os valores de resistividade variam entre 196 a 346 ohm.m, correspondendo à valores de um solo superficial seco, enquanto que para estas mesmas elevações para as distâncias de 190 até 265 metros, os valores de resistividade ficam entre 20 a 70 ohm.m correspondendo à uma zona de baixa resistividade (zona úmida).

A partir da elevação de 711 metros torna-se mais nítida uma região de resistividade mais baixa, configurando a zona de umidade, localizada entre 160 metros de distância horizontal até 265 metros. Uma outra zona de umidade de menor extensão e amplitude (resistividade < 70 ohm.m) aparece entre as elevações de 716 até 706 metros, abrangendo as distâncias horizontais de 15 até 90 metros. Para as distâncias horizontais de 90 até 150 metros, abrangendo as elevações de 718 até 702 metros, o topo rochoso praticamente não aparece, somente aparecendo na profundidade de 17 metros (elevação 702 metros). O topo rochoso é marcado com uma linha tracejada na Figura 36.



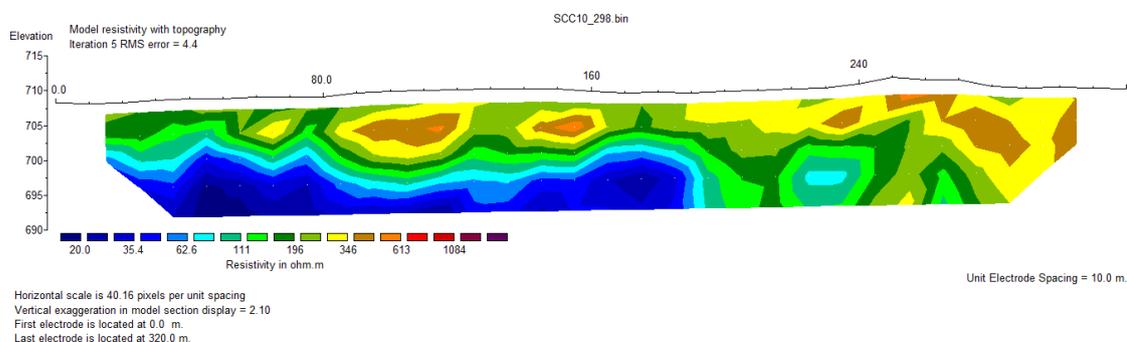
**Figura 36** - Seção de Caminhamento Elétrico D com espaçamento em X de 10 metros e elevações em Y que variam 719 a 702 metros. Linha em tracejado indica o topo rochoso.

## Linha C

A Linha C (Figura 37) é a linha subsequente à Linha D, cuja localização é próxima da região central da área do aterro sanitário. As resistividades com valores que variam entre 196 a 346 ohm.m ocorrem ao longo de todo o perfil, se estendendo nas distâncias horizontais de 15 a 305 metros, sendo interrompido por uma extensa e ampla zona de baixa resistividade (< 70 ohm.m) desde a partir da elevação de 702,5 metros até 690 metros, nas distâncias horizontais de 15 a 190 metros, que indica uma região de maior umidade no solo.

Os intervalos de resistividade entre 196 a 346 ohm.m correspondem a valores típicos de solos residuais argilosos secos. Nesta Linha de caminhamento elétrico não foi encontrado o topo rochoso.

Outra interpretação para as manchas concentradas em marrom e amarelo (altas resistividades) nas distâncias horizontais entre 80 a 130 metros e entre 140 a 160 metros, seria de que poderiam indicar a presença de blocos de rocha (matações) no meio do solo. No entanto as sondagens SPT realizadas próximo a esta área não indicaram a presença de rocha a pequena profundidade.



**Figura 37** - Seção de Caminhamento Elétrico C com espaçamento em X de 10 metros e elevações em Y que variam 707 a 690 metros.

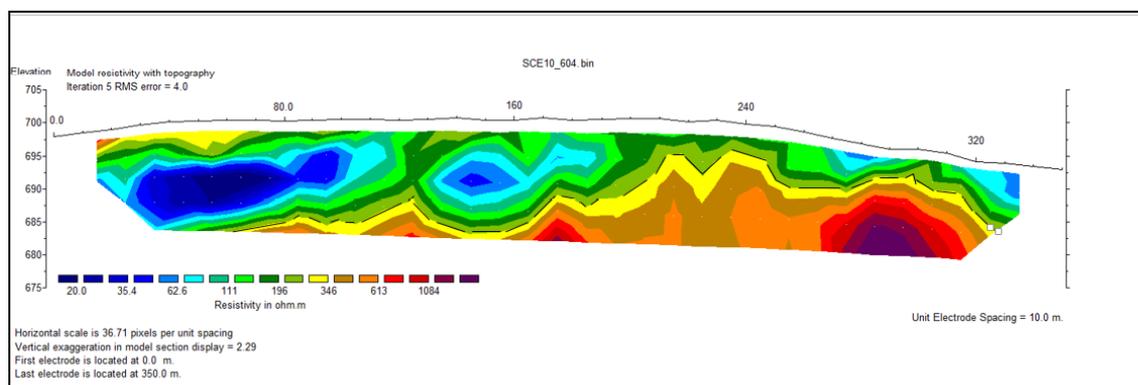
## Linha E

A Linha E (Figura 38) é subsequente à Linha C e localiza-se na área central do aterro sanitário. A parte mais superficial (de resistividade que abrange valores de 196 a 346 ohm.m) ocorre entre as elevações de 697 a 696 metros, abrangendo as distâncias horizontais de 15 até 105 metros e depois entre as distâncias horizontais de 120 a 170 metros, enquanto que entre as

distâncias horizontais de 190 até 260 metros, esta faixa de valores de resistividade fica em contato com o contorno do topo rochoso. Essa faixa de valores de solo mais superficial corresponde a um solo residual argiloso seco.

Na seção ocorrem três zonas de baixa resistividade (resistividade  $< 70$  ohm.m), uma na distância horizontal de 15 a 160 metros, abrangendo as elevações entre 697 a 685 metros, uma outra zona na distância horizontal de 130 a 190 metros, abrangendo as elevações de 697 a 685 metros, a terceira zona ocorre na distância horizontal de 265 a 335 metros entre 697 a 695 metros de elevação.

A faixa amarela, evidenciada pela linha tracejada (valores de resistividade  $> 346$  ohm.m), aparece em maiores profundidades na porção oeste da seção (nas distâncias horizontais de 60 a 160 metros), abrangendo as elevações entre 687,5 a 682,5 metros, enquanto que a partir de 170 metros de distância horizontal o contorno do topo rochoso se encontra cada vez mais próximo da superfície (em direção à porção leste da linha). A partir de 240 metros de distância horizontal o contorno do topo rochoso abrange as elevações de 695 metros voltando a ocupar profundidades de 2,5 a 5 metros e a partir da distância horizontal de 310 metros, o topo rochoso atinge 7,5 metros de profundidade (elevações entre 695 a 690 metros) na distância horizontal de 260 até 335 metros.



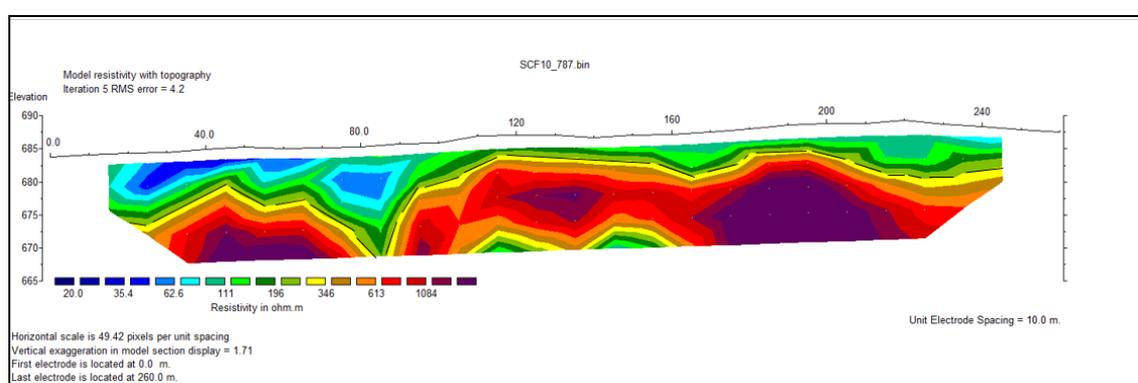
**Figura 38** - Seção de Caminhamento Elétrico E com espaçamento em X de 10 metros e elevações em Y que variam 697,5 a 682,5 metros. O topo rochoso está indicado pela linha tracejada.

## Linha F

A Linha F (Figura 39) é a linha subsequente a Linha E, localizada na porção centro-norte. Há uma camada de pequena espessura com valores de resistividade inferiores a 70

ohm.m entre as distâncias horizontais de 15 a 100 metros e que abrange desde a elevação 682,5 metros até 675 metros (na distância horizontal de 80 metros).

O topo rochoso, marcado pelo contorno amarelo (resistividade > 346 ohm.m) e pela linha tracejada, ocupa profundidades variadas ao longo da seção, sendo que as maiores profundidades ocorrem na porção oeste, indo até o centro (distâncias horizontais de 15 até 95 metros) e abrange as elevações de 677,5 a 675 metros. Do centro da seção até a porção leste, na distância horizontal de 120 a 245 metros, ocorre em profundidades próximas da superfície (elevações entre 680 e 677,5 metros).



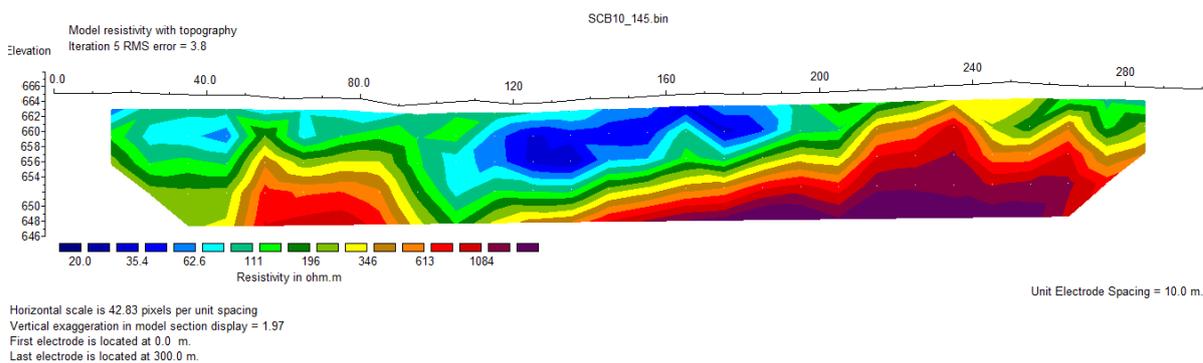
**Figura 39** - Seção de Caminhamento Elétrico F com espaçamento em X de 10 metros e elevações em Y que variam 682,5 a 665 metros. O topo rochoso está indicado pela linha tracejada.

## Linha B

A Linha B (Figura 40) é a linha subsequente à Linha F, localizada nas porções norte-noroeste da área do aterro sanitário. As resistividades (entre 196 a 346 ohm.m) interpretadas como solo residual argiloso seco se distribuem conforme a variação em profundidade do contorno do topo rochoso (profundidades mais acentuadas na porção oeste da seção) e profundidades mais próximas da superfície nas porções leste da seção B. Para a distância horizontal de 15 até 50 metros, essa faixa de valores de resistividade se encontra entre as elevações de 648 a 652 metros, enquanto que para a distância horizontal de 50 a 90 metros abrange as elevações entre 660 a 658 metros, para a distância horizontal de 100 a 170 metros, estes valores abrangem as elevações entre 656 a 646 metros, ficando mais próximo da superfície a medida que se direciona para a porção leste da seção.

Entre as distâncias horizontais de 180 a 230 metros a resistividade correspondente ao solo seco ocupa as elevações entre 664 a 658 metros, enquanto que para a distância horizontal de 260 a 285 metros as elevações abrangidas ficam entre 664 a 663 metros.

Na seção há uma extensa e ampla zona de baixa resistividade (<70 ohm.m) que se localiza na distância horizontal entre 100 a 185 metros, abrangendo as elevações desde 663 até 650 metros. O topo rochoso, marcado pela linha amarela (resistividade > 346 ohm.m) e pelo tracejado, assim como observado nas Linhas E, F, por exemplo, se encontra em maiores profundidades na porção oeste, para a distância horizontal de 15 a 40 metros, a profundidade do topo rochoso se encontra próximo de 17 metros, correspondendo à elevação de 646 metros. No entanto, para a distância horizontal entre 50 a 90 metros, atinge a cota de 658 metros, o que sugere uma elevação local do topo rochoso. Para a distância horizontal de 90 a 120 metros, o topo rochoso volta a ficar mais profundo, na cota de 646 metros, enquanto que na porção leste a sua profundidade se reduz bastante, encontrando-se mais próximo da superfície para a distância horizontal de 200 a 280 metros (cotas entre 662 a 664 metros).



**Figura 40** - Seção de Caminhamento Elétrico B com espaçamento em X de 10 metros e elevações em Y que variam 666 a 646 metros.

## Linha G

A Linha G (Figura 41) é subsequente à Linha B e é a linha de caminhamento elétrico localizada na porção mais norte-noroeste na área do aterro sanitário, próximo aos três tanques de chorume.

Existem duas possibilidades a serem consideradas para a interpretação da seção G. Uma das hipóteses é a presença de blocos de rocha ou mesmo o topo rochoso em profundidades muito próximas da superfície (cerca de 2 a 3 metros de profundidade). Há

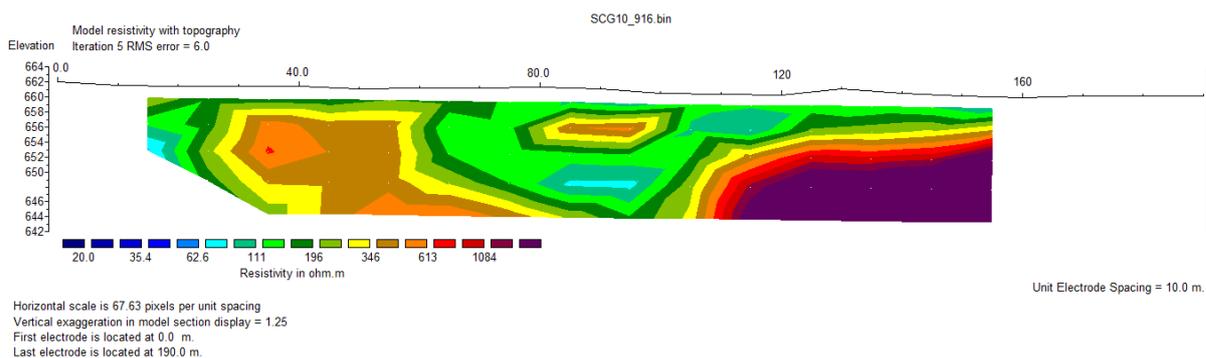
evidências observadas em levantamento de campo, realizado em dezembro de 2013, onde observou-se, na abertura da primeira cava para colocação do lixo, a presença de rocha a pequena profundidade. No entanto, nas sondagens SPT, localizadas próximas à linha G o topo rochoso está bem mais profundo.

No centro da seção entre a distância horizontal de 60 a 100/110 metros há um corpo circular concêntrico indicando valores de resistividade entre 196 a 346 ohm.m, que pode ser interpretado como possível indício de um bloco de matacão isolado entre as distâncias horizontais de 80 a 100 metros, enquanto que o contorno do topo rochoso ficaria entre as elevações de 646 a 642 metros, aproximadamente entre 14 a 17 metros de profundidade.

Assim sendo, existe outra hipótese que seria a da influência da manta plástica que reveste os taques de chorume ter elevado os valores de resistividade lateralmente e em profundidade o que poderia explicar também a interpretação da seção G.

A base para considerar esta hipótese está na comparação com a seção de cargabilidade na mesma linha de caminhamento elétrico e com as sondagens SPT mais próximas da linha de caminhamento elétrico que indicaria o saprólito até 13,53 metros (caso da sondagem SP – 01) mais a norte da Linha G e 18,73 metros para a sondagem SP – 03. Na seção G quase não há o aparecimento de zonas de baixa resistividade, ocupando apenas uma pequena parte na porção oeste da seção (entre as elevações de 654 a 652 metros) com aproximadamente 2 metros de profundidade para essa zona de umidade.

O contorno do topo rochoso (resistividade > 346 ohm.m) aparece entre a distância horizontal de 100 a 155 metros, cuja as profundidades se encontram muito próximas da superfície (cerca de 4 metros) e abrange as elevações de 656 (entre as posições horizontais de 145 a 155 metros) a 654 metros (entre as posições 110 a 120 metros), enquanto que para a posição horizontal de 100 metros, o topo rochoso se encontra em uma profundidade ligeiramente maior (6 a 8 metros), abrangendo as elevações entre 654 a 652 metros.

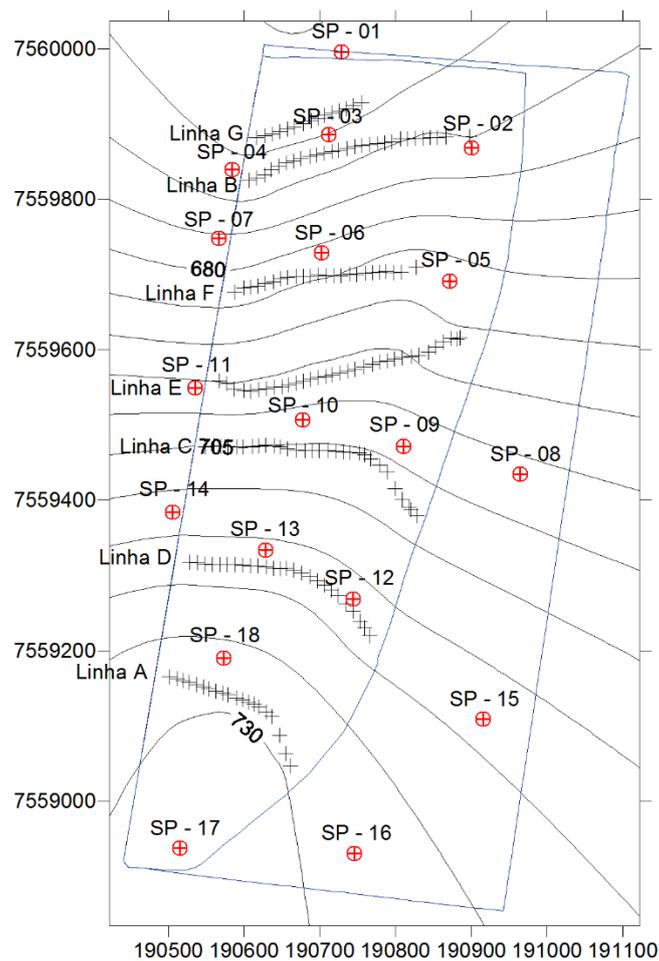


**Figura 41** - Seção de Caminhamento Elétrico G com espaçamento em X de 10 metros e elevações em Y que variam 664 a 642 metros.

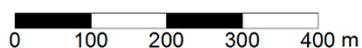
## 5.2.2 - Comparação das linhas de caminhamento elétrico com os dados de sondagem SPT

Para a comparação das linhas de caminhamento elétrico com os dados de sondagem SPT foi necessário, inicialmente, identificar quais sondagens estão mais próximas das respectivas linhas de caminhamento elétrico. De sul para norte, desde a proximidade da área administrativa do aterro sanitário até as localizações próximas ao tanque de chorume (mais na porção norte/noroeste) do aterro, as seqüências das linhas de caminhamento elétrico são identificadas na seguinte ordem: Linha A -> Linha D -> Linha C -> Linha E -> Linha F -> Linha B -> Linha G, conforme Figura 42. Nesta mesma figura também é possível observar a localização de todas as sondagens SPT realizadas na área.

## Mapa de localização das sondagens SPT e linhas de CE



Escala:



Datum: UTM SIRGAS 2000 Zona 23 S

Legenda:

- + Pontos das linhas de caminhamento elétrico
- ⊕ Pontos de Sondagem (SPT)
- 730 Isovalores de cota (equidistância de 5 m)
- ▭ Limite efetivo do aterro sanitário

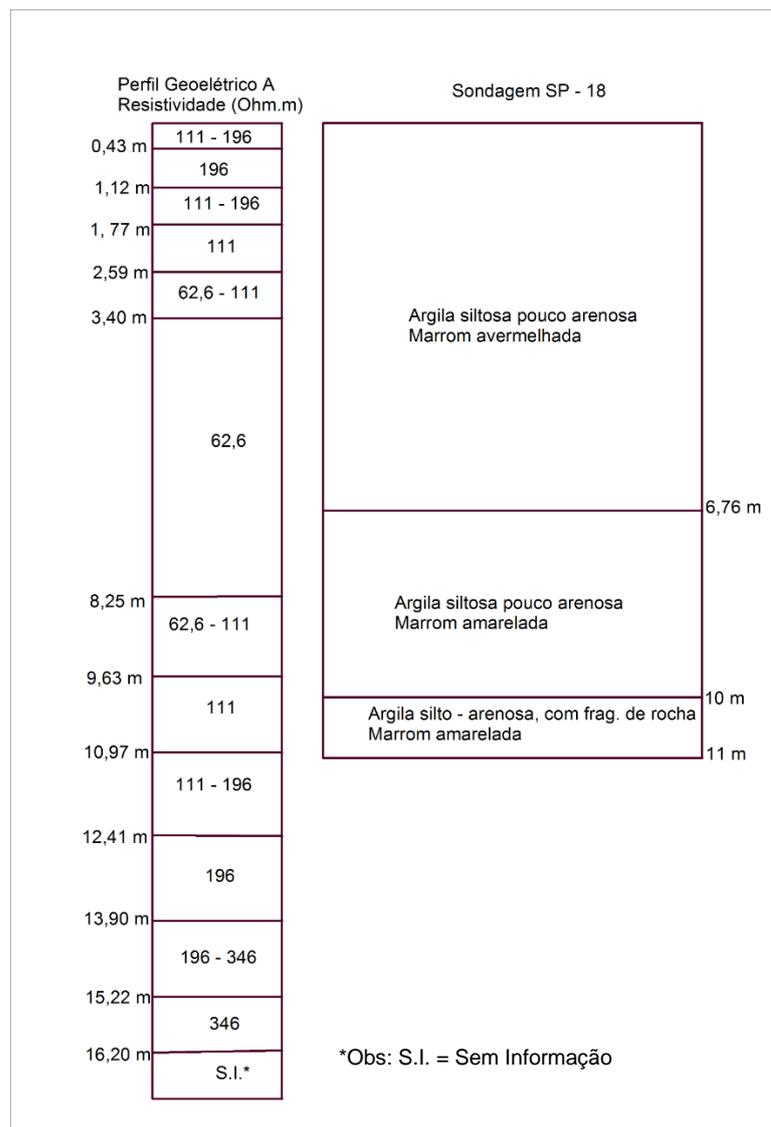
**Figura 42** - Mapa de localização das sondagens SPT e linhas de caminhamento elétrico.

A sondagem SPT mais próxima da linha de caminhamento elétrico A é a sondagem SP - 18. Para a Linha D as sondagens mais próximas da seção são a sondagem SP - 13 e a

sondagem SP – 12. Para a Linha C, as sondagens mais próximas são a sondagem SP -10 e a SP – 09. Para a Linha E as sondagens mais próximas são a SP – 11 próxima ao início da seção E (a oeste) e a sondagem SP – 10 localizada no centro da linha. Para a Linha F, a sondagem SP – 06 localiza-se no centro da seção F e para as Linhas B e G, a sondagem mais próxima é a sondagem SP – 03.

#### **5.2.2.1 - Sondagem SP – 18 e Linha de Caminhamento Elétrico A**

A sondagem SP – 18 se encontra a aproximadamente 90 metros do início da seção (de oeste para leste). Na comparação do perfil geoeletrico com a sondagem SP – 18 (Figura 43), consegue-se obter com relativa precisão a profundidade de transição do saprólito/topo rochoso. O perfil geoeletrico indica que em 13,9 metros já há início do topo rochoso e a sondagem SP – 18, o impenetrável marca profundidades de 11 metros, já na transição entre o saprólito e topo rochoso do diabásio.

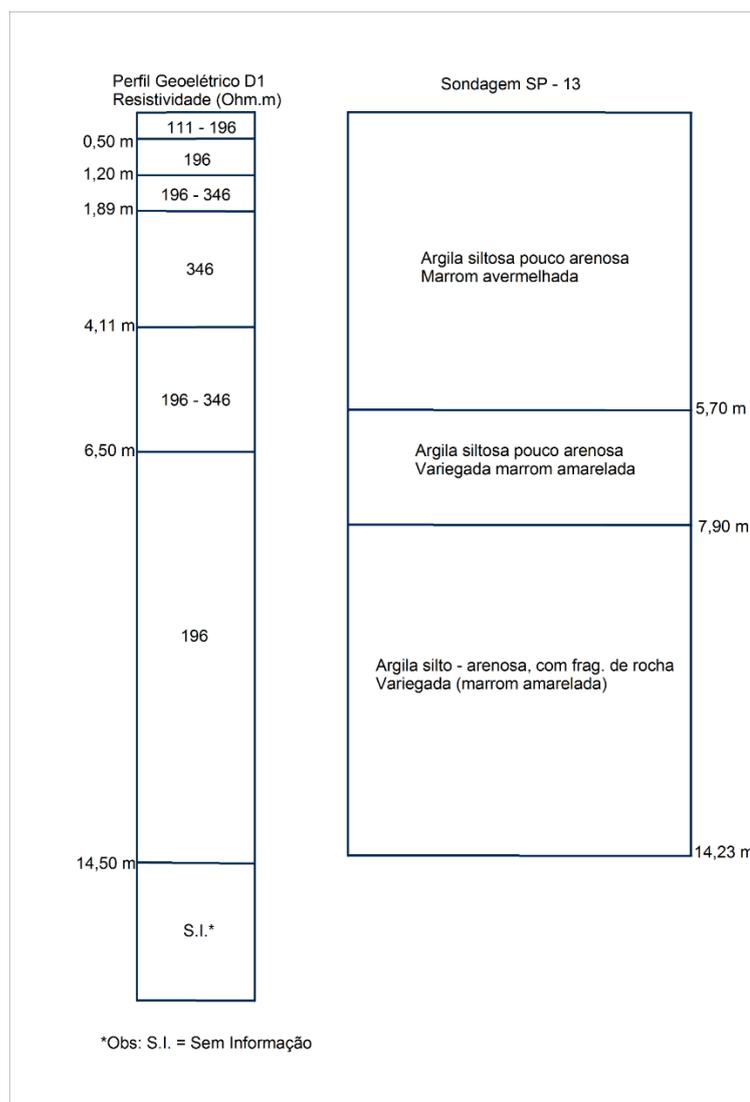


**Figura 43** - Comparação entre o perfil Geométrico da seção A e a sondagem SP – 18.

Vale ressaltar ainda que no perfil geométrico para a seção A, a zona de umidade aparece com cerca de 3,4 metros de profundidade e se estende até aproximadamente 9,6 metros de profundidade, formando uma zona úmida de 6,2 metros de extensão em profundidade, enquanto que na sondagem SPT não foi identificada a presença do lençol freático para estas profundidades. No entanto, deve-se ressaltar que as sondagens foram realizadas no ano de 2010 e as condições hidrológicas podiam ser diferentes.

### 5.2.2.2 - Sondagens SP – 13 e SP – 12 e a Linha de Caminhamento Elétrico D

A linha de caminhamento elétrico D foi dividida em dois perfis geoeletricos D1 e D2 devido à proximidade com as sondagens. A Figura 44 mostra a comparação do perfil geoeletrico D1 próximo da distância horizontal de 110 metros (de oeste para leste) com a sondagem SP – 13.

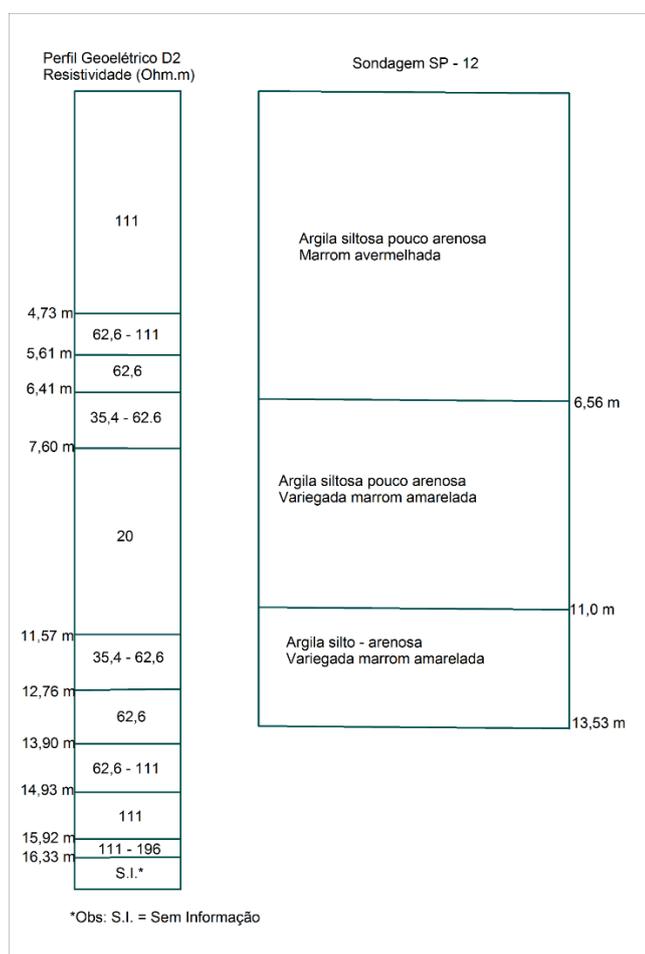


**Figura 44** - Comparação entre o perfil Geoeletrico da seção D com a sondagem SP – 13.

O perfil geoeletrico D1 se localiza próximo à distância horizontal de 110 metros na linha de caminhamento elétrico D. Nesta porção da seção geoeletrica D as resistividades variam, em profundidade, em faixas de valores típicos de solo seco. Neste ponto não foi encontrado valores de resistividade associados ao topo rochoso e a sondagem SP – 13 indica que o topo rochoso não é encontrado até profundidades superiores a 14 metros, sendo que o

impenetrável é atingido aos 14,23 metros de profundidade. Apesar de não ter encontrado o topo rochoso neste ponto a geofísica e a sondagem indicam maior espessura de camadas de solos.

O perfil geoeletrico D2 (Figura 45) foi feito com informações extraídas da seção D na região mais próxima da sondagem SP-12, aproximadamente 220 a 230 metros do início da seção.



**Figura 45** - Comparação entre o perfil Geoeletrico da seção D com a sondagem SP – 12.

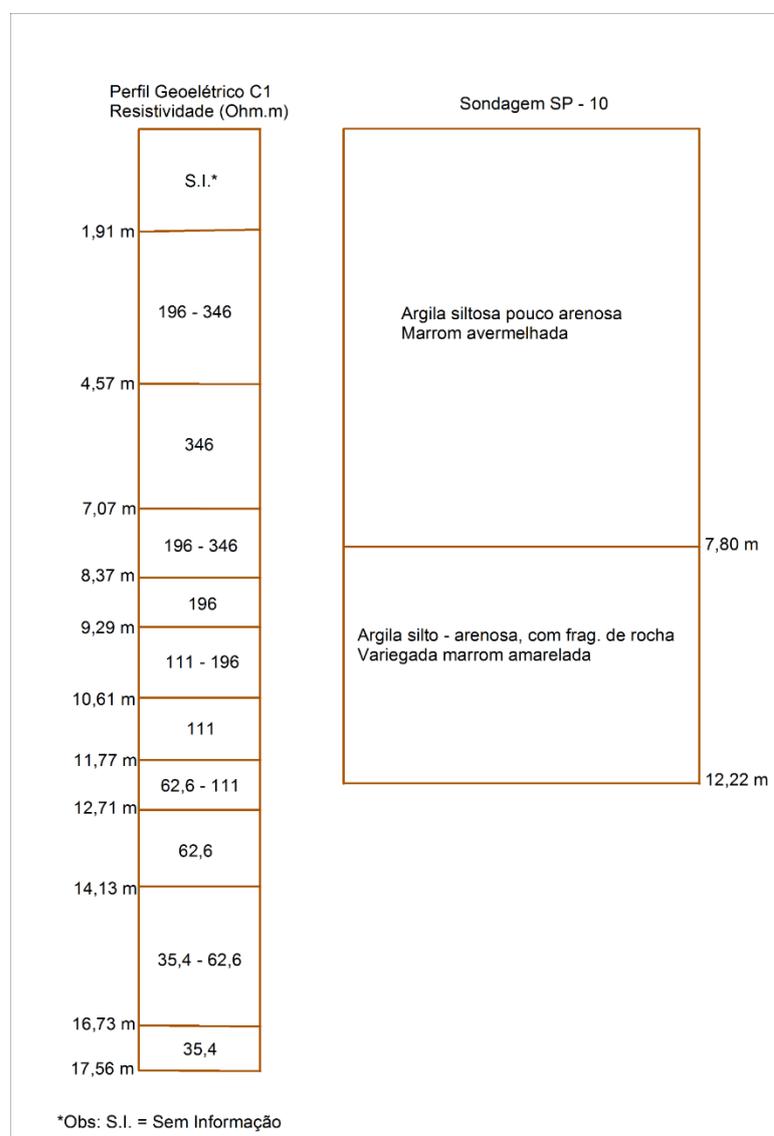
A sondagem SP – 12 atinge o impenetrável na profundidade de 13,53 metros, enquanto que na seção geoeletrica não há evidências de topo rochoso neste ponto até aproximadamente 17 metros de profundidade.

No entanto, para esta seção geoeletrica a partir dos 4,73 metros de profundidade aparece uma ampla zona de baixa resistividade, interpretada com zona de umidade, que se

estende até mais de 16 metros de profundidade, o que pode ter dificultado a identificação da proximidade do topo rochoso.

### 5.2.2.3 - Sondagens SP – 10 e SP – 09 e a Linha de Caminhamento Elétrico C

A linha de caminhamento elétrico C foi dividida em dois perfis (C1 e C2) devido à proximidade com as sondagens. O perfil Geoeletrico C1 (distância horizontal de 140 metros) pode ser correlacionado com a sondagem SP – 10 (Figura 46).



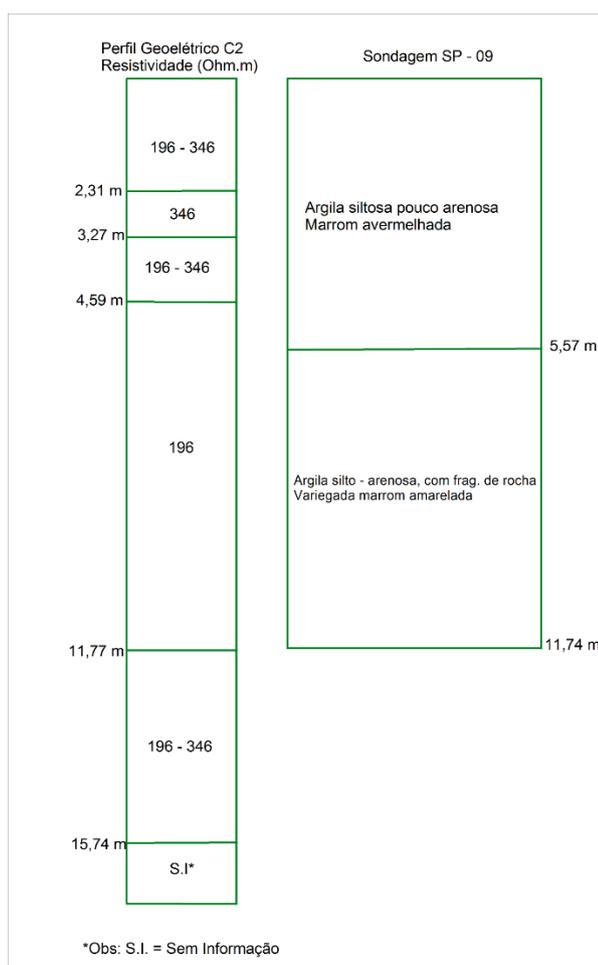
**Figura 46** - Comparação entre o perfil geoeletrico C1 e a sondagem SP – 10.

O perfil geoeletrico C1 apresenta valores comumente mais altos de resistividade elétrica que seriam próximos de intervalos interpretados como sendo de topo rochoso em

profundidades mais próximas da superfície. Até aproximadamente 7,0 metros de profundidade os valores de resistividade de 346 ohm.m pode indicar a presença de blocos de rocha localizados próximos à linha de caminhamento. Para este perfil geoeétrico não foi encontrado topo rochoso até 17 metros de profundidade, enquanto que a sondagem SP – 10 indica a profundidade do impenetrável como sendo de 12,2 metros.

A partir de 11,7 metros de profundidade, ocorre a presença de uma zona úmida que se estende até 17,5 metros de profundidade, formando uma zona de umidade de 5,7 metros de extensão lateral, enquanto que para estas profundidades a sondagem SP–10 não indica a presença do nível d'água.

A Figura 47 correlaciona o perfil geoeétrico C2 na posição horizontal de 250 metros com a sondagem SP – 09.

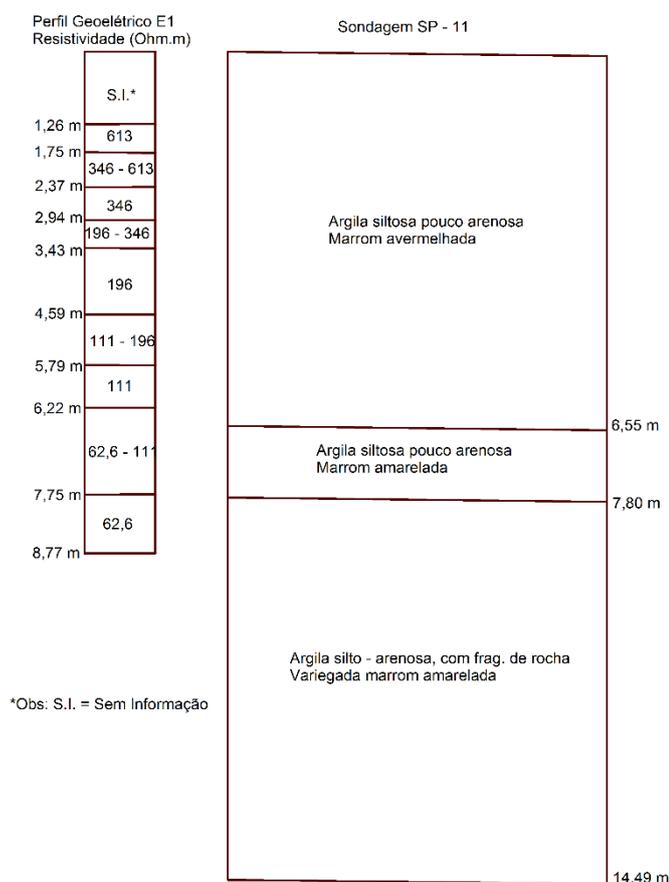


**Figura 47** - Comparação entre o perfil Geoeétrico da seção C2 com a sondagem SP – 09.

Os valores de resistividade também são da ordem entre 196 – 346 ohm.m ao longo de toda a profundidade do perfil. Estes altos valores de resistividade podem ser interpretados como solo residual argiloso seco ou a presença de blocos de matações de diabásio nas proximidades da linha de caminhamento elétrico C. O topo rochoso pode estar entre as profundidades de 16 a 17 metros, com valores de resistividade superiores a 346 ohm.m, no entanto é uma informação pontual, que necessitaria de investigação até profundidades maiores para sua confirmação. A sondagem SP – 09 indica a profundidade do impenetrável em 11,7 metros.

#### 5.2.2.4 - Sondagens SP – 11 e SP – 10 e a Linha de Caminhamento Elétrico E

O caminhamento elétrico E foi dividido em dois perfis geoeletricos (E1 e E2) conforme a proximidade com as sondagens. A Figura 48 representa uma comparação entre um perfil geoeletrico E1 na distância horizontal entre 15 metros e a sondagem SP – 11.

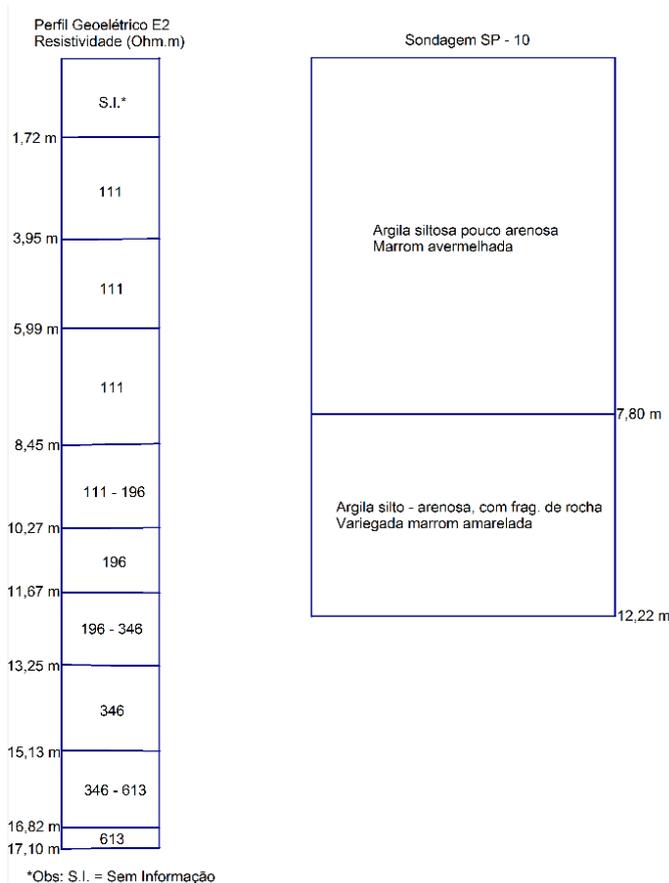


**Figura 48** - Comparação entre o perfil geoeletrico E1 e a sondagem SP - 11.

No perfil geoeletrico E1 para as primeiras profundidades, as resistividades variam entre 613 e 346 ohm.m até 2,94 metros de profundidade. Com o aumento da profundidade, as resistividades diminuem para algo em torno entre 196 a 346 ohm.m (de 2,94 a 3,43 metros de profundidade) e entre 111 a 196 ohm.m (para as profundidades entre 3,43 a 5,79 metros). A zona úmida tende a aparecer a aproximadamente 6,22 metros de profundidade, quando os valores de resistividade diminuem para 62,6 ohm.m. No início da seção da linha E até 8 metros de profundidade que corresponde à extensão do perfil geoeletrico E1 não se nota a presença do topo rochoso, sendo que a sondagem mais próxima deste perfil a sondagem SP – 11, indica o impenetrável aos 14,49 metros de profundidade, o que confirma o que fora interpretado no início da linha de caminhamento elétrico E, onde o topo rochoso na porção oeste do CE é encontrado aos 14 /15 metros de profundidade e a sondagem SP – 11 não detecta a presença de nível d'água.

Para o perfil geoeletrico E2 na distância horizontal de 110/120 metros (Figura 48), as resistividades mais próximas da superfície são resistividades baixas, formando uma pequena zona condutiva nessas profundidades até 8,45 metros de profundidade. A partir de 8,45 metros, a resistividade aumenta para valores acima de 111 ohm.m, chegando até 346 ohm.m em 11,67 metros, sendo o topo rochoso encontrado aproximadamente em 13,35 metros, que está próxima da profundidade do impenetrável de 12,22 metros para a sondagem SP – 10.

A Figura 49 mostra a comparação entre o perfil geoeletrico E2 na distância horizontal de 110/120 metros e a sondagem SP – 10.

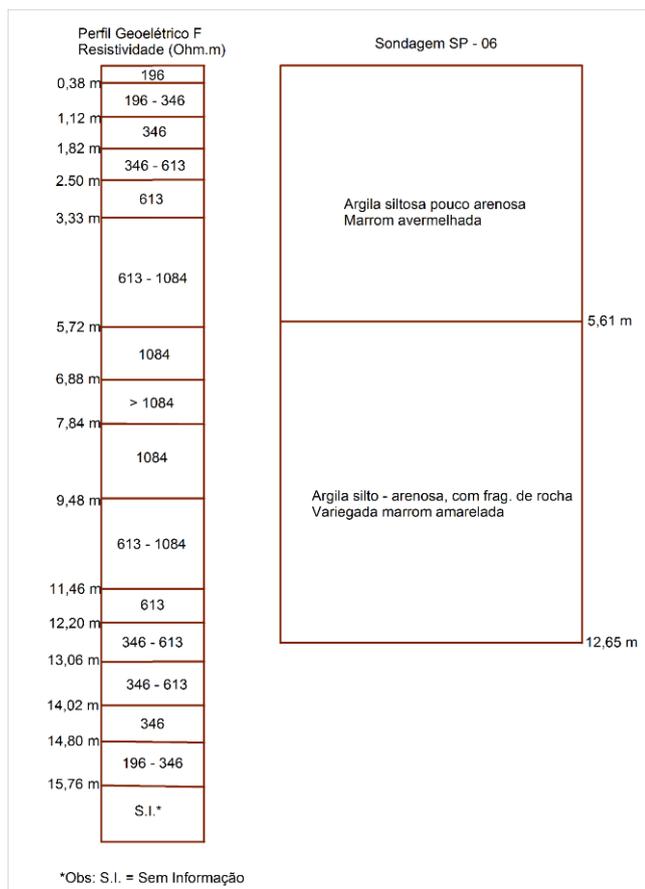


**Figura 49** - Comparação do perfil geoeétrico E2 com a sondagem SP - 10.

Na sondagem SP – 10 não foi encontrado nível d’água em nenhuma profundidade, apesar da geofísica indicar uma zona mais condutiva de pequena amplitude lateral, com extensão em profundidade que tende a aparecer no centro e na porção leste da Linha E. No entanto, é importante lembrar que esta linha de CE foi realizada no dia seguinte a uma intensa chuva que ocorreu na região, o que poderia explicar os valores mais baixos de resistividade elétrica no solo superficial.

#### 5.2.2.5 - Sondagem SP – 06 e a Linha de Caminhamento Elétrico F

A sondagem SP – 06 se localiza, de maneira aproximada, na distância horizontal 110/120 metros do perfil geoeétrico F. A Figura 50 mostra a comparação do perfil geoeétrico nesta região com os resultados da sondagem.



**Figura 50** - Comparação entre o perfil geométrico F e a sondagem SP - 06.

A resistividade para o perfil geométrico F está acima de 196 ohm.m desde a superfície, sendo que em 1,1 metros o valor de resistividade está acima de 346 ohm.m e em 2,50 metros os valores são típicos de rochas sãs como o diabásio (>613 ohm.m).

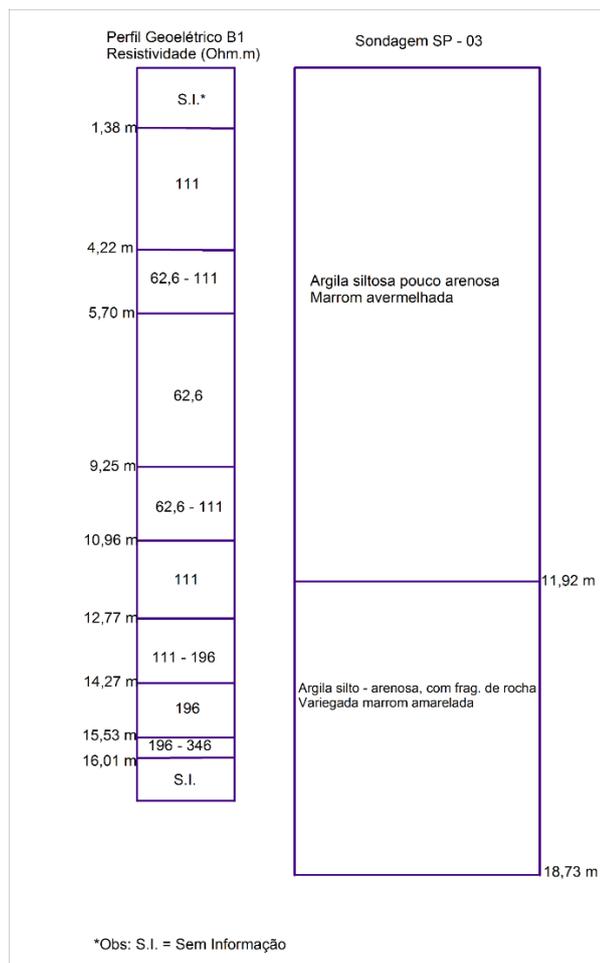
Neste perfil geométrico o topo rochoso e a rocha sã estão muito mais próximos da superfície do que nos demais perfis geométricos interpretados nas outras linhas de caminhamento elétrico. As informações da geofísica são destoantes das informações descritas na sondagem SP – 06, onde o impenetrável está em aproximadamente 12,6 metros, apesar do saprólito estar descrito desde 5 metros de profundidade. O perfil de alteração de rochas básicas pode ser altamente irregular e as profundidades do topo rochoso podem variar em pequenas distâncias, isso explicaria a diferença observada na sondagem SP-6 que se localiza a certa distância da linha de CE.

No entanto, as informações de presença de blocos de rocha e topo rochoso a pequena profundidade foi confirmada nas escavações realizadas para a instalação da célula de

deposição dos RSU, atualmente em operação, localizada entre as seções geoeletricas F e B, o que confirma os resultados da seção geoeletrica F.

#### 5.2.2.6 - Sondagens SP – 03 e SP - 02 e a Linha de Caminhamento Elétrico B

A Figura 51 apresenta comparação do perfil geoeletrico B1, localizado a distância horizontal 110/120 metros, com a sondagem SP – 03.



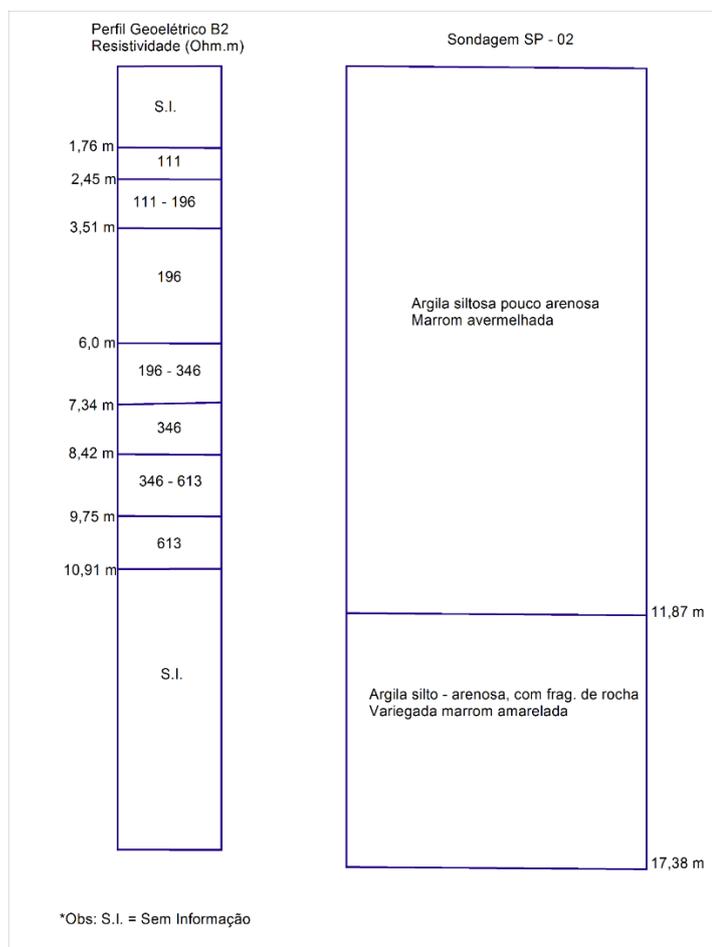
**Figura 51** - Comparação entre perfil geoeletrico B1 e a sondagem SP - 03.

O perfil geoeletrico B1 localiza-se em uma zona úmida, evidenciada pelos baixos valores de resistividade (<111 ohm.m) até as profundidades de 12,7 metros. A zona úmida ocorre a partir de 4,2 metros de profundidade e se estende até aproximadamente 10,9 metros, enquanto que na sondagem SP – 03 não se observa a presença nível d'água.

O topo rochoso para o perfil geoeletrico B1 se encontra aproximadamente 16,01 metros de profundidade, quando o valor da resistividade fica na faixa entre 346 ohm.m,

compatível com a profundidade do impenetrável, em torno de 18 metros, obtido na sondagem SPT.

A Figura 52 compara o perfil geoeétrico da linha B2 de distância horizontal de 280 metros com a sondagem SP – 02.

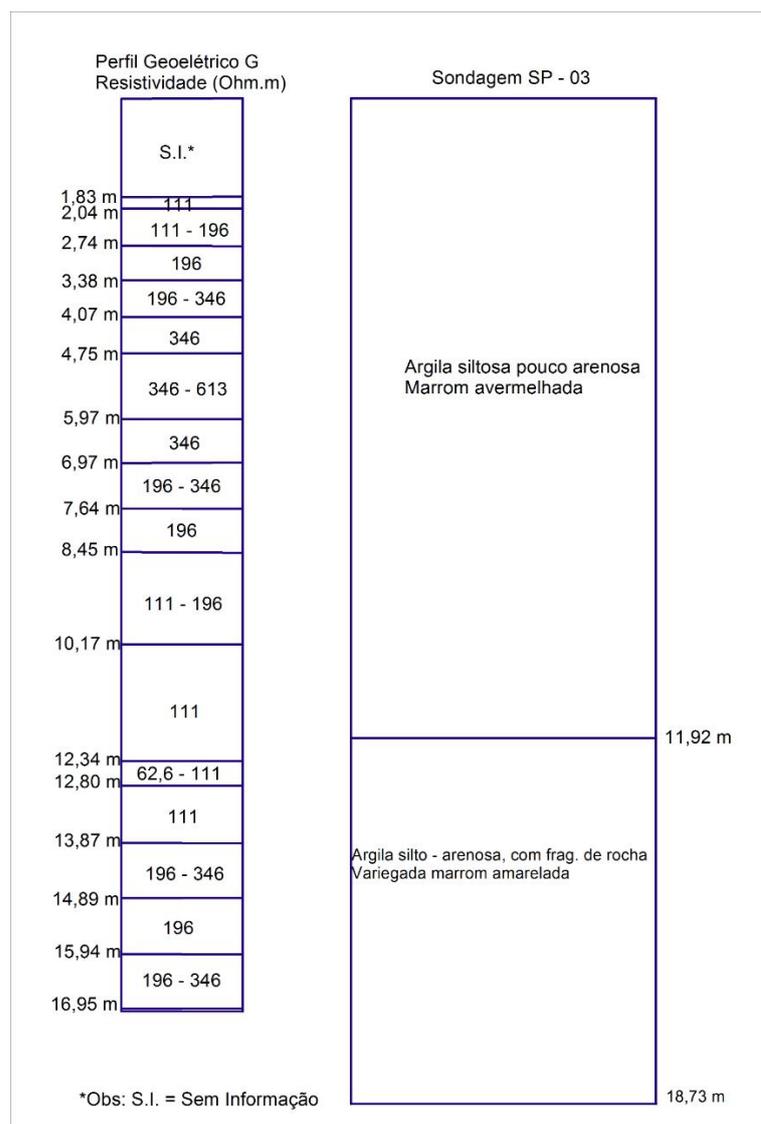


**Figura 52** - Comparação entre o perfil geoeétrico B2 e a sondagem SP - 02.

Para o perfil geoeétrico B2 na distância horizontal de 280 metros, as resistividades mais próximas da superfície estão entre as faixas de 111 – 196 ohm.m. O topo rochoso ocorre nas profundidades de 7,3 metros, onde os valores de resistividade estão acima de 346 ohm.m até as profundidades de 10,9 metros. Para as profundidades acima de 10 metros a seção geofísica termina, portanto não há informações até 17 metros de profundidade. A profundidade do topo rochoso no perfil geoeétrico destoa da descrição da sondagem onde o impenetrável está na profundidade 17,3 metros, sendo o provável contato saprólito/topo da rocha. Novamente esta discrepância pode ser função da heterogeneidade dos perfis de alteração como se observa ao longo da seção de geoeétrica B como um todo.

### 5.2.2.7 - Sondagem SP – 03 e a Linha de Caminhamento Elétrico G

A sondagem SP – 03 localizada entre as linhas de caminhamento elétrico B e G é também a sondagem SPT mais próxima da linha G. A Figura 53 compara o perfil geoeletrico G na distância horizontal de 80/90 metros com a sondagem SP – 03.



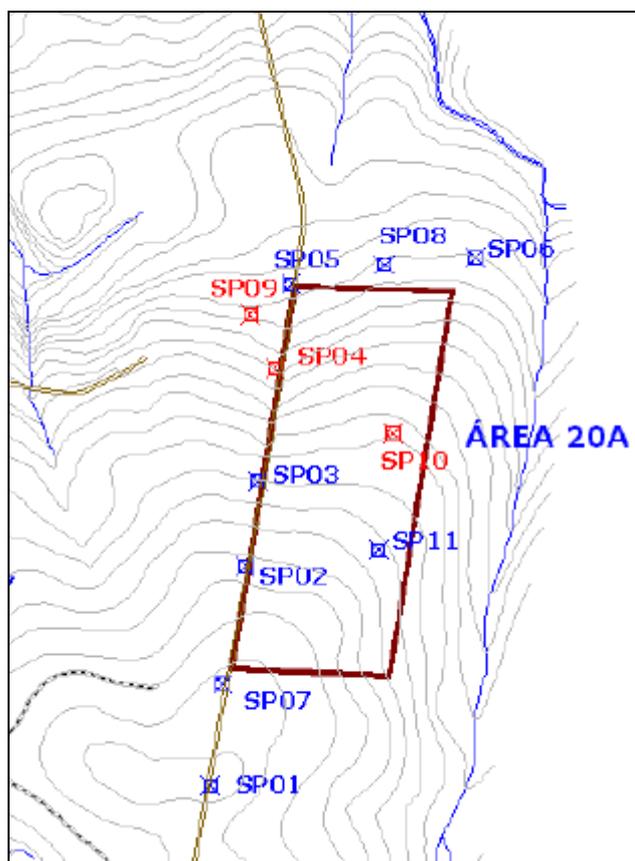
**Figura 53** - Comparação entre o perfil geoeletrico G e a sondagem SP - 03.

Para o perfil geoeletrico G o que se observa são valores de resistividade altos, compatíveis com a presença de blocos da rocha diabásio a partir 2,7 metros de profundidade e se estendendo até 7,6 metros aproximadamente. As resistividades típicas de solos residuais argilosos se estendem de 7,6 até aproximadamente 17,0 metros de profundidade. Para a

sondagem SP – 03, a profundidade que se encontra o impenetrável é em 18,7 metros, o que mostra uma boa correlação entre o perfil geométrico G e a sondagem SP – 03 para este ponto, indicando profundidades próximas do topo rochoso.

#### 5.2.2.8 - Correlação com as informações das sondagens SPT contidas no EIA/RIMA

Ao longo da área do aterro sanitário foram realizados 11 furos de sondagem, conforme observado na Figura 54. As sondagens foram classificadas como argila siltosa pouco arenosa e o interessante é que quatro destas sondagens, indicam que o topo rochoso esteja próximo da superfície o que confirma em boa parte as interpretações feitas pelos levantamentos geofísicos.



**Figura 54** - Foto que mostra a distribuição das sondagens SPT ao longo da área do aterro sanitário (Sondagens SP 04, SP09 e SP10 indicam rocha a pequena profundidade). Fonte: Retirado de FIPAI, 2010.

As três sondagens que estão em vermelho indicam que o topo rochoso se encontra em profundidades próximas da superfície. Na sondagem SP10 o topo rochoso se encontra em

2,44 metros de profundidade, enquanto para a sondagem SP04, a profundidade é de 3,70 metros e para a sondagem SP09 é de 3,77 metros.

A sondagem SP10 está em uma localização próxima da parte leste da linha de caminhamento elétrico E que indica que o topo rochoso varia entre profundidades de 2,5 a 5,0 metros. Para este caso a profundidade do topo rochoso encontrada na sondagem apresenta uma boa correlação com a profundidade do topo rochoso interpretada na seção E. Tal sondagem apresenta informações destoantes da sondagem localizada próxima (SP-05) à esta.

A sondagem SP04 se localiza próxima às porções oeste das linhas de caminhamento elétrico F e B. Esta sondagem também apresenta uma boa correlação com as informações das investigações geofísicas destas duas linhas de caminhamento elétrico, onde na porção oeste o topo rochoso pode se encontrar em 5 metros de profundidade. Embora a geofísica indique que o topo rochoso não se distribui de maneira uniforme ao longo de toda a área do aterro sanitário, no geral a tendência é que o método indireto de investigação mostre o topo rochoso a uma profundidade maior do que o indicado pela sondagem SP04, entretanto, esta sondagem apresenta uma boa correlação com a tendência observada entre as duas seções geoeletricas e a visita de campo (Figura 55). Por ser em uma área próxima das células de deposição dos RSU, observou-se blocos de rocha escavados nas proximidades destas células, o que também é uma boa evidência de que nesta porção o topo rochoso se encontra entre 3 a 5 metros de profundidade e relativamente próximos à superfície.



**Figura 55** - Visita de campo que mostra blocos de diabásio nas proximidades da célula de disposição de resíduos sólidos urbanos, proximidade da linha de caminhamento elétrico B.

A sondagem SP09 apesar de estar mais distante da área do aterro sanitário é um ponto que se localiza próximo às porções oeste das linhas de caminhamento elétrico B e G. Considerando uma das hipóteses de interpretação da Linha G (da influência de blocos de matacões na porção oeste da seção), o topo rochoso pode se encontrar cerca de 2 metros de profundidade, o que indicaria uma boa correlação com a profundidade do topo rochoso encontrada pela sondagem SP09 de 3,77 metros.

Para as outras sondagens SP02, SP03 e SP11 foi mencionado no relatório de impacto ambiental que o topo rochoso não se encontra em profundidades próximas da superfície, tais sondagens se localizam entre as seções de caminhamento elétrico A, D e C, o que confirma em termos gerais o que fora encontrado na geofísica, onde nestas porções o topo rochoso se encontra em maiores profundidades, sendo muitas vezes não encontrada no decorrer dos 17 metros de profundidade (caso da Linha C).

### **5.3 - Considerações sobre a correlação dos perfis geoeletricos com as sondagens SPT**

A comparação entre as seções geofísicas e as sondagens SPT não apresentaram uma boa correlação, de maneira geral a mudança nos valores de resistividade elétrica em profundidade não pôde ser comparada com a descrição das sondagens SPT. Somente em alguns casos há uma boa correspondência entre as linhas de caminhamento elétrico e as sondagens SPT. A melhor correlação dos resultados refere-se à identificação do topo rochoso, que em várias seções coincidiu ou esteve próxima ao que foi determinado pelas sondagens.

Um aspecto importante a se relatar diz respeito a identificação das zonas de baixa resistividade, que foram interpretadas como a presença de zonas com maior umidade. Em nenhuma das sondagens SPT realizadas foi identificada a presença do lençol freático. Este é um aspecto de grande importância em áreas de instalação de aterros sanitários e a presença de água subterrânea ou de regiões preferenciais de fluxo deve ser melhor investigada, uma vez que as seções geoeletricas apresentam fortes evidências da presença de água em certas regiões da área estudada. Esta evidência foi confirmada em pelo menos um poço de monitoramento (PM – 1 de coordenadas 190846m E e 7558894m N) posicionado em cota topográfica compatível com os caminhamentos elétricos e localizado dentro da área do empreendimento, no qual foi medido o nível de água a 5,2 metros de profundidade.

Vale ressaltar que as sondagens SPT foram feitas em 2010, enquanto que as linhas de caminhamento em abril de 2014, representando uma diferença temporal importante entre os dois métodos de investigação, uma vez que o nível d'água no lençol freático pode oscilar muito em diferentes períodos.

### 5.3.1 - Modelo Geométrico com base na comparação dos dados de sondagem SPT com as seções de resistividade

Com base nas informações de eletrorresistividade das seções e das sondagens correlacionadas com estas seções, percebe-se que valores de resistividade relativamente altos, na faixa que abrange 196 – 346 ohm.m, quando ocorrem próximo a superfície correspondem a um solo seco ou com teor de umidade muito baixo. Valores de resistividade abaixo de 111 ohm.m, especificamente (valores menores do que 62,6 ohm.m) parecem estar associados às regiões com teor de umidade elevado, embora nenhuma das sondagens tenha indicado a presença do lençol freático.

A interpretação conjunta das informações dos CEs e das sondagens permitiram concluir que os valores de resistividade que correspondem ao impenetrável nas sondagens SPT (acima de 346 ohm.m) estariam associados a presença do topo rochoso, que no caso da área é representado pelo diabásio.

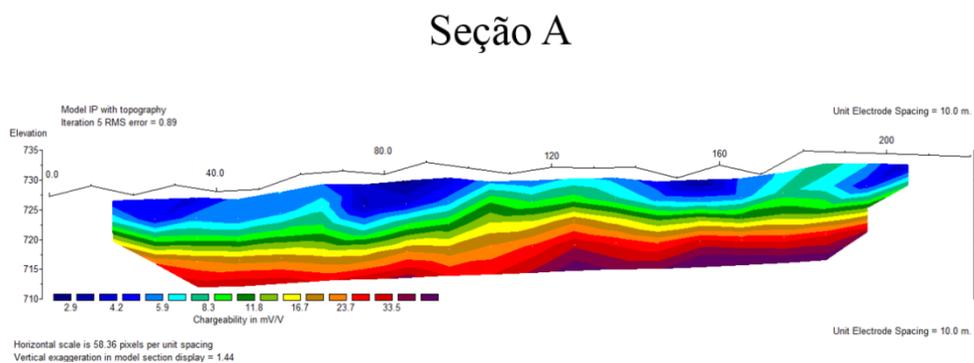
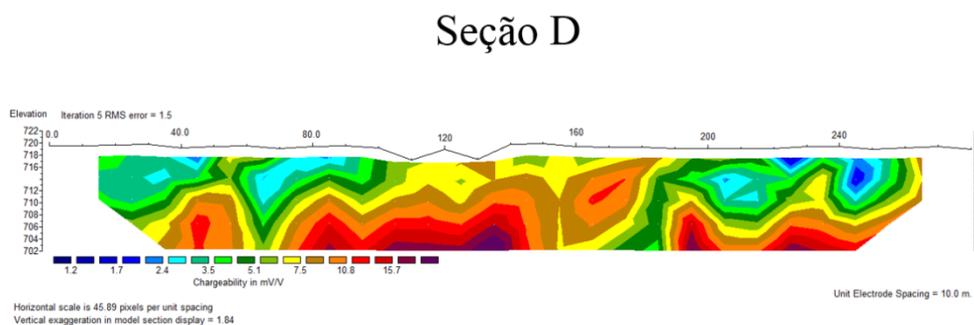
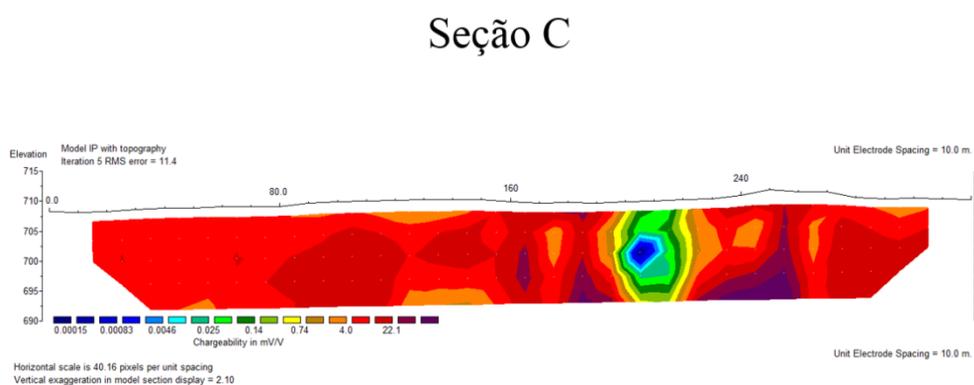
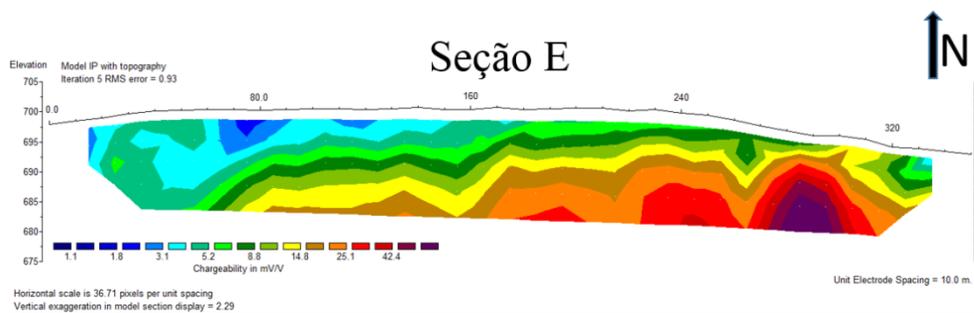
Em profundidades maiores a resistividade chegou a valores em torno de 613 a 1084 ohm.m, o que seria característico de um maciço rochoso composto de diabásio são. A Tabela 8 apresenta a interpretação feita com base dos valores de resistividade interpretados nas seções de eletrorresistividade.

**Tabela 8** - Resumo de faixas de resistividade e suas respectivas interpretações servindo como base para o modelo geométrico.

Resistividade (Ohm.m)	Intepretação (Modelo Geométrico)
< 62,6	Solo Residual Argiloso Úmido
196 – 346	Solo Residual Argiloso Seco
> 346	Topo Rochoso (Diabásio)
-> 613	Rocha São (Diabásio)

#### **5.4 - Seções de Cargabilidade**

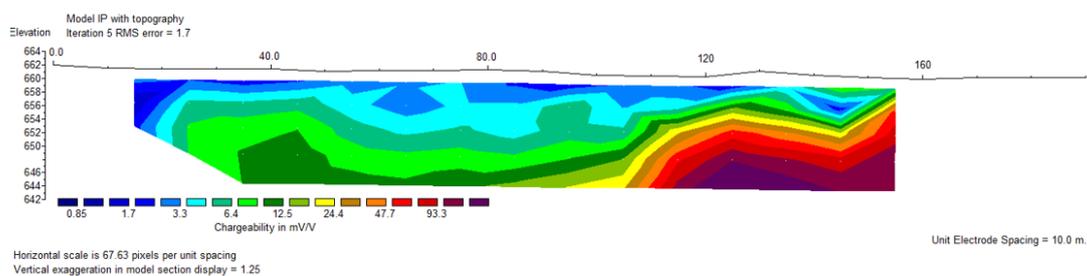
Os resultados da cargabilidade nas seções geradas para as linhas de caminhamento elétrico são mostradas nas Figuras 56 e 57. A Figura 56 mostra as quatro primeiras seções de cargabilidade, na seguinte sequência de sul para norte Linha A -> Linha D -> Linha C -> Linha E. Enquanto que a Figura 57 mostra a sequência Linha F -> Linha B -> Linha G.



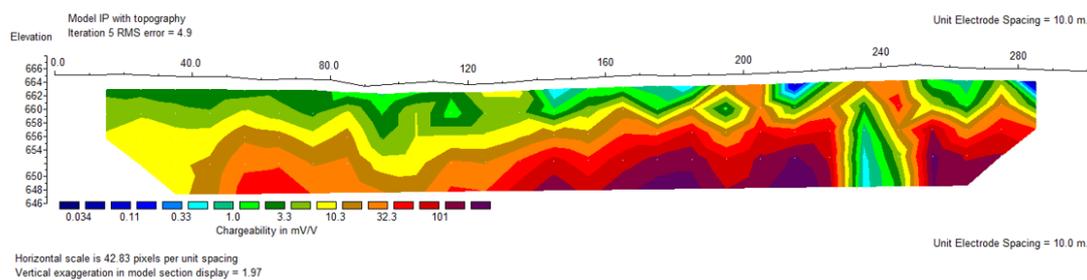
**Figura 56** - Sequência das seções de cargabilidade obedecendo à sequência das linhas de caminhamento elétrico de sul para norte. Linha A -> Linha D -> Linha C -> Linha E.



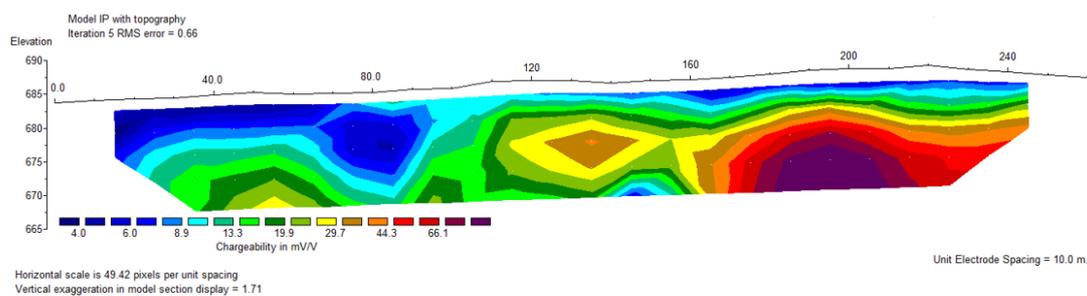
## Seção G



## Seção B



## Seção F



**Figura 57** - Sequência das seções de cargabilidade obedecendo à sequência das linhas de caminhamento elétrico.  
Linha F -> Linha B -> Linha G.

Algumas seções de cargabilidade apresentaram boas correlações com as seções de resistividade, no que se refere à identificação do topo rochoso, como na linha de caminhamento elétrico A, enquanto em outras seções essa correlação não ficou evidente. No geral, os valores de cargabilidade tendem a aumentar com a profundidade à medida que se chega próximo ao topo rochoso.

Nas seções A, E, F, B e G onde há o contorno do topo do diabásio, os valores de cargabilidade são maiores do que 32 mV/V, podendo chegar a valores na faixa de 90 a 100 mV/V (seções B e G). Para as seções D e C onde não há a presença de topo rochoso o valor de máxima cargabilidade é da ordem entre 15 a 20 mV/V.

As zonas úmidas identificadas nas seções de resistividade não são evidenciadas em todas as seções de cargabilidade. Segundo Lago (2009), para solos residuais derivados de basaltos os baixos valores de resistividade ( $< 95 \text{ ohm.m}$ ) quando estão associados a altos valores de cargabilidade ( $> 17 \text{ mV/V}$ ) podem caracterizar a presença da zona saturada, sendo que os próprios dados de cargabilidade seriam bons para delimitar o limite da zona saturada com a zona não saturada. No entanto, não foi observado este comportamento em todas as seções de cargabilidade, quando comparadas às suas respectivas seções de resistividade. Por exemplo, para a seção A, as zonas menos resistivas apresentam valores de cargabilidade  $> 16 \text{ mV/V}$ , o que seria uma boa correlação entre ambos os métodos para uma possível delimitação da zona saturada/não saturada nesta seção. Já em outras seções, como a linha C, por exemplo, regiões mais condutivas, interpretadas como zona úmida, apresentam cargabilidades relativamente baixas (valores entre 4 mV/V).

Vacquier et al. (1997) realizaram estudos com a técnica de polarização induzida em aquíferos, e concluíram em termos gerais como seria a resposta da técnica de PI em diferentes situações. Uma boa resposta em termos de polarizabilidade depende da magnitude da mistura da resistividade da solução, da quantidade de argila, e do cátion que pode saturar a argila. Portanto, o que se pode concluir é que a cargabilidade é influenciada pela quantidade de água, pela proporção de argila e areia contidas no solo, além de variação de teores de salinidade.

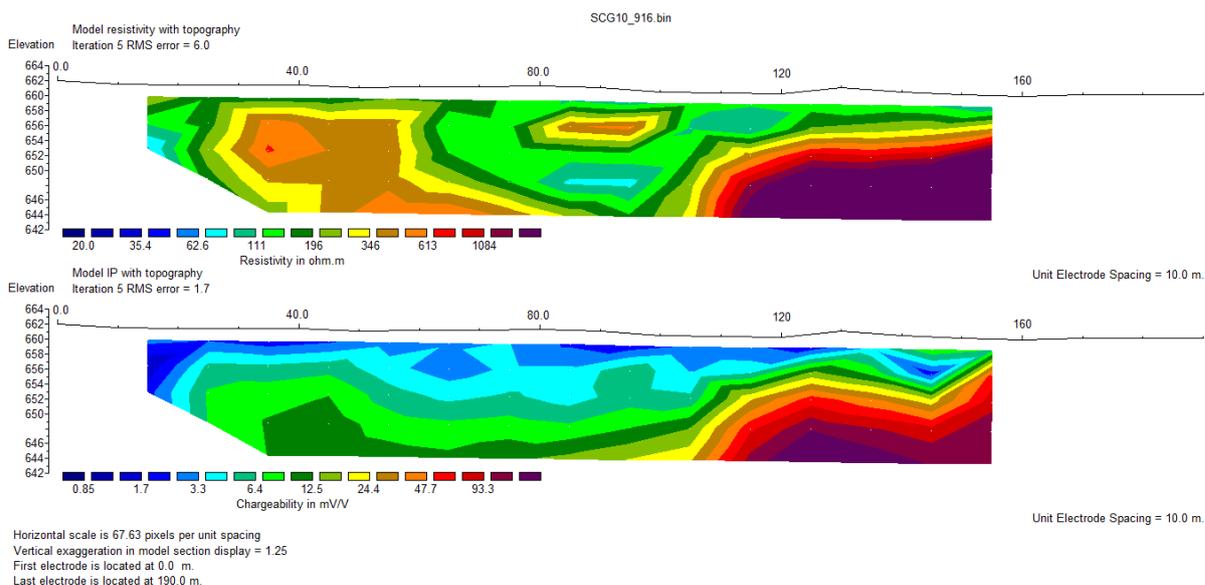
Em áreas onde se encontra o saprólito do diabásio, os valores de cargabilidade tendem a aumentar devido à presença de magnetita. Provavelmente, a magnetita também deve ocorrer em menores proporções nas áreas que envolvem o material alterado residual, o que conduz também a um aumento na cargabilidade.

Para a seção G há de serem levadas em consideração as duas hipóteses descritas durante os comentários sobre as seções de resistividade. A primeira hipótese seria a da influência da manta de impermeabilização dos tanques de chorume, que podem vir a interferir na seção, nos valores de resistividade lateralmente e em profundidade. A manta pode provocar um aumento no valor de resistividade, a outra hipótese a ser aventada seria a de existir blocos de rocha com cerca de 2 a 3 metros de profundidade, encontrados durante a escavação para a abertura das células de ativação de chorume no aterro sanitário.

Para a seção G de cargabilidade, nas profundidades mais superficiais, os valores seriam relativamente baixos da ordem de 0,85 até 3,3 mV/V nos primeiros 7 metros de profundidade ao longo de toda a seção de caminhamento elétrico. A cargabilidade para as profundidades abaixo de 7 metros até 17 metros, ao longo da distância horizontal entre 15 a 100 metros, abrangem valores entre 6,4 até acima de 12,5 mV/V, enquanto que a partir dos 110 metros de distância horizontal, o contorno das faixas de valores de cargabilidade são semelhantes ao contorno do topo rochoso e aumentam mais acentuadamente em profundidade, abrangendo valores da ordem de 24,4 até 93,3 mV/V.

O que chama a atenção e que difere um pouco das interpretações obtidas nas linhas de caminhamento elétrico é o comportamento observado na linha G, onde uma das hipóteses é que a manta impermeabilizante influencia nos resultados de resistividade para esta seção. Se considerada a hipótese, da profundidade do topo do diabásio estar entre 2 a 3 metros de profundidade no sentido oeste da Linha G, os valores médios de cargabilidade (3,3 a 6,4 mV/V) no início da linha de caminhamento elétrico destoam, dos valores médios de cargabilidade (24,7 a 93,3 mV/V) para o topo rochoso a leste da seção.

A Figura 58 mostra o resultado da seção de eletrorresistividade e cargabilidade para a Linha G, com os seus respectivos intervalos.



**Figura 58** - Seção de Eletroresistividade e Cargabilidade da Linha G.

A Tabela 9 mostra de maneira resumida os intervalos de cargabilidade interpretados como sendo de solo residual argiloso seco, zona de umidade e topo do diabásio para cada seção. Tais intervalos de cargabilidade são sugeridos em função da correlação entre as seções de resistividade e cargabilidade, do que seria material residual seco, zona úmida e topo rochoso e também o uso de intervalos de cargabilidade utilizados por alguns autores, como Lago (2009) como referência de um solo residual argiloso não saturado (cargabilidade entre 5 a 17 mV/V), solo residual argiloso saturado (cargabilidade entre 17 a 22 mV/V) na região de Ribeirão Preto. A cargabilidade de uma rocha vulcânica densa citado por Telford et al. (1990) varia entre 100 a 500 ms, tais valores de cargabilidade serviram como base para refinar o modelo geológico da área do aterro sanitário de São Carlos.

**Tabela 9** - Intervalos de cargabilidade interpretados com base nas diversas seções analisadas.

<b>Levantamento Elétrico</b> <b>2D</b>	<b>Solo Residual Argiloso</b> <b>Seco</b>	<b>Zonas Úmidas</b>	<b>Topo do Diabásio</b>
Linha A	Cargabilidade entre 2,9 a 16,7 mV/V	Cargabilidade entre 5,9 a 16,7 mV/V	Cargabilidade entre 23,7 a 33,5 mV/V
Linha D	Cargabilidade entre 1,2 a 7,5 mV/V	Cargabilidade entre 2,4 a 5,1 mV/V e 1,2 a 15 mV/V	Indisponível

**Tabela 9** - Intervalos de cargabilidade interpretados com base nas diversas seções analisadas (continuação).

<b>Levantamento Elétrico 2D</b>	<b>Solo Residual Argiloso Seco</b>	<b>Zonas Úmidas</b>	<b>Topo do Diabásio</b>
Linha C	Cargabilidade entre 4,0 a > 22 mV/V	Cargabilidade de 4,0 mV/V	Cargabilidade dos matacões de diabásio 22 mV/V
Linha E	Cargabilidade entre 5,2 a 8,8 mV/V	Cargabilidade entre 1,1 a 5,2 mV/V	Cargabilidade entre >8,8 a 42,4 mV/V
Linha F	Cargabilidade entre 4,0 a 8,9 mV/V	Cargabilidade entre 4,0 a 8,9 mV/V	Cargabilidade entre 13,3 a 66,1 mV/V
Linha B	Cargabilidade de 3,3 mV/V	Cargabilidade entre 3,3 a 10,3 mV/V	Cargabilidade de 32,3 mV/V
Linha G	Cargabilidade entre 0,85 a 3,3 mV/V e 6,4 a 12,5 mV/V	Indisponível	Cargabilidade entre 24,4 a 93,3 mV/V

O que se pode concluir, a partir dos valores encontrados nas seções, é que a cargabilidade para o material natural seco, no caso o solo residual argiloso, ocupa uma faixa de 2 a 16/17 mV/V o que corresponde aos valores de resistividades, interpretados como de solo residual argiloso seco, na faixa de 196 a 346 ohm.m. Para as zonas de umidade, a cargabilidade varia de uma faixa entre 1,1/2,4 a 10,3/16 mV/V, correspondendo aos valores de resistividade menores do que 62,6 ohm.m para as zonas úmidas. Enquanto que a cargabilidade, para a rocha diabásio, varia desde 8,8 – 13 mV/V representado o topo da rocha, até valores de 66,1 a 93,3 mV/V, que seriam característicos da rocha sã em maiores profundidades.

### 5.5 - Sondagens Elétricas Verticais (SEV)

Foram feitas três sondagens elétricas verticais ao longo da área do aterro sanitário utilizando o arranjo Schlumberger. Na Figura 59 pode-se observar a localização das SEVs e na Tabela 10 as suas coordenadas topográficas. A SEV-1 foi feita no final da linha de caminhamento elétrico D (a leste da linha), a SEV-2 está localizada ao final da linha de

caminhamento elétrico E (na porção leste ao final da seção), enquanto que a SEV-3 está localizada no início da linha de caminhamento elétrico C (porção oeste).

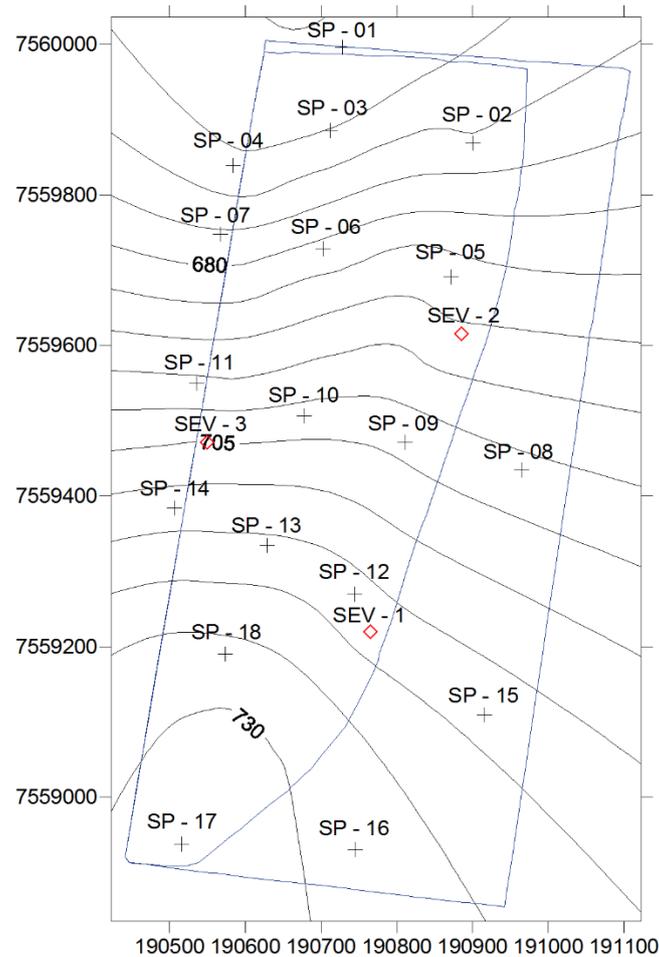
**Tabela 10** - Coordenadas topográficas das três sondagens elétricas verticais.

SEV	Coordenada (m)	Coordenada (m)	Cota (m)
SEV - 1	190765,431635	7559219,7824	717,503579
SEV - 2	190885,037831	7559615,57402	690,829559
SEV - 3	190549,508559	7559470,97557	705,408944

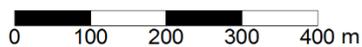
Obs: As coordenadas foram medidas em UTM datum SIRGAS 2000 e fuso 23 S.

Na Figura 59 pode-se observar também a localização das sondagens SPT e o limite do aterro sanitário.

## Mapa de Localização das sondagens elétricas verticais e sondagens SPT



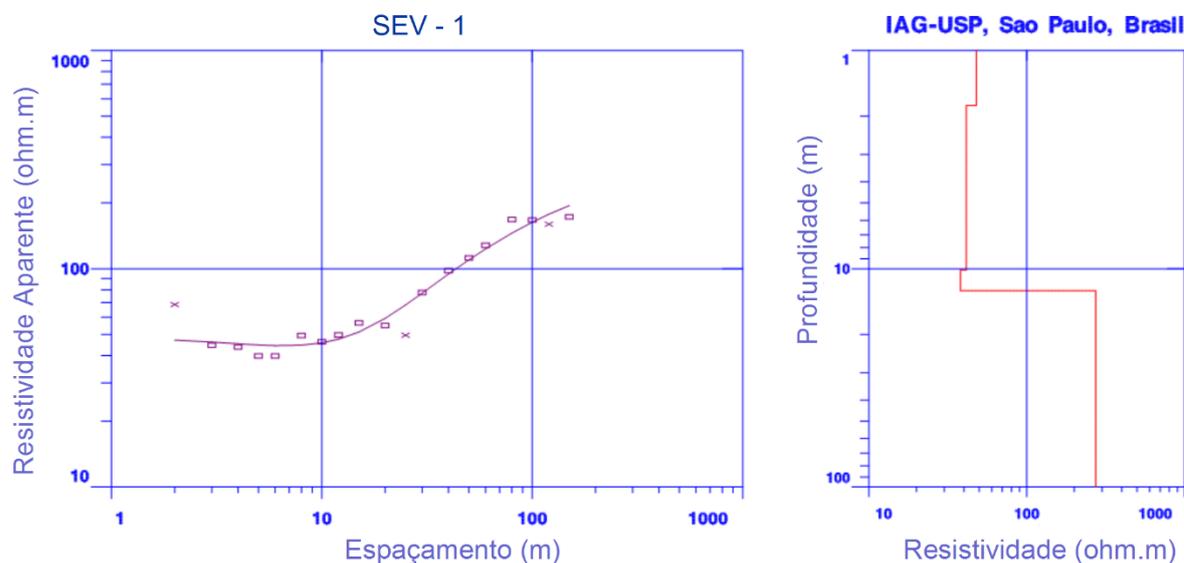
Datum: UTM SIRGAS 2000 Zona 23 S



- + Sondagem SPT (SP)
- ◇ Pontos de sondagem elétrica vertical (SEV)
- ▭ Limite Efetivo do Aterro Sanitário
- 730 Isovalores de cotas (m)

**Figura 59** - Mapa de localização da área do aterro sanitário com as localizações dos pontos das sondagens elétricas verticais com as sondagens SPT e o limite do aterro sanitário.

A Figura 60 mostra o gráfico referente à SEV – 1 com as 4 camadas interpretadas, seus respectivos valores de resistividade, espessura e profundidade.



**Figura 60** - Sondagem elétrica vertical 1 com as diferentes camadas interpretadas.

Na Sondagem Elétrica Vertical 01 aparentemente existem três camadas de solo, sendo a camada de solo mais superficial até 2,0 metros com valores de resistividade na ordem de 50 ohm.m, a segunda camada de solo se encontra de 2,0 metros de profundidade até 10,0 metros de profundidade com valores de resistividade ligeiramente menores (na ordem de 40-50 ohm.m) sendo caracterizada como uma camada de solo argiloso residual maduro com presença de água ou de umidade (devido aos baixos valores de resistividade). A terceira camada de solo se encontra entre 10-12 metros de profundidade, com valores de resistividade entre 30-40 ohm.m, sendo caracterizado como um solo saprolítico devido à proximidade com o topo rochoso e a pouca espessura do material residual, este solo também ocorre na presença da zona úmida.

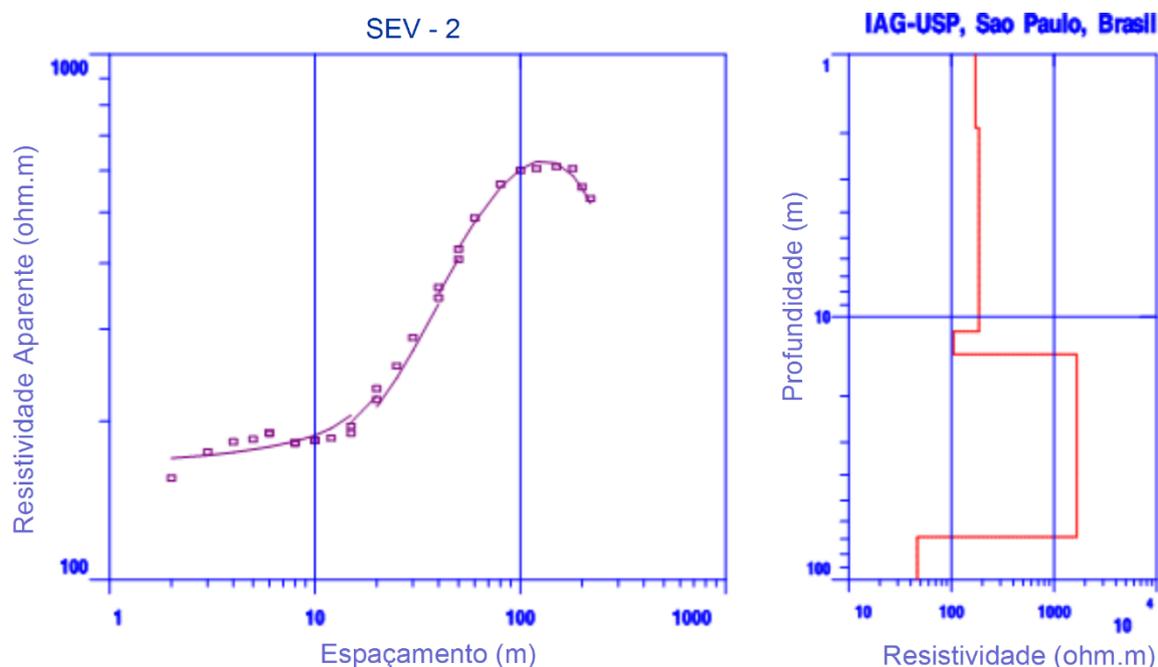
Já o topo rochoso é encontrado nas profundidades acima de 12 metros com valores de resistividade em torno de (250 a 300 ohm.m), a rocha interpretada é o diabásio, nesta SEV aparentemente não foi encontrado o contato com o Arenito. Para este caso o valor da resistividade da rocha pode variar, pois a rocha corresponde à última camada analisada na SEV1.

A Tabela 11 representa um resumo da análise feita na SEV – 1, com o número de camadas encontrado, a espessura de cada camada, os valores de resistividade encontrados para cada camada e a interpretação feita para cada uma.

**Tabela 11-** Modelo geoeétrico da SEV – 1 realizada no final da Linha D.

Camada	Profundidade (m)	Resistividade (ohm.m)	Interpretação
1	0 – 2,0	50	Solo Superficial
2	2,0 – 10,0	40 - 50	Solo residual maduro c/Zona de Umidade
3	10,0 – 12,0	30 - 40	Saprólito c/Zona de Umidade
4	De 12,0 adiante	200 - 300	Diabásio

A Figura 61 mostra a sondagem elétrica vertical (SEV – 2) realizada no final da Linha E (a leste), apresenta o número, espessura, valores de resistividade e interpretação para cada camada, na forma de gráfico e de perfil geoeétrico referentes à SEV.



**Figura 61** - Sondagem elétrica vertical 2 mostrando o gráfico com as diferentes camadas interpretadas.

Para a Sondagem Elétrica Vertical 02, foram encontradas duas camadas de solo, uma camada de solo superficial com profundidade até 2,0 metros, com valores de resistividade em torno de 150 ohm.m. A segunda camada de solo de 2,0 metros até 11,0 metros de profundidade, apresenta valores de resistividade da ordem de 180 ohm.m até 200 ohm.m, sendo o solo correspondente a de um material residual maduro. Para as camadas de solo (superficial e residual maduro), os valores de resistividade da ordem de 150 a 200 ohm.m, indicam que são valores indicativos de um solo seco, sem a presença da zona de umidade.

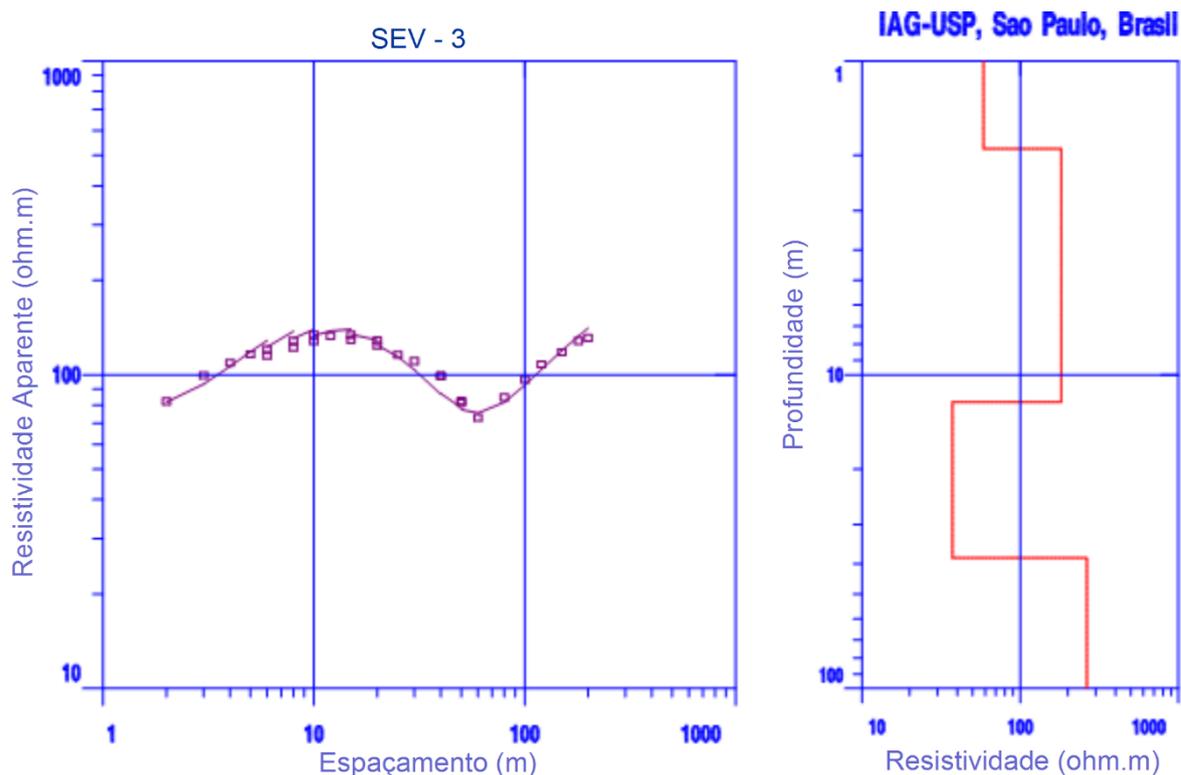
Já a terceira camada é representada pela presença de rocha que começa em torno de 12,0 e vai até 70,0 metros de profundidade, com valores de resistividade entre 1000-2000 ohm.m. Esses valores de resistividade correspondem ao diabásio que apresenta uma espessura de aproximadamente 58,0 metros. Enquanto que para as profundidades de 70,0 metros até 100,0 metros o valor de resistividade diminui significativamente para a casa de 50 ohm.m o que indica a provável presença do corpo de arenito.

A Tabela 12 apresenta um resumo do número de camadas, sua espessura, valores de resistividade e interpretações feitas pela linha da SEV - 2. O interessante é que esta sondagem elétrica vertical foi a única que aparentemente atingiu o corpo de arenito.

**Tabela 12** - Modelo geoeletrico da SEV – 2 realizada no final da Linha E.

<b>Camada</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Resistividade (ohm.m)</b>	<b>Interpretação</b>
1	0 – 2,0	150	Solo Superficial
2	2,0 – 11,0	180 - 200	Solo Residual Maduro (seco)
3	12,0 – 70,0	1000 - 2000	Diabásio
4	De 70,0 adiante	40 – 50	Arenito

A Figura 62 mostra os gráficos indicando o número de camadas interpretadas para a SEV-03, com suas respectivas profundidades e valores de resistividade.



**Figura 62** - Sondagem elétrica Vertical 3 mostrando o gráfico com as diferentes camadas interpretadas.

Para a SEV-3, foi identificado uma maior espessura de solo, que permitiu a divisão em três camadas. A primeira camada, mais superficial, se estende de 0 a 2,0 metros de profundidade e apresenta valores de resistividade da ordem de 50 ohm.m. A segunda camada se encontra em profundidades de 2,0 a 12,0 metros, com valores de resistividade da ordem de 200 ohm.m, sendo uma camada de solo residual maduro, com resistividades típicas de solos secos. A terceira camada de solo se encontra de 12,0 metros a aproximadamente 38,0 metros indicando valores de resistividade da ordem de 40-50 ohm.m, correspondendo a um solo residual com presença de zona de umidade que faz com que estes valores caiam abruptamente entre uma camada e outra. O fato da terceira camada de solo estar com uma resistividade menor do que as outras duas camadas de solo, muito provavelmente é devido à uma zona de maior umidade, portanto uma zona mais condutiva, tal zona com 26 metros de extensão em profundidade foi bem identificada pela SEV.

A profundidade do topo rochoso começa a partir de 38,0 metros até mais de 100 metros, com valores de resistividade entre 280 a 300 ohm.m, indicando provavelmente a presença de diabásio. Sendo o típico valor de resistividade para o topo do diabásio identificado como algo em torno de 300 ohm.m.

A Tabela 13 apresenta um resumo do número de camadas, sua espessura, valores de resistividade e interpretações feitas com base na SEV - 3.

**Tabela 13** - Modelo geoeétrico da SEV – 3 realizada no início da Linha C.

Camada	Profundidade (m)	Resistividade (ohm.m)	Interpretação
1	0 – 2,0	50	Solo Superficial
2	2,0 – 12,0	200	Solo Residual Maduro (Seco)
3	12,0 – 38,0	40 - 50	Solo Residual/saprolito com umidade elevada
4	De 38,0 adiante	280 - 300	Diabásio

### 5.5.1 - Comparação entre as três SEVs

Os resultados das SEVs mostram uma relativa homogeneidade nos modelos geoeétricos obtidos, sobretudo as diferenças que ocorrem nos valores de resistividade estão relacionadas à presença da zona de umidade ou ausência desta. Com a presença da zona de umidade os valores de resistividade ficam entre 40 – 50 ohm.m (desde o solo superficial até solos com profundidade acentuada) e quando há a ausência da zona de umidade, os valores de resistividade ficam em torno de 150 – 200 ohm.m (desde o solo superficial até os solos residuais secos de maiores profundidades). Essa relativa homogeneidade elétrica resulta do material de alteração formando predominantemente por solos argilosos e argilo-siltosos com pequenas variações nas proporções de areia, derivado do diabásio da Formação Serra Geral.

A queda nos valores de resistividade (observados nas SEVs 1 e 3) também se verifica nas seções de caminamento elétrico. As localizações destas duas sondagens elétricas são próximas as Linhas D e C respectivamente. A SEV – 1 se localiza no final da Linha de caminamento elétrico D, sendo que nesta linha a zona de maior umidade ocorre desde profundidades próximas da superfície até aproximadamente 17,0 metros, enquanto que no modelo geoeétrico interpretado para a SEV – 1 apresenta valores de resistividade da ordem de 40 – 50 ohm.m até aos 12,0 metros de profundidade.

A SEV – 3, localizada no início da Linha C (porção oeste), mostra uma queda abrupta nos valores de resistividade nas profundidades de 12,0 a 38,0 metros, somente aumentando para algo em torno de 280 – 300 ohm.m, após os 38,0 metros, o que confirma a existência de uma grande zona de umidade mais elevada desde a porção oeste até a região central detectada na seção de caminhamento elétrico C.

A realização dos ensaios de sondagem elétrica vertical foi importante para definir algumas variações na camada de solo (solo mais superficial e residual seco/úmido), além de ser importante para determinar a posição da zona saturada e neste caso confirma o que fora observado nas linhas de caminhamento elétrico. Verificou-se que as áreas de maior extensão das zonas com maior umidade se encontram nas porções mais a oeste da área do aterro sanitário (centro-oeste/sudoeste), enquanto que a leste a zona de umidade apresenta uma amplitude e extensão em profundidade menor (conforme observado na SEV – 2 realizada ao final da Linha E), onde o ensaio indica valores de resistividade maiores (acima de 150 ohm.m).

A Tabela 14 mostra, resumidamente, as variações dos valores de resistividade obtidos pelas sondagens elétricas verticais (valores de resistividade aparente inferiores a 50 ohm.m), marcadas pela presença da zona de umidade e o terreno com solo mais seco (com valores de resistividade superiores a 150 ohm.m). Esta é uma informação importante para as áreas de disposição de resíduos, pois pode permitir identificar lugares que no futuro que podem ser potencialmente mais afetados pelo chorume, com sua percolação mais facilitada. As seções das SEVs auxiliaram na elaboração de modelos mais detalhados para diferenciação entre as áreas onde os materiais naturais são mais secos ou marcados pela influência da zona de umidade. As interpretações das SEVs serviram de base para refinar a os modelos 2D e 3D elaborados no software *Surfer* que serão apresentados no item 5.6.

**Tabela 14** - Modelo geoeletrico com o resumo das 3 SEVs indicando as variações de resistividade.

Camada	Profundidade (m)	Resistividade (ohm.m)	Interpretação
1	0 – 2,0	50 – 150	Solo Superficial
2	2,0 – 10,0/12,0	40 – 180/200	Solo Residual Maduro – Seco e úmido
3	10,0 – 38,0 à 70,0	30 – 40 - 1000/2000	Saprólito c/umidade, Diabásio e Solo Residual c/ umidade
4	12,0 – 38,0	40/50 – 280/300	Diabásio e Arenito

As sondagens elétricas verticais também foram importantes para estimar a dimensão da espessura do corpo do diabásio e também por identificar a presença do litotipo arenito em profundidades de cerca de 70,0 metros, abaixo do corpo de diabásio.

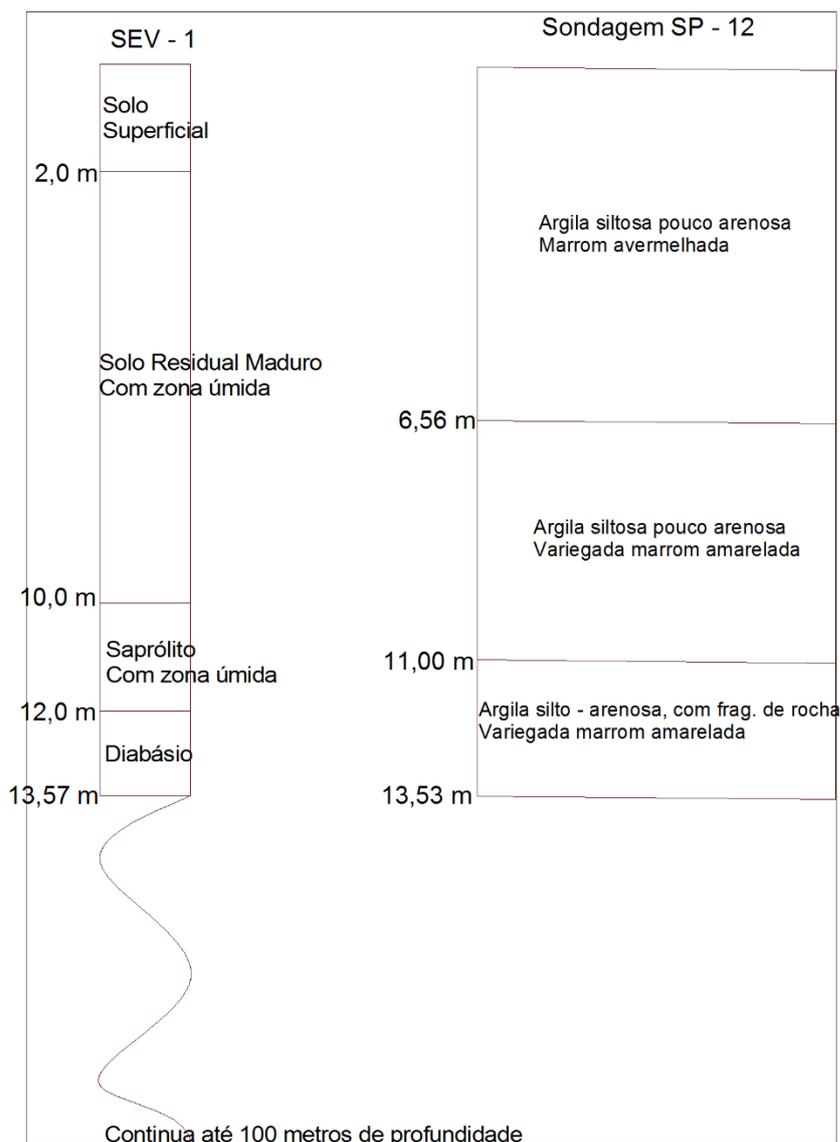
### 5.5.2 - Comparação entre as SEVs e as sondagens SPT próximas

A sondagem SPT mais próxima da SEV – 1 é a sondagem SP – 12, para a SEV – 2 a sondagem mais próxima é a SP – 05, enquanto que para a SEV – 3 a mais próxima é a sondagem SP – 11.

#### 5.5.2.1 - Comparação entre a SEV – 1 e a sondagem SP – 12

A interpretação do perfil da SEV-1 e a descrição do perfil da sondagem SP-12 estão bem próximos, no que se refere a determinação da profundidade do solo residual argiloso maduro e do solo residual argiloso mais jovem com fragmentos de rocha (Figura 63). O arranjo geofísico da sondagem elétrica vertical conseguiu determinar com relativo acerto as mudanças de um solo mais evoluído para um solo residual com fragmentos de rocha.

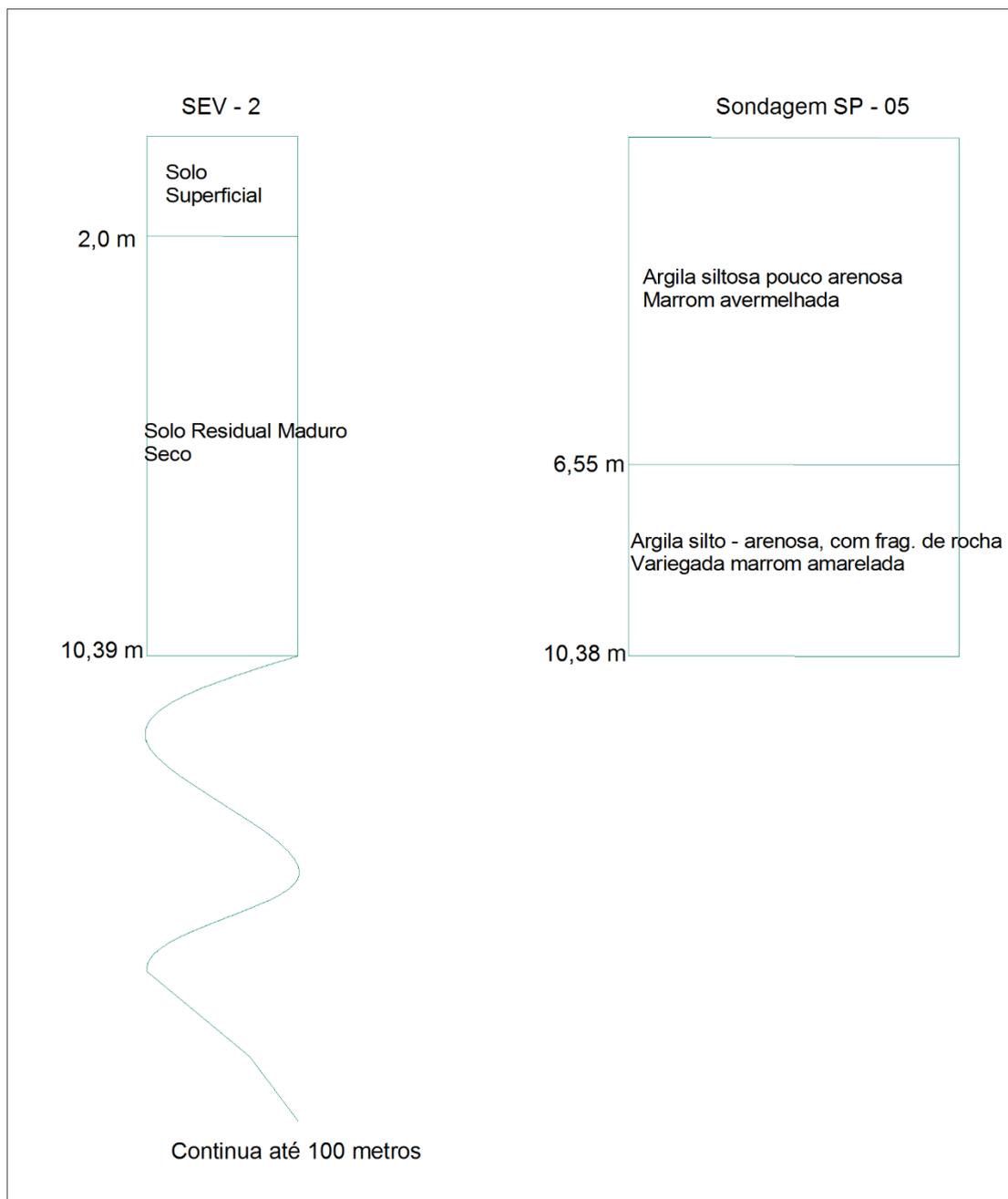
A interpretação da zona de umidade confere com o que foi encontrado na linha de caminhamento elétrico D em sua porção leste, corroborando a interpretação da camada de solo como zona úmida (solo residual maduro). No entanto, a sondagem SPT-12 não identifica a presença do nível de água subterrânea.



**Figura 63** - Comparação das unidades geoeletricas da SEV - 1 com as camadas descritas na sondagem SP - 12.

### 5.5.2.2 - Comparação entre a SEV - 2 e a sondagem SP - 05

A Figura 64 apresenta a interpretação dos resultados da SEV-2 comparados com a descrição das camadas de solo da sondagem SP-5. Observa-se que resistividade elétrica não permitiu detectar a mudança na composição das unidades de solo, como o aumento da fração areia entre as unidades argila silto-arenosa e argila siltosa pouco arenosa. No entanto, com a sondagem elétrica vertical foi possível identificar, com relativa precisão, o limite entre a camada de solo e a rocha, localizado em uma profundidade de cerca de 10 a 11 metros.



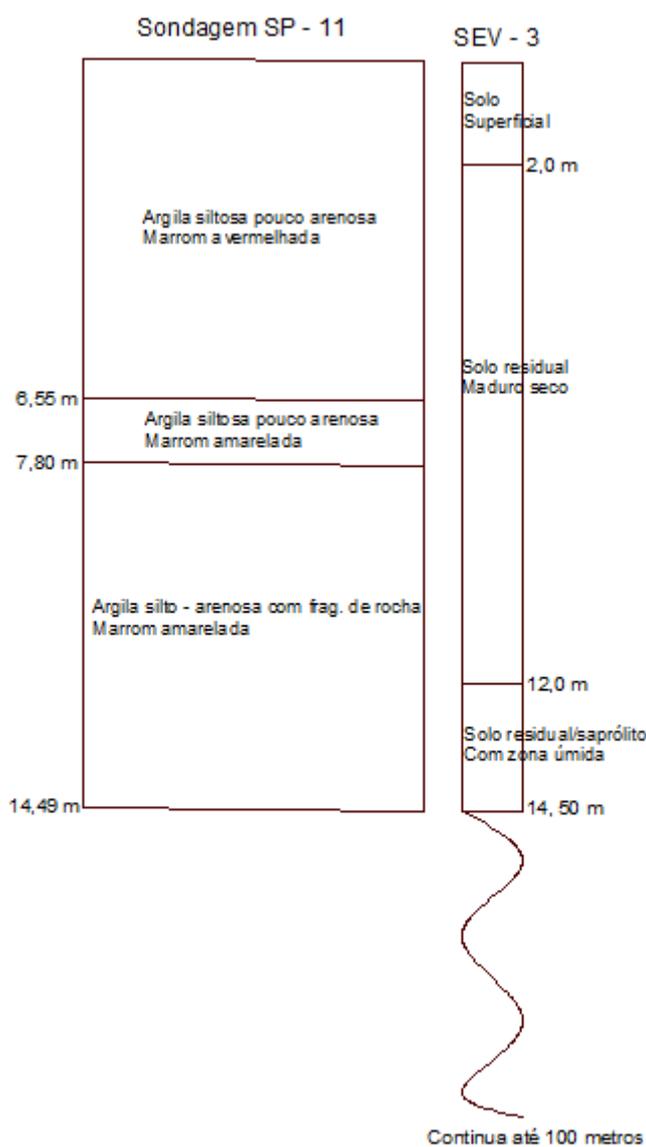
**Figura 64** - Comparação das unidades geológicas interpretadas pela SEV - 2 com a descrição das unidades descritas pela sondagem SP - 05.

### 5.5.2.3 - Comparação entre a SEV – 3 e a sondagem SP – 11

Comparando-se a SEV – 3 com a Sondagem SP – 11, observa-se que uma mesma unidade geológica representa três camadas de solos diferentes. A unidade geológica interpretada como sendo solo residual maduro seco, cuja as profundidades variam de 2 até 12 metros, abrange as três camadas de solo argiloso descritas pela sondagem SP – 11 (conforme

Figura 65). Por outro lado, a SEV evidenciou a profundidade indicativa do saprólito e topo rochoso, aos 14,50 metros de profundidade, em concordância com o observado na sondagem SP – 11. No entanto, a presença de uma zona de baixa resistividade, causada provavelmente pelo aumento da umidade no saprólito dificultou precisar melhor a profundidade do topo rochoso.

É importante lembrar que a sondagem SPT se localiza em uma área fora do limite do aterro sanitário, mas como em termos de localização é a que se encontra mais próxima do ponto de sondagem elétrica vertical, foi utilizada para efetuar a comparação.



**Figura 65** - Comparação das unidades geológicas da SEV - 3 com as unidades descritas pela sondagem SP – 11.

#### 5.5.2.4 – Comparação com os resultados das SEVs realizadas no relatório de impacto ambiental

Foram realizadas 5 sondagens elétricas verticais ao longo da área do aterro sanitário que foram abordadas no relatório de impacto ambiental. Na descrição do relatório não é informado as coordenadas das 5 SEVs ao longo da área do empreendimento.

As principais unidades descritas por estas sondagens elétricas verticais são: de de 0 a 1 metro de profundidade, corresponde a um solo mais superficial que correlacionando com as sondagens SPTs obtidas por eles estaria relacionada a um solo coluvionar; a outra unidade que varia de 1 a 4/7,5-10 metros de profundidade é descrita como solo saturado; por último a unidade descrita como rocha básica sã abrange profundidades de 4,5/7/10 até 50 metros de profundidade.

Conforme mencionado em FIPAI (2010), o solo mais superficial interpretado como coluvionar tem material de natureza pelítica de composição muito próxima ao solo de material residual derivado da alteração do diabásio, algo muito próximo ao que fora encontrado nas sondagens SPT utilizadas neste trabalho (feitas pela companhia Prospec). A informação obtida pela geofísica mostra que o topo rochoso se encontra em maior ou menor profundidade dependendo de sua localização ao longo da área do aterro sanitário.

A Tabela 15 retirada de FIPAI (2010) mostra as 5 sondagens elétricas verticais descritas pelo EIA/RIMA.

**Tabela 15** - Unidades classificadas pelas sondagens elétricas verticais.

SEV	Horizonte		
	1 – Solo	2 – Solo Saturado	3 – Rocha básica sã
01	De 0 a 1 m	De 1 a 4,5 m	De 4,5 a 50 m
02	De 0 a 1 m	De 1 a 10 m	De 10 a 70 m
03	De 0 a 1 m	De 1 a 7 m	De 7 a 70 m
04	De 0 a 1 m	De 1 a 10 m	De 10 a 50 m
05	De 0 a 1 m	De 1 a 7 m	De 7 a 50 m

Fonte: Retirado de FIPAI (2010).

## 5.6 - Determinação da superfície do Topo Rochoso

Por meio das análises e interpretações das seções de resistividade e correlações com as sondagens SPT foi possível identificar as faixas de resistividade acima de 300 ohm.m como característica do início do corpo rochoso. Portanto, este limite seria característico do topo rochoso, representado pelo contato do solo residual maduro + residual jovem com a rocha menos alterada. Este nível coincidiu, para a maioria das sondagens SPT, com a profundidade do impenetrável a percussão.

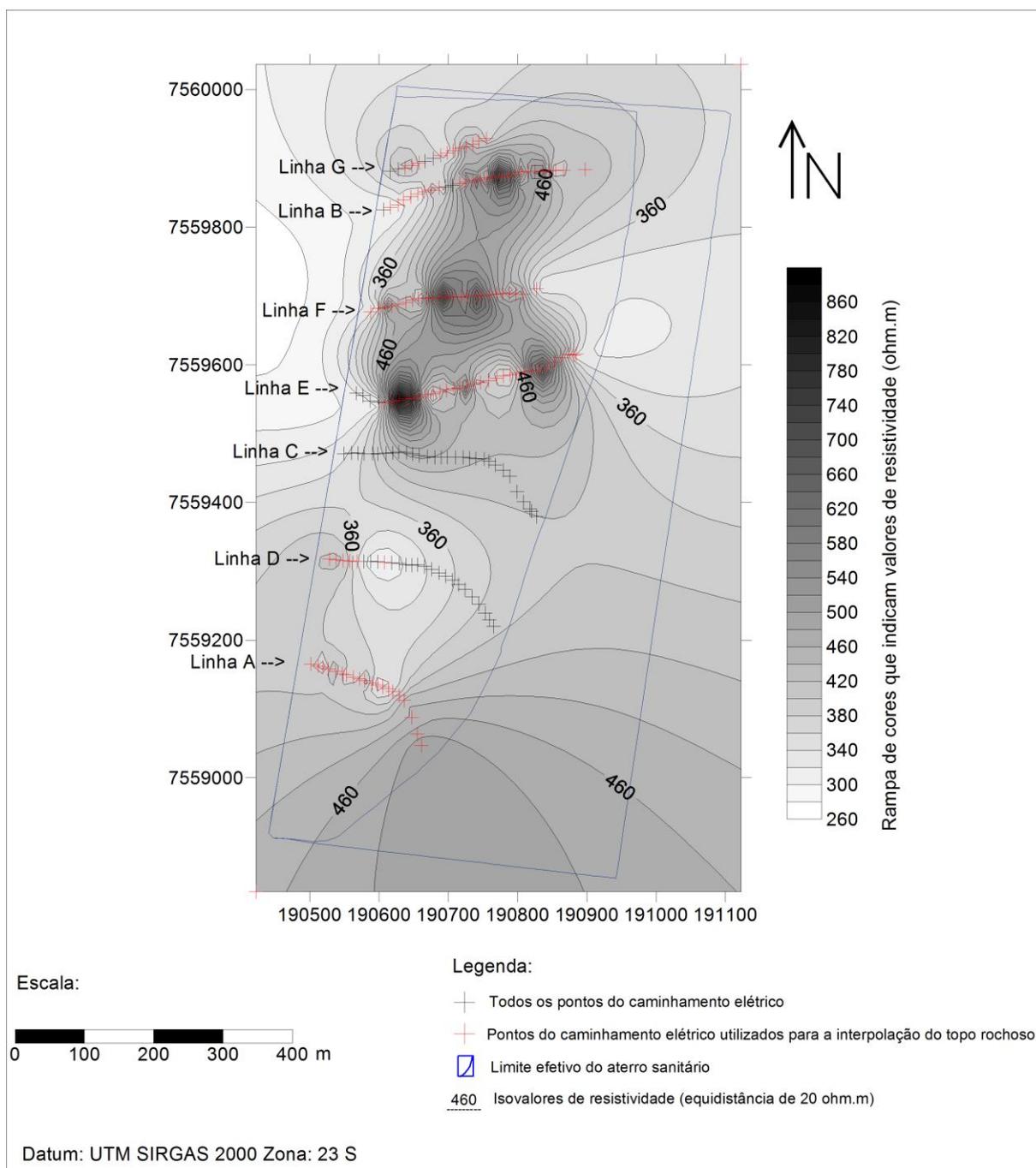
O mapa interpolado com os dados de resistividade maiores que 300 ohm.m de todas as linhas de caminhamento elétrico, obedecendo a sequência das linhas de sul para norte (A -> D -> C -> E -> F -> B -> G), é apresentado na Figura 66. É importante ressaltar que neste mapa está representada uma área mais ampla cobrindo toda a área do empreendimento e não somente a área destinada a disposição dos resíduos no aterro sanitário. Como a coleta dos dados geofísicos não abrange toda a área do empreendimento, deve-se ter em mente que o erro das interpolações dos dados de resistividade tende a ser maior nas regiões extrapoladas.

Neste mapa observa-se que os maiores valores de resistividade (> 460 ohm.m) aparecem com maior frequência nas localizações centro-norte, centro-nordeste e norte-nordeste ao longo das linhas E (no início a oeste e no final a leste), F, B e G, também se encontra no extremo sul-sudoeste e sul-sudeste (a sul da linha de caminhamento elétrico A). Ao passo que nas localizações nordeste e leste, ocorrem os isovalores de resistividade (entre 300 e 360 ohm.m).

É importante ressaltar que onde se encontram os maiores valores de resistividades (interpretados como topo do diabásio), conforme apresentado pelo mapa interpolado, além das interpretações das linhas de caminhamento elétrico, sondagens SPT e observações de campo indicam que a rocha é encontrada muito próxima à superfície ao contrário do que fora observado nas porções mais ao sul da área do aterro sanitário (especificamente entre as Linhas A, D e C) que indicam resistividades menores do que 360 ohm.m.

Para onde há a operação dos resíduos sólidos nas proximidades das Linhas B e G, deve-se notar que a proximidade da rocha sã na superfície, pode acarretar em maiores problemas operacionais e de custos para o empreendimento.

O mapa interpolado do topo rochoso está representado em tons de cinza, sendo o menor valor das isolinhas representados por tons mais próximos ao branco, enquanto que os valores de cinza escuro a preto correspondem aos maiores valores das isolinhas de resistividade. Na Figura 66 também foi colocado o limite do aterro sanitário de São Carlos e as linhas do caminhamento elétrico em preto, sendo que os pontos em vermelho representam os locais em que foi identificada a presença do topo rochoso nas respectivas linhas de CE.



**Figura 66** - Mapa interpolado com valores de resistividade característicos do maciço rochoso.

### **5.6.1 - Obtenção de modelo digital de elevação (MDE) com os dados de superfície do topo rochoso**

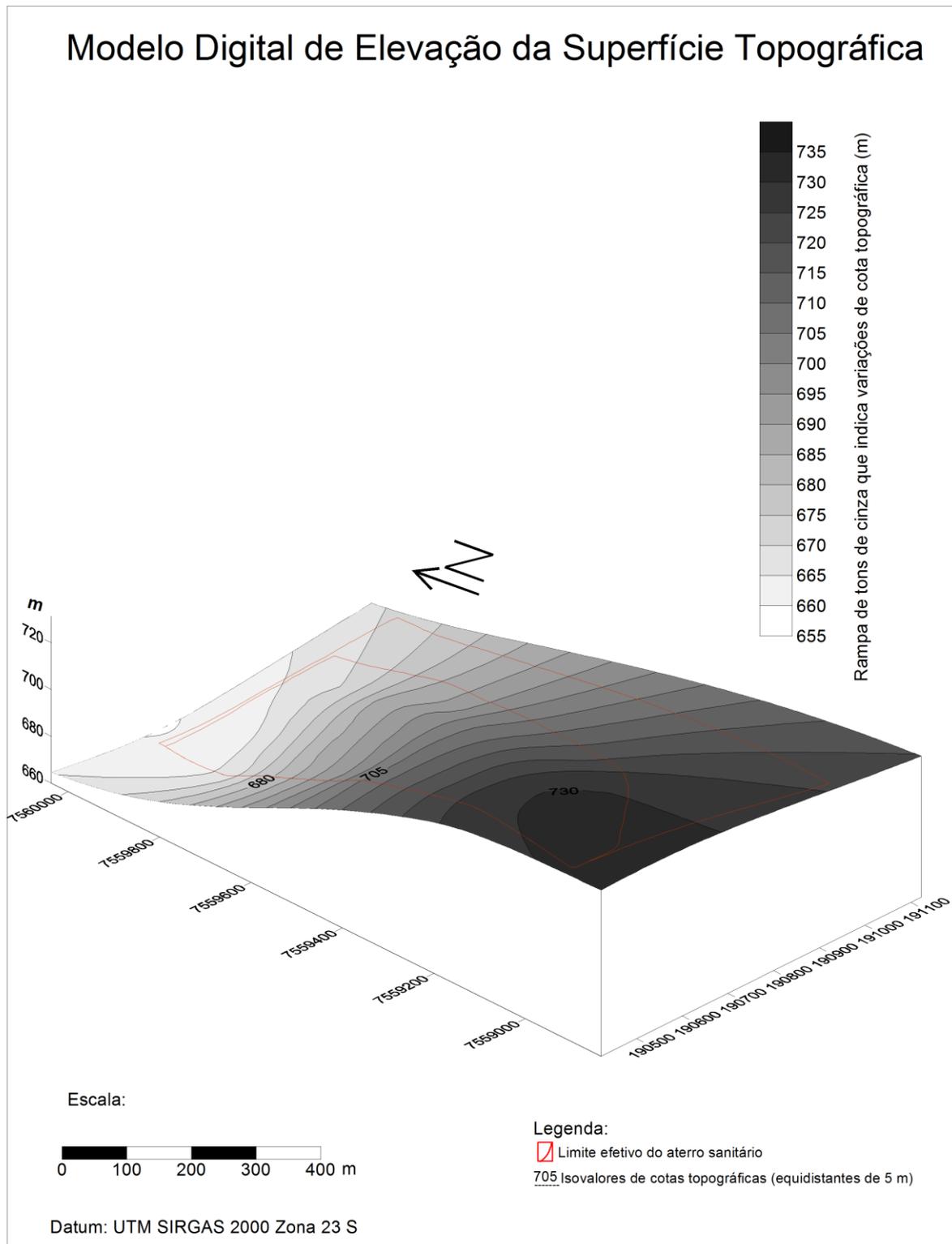
Conforme procedimento descrito no item materiais e métodos, o MDE do topo rochoso teve como base a determinação das cotas topográficas de cada ponto com valor de resistividade característico do topo rochoso. O MDE gerado para a superfície do topo rochoso varia ao longo de toda a área do aterro sanitário, dado que a profundidade do topo rochoso não se distribui de maneira uniforme em toda área (Figura 68).

A área correspondente ao aterro sanitário tem uma declividade média de 8% e apresenta um desnível de cerca de 75 metros entre a parte sul (mais alta) e parte norte (mais baixa), como pode ser observado na Figura 67. Topograficamente a área apresenta uma altitude de 730 metros na parte sul e uma altitude de 655 metros na parte norte. Enquanto que para o topo rochoso a maior altitude topográfica é de cerca de 720 metros e a menor altitude é de 650 metros, na parte sul e norte respectivamente.

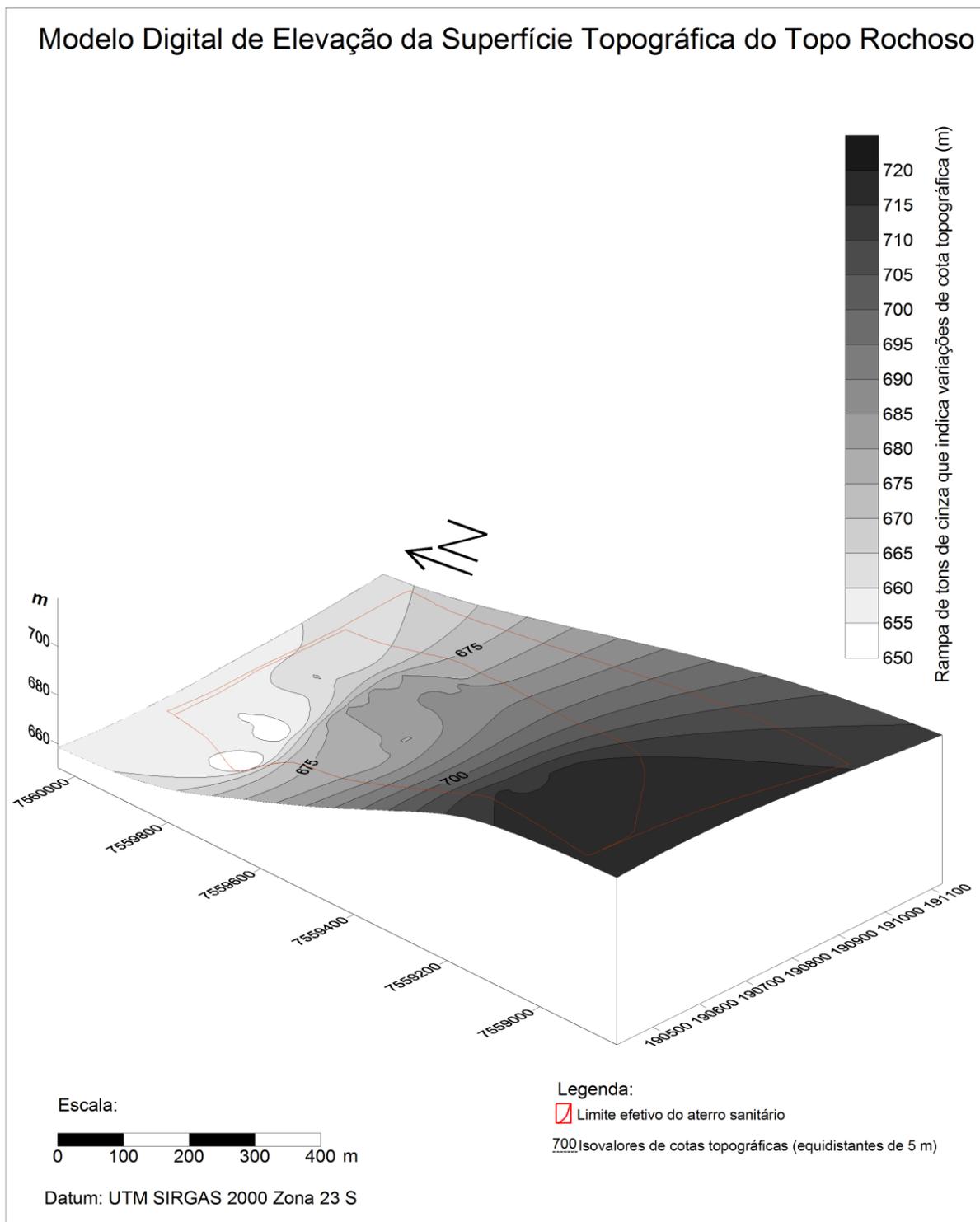
Observando-se a superfície do topo rochoso (Figura 68), percebe-se um mergulho na direção nordeste (NE), coincidindo com as porções onde a topografia apresenta altitudes por volta de 660 metros. O corpo de diabásio é contínuo ao longo de toda a área do aterro sanitário sendo um importante fator no controle dos fluxos de umidade na área.

Nas regiões onde o topo rochoso se encontra mais próximo à superfície exerce um maior controle sobre o fluxo de água subterrânea que se infiltra, direcionando as linhas de fluxo para as regiões de solos mais espesso, uma vez que o diabásio é praticamente impermeável.

Comparando os MDEs da superfície topográfica com a superfície do topo do diabásio, nota-se que as maiores diferenças das cotas topográficas ocorrem na porção central da área do aterro sanitário (próximos das linhas de caminhamento elétrico D e C), fato este que fora confirmado pela interpretação do mapa interpolado de profundidade do topo rochoso, onde que nestas porções indicam maiores profundidades do topo do diabásio. Já nas localizações a norte do aterro sanitário os dois modelos digitais apresentam uma diferença menor entre as cotas topográficas, o que confirma com o que fora observado durante a interpretação das linhas de CE, sondagens SPT e mapas interpolados que o topo da rocha se encontra próximo à superfície nestas porções.



**Figura 67** - Modelo Digital de Elevação da Superfície Topográfica.

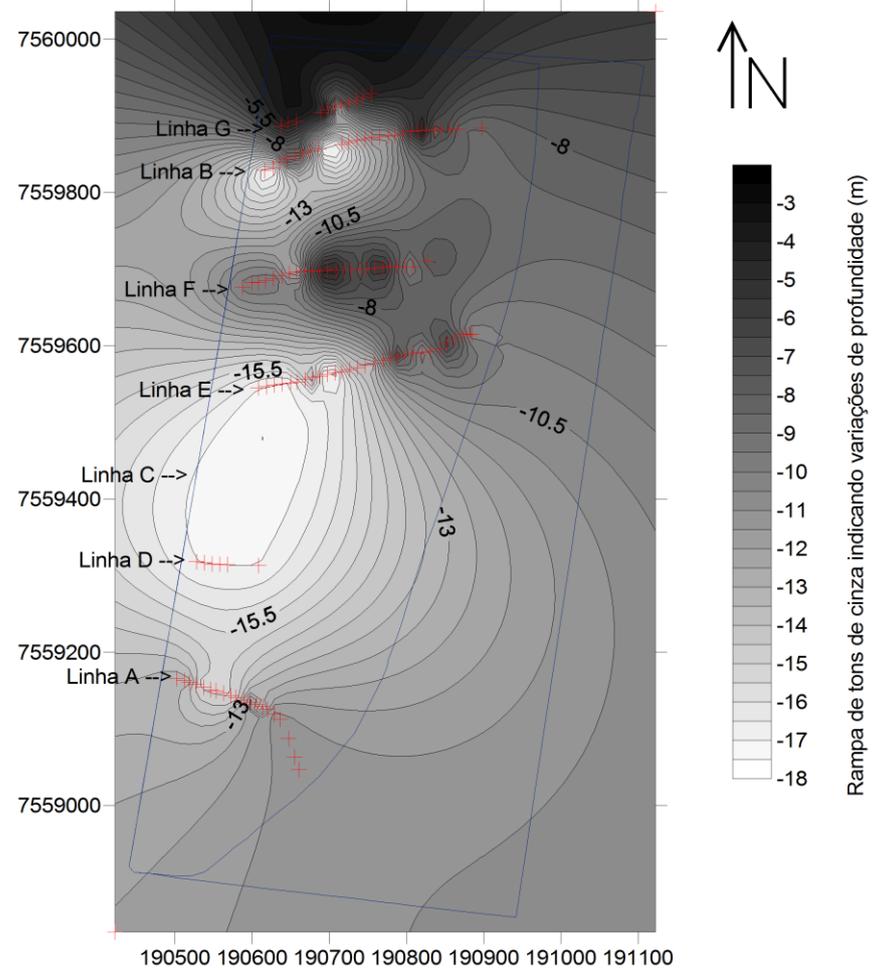


**Figura 68** - Modelo Digital de Elevação do topo rochoso.

O mapa da Figura 69 apresenta a profundidade do topo rochoso com isolinhas equidistantes de 0,5 metros. O que se observa é que o topo rochoso se encontra em profundidades médias que variam entre 8 a 15,5 metros, onde os tons de cinza mais claros representam as linhas de isovalores de maior profundidade, enquanto que os tons de cinza

mais escuro, representam as menores profundidades. A tendência observada é de profundidades maiores nas porções centro-oeste entre as linhas de caminhamento D e C, de até 18 metros de profundidade e sudoeste ao sul da linha de caminhamento elétrico A com isovalores que podem atingir 13 metros de profundidade. Enquanto que nas localizações ao norte da área do aterro sanitário, que abrangem as porções oeste e leste das linhas de caminhamento elétrico B e G, o topo do diabásio está mais próximo da superfície com isovalores menores do que 5 metros e 7 metros ao leste das linhas de caminhamento E e F.

## Mapa Interpolado de Profundidade do Topo Rochoso



Legenda:

- + Pontos de Caminhamento Elétrico utilizados para a interpolação do topo rochoso
- Limite efetivo do aterro sanitário
- 13 Isovalores de profundidade do topo rochoso (equidistantes de 0,5 m)

Escala:



Datum: UTM SIRGAS 2000 Zona 23 S

**Figura 69** - Mapa interpolado de profundidade do topo rochoso.

### 5.6.2 - Mapas da superfície interpolada da Zona Úmida

O mapa interpolado (Figura 70) apresenta a distribuição dos valores de resistividade correspondentes às áreas identificadas como zonas de umidade elevada. Estão representados neste mapa somente os valores de resistividade inferiores a 68 ohm.m, tendo sido considerados somente os pontos onde se identificou a presença da zona de umidade, indicados em vermelho na Figura 70.

Para o mapa interpolado do topo da zona úmida, observa-se que existe uma grande concentração de zona úmida entre as linhas de caminhamento elétrico D (a leste no final da seção), Linha C e E (ambos a oeste no início da seção) que abrange a porção central da área do aterro sanitário. Correlacionando esta zona úmida, cujo os valores de resistividade são menores do que 40 ohm.m com o mapa interpolado da profundidade do topo da zona de umidade é observado que além dessa zona de umidade apresentar uma relativa acentuada extensão lateral também ocorre desde profundidades de 5 metros até 17 metros.

Esse comportamento observado nos mapas interpolados corrobora com o que fora interpretado para as linhas de caminhamento elétrico (mais especificamente Linhas D, C e E) como zona de umidade e também apresenta uma certa correlação com as observações de campo e as sondagens SPT próximas destas linhas que indicam maior espessura da camada de solo, portanto com o topo do diabásio encontrado em maiores profundidades.

Em contrapartida, nas áreas onde o topo rochoso é próximo da superfície (porções norte-noroeste), as zonas úmidas deixam de ter uma grande extensão em profundidade, conforme observado pelas linhas F e B e também corrobora com o que fora observado durante as seções de CE, sondagens SPT e interpolações do topo do diabásio.

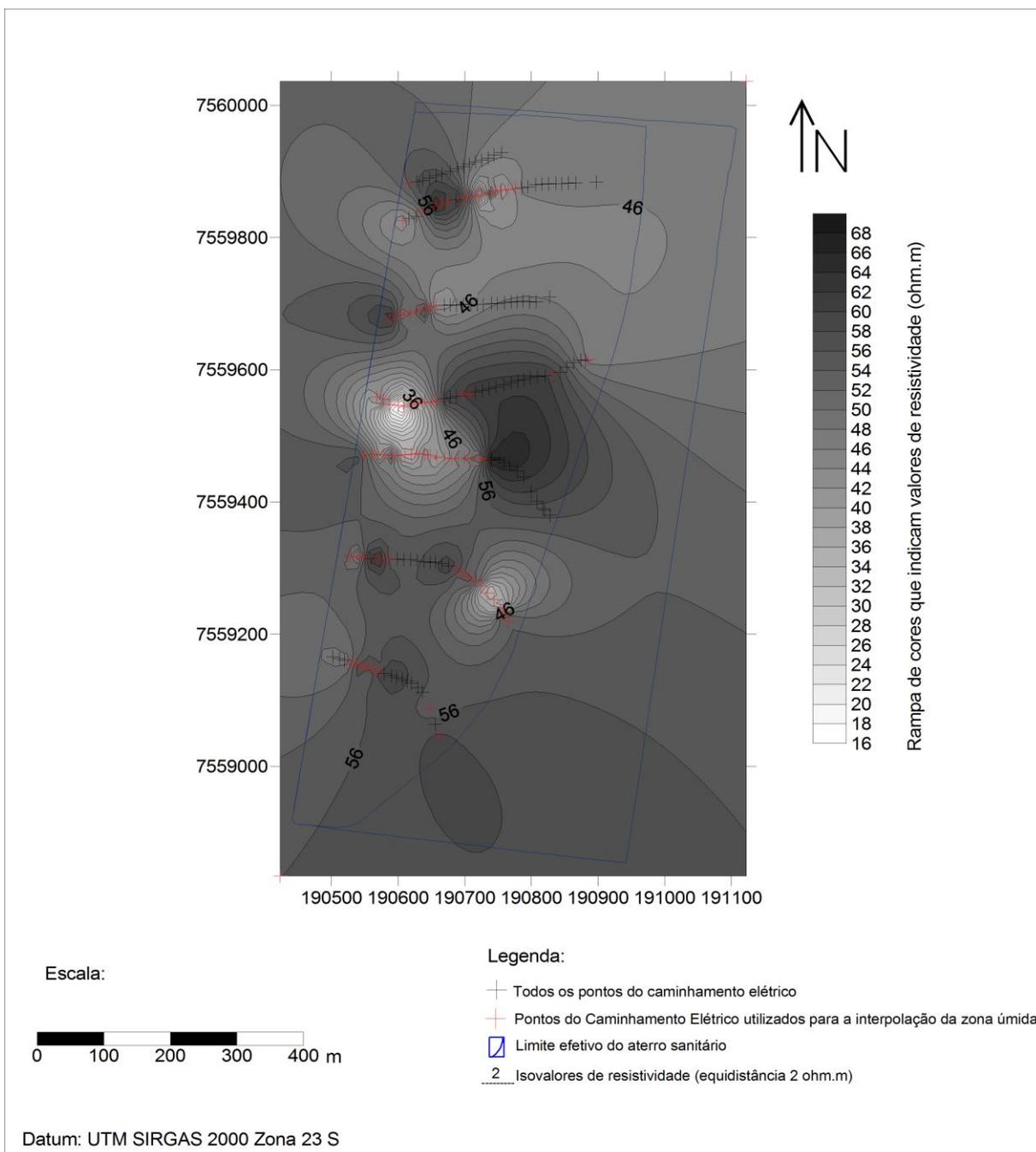
O Modelo Digital de Elevação (MDE) da Figura 71 mostra os valores de cota do topo desta zona de umidade, enquanto que o MDE da Figura 72 apresenta os vetores que indicam os sentidos de fluxo preferencial de água. Observando-se ambos os MDEs percebe-se que os fluxos preferenciais estão nas direções oeste e noroeste. Assim, as maiores densidades de fluxos ocorrem nas direções noroeste (onde a topografia diminui para cotas em torno de 680 a 660 metros).

Comparando os mapas obtidos da interpolação das profundidades do topo rochoso e da zona de umidade, observa-se que nas porções mais a norte e nordeste, o topo rochoso está em

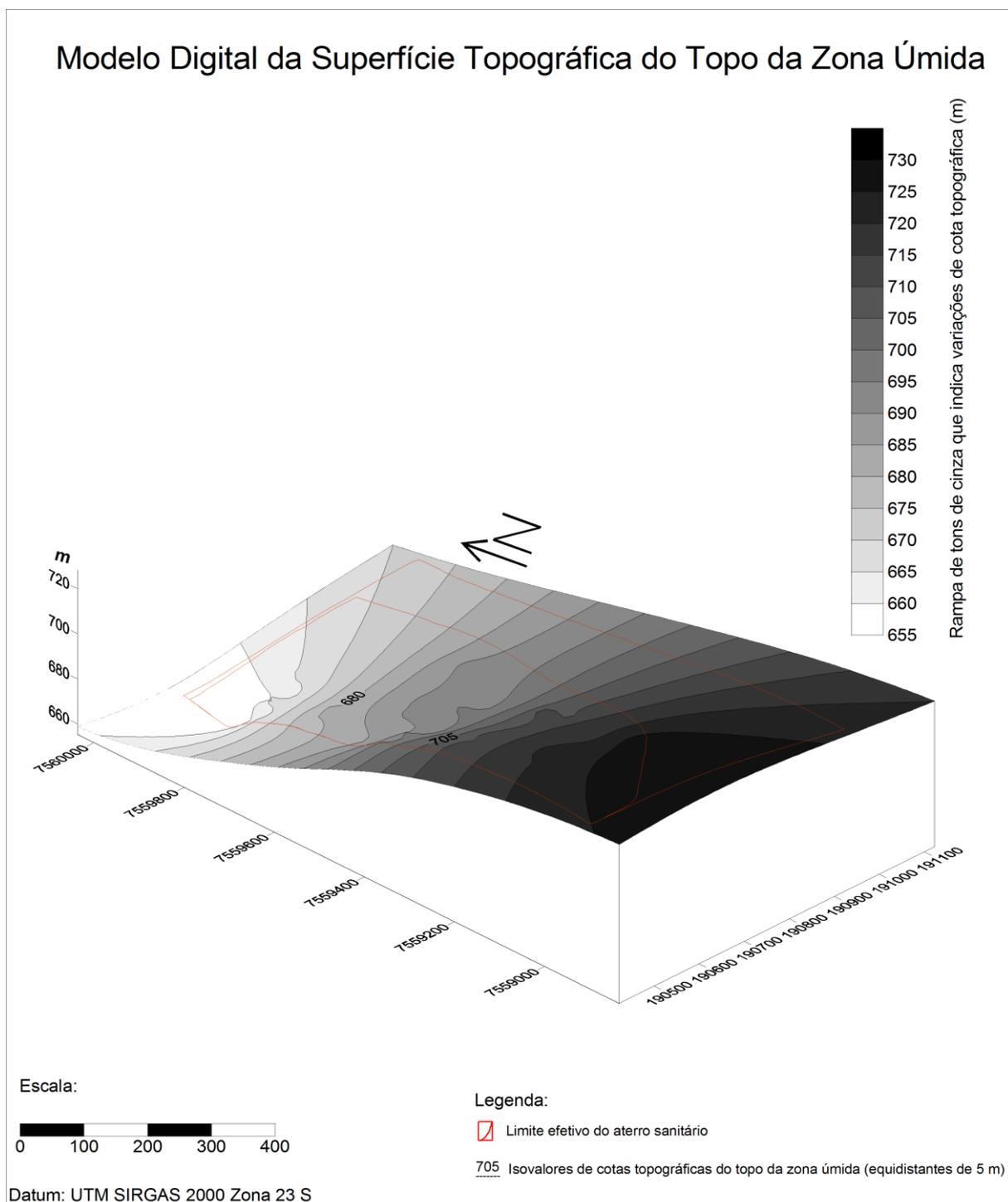
profundidades próximas da superfície, enquanto que para a zona úmida, as profundidades nessa porção também são mais próximas à superfície. Para as áreas de maior profundidade para a zona úmida, o topo rochoso também se encontra em maiores profundidades.

Comparando o MDE da zona úmida com o MDE da superfície topográfica (Figura 67), se observa que as maiores diferenças entre as cotas topográficas entre os MDES ocorrem na porção central (nas proximidades das Linhas D, C e E), confirmando o que fora interpretado nas linhas de CEs, sondagens e no mapa interpolado de profundidade do topo da zona úmida. Enquanto que para as porções norte-noroeste, as diferenças entre as cotas topográficas dos dois modelos são menores devido à proximidade do topo do diabásio com a superfície e conseqüentemente a uma menor extensão em profundidade que a zona de umidade ocupa nessa porção.

Portanto, as variações topográficas do topo rochoso parecem exercer um controle na distribuição das zonas de maior umidade, como já observado anteriormente na análise individual dos caminhamentos elétricos.

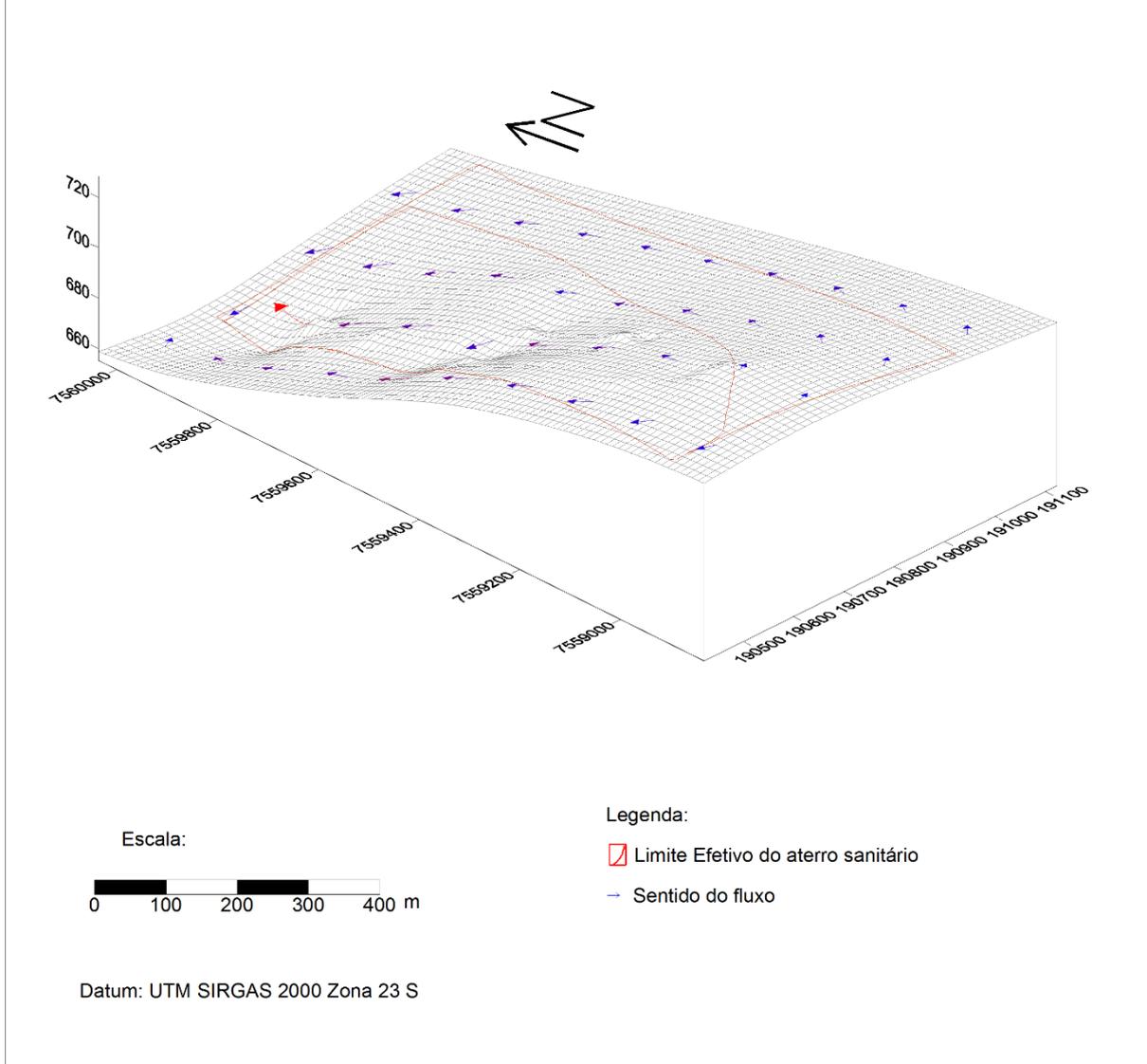


**Figura 70** - Mapa Interpolado com valores de resistividade característicos da Zona de Umidade.



**Figura 71** - Modelo Digital de Elevação Superfície Topográfica Topo da Zona de Umidade.

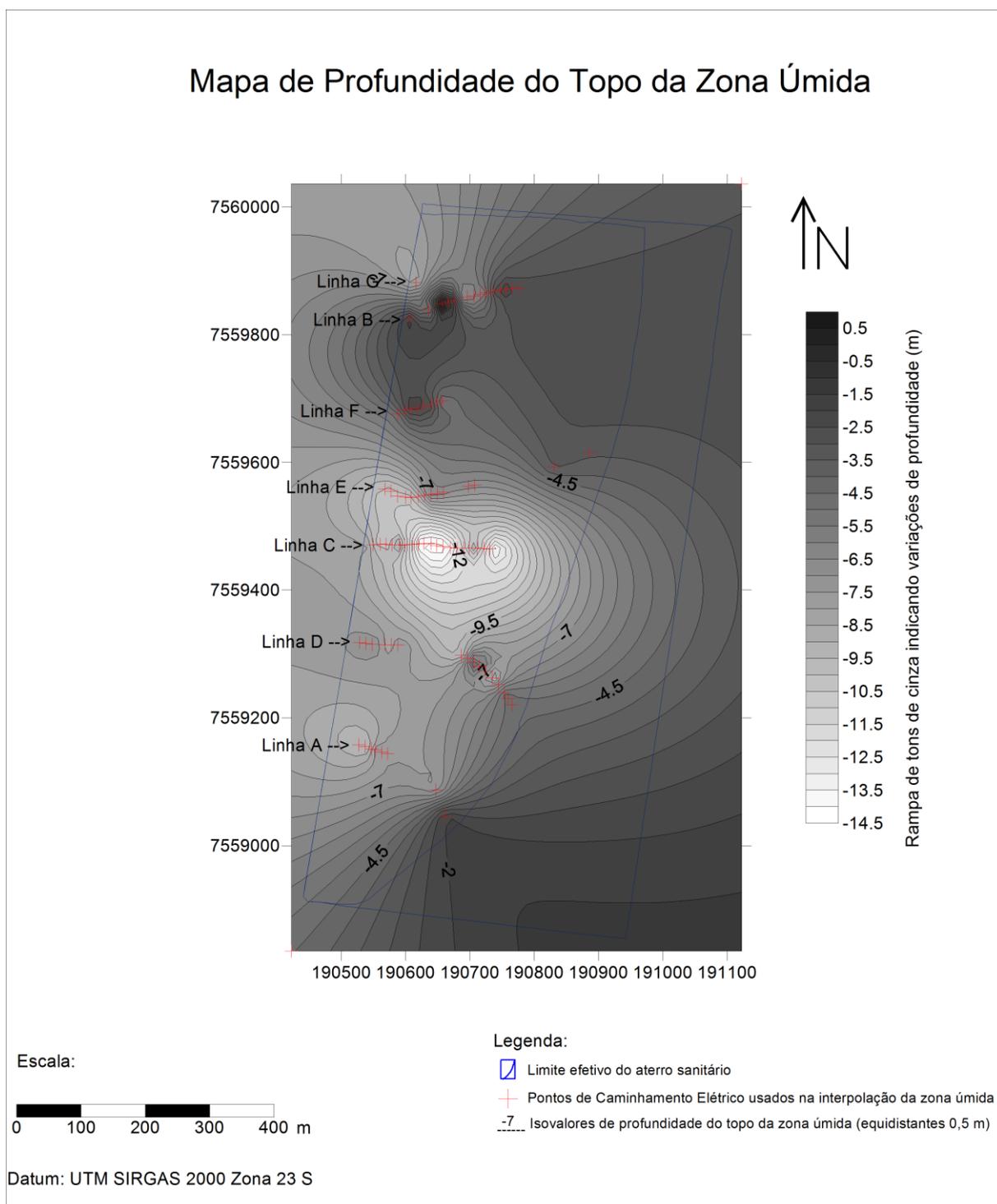
## Modelo Digital de Elevação com informação de vetores



**Figura 72** - Modelo Digital de elevação com a indicação da direção de fluxo preferencial.

A variação espacial das profundidades do topo zona úmida em toda a área do aterro sanitário é apresentada na Figura 73. De um modo geral, a zona úmida aparece em maiores profundidades (cerca de 9,5 a 12 metros) nas áreas centrais do aterro. As menores

profundidades estão localizadas a sul – sudeste e norte – nordeste do mapa, com profundidades de 2 metros aproximadamente. Contudo deve-se ressaltar que esta região apresenta um maior erro devido à extrapolação das curvas interpoladas para um pouco além a área do aterro sanitário, uma vez que os caminhamentos elétricos foram realizados, somente na área destinada à instalação das células do aterro nesta etapa inicial da operação.



**Figura 73** - Mapa da profundidade da superfície do topo da zona de umidade.

## 6 - CONCLUSÕES

### 6.1 - Sondagens Elétricas Verticais (SEV)

Os ensaios geofísicos do tipo SEV permitiram identificar e caracterizar com precisão as camadas em função da profundidade, espessura, diferenças nos valores de resistividade, as diferentes camadas geoeletricas. Tendo uma boa correlação com as interpretações das linhas de caminhamento elétrico e sondagens SPT próximas aos ensaios geofísicos.

Em suma, as SEVs permitiram identificar a profundidade da zona de umidade e delimitar a espessura do corpo de diabásio em grandes profundidades, sendo que em uma delas foi identificado a presença do arenito, identificando com relativa precisão o contato entre os litotipos.

A comparação dos resultados da SEV realizados neste trabalho com os resultados encontrados na SEV utilizadas no EIA/RIMA se torna dificultada, uma vez que não se teve acesso direto aos pontos de SEV realizados no EIA/RIMA e suas respectivas localizações geográficas para se ter uma melhor análise em profundidade ao longo da área do aterro sanitário.

Todos os valores de resistividade, de espessura e profundidade dos níveis geoeletricos, suas respectivas relações com as interpretações das linhas de CE e resultados de sondagens SPT nas profundidades de saprólito/topo do diabásio estão de acordo com o que foi interpretado durante as seções, foi visto na literatura consultada e com o modelo proposto para a caracterização do aterro sanitário.

As interpretações das SEVs auxiliaram no entendimento do comportamento geológico do local, explicitando o contato entre o solo e a rocha e entre diferentes tipos de litologias.

O método de eletrorresistividade associado com a técnica da SEV e o arranjo Schlumberger, utilizados na área do aterro sanitário do município de São Carlos, mostraram-se eficazes na caracterização da espessura do corpo do diabásio e a que profundidade este se encontra e também quanto à continuidade da intrusão deste litotipo e o contato com o arenito evidenciado em uma das SEVs a mais de 70 metros de profundidade.

## 6.2 - Caminhamento Elétrico

As sete linhas de caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo permitiram identificar zonas de baixa resistividade que são distribuídas tanto em profundidade quanto lateralmente ao longo da área do aterro sanitário. Tais zonas de baixa resistividade foram interpretadas como zonas úmidas e estão associados com valores de resistividade  $<62,6$  ohm.m e apresentam grande extensão territorial especialmente nas localizações à sul do aterro sanitário.

As linhas de caminhamento elétrico A, D e C apresentam zonas de umidade de grande extensão lateral abrangendo profundidades de até 17 metros, havendo uma boa correlação com as SEVs localizadas entre estas linhas. Os resultados de interpretação destas três linhas (especialmente das linhas D e C) mostraram que o topo do diabásio praticamente não aparece em profundidades próximas da superfície nesta região.

As linhas de caminhamento elétrico E, F, B e G apresentam zonas de umidade de poucas extensões laterais e localizadas em profundidades mais próximas da superfície, em contrapartida o topo do diabásio está em profundidades próximas da superfície.

Os resultados do conjunto de linhas de caminhamento elétrico permitiu identificar duas regiões distintas: a primeira, ao sul, indica zonas de baixa resistividade ( $<62,6$  ohm.m) mais amplas e em profundidades de até 17 metros (caso da Linha C); e a segunda, nas porções centrais e norte do aterro, o predomínio de zonas de resistividade ( $>346$  ohm.m) em profundidades próximas da superfície o que mostra um controle do corpo de diabásio quanto à distribuição da zona úmida e sua amplitude para estas localidades do aterro sanitário.

Desse modo, conclui-se que as investigações das linhas de CE e seus resultados apresentados em seções de resistividade mostraram-se eficientes no quesito de identificação do topo do diabásio e determinação da zona úmida.

A correlação das linhas de CE com os pontos de sondagem SPT não foram boas. É importante lembrar que os ensaios SPT e os ensaios de geofísica foram realizados em diferentes anos e que em todos os ensaios SPT não foram encontrados nível d'água, conforme indicado na interpretação das seções de resistividade, indicando a necessidade de realizar mais ensaios diretos ao longo da área do aterro sanitário para confirmar a existência de lençol freático e a que profundidade se encontra, conforme indicado pela geofísica.

Em contrapartida, a indicação do topo rochoso pela geofísica se encontra de acordo com algumas sondagens SPT elucidadas no EIA/RIMA para o estabelecimento do aterro sanitário na região de São Carlos e também está de acordo com as observações de campo onde se encontrou blocos de diabásio próximos à superfície escavados pela equipe que administra o aterro sanitário nas proximidades da célula de ativação.

As alterações dos valores de resistividade podem indicar, uma tendência de caracterização de *background* para a área do aterro sanitário, sendo um importante método investigativo e de baixo custo auxiliando na fase de operação e pós-operação do aterro sanitário.

As seções de cargabilidade mostraram a tendência de aumentar o valor conforme o aumento da profundidade em cada seção. Os resultados mostrados na cargabilidade se assemelham com os resultados de resistividade, principalmente no que se refere a identificar a presença do topo do diabásio e das regiões de saprólito/topo rochoso. O aumento de cargabilidade foi um fator importante para confirmar a posição do topo do diabásio evidenciado nas seções de resistividade.

De uma maneira geral pode-se afirmar que as seções de resistividade e cargabilidade permitiram uma boa caracterização do aterro sanitário, mas não eliminam a necessidade de métodos investigativos diretos. No entanto, podem auxiliar na identificação dos locais onde devem ser instaurados poços de monitoramento, feitas novas sondagens SPT, especialmente nas áreas em que a geofísica indicou a presença de blocos de matações ou a presença de zonas de maior umidade no solo.

### **6.3 – Importância da Geofísica integrada com os métodos diretos de investigação**

É de suma importância correlacionar um método indireto como a geofísica com dados diretos como sondagens SPT. Deve-se considerar que a geofísica identificou com relativa precisão a profundidade do topo do diabásio e a profundidade da zona úmida, enquanto que as sondagens serviram de embasamento para a construção do modelo geológico para a área do aterro.

Para as sondagens SPT o que se observa é que, nas porções sul e central do aterro sanitário, as camadas de solo apresentam maiores espessuras (cerca de 12 a 13 metros de profundidade) do que nas sondagens SPT localizadas mais ao norte do aterro (próximos das

Linhas B e G), o que de fato corrobora com o que fora observado pelo método geofísico de que o topo do diabásio se encontra em maiores profundidades nas localizações centro e sul e mais próximos da superfície na posição norte.

Entretanto, deve-se ressaltar que as campanhas da geofísica e sondagens SPT foram feitas em diferentes épocas e que nenhuma das sondagens conseguiu encontrar nível d'água, encontradas nas seções de eletrorresistividade onde foram detectadas mudanças bruscas nos valores de resistividade, formando zonas mais condutivas e zonas mais resistivas em diferentes linhas de caminhamento elétrico.

As observações de campo também foram de suma importância para ajudar na construção do modelo, cuja observação de blocos de diabásio próximos à superfície, na região norte-nordeste do aterro, onde se localiza a cava de disposição de resíduos sólidos confirmando à proximidade do topo do diabásio na superfície indicada pela geofísica.

Os métodos geofísicos em conjunto com outros métodos diretos se tornam métodos importantes para caracterização de áreas de aterro sanitário e auxiliam na construção de um modelo geológico inicial com relativa eficácia e grande quantidade de informação.

#### **6.4 - Importância da Geofísica para a caracterização do aterro sanitário de São Carlos**

Uma das principais contribuições do estudo geofísico realizado foi a caracterização da área do aterro sanitário quanto a determinação da profundidade do topo rochoso e a indicação da direção dos fluxos preferenciais das águas em subsuperfície. A informação sobre a distribuição espacial da superfície do topo rochoso e de sua profundidade vai auxiliar no planejamento da escavação das futuras cavas para deposição do RSU. O mapa interpolado do topo rochoso mostra exatamente que nas porções centro-leste, norte-nordeste o topo rochoso localiza-se a profundidades muito próximas da superfície o que eleva o custo de escavação ou pode mesmo limitar a instalação das cavas de deposição em determinadas áreas.

Em relação à determinação das zonas de umidade, a identificação das localidades onde estas zonas aparecem em maior amplitude e extensão e onde identificou-se as direções preferenciais de fluxo de água são importantes para a alocação de poços de monitoramento. Especialmente a porção noroeste da área, onde há três células de deposição de RSU em atividade, é de vital importância, pois ocorrem fluxos de direções preferenciais neste sentido,

podendo ser zonas potenciais de contaminação no futuro, se houver vazamentos de líquidos percolados. Nestas áreas não há, até a presente data, poços de monitoramento instalados.

Considera-se ainda de suma importância a realização dos métodos geelétricos nesta fase da obra, ou seja, antes da deposição dos RSU, pois permite a obtenção de parâmetros que servirão de *background*, para futuros estudos geofísicos na região após a implantação do aterro. Uma vez que a resistividade elétrica dos solos é altamente afetada pelos líquidos percolados oriundos do aterro, qualquer contaminação poderá facilmente ser identificada, devido a alteração dos valores padrão de resistividade obtidos para a área.

## 7 - RECOMENDAÇÕES

Com o término do presente projeto de pesquisa, algumas recomendações para trabalhos futuros de mesma natureza podem ser feitas:

- Realização de ensaios geofísicos semelhantes, novamente, em um período entre 5 ou 10 anos, estando aproximadamente no meio do período de vida útil do aterro acompanhando a evolução no tratamento do chorume;

- Realização de análises físico-químicas em amostras de solo e de água que devem ser coletadas no aterro sanitário, para verificar se há ou não contaminação e para onde estes eventuais contaminantes se direcionam;

- Se possível, inclusão de mais ensaios geofísicos, utilizando outros métodos de investigação como o GPR e IP para trabalhos futuros, além da realização de outros ensaios geoeletricos do tipo dipolo-dipolo para linha de caminhamento elétrico, mas com diferentes configurações eletródicas abrangendo profundidades diferentes das que foram utilizadas neste trabalho.

- Realização de um maior número de SEVs, de maneira a permitir a montagem de seções correlacionando as informações das diversas SEVs;

- Realizar ensaios geofísicos com certa periodicidade em períodos mais chuvosos e períodos mais secos para contínuo monitoramento temporal e monitoramento da percolação de chorume ao longo das fases de operação do aterro sanitário;

- Para os futuros ensaios geofísicos a serem realizados no aterro sanitário, recomenda-se uma manutenção no padrão destes, uma vez que se torna mais fácil a compilação dos eventuais dados geofísicos e considerando a mesma metodologia de investigação consegue-se monitorar mais facilmente o aterro sanitário;

- Realização de mais ensaios diretos de investigação, poços de monitoramento devem ser colocados nas porções a oeste e noroeste do aterro sanitário, onde os mapas interpolados mostraram o fluxo preferencial da zona úmida, de maneira a evitar que o chorume chegue e contamine o lençol freático.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M. & BARBOSA, O. 1953; **Geologia das quadrículas de Piracicaba e Rio Claro, Estado de São Paulo**. BoI. DNPMIDGM, 143:96p.

ALMEIDA, F.F.M. (1964); **Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista**. Boletim do Instituto Geográfico e Geológico, São Paulo, n.41, p.169-263, 1964.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2011**. São Paulo, 2012. In : <http://www.abrelpe.org.br>. Acesso em Agosto de 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2013**. São Paulo, 2014. In: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2013.pdf>>. Acessado em: 04/12/2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Classificação de resíduos, **NBR 10004**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resíduos Sólidos Classificação, **NBR 10.004**. São Paulo, 1987.

BASOKUR, A.T.; **Microcomputer program for the direct interpretation of resistivity sounding data**. Computers and Geosciences, v.16, n.4, p.587 – 601, 1990.

BITAR, O.Y. (coord.) *et al.*; **O meio físico em estudos de impacto ambiental**. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990 (Publicação IPT; nº 1.823).

BORTOLIN, J.R.M.; MALAGUTTI FILHO, W.; **Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos sólidos urbanos.** Revista Engenharia Sanitária Ambiental, v.15,n.4, p.367-374,2010.

BORTOLIN, J.R.M.; **Monitoramento temporal da pluma de contaminação do aterro controlado de Rio Claro (SP) por meio do método da eletrorresistividade.** Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, SP, 2009.

BRAGA, A.C.O.; **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática.** Tese apresentada ao concurso público para a obtenção do título de Livre-Docente na disciplina Métodos Geométricos Aplicados à Hidrogeologia vinculados ao programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, SP, 2006.

BRANDT NETO, M. 1984.; **O Grupo Bauru na região centro-norte do Estado de São Paulo.** São Paulo, 2v. (Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo).

BRASIL, 2010a. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências.** Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007/2010/2010/Lei/L12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007/2010/2010/Lei/L12305.htm)>. Acessado em: 29 de dezembro de 2015.

BRASIL, 2010b. Decreto 7.404/10, de 23 de dezembro de 2010. **Regulamenta a lei nº 12.305/10 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências.** Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007/2010/2010/decreto/d7404.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007/2010/2010/decreto/d7404.htm)>. Acessado em: 29 de dezembro de 2015.

BRASIL, Lei 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.** Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l6938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm)>. Acessado em: 29 de dezembro de 2015.

BROLLO, M. J.; **Metodologia Automatizada para Seleção de Áreas para Disposição de Resíduos Sólidos. Aplicação na Região Metropolitana de Campinas (SP).** Tese (Doutorado em Saúde Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

CARMO JUNIOR, G.N. da R.; **Aterro Sanitário.** Rio de Janeiro, 2012. 49 slides, color. Disponível em: <[www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2012/09/AS-\\_Aula-9.pdf](http://www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2012/09/AS-_Aula-9.pdf)>. Acessado em: 3 jan. 2016.

CASTILHOS JÚNIOR., A. B.; **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte.** Rio de Janeiro: Rima ABES, 2003.

CASTILHOS JÚNIOR, A.B.; (2003) **Principais processos de degradação de resíduos sólidos urbanos.** In: Armando Borges de Castilhos Junior (Org) Resíduos Sólidos Urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Projeto PROSAB Rio de Janeiro – RJ. ABES, Rima, 2003, 249 p.

CATAPRETA, C. A. A.; **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação.** Tese Apresentada no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal De Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção de Título de Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Escola De Engenharia UFMG, Belo Horizonte, 2008.

CAVAGUTI. N.; SILVA FP. 1992.; **Gestão dos recursos hídricos subterrâneos na cidade de Bauru – SP, face as características hidrogeológicas especiais da região.** Anais do VII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Belo Horizonte, MG, p. 74–79.

CAVALCANTI, S.S.; SATO, H.K.; LIMA, O.A.L.; **Geofísica elétrica na caracterização da hidrologia subterrânea na região do Aterro Metropolitano Centro, Salvador, Bahia.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 19, n. 2, p. 155-168, 2001.

CCPERH - COMITÊ COORDENADOR DO PERH, (1999).; **Relatório de situação dos recursos hídricos do Estado de São Paulo**, 128 p. São Paulo.

CERQUEIRA L. ALVES F.; **Incineração e Co-processamento: Alternativas para a gestão de resíduos perigosos.** Saneamento Ambiental, n.59, p.18-23, 1999.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1997) **Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo.** Série Relatórios. 106p. São Paulo.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Resíduos sólidos industriais.** São Paulo: CETESB/ASCETESB, 2ª edição, 1992, 233 p.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. São Paulo. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares - 2009.** São Paulo: Cetesb, 2010. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/publicacoes.asp>>. Acesso em: 3/5/2016.

CHIOSSI, N.J.; **Geologia aplicada à Engenharia. Grêmio Politécnico USP**, São Paulo. 1975. 2.ed. 427p.

COIMBRA, A.M., BRANDT NETO, M. & COUTINHO, J.M.V.; 1981. **Silicificação dos arenitos da Formação Bauru no Estado de São Paulo**. In: A FORMAÇÃO BAURU NO ESTADO DE SÃO PAULO E REGIÕES ADJACENTES, São Paulo. Coletânea de trabalhos e debates. São Paulo: SBG, p.103-115.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL. 1999. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. São Paulo, CETESB, p. 372. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/areas\\_contaminadas/anexos/download/6200.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/areas_contaminadas/anexos/download/6200.pdf)>  
Acessado em: 03/01/2016.

CONSTABLE, S.C.; PARKER, R.L.; CONSTABLE, C.G.; **Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data**. Geophysics, v.52, n.3, p.289 – 300. 1987.

COSTERTON, J.W. (1995); **Microbial Biofilms**. Annual Reviews Microbiology, 49: 711 – 745.

COTTAS, L. R.; **Estudos geológico-geotécnicos aplicados ao planejamento urbano de Rio Claro – SP. 1983**. Tese (Doutorado em Geologia), Universidade de São Paulo, São Paulo.

COTTAS, L.R. & BARCELOS, J.H. 1981.; **Novas considerações sobre a região de Itaqueri da Serra**. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, Curitiba. Atas. Curitiba: SBG, v.2, p.70-76.

DAHLIN, T., and ZHOU, B.; **A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays**. Geophysical prospecting, v.52, p.379 – 398, 2004.  
**data interpretation** software. USA. Manual.

DAVINO, A.; SINELLI, O.; SOUZA, A.; CORREIA, C.T. (1982) **Diabásios na região nordeste da Bacia do Paraná**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32, 1982, Salvador. Anais. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia. p.1736-1744.

DeGROOT-HEDLIN, C. and CONSTABLE, S.; **Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data**. Geophysics, v.55, n.12, p.1613 – 1624, 1990.

DOBECKI, T.L & ROMIG, P.R.; **Geotechnical and groundwater geophysics**. Geophysics, v.50, n.12, -2621-2636, 1985.

DOBRIN, M.B. & SAVIT, C.H.; **Introduction to geophysical prospecting**. 4<sup>a</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill, 1988. 867p.

EDWARDS, L.S.; **A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization**. Geophysics, v.42, n.5, p.1020 – 1036, 1977.

ELIS, V.R.; **Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos**. 1999. 264p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (2004). Disponível em: <<http://www.cnpma.EMBRAPA.br/projetos/index.php3?sec=guara>>. Acessado em: 01/03/2016

EPA - ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY. **Climate Change and Waste**. Reducing Waste Can Make a Difference. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/pubs/ghg/climfold.pdf>>. Acessado em: 3/5/2016.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Solid Waste Disposal Facility Criteria: Technical Manual.** Washington, D.C., 1993. Disponível em <<http://www.epa.gov/epaoswer/non-hw/muncpl/landfill/techman/index.htm>> Acessado em 30/07/2014.

FACHIN, S. J. S. (2007); **Ensaios geolétricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto SP: avaliação de parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental do problema.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG-USP, 140p.

FERNANDES, L.A. (2004); **Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru (PR, SP, MG), escala 1:1.000.000.** Boletim Paranaense de Geociências, v.55, p.53-66.

FERRANTE, J.E.T. (1990); **Mapeamento Geotécnico Regional da Bacia do Alto Jacaré-Guaçu - SP, com base nas aplicações técnicas de sensoriamento remoto e sistema geográfico de informação.** 183p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

FERREIRA, J.A.; **Resíduos Sólidos: perspectivas atuais.** In: SISINNO, C.L.S.; OLIVEIRA, R.M. (Org.). Resíduos Sólidos, Ambiente e Saúde: uma visão multidisciplinar. Rio de Janeiro: Editora Fiocruz, 1a. ed., p. 19-40, 2000.

FILHO, L.F.B.; **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. UFRJ, 2005

FIPAI (2010); **Estudo de Impacto Ambiental do aterro sanitário para a disposição final de resíduos sólidos domiciliares do município de São Carlos/SP.** São Carlos.

FUNDAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ PARA O DESENVOLVIMENTO DA CIÊNCIA, DA TECNOLOGIA E DA CULTURA (FUNPAR). Curitiba: Global Environmental Facilitu; Banco Mundial, fev. 2001.

GALLAS, J. D. F.; TAIOLI, F.; SILVA, S. M. C. P.; COELHO, O. G. W.; PAIM, P. S.G.; **Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade**. Revista Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, p.51-59, jan/mar. 2005.

GALLAS, J.D.F.; **Principais Métodos Geométricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental**. 2000. 174p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

GANDOLFO, O.C.B.; **Um estudo do imageamento elétrico em investigação rasa. Tese de Doutorado**. Programa de Pós – Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia. USP, São Paulo, 2007.

GANIGUÉ, R. *et al.*; **Partial ammonium oxidation to nitrite of high ammonium content urban landfill leachates**. *Water Research*, v. 41, n. 15, p. 3317-3326, 2007.

GEOTOMO SOFTWARE RES2DINV (v.3.54) for Windows 98/ME/2000/NT/XP. Geoelectrical Imaging 2D & 3D. 2004, 130p.

GONÇALVES, A.R.L. (1986); **Geologia ambiental da área de São Carlos**. 138p. Tese (Doutorado) - Insituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

GONÇALVES, A.R.L.; BOSSOLAN, N.R.S.; ORLANDO, M.J.G. (1992); Determinação da direção do fluxo defreativo no aterro sanitário de São Carlos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 7., 1992, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas.

GREENHOUSE, J.P.; **Environmental geophysics. It's about time.** Geophysics: The Leading Edge of Exploration, v.10, n.1, p.32-34, 1991.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000.** Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb/pnsb.pdf>>  
Acessado em: 30/07/2014.

INMAN, J.R.; RYU, J.; WARD, S. H.; **Resistivity inversion.** Geophysics, v. 38, n. 6, p.1088-1108, 1973.

INMAN, J.R.; **Resistivity inversion with ridge regression.** Geophysics, v.40, n.5, p.798 – 817, 1975.

INPEV - INSTITUTO NACIONAL DE PROCESSAMENTO DE EMBALAGENS VAZIAS.  
Disponível em: <<http://www.inpev.org.br/>>. Acessado em: 3/4/2016.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT; COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM - CEMPRE. **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado.** São Paulo: IPT/CEMPRE, 370p., 2000.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado.** São Paulo: IPT/CEMPRE. 1995. 278p.

INSTITUTO GEOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Metodologia para Seleção de Áreas para Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos** BROLLO, M.J.; SILVA, P.C.F. (Coord.) Relatório Técnico. São Paulo: IG / SMA, 1999.

INTERPEX (1993). RESIX IP v. 2.0.; **DC resistivity and induced polarization.**

IPT - INSTITUTO DE PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO (1981); **Mapa Geomorfológico do estado de São Paulo.** Escala 1:500.000.V.1 (texto). São Paulo.

JACKSON, P.D; EARL, S.J.; REECE, G.J.; **3D resistivity inversion using 2D measurements on the electric field.** *Geophysical prospecting*, 49, p.26 – 39, 2001.

JUCÁ, J.F.; **Situação atual e perspectivas para a gestão de resíduos sólidos no Brasil.** UFPE, 2014.

KJELDSEN, P.; CHRISTOPHERSEN, M.; **Composition of leachate from old landfills in Denmark.** *Waste Management & Research*, v. 19, n. 3, p. 249-256, 2001.

KUNETZ, G.; **Principles of direct current resistivity prospecting.** Berlin: Gebrüder Borntraeger. 1966. 103p.

LAGO, A.L.; ELIS, V.R.; GIACHETI, H.L.; **Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru - SP.** *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 24, n. 3, p 357-374, 2006.

LAGO, A.L.; **Investigação geofísica 2D e 3D com aplicação em meio ambiente: estudo sobre uma área de disposição de resíduos de óleo lubrificante no município de Ribeirão Preto – SP.** Tese de Doutorado do programa de Pós-Graduação do Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas. USP, São Paulo, 2009.

LEITE, J.C. (1995).; **Metodologia para a elaboração da carta de susceptibilidade à contaminação e poluição das águas subsuperficiais.** São Carlos, 219 p. Dissertação (Mestrado), v.1 – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LEPSCH, I.F. (1994); **Solos do Estado de São Paulo**. In: LOMBARDI NETO, F.; DRUGOWICH, M.I. (coord.). Manual Técnico de Manejo e Conservação de Solo e Água. Campinas, v.2m n.39, p 70 - 120 : CATI, 1994.p.70 - 120, 1994.

LIMA C.R.; **Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos [apresentado ao curso de capacitação em limpeza pública para profissionais de prefeituras; 2002 set 20; Vitória (ES), Brasil]**.

LIMA, J.D.; **Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil**, ABES-PB, Seção Paraíba. 2001.

LO, I.M-C (1996); **Characteristics and treatment of leachates from domestic landfills**. Environment International 22, n.4, p.433-442.

LOKE, M.H. and DAHLIN, T.; **A comparison of the Gauss – Newton and quasi – Newton methods in resistivity imaging inversion**. Journal of Applied Geophysics, v.49, n.3, p.149-162, 2002.

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

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

LOKE, M.H.; **Electrical Imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2D and 3D surveys**. Notes, 61pp. Disponível em: <<http://www.abem.se>>. 1999.

MAEDA, E.E.; **Diagnóstico da Gestão de Resíduos Sólidos nos municípios do Estado de São Paulo, a partir dos Planos Municipais de Gestão Integrada**. Dissertação de Mestrado pelo programa de Engenharia Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos. USP, São Paulo, 2013.

MALDANER, L.S. (2011); **Cobertura para oxidação biológica do metano em aterros de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação de mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

MANAHAN, S.E.; **Environmental Chemistry**. Sixth Edition. CRC Press Inc., 1999.

MARQUES, A.C.M.; **Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos**. Tese Doutorado. Programa de Pós-Graduação de Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos. USP, São Carlos, 2001.

MATHEUS, C.E.; MORAES, A.J., TUNDISI, J.G. (1992); **Áreas alagadas da bacia Hidrográfica do ribeirão do Feijão como sistema de proteção da qualidade das águas de abastecimento de São Carlos**. IN: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE ECOLOGIA, 2.; CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 1., 1992, Caxambu. Resumos. Rio Claro: SEB.

MCBEAN, E. A., F.A.R overs, and FARQUHAR, G. J.; **Solid Waste Landfill Engineering and Design**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall PTR, 1995.

MENEZES, D.B. (1995); **Diagnóstico dos impactos do depósito de resíduos sólidos de São Carlos - SP, no meio físico**; 103p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MILANI, E.J. **Evolução Tectono-Estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.

MILANI, E.J.; FRANÇA, A.B.; SCHNEIDER, R.L. (1994); **Bacia do Paraná**. Boletim Geociências Petrobrás. São Paulo, v.8, n.1, p.69-82.

MILANI, E.J.; RAMOS, V.A (1998); **Orogenias Paleozóicas no Domínio Sul - Occidental do Gondwana e os Ciclos de Sbusidência da Bacia do Paraná**. Revista Brasileira de Geociências, v.28, n.4m p.473-484.

MINOZZO, M. (2009); **Métodos geofísicos aplicados na avaliação ambiental em uma indústria química na cidade de São Paulo – SP**. Dissertação de mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG-USP. 114p.

MIRANDA, E.E - Coord. (2005); **SISTEMA DE GESTÃO TERRITORIAL PARA A ABAG/RP**. EMBRAPA Monitoramento por Satélite, Campinas. Disponível em: <<http://www.abagr.cnpem.EMBRAPA.br>>. Acessado em: 19/01/2016.

MONDELLI, G.; **Investigação Geoambiental em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos utilizando a tecnologia do piezocone**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2004

MOURA, H. P.; MALAGUTTI FILHO, W.; **Métodos de eletrorresistividade e de polarização induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: Aterro Controlado de Rio Claro-SP**. Revista Geociências, São Paulo, v. 22, n. Especial, p. 129-139, 2003.

MURO, M.D. (2002); **Carta de zoneamento para seleção de áreas frente à instalação de aterros sanitários, no município de São Carlos – escala 1:50.000**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2 v.

OAKLEY, R.E.; **Design and Performance of Earth Lined Containment Systems, In: Geotechnical Practice for Waste Disposal '87**, Proceedings of a Specialty Conference, MI, USA, Geotechnical Special Publication, ASCE, 1987, No. 13, pp.117-136.

OEA - ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS; **Projeto Proteção Ambiental e Gerenciamento Sustentável Integrado do Sistema Aquífero Guarani**. Elaborado por André Virmond Lima Bittencourt *et al.* Sob a coordenação de Ernani Francisco de Rosa Filho.

OGILVY, R.; MELDRUM P.; CHAMBERS, J.; WILLIAMS, G.; **The use of 3D electrical resistivity tomography to characterize waste and leachate distribution within a closed landfill**, Thriplow, UK. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, v.7, n.1, p.11018, 2002.

OLAYINKA, A.I.; YARAMANCI, U.; **Assessment of the reliability of 2D inversion of apparent resistivity data. Geophysical Prospecting**. Volume 48, Issue 2, pages 293–316, March 2000.

OLDENBURG, D.W.; LI, Y.; **Inversion of induced polarization data. Geophysics**, v.59, n.9, p.1327 – 1341. 1994.

OLIVEIRA, J.B. (1999); **Solos do Estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico**. Boletim Científico do IAC - Instituto Agrônomo, Campinas, n.45. 112p, 1999.  
<[http://www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/cobf/V5\\_Floresta\\_Estacional\\_Semidecidu al.pdf](http://www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/cobf/V5_Floresta_Estacional_Semidecidu al.pdf)> (Site da parte de vegetação). Acessado em: 22/02/2016

ORELLANA, E. 1972.; **Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua**. Madrid: Paraninfo, 523 p.

PARASNIS, D. S.; **Principles of Applied Geophysics**. 2. ed. London: London Chapman and Hall, 1972. 214p.

PATELLA, D. **A new parameter for the interpretation of induced polarization field prospecting (time-domain)**, Geophysical Prospecting, 21:315-329, 1973.

PFEIFFER, S.C. (1993); **Avaliação da viabilidade técnico-econômica de aproveitamento de águas subterrâneas na área urbana de São Carlos - SP**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PMSC - PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS (2004); **Plano Diretor de São Carlos I: diagnóstico da cidade**, Proc.2146.03, PL 215, CD-ROM.

POHLAND, F.G.; HARPER, S. R.; **Critical review and summary of leachate and gas production from landfills**. EPA/600/2-86/73. Cincinnati, OH, U.S.A.: U.S. Environmental Protection Agency, 1986.

PONÇANO, W.L., STEIN, D.P., ALMEIDA, F.F., ALMEIDA, M.A. & MELO, M.S. **A Formação Itaqueri e depósitos correlatos no Estado de São Paulo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32., Salvador. Anais. Salvador: SBG, vA, p.1339-1350, 1982.

REYNOLDS, J.M.; **An introduction to applied and environmental geophysics**. New York: John Wiley & Sons, 1997. 796p.

RIBEIRO FILHO, V.O.; **Tratamento e destinação final de RSS.** In: ABIP. Curso de Resíduos Sólidos Serviços de Saúde. São Paulo, 1997.p.47.

RICCOMINI, C.; **Considerações sobre a posição estratigráfica e tectonismo deformador da Formação Itaqueri na porção centro-leste do Estado de São Paulo.** Rev. IG São Paulo, 18 (1/2), 41-48, jan/dez/1997.

ROSS, J.L.S; MOROZ, I.C (1997); **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo Escala 1:500.000.** Departamento de Geografia FFLCH-USP-IPT.Fapesp, São Paulo.

SAZASAKI, Y.; **Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation.** Geophysical prospecting, v.40, p.453 – 464, 1992.

SAZASAKI, Y.; **Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data.** Geophysics, v.54, n.2, p.254 – 262. 1989.

SCHALCH, V.; **Estratégias para a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos.** 149 f. Livre docência. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2002.

SHERIFF, R.E.; **Encyclopedic dictionary of applied geophysics.** 4<sup>a</sup> ed. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists (SEG), 2002. 429p.

SHIMA, E.; BECCARI, A.; **Os perigos do lixo hospitalar.** Rev. Globo Ciência, agosto, p.66-67, 1996.

SHIRAIWA, S. *et al*; **Estudos geofísicos integrados no lixão de Cuiabá, MT, Brasil: resultados preliminares.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 20, n. 3, p. 181-186, 2002.

SILVA, J.E. *et al*; **Aplicação de ensaios elétricos e eletromagnéticos em problema de poluição ambiental**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 20, n. 3, p. 193-198, 2002.

SILVA, R.B (2014); **Tratamento conjugado de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico por processo anaeróbio seguido de aeróbio**. Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande.

SINDUSCON. **Gestão ambiental de resíduos da construção civil**. A experiência do SindusCon-SP. São Paulo: Sinduscon, 2005.

SMA/SP - SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO (2004); **Mapa de Vegetação Remanescente do estado de São Paulo**. Programa Biota/Fapesp, Instituto Florestal. São Paulo Disponível em: <<http://sinbiota.cria.org.br/atlas>>. Acessado em: 01/11/2015.

SOARES, P.C. (1973); **O Mesozóico Gondwânico no Estado de São Paulo**. 152p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Rio Claro.

SOUZA, L.A.P.; SILVA, R.F.; IYOMASA, W.S.; **Investigações geofísicas**. In: OLIVEIRA, A.M.S., BRITO, S.N.A. (Ed). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. Métodos de investigação, p.165-183.

SPEECE, R. E.; **Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters**. Archaea Press. 1996.

STEEPLES, D.W.; **Uses and techniques of environmental geophysics**. **Geophysics: The Leading Edge of Exploration**, v.10, n.9, p.30-31,1991.

SUMMER, J.S. 1976. **Principles of induced polarization for geophysical exploration**. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 277 p.

TCHOBANOGLIOUS, G.,THEISEN,H., VIGIL, S.; **Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues**, McGrall-Hill, Inc.,New York, 949 p. 1993.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E.; **Applied Geophysics**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 770p.

TELFORD, W.M; GELDART, L.P. & SHERIFF, R.E. 1990; **Applied Geophysics**. 2and ed. Cambridge University Press, New York. 859p.

TOLENTINO, M. (1967); **Estudo crítico sobre o clima da região de São Carlos**. 1967.78 p. Concurso de Monografias Municipais - Prefeitura Municipal de São Carlos.

TOLMASQUIM, M. T.; **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, Cinergia, 2003.

TREITEL, S. & LINES L.; **Past, present and future geophysical inversion-A new millennium analysis**. Geophysics, v.66, n.1, p.21 – 24, 2001.

VOGELSANG, D.; **Environmental Geophysics. A practical guide**. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 173p.

WARD, S.H.; **Resistivity and induced polarization methods**. In: Geotechnical and Environmental Geophysics. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists (SEG), 1990. v.1: Review and Tutorial, p.147-189.

WINDHAN-BELLORD, ALVERENGA, K., SOUZA, P. B. E. **O caminho de volta: Responsabilidade compartilhada e logística reversa**. Revista Ambiental Ano 16. Vol. 63. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2011.

YOSHIDA, C.; **Competências e as diretrizes da PNRS: conflitos e critérios de harmonização entre as demais legislações e normas.** In: JARDIM, A.; YOSHIDA, C.; MACHADO FILHO, J. V. (org.). Política Nacional, Gestão e Gerenciamento de Resíduos Sólidos. Barueri: Manole, 2012, p. 3-38.

ZAIAT, M.; RODRIGUES, J.A.D.; RATUZNEI, S.M.; CAMARGO E.F.M.; BORZANI, W. (2001); **Anaerobic Sequencing Batch Reactors for Wastewater Treatment: A Developing Technology.** Applied Microbiology and Biotechnology, 55(1): 29-35, 2001.

ZAINE, J.E.; **Geologia da formação Rio Claro na Folha Rio Claro-SP.** Rio Claro, 1994. 89 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro.

ZHDANOV, M.S.; KELLER, G.V.; **The geoelectrical methods in geophysical exploration.** Amsterdam: Elsevier Science Publishing Co, 1994. 873p.

ZHOU, B.; DAHLIN, T.; **Properties and effects of measurements errors on 2D resistivity imaging surveying.** Near Surface Geophysics, v.1, p.105-117, 2003.

ZOHDY, A.A.R.; **A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves.** Geophysics, v.54, n.2, p.245 – 253, 1989.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N.; PEJON, O. J.; **O mapeamento geotécnico na previsão e prevenção de riscos geológicos em áreas urbanas.** In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO, 1., 1990, São Paulo. Atas. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1990. p. 305-315, 1990.

ZUQUETTE, L.V.; **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração.** São Carlos, 1993. 368 p., 2 v. Tese (Livredocência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

ZUQUETTE, L.V.; PEJON, O.J.; SINELLI, O.; GANDOLFI, N. (1994); **Methodology of specific engineering geological mapping for selection of sites for waste disposal**. In: 7<sup>TH</sup> CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, Lisboa, Portugal, vol.4, p.2481 – 2490.