ANDRÉA TEIXEIRA USTRA

**UTILIZAÇÃO DOS MÉTODOS ELETRORESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO
INDUZIDA COM AQUISIÇÃO DE DADOS 3D PARA CARACTERIZAÇÃO
GEOAMBIENTAL DE UMA ÁREA À JUSANTE DO ATERRO DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS DE BAURU – SP**

Dissertação apresentada ao Instituto de
Astronomia, Geofísica e Ciências
Atmosféricas da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de mestre em
geofísica.

Área de concentração: Geofísica

Orientador: Prof. Dr. Vagner Roberto Elis

São Paulo

2008

A minha mãe *Evelin*, que me mostrou que dedicação é o caminho para a realização dos nossos sonhos.

Ao meu amado *Caio*, meu dedicado e compreensivo companheiro.

Ao meu irmão *Octávio*, que tanto me encoraja.

As minhas queridas tias *Ericina* e *Gláucia*, e meus tios *Renato*, *Paulo* e *Carlos Alberto*, que me mostraram felicidade é um estado de espírito.

A *Daniela*, *Luciana*, *Márcia*, *Mônica* e *Alexandre*, meus fiéis amigos, que tanto me divertem e estão sempre ao meu lado.

A minha cunhada e a todos meus primos, meus bons amigos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Vagner Roberto Elis, pela orientação, apoio e amizade.

Ao Prof. Dr. Jorge Luis Porsani, pela grande contribuição através de críticas e sugestões à pesquisa.

Ao técnico da Geofísica Aplicada Ernande Costa Santos pela fundamental ajuda no trabalho de campo.

Ao Departamento de Geofísica do IAG pela oportunidade e estrutura oferecida.

Ao Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, por emprestar o equipamento utilizado para a aquisição de dados e ajuda no custeio do trabalho de campo.

À Empresa Municipal de Desenvolvimento Urbano e Rural de Bauru – EMDURB, que forneceram as análises químicas.

A todos os professores do IAG, que contribuíram para minha formação acadêmica.

A todos os funcionários do IAG.

A CAPES, pela bolsa concedida.

Aos colegas Alexandre Lago, Giulliana Mondelli e Sérgio Fachin, pela grande contribuição para a realização do trabalho com a ajuda no trabalho de campo, fornecimento de dados, discussões e sugestões.

Aos colegas Álvaro, Gil, Gláucia, Helena, Ivan, Juliana, Manuelle, Marcelo Furlan, Marcus, Nilton, Robson, Selma, Sérgio, Vinicius, Welitom e demais alunos do programa de pós-graduação em geofísica do IAG, pela amizade, discussões e ajuda.

À minha família, amigos e ao meu companheiro Caio.

RESUMO

Uma área contaminada à jusante do Aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru foi investigada através dos métodos Eletroresistividade e Polarização Induzida, com uma técnica de imageamento 3D. A área investigada foi escolhida com base em resultados precedentes de investigações geofísicas e análises químicas das águas de poços de monitoramento, que indicam a ocorrência de contaminação incipiente. O objetivo do levantamento foi detectar e delinear a pluma de contaminação produzida pelos resíduos e adquirir informações detalhadas sobre a área afetada. O conjunto de dados 3D foi formado por dados de uma série de caminhamentos elétricos paralelos realizados com o arranjo dipolo-dipolo, e foi invertido como um levantamento 3D. Essa técnica de aquisição é menos trabalhosa do que um levantamento 3D completo e ainda assim o modelo resultante deve fornecer os maiores contrastes de resistividade e permitir uma visão tridimensional das principais feições. Modelos sintéticos 2D de resistividade foram construídos com o objetivo de analisar a qualidade dos dados e consequentemente do modelo 3D gerado. Os resultados dos modelos invertidos de resistividade e cargabilidade (inversão 3D) sugerem a presença de uma pluma contaminação e seu caminho preferencial, que segue o sentido do fluxo subterrâneo. Dados de análises químicas das águas de poços de monitoramento comprovam a contaminação incipiente. Modelos quasi 3D de resistividade e cargabilidade foram construídos, com diferentes distâncias entre as linhas de levantamento. Esses modelos identificaram os maiores contrastes observados nos modelos 3D, entretanto criaram diversos artefatos que dificultaram a interpretação. Um modelo sintético 3D de resistividade foi construído e as inversões dos dados obtidos pela simulação de um levantamento diagonal cruzado com arranjo pólo-polo e um levantamento em linhas paralelas com arranjo dipolo-dipolo mostram que as duas aquisições fornecem resultados muito semelhantes. A técnica de aquisição 3D utilizada nesse trabalho mostrou-se eficiente no mapeamento da pluma de contaminação em estudos de áreas de disposição de resíduos e deve ser considerada na escolha da técnica de aquisição para o estudo de áreas complexas.

PALAVRAS – CHAVE: Eletroresistividade, Polarização Induzida, Inversão 3D, Contaminação, Resíduos sólidos.

ABSTRACT

A contaminated site downstream a landfill in Brazil was investigated using a 3D resistivity and induced polarization imaging technique. The choice of the investigated area was based on previous geophysical investigations and chemical analysis data from the monitoring wells that indicate the occurrence of incipient contamination. The purpose of this investigation was to detect and delineate the contamination plume produced by the wastes and to obtain detailed information about the affected area. The data set consisted of a series of parallel electrical profile data acquired with the dipole-dipole array, and was inverted as a 3D survey. This acquisition technique is less troublesome than a complete 3D survey, and still the resulting model should provide the major resistivity contrasts and enables a tridimensional picture of the main features. 2D synthetic models were constructed to evaluate the data quality and hence the 3D generated model quality. The results suggest the presence of a contamination plume and their preferential path, which is in good agreement with the underground water flow data. Chemical analysis data from the monitoring wells confirm the incipient contamination. Quasi 3D resistivity and chargeability models were constructed, with different spacing between the survey lines. These models identified the major contrasts observed in the 3D models; however they created artifacts that can mislead the interpretation. A 3D synthetic model was constructed and their inversion obtained simulating a cross-diagonal survey with pole-pole array and a parallel line survey with dipole-dipole array yielded very similar results. The 3D technique reveals to be efficient in waste disposal sites investigations, and should be taken into account when choosing the investigation technique in complex sites.

KEY-WORDS: Eletroresistivity, Induced Polarization, 3D inversion, Contamination, Solid waste.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1 ASPECTOS GERAIS	1
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
CAPÍTULO II – RESÍDUOS SÓLIDOS	9
2.1 ASPECTOS GERAIS	9
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	9
2.2.1 Quanto às características físicas	9
2.2.2 Quanto à origem	10
2.2.3 Quanto à periculosidade: NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação	11
2.3 FORMAS DE DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	11
2.3.1 LIXÃO	12
2.3.2 ATERRO CONTROLADO	12
2.3.3 ATERRO SANITÁRIO	13
2.4 CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	14
CAPÍTULO III – ÁREA DE ESTUDO	23
3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	23
3.1.1 Formação Corumbataí	24
3.1.2 Formação Pirambóia	25
3.1.3 Formação Botucatu	25
3.1.4 Formação Serra geral	25
3.1.5 Grupo Bauru	25
3.2 CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL	27
3.3 ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE BAURU	27
3.4 INVESTIGAÇÃO GEOAMBIENTAL ANTECEDENTE	30
CAPÍTULO IV – METODOLOGIA	37
4.1 MÉTODOS GEOFÍSICOS UTILIZADOS – FUNDAMENTOS TEÓRICOS	37
4.1.1 MÉTODO DA ELETRORESISTIVIDADE	37
4.1.1.1 TEORIA ELEMENTAR	38
4.1.2 MÉTODO DA POLARIZAÇÃO INDUZIDA – IP	40

4.1.2.1 FONTES DE EFEITO IP	40
4.1.2.1.1 POLARIZAÇÃO DE MEMBRANA.....	41
4.1.2.1.2 POLARIZAÇÃO DE ELETRODO	42
4.1.2.2 CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE.....	43
4.1.2.3 FORMAS DE MEDIÇÃO DA POLARIZAÇÃO INDUZIDA	45
4.1.2.3.1 MEDIDA NO DOMÍNIO DO TEMPO	45
4.1.2.3.2 MEDIDA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	46
4.2 PROCEDIMENTO DE CAMPO – AQUISIÇÃO DE DADOS DE RESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA	46
4.2.1 AQUISIÇÃO 2D	48
4.2.2 AQUISIÇÃO 3D	49
4.3 FONTES DE RUÍDO DA ELETRORESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA	53
4.3.1 POLARIZAÇÃO DE ELETRODO	54
4.3.2 POLARIZAÇÃO ESPONTÂNEA	55
4.3.3 RUÍDOS ANTRÓPICOS	55
4.3.4 ACOPLAMENTO CAPACITIVO	55
4.3.5 ACOPLAMENTO ELETROMAGNÉTICO	55
4.4 FONTES DE ERROS DAS MEDIDAS DE ELETRORESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA	56
4.5 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	56
4.5.1 MODELAGEM DIRETA	56
4.5.2 MODELAGEM INVERSA.....	57
 CAPÍTULO V – AQUISIÇÃO DE DADOS E TRATAMENTO PRELIMINAR	61
5.1 ENSAIOS GEOFÍSICOS REALIZADOS.....	61
5.2 TRATAMENTO PRELIMINAR DOS DADOS	62
 CAPÍTULO VI – RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
6.1 INTERPRETAÇÃO DOS MODELOS 3D DE RESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA	75
6.2 INTERPRETAÇÃO DOS MODELOS QUASI 3D DE RESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA	86

6.3 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS PELOS MODELOS 3D DE RESISTIVIDADE E SIMULAÇÃO DE AQUISIÇÃO DE DADOS	97
CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	101
CAPÍTULO VIII – REFERÊNCIAS CITADAS E CONSULTADAS	103
ANEXO I: <i>Seções interpretadas de resistividade e cargabilidade das linhas de caminhamento elétrico (1ª filtragem- 9 níveis de investigação)</i>	111
ANEXO II: <i>Modelos sintéticos e seções interpretadas de resistividade</i>	141
ANEXO III: <i>Seções interpretadas de resistividade e cargabilidade das linhas de caminhamento elétrico (2ª filtragem- 8 níveis de investigação)</i>	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Foto aérea do local do Aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru (Lago, 2004).	2
Figura 1.2: a) Seção de resistividade e b) Seção de cargabilidade, e poços de monitoramento (GMW), Cape Cod, Massachusetts, USA (Sodage <i>et al</i> , 2006).....	6
Figura 1.3: Mapa de fluxo subterrâneo do Aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru (Lago, 2004).....	6
Figura 1.4: Seção de resistividade e cargabilidade à jusante do Aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru (Lago, 2004).....	7
Figura 1.5: Mapas de resistividade em profundidade de 0 a 42 m (Dahlin <i>et al</i> , 2002).	8
Figura 2.1: Gráfico de distribuição das formas de disposição final de resíduos sólidos urbanos. (a) Brasil, (b) Sudeste (IBGE, 2000).....	12
Figura 2.2: Índice de qualidade de aterros de resíduos no Estado de São Paulo (CETESB, 2006).....	14
Figura 3.1: Mapa geológico do Estado de São Paulo (modificado de Lago, 2004).....	23
Figura 3.2: Mapa geológico da região de Bauru – SP (Lago, 2004).....	24
Figura 3.3: Mapa de potencial espontâneo do aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru (Lago, 2004).	31
Figura 3.4: Mapa dos ensaios geofísicos e medições diretas (Lago, 2004 e Mondelli, 2004).	31
Figura 3.5: Distribuição de resistividade. (a) Profundidade teórica de 10 m. (b) Profundidade teórica de 25 m (Elis <i>et al</i> , 2007).	33
Figura 3.6: Distribuição de cargabilidade. (a) Profundidade teórica de 10 m. (b) Profundidade teórica de 25 m (Elis <i>et al</i> , 2007).	34
Figura 3.7: Área do levantamento 3D.	35
Figura 4.1: Valores de resistividade elétrica de materiais conhecidos (modificado de Elis, 1998).....	38
Figura 4.2: Direção do fluxo de corrente no semi-espaço.....	38
Figura 4.3: Efeito de polarização de membrana. a) Distribuição normal de íons em um arenito poroso; b) Polarização de membrana em um arenito poroso devido à aplicação de voltagem em corrente contínua (modificado de Telford <i>et al</i> , 1990).	42
Figura 4.4: Fluxo eletrolítico no poro superior e polarização de eletrodo no poro inferior (Telford <i>et al</i> , 1990).	43
Figura 4.5: Modelo de circuito analógico de uma rocha (modificado de Ward, 1990).	44

Figura 4.6: Variação de potencial com o tempo. a) Polarização induzida; b) Circuito RC (Telford <i>et al</i> , 1990).	44
Figura 4.7: Arranjo dipolo-dipolo (modificado de Elis, 1998).	49
Figura 4.8: Posição dos eletrodos de potencial correspondentes a um único eletrodo de corrente no arranjo 3D completo (modificado de Loke & Barker, 1996b).	50
Figura 4.9: Posição dos eletrodos de potencial correspondentes a um único eletrodo de corrente no arranjo 3D diagonal cruzado (modificado de Loke & Barker, 1996b).	50
Figura 4.10: Função sensibilidade do arranjo dipolo-dipolo. (a) $n = 1$, (b) $n = 2$, (c) $n = 4$, (d) $n = 6$ (Loke, 2002b).	52
Figura 4.11: Função sensibilidade do arranjo dipolo-dipolo, para $n = 1$. (a) $z = 0,07$ m, (b) $z = 0,25$ m, (c) $z = 0,50$ m, (d) $z = 0,75$ m (Loke, 2002b).	53
Figura 4.12: Eletrodos não polarizáveis.	54
Figura 4.13: a) Parte da malha bidimensional utilizada para a modelagem 2D, com a localização dos eletrodos (Loke, 2002a). b) Parte da malha tridimensional utilizada para a modelagem 3D, com a localização de eletrodos de corrente (I) e potencial (P) (Loke, 2001). ..	57
Figura 5.1: Croqui das linhas de caminamento elétrico.	61
Figura 5.2: Histograma de: (a) resistência de contato dos eletrodos, (b) desvio padrão das medidas e (c) ruído natural.	63
Figura 5.3: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 25$ m, após a primeira filtragem dos dados.	65
Figura 5.4: Modelo sintético da linha em $Y = 25$ m.	66
Figura 5.5: Inversão dos dados de resistividade aparente do modelo da figura 5.4.	67
Figura 5.6: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 25$ m.	70
Figura 5.7: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 0$ m.	71
Figura 5.8: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 0$ m.	72
Figura 5.9: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 65$ m.	73
Figura 5.10: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 65$ m.	74
Figura 6.1: Plano XY do modelo de resistividade. Todas as distâncias estão em metros.	76
Figura 6.2: Plano XZ do modelo de resistividade. Todas as distâncias estão em metros.	78
Figura 6.3: Plano YZ do modelo de resistividade. Todas as distâncias estão em metros.	79
Figura 6.4: Plano XY do modelo de cargabilidade. Todas as distâncias estão em metros.	81
Figura 6.5: Plano XZ do modelo de cargabilidade. Todas as distâncias estão em metros.	82
Figura 6.6: Plano YZ do modelo de cargabilidade. Todas as distâncias estão em metros.	83

Figura 6.7: Mapa topográfico do aterro de Bauru com a localização dos poços de monitoramento e da malha 3D.	84
Figura 6.8: Quasi 3D de resistividade, com 5 m de espaçamento entre as linhas. Todas as distâncias estão em metros	88
Figura 6.9: Quasi 3D de resistividade, com 10 m de espaçamento entre as linhas. Todas as distâncias estão em metros.	89
Figura 6.10: Quasi 3D de resistividade, com 15 m de espaçamento entre as linhas. Todas as distâncias estão em metros.	90
Figura 6.11: Quasi 3D de resistividade, com 20 m de espaçamento entre as linhas. Todas as distâncias estão em metros.	91
Figura 6.12: Quasi 3D de cargabilidade, com 5 m de espaçamento entre as linhas. Todas as distâncias estão em metros.	93
Figura 6.13: Quasi 3D de cargabilidade, com 10 m de espaçamento entre as linhas. Todas as distâncias estão em metros.	94
Figura 6.14: Quasi 3D de cargabilidade, com 15 m de espaçamento entre as linhas. Todas as distâncias estão em metros.	95
Figura 6.15: Quasi 3D de cargabilidade, com 20 m de espaçamento entre as linhas. Todas as distâncias estão em metros.	96
Figura 6.16: Modelo sintético de resistividade 3D.	97
Figura 6.17: Inversão do modelo da figura 6.16. Aquisição diagonal cruzado com arranjo pólo-pólo.	98
Figura 6.18: Inversão do modelo da figura 6.16. Aquisição por linhas paralelas de caminhamento elétrico com o arranjo dipolo-dipolo.	99
Figura I.1: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 0$ m.	113
Figura I.2: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 5$ m.	114
Figura I.3: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 10$ m.	115
Figura I.4: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 15$ m.	116
Figura I.5: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 20$ m.	117
Figura I.6: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 25$ m.	118
Figura I.7: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 30$ m.	119
Figura I.8: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 35$ m.	120
Figura I.9: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 40$ m.	121
Figura I.10: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 45$ m.	122
Figura I.11: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 50$ m.	123

Figura I.12: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 55$ m.....	124
Figura I.13: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 60$ m.....	125
Figura I.14: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 65$ m.....	126
Figura I.15: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 0$ m.....	127
Figura I.16: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 5$ m.....	128
Figura I.17: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 10$ m.....	129
Figura I.18: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 15$ m.....	130
Figura I.19: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 20$ m.....	131
Figura I.20: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 25$ m.....	132
Figura I.21: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 30$ m.....	133
Figura I.22: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 35$ m.....	134
Figura I.23: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 40$ m.....	135
Figura I.24: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 45$ m.....	136
Figura I.25: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 50$ m.....	137
Figura I.26: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 55$ m.....	138
Figura I.27: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 60$ m.....	139
Figura I.28: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 65$ m.....	140
Figura II.1: Modelo sintético de resistividade da linha em $Y = 15$ m.....	143
Figura II.2: Inversão do modelo sintético da linha em $Y = 15$ m.	144
Figura II.3: Modelo sintético de resistividade da linha em $Y = 25$ m.....	145
Figura II.4: Inversão do modelo sintético da linha em $Y = 25$ m.	146
Figura II.5: Modelo sintético de resistividade da linha em $Y = 40$ m.....	147
Figura II.6: Inversão do modelo sintético da linha em $Y = 40$ m.	148
Figura II.7: Modelo sintético de resistividade da linha em $Y = 50$ m.....	149
Figura II.8: Inversão do modelo sintético da linha em $Y = 50$ m.	150
Figura II.9: Modelo sintético de resistividade da linha em $Y = 60$ m.....	151
Figura II.10: Inversão do modelo sintético da linha em $Y = 60$ m.	152
Figura III.1: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 0$ m.	155
Figura III.2: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 5$ m.	156
Figura III.3: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 10$ m.	157
Figura III.4: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 15$ m.	158
Figura III.5: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 20$ m.	159
Figura III.6: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 25$ m.	160
Figura III.7: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 30$ m.	161

Figura III.8: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 35$ m.	162
Figura III.9: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 40$ m.	163
Figura III.10: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 45$ m.	164
Figura III.11: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 50$ m.	165
Figura III.12: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 55$ m.	166
Figura III.13: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 60$ m.	167
Figura III.14: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 65$ m.	168
Figura III.15: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 0$ m.	169
Figura III.16: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 5$ m.	170
Figura III.17: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 10$ m.	171
Figura III.18: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 15$ m.	172
Figura III.19: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 20$ m.	173
Figura III.20: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 25$ m.	174
Figura III.21: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 30$ m.	175
Figura III.22: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 35$ m.	176
Figura III.23: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 40$ m.	177
Figura III.24: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 45$ m.	178
Figura III.25: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 50$ m.	179
Figura III.26: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 55$ m.	180
Figura III.27: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 60$ m.	181
Figura III.28: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 65$ m.	182

LISTA DE FOTOS

Foto 3.2: Vista panorâmica do Aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru, destacando os três patamares (Outubro, 2006).....	28
Foto 3.3: Sistema de drenagem de líquidos e casa de coleta de chorume (Outubro, 2006).....	29
Foto 3.4: Sistema de drenagem de gases (Outubro, 2006).....	29
Foto 3.5: Poços de monitoramento (Outubro, 2006).....	30
Foto 3.6: Vista panorâmica da área escolhida para o levantamento 3D (Outubro, 2006).	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Padrão de potabilidade para substâncias químicas que representam risco à saúde (FUNASA, 2000).	16
Tabela 2.2: Valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo (CETESB, 2005).	18
Tabela 2.3: Faixa de concentração dos principais parâmetros de percolados de aterros sanitários (Modificado de Contrera, 2003).	21
Tabela 3.1: Coluna estratigráfica sintetizada da Bacia Sedimentar do Paraná (Lago, 2004)... ..	26
Tabela 4.1: Arranjos eletródicos mais utilizados.	47
Tabela 6.1: Análises químicas das águas coletadas nos poços de monitoramento (Mondelli, 2006).	85

SIGLAS E ABREVIATURAS

SIGLA – DESCRIÇÃO

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CE – Caminhamento elétrico

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

DBO – Demanda biológica de oxigênio

DC-PP – Técnica de levantamento 3D diagonal cruzado, com o arranjo pólo-polo

DQO – Demanda química de oxigênio

E. Coli – Escherichia Coli

EMDURB – Empresa Municipal de Desenvolvimento Urbano e Rural de Bauru

FE – Finite element

FD – Finite difference

FIPAI – Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial

FUNASA – Fundação Nacional da Saúde

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IP – Induced Polarization

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

IQR – Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos em Valas

LP-DD – Técnica de levantamento 3D por linhas paralelas, com o arranjo dipolo-dipolo

N. A – Nível d'água

NBR – Norma Brasileira

RC – Resistor-Capacitor

RCPTU – Piezocone de resistividade

RMS – Root Mean Square

VMP – Valor Máximo Permitido

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

Atualmente uma das grandes preocupações mundiais são os impactos ambientais causados pela disposição de resíduos gerados pela população. Os problemas relacionados à forma de disposição dos resíduos devem-se à migração dos contaminantes para o meio ambiente local e conseqüente contaminação dos solos e águas subterrâneas.

As principais fontes de contaminação do solo e águas subterrâneas são: disposição de resíduos sólidos (industriais, domésticos e hospitalares), lagoas de tratamento de efluentes, disposição de esgoto, disposição de resíduos radioativos, atividade agrícola e vazamentos de materiais contaminantes.

Em um local de disposição de resíduos sólidos, a alta concentração de materiais como metais pesados, nutrientes e substâncias orgânicas representam um alto risco de poluição da vizinhança. Esses locais constituem, portanto, uma séria ameaça de poluição do meio ambiente local.

A capacidade de poluição do ambiente depende da quantidade e qualidade de água que percola através dos aterros e alcança as redondezas. O conteúdo lixiviado de um depósito de resíduos sólidos está geralmente associado às grandes concentrações de íons e, portanto baixas resistividades. Isso torna as técnicas geoeletricas de imageamento particularmente interessantes para o mapeamento da extensão tridimensional da contaminação ao redor de um local de disposição de resíduos sólidos.

De uma forma geral a utilização da geofísica na caracterização de uma área contaminada consiste na detecção e mapeamento da extensão da área afetada e informações sobre a profundidade da zona saturada, direção do fluxo subterrâneo e profundidade do substrato rochoso inalterado. Particularmente, as técnicas geoeletricas de imageamento podem ser aplicadas na identificação, mapeamento e delineamento dos contaminantes, controle de qualidade da imobilização do contaminante, e monitoramento em longo prazo.

Os métodos geofísicos apresentam vantagens em relação à amostragem direta, como por exemplo, custo e tempo de execução de ensaios muito menores. Entretanto, devido às ambigüidades inerentes a interpretação, os resultados não podem ser considerados definitivos, e frequentemente é necessário fazer uma amostragem direta para validar a interpretação. Se

devidamente aplicados, os levantamentos geofísicos podem otimizar as campanhas de investigação maximizando a área estudada e minimizando as necessidades de perfurações.

Dentro desse contexto, esse projeto tem como finalidade avaliar a potencialidade de integração dos métodos geofísicos eletroresistividade e polarização induzida, com aquisição de dados 3D, para a caracterização geolétrica de uma área em um aterro de resíduos urbanos. A utilização integrada 3D pode constituir uma metodologia eficiente na avaliação e caracterização de problemas ambientais, trazendo detalhes na visualização das possíveis plumas de contaminação.

O principal objetivo desse trabalho é a aplicação de uma metodologia geofísica de aquisição 3D, para uma caracterização geoambiental detalhada da uma área a jusante do Aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru – SP (figura 1.1). A área escolhida para a realização dos ensaios fica em frente ao limite oeste do aterro, onde análises químicas de poços de monitoramento indicam contaminação por diversas substâncias.

Esse procedimento objetiva trazer um avanço na aplicação de métodos geolétricos para caracterização geoambiental, uma vez que o tratamento tridimensional do problema poderá possibilitar a visualização de características e detalhes importantes para o conhecimento da estruturação e comportamento dessa fonte de contaminação e sua interação com o meio físico.

Figura 1.1: Foto aérea do local do Aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru (Lago, 2004).

Para o levantamento 3D foram utilizados os métodos da eletroresistividade e polarização induzida, com a técnica de caminhamento elétrico com o arranjo dipolo-dipolo com espaçamento de 5 metros. Uma série de linhas de caminhamento elétrico paralelas e espaçadas em 5 metros constituiu a malha tridimensional. A interpretação dos dados foi conduzida com *softwares* apropriados (interpretação quantitativa 2D e 3D).

A caracterização geoambiental da área foi feita a partir da interpretação integrada dos dados adquiridos e de dados disponíveis de ensaios geofísicos e amostras de água e solo.

Com base nos resultados obtidos, foi feita uma análise das vantagens e limitações dos métodos geofísicos utilizados. Essa análise mostra o potencial da metodologia geofísica integrada, e também, da técnica de aquisição de dados 3D em áreas de disposição de resíduos.

O trabalho desenvolvido é apresentado neste texto, que está estruturado da seguinte maneira:

O capítulo 1, Introdução, apresenta os aspectos gerais, os objetivos da pesquisa, a metodologia do trabalho e a revisão bibliográfica.

No capítulo 2, Resíduos sólidos, são apresentados o conceito de resíduo sólido, sua classificação e formas de disposição.

No capítulo 3, Área de estudo, são apresentados o contexto geológico regional e local, e as características do Aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru.

O capítulo 4, Metodologia, apresenta os fundamentos teóricos dos métodos da eletroresistividade e polarização induzida.

No capítulo 5, Aquisição de dados e tratamento preliminar, são apresentados os ensaios geofísicos realizados e uma análise da qualidade dos dados adquiridos.

O capítulo 6, Resultados e discussões, apresenta os modelos geofísicos, as análises químicas dos poços de monitoramento e as interpretações dos resultados obtidos.

O capítulo 7 apresenta as conclusões e recomendações deste trabalho e o capítulo 8 contém as referências bibliográficas citadas e consultadas.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A geofísica aplicada, ou geofísica de exploração, se expandiu rapidamente nos últimos 50 anos e tem auxiliado na exploração de matéria prima e fontes de energia exigidas pela civilização moderna. Dentro desse contexto, novos desafios surgiram relacionados a problemas ambientais. O local de disposição de resíduos perigosos, proteção do solo e das águas subterrâneas da contaminação e planejamento de novos locais seguros de disposição de

resíduos domésticos, industriais e nucleares estão entre os principais problemas ambientais que a geofísica pode auxiliar.

Todas as técnicas geofísicas essencialmente detectam descontinuidades no subsolo, regiões suficientemente diferentes em algumas propriedades físicas, como densidade, susceptibilidade magnética, elasticidade, polarizabilidade, resistividade e condutividade elétrica, permissividade dielétrica, radioatividade e condutividade térmica. A escolha do método geofísico ou combinação destes depende do contraste de propriedades físicas envolvido no objeto de estudo e sua vizinhança.

Em relação aos problemas de contaminação pela disposição de resíduos, Sharma (1997) destaca as informações mais importantes a serem obtidas com os métodos geofísicos:

1. Localização de estruturas geológicas (falhas, fissuras, contatos, etc.);
2. Localização de aquíferos e estruturas hidraulicamente ativas para a detecção do movimento das plumas de contaminação;
3. Detecção e localização de depósitos de resíduos, principalmente das margens;
4. Exploração de novas áreas de disposição segura de resíduos, tectonicamente/sismicamente estáveis com estruturas geológicas que protejam as águas subterrâneas da contaminação.

O método geofísico utilizado deve considerar as informações necessárias para a avaliação do problema ambiental a ser estudado. Na detecção e mapeamento de plumas de contaminação, os métodos elétricos e eletromagnéticos se mostram os mais adequados.

De acordo com Elis (1998), a interpretação dos dados possibilita a análise do local, com informações importantes sobre a interação entre a fonte potencial de contaminação e o ambiente geológico e hidrogeológico. Os métodos elétricos, com suas várias técnicas e arranjos possíveis, mostram uma grande versatilidade, que se traduz na possibilidade de investigação das mais diversas características do meio físico, em relação a uma fonte potencial de contaminação. As informações fornecidas pela geofísica permitem o planejamento e dimensionamento de métodos de investigação mais detalhados e precisos, como a instalação de poços de monitoramento, e podem servir de base e orientação para estudos posteriores.

Existem diversos exemplos na literatura de aplicações da eletroresistividade e polarização induzida em estudos ambientais. Bernstone *et al* (2000) realizaram ensaios geofísicos como uma técnica de pré-caracterização para escavações e remediação de áreas de disposição de resíduos. Os autores obtiveram bons resultados na identificação de caminhos

preferenciais do conteúdo lixiviado e da posição da zona saturada e anomalias discretas de alta e baixa resistividade foram detectadas, sugerindo possíveis locais de escavação.

Sogade *et al* (2006) utilizaram os métodos da eletroresistividade e polarização induzida no mapeamento de uma pluma de contaminação gerada pelo vazamento de derivados de hidrocarbonetos, principalmente benzeno, ocorridos na década de 1970. Os dados de resistividade estão de acordo com a distribuição da pluma detectada pelos poços (figura 1.2a) e os dados de IP mostraram-se particularmente interessantes nesse estudo, pois a profundidade e extensão do benzeno detectada nos poços GMW 30 e GMW 32 estão bem relacionadas com as anomalias de cargabilidade (figura 1.2b).

Mondelli (2004) e Lago (2004) realizaram uma extensa campanha de investigação geoambiental do Aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru, onde foram utilizados métodos geofísicos (eletroresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo), tecnologia de piezocone e amostragem direta de solo e água. Baseados nos resultados dos ensaios geofísicos, as amostras de solo e água foram retiradas da região à jusante do aterro, na direção do fluxo subterrâneo (figura 1.3). Os valores de resistividade obtidos com a tecnologia do piezocone confirmaram a possível contaminação (regiões menos resistivas) sugerida pela interpretação dos dados de geofísica (figura 1.4). As amostras de água confirmam a contaminação do local. A análise conjunta de toda a campanha de investigação mostra que a pluma de contaminação ultrapassa os limites do aterro para jusante, à oeste-noroeste. Os parâmetros que ultrapassaram os limites estabelecidos pela norma adotada foram: DBO, DQO, condutividade, cádmio, ferro, níquel, cromo e bactérias coliformes totais.

Os dois autores concluem que a impermeabilização do aterro parece não ter sido eficiente e o meio ambiente local não está devidamente protegido dessa fonte de contaminação. A interpretação dos ensaios de resistividade sugere que o sentido do fluxo da pluma de contaminação seja o mesmo do fluxo subterrâneo.

Figura 1.2: a) Seção de resistividade e b) Seção de cargabilidade, e poços de monitoramento (GMW), Cape Cod, Massachusetts, USA (Sodage *et al*, 2006).

Figura 1.3: Mapa de fluxo subterrâneo do Aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru (Lago, 2004).

Figura 1.4: Seção de resistividade e cargabilidade à jusante do Aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru (Lago, 2004).

Com a crescente demanda por um conhecimento detalhado da subsuperfície para aplicações em geotecnia, hidrogeologia e meio ambiente, os métodos elétricos tornam-se cada vez mais populares. Apesar das estruturas geológicas serem tridimensionais por natureza, as técnicas de levantamento 3D não são rotineiramente utilizadas como as técnicas de levantamento 1D ou 2D. Exemplos de aplicações de levantamentos 3D são encontrados na literatura somente após meados dos anos 90.

Dahlin & Loke (1997) relatam que levantamentos quasi 3D (inversão 3D a partir de dados 2D) podem fornecer bons resultados, e Loke & Barker (1996b) detalham algumas técnicas de aquisição 3D. Bentley & Gharibi (2004) comparam resultados de levantamento 2D e 3D em uma área de remediação, e concluem efeitos tridimensionais podem distorcer ou contaminar imagens 2D.

Dahlin *et al* (2002) realizaram um levantamento 3D em uma área de disposição de resíduos na Suécia e obtiveram bons resultados. A técnica foi capaz de delinear a porção contaminada, provando ser muito útil em aplicações ambientais (figura 1.5).

Figura 1.5: Mapas de resistividade em profundidade de 0 a 42 m (Dahlin et al, 2002).

CAPÍTULO II

RESÍDUOS SÓLIDOS

2.1 ASPECTOS GERAIS

Com o crescimento da industrialização, desenvolvimento tecnológico e crescimento econômico, a quantidade de resíduos produzidos pela sociedade tem crescido imensamente. Diversos tipos de resíduos são produzidos, como domésticos, comerciais, industriais, de mineração e resíduos radioativos. Dependendo da fonte de geração, alguns destes resíduos podem se degradar em produtos inofensivos, enquanto outros podem ser não degradáveis ou perigosos, impondo risco à saúde e problemas ambientais se não forem manejados adequadamente. Além disso, os resíduos podem ser transformados através de reações químicas, resultando na produção de substâncias perigosas (Bell, 1998).

De acordo com a NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação (ABNT, 2004a), resíduo sólido é definido como qualquer resíduo nos estados sólido e semi-sólido que resulte de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exija para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis face à melhor tecnologia disponível.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Os resíduos sólidos podem ser classificados quanto à suas características físicas, origem e periculosidade (IPT,1995).

2.2.1 Quanto às características físicas

- **Seco:** papéis, plásticos, metais, tecidos, vidros, madeiras, cerâmicas, etc,
- **Molhado:** restos de comida, animais mortos, podas de árvores, etc.

2.2.2 Quanto à origem

- **Domiciliar:** originado da vida diária das residências, constituído por restos de alimentos, produtos deteriorados, papéis, vidros, embalagens, papel higiênico, fraldas descartáveis, etc. Pode conter alguns resíduos tóxicos.
- **Comercial:** originado dos diversos estabelecimentos comerciais e de serviços, tais como supermercados, lojas, restaurantes, etc.
- **Serviços públicos:** originados dos serviços de limpeza urbana, incluindo todos os resíduos de varrição das vias públicas, limpeza de praias, galerias, córregos, restos de podas de plantas, etc.
- **Hospitalar:** descartados por hospitais, farmácias e clínicas (algodão, seringas, agulhas, restos de remédios, luvas, curativos, sangue coagulado, órgãos e tecidos removidos, meios de cultura e animais utilizados em testes, resina sintética, filmes fotográficos de raios X). Em função de suas características, merece um cuidado especial em seu acondicionamento, manipulação e disposição final. Deve ser incinerado e os resíduos levados para um aterro sanitário.
- **Portos, Aeroportos, Terminais Rodoviários e Ferroviários:** resíduos sépticos, ou seja, que contêm ou potencialmente podem conter germes patogênicos. Basicamente originam-se de material de higiene pessoal e restos de alimentos, que podem hospedar doenças provenientes de outras cidades, estados e países.
- **Industrial:** originado nas atividades dos diversos ramos da indústria, como o metalúrgico, químico, petroquímico, de papelaria, da indústria alimentícia, etc. Os resíduos industriais são bem variados, podendo conter cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, madeira, fibras, borracha, metal, escórias, vidros, cerâmicas. Por ser tóxico, esse tipo de resíduo necessita de tratamento especial.
- **Radioativo:** resíduos provenientes da atividade nuclear (resíduos de atividades com urânio, cério, tório, radônio, cobalto), que devem ser manuseados apenas com equipamentos e técnicos adequados.
- **Agrícola:** resíduos sólidos das atividades agrícola e pecuária, como embalagens de adubos, defensivos agrícolas, ração, restos de colheita, etc. O resíduo proveniente de pesticidas é considerado tóxico e necessita de tratamento especial.
- **Entulho:** resíduos da construção civil, como demolições, restos de obras e solos de escavações. O entulho é geralmente um material inerte, passível de reaproveitamento.

2.2.3 Quanto à periculosidade: NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação

Se o resíduo for um resíduo sólido, deve-se então determinar se este é um resíduo perigoso. É de responsabilidade do gerador, analisar seus resíduos e determinar suas propriedades. Uma vez que há conhecimento sobre as propriedades dos resíduos, é possível classificá-los segundo a NBR 10004. Esta norma define resíduos perigosos mediante critérios específicos e considera várias listas de substâncias, estabelecidas por anexos normativos. São eles: A – Resíduos perigosos de fontes não específicas; B – Resíduos perigosos de fontes específicas; C – Substâncias que conferem periculosidade aos resíduos; D – Substâncias agudamente tóxicas; E – Substâncias tóxicas; F – Concentração – Limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação e G – Padrões para o ensaio de solubilização. Com isso, a NBR 10004 classifica os resíduos em:

- **Classe I – perigosos** – Classificados segundo suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
- **Classe II – não perigosos**
 - **Classe II A – não inertes** – Resíduos cujo extrato solubilizado conforme a NBR 10006 – Solubilização de Resíduos (ABNT, 2004b) apresenta concentrações superiores ao anexo G, e padrões de concentração superiores ao permitido quanto à potabilidade da água.
 - **Classe II B – inertes** – Resíduos cujo extrato solubilizado conforme a NBR 10006 apresenta concentrações inferiores ao anexo G.

2.3 FORMAS DE DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Diversos destinos podem ser dados aos resíduos sólidos urbanos, como por exemplo, a reciclagem, compostagem, incineração e disposição no solo. As figuras 2.1 a e b ilustram a distribuição das principais destinações dos resíduos sólidos urbanos no Brasil e na Região Sudeste.

Figura 2.1: Gráfico de distribuição das formas de disposição final de resíduos sólidos urbanos. (a) Brasil, (b) Sudeste (IBGE, 2000).

A disposição final desses resíduos no solo geralmente é feita das formas descritas a seguir.

2.3.1 LIXÃO

O lixão é uma forma inadequada de disposição, que se caracteriza pela simples descarga dos resíduos sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Os resíduos assim lançados acarretam problemas como proliferação de doenças, geração de maus odores e, principalmente, poluição do solo e das águas subterrâneas e superficiais, pela infiltração do chorume.

2.3.2 ATERRO CONTROLADO

O aterro controlado é uma técnica de disposição de resíduos sólidos no solo, sem causar danos à saúde pública e minimizando os impactos ambientais. Essa forma de disposição produz poluição, porém localizada. Geralmente não se dispõe de impermeabilização de base, nem de sistemas de tratamento do percolato ou do biogás gerado.

2.3.3 ATERRO SANITÁRIO

O aterro sanitário é um processo utilizado para a disposição de resíduos sólidos que permite um confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública. As formas de aterramento são: trincheira, rampa ou área. Um aterro sanitário deve conter:

- Sistema de impermeabilização da base do aterro, com a função de evitar a contaminação do subsolo e aquíferos subjacentes, pela migração de percolato e/ou do biogás.
- Sistema de cobertura dos resíduos, com a função de proteger a superfície das células de lixo, diminuir a taxa de formação de percolados e evitar a saída descontrolada de biogás.
- Sistema de drenagem de líquidos percolados, com a função de coletar e conduzir o líquido, minimizando seu potencial de migração para o subsolo.
- Sistema de drenagem de biogás, com a função de drenar os gases provenientes da decomposição da matéria orgânica, evitando sua migração através dos meios porosos que constituem o subsolo.
- Sistema de tratamento do líquido percolato. Os processos atualmente empregados são: recirculação, lagoa de estabilização, tratamento químico, filtro biológico e ETE.
- Sistema de tratamento dos gases. O sistema de tratamento usual é a queima do biogás nos próprios drenos coletores de gases. Porém, esse sistema gera ainda problemas ambientais.
- Sistema de monitoramento, com a função permitir a detecção, em estágio inicial, dos impactos ambientais negativos causados pelo empreendimento, permitindo a implementação de medidas mitigadoras antes que este assuma grandes proporções e, desta forma, torna-se mais difícil sua correção.
- Cobertura final do aterro.

Em termos de disposição de resíduos em aterros, um aterro é ambientalmente aceitável se corretamente construído. Se não for corretamente construído, um aterro pode ter o impacto reverso no meio ambiente, resultando em poluição das águas superficiais e subterrâneas. A CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, órgão delegado do governo do Estado de São Paulo para o controle da poluição ambiental, realiza levantamentos e avaliações sobre as condições ambientais e sanitárias dos locais de destinação final de resíduos sólidos domiciliares do estado. As informações coletadas nas inspeções referentes à localização, estrutura e operação de cada instalação, são utilizadas para a elaboração de

índices de qualidade. A figura 2.2 mostra os índices de qualidade de aterros de resíduos no Estado de São Paulo, que são periodicamente inspecionados pela CETESB. Em 2006 o aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru teve o seu IQR (Índice de Qualidade do Aterro de Resíduos em Valas) avaliado em 8,7 pela CETESB, considerado como condição adequada (A).

Figura 2.2: Índice de qualidade de aterros de resíduos no Estado de São Paulo (CETESB, 2006).

2.4 CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A contaminação das águas pode ser definida como a introdução de microorganismos, substâncias tóxicas, resíduos ou efluentes no ar, no solo ou na água, que torne o meio impróprio para sua finalidade.

O termo poluição refere-se à presença de uma substância no meio que devido a sua composição química ou quantidade, impede o funcionamento de processos naturais e produz efeitos à saúde ou ambientais indesejáveis. Conforme a Lei 6.938/81, que estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente, poluição é a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente: prejudiquem saúde, a segurança e o bem estar da

população; criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; afetem desfavoravelmente a biota; afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos.

Em áreas de disposição de resíduos os contaminantes dispostos na superfície podem atravessar o solo não saturado e a zona capilar, atingindo a zona saturada. Na zona não saturada, cujos poros são preenchidos por ar e água, o fluxo da água depende da força da gravidade e da forma dos poros, sendo vertical para baixo. Na zona saturada, onde os poros são preenchidos por água, o fluxo depende do gradiente hidráulico e os contaminantes podem se espalhar por grandes áreas, cobrindo longas distâncias, após período de tempo variável. Caracterizam-se, assim, plumas de contaminação com concentrações variáveis, no espaço e no tempo, dependendo das condições hidrogeológicas locais (OLIVEIRA & BRITO, 1998).

Segundo OLIVEIRA & BRITO (1998), a direção do fluxo da água subterrânea, que transporta os contaminantes, depende das direções e da relação de anisotropia das condutividades hidráulicas principais do meio. A anisotropia está presente em aluviões, nos depósitos sedimentares e nos maciços rochosos, condicionada pela presença de estruturas geológicas. As heterogeneidades presentes nos diferentes meios geológicos são complicadores para a compreensão do comportamento dos contaminantes nos meios saturados. Os autores ressaltam condicionantes geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos e geomorfológicos, que são de grande importância em áreas de disposição de resíduos, para compreensão e avaliação da migração dos contaminantes nos solos e nas águas subterrâneas.

Como condicionantes geológicos, destacam-se zonas de risco sísmico, falhamentos regionais, estratigrafia, litologia, heterogeneidades e anisotropias, e estruturas geológicas.

A presença de aquíferos, zonas de recarga de aquíferos, gradientes hidráulicos, condutividades hidráulicas, porosidade, armazenamentos específicos, velocidades e direções de fluxo regional e local das águas subterrâneas fazem parte dos condicionantes hidrogeológicos. Adiciona-se ainda a esses condicionantes, características da zona não saturada, posição do nível d'água e suas variações, qualidade e utilização das águas subterrâneas, assim como a proximidade, qualidade e utilização das águas superficiais.

Como condicionantes geotécnicos têm-se as características granulométricas e de resistência do meio e, como condicionantes geomorfológicos, áreas sujeitas à inundação, com declividade elevada e áreas suscetíveis a escorregamentos, erosões e subsidências.

Em rochas sedimentares, os arenitos e conglomerados, desprovidos de matriz argilosa, apresentam elevadas condutividades hidráulicas e, portanto, favorecem a migração de contaminantes. Já os siltitos e argilitos, apresentam baixas condutividades hidráulicas e

elevada capacidade de sorção dos contaminantes nas partículas argilosas, dificultando a sua migração. Nas rochas sedimentares, a percolação e conseqüente contaminação ocorrem, predominantemente, ao longo de contatos entre as diferentes camadas e ao longo de planos de acamamento, com comportamento anisotrópico. A percolação também pode estar condicionada a presença de descontinuidades como falhas e juntas, sendo que, muitas vezes, estas últimas se formam ao longo das superfícies de contato e acamamento. As rochas calcárias apresentam estruturas de dissolução e vazios altamente favoráveis à percolação das águas subterrâneas e transporte de contaminantes. Em rochas ígneas e metamórficas, o transporte de contaminantes é governado pela presença de descontinuidades, como falhas e fraturas (OLIVEIRA & BRITO, 1998).

Para avaliar a poluição gerada pelas diversas fontes de contaminação do solo e conseqüentemente das águas subterrâneas, deve-se levar em conta valores concentrações de substâncias orgânicas e inorgânicas, legalmente estabelecidos.

A matéria orgânica descarregada nos aterros permite a proliferação de bactérias, comprometendo as águas subterrâneas. Entre as substâncias inorgânicas destacam-se nitratos e cloretos, devido a sua mobilidade e estabilidade na zona saturada. São considerados particularmente perigosos os metais Zinco, Chumbo, Níquel, Cádmio e Cromo. Dentre os constituintes orgânicos, os compostos sintéticos são os mais preocupantes.

A água potável, destinada ao consumo humano, deve obedecer aos padrões de potabilidade para substâncias químicas que apresentam risco à saúde, estabelecidos pela portaria 1.469 – Controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (FUNASA, 2000), apresentados na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Padrão de potabilidade para substâncias químicas que representam risco à saúde (FUNASA, 2000).

Parâmetro	Unidade	VMP ⁽¹⁾
Inorgânicas		
Antimônio	mg/L	0,005
Arsênio	mg/L	0,01
Bário	mg/L	0,7
Cádmio	mg/L	0,005
Cianeto	mg/L	0,07
Chumbo	mg/L	0,01
Cobre	mg/L	2
Cromo	mg/L	0,05
Fluoreto ⁽²⁾	mg/L	1,5
Mercúrio	mg/L	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	10
Nitrito (como N)	mg/L	1

Selênio	mg/L	0,01
Orgânicas		
Acrilamida	µg/L	0,5
Benzeno	µg/L	5
Benzo [a] pireno	µg/L	0,7
Cloreto de Vinila	µg/L	5
1,2 Dicloroetano	µg/L	10
1,1 Dicloroetano	µg/L	30
Diclorometano	µg/L	20
Estireno	µg/L	20
Tetracloroeto de Carbono	µg/L	2
Tetracloroetano	µg/L	40
Triclorobenzeno	µg/L	20
Tricloroetano	µg/L	70
Agrotóxicos		
Alaclor	µg/L	20
Aldrin e Dieldrin	µg/L	0,03
Atrazina	µg/L	2
Bentazona	µg/L	300
Clordano (isômeros)	µg/L	0,2
2,4 D	µg/L	30
DDT (isômeros)	µg/L	2
Endossulfan	µg/L	20
Endrin	µg/L	0,6
Glifosato	µg/L	500
Héptacloro e Heptacloro epóxido	µg/L	0,03
Hexaclorobenzeno	µg/L	1
Lindano (g-BHC)	µg/L	2
Metacloro	µg/L	10
Metoxicloro	µg/L	20
Molinato	µg/L	6
Pendimetalina	µg/L	20
Pentaclorofenol	µg/L	9
Permetrina	µg/L	20
Propanil	µg/L	20
Simazina	µg/L	2
Trifuralina	µg/L	20
Cianotoxinas		
Microcistinas ⁽³⁾	µg/L	1
Desinfetantes e produtos secundários da desinfecção		
Bromato	mg/L	0,025
Clorito	mg/L	0,2
Cloro livre	mg/L	5
Monocloroamina	mg/L	3
2,4,6 Triclorofenol	mg/L	0,2
Trihalometanos Total	mg/L	0,1

Notas:

(1) Valor Máximo Permitido.

(2) Os valores recomendados para a concentração de íon fluoreto devem observar a legislação específica vigente relativa à fluoretação da água, em qualquer caso devendo ser respeitado o VMP desta tabela.

(3) É aceitável a concentração de até 10 µg/L em até 3 (três) amostras, consecutivas ou não, nas análises realizadas nos últimos 12 (doze) meses.

(4) Análise exigida de acordo com o desinfetante utilizado.

Na presente pesquisa, interessam principalmente os valores orientados pela CETESB para solos e águas subterrâneas, apresentados na tabela 2.2. Os resultados de análises químicas de poços de monitoramento devem ser comparados com esses valores para que se possa concluir se uma área está contaminada e qual a magnitude do problema ambiental.

Tabela 2.2: Valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo (CETESB, 2005).

Substância	Solo (mg/Kg) de peso seco (1)					Água subterrânea (µg/L)
	Referência de qualidade	Prevenção	Intervenção			Intervenção
			Agrícola	Residencial	Industrial	
Inorgânicos						
Alumínio	-	-	-	-	-	200
Antimônio	< 0,5	2	5	10	25	5
Arsênio	3,5	15	35	55	150	10
Bário	75	150	300	500	750	700
Boro	-	-	-	-	-	500
Cádmio	< 0,5	1,3	3	8	20	5
Chumbo	17	72	180	300	900	10
Cobalto	13	25	35	65	90	5
Cobre	35	60	200	400	600	2.000
Cromo	40	74	150	300	400	50
Ferro	-	-	-	-	-	300
Manganês	-	-	-	-	-	400
Mercúrio	0,05	0,5	12	36	70	1
Molibdênio	<4	30	50	100	120	70
Níquel	13	30	70	100	130	20
Nitrato (como N)	-	-	-	-	-	10.000
Prata	0,25	2	25	50	100	50
Selênio	0,25	5	-	-	-	10
Vanádio	275	-	-	-	-	-
Zinco	60	300	450	1000	2000	5.000
Hidrocarbonetos aromáticos voláteis						
Benzeno	na	0,03	0,06	0,08	0,15	5
Estireno	na	0,2	15	35	80	20
Etilbenzeno	na	6,2	35	40	95	300

Tolueno	na	0,14	30	30	75	700
Xilenos	na	0,13	25	30	70	500
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos ⁽²⁾						
Antraceno	na	0,039	-	-	-	-
Benzo(a)antraceno	na	0,025	9	20	65	1,75
Benzo(k)fluoranteno	na	0,38	-	-	-	-
Benzo(g,h,i)perileno	na	0,57	-	-	-	-
Benzo(a)pireno	na	0,052	0,4	1,5	3,5	0,7
Criseno	na	8,1	-	-	-	-
Dibenzo(a,h)antraceno	na	0,08	0,15	0,6	1,3	0,18
Fenantreno	na	3,3	15	40	95	140
Indeno(1,2,3-c,d)pireno	na	0,031	2	25	130	0,17
Naftaleno	na	0,12	30	60	90	140
Benzenos clorados ⁽²⁾						
Clorobenzeno (Mono)	na	0,41	40	45	120	70
1,2-Diclorobenzeno	na	0,73	150	200	400	1.000
1,3-Diclorobenzeno	na	0,39	-	-	-	-
1,4-Diclorobenzeno	na	0,39	50	70	150	300
1,2,3-Triclorobenzeno	na	0,01	5	15	35	(a)
1,2,4-Triclorobenzeno	na	0,011	7	20	40	(a)
1,3,5-Triclorobenzeno	na	0,5	-	-	-	(a)
1,2,3,4-Tetraclorobenzeno	na	0,16	-	-	-	-
1,2,3,5-Tetraclorobenzeno	na	0,0065	-	-	-	-
Hexaclorobenzeno	na	0,01	-	-	-	-
1,2,4,5-Tetraclorobenzeno	na	0,003 ⁽³⁾	0,005	0,1	1	1
Étanos clorados						
1,1-Dicloroetano	na	-	8,5	20	25	280
1,2-Dicloroetano	na	0,075	0,15	0,25	0,5	10
1,1,1-Tricloroetano	na	-	11	11	25	280
Étenos clorados						
Cloreto de vinila	na	0,003	0,005	0,003	0,008	5
1,1-Dicloroeteno	na	-	5	3	8	30
1,2-Dicloroeteno - cis	na	-	1,5	2,5	4	(b)
1,2-Dicloroeteno - trans	na	-	4	8	11	(b)
Tricloroeteno - TCE	na	0,0078	7	7	22	70
Tetracloroeteno - PCE	na	0,054	4	5	13	40
Metanos clorados						
Cloreto de Metileno	na	0,018	4,5	9	15	20
Clorofórmio	na	1,75	3,5	5	8,5	200
Tetracloreto de carbono	na	0,17	0,5	0,7	1,3	2
Fenóis clorados						
2-Clorofenol (o)	na	0,055	0,5	1,5	2	10,5
2,4-Diclorofenol	na	0,031	1,5	4	6	10,5
3,4-Diclorofenol	na	0,051	1	3	6	10,5
2,4,5-Triclorofenol	na	0,11	-	-	-	10,5
2,4,6-Triclorofenol	na	1,5	3	10	20	200
2,3,4,5-Tetraclorofenol	na	0,092	7	25	50	10,5
2,3,4,6-Tetraclorofenol	na	0,011	1	3,5	7,5	10,5
Pentaclorofenol (PCP)	na	0,16	0,35	1,3	3	9
Fenóis não clorados						
Cresóis	na	0,16	6	14	19	175

Fenol	na	0,2	5	10	15	140
Ésteres ftálicos						
Dietilexil ftalato (DEHP)	na	0,6	1,2	4	10	8
Dimetil ftalato	na	0,25	0,5	1,6	3	14
Di-n-butil ftalato	na	0,7	-	-	-	-
Pesticidas organoclorados						
Aldrin ⁽²⁾	na	0,0015 ⁽³⁾	0,003	0,01	0,03	(d)
Dieldrin ⁽²⁾	na	0,043 ⁽³⁾	0,2	0,6	1,3	(d)
Endrin ⁽²⁾	na	0,001 ⁽³⁾	0,4	1,5	2,5	0,6
DDT ⁽²⁾	na	0,01 ⁽³⁾	0,55	2	5	(c)
DDD ⁽²⁾	na	0,013	0,8	3	7	(c)
DDE ⁽²⁾	na	0,021	0,3	1	3	(c)
HCH beta	na	0,011	0,03	0,1	5	0,07
HCH – gama (Lindano)	na	0,001	0,3	0,07	1,5	2
PCBs						
total	na	0,0003 (3)	0,01	0,03	0,12	3,5

(1) – Procedimentos analíticos devem seguir SW-846, com metodologia de extração de inorgânicos 3050b ou 3051 ou procedimento equivalente.

(2) – Para avaliação de risco, deverá ser utilizada a abordagem de unidade toxicológica por grupo de substancias.

(3) – Substância banida pela Convenção de Estolcomo, ratificada pelo Decreto Legislativo nº 204, de 07-05-2004, sem permissão de novos aportes no solo.

na – não se aplica para substancias orgânicas.

(a) – somatória para triclorobenzenos = 20 µg/L.

(b) – somatória para 1,2 dicloroetenos = 50 µg/L.

(c) – somatória para DDT-DDD-DDE = 2 µg/L.

(d) – somatória para Aldrin e Dieldrin = 0,03 µg/L.

Em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos, a contaminação das águas subterrâneas ocorre através da infiltração do chorume no solo sob o aterro atingindo a zona saturada. O chorume é formado pela percolação das águas das chuvas no corpo de resíduos e os líquidos gerados pela degradação destes.

O chorume contém normalmente elevadas concentrações de amônia, sólidos totais dissolvidos, carbono orgânico, cloreto, ferro, além de concentrações menores de um grande número de outros contaminantes inorgânicos e orgânicos (Mirecki & Parks, 1994). Na tabela 2.3 são apresentadas as concentrações dos principais parâmetros de composição de líquidos percolados de aterros sanitários, onde podem ser observados os valores mínimos e máximos obtidos para os parâmetros físico-químicos.

Tabela 2.3: Faixa de concentração dos principais parâmetros de percolados de aterros sanitários (Modificado de Contrera, 2003).

Parâmetro	Unidade	Faixa
DQO	mg/L	150 – 100.000
DBO ₅	mg/L	100 – 90.000
pH	-	5,3 – 8,5
Alcalinidade	mg CaCO ₃ /L	300 – 11.500
NH ₄	mg/L	1 – 1.500
N _{org}	mg/L	1 – 2.000
N _{tot}	mg/L	50 – 5.000
NO ₃	mg/L	0,1 – 50
NO ₂	mg/L	0 – 25
P _{tot}	mg/L	0,1 – 30
PO ₄	mg/L	0,3 – 25
Ca	mg/L	10 – 2.500
Mg	mg/L	50 – 1.150
Na	mg/L	50 – 4.000
K	mg/L	10 – 2.500
SO ₄	mg/L	10 – 1.200
Cl	mg/L	30 – 4.000
Fe	mg/L	0,4 – 2.200
Zn	mg/L	0,05 – 170
Mn	mg/L	0,4 – 50
Cd	µg/L	0,5 – 140
Co	µg/L	4 – 950
Ni	µg/L	20 – 2.050
Pb	µg/L	8 – 1.020
Cr	µg/L	30 – 1.600
Cu	µg/L	4 – 1.400
Hg	µg/L	0,2 – 50

CAPÍTULO III

ÁREA DE ESTUDO

3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A área do Aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru localiza-se na parte oriental da Bacia Sedimentar do Paraná, no Planalto Ocidental (figura 3.1). Predominam as rochas sedimentares do Grupo Bauru, representado pelas formações Adamantina e Marília que recobrem as rochas vulcânicas da formação Serra Geral (figura 3.2).

Figura 3.1: Mapa geológico do Estado de São Paulo (modificado de Lago, 2004).

A Bacia do Paraná é uma bacia sedimentar, que evoluiu sobre a Plataforma Sul-Americana, e sua formação teve início a aproximadamente 400 milhões de anos. A persistente subsidência na área de formação da bacia possibilitou o acúmulo de grande espessura de sedimentos, lavas basálticas e sills de diabásio, ultrapassando 5.000 metros na porção mais profunda. Sua evolução se deu por fases de subsidência e soerguimento com erosão associada,

no transcorrer das quais a sedimentação se processou em sub-bacias. A tabela 3.1 mostra a coluna estratigráfica sintetizada da Bacia Sedimentar do Paraná (Lago, 2004).

Figura 3.2: Mapa geológico da região de Bauru – SP (Lago, 2004).

As principais litologias correspondem da base para o topo, às Formações Pirambóia, Botucatu, Serra Geral e Grupo Bauru (Formações Marília e Adamantina), limitadas na base pela Formação Corumbataí. As litologias que constituem as unidades estratigráficas são descritas a seguir, de acordo com Cavaguti & Silva (1992).

3.1.1 Formação Corumbataí

A Formação Corumbataí ocorre no embasamento impermeável das formações mesozóicas sobrejacentes e é constituída por uma sequência de clastos finos, representada por camadas de argilitos, siltitos e folhelhos, com intercalações frequentes de camadas de calcários, às vezes oolíticos e de arenitos muito finos.

3.1.2 Formação Pirambóia

A Formação Pirambóia ocorre em toda a área, assentada sobre a Formação Corumbataí. É constituída por uma seqüência predominantemente arenosa de granulação fina a média com teor de argila crescente em direção à base, com ocorrência local de arenitos grossos a conglomeráticos e intercalações pouco espessas de lamitos avermelhados, mais freqüentes nas seções basais. O contato superior pode ser com a Formação Botucatu de maneira transicional ou com a Formação Marília de forma discordante.

3.1.3 Formação Botucatu

A Formação Botucatu é representada por um pacote de arenitos avermelhados finos a médios, de origem eólica. O contato superior pode ser abrupto com a Formação Serra Geral ou de maneira discordante com o Grupo Bauru.

3.1.4 Formação Serra geral

A Formação Serra Geral é formada por derrames de lavas basálticas. Na parte basal, apresenta interdigitamento com os arenitos da Formação Botucatu. O contato superior ocorre com o Grupo Bauru de forma discordante.

3.1.5 Grupo Bauru

O Grupo Bauru é representado na área pelas formações Adamantina (inferior) e Marília (superior), que recobrem todas as formações geológicas já descritas. Apresenta uma seqüência basal lamítica, de origem lacustre, sobre a qual se encontram arenitos finos a grossos, argilosos, avermelhados, com algumas intercalações de lamitos avermelhados.

Tabela 3.1: Coluna estratigráfica sintetizada da Bacia Sedimentar do Paraná (Lago, 2004).

Idade Era	Unidade		Litologias
	Grupo	Formação	
Cenozóica	1	Depósitos Cenozóicos	Areias e argilas associadas a várzeas: materiais arenosos e lateríticos de cobertura.
	2	Rio Claro	Arenitos pouco consolidados com lentes de argilas e níveis conglomeráticos na base.
Mesozóica	Bauru	Marília	Arenitos finos a grossos, argilosos, avermelhados, com algumas intercalações de lamitos avermelhados.
		Adamantina	
	São Bento	Serra Geral	Derrames de basaltos com lentes de arenitos interderrames na base.
		Botucatu	Arenitos avermelhados finos a médios, bem selecionados, com estratificações cruzadas de grande porte.
		Pirambóia	Arenitos, níveis de lamitos, com estratificações cruzadas de médio a grande porte.
Paleozóica	Passa Dois	Corumbataí	Argilitos e siltitos arroxeados e marrom avermelhados, com intercalações de arenitos, leitos carbonáticos e coquinas.
		Irati	Folhelhos pirobetuminosos, calcários dolomíticos e siltitos.
	Tubarão	Tatuí (Palermo/Rio Bonito)	Siltitos e siltitos arenosos. Podem ocorrer arenitos, conglomerados e calcários.
		Itararé/Aquidauana	Arenitos, siltitos, varvitos e diamictitos.
Pré-Cambriano Granitos, gnaisses, xistos e quartzitos.			

3.2 CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL

Na área de estudo ocorrem arenitos do Grupo Bauru, representado pelas Formações Adamantina e Marília. Esta unidade é importante, pois a água subterrânea explorada na região de Bauru provém dos Grupos Bauru e São Bento (Formações Serra Geral, Botucatu e Pirambóia). Segundo Cavaguti & Silva (1992), o Grupo Bauru tem espessura média de 120m, sendo que o aquífero Bauru é o superior, onde estão perfurados os poços mais rasos.

O nível d água localiza-se a uma profundidade no mínimo superior a 5 m da cota da base do aterro, estabelecido no projeto do aterro sanitário (Mondelli, 2004).

A área do aterro é constituída por aluviões, coluviões, solo de alteração e arenito. O aluvião é caracterizado por areia fina silto-argilosa e o coluvião por areno-argiloso. O solo do aterro possui textura de areia fina a media argilosa.

3.3 ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE BAURU

O Aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru está localizado na Rodovia Marechal Rondon, Km 353 mais 500 metros, a uma distância de 15 Km do centro da cidade, e tem como referência as coordenadas 22°15'S e 49°10'W (foto 3.1). Segundo a CETESB (2006) a cidade de Bauru produz aproximadamente 212 toneladas de lixo por dia.

Foto 3.1: Aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru – SP.

O aterro funciona de acordo com a legislação da CETESB, que avaliou seu IQR (Índice de Qualidade do Aterro de Resíduos em Valas) em 8,7 em 2006, considerado como condição adequada (A). A área ocupada pelo aterro é de aproximadamente 270.000 m², com 3 camadas de resíduos com 4 m de altura cada (foto 3.2). O aterro de impermeabilização é constituído do solo bem compactado do próprio local (que apresenta baixo coeficiente de permeabilidade). Sobre o aterro de impermeabilização existe uma camada impermeabilizante betuminosa com asfalto diluído CM 30 (FIPAI,1992).

Foto 3.2: Vista panorâmica do Aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru, destacando os três patamares (Outubro, 2006).

O sistema de drenagem de líquidos percolados do aterro consiste em linhas de drenagem principal e secundária formadas por canaletas de concreto. Os líquidos percolados convergem para uma caixa central de coleta (foto 3.3), de onde são destinados à recirculação ou ao sistema de lagoas de estabilização. A drenagem dos gases gerados pela decomposição do lixo confinado (metano - CH₄ e dióxido de carbono – CO₂) é feita por meio de tubos de concreto (foto 3.4) (FIPAI, 1992). Existem 13 poços de monitoramento ao redor do aterro, sendo que um poço é considerado como sendo de poço de montante e sete de jusante (foto 3.5).

Foto 3.3: Sistema de drenagem de líquidos e casa de coleta de chorume (Outubro, 2006).

Foto 3.4: Sistema de drenagem de gases (Outubro, 2006).

Foto 3.5: Poços de monitoramento (Outubro, 2006).

3.4 INVESTIGAÇÃO GEOAMBIENTAL ANTECEDENTE

Lago (2004) realizou uma campanha de investigação geoambiental no Aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru através dos métodos geofísicos eletroresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo. Os resultados obtidos com o levantamento de potencial espontâneo mostrados na figura 3.3 indicam o sentido predominante do fluxo subterrâneo como sendo leste-noroeste, representado pelo aumento dos valores de potencial espontâneo.

Mondelli (2004) realizou ensaios intrusivos com base na interpretação dos ensaios geofísicos realizados na área. O mapa da figura 3.4 contém a localização das sondagens elétricas, linhas de caminhamento elétrico, sondagens com piezocone de resistividade, poços de monitoramento e os limites do aterro.

Os dados de resistividade e cargabilidade aparentes de cada perfil de caminhamento elétrico coletados por Lago (2004) foram submetidos à rotina de inversão, gerando seções de resistividade e cargabilidade reais. Os dados de resistividade e cargabilidade de cada seção foram então interpolados nas profundidades teóricas de cada nível de investigação, gerando mapas de resistividade da região do aterro em várias profundidades (Elis *et al*, 2007).

A figura 3.5a mostra o mapa de resistividade na profundidade de 10 m (acima da zona saturada na maior parte), onde é possível observar uma grande anomalia condutora dentro dos limites do aterro que se estende para fora desse limite na direção oeste-noroeste, onde a zona saturada torna-se mais rasa. O tamanho da anomalia condutora é maior na profundidade de 25 m, como se observa na figura 3.5b, a partir de dentro para fora dos limites do aterro. A anomalia condutora observada dentro do aterro deve-se à formação do chorume, e a anomalia condutora observada fora do aterro sugere a formação de uma pluma de contaminação. Os resultados dos ensaios de eletroresistividade mostram que zonas de menor resistividade se desenvolvem principalmente no sentido leste-noroeste, caracterizando um possível caminho preferencial da pluma de contaminação, que é concordante com o sentido do fluxo subterrâneo local.

A figura 3.6a mostra o mapa de cargabilidade na profundidade de 10 m, onde é possível observar uma anomalia com altos valores de cargabilidade dentro dos limites do aterro, que se deve à presença de materiais polarizáveis no corpo de resíduos. Na figura 3.6b observa-se valores de cargabilidade mais elevados dentro dos limites do aterro, mas observa-se principalmente uma diminuição dos valores de cargabilidade na região à jusante do aterro, sugerindo novamente a presença de uma pluma de contaminação evoluindo nesse sentido.

Mondelli (2004) conclui que a impermeabilização do fundo do aterro com CM-30 diluído parece não ter sido eficiente. Os resultados dos ensaios com o piezocone de resistividade (RCPTU) confirmaram uma possível contaminação das regiões menos resistivas. Análises químicas de amostras de água coletadas dos poços de monitoramento indicaram que os poços mais contaminados estão localizados a noroeste do aterro.

A análise conjunta de toda a investigação no aterro mostra que a pluma de contaminação ultrapassa os limites do aterro para jusante, a oeste-noroeste. Com base nesses resultados e com o objetivo de estudar o desenvolvimento dessa pluma mais detalhadamente, determinou-se com área de estudo a região adjacente às cavas preenchidas com resíduos, à jusante (figura 3.7 e foto 3.6).

Figura 3.6: Distribuição de cargabilidade. (a) Profundidade teórica de 10 m. (b) Profundidade teórica de 25 m (Elis *et al*, 2007).

Figura 3.7: Área do levantamento 3D.

Foto 3.6: Vista panorâmica d a área escolhida para o levantamento 3D (Outubro, 2006).

CAPÍTULO IV

METODOLOGIA

4.1 MÉTODOS GEOFÍSICOS UTILIZADOS – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1.1 MÉTODO DA ELETRORESISTIVIDADE

A resistividade elétrica e seu inverso, a condutividade elétrica, relacionam-se aos mecanismos de propagação de corrente elétrica nos materiais pela condução eletrônica e pela condução eletrolítica. A condutividade eletrônica em solos e rochas pode ser devida à presença de minerais metálicos e grafita (condutores) em sua matriz, e a condutividade eletrolítica devida ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras dos solos e rochas.

Em geral, a condutividade é eletrolítica, pois apenas em casos específicos os minerais condutores ocorrem em rochas em quantidades suficientes para aumentar sua condutividade global. A condução eletrolítica ocorre nos espaços entre os poros, nas superfícies dos grãos, fraturas, falhas e diques.

A resistividade dos solos e rochas que possuem condutividade eletrolítica é afetada principalmente por quatro fatores:

- composição mineralógica;
- porosidade;
- teor em água;
- quantidade e natureza dos sais dissolvidos.

Dentre esses fatores, o teor de umidade e a salinidade são os mais importantes. O aumento do teor de umidade e da quantidade de sais dissolvidos leva a uma diminuição dos valores de resistividade. Devido a essa série de fatores, o parâmetro resistividade tem um amplo limite de variação, mesmo para um único tipo de rocha, como pode ser observado na figura 4.1.

Figura 4.1: Valores de resistividade elétrica de materiais conhecidos (modificado de Elis, 1998).

4.1.1.1 TEORIA ELEMENTAR

Em qualquer superfície esférica S , a uma distância r da origem, a corrente flui radialmente. Considerando um semi-espaço, a corrente flui radialmente em uma semi-esfera, como mostra a figura 4.2. Aplicando uma corrente elétrica I através de um eletrodo na superfície do semi-espaço, a corrente flui radialmente para fora através da semi-esfera de raio r , e superfície $2\pi r^2$. Assim a densidade de corrente para um eletrodo pontual no semi-espaço homogêneo é

$$J_r = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (4.1).$$

Figura 4.2: Direção do fluxo de corrente no semi-espaço.

Se ρ é a resistividade homogênea isotrópica, então podemos escrever a *Lei de Ohm* da forma

$$E_r = J_r \rho = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (4.2), \text{ onde}$$

E_r é o campo elétrico gerado por I .

O potencial elétrico V a uma distância r dos eletrodos é dado pela integral de E_r entre r e o infinito

$$V = \int_r^{\infty} E_r dr = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (4.3).$$

Essa equação fornece a relação fundamental para todos os métodos de prospecção elétrica realizados na superfície da terra.

Se dois eletrodos de correntes de intensidade $+I$ e $-I$ são colocados na superfície de um sólido condutor nas posições C1 e C2, o potencial resultante no ponto P1 é

$$V_{P1} = V_{C1} - V_{C2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} \right] \quad (4.4),$$

onde r_{C1P1} é a distancia entre C1 e P1 e r_{C2P1} é a distancia entre C2 e P1.

Na prática, mede-se uma diferença de potencial ao invés de um potencial, de maneira que para um arranjo de quatro eletrodos escreve-se

$$\Delta V = V_{P1} - V_{P2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} \right] \quad (4.5),$$

onde r_{C1P2} é a distancia entre C1 e P2 e r_{C2P2} é a distancia entre C2 e P2.

A resistividade do semi-espaco é então dada por

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot K \quad (4.6),$$

onde a constante K , chamada *fator geométrico*, depende das posições dos eletrodos.

A resistividade real de um solo homogêneo isotrópico pode ser calculada pela equação (4.6). Sobre solos não homogêneos e/ou anisotrópicos, a resistividade medida é uma *resistividade aparente*, que varia com a posição e/ou direção do arranjo eletródico. Cada medida de resistividade da subsuperfície é a resistividade aparente de um semi-espaco homogêneo equivalente. Não é necessariamente representativa da resistividade real de qualquer elemento, nem uma simples média das resistividades reais. Entretanto, ela varia sistematicamente através de uma seção geológica e pode ser o diagnóstico para camadas e

para a presença de heterogeneidades condutoras ou resistivas. A resistividade aparente é calculada como

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \cdot K \quad (4.7).$$

4.1.2 MÉTODO DA POLARIZAÇÃO INDUZIDA – IP

A polarização induzida é um fenômeno elétrico estimulado por corrente elétrica observado como uma resposta retardada à voltagem, em materiais naturais. Em alguns corpos que são atravessados por uma corrente elétrica, quando esta é interrompida, a diferença de potencial gerada não desaparece bruscamente, mas é atenuada gradualmente. Durante o tempo de fluxo original injetado, presume-se que alguma energia seja armazenada no material. O decaimento da voltagem no material, medido após esse fluxo, representa a volta do material para o seu estado natural após o distúrbio gerado pela corrente aplicada.

Provavelmente essa energia armazenada existe sob diversas formas, como por exemplo, mecânica, elétrica e química, entretanto diversos estudos de polarização estabeleceram que a energia química é a mais importante (Telford *et al*, 1990).

Braga (1999) reúne diversos trabalhos sobre polarização induzida em hidrogeologia e conclui que:

- a magnitude do efeito da polarização depende da resistividade da solução, da quantidade e espécie de argila e do cátion que satura a argila;
- geralmente, a polarizabilidade diminui com a diminuição da resistividade, então camadas de argilas e águas salgadas resultam em pequenos efeitos IP;
- areia quartzosa pura, saturada com água, não mostra quase nenhum efeito IP;
- argilas puras, apresentam baixa resistividade e muito baixa polarização;
- camadas arenosas, apresentam alta resistividade e cargabilidade intermediária;
- a resposta IP, em camadas com misturas de areias e argilas, é bem maior do que a resposta em camadas argilosas puras;

4.1.2.1 FONTES DE EFEITO IP

O armazenamento de energia química é o resultado de:

- variações na mobilidade dos íons no fluido através da estrutura da rocha – *polarização de membrana*. Constitui o *background* do efeito IP e ocorre em rochas que não contêm minerais metálicos;

- variações entre a condutividade eletrolítica e eletrônica quando minerais metálicos estão presentes – *polarização de eletrodo*. Tem magnitude maior do que o *background* e depende da presença de minerais metálicos na rocha.

Os dois efeitos são indistinguíveis para a medição do efeito IP.

4.1.2.1.1 POLARIZAÇÃO DE MEMBRANA

Quando minerais metálicos estão ausentes nas rochas ou ocorrem com pouca frequência, a única forma de condução é a eletrolítica. Nesta situação, a estrutura da rocha deve ser porosa para permitir o fluxo de corrente. A maioria dos minerais das rochas tem uma rede de cargas negativas na interface superfície-fluido do poro. Consequentemente os íons positivos são atraídos e os negativos são repelidos por essa interface. Essa concentração de íons positivos pode se estender na zona do fluido até a profundidade da espessura do próprio poro, como mostra a figura 4.3a. Se isso ocorrer, quando um campo elétrico for aplicado, os íons negativos se acumularão em uma extremidade da zona, e deixarão a outra vazia. Como resultado dessa distribuição de polarização, o fluxo de corrente é impedido, como ilustrado na figura 4.3b. Quando a corrente é interrompida os íons retornam as suas posições originais em um intervalo de tempo finito.

A magnitude da polarização de membrana é maior na presença de minerais de argilas, cujos poros são particularmente pequenos. Entretanto, essa magnitude não cresce constantemente com a concentração de argila, mas atinge um máximo e decresce novamente. Isso ocorre porque deve haver uma passagem alternativa maior no material, onde não ocorre o acúmulo de íons, caso contrário tanto o fluxo de corrente com a polarização seriam reduzidos. O aumento da salinidade do fluido do poro também provoca uma queda no efeito de polarização (Telford *et al*, 1990).

Figura 4.3: Efeito de polarização de membrana. a) Distribuição normal de íons em um arenito poroso; b) Polarização de membrana em um arenito poroso devido à aplicação de voltagem em corrente contínua (modificado de Telford *et al*, 1990).

4.1.2.1.2 POLARIZAÇÃO DE ELETRODO

A polarização de eletrodo ocorre quando minerais metálicos estão presentes na rocha e o fluxo de corrente é parcialmente eletrônico e parcialmente eletrolítico. Na presença de um mineral metálico, uma rede de cargas de sinais opostos é formada em cada face, resultando em um acúmulo de íons no eletrólito adjacente a cada face, como mostra a figura 4.4. A ação é de eletrólise, quando a corrente flui e ocorrem trocas de elétrons entre o metal e os íons da solução. Esse efeito é conhecido como sobrevoltagem (*overvoltage*).

Essa sobrevoltagem é a energia potencial extra requerida para dar início a processos eletroquímicos, particularmente a transferência de elétrons. Esse potencial deve-se principalmente a reação de oxidação-redução, chamado “sobrevoltagem de ativação”. Também contribui para a sobrevoltagem o gradiente de concentração iônica da solução na interface.

Como a velocidade do fluxo de corrente no eletrólito é muito menor do que no metal, o acúmulo de íons é mantido pela voltagem externa. Quando a corrente é interrompida, a voltagem residual decai conforme os íons voltam ao seu estado de equilíbrio.

Figura 4.4: Fluxo eletrolítico no poro superior e polarização de eletrodo no poro inferior (Telford *et al*, 1990).

A magnitude da polarização de eletrodo depende da corrente externa e também das características do meio. Depende da porosidade e resistividade da rocha hospedeira, assim como da concentração de minerais, pois como é um fenômeno de superfície, espera-se que seja tão maior quanto mais disseminado o mineral (Telford *et al*, 1990).

4.1.2.2 CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE

O circuito da figura 4.5 ilustra o modelo de circuito analógico (Pelton *et al*, 1978) do mecanismo responsável pelo efeito IP. O modo de relaxamento Cole-Cole, cujo modelo matemático tenta explicar a variação da resistividade com a frequência, observado no método IP, é definido como

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right] \quad (4.8),$$

onde ρ = resistividade, m = cargabilidade verdadeira, ω = frequência angular, τ = tempo de relaxação, c = constante de relaxação.

Figura 4.5: Modelo de circuito analógico de uma rocha (modificado de Ward, 1990).

No circuito, ρ_0 simula a passagem não bloqueada pelo poro, e a impedância complexa $\rho_1(i\omega X)^{-c}$ simula a interface iônica-metálica e a passagens bloqueadas pelo poro. Superficialmente, os tempos de armazenamento e decaimento se assemelham ao tempo de carga e descarga de um circuito RC, respectivamente. Entretanto a curva de decaimento não é exponencial como no circuito RC, nem começa no potencial máximo (Telford, 1990).

Figura 4.6: Variação de potencial com o tempo. a) Polarização induzida; b) Circuito RC (Telford *et al*, 1990).

4.1.2.3 FORMAS DE MEDIÇÃO DA POLARIZAÇÃO INDUZIDA

Assim como na eletroresistividade, o efeito IP é medido pela aplicação de uma corrente elétrica artificial no terreno através de dois eletrodos, e medição do potencial gerado em outros dois eletrodos nas proximidades do fluxo de corrente. A medição é feita durante o fluxo de corrente e após seu cessamento. Medidas do efeito IP podem ser realizadas tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. No domínio do tempo a voltagem inicial V_C emitida durante o intervalo de fluxo de corrente e a voltagem residual $V(t)$ existente em um tempo t após o corte da corrente são medidas. A voltagem residual deve ser medida antes que tenha decaído ao nível de ruído. No domínio da frequência, as medidas de resistividade aparente são feitas em duas ou mais frequências. Os parâmetros medidos nos dois métodos são descritos a seguir.

4.1.2.3.1 MEDIDA NO DOMÍNIO DO TEMPO

PORCENTAGEM IP – Comparação da voltagem residual $V(t)$ existente em um instante t após a corrente ter sido cortada, com a voltagem estabilizada V_C durante o fluxo de corrente. A razão $V(t)/V_C$ é expressa em mV/V, ou em porcentagem, $100 \cdot V(t)/V_C$. Na prática, o intervalo de tempo pode variar de 0,1 a 10 segundos.

INTEGRAL DO TEMPO DE DECAIMENTO – Integração das medidas do potencial sobre um intervalo de tempo. Se o tempo de integração for pequeno e a curva de decaimento for amostrada diversas vezes, os valores da integral são efetivamente as medidas do potencial existente em diferentes instantes. Essa medida é uma extensão da medida de porcentagem IP, da qual se pode obter o formato da curva de decaimento.

CARGABILIDADE - Definida pela integração da curva de descarga durante um intervalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$, é fornecida por:

$$M = \frac{1}{V_C} \int_{t_1}^{t_2} V(t) \cdot dt \quad (4.9).$$

Quando $V(t)$ e V_C têm as mesmas unidades, a cargabilidade (M) pode ser medida em milissegundos, mas geralmente é expressa em mV/V.

4.1.2.3.2 MEDIDA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

EFEITO DE FREQUÊNCIA – Medição da resistividade aparente em duas ou mais frequências. O efeito de frequência é definido como

$$fe = \frac{(\rho_{dc} - \rho_{ac})}{\rho_{ac}} \quad (4.10),$$

enquanto a porcentagem do efeito de frequência é dada por

$$PFE = 100 \frac{(\rho_{dc} - \rho_{ac})}{\rho_{ac}} \quad (4.11),$$

onde ρ_{dc} , ρ_{ac} são as resistividades aparentes medidas em d.c. e em altas frequências. Na prática, as medidas são realizadas na faixa de 0,1 a 10 Hz, e ρ_{dc} é o valor obtido para a menor frequência.

FATOR METÁLICO – Definido como

$$MF = 2\pi \cdot 10^5 \frac{(\rho_{dc} - \rho_{ac})}{\rho_{dc} \rho_{ac}} \quad (4.12).$$

O fator metálico tem unidade de S/m.

4.2 PROCEDIMENTO DE CAMPO – AQUISIÇÃO DE DADOS DE RESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA

Os métodos de eletroresistividade e polarização induzida envolvem medidas de uma impedância, com subsequente interpretação em termos de propriedades elétricas da subsuperfície, e finalmente da subsuperfície geológica.

Em medidas puramente no domínio da frequência, a corrente de entrada é uma onda senoidal com frequência f e período $T = 1/f$. A impedância também pode ser medida no domínio do tempo, e nesse caso a corrente é periodicamente ligada e desligada. A saída é a voltagem medida em vários instantes quando a corrente transmitida é desligada. A entrada também é periódica, porque as medidas devem ser feitas para cada um dos muitos períodos e então somadas ou empilhadas, para eliminar o ruído.

Os equipamentos utilizados possuem uma fonte controlada para emissão de corrente elétrica e medidores da corrente e voltagem geradas. Neste trabalho foi utilizado um sistema resistivímetro fabricado pela *Iris Instruments*, modelo *Syscal Pro*, que mede a voltagem

aplicada e valores da curva de decaimento da voltagem, fornecendo dados de resistividade e cargabilidade.

As medidas são normalmente realizadas com um arranjo de quatro eletrodos, uma corrente elétrica artificial é aplicada no terreno através de dois eletrodos (denominados C1 e C2), e o potencial gerado é medido em outros dois eletrodos (denominados P1 e P2), de maneira a determinar a resistividade real ou aparente em subsuperfície.

Todos os arranjos geométricos usados para obter a resistividade e a cargabilidade aparentes são baseados na equação (4.7). Um resumo dos arranjos mais utilizados é mostrado na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Arranjos eletródicos mais utilizados.

Arranjo	Posição dos eletrodos	Fator geométrico
Schulumberger		$K = \pi \cdot b \cdot (b + 1) \cdot a$
Wenner		$K = 2 \cdot \pi \cdot a$
Pólo-pólo		$K = 2 \cdot \pi \cdot a$
Pólo-dipolo		$K = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot (n + 1) \cdot a$
Dipolo-dipolo		$K = \pi \cdot n \cdot (n + 1) \cdot (n + 2) \cdot a$

4.2.1 AQUISIÇÃO 2D

Conhecida como técnica de caminhamento elétrico (CE), a aquisição 2D obtém a variação lateral de resistividade em profundidades aproximadamente constantes. Isso é alcançado fixando-se um espaçamento de eletrodos e caminhando-se com estes ao longo de perfis e efetuando as medidas.

Dahlin & Zhou (2004) simulam numericamente a aquisição 2D com diversos arranjos eletródicos e avaliam suas vantagens e limitações, considerando a sensibilidade a ruído e efeitos de anomalia. O efeito de anomalia é utilizado na avaliação da eficiência da medição de um arranjo e considera-se que este deve ser significativamente maior do que o nível de ruído local. Os autores concluem que os efeitos de anomalia para os diferentes arranjos variam com a geologia local, e recomendam os arranjos pólo-dipolo, dipolo-dipolo e Schlumberger, entre outros, para levantamentos 2D, sendo que a escolha final deve ser determinada pela geologia local, objetivo da investigação e considerações logísticas.

Com o arranjo dipolo-dipolo, os eletrodos C1 e C2 de injeção de corrente e P1 e P2 de potencial são dispostos segundo um mesmo perfil e o arranjo é definido pelos espaçamentos $X = \overline{C1C2} = \overline{P1P2}$. Normalmente, as medidas são efetuadas em várias profundidades de investigação, isto é $n = 1, 2, 3, \dots$, atribuídas à intersecção das linhas que partem do centro de $\overline{C1C2}$ e $\overline{P1P2}$ com ângulos de 45° como ilustrado na figura 4.7. A profundidade de investigação cresce com o espaçamento (E) entre os centros dos dipolos transmissores e receptores, e teoricamente corresponde a $E/2$. O arranjo dipolo-dipolo é considerado por Dahlin e Zhou (2004) como um arranjo que apresenta boa resolução, porém mais suscetível à contaminação por ruído.

Barker (1989) discute diversos conceitos do termo “profundidade de investigação”, e argumenta que na prática, a profundidade de investigação de um arranjo eletródico é a profundidade com a qual uma medida de resistividade parente feita na superfície pode ser melhor associada. Dahlin e Zhou (2004) ressaltam que a profundidade de investigação de um determinado arranjo, assim como a resolução do imageamento, não depende apenas do tamanho dos dipolos, mas também da geologia local (propriedades elétricas e geometria do corpo anômalo) e do nível de ruído.

Figura 4.7: Arranjo dipolo-dipolo (modificado de Elis, 1998).

4.2.2 AQUISIÇÃO 3D

Como a maioria das estruturas geológicas são 3D por natureza, um levantamento 3D usando o modelo de interpretação 3D teoricamente forneceria resultados mais precisos. Entretanto a aquisição 3D não é rotineiramente usada como a aquisição 2D, principalmente pelo fato de que o custo e o tempo do levantamento 3D são significativamente maiores se a área do levantamento for suficientemente grande.

Para o levantamento 3D os eletrodos são posicionados em uma malha regular com o mesmo espaçamento nas direções perpendiculares x e y . O arranjo mais comum utilizado nesse tipo de levantamento é o pólo-pólo, onde o número máximo de medidas n_{max} depende do número de eletrodos n_e e é dado por $n_{max} = n_e (n_e - 1)/2$. Nesse caso, cada eletrodo é usado como eletrodo de corrente e depois como eletrodo de potencial. Devido à reciprocidade, só é necessário medir o potencial nos eletrodos com índices maiores do que o eletrodo de corrente, como ilustrado na figura 4.8. Para um *grid* de 5 por 5, por exemplo, um conjunto de dados completo tem 300 pontos, e para um *grid* de 7 por 7, 1176 pontos. Essa técnica de levantamento é conhecida como 3D completo. O levantamento de um arranjo como esse pode levar muito tempo. Uma técnica que reduz o número de medidas sem degradar a qualidade do

modelo a ser obtido é o levantamento diagonal cruzado. Nessa técnica as medidas são feitas somente ao longo das linhas horizontal, vertical e da diagonal com 45° que passam pelo eletrodo de corrente, como ilustrado na figura 4.9.

Figura 4.8: Posição dos eletrodos de potencial correspondentes a um único eletrodo de corrente no arranjo 3D completo (modificado de Loke & Barker, 1996b).

Figura 4.9: Posição dos eletrodos de potencial correspondentes a um único eletrodo de corrente no arranjo 3D diagonal cruzado (modificado de Loke & Barker, 1996b).

Muitas vezes o conjunto de dados 3D é construído a partir de dados de perfis 2D paralelos. Comparado com os demais arranjos comumente utilizados, o arranjo dipolo-dipolo

é o mais sensível aos efeitos 3D, devido ao padrão da sua função de sensibilidade. A função de sensibilidade de um arranjo basicamente diz o grau com que uma mudança na resistividade de uma seção da subsuperfície influencia o potencial medido. Quanto maior o valor da função, maior a influência da região da subsuperfície na medida.

Segundo Loke (2002b) o arranjo dipolo-dipolo é o arranjo mais sensível a efeitos tridimensionais, comparado aos demais arranjos mais frequentemente utilizados. A função de sensibilidade do arranjo dipolo-dipolo (figura 4.10) mostra que as regiões com os maiores valores de sensibilidade estão concentradas abaixo dos pares de eletrodos $C1C2$ e $P1P2$. Na figura 4.11 observa-se um alongamento da função de sensibilidade na direção Y. Isso significa que o arranjo é mais sensível a estruturas fora do seu eixo. Essa característica, que pode ser desfavorável para levantamentos 2D, é uma vantagem em levantamentos 3D.

Ainda segundo o autor, o arranjo dipolo-dipolo pode tolerar um espaçamento maior entre as linhas de levantamento (até aproximadamente três vezes o espaçamento entre os eletrodos) e ainda assim conter informação 3D significativa. No caso de perfis paralelos, os valores medidos podem ser combinados em um conjunto de dados 3D e invertidos, gerando um modelo 3D. O modelo 3D gerado deverá ser pior do que o gerado por um levantamento 3D completo, mas deverá revelar as principais variações de resistividade. As técnicas de aquisição 3D são classificadas em ordem decrescente do conteúdo de informação tridimensional:

Categoria 1 – Eletrodos posicionados regularmente em um *grid* retangular, com medidas em todas as direções possíveis;

Categoria 2 - Eletrodos posicionados em um *grid* retangular, com medidas ao longo de um número limitado de ângulos entre as linhas;

Categoria 3 – Medidas feitas em duas direções apenas;

Categoria 4 – Medidas feitas apenas em uma direção.

A acurácia dos modelos obtidos a partir de aquisições das categorias 3 e 4 é menor do que a dos modelos das categorias 1 e 2, e depende fortemente do espaçamento entre as linhas e do arranjo utilizado. Entretanto, mesmo para a categoria 4, os resultados da inversão 3D devem fornecer uma indicação útil se os efeitos 3D são significantes (Loke, 2002b).

Nessa pesquisa, os modelos 3D foram gerados a partir de uma aquisição da categoria 4, com o arranjo dipolo-dipolo.

Para o caso do levantamento 3D consistir em uma série de levantamentos 2D, se as linhas paralelas forem muito espaçadas ou se as linhas não forem paralelas, cada perfil pode ser independentemente invertido e então combinados, formando um modelo quasi 3D (Dahlin

& Loke, 1997). Entretanto, Loke (2002b) ressalta que o modelo gerado por esse procedimento não é um modelo 3D verdadeiro.

Figura 4.10: Função sensibilidade do arranjo dipolo-dipolo. (a) $n = 1$, (b) $n = 2$, (c) $n = 4$, (d) $n = 6$ (Loke, 2002b).

Figura 4.11: Função sensibilidade do arranjo dipolo-dipolo, para $n = 1$. (a) $z = 0,07\text{ m}$, (b) $z = 0,25\text{ m}$, (c) $z = 0,50\text{ m}$, (d) $z = 0,75\text{ m}$ (Loke, 2002b).

4.3 FONTES DE RUÍDO DA ELETRORESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA

A confiabilidade e resolução do imageamento são essencialmente afetadas pelo ruído inerente aos métodos da eletroresistividade e polarização induzida e dependem de todos os aspectos do trabalho de campo. Um nível de ruído subestimado pode fazer com que a inversão falhe no ajuste dos dados e a imagem resultante se torna ruim e contaminada por artefatos. Por outro lado, um nível de ruído superestimado pode diminuir substancialmente a resolução do imageamento (Zhou & Dahlin, 2003). As principais fontes de ruído são descritas a seguir.

4.3.1 POLARIZAÇÃO DE ELETRODO

Uma das principais fontes de ruído que pode diminuir a qualidade dos dados de resistividade e cargabilidade é o efeito de polarização de eletrodo, atribuído ao acúmulo de carga na interface entre o metal condutor do eletrodo e o solo. Esse efeito, que ocorre quando um eletrodo é usado para transmitir corrente, deve ser levado em conta se o mesmo eletrodo for subsequentemente usado para medir potencial. O efeito de polarização de eletrodo, várias ordens de magnitude maiores do que o sinal induzido, permanece em níveis significativos por dezenas de minutos em solos naturais (Dahlin, 2000). Esse efeito pode ser evitado separando os eletrodos utilizados somente para a transmissão de corrente dos eletrodos utilizados para a medida de potencial.

Uma maneira de minimizar a contaminação dos dados pelo ruído gerado pela polarização de eletrodo, é utilizar dois eletrodos metálicos como eletrodos de corrente, e eletrodos não-polarizáveis como eletrodos de potencial. Os eletrodos não-polarizáveis consistem em um metal imerso em solução saturada do seu próprio sal, dentro de um recipiente poroso que permite que a solução vazze lentamente e faça contato com o solo. Na presente pesquisa, utilizou-se eletrodos porosos com uma haste de cobre (Cu) imersa em uma solução de sulfato de cobre (CuSO_4) (figura 4.12).

Figura 4.12: Eletrodos não polarizáveis.

4.3.2 POLARIZAÇÃO ESPONTÂNEA

São variações de voltagem naturais do solo, causadas por correntes telúricas ou reações eletroquímicas na subsuperfície. Devem ser medidos e eliminados das leituras de potencial (Sumner, 1976). Correntes telúricas são correntes naturais de baixa frequência que se estendem por vastas áreas. Em medidas no domínio do tempo, esse ruído é reduzido pelo valor médio das leituras sobre vários ciclos de decaimento. No domínio da frequência, esse tipo de ruído pode ser reduzido por um filtro passa-alta (Telford *et al*, 1990).

4.3.3 RUÍDOS ANTRÓPICOS

Podem ser considerados como fontes de ruído equipamentos elétricos próximos à área de levantamento, como por exemplo, linhas de transmissão de energia, cercas elétricas, etc.

4.3.4 ACOPLAMENTO CAPACITIVO

Ocorre entre os eletrodos de corrente e cabos de potencial, ou vice-versa, como resultado de fuga de corrente. O efeito capacitivo é normalmente suficientemente pequeno e pode ser desprezado, a não ser que os cabos estejam danificados ou muito próximos aos eletrodos (Telford *et al*, 1990). Para minimizar esse efeito, o cabo de potencial deve estar bem separado do eletrodo de corrente.

4.3.5 ACOPLAMENTO ELETROMAGNÉTICO

Resulta de indutância mútua entre os cabos de corrente e potencial. Esse efeito pode ser grande na utilização de cabos longos ou altas frequências. O acoplamento eletromagnético é particularmente importante no método da polarização induzida, e pode ser facilmente minimizado no domínio do tempo, estabelecendo um atraso entre os instantes do corte de corrente e início da medida do decaimento da voltagem (Sumner, 1976). O arranjo dipolo-dipolo é o menos influenciado por esse efeito, onde os dipolos de corrente e potencial são ambos pequenos em extensão e permanecem distantes um do outro (Sharma, 1997).

4.4 FONTES DE ERROS DAS MEDIDAS DE ELETRORESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA

Para aplicar a técnica de imageamento com sucesso, deve-se ter muita atenção no controle dos dados observados no trabalho de campo e seu processamento, e todas as medidas para minimizar os efeitos de todas as fontes de erros devem ser tomadas. No geral, os erros de medição podem ser classificados em dois tipos: (a) erros no espaçamento dos dipolos e (b) erros na leitura do potencial.

Erros no espaçamento dos dipolos são causados pelo erro no posicionamento dos eletrodos, e podem ser minimizados com um trabalho cuidadoso da equipe.

Erros na leitura do potencial surgem a partir de muitas fontes, como mau contato do eletrodo, danos no cabo, ruído natural, problemas instrumentais (corrente errada, mau contato) e instrumentos inadequados.

Segundo Zhou & Dahlin (2003), dois métodos podem ser adotados para checar a qualidade dos dados. O primeiro é repetir a observação e calcular a média, mediana e desvio padrão como uma estimativa do erro do dado. Outra alternativa é usar a medida normal e recíproca do ponto. Teoricamente, sem nenhum ruído a medida normal e recíproca deveria ter o mesmo valor.

4.5 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

4.5.1 MODELAGEM DIRETA

O maior interesse no processo de modelagem direta é o planejamento do levantamento. É possível simular um levantamento para diversos arranjos e espaçamentos dos dipolos, com o objetivo de escolher a melhor forma de aquisição que resultará no melhor imageamento para determinada situação. Esse procedimento, entretanto, requer informações prévias da subsuperfície. A modelagem direta também pode ser utilizada com o objetivo de esclarecer a interpretação dos dados de campo.

Nesta pesquisa, foram construídos apenas modelos de resistividade. Nesse procedimento, a distribuição de resistividade da subsuperfície é especificada, com o propósito de calcular os valores de resistividade aparente da estrutura que seriam medidos por um arranjo específico. Para distribuições de resistividade complexas, como é o caso das investigações de áreas contaminadas, os valores de resistividade aparente são calculados pelos

métodos de diferenças finitas (*finite difference* – FD) ou elementos finitos (*finite element* – FE) (Loke, 2002b).

Nessa pesquisa foram utilizados os *softwares* livres RES2DMOD (Loke, 2002a) para a modelagem bidimensional e RES3DMOD (Loke, 2001) para a modelagem tridimensional, ambos com o método FD. O modelo de resistividade 2D é subdividido em uma malha retangular (figura 4.13a), onde cada célula recebe um valor de resistividade. O modelo de resistividade 3D é subdividido em células 3D, onde cada célula recebe um valor de resistividade. Os valores de resistividade aparente são calculados com um *grid* retangular de eletrodos sobre uma estrutura 3D (figura 4.14b). O método das diferenças finitas utilizado é uma modificação de Loke (1994) do método descrito por Dey & Morrison (1979a), que calcula os valores de resistividade aparente gerados por cada célula, para um arranjo específico. O método dos elementos finitos utiliza elementos triangulares de primeira ordem (Silvester & Ferrari, 1990) para determinar o potencial elétrico nos nós entre cada célula.

Figura 4.13: a) Parte da malha bidimensional utilizada para a modelagem 2D, com a localização dos eletrodos (Loke, 2002a). b) Parte da malha tridimensional utilizada para a modelagem 3D, com a localização de eletrodos de corrente (I) e potencial (P) (Loke, 2001).

4.5.2 MODELAGEM INVERSA

Todos os processos de inversão essencialmente tentam determinar um modelo para o qual a resposta da subsuperfície esteja de acordo com o dado medido. O modelo é uma representação matemática idealizada de uma seção da terra, que tem um conjunto de parâmetros que são as quantidades físicas que se procura estimar a partir dos dados

observados. A resposta do modelo são os dados sintéticos que podem ser calculados a partir de relações matemáticas que definem o modelo para um dado conjunto de parâmetros.

Em todos os métodos de otimização, um modelo inicial é modificado de modo iterativo tal que a diferença entre a resposta do modelo e os dados observados seja reduzida. O conjunto de dados observados pode ser escrito como um vetor coluna y , onde o número de elementos é o número de medidas, n . A resposta do modelo f pode ser escrita do mesmo modo. Os parâmetros do modelo também podem ser representados como um vetor coluna q , onde o número de linhas é o número de parâmetros, m . A diferença entre os dados observados e os dados sintéticos é dada pelo vetor discrepância g , definido por

$$g = y - f \quad (4.13).$$

No método de otimização dos mínimos quadrados, o modelo inicial é modificado tal que a soma dos quadrados dos erros E da diferença entre a resposta do modelo e o dado observado seja minimizada

$$E = g^T g = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad (4.14), \text{ onde}$$

g^T é o vetor transposto de g e i é o número de medidas.

Para reduzir o valor do erro, a seguinte equação de Gauss-Newton é usada para determinar a mudança nos parâmetros do modelo que deve reduzir a soma dos quadrados do erro

$$J^T J \Delta q_i = J^T g \quad (4.15),$$

onde J é a matriz Jacobiana (de tamanho n por m) das derivadas parciais, J^T é a sua transposta e Δq_i é o vetor de mudança dos parâmetros. Os elementos da matriz Jacobiana são dados por

$$J_{nm} = \frac{\partial f_n}{\partial q_m} \quad (4.16), \text{ que é}$$

a mudança na n -ésima resposta devido à mudança no m -ésimo parâmetro. Após calcular o vetor de mudança dos parâmetros, um novo modelo é obtido por

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (4.17), \text{ onde}$$

k é o número da última da iteração e $k+1$ é o número da iteração que teve o modelo modificado.

Entretanto, o modelo com o menor erro RMS pode apresentar variações irreais dos valores de resistividade e nem sempre são os melhores modelos geológicos. O melhor procedimento nesses casos é escolher o modelo para o qual o erro RMS da iteração anterior não varia significativamente (Loke, 2002b). A convergência do erro RMS é na verdade mais

importante do que seu valor absoluto. A variação do erro RMS entre duas iterações consecutivas é um parâmetro que pode ser aplicado a dados com diferentes níveis de ruído (Geotomo Software, 2001).

Quando o número de parâmetros é grande, tal como na inversão 2D, o modelo produzido por esse método pode trazer distribuições de resistividade erráticas com zonas falsas de alta ou baixa resistividade. Para solucionar esse problema, a equação dos mínimos quadrados de Gauss-Newton é modificada para minimizar variações espaciais nos parâmetros do modelo (i.e. mudança gradual ou suave da resistividade). Esse método de suavização tem a forma

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T g - \lambda F q_k \quad (4.18),$$

onde

$$F = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_y C_y^T C_y + \alpha_z C_z^T C_z \quad (4.19),$$

e C_x , C_y e C_z são as matrizes de suavização nas direções x , y e z . α_x , α_y e α_z são os pesos relativos dos filtros de suavização nas direções x , y e z , respectivamente. O fator λ é conhecido como *damping factor* e tem a função de contrair a variação do vetor de parâmetros.

O método de suavização por mínimos quadrados é amplamente utilizado na inversão 2D e 3D. O cálculo da matriz Jacobiana pode ser feito de três maneiras: a) Método Quasi-Newton (inversão 2D); b) Método Gauss-Newton completo (inversão 2D e 3D); c) Método Gauss-Newton incompleto (inversão 2D e 3D).

O método Gauss-Newton completo recalcula a matriz Jacobiana das derivadas parciais para todas as iterações. Já no método Quasi-Newton, utilizado principalmente pela redução do tempo computacional, a matriz Jacobiana é calculada na primeira iteração, e as matrizes Jacobianas das iterações subseqüentes são estimadas por uma técnica de atualização. Seria esperado que o método Gauss-Newton completo, por trabalhar com derivadas parciais exatas, convergisse com menos iterações. Entretanto, Dahlin e Loke (2002) observam que para muitos conjuntos de dados, o método Quasi-Newton pode ser significativamente mais rápido do que o método Gauss-Newton. O método Gauss-Newton incompleto é uma combinação dos métodos Quasi-Newton e Gauss-Newton, no qual as derivadas parciais são diretamente recalculadas para as primeiras duas ou três iterações, e então estimadas pela técnica de atualização para as subseqüentes iterações.

Dahlin e Loke (2002) testaram esses três métodos para alguns modelos sintéticos e concluíram que em áreas com contrastes de resistividade moderados (menor do que 10:1), os modelos invertidos obtidos pelos três métodos são semelhantes. Entretanto, em áreas com

grandes contrastes de resistividades, o método Gauss-Newton completo fornece um resultado mais preciso do que os outros dois. A diferença, entretanto, é pequena, e os autores ressaltam que o método de Gauss-Newton incompleto representa boa relação entre velocidade de processamento e acurácia dos resultados.

Outro método de inversão 2D e 3D amplamente utilizado é a inversão robusta, que minimiza a diferença absoluta entre os dados de resistividade aparente medidos e calculados. A princípio a inversão robusta é superior à inversão por mínimos quadrados, pois minimiza a diferença absoluta entre os dados medidos e calculados ao invés do quadrado da diferença. A inversão por mínimos quadrados dá mais importância a pontos para os quais a diferença entre os dados medidos e calculados é maior, tornando esse método mais sensível a *outliers*. Sendo assim, a inversão robusta é menos sensível a ruído (Dahlin & Zhou, 2004). Esse método de otimização tem a forma

$$(J^T J + \lambda F_R) \Delta q_k = J^T R_d g - \lambda F_R q_k \quad (4.20),$$

onde

$$F_R = \alpha_x C_x^T R_m C_x + \alpha_y C_y^T R_m C_y + \alpha_z C_z^T R_m C_z \quad (4.21),$$

e R_d e R_m são matrizes introduzidas para que os diferentes elementos dos erros de ajuste dos dados e vetores de robustez do modelo tenham pesos iguais.

Por produzir um modelo com limites mais bruscos, a inversão robusta é indicada para casos em que a subsuperfície apresenta corpos predominantemente homogêneos com limites mais abruptos, como uma rocha ígnea. Esse caso é o oposto do esperado para uma pluma de contaminação, que apresenta variações mais suaves e, portanto deve ser interpretada pelo método de suavização por mínimos quadrados (Loke, 2002b).

Na presente pesquisa, utilizou-se os *softwares* RES2DINV (Geotomo Software, 2003) para a inversão 2D e RES3DINV (Geotomo Software, 2001) para a inversão 3D. Como o objetivo deste trabalho é imagear uma pluma de contaminação, utilizou-se a rotina de inversão pelo método de suavização por mínimos quadrados tanto na interpretação 2D como na 3D. As matrizes Jacobianas e os valores de resistividade aparente foram calculados pelo método das diferenças finitas.

CAPÍTULO V

AQUISIÇÃO DE DADOS E TRATAMENTO PRELIMINAR

5.1 ENSAIOS GEOFÍSICOS REALIZADOS

O levantamento geofísico foi conduzido em uma área adjacente à disposição dos resíduos, à jusante da cava preenchida com os resíduos. O levantamento foi composto por uma série de 14 linhas de caminhamentos elétricos paralelos. Utilizou-se o arranjo dipolo-dipolo com espaçamento de 5 m entre os dipolos e 5 m entre cada linha. A figura 5.1 mostra o local da malha 3D e o croqui do levantamento.

Figura 5.1: Croqui das linhas de caminhada elétrica.

O equipamento utilizado no levantamento foi o Syscal Pro da Iris Instruments, um equipamento com 10 canais de aquisição simultânea. O cabo utilizado para a medição do potencial possui 10 saídas, permitindo assim a aquisição de dados em 9 níveis de investigação.

Para minimizar a contaminação dos dados pelo ruído gerado pela polarização de eletrodo, foram utilizados dois eletrodos metálicos como eletrodos de corrente, e eletrodos não-polarizáveis como eletrodos de potencial.

Todos os perfis possuem topografia plana, com exceção dos perfis a partir de Y = 55 m, que terminam sobre a cava de resíduos, como pode ser observado no mapa da figura 5.1. Entretanto, a variação topográfica máxima não ultrapassou 4 m ao longo de pelo menos os últimos 45 m de caminhada. O ângulo de inclinação das linhas obteve o máximo de $\theta = \tan^{-1}(\Delta Y / \Delta X) = \tan^{-1}(4 / 45) = 5,1^\circ$. Segundo Fox *et al* (1980), ângulos menores do que 10° não produzem artefatos significativos, sendo assim, a topografia de todas as linhas foi considerada plana.

5.2 TRATAMENTO PRELIMINAR DOS DADOS

Inicialmente cada caminhada elétrica foi interpretado individualmente, com o objetivo de avaliar a qualidade dos dados e consequentemente evitar feições errôneas que poderiam dificultar a interpretação dos modelos 3D.

A qualidade dos dados coletados e consequentemente a qualidade do modelo gerado são afetadas pelas diversas fontes de ruído (citadas no capítulo IV) inerentes ao método. A resistência de contato do conjunto cabos-eletrodos-solo pode afetar seriamente a qualidade da medida. Como a corrente injetada é limitada, altas resistências de contato diminuirão a corrente transmitida, resultando na leitura de potenciais menores e diminuição da razão sinal/ruído (Dahlin, 1993). Sendo assim, procurou-se realizar as medidas com resistência de contato máxima de 6 Kohm.

O equipamento utilizou atribuiu um fator de qualidade a cada ponto medido. Esse fator é um parâmetro de empilhamento da medição, estabelecido pelo usuário, que representa o desvio padrão de cada medida. Durante a aquisição dos dados, estabeleceu-se um mínimo de cinco medidas por ciclo, e máximo de dez, e fator de qualidade 3%. Quando o fator de qualidade é maior do que o estabelecido, a medição continuará até o máximo de medidas. Se for menor, então será feito o número mínimo de medidas (Iris Instruments, 2003).

O ruído natural medido é compensado nas leituras de potencial pelo próprio equipamento. A Figura 5.2 contém os histogramas da resistência de contato, do desvio padrão (fator de qualidade) e do ruído natural do conjunto de dados de todas as linhas.

Figura 5.2: Histograma de: (a) resistência de contato dos eletrodos, (b) desvio padrão das medidas e (c) ruído natural.

A primeira etapa do processamento dos dados de campo consistiu na filtragem de dados com desvio padrão superior a 10%. Também foram removidos os dados que apresentaram valores de cargabilidade aparente negativos, pois valores negativos podem criar artefatos no modelo de cargabilidade e dificultar a interpretação do modelo gerado. De acordo com Nabighian & Elliot (1976), esse efeito pode ocorrer em situações de multicamadas horizontais, onde a camada mais inferior é mais condutiva do que a camada imediatamente acima e a camada mais superior é polarizável. Segundo Martinho & Almeida (2006) o efeito IP negativo também pode ser devido a efeitos geométricos 2D ou 3D relacionados a posição e formato da pluma de contaminação.

Os dados de campo foram processados pela rotina de inversão por suavização pelo método de otimização por mínimos quadrados (Loke, 2002b). Dentre as 14 linhas, 12 apresentaram seus modelos de resistividade com erro RMS superior a 50%. A figura 5.3 apresenta o resultado da inversão dos dados de resistividade da linha em $Y = 25$ m, que

apresentou o maior erro RMS. As demais seções de resistividade e cargabilidade desta primeira filtragem estão reunidas no anexo I.

Na tentativa de entender porque os resultados apresentaram erros de ajuste tão altos, foram elaborados cinco modelos sintéticos de resistividade, com valores de resistividade próximo daqueles obtidos no resultado da inversão das linhas em $Y = 15, 25, 40, 50$ e 60 m. Os valores de resistividade aparente foram calculados pelo método das diferenças finitas, para o arranjo dipolo-dipolo. Um nível de 10% de ruído gaussiano foi adicionado aos valores calculados. Os dados de resistividade aparente calculados foram exportados para o software de inversão, e submetidos à mesma rotina de inversão. As figuras de 5.4 e 5.5 mostram o modelo sintético da linha em $Y = 25$ m, e o resultado da inversão, respectivamente. Os demais modelos sintéticos e os resultados dos processos de inversão são apresentados no anexo II.

A inversão dos dados de resistividade aparente calculados para os modelos sintéticos mostra que a aquisição utilizada no trabalho de campo, isto é, o arranjo dipolo-dipolo com espaçamento de 5 m entre os dipolos e 9 níveis de investigação, não poderia medir os altos valores de resistividade registrados no último nível. Isso ocorre devido ao padrão de sensibilidade do arranjo dipolo-dipolo, que é muito sensível às variações laterais de resistividade na porção mais rasa, mas perde muita sensibilidade com profundidade (Loke, 2002b). Os altos valores de resistividade medidos no último nível são provavelmente gerados por ruído, originado por algum problema no cabo de potencial.

Figura 5.3: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em Y = 25 m, após a primeira filtragem dos dados.

Figura 5.4: Modelo sintético da linha em $Y = 25$ m.

Figura 5.5: Inversão dos dados de resistividade aparente do modelo da figura 5.4.

Baseado na interpretação das seções geradas pelos modelos sintéticos, os dados do último nível de investigação foram removidos. Também foram removidos os pontos que apresentaram alto erro RMS (superior a 100%). Loke (2002b) define como uma regra geral que pontos com erro superior a 100% podem ser removidos.

A figura 5.6 contém o resultado da inversão dos dados de resistividade da linha em $Y = 25$ m, após essa segunda filtragem. De fato a remoção do último nível diminuiu o erro RMS, entretanto algumas seções de resistividade apresentaram erros RMS que podem ser considerados altos. Obteve-se um erro RMS mínimo de 4,8% ($Y = 10$ m) e máximo de 35,8% ($Y = 45$ m), enquanto obteve-se mínimo de 1,2% ($Y = 5$ m) e máximo de 3,3% ($Y = 45$ m) para os dados de cargabilidade aparente.

De acordo com Loke (2003) o modelo com o menor erro RMS nem sempre é o melhor do modelo, particularmente no caso de dados muito ruidosos. Entretanto, observa-se que os erros de ajuste dos dados de cargabilidade aparente são sempre bem menores do que os erros dos dados de resistividade aparente, o que pode representar uma contribuição dos contrastes de resistividade observados para o erro de ajuste dos dados, como sugere o trabalho de Olayinka e Yaramanci (2000).

Olayinka e Yaramanci (2000) construíram modelos sintéticos 2D de resistividade que foram submetidos à rotina de inversão (inversão por suavização por mínimos quadrados – RES2DINV). Os autores constataram que o erro de ajuste dos dados de resistividade aparente (calculadas pelo modelo sintético e pelo modelo invertido) diminui com o número de iterações, como esperado, mas nem sempre o erro de ajuste entre os modelos (sintético e invertido) diminui. Observaram-se situações na qual o erro de ajuste do modelo diminui com o número de iterações (comportamento ideal), permanece invariante (comportamento não-único) e aumenta com o número de iterações (comportamento anti-ideal). Observou-se também que o comportamento ideal ocorreu para contrastes de resistividade muito pequenos, enquanto que o comportamento anti-ideal ocorreu para grandes contrastes de resistividade.

Os autores observaram também que tanto o erro inicial de ajuste dos dados quanto o erro de ajuste dos modelos crescem com o aumento do contraste de resistividade. Outra observação importante foi que para os contrastes de resistividade de 40:1 e 80:1 (contrastos observados nessa pesquisa), os erros de ajuste dos dados de resistividade aparente foram maiores do que para os contrastes menores.

Com base nesses estudos, optou-se por considerar neste trabalho os modelos obtidos na terceira iteração das inversões 2D e 3D. A qualidade dos modelos foi assegurada não

apenas pelos erros RMS fornecidos, mas também por informações diretas, como a profundidade conhecida do topo da zona saturada e a presença dos resíduos.

As figuras 5.7 a 5.10 contêm os resultados da inversão dos dados de resistividade e cargabilidade aparentes medidos, com os oito níveis de investigação, das linhas em $Y = 0$ m e 65 m. As demais seções estão reunidas no anexo III.

A qualidade do imageamento é consolidada pelas seções de resistividade e cargabilidade da linha em $Y = 0$ m (figuras 5.6 e 5.7, respectivamente), onde se observa na profundidade de aproximadamente 8 m valores de resistividade inferiores à 54,9 ohm.m e valores de cargabilidade superiores à 9 mV/V. Atribui-se a essa profundidade o topo da zona saturada, o que está de acordo com antigos dados de poços, que mediram o nível d'água entre 7 e 10 m no local do levantamento.

A qualidade do imageamento também é assegurada pelos contrastes observados a partir da posição de aproximadamente 70 m das seções de resistividade e cargabilidade da linha em $Y = 65$ m (figuras 5.8 e 5.9, respectivamente), posição a partir da qual a linha geofísica está sobre a cava preenchida com resíduos (coberta por uma camada de solo). Esse contraste é marcado pela diminuição dos valores de resistividade (menores do que 20,2 ohm.m) e aumento dos valores de cargabilidade (maiores do que 31,0 mV/V, devido à presença de materiais polarizáveis que constituem os resíduos).

Figura 5.6: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 25$ m.

Figura 5.7: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 0$ m.

Figura 5.8: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 0$ m.

Figura 5.9: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 65$ m.

Figura 5.10: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 65 m.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 INTERPRETAÇÃO DOS MODELOS 3D DE RESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA

Após o tratamento citado no capítulo anterior, os dados das 14 linhas de caminhamento elétrico foram concatenados em um único conjunto de dados que foi submetido à rotina de inversão 3D. Os dados foram processados pela rotina de inversão por suavização pelo método de otimização por mínimos quadrados. O modelo de resistividade é mostrado pelas figuras 6.1, 6.2 e 6.3, nos planos XY, XZ e YZ, respectivamente. As figuras 6.4, 6.5 e 6.6 contêm o modelo de cargabilidade nos planos XY, XZ e YZ, respectivamente. Os modelos apresentados foram obtidos na terceira iteração, cujos erros RMS foram de 17,7% para o modelo de resistividade e 4,8% para o modelo de cargabilidade.

Observa-se na figura 6.1 que o modelo 3D de resistividade define muito bem a cava preenchida com resíduos, como uma anomalia condutiva (até 20,2 ohm.m), como pode ser observado nas seções de corte referentes as profundidades até 3,76 m. Nas profundidades de 3,76 a 6,08 m observa-se o início da influência da migração dos contaminantes, com valores de resistividade até aproximadamente 54,9 ohm.m. De 6,08 a 8,74, a anomalia condutora é maior, como era esperado, pois nesta faixa de profundidade encontra-se o topo da zona saturada. Observa-se pelas duas últimas seções, que a anomalia condutora começa a se alongar, no sentido predominante de leste para oeste-noroeste. Esse sentido de migração da pluma condutora está de acordo com Lago (2004), que obteve o mesmo sentido do fluxo subterrâneo através de levantamentos de potencial espontâneo sobre toda a área do aterro e seu entorno. Os valores inferiores a 20,2 ohm.m observados fora da cava são interpretados como a pluma de contaminação.

Figura 6.1: Plano XY do modelo de resistividade. Todas as distâncias estão em metros.

As seções de corte do plano XZ mostradas na figura 6.2 apresentam um padrão comum, com os valores de resistividade diminuindo com a profundidade. Observa-se que valores de resistividade abaixo de aproximadamente 54,9 ohm.m encontram-se a partir de aproximadamente 7,5 m de profundidade, nas primeiras seções. Esses valores foram interpretados como referentes à zona saturada. As profundidades dessas zonas condutoras, entretanto, são cada vez menores quanto mais se aproxima dos limites do aterro. Esse padrão provavelmente se deve a presença dos contaminantes, que causam a diminuição dos valores de resistividade no local afetado. A partir de $Y = 60$ m os levantamentos terminaram sobre o aterro, entretanto observa-se a partir de $Y = 45$ m o início da influência da cava.

O plano YZ mostrado na figura 6.3 salienta a influência dos resíduos, representada pela anomalia de 20,2 ohm.m que ocorre a partir de $Y = 60$. Também é possível distinguir a presença dos resíduos, a partir de $Y = 60$ m, pelos valores de 2,3 até 20,2 ohm.m, para as seções de corte com X maior do que 80 m. O caminho preferencial da pluma condutora é facilmente identificado nas seções entre 55 e 85 m. A diminuição de profundidade da zona saturada com a aproximação do aterro também está claramente mostrada ao longo de todas as seções da figura.

Conclui-se então, que o modelo 3D de resistividade delineou a cava com resíduos e permitiu a estimativa correta do sentido predominante do fluxo subterrâneo. A anomalia condutora com valores de resistividade abaixo de 20,2 ohm.m fora da cava sugere a presença de uma pluma de contaminação.

Observa-se na figura 6.4 que o modelo 3D de cargabilidade também distinguiu a cava com resíduos, identificada por valores de cargabilidade de até 31,0 mV/V, encontrados em até 6,08 m de profundidade. Esses valores de cargabilidade provavelmente devem-se à presença de materiais polarizáveis no corpo de resíduos. Observam-se valores de até 3,8 mV/V nas três seções mais rasas, que são interpretadas como referentes à zona não saturada. De 6,08 m à 8,74 m de profundidade, observa-se o predomínio de valores acima de 6,4 mV/V. Observa-se nas duas últimas seções que os valores de cargabilidade mais altos acompanham a direção do fluxo subterrâneo assim como a pluma condutora observada no modelo de resistividade.

Figura 6.2: Plano XZ do modelo de resistividade. Todas as distâncias estão em metros.

Figura 6.3: Plano YZ do modelo de resistividade. Todas as distâncias estão em metros.

As seções de corte do plano XZ mostradas na figura 6.5 apresentam um padrão comum, com os valores de cargabilidade aumentando com a profundidade. Observa-se que valores de cargabilidade abaixo de aproximadamente 10,9 mV/V encontram-se a partir de aproximadamente 7,5 m de profundidade, nas primeiras seções. A profundidade na qual esses valores são observados coincide com as profundidades nas quais se observam resistividades até 54,9 ohm.m. Conclui-se então que o modelo de cargabilidade também identificou a zona saturada. Entretanto, nem todas as seções apresentam o mesmo padrão de estruturas horizontais, possivelmente devido a regiões de maior saturação pela salinidade da pluma de contaminação na zona saturada e conseqüente diminuição dos valores de cargabilidade. A influência dos resíduos pode ser observada a partir de $Y = 50$ m, por valores acima de 31,0 mV/V.

O plano YZ mostrado na figura 6.6 não distinguiu claramente um caminho preferencial da pluma, como no plano YZ do modelo de resistividade, entretanto nota-se um aumento da cargabilidade nas seções com X entre 65 m e 85 m. A cava é identificada a partir de $X = 75$ m. Nos três planos do modelo de cargabilidade, observa-se anomalias inferiores à 0,47 mV/V na região interpretada como zona não saturada, que podem ser devido as variações naturais do meio.

Dessa forma conclui-se que, assim como na resistividade, o modelo 3D de cargabilidade delineou a cava com resíduos e permitiu a estimativa do sentido predominante do fluxo subterrâneo. Os valores de cargabilidade acima de 31,0 mV/V fora da cava sugerem a presença de uma pluma de contaminação. Esse alto efeito IP observado pode ter sido provocado por contaminação incipiente, com baixa concentração de sais dissolvidos e outros processos químicos que ocorrem no meio, dentre outros fatores. Normalmente correlaciona-se baixos valores de cargabilidade com pluma contaminante condutora, devido a alta concentração de sais. Nesse caso, como a concentração é baixa, o efeito IP é alto. Esse comportamento é explicado no estudo experimental de Griffiths *et al* (1981). Estes autores mostraram, em estudos experimentais com amostras saturadas de arenito com matriz argilosa, que o efeito IP varia com o teor em NaCl. No experimento, os valores de cargabilidade atingem um máximo com o aumento da concentração do sal e depois tendem a decair.

Figura 6.4: Plano XY do modelo de cargabilidade. Todas as distâncias estão em metros.

Figura 6.5: Plano XZ do modelo de cargabilidade. Todas as distâncias estão em metros.

Figura 6.6: Plano YZ do modelo de cargabilidade. Todas as distâncias estão em metros.

A figura 6.7 mostra o mapa topográfico da área do aterro, a localização da área do levantamento geofísico realizado e dos poços de monitoramento. Os dados da campanha de análise química das águas desses poços realizada em julho de 2006 (tabela 6.1) foram fornecidos pela EMDURB - Empresa Municipal de Desenvolvimento Urbano e Rural de Bauru (Mondelli, 2006).

Figura 6.7: Mapa topográfico do aterro de Bauru com a localização dos poços de monitoramento e da malha 3D.

Tabela 6.1: Análises químicas das águas coletadas nos poços de monitoramento (Mondelli, 2006).

Poço	P1	P2	P3	P4	P5A	P5B	P6	P7	P8	P9	P10	P11	PP12	P13
N.A (m)	9,41	8,52	10,75	33,47	7,20	8,00	4,13	8,55	8,04	7,99	33,89	27,95	18,69	30,41
pH	5,51	5,73	5,81	6,19	6,63	6,67	5,45	5,35	5,85	5,67	6,45	7,45	6,92	6,17
Cond. Elétrica (microS/cm)	157,8	487,0	125,7	464,0	310,0	223,0	43,7	253,0	256,0	160,4	346,0	188,4	349,0	138,2
Cloretos (mg/L)	12,5	30,5	3,3	1,5	4,2	4,2	2,8	19,3	15,2	2,2	1,7	1,1	1,9	1,7
Carbono orgânico total (mg/L)	13,240	2,511	1,435	1,698	2,184	1,146	6,724	2,095	1,383	1,196	1,501	1,149	1,295	1,200
Sulfatos (mg/L)	<1	<1	<1	<1	9	<0	4	<1	<1	<1	<1	1	14	<1
Sulfetos (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	0,03	0,13	< 0,01	< 0,01	0,20	0,10	0,10	0,02	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Nitratos (mg/L)	0,25	0,19	1,20	0,97	0,88	5,27	0,32	0,17	0,43	0,86	2,27	1,01	1,21	2,44
Nitritos (mg/L)	0,002	0,002	0,002	0,004	0,440	0,005	0,002	0,001	0,002	0,003	0,005	0,007	0,095	0,013
Nitrogênio total (mg/L)	0,15	0,51	0,02	0,03	2,00	4,00	0,50	0,12	0,02	0,02	0,06	0,02	0,01	<0,00
Fosfato total (mg/L)	0,09	0,12	0,10	0,18	0,16	0,06	3,21	0,09	0,05	0,06	0,12	0,14	0,09	0,06
DQO (mg/L)	16	32	14	21	21	6	104	32	13	15	18	10	4	6
DBO (mg/L)	2	4	2	4	4	1	8	3	2	3	3	2	<1	<1
Coliformes totais (UFC/100ml)	2.200	900	1400	4600	13400	4600	11000	2700	270	580	3200	7500	960	13000
E. COLI (UFC/100 ml)	230	4	10	116	30	20	800	130	10	32	180	30	72	180
Zn (mg/L)	0,08	0,19	0,30	0,10	0,07	0,08	0,44	0,43	0,28	0,11	0,10	0,11	1,05	0,10
Pb (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ni (mg/L)	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008
Cd (mg/L)	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006
Fe total (mg/L)	2,98	1,64	0,27	0,62	0,27	0,02	15,7	4,61	0,19	0,42	0,64	4,31	0,23	0,43
Cr total (mg/L)	0,87	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,01	< 0,004	0,05	0,32	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Na (mg/L)	3,2	2,6	1,2	3,5	ND	ND	1,5	2	2,5	1,7	7	1,6	3	1,8
K (mg/L)	0,7	4,2	1,7	5,0	ND	ND	2,7	3,8	3,7	2,9	9,7	2,7	6,5	2,3
Ca (mg/L)	17,8	51	21,7	63,6	ND	ND	5,5	39,6	40	31,8	52,4	53	59,2	22,3

A área do levantamento abrange os poços P1, P2, P5A, P5B, P7, P8 e P9, para os quais o nível d'água medido está entre 7 e 9,5 m de profundidade. Portanto a profundidade do topo da zona saturada estimada pelos modelos de resistividade e cargabilidade está condizente com os dados dos poços.

Os poços P1, P2, P5A, P5B, P7, P8 e P9 são considerados de jusante, e foram os que apresentaram os maiores valores de concentração de íons cloreto (com exceção do P9), que é um indicativo de contaminação por aterros de resíduos. Alguns dos poços de jusante também apresentaram valores anômalos de sulfatos, nitritos, nitratos, nitrogênio total, ferro e cromo, confirmando a presença de contaminação. Os valores desses parâmetros, embora alterados, estão abaixo dos valores de intervenção da CETESB, o que mostra que a contaminação pode ser considerada incipiente. Por outro lado, todos os poços apresentaram valores de coliformes totais e bactérias *Escherichia Coli* superiores ao valor máximo permitido (ausência em 100 ml), estabelecido pela Portaria 1469 de 29/12/2000 do Ministério da Saúde (Funasa, 2000).

Os outros poços apresentaram, além dos constituintes bacteriológicos, altos valores de condutividade, sulfatos, ferro, DBO e DQO. Os altos teores de ferro podem ser explicados pela grande quantidade desse elemento nos solos de Bauru (Lago, 2004). As demais alterações podem ter sido geradas pela proximidade dos resíduos de saúde, das lagoas de tratamento de chorume e fossa séptica do escritório do aterro. O poço P13 fica ao norte do aterro, e os poços P6, P10, P11 e P12 ao sul, sendo que o poço P12 fica próximo ao local atual de disposição dos resíduos de saúde. Segundo Mondelli (2004) o poço P6 não pode ser considerado como de montante devido as suas características de solo diferentes na base do aterro, o que pode explicar a baixa concentração de cálcio na composição da água desse poço. Devido à cimentação carbonática nas rochas da Formação Marília, o cálcio aparece em maiores quantidades nas águas dos outros poços. O poço P4 ao leste do aterro, é considerado poço de montante, mas não pode ser considerado com referência, pois existem lagoas de tratamento de chorume próximas.

6.2 INTERPRETAÇÃO DOS MODELOS QUASI 3D DE RESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA

Como uma forma de avaliar o potencial da aquisição e tratamento dos dados 3D, foram construídos modelos quasi 3D para uma comparação com os resultados 3D obtidos. Os modelos quasi 3D foram construídos através da interpolação dos valores de resistividade e cargabilidade reais, resultado das inversões individuais das linhas 2D, nas diferentes

profundidades. Utilizou-se o *software* comercial *Surfer*, com a krigagem simples (modelo linear) como método de interpolação. Esse procedimento de interpolação é estabelecido por pesos determinados atribuídos as diferentes amostras.

A figura 6.8 mostra o modelo quasi 3D de resistividade construído pela interpolação de todas as linhas de caminhamento elétrico, ou seja, distância de 5 m entre cada linha. Assim como no modelo 3D invertido, o modelo quasi 3D identifica a presença dos resíduos até 4 m de profundidade, o início da influência da contaminação até 7 m e a pluma de contaminação (resistividades menores do que 20 ohm.m), a partir desta profundidade e se estendendo no sentido do fluxo predominante. Observa-se que na zona de contaminação os valores de resistividades são menores dos que os valores do modelo da inversão 3D nesta região. Observa-se também uma anomalia de aproximadamente 900 ohm.m na última seção, em $Y = 20$ m que pode ter sido gerada pelo processo de interpolação de um dado mais ruidoso.

A figura 6.9 mostra o modelo quasi 3D de resistividade construído pela interpolação de linhas de caminhamento elétrico espaçadas em 10 m. A presença dos resíduos e a influência da contaminação são identificadas, porém com menor resolução. De 7 a 12 m de profundidade não é possível estimar o sentido correto de propagação da pluma. Nota-se que a anomalia observada na última seção da figura 6.8 não aparece nesse modelo, confirmando que tal anomalia foi gerada pela interpolação, já que a linha em $Y = 20$ m não faz parte desse conjunto de dados.

As figuras 6.10 e 6.11 mostram os modelos quasi 3D de resistividade construídos pela interpolação das linhas espaçadas em 15 m e 20 m, respectivamente. Observa-se a geração de diversas anomalias, como aquela observada na figura 6.8. Apesar da presença dos resíduos e sua influência próxima a cava terem sido identificados, seu delineamento ficou bastante prejudicado por anomalias de alta e baixa resistividade. O sentido de propagação da pluma é dificilmente estimado através dessas figuras, principalmente sem o auxílio de outros dados complementares.

Figura 6.8: Quasi 3D de resistividade, com 5 m de espaçamento entre as linhas. Todas as distâncias estão em metros.

Figura 6.9: Quasi 3D de resistividade, com 10 m de espaçamento entre as linhas. Todas as distâncias estão em metros.

Figura 6.10: Quasi 3D de resistividade, com 15 m de espaçamento entre as linhas. Todas as distâncias estão em metros.

Figura 6.11: Quasi 3D de resistividade, com 20 m de espaçamento entre as linhas. Todas as distâncias estão em metros.

A figura 6.12 mostra o modelo quasi 3D de cargabilidade construído pela interpolação das linhas espaçadas em 5 m. A presença dos resíduos é identificada por cargabilidades maiores do 12 mV/V, e as seções referentes as profundidades entre 4 e 9,5 m mostram um aumento dos valores de cargabilidade (acima de 6 mV/V) que podem ser interpretados como a influência da contaminação e o início da zona saturada. Não é possível identificar a presença de uma pluma de contaminação. O mesmo ocorre na interpolação das linhas de caminhamento elétrico espaçadas em 10 m mostrada pela figura 6.13.

Os modelos construídos pela interpolação com as linhas espaçadas em 15 m e 20 m são mostrados pelas figuras 6.14 e 6.15, respectivamente. A diminuição da resolução da imagem dificulta ainda mais a interpretação dos modelos. Exceto a presença dos resíduos, é possível concluir apenas que os valores de cargabilidade aumentam com a profundidade.

De uma forma geral, os modelos quasi 3D de resistividade gerados identificam as principais feições imageadas no modelo 3D invertido: a presença dos resíduos, a zona saturada, a pluma de contaminação e o sentido aproximado do fluxo subterrâneo. Para a cargabilidade, o modelo identificou a cava com resíduos, e pode-se concluir que o aumento de valores em profundidades acima de 4 m sugere a presença de contaminação, pois se sabe que a zona saturada está em pelo menos 7 m.

Obviamente a resolução das principais feições diminui com o aumento da distância entre as linhas. Além disso, as interpolações geraram diversos artefatos que podem confundir a interpretação dos modelos. Observa-se que esses artefatos ocorrem apenas nas duas últimas seções, referentes ao sétimo e oitavo níveis de investigação. De fato Dahlin e Zhou (2004) advertem que após o sexto nível, a razão sinal/ruído torna-se muito baixa para o arranjo dipolo-dipolo. Além disso, o processo de interpolação utilizado considera variações em apenas duas dimensões espaciais, no caso X e Y, diferentemente do processo de inversão 3D, que considera as variações nas três dimensões.

Apesar dos artefatos, o modelo quasi 3D é uma alternativa de visualização dos dados em três dimensões, caso a inversão 3D não possa ser utilizada. Isso pode ocorrer se a distância entre as linhas for muito grande (maior do que três vezes o tamanho do dipolo) e/ou as linhas não forem paralelas.

Figura 6.12: Quasi 3D de cargabilidade, com 5 m de espaçamento entre as linhas. Todas as distâncias estão em metros.

Figura 6.13: Quasi 3D de cargabilidade, com 10 m de espaçamento entre as linhas. Todas as distâncias estão em metros.

Figura 6.14: Quasi 3D de cargabilidade, com 15 m de espaçamento entre as linhas. Todas as distâncias estão em metros.

Figura 6.15: Quasi 3D de cargabilidade, com 20 m de espaçamento entre as linhas. Todas as distâncias estão em metros.

6.3 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS PELOS MODELOS 3D DE RESISTIVIDADE E SIMULAÇÃO DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O modo de aquisição de dados utilizado nessa pesquisa apresenta o menor conteúdo de informação tridimensional dentre os demais. Sendo assim, um modelo sintético (figura 6.16) foi construído com o objetivo de comparar a qualidade de imageamento da aquisição utilizada no campo e outros modos de aquisição. Um nível de 10% de ruído gaussiano foi adicionado aos valores de resistividade aparente, que foram exportados para o *software* de inversão 3D, e submetidos à rotina de inversão por suavização pelo método dos mínimos quadrados. Para a inversão, o modelo foi exportado como uma aquisição diagonal cruzado com o arranjo pólo-pólo (DC-PP) e também como aquisição de linhas paralelas com arranjo dipolo-dipolo (LP-DD), cujos resultados são mostrados pelas figuras 6.17 e 6.18, respectivamente. Os valores utilizados no modelo são baseados no resultado da inversão 3D dos dados medidos.

Figura 6.16: Modelo sintético de resistividade 3D.

As inversões do modelo 3D da pluma de contaminação mostram que as duas técnicas de aquisição produzem resultados semelhantes, entretanto, pequenas diferenças no imageamento podem ser observadas. Na profundidade de 0 a 3,5 m as duas técnicas produziram praticamente a mesma distribuição de resistividade, especialmente na cava com resíduos (até 20,2 ohm.m), que é a maior feição observada nesta profundidade. De 3,5 a 7,5 m, o delineamento da cava permanece praticamente o mesmo para as duas aquisições, assim

como a distribuição no restante da área, com exceção da anomalia resistiva (aproximadamente 407 ohm.m) que ocupa uma área maior no modelo fornecido pelo LP-DD. A partir de 7,5 m, profundidade na qual se observa a influência da pluma de contaminação na zona saturada, a anomalia representativa desta pluma (até 20,2 ohm.m) ocupa uma área maior e possui valores de resistividade menor no modelo LP-DD do que no modelo DC-PP. A distribuição espacial dos valores inferiores à aproximadamente 50 ohm.m, que representam a zona saturada e a contaminação, são melhor delineados pelo modelo DC-PP.

Figura 6.17: Inversão do modelo da figura 6.16. Aquisição diagonal cruzado com arranjo pólo-pólo.

Figura 6.18: Inversão do modelo da figura 6.16. Aquisição por linhas paralelas de caminhamento elétrico com o arranjo dipolo-dipolo.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos mostram o grande potencial de aplicação métodos eletroresistividade e polarização induzida na caracterização geoambiental de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos. A metodologia utilizada forneceu uma grande quantidade de dados e informações que permitiram uma análise da área de estudo quanto às relações entre os resíduos e o meio físico.

A análise da qualidade dos dados é uma etapa fundamental que precede a rotina de inversão, que devido a dados muito ruidosos, pode resultar na criação de artefatos que podem levar a uma interpretação errônea. Fatores como contatos dos eletrodos e cabos, polarização dos eletrodos de potencial, ruídos antrópicos, acoplamentos entre os cabos de medição, e distância entre os dipolos são parâmetros que devem ser controlados durante a aquisição, pois exercem grande influência na qualidade do dado medido.

A construção de modelos sintéticos de resistividade permitiu a identificação de uma grande fonte de ruído no último nível de investigação. Os dados do último nível geraram artefatos nos modelos invertidos 2D de resistividade e cargabilidade, cuja interpretação não se enquadrava com dados conhecidos do meio físico local.

O modelo 3D de resistividade delineou a cava com resíduos e permitiu a estimativa correta do sentido predominante leste-oeste do fluxo subterrâneo. A anomalia condutora com valores de resistividade entre 2,3 e 20,2 ohm.m fora da cava sugere a presença de uma pluma de contaminação. Valores entre 20,2 e 54,9 ohm.m foram interpretados como referentes à zona saturada, e valores acima de 54,9 ohm.m como o meio natural.

O modelo 3D de cargabilidade também delineou a cava com resíduos e permitiu a estimativa do sentido predominante do fluxo subterrâneo. Os valores de cargabilidade acima de 31,0 mV/V fora da cava sugerem a presença de uma pluma de contaminação. Valores abaixo de 10,9 mV/V foram interpretados como referentes à zona saturada e valores abaixo de 3,8 mV/V interpretados como referentes à zona não saturada.

O imageamento das principais feições identificadas pelo modelo de resistividade, profundidade da zona saturada, presença dos resíduos, pluma de contaminação e direção do fluxo subterrâneo, coincidem com as feições identificadas pelo modelo de cargabilidade. Entretanto, devidos aos grandes contrastes observados, essas feições são mais facilmente interpretadas pelo modelo de resistividade. Por outro lado, a ocorrência do fenômeno de

polarização induzida e sua magnitude são afetadas por diversos fatores, o que torna a interpretação desses dados mais complexa. Recomenda-se, portanto estudos mais detalhados sobre o fenômeno de polarização induzida em meios contaminados focalizando sua resposta a fatores como o a concentração de sais dissolvidos e minerais, tipos de substâncias presentes e processo químicos que ocorram no meio.

A contaminação incipiente é confirmada pelos dados de análises químicas das águas dos poços de monitoramento, principalmente pelas altas concentrações de cloreto que ocorreram apenas nos poços à jusante do aterro. Nesses poços também foram observados valores anômalos de sulfatos, nitritos, nitratos, nitrogênio total, ferro e cromo, confirmando a contaminação incipiente.

Os modelos quasi 3D de resistividade gerados identificam as principais feições imageadas no modelo 3D invertido: a presença dos resíduos, a zona saturada, a pluma de contaminação e o sentido aproximado do fluxo subterrâneo. Para a cargabilidade, os modelos identificaram presença dos resíduos, e o aumento de valores em profundidades acima de 4 m sugere a presença de contaminação. Não foi possível estimar o sentido predominante do fluxo subterrâneo pelos modelos quasi 3D de cargabilidade.

Apesar dos artefatos gerados observados nos modelos quasi 3D de resistividade e cargabilidade, modelos quasi 3D podem ser considerados uma opção de visualização dos dados em três dimensões.

A construção do modelo sintético 3D mostrou que a metodologia utilizada para a inversão 3D fornece modelos que apresentam as principais feições. O modelo DC-PP tem uma resolução maior do que o LP-DD, mas ainda assim as principais feições modeladas (cava com resíduos e pluma de contaminação) foram imageadas com sucesso pela técnica LP-DD. Considerando que a técnica diagonal cruzado requer um tempo de aquisição muito maior, a técnica de aquisição dos dados utilizada na pesquisa (i.e. linhas de caminhamento elétrico paralelas com o arranjo dipolo-dipolo) apresenta uma boa relação custo/benefício. Constatou-se que de fato, essa técnica, de categoria 4, fornece as principais feições tridimensionais da subsuperfície amostrada.

CAPÍTULO VIII

REFERÊNCIAS CITADAS E CONSULTADAS

ABNT – 2004 a – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação.

ABNT – 2004 b – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004 – Solubilização de Resíduos – Procedimentos.

BARKER, R.D. – 1989 – Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, 54, pp 1031 – 1037.

BELL, F. G. – 1998 – *Environmental Geology: principals and practice*. Blackwell Science, 594 p.

BENTLEY, L. R.; GHARIBI, M. – 2004 – Case History: Two-and three-dimensional electrical resistivity imaging at a heterogeneous remediation site. *Geophysics*, 69, 674-680.

BERNSTONE, C; DAHLIN, T.; OHLSSON, T.; HOGLAND, W. – 2000 – DC-resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excavation surveys. *Environmental Geology*, 39, 360-371.

BRAGA, A .C.O. – 1999 – *Métodos de Prospecção em Hidrogeologia*. Apostila Interna do Curso de Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, Rio Claro - SP.

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

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB – 2005 – *Relatório de Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas no Estado de São Paulo*. São Paulo, 232p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB – 2006 – Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares. São Paulo, 86p.

CONTRERA, R. C. – 2003 – Tratamento biológico de líquidos percolados de aterros sanitários utilizando reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF). Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 149 p.

DAHLIN, T. – 1993 – On the automation of 2D resistivity surveying for engineering and environmental applications. Thesis, Department of Engineering Geology, Lund Institute of Technology, Lund University, 187 p.

DAHLIN, T.; LOKE, M. H. – 1997 – Quasi-3D resistivity imaging – Mapping of three dimensional structures using two dimensional DC resistivity techniques. Procs. 3rd Meeting Environmental and Engineering Geophysics, Aarhus, Denmark, 8-11 September 1997. Disponível em: <http://lthtg.tg.lth.se/%7Ettda/docs/EEGS97q3.pdf>.

DAHLIN, T – 2000 – Short Note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi-electrode arrays. Geophysical Prospecting, 48, pp 181-187.

DAHLIN, T – 2001 – The development of DC resistivity imaging techniques. Computers & Geosciences, 27, pp 1019-1029.

DAHLIN, T.; BERNSTONE, C.; LOKE, M. H. – 2002 – A 3-D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden. Geophysics, 67, pp 1692-1700.

DAHLIN, T.; ZHOU, B. – 2004 – A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. Geophysical Prospecting, 52, pp 379-398.

DEY, A.; MORRISON, H. F. – 1979a – Resistivity modeling for arbitrarily shaped three dimensional structures. Geophysical Prospecting, 27, pp 1020-1036.

DEY, A.; MORRISON, H. F. – 1979b – Resistivity modeling for arbitrarily shaped three dimensional structures. Geophysics, 44, pp 753-780.

EDWARDS, L. S. – 1977 – A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, 42, 1020-1036.

ELIS, V.R. – 1998 – Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 264 p.

ELIS, V. R.; ZUQUETTE, L. V. – 2002 – Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos urbanos. *Revista Brasileira de Geociências*, 32, p. 119-134.

ELIS, V.R.; LAGO, A.L.; USTRA, A.T.; MODELLI, G.; GIACHETI, H.L. – 2007 – Utilização de mapas de resistividade e cargabilidade para posicionamento de sistema de monitoramento geoambiental. Procs. 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brasil, 19-23 Novembro 2007.

FIPAI – 1992 – Aterro sanitário da cidade de Bauru – SP. EIA-RIMA.

FOX, R. C.; HOHMANN, G. W.; KILLPACK, T. J.; RIJO, L. – 1980 – Topographic effects in resistivity and induced-polarization surveys. *Geophysics*, 45, pp 75-93.

FUNASA – 2000 – Portaria 1.469 – Controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Ministério da Saúde.

GEOTOMO SOFTWARE – 2001 – RES3DINV. Rapid 3D resistivity & IP inversion using the least square inversion. Disponível em: www.geoelectrical.com, 26 p.

GEOTOMO SOFTWARE – 2003 – RES2DINV. Rapid 2D resistivity & IP inversion using the least square inversion. Disponível em: www.geoelectrical.com, 127 p.

GRIFFITHS, D.H.; BARKER, R.D. & FINCH, J.W. - 1981 - Recent Applications of electrical resistivity and induced polarization methods to hydrogeological problems. *A Survey of British Hydrogeology 1980*. The Royal Society, London, pp. 85-96.

HOFFMANN, R.; DIETRICH, P. – 2004 – An approach to determine solutions to the geoelectrical 2D inversion problem. *Journal of Applied Geophysics*, 54, pp 79-91.

HOLCOMBE, H. T.; JIRACEK, G. R. – 1984 – Three-dimensional terrain corrections in resistivity surveys. *Geophysics*, 49, pp 439-452.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL – IBAM – 2001 – Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos. IBAM, Rio de Janeiro, RJ, 204p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE – 2000. Pesquisa nacional de saneamento básico.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT – 1995 – Lixo Municipal. Manual de Gerenciamento Integrado. IPT, São Paulo SP, 278p.

IRIS INSTRUMENTS – 2003 – Syscal Pro – User's Manual. Disponível em: www.heritagegeophysics.com/images/promanual.pdf, 67 p.

IRIS INSTRUMENTS – 2005 – Geophysical equipment for exploring the earth's resources. Disponível em: www.iris-instruments.com, 39 p.

JACKSON, P.D.; EARL, S.J.; REECE, G.J. – 2001 - 3D resistivity inversion using 2D measurements of the electric field. *Geophysical Prospecting*, 49, pp 26-39.

LAGO, A. L. – 2004 – Aplicação integrada de métodos geofísicos na área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru – SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, São Paulo, SP.

LAGO, A. L.; ELIS, V. R.; GIACHETI H. L. – 2006 – Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru – SP. *Revista Brasileira de Geofísica*, 4, 357-374.

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

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. – 2001 – RES3DMOD. 3-D resistivity & IP forward modeling using the finite-difference and finite-element methods. Disponível em: www.geoelectrical.com, 7 p.

LOKE, M. H. – 2002a – RES2DMOD. Rapid 2D resistivity forward modeling using the finite-difference and finite-element methods. Disponível em: www.geoelectrical.com, 15 p.

LOKE, M. H. – 2002b – Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Disponível em: www.geoelectrical.com, 134 p.

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

MARTINHO, E.; ALMEIDA, F – 2006 – 3D behaviour of contamination in landfill sites using 2D resistivity/IP imaging: case studies in Portugal. *Environmental Geology*, 49, 1071–1078.

MIRECKI, J. E; PARKS, W. S. – 1994 – Leachate Geochemistry at a municipal landfill, Memphis, Tennessee. *Ground water*, 32, 390-398.

MONDELLI, G. – 2004 – Investigação geoambiental em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos utilizando a tecnologia do piezocone. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 391 p.

MONDELLI, G. – 2006 – Projeto de doutorado. Processo FAPESP nº 04/08720-3.

MONDELLI, G.; GIACHETI, H. L.; BOSCOV, M. E. G.; ELIS, V.R.; HAMADA, J.; – 2007 – Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal solid waste

disposal site in Brazil. *Environmental Geology*, 52, 871-887.

NABIGHIAN, M. N.; ELLIOT, C. L. – 1974 – Negative induced polarization effects from layered media. *Geophysics*, 41, pp1236-1255.

OLAYINKA, A. I.; YARAMANCI, U. – 2000 – Assessment of the reliability of 2D inversion of apparent resistivity data. *Geophysical Prospecting*, 48, 293-316.

OLDENBURG, D. W.; LI, Y. – 1999 – Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics*, 64, 403-416.

OLIVEIRA, A. M. S; BRITO, S. N. A. – 1998 – *Geologia de engenharia*. ABGE, 586 p.

PELTON, W. H., WARD, S. H., HALLOF, P. G., SILL, W. R. e NELSON, P. H. – 1978 – Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, 43, pp588-609.

SHARMA, P. V. – 1997 – *Environmental and engineering geophysics*. . Cambridge University Press, 475 p.

SILVERSTER, P. P.; FERRARI, R. L. – 1990 – *Finite elements for electrical engineering* (2^o ed.). Cambridge University Press.

SOGADE, J. A.; SCIRA-SCAPPUZZO, F.; VICHABIAN, Y.; SHI, W.; RODI, W.; LESMES, D. P. MORGAN, F. D – 2006 – Induced-polarization detection and mapping of contaminant plumes. *Geophysics*, 71, pp B75-B84.

SUMNER, J.S. – 1976 - *Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration*. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 227p.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. & KEYS, D.A. – 1990 – *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 860 p.

VOGELSANG, D. – 1995 - Environmental Geophysics. A practical guide. Springer-Verlag, Berlin, 172p.

WARD, S.H. – 1990 – Resistivity and Induced Polarization Methods. Geotechnical and Environmental Geophysics, Volume 1: Review and Tutorial. Society of Exploration Geophysics, Tulsa, OK, pp. 147-189.

YI, M. J.; KIM, J. H.; SONG, Y.; CHO, S. J.; CHUNG, S. H.; SUH. J. – 2001 – Three-dimensional imaging of subsurface structures using resistivity data. Geophysical Prospecting, 48, pp 483-497.

ZHOU, B.; DAHLIN, T. – 2003 – Properties and effects of measurements errors on 2D resistivity imaging surveying. Near Surface Geophysics, 1, pp 105-117.

ANEXO I

*Seções interpretadas de resistividade e cargabilidade das linhas de caminhamento elétrico
(1ª filtragem- 9 níveis de investigação)*

Figura I.1: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 0$ m.

Figura I.2: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em Y = 5 m.

Figura I.3: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em Y = 10 m.

Figura I.4: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em Y = 15 m.

Figura I.5: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em Y = 20 m.

Figura I.6: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 25$ m.

Figura I.7: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em Y = 30 m.

Figura I.8: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 35$ m.

Figura I.9: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em Y = 40 m.

Figura I.10: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em Y = 45 m.

Figura I.11: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em Y = 50 m.

Figura I.12: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em Y = 55 m.

Figura I.13: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em Y = 60 m.

Figura I.14: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em Y = 65 m.

Figura I.15: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 0$ m.

Figura I.16: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 5 m.

Figura I.17: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 10 m.

Figura I.18: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 15$ m.

Figura I.19: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 20$ m.

Figura I.20: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 25$ m.

Figura I.21: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 30 m.

Figura I.22: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 35 m.

Figura I.23: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 40 m.

Figura I.24: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 45 m.

Figura I.25: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 50 m.

Figura I.26: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 55 m.

Figura I.27: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 60 m.

Figura I.28: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 65 m.

ANEXO II

Modelos sintéticos e seções interpretadas de resistividade

Figura II.1: Modelo sintético de resistividade da linha em $Y = 15$ m.

Figura II.2: Inversão do modelo sintético da linha em Y = 15 m.

Figura II.3:Modelo sintético de resistividade da linha em Y = 25 m.

Figura II.4: Inversão do modelo sintético da linha em $Y = 25$ m.

Figura II.5: Modelo sintético de resistividade da linha em $Y = 40$ m.

Figura II.6: Inversão do modelo sintético da linha em $Y = 40$ m.

Figura II.7: Modelo sintético de resistividade da linha em $Y = 50$ m.

Figura II.8: Inversão do modelo sintético da linha em $Y = 50$ m.

Figura II.9: Modelo sintético de resistividade da linha em $Y = 60$ m.

Figura II.10: Inversão do modelo sintético da linha em $Y = 60$ m.

ANEXO III

*Seções interpretadas de resistividade e cargabilidade das linhas de caminhamento elétrico
(2ª filtragem- 8 níveis de investigação)*

Figura III.1: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 0$ m.

Figura III.2: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 5 \text{ m}$.

Figura III.3: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em Y = 10 m.

Figura III.4: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em Y = 15 m.

Figura III.5: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em Y = 20 m.

Figura III.6: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 25$ m.

Figura III.7: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 30$ m.

Figura III.8: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 35$ m.

Figura III.9: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 40$ m.

Figura III.10: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 45$ m.

Figura III.11: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 50$ m.

Figura III.12: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 55$ m.

Figura III.13: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 60$ m.

Figura III.14: Inversão dos dados de resistividade aparente da linha em $Y = 65$ m.

Figura III.15: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 0$ m.

Figura III.16: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 5 m.

Figura III.17: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 10 m.

Figura III.18: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 15 m.

Figura III.19: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 20 m.

Figura III.20: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 25 m.

Figura III.21: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 30 m.

Figura III.22: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 35 m.

Figura III.23: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 40 m.

Figura III.24: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 45 m.

Figura III.25: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 50 m.

Figura III.26: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em $Y = 55$ m.

Figura III.27: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 60 m.

Figura III.28: Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha em Y = 65 m.