



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG**

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOELÉTRICOS NO  
DELINEAMENTO DA PLUMA DE CONTAMINAÇÃO NOS  
LIMITES DO ATERRO CONTROLADO DO JOKEY CLUBE DE  
BRASÍLIA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO N° 044**

**MÁRCIO MACIEL CAVALCANTI**

Orientador: Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges

Brasília - DF

Março/2013

MÁRCIO MACIEL CAVALCANTI

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOELÉTRICOS NO  
DELINEAMENTO DA PLUMA DE CONTAMINAÇÃO NOS  
LIMITES DO ATERRO CONTROLADO DO JOKEY CLUB DE  
BRASÍLIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de  
Geociências – IG da Universidade de Brasília –  
UnB.

Área de Concentração: Geofísica Aplicada

Orientador: Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges

Brasília, DF

2013

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Márcio Maciel Cavalcanti

Aplicação de métodos geoeletricos no delineamento da pluma de contaminação nos limites do Aterro Controlado do Jokey Clube de Brasília – DF.

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências

Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas.

Área de Concentração: Geofísica Aplicada

Aprovado em: março de 2013.

### Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges  
Instituto de Geociências  
Universidade de Brasília/UnB.

---

Prof. Dr. Vagner Roberto Elis  
IAG/USP  
Universidade de São Paulo/USP

---

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos  
Instituto de Geociências  
Universidade de Brasília/UnB.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela Benção de ter me guiado no campo da sabedoria e do conhecimento.

Agradeço aos meus Pais por terem lutado sempre para que eu nunca abandonasse os estudos.

Agradeço a todos que contribuíram e participaram desta pesquisa, em especial:

Ao prof. Welitom Rodrigues Borges, pela orientação, paciência, broncas e apoio, e pelos momentos de irmão mais velho.

Ao prof. Marcelo Peres Rocha (grande amigo), pela amizade, conselhos e apoio nas horas difíceis.

Ao Prof. Luciano Soares da Cunha pelas discussões e dicas sobre os resultados encontrados.

Ao Instituto de Geociências Aplicadas da Universidade de Brasília – UnB, pela oportunidade e pelo equipamento disponível para a realização deste trabalho. Ao Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA/UnB) pela disponibilização dos equipamentos geofísicos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao técnico Péricles de Brito Macedo pelo apoio e participação nas aquisições dos dados.

Aos colegas Eduardo Xavier Seimetz (vulgo B2), Paulo Araujo de Azevedo (Codó), Pedro Vencovsky Nogueira e Umberto José Travaglia Filho, aos alunos do curso de graduação em Geofísica: Aline Isabel de Pádua, Isabela Resende Almeida, Karine dos Santos Taveira, e também aos membros da PHYGEO, empresa júnior dos alunos de graduação em geofísica da UnB, pelo empenho e serviços prestados durante a aquisição de dados.

E finalmente, mas não menos importante a minha noiva, Tâmara, pelo seu amor, carinho, compreensão e preocupação com meu bem estar e saúde. Amor eu te amo!

## RESUMO

CAVALCANTI, M. M. **Aplicação de métodos geoeletricos no delineamento da pluma de contaminação nos limites do Aterro Controlado do Jokey Clube de Brasília – DF.** 2013. 111p. Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências, Geofísica Aplicada, Universidade de Brasília – UnB. Brasília, DF. 2013.

Esta pesquisa foi realizada nos limites do aterro controlado do Jokey Clube de Brasília (JCB), com o objetivo de investigar a evolução da pluma de contaminação gerada pela percolação do chorume na zona saturada.

A área de estudo localiza-se em Brasília, DF. A principal via de acesso ao Aterro JCB é a Rodovia EPCL-DF-096/BR-070, conhecida como Via Estrutural, que liga o Plano Piloto às cidades de Taguatinga, Ceilândia e Brazlândia. A área é caracterizada por um espesso saprólito de origem ardosiana (latossolo vermelho), pertencente ao Grupo Paranoá, com ocorrências de concreções lateríticas e clastos de quartzito. A área do aterro (JCB) está posicionado sobre um aquífero poroso, com características de um sistema heterogêneo e anisotrópico.

Foram aplicados os métodos geoeletricos *Ground Penetrating Radar* (GPR) e Eletroresistividade 2D. Os dados de GPR foram realizados na área interna e externa nos limites sudestes, sul e sudoeste do aterro JCB; tendo a profundidade de investigação até 9 metros. Os perfis de GPR foram adquiridos com antena blindada de 200 MHz. As seções de eletroresistividade foram adquiridas com arranjo Dipolo-dipolo e espaçamento entre os dipolos de 10 metros, tendo os comprimentos das seções de 540, 360 e 180 metros, com profundidade de 72 e 25 metros, respectivamente.

Após processamento e interpretação dos dados geofísicos, estes foram comparados com os valores de análise físico-química da água (teor de amônia –  $\text{NH}_3$ , pH e condutividade –  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) coletados dos furos de sondagens e de poços residenciais. Visando correlacionar os valores de resistividade a classificação de áreas contaminadas (AC), áreas levemente contaminadas (ALC) e áreas não contaminadas (AN - *Background*).

O método GPR permitiu observar os limites das cavas de resíduos sólidos, utilizadas na década de 80, sendo possível identificar o topo e as laterais das cavas. A base não foi identificada devido a atenuação do sinal na profundidade de 4 metros, sendo relacionada à presença de zona condutiva pela percolação do chorume, abaixo das

cavas. Nos limites externos o sinal do GPR apresentou zonas de condutividade mais rasas, iniciando a partir de 2 metros de profundidade. Estas zonas de condutividade foram relacionadas à contaminação pelo fluxo superficial, próximo às trincheiras de drenagem pluvial.

As seções de eletrorresistividade apresentaram valores de baixa resistividade (<100 ohm.m), interpretado como área contaminada (AC); valores entre 100 a 700 ohm.m, interpretado como área levemente contaminada (ALC); e valores de resistividade entre 700 a 2000 ohm.m, sendo relacionados a saprolito saturado, não saturado e rocha (*background*).

Os resultados geofísicos junto com a topografia da área do aterro JCB, possibilitaram delinear o fluxo preferencial da pluma de contaminação. É observada a migração tênue da pluma de contaminação, para o limite leste do aterro JCB com o Parque Nacional de Brasília (PNB), sendo intensificada a presença de contaminação no limite sudeste do aterro JCB com o PNB. O fluxo preferencial da pluma esta voltada mais para os limites: sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste do aterro JCB.

## ABSTRACT

CAVALCANTI, M. M. **Application of geoelectrical methods in the delineation of the plume of contamination within the limits of the Landfill Jokey Club of Brasilia - DF.** 2013. 111p. Master Thesis - Institute of Geosciences, Applied Geophysics, University of Brasilia - UNB. Brasília, DF. 2013.

This research was conducted the limits of the landfill Jokey Club of Brasília (JCB), aiming to investigate the evolution of the contamination plume generated by the percolation of leachate in the saturated zone.

The study area is located in Brasília, DF. The main access road to the landfill JCB is EPCL-DF-096/BR-070 Highway, known as Via Structural, linking the cities of Plano Piloto Wansbeck, and Ceilândia Brazlândia. The area is characterized by a thick saprolite home slate (oxisol) belonging to Group Paranoá, with occurrences of lateritic concretions and quartzite clasts. The area of the landfill (JCB) is positioned on a porous aquifer, with characteristics of a heterogeneous and anisotropic system.

We applied the methods geoelectrical Ground Penetrating Radar (GPR) and Electrical Resistivity 2D. The GPR data were performed in the inner and outer limits sudestes, south and southwest of the landfill JCB; having depth research up to 9 meters. The GPR profiles were acquired with shielded 200 MHz antenna sections of resistivity were acquired with dipole-dipole array and dipole spacing of 10 m, and the lengths of sections 540, 360 and 180 meters, with a depth of 72 and 25 meters, respectively.

After processing and interpretation of geophysical data, they were compared with the values of physico-chemical water (concentration of ammonia -  $\text{NH}_3$ , pH and conductivity -  $\text{mS/cm}$ ) collected from boreholes and wells residential. Aiming resistivity values correlate the classification of contaminated areas (AC), lightly contaminated areas (ALC) and uncontaminated area (Background).

The GPR method allowed us to observe the armhole limits of solid waste, used in the 80's, being able to identify the top and sides of the armhole. The base was not identified due to the attenuation of the signal in depth of 4 meters, being related to the presence of conductive zone by percolation of the leachate below the armhole. In the outer limits of the GPR signal showed shallower zones of conductivity, starting from 2 meters of depth. These zones of conductivity were related to contamination by surface flow near the storm water drainage trenches.

The sections of resistivity values showed low resistivity (<100 ohm.m), interpreted as contaminated area (AC); values from 100 to 700 ohm.m, interpreted as slightly contaminated area (ALC) and resistivity values between 700 to 2000 ohm.m; and the related saturated saprolite, unsaturated and rock (background).

The geophysical results along with the topography of the landfill area JCB, delineated a possible preferential flow of the contamination plume. It is observed tenuous migrating of the plume contamination, to the eastern boundary of the landfill JCB with the National Park of Brasilia (PNB), which intensified the presence of contamination in the southeastern limit of the landfill JCB with PNB. The preference flow of the plume this turned over to the limits: southeast, south, southwest, west and northwest of the landfill JCB.

# SUMÁRIO

## CAPITULO 1

1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.2 – Objetivo e Justificativa.....	2

## CAPITULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 – Áreas de disposição de resíduos sólidos.....	3
2.2 – Resíduos Sólidos.....	6
2.3 – Chorume.....	7
2.3.1 – Características Físico-químicas do chorume.....	7
2.4 – Contaminações das Águas Subterrâneas.....	10
2.4 – Aplicações de métodos geofísicos a aterros.....	12

## CAPITULO 3

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
3.1 – Eletrorresistividade.....	17
3.1.1 – Propriedades Elétricas dos Materiais. Terrestres.....	18
3.1.2 – Teoria Elementar.....	20
3.1.3 – Resistividade Aparente.....	22
3.1.4 – Técnicas de aquisição de Dados.....	23
3.1.5 – Modelagem de Dados de Eletrorresistividade.....	25
3.2 – Ground Penetrating Radar – GPR.....	28
3.2.1 – Coeficiente de Reflexão.....	32
3.2.2 – Profundidade de Penetração.....	33

## CAPITULO 4

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	34
4.1 – Localização.....	34

4.2 – Histórico do Aterro JCB.....	35
4.3 – Clima.....	36
4.4 – Vegetação e Hidrografia.....	37
4.5 – Geomorfologia.....	39
4.6 – Geologia.....	40
4.7 – Pedologia.....	42
4.8 – Hidrogeologia.....	45
4.9 – Topografias do Aterro JCB.....	48
4.10 – A Pluma de Contaminação (Chorume) do Aterro JCB.....	51
<b>CAPITULO 5</b>	
5. METODOLOGIA.....	56
5.1 – Ground Penetrating Radar (GPR).....	57
5.2 – Eletrorresistividade.....	59
<b>CAPITULO 6</b>	
6 .RESULTADOS.....	63
6.1 – Ground Penetrating Radar (GPR) .....	63
6.2 – Eletrorresistividade.....	68
<b>CAPITULO 7</b>	
7. CONCLUSÃO.....	85
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	89
<b>ANEXOS</b> .....	97

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Cartograma da destinação de resíduos sólidos no Território Brasileiro no ano de 2008 (IBGE,2008).....	6
Figura 2.2 - Processos que produzem atenuação de ação de contaminantes (FOSTER et al,1987 apud ELIS, 1999).....	12
Figura 2.3 – Modelo de resistividade conceitual para aterros antigos com a produção de chorume e migração para o sistema de águas subterrâneas (DoE, 1996 apud MEJU, 2000).....	14
Figura 3.1 – Ilustração da resistividade de um material (KEAREY et al, 2009).....	18
Figura 3.2 - Injeção de corrente em um ponto na superfície e a distribuição do seu fluxo em subsuperfície (LAGO, 2009).....	20
Figura 3.3 - Representação esquemática da disposição dos eletrodos de corrente (AB) e potencial (MN) em arranjo Schlumberger (BRAGA, 2007).....	22
Figura 3.4 – Caminhamento elétrico pelo método de Arranjo Dipolo-dipolo, com as profundidades de investigação (n) atribuídas a intersecção das linhas entre os eletrodos AB e MN com ângulo de 45°.....	24
Figura 3.7 – Subdivisão da subsuperfície em blocos retangulares para interpretar dados de um imageamento bidimensional. (a) Modelo com algoritmo padrão e com número maior de blocos que o número de pontos de referência (datums) (adaptado de Loke, 2001).....	26
Figura 3.8 – Exemplo de resultados de inversão: (a) pseudo seção de resistividade aparente para um modelo sintético de teste com um bloco falhado (100 ohm.m) na parte inferior esquerdo e um pequeno bloco retangular (2 ohm.m) à direita, num meio de 10 ohm.....	27
Figura 3.9 – (a) Antena Blindada de GPR (modo biestático) ilustrando o comportamento das frentes de onda. (b) Traço esquemático mostrando as chegadas das principais frentes de onda do GPR.....	28
Figura 3.10 – Perfil de GPR, adquirido com antena de 200 MHz blindada, com 7 metros de profundidade de investigação no subsolo.....	29
Figura 3.11 – Efeito da presença de campo EM na distribuição de cargas em corpo condutor: a) distribuição de cargas por condução; b) distribuição de cargas por deslocamento (ANNAN, 1992).....	29

Figura 3.12 – Gráfico da variação da velocidade e da atenuação pelo Log da frequência, mostrando a frequência de transição (Ft), e as zonas de dispersão e de propagação das ondas EM (JOL, 2009).....	31
Figura 4.1 – Mapa de localização do Aterro Controlado do Jokey Clube em Brasília/DF.....	34
Figura 4.2 – Deposição temporal do lixo na área do Aterro do JCB.....	36
Figura 4.3 – Totais mensais de precipitação pluviométrica – Estação de Brasília (média histórica do período de 1963 a 1990).....	37
Figura 4.4 – Mapa com o tipo de vegetação e hidrografia nas proximidades do Aterro JCB de Brasília/DF.....	38
Figura 4.5 – Mapa de Compartimentação Geomorfológica do Distrito Federal. Adaptado de Embrapa (1998).....	39
Figura 4.6 – Mapa Geológico de Brasília/DF. Adaptado de Freitas Silva e Campos (1998).....	40
Figura 4.7 – Coluna estratigráfica completa do Grupo Paranoá. A - argila, S - silte, AF - areia fina, AM - areia média, AG - areia grossa e C – cascalho (FARIA, 1995).....	41
Figura 4.8 – Mapa Pedológico Simplificado do DF (EMBRAPA, 1978).....	43
Figura 4.9 – Seção Geológico-Geotécnica do Aterro JCB. Sentido oeste para leste. (BERNARDES et al, 1999).....	45
Figura 4.10 – Mapa Hidrogeológico de Brasília/DF. Freitas-Silva e Campos (1998).....	46
Figura 4.11 – Perfil topográfico do Aterro JCB no sentido norte-sul. Visada para leste.....	49
Figura 4.12 – Perfil topográfico do Aterro JCB no sentido oeste-leste. Visada para norte.....	50
Figura 4.13 - Mapa dos níveis da água subterrânea na área do Aterro JCB (Stollberg et al, 2011).....	50
Figura 4.14 – Mapa topográfico da área do Aterro JCB e vizinhanças.....	51
Figura 4.15 – Mapa de distribuição da pluma de contaminação na região do Aterro JCB, com projeção para o ano de 2007. As setas indicam o fluxo subterrâneo local preferencial da pluma (CAMPOS, 2007).....	53
Figura 4.16 - Modelagem matemática para o fluxo da pluma do Aterro JCB, com duas tendências: Córrego do Acampamento (Parque Nacional) e Córrego do Vale (Setor de chácaras), para os anos de 2010, 2030 e 2050 (CARNEIRO, 2002).....	54

Figura 5.1 – Fotos evidenciam a instalação de poços de monitoramento da qualidade da água subterrânea nas proximidades do PNB e o Aterro JCB.....	56
Figura 5.2 – Croqui com a localização e sentido das aquisições dos perfis de GPR na área interna e externa do Aterro JCB.....	57
Figura 5.3 – Fotos evidenciam a aquisição de dados de GPR na área externa e interna do Aterro JCB.....	58
Figura 5.4 – Parte de uma seção de GPR que evidencia a presença de uma hipérbole que foi utilizada para o ajuste da velocidade hiperbólica da onda eletromagnética na subsuperfície do Aterro JCB.....	59
Figura 5.5 – Croqui com a localização e o sentido das aquisições de eletrorresistividade nos limites do Aterro JCB. ....	60
Figura 5.6 – Representação espacial dos pontos investigados com os protocolos de eletrorresistividade preparados para o arranjo dipolo-dipolo com 54 e 36 eletrodos.....	60
Figuras 5.7 – Fotos evidenciam a aquisição de dados de eletrorresistividade na área externa do Aterro JCB.....	61
Figura 6.1 – Partes dos perfis de GPR mostrando os padrões característicos das estruturas presentes na subsuperfície do Aterro JCB. PR1 (Cobertura de solo argiloso), PR2 (Resíduos Sólidos), PR3(Resíduos Sólidos e solo com percolação do chorume) e PR4 (solo com percolação do chorume).....	64
Figura 6.2 – Perfil de GPR, apresentando os limites da cava de resíduos sólidos.....	65
Figura 6.3 – Perfil de GPR com divisão entre os prolongamentos das cavas, na posição de 195 metros de extensão.....	65
Figura 6.4 – Perfil de GPR com a presença de atenuação do sinal (linha pontilhada vermelha) na profundidade de 2 metros.....	66
Figura 6.5 – Imagem do Google Earth do ano de 2013. (a) trincheira para drenagem pluvial; (b) lagoas de contenção e (c) área de despejo de resíduos industriais e de animais mortos.....	67
Figura 6.6 – Seção EL1 (background). (a) modelo de resistividade elétrica obtido após a inversão. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.....	69
Figura 6.7 – Seção EL2. (a) modelo de resistividade obtido após inversão e os furos de sondagem de análise de água. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.....	70
Figura 6.8 – Seção EL3. (a) modelo de resistividade obtido após inversão e o poço de análise de água. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.....	71

Figura 6.9 – Seções EL4. (a) modelo de resistividade obtido após inversão com um poço de monitoramento (PARK 11). (b) modelo geológico/geofísico elaborado.....	72
Figura 6.10 – Seções EL5 e EL6. (a) modelo de resistividade obtido após inversão. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.....	73
Figura 6.11 – Seção EL11. (a) modelo de resistividade obtido após inversão e a localização dos furos de sondagem. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.....	74
Figura 6.12 – Seção EL12. (a) modelo de resistividade obtido após inversão e a localização dos furos de sondagem SPT (Furo 01) e a Trado mecânico (Furo 34), Campos (2006). (b) modelo geológico/geofísico elaborado.....	75
Figura 6.13 – Profundidade e classificação das camadas pelo furo de sondagem SPT 01 (CAMPOS, 2006) e sua correlação ao gradiente de resistividade elétrica da seção EL12.....	76
Figura 6.14 – Seção EL13. (a) modelo de resistividade obtido após inversão e a localização dos furos de sondagem. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.....	77
Figura 6.15 – Seções EL10 e EL10A. (a) modelo de resistividade obtido após inversão. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.....	78
Figura 6.16 – Seção EL7. (a) modelo de resistividade obtido após inversão. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.....	79
Figura 6.17 – Seção EL8. (a) modelo de resistividade obtido após inversão. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.....	80
Figura 6.18 – Seção EL9. (a) modelo de resistividade obtido após inversão e a localização do furo de sondagem (Chácara N° 22). (b) modelo geológico/geofísico elaborado.....	82
Figura 6.19 – Seção EL14. (a) modelo de resistividade obtido após inversão e a localização da área de lavoura. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.....	83
Figura 6.20 – Seção EL15. (a) modelo de resistividade obtido após inversão e a localização da área de lavoura e da lagoa de piscicultura. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.....	84
Figura 7.1 – Imagem do Google Earth 2012, com as sobreposições das seções de eletrorresistividade nos limites do Aterro JCB.....	87
Figura 7.2 – Mapa do fluxo subterrâneo local preferencial da pluma de contaminação gerada pelo Aterro JCB, para o ano de 2012.....	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Destino final dos resíduos sólidos, por unidade de destino dos resíduos (%). Brasil – 1989/2008 (IBGE, 2008).....	5
Tabela 2.2 – Mudanças típicas nas concentrações de chorume com a idade do resíduo (FARQUHAR, 1989; BIRKS e EYLES, 1997).....	10
Tabela 2.3 – Classificação para as áreas contaminadas de acordo com intervalos de resistividade elétrica, condutividade elétrica aparente e atenuação da onda eletromagnética do GPR (FACHIN et al. 2006).....	15
Tabela 3.1 – Profundidade média de investigação ( $Z_e$ ) para o arranjo Dipolo-dipolo (Adaptado de EDWARDS, 1977).....	25
Tabela 3.2 - Permissividade dielétrica ( $\epsilon_r$ ) e a condutividade elétrica ( $\sigma$ ) de alguns materiais comuns para as frequências utilizadas no GPR (PORSANI, 1999).....	31
Tabela 3.3 – Frequência versus profundidade de Penetração (MALA, 1997).....	33
Tabela 4.1 – Relação dos tipos climáticos de ocorrência na região de Brasília/DF e sua relação com a altimetria e com a temperatura.....	36
Tabela 4.2 – Sistemas Aquíferos de Brasília/DF, seus domínios e as medias das vazões (CAMPOS e FREITAS SILVA, 1998).....	46
Tabela 4.3 – Composição média e máxima do chorume do Aterro JCB e valores de background. Todas as unidades em mg/L, com exceção da condutividade elétrica (CE) medida em $\mu\text{S}/\text{cm}$ e pH adimensional. Franco (1996), Araújo (1996) e Campos (2007).....	52
Tabela 5.1 – Características do protocolo de aquisição das seções de eletrorresistividade, para obtenção dos dados no Aterro do JCB .....	59
Tabela 6.1 – Valores físico-químicos das análises de água coletadas dos furos de sondagem nas proximidades do aterro JCB, período de estiagem (STOLLBERG et al., 2011).....	69
Tabela 6.2 - Valores físico-químicos das análises de água coletadas dos furos de sondagem nas proximidades do aterro JCB, período de chuva, ano 2012.....	81
Tabela 7.1 – Relação dos valores de resistividade com os parâmetros físico-químicos da análise de água dos poços.....	86

## LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

JCB – Aterro Controlado do Jokey Clube de Brasília

GPR – Ground Penetrating Radar

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

PNB – Parque Nacional de Brasília

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

S/m – Unidade Internacional para condutividade (Siemens por metro)

ohm.m – Unidade Internacional para resistividade (ohm por metro)

pH – Potencial Hidrogeniônico

n – fator que corresponde à razão entre a distância entre os eletrodos de um dipolo

$\alpha$  – atenuação

CE – Caminhamento Elétrico

E – campo elétrico

H – campo magnético

rGPR – coeficiente de reflexão GPR

L – comprimento máximo do arranjo

I – corrente

JC – corrente por condução

JD – corrente por deslocamento

JT – corrente total

D – densidade do momento dipolo

d – vetor de perturbação do modelo

J – densidade de corrente

$\Delta V$  – diferença de potencial

RMS – erro médio quadrático

F – uma matriz de suavização

Ze – fator de profundidade

Ft – frequência de transição

$\omega$  – frequências de excitação

$g$  – vetor de discrepância

Hz – Hertz, 24

$Z$  – impedância elétrica,

$B$  – indução magnética

$J$  – matriz Jacobiana de derivadas parciais

$K$  – conhecido como Fator Geométrico

$\text{mA}$  – miliampère

$\text{mV}$  – milivolte

PEP – perfilagem Elétrica de Poços

$\mu$  – permeabilidade magnética do material

$\epsilon_r$  – permissividade dielétrica

$r$  – vetor contendo o logaritmo dos valores de resistividade modelados

$R$  – resistência

$\rho$  – resistividade

$\rho_a$  – resistividade aparente

EM – sinal eletromagnético

SEV – Sondagem Elétrica Vertical

$u$  – fator de amortecimento

$V$  – Volte, 24

$v$  – velocidade

$\epsilon$  – Permissividade dielétrica

## CAPÍTULO I

### 1 – INTRODUÇÃO

No Brasil são utilizadas três formas de disposição final de resíduos sólidos (lixão, aterro controlado e aterro sanitário), sendo o lixão uma forma de disposição sem o menor controle ambiental. Conforme a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008, realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no Brasil, 50,8% dos resíduos sólidos destinam-se a lixões, 22,5% a aterros controlados e 26,7% a aterros sanitários.

A disposição dos resíduos sólidos em lixões e aterros controlados gera impactos ambientais e problemas à saúde pública devido à contaminação do solo e da água pela percolação do chorume. A contaminação pelo chorume é causada essencialmente pelo lixiviamento dos metais pesados presentes nos resíduos sólidos que constituem o lixo urbano (ex.: pilhas, baterias, latas de tinta, entre outros). Estes metais pesados, em conjunto com o líquido proveniente da decomposição de materiais orgânicos, apresentam pH alcalino, contaminando desta maneira o subsolo, as águas superficiais e as águas subterrâneas.

A natureza não invasiva dos métodos geofísicos, aliada ao seu baixo custo operacional, rapidez e facilidade de utilização, os torna uma excelente ferramenta para ser aplicada em estudos ambientais. Os métodos geofísicos fazem o uso de propriedades físicas para investigar estruturas e objetos em subsuperfície. Então, a eficácia de um levantamento geofísico está condicionada à existência de contrastes nas propriedades físicas mensuradas e na coerência da interpretação dos dados.

Dentre os métodos geofísicos aplicados a estudos ambientais, principalmente no estudo da contaminação de águas subterrâneas, destacam-se os métodos geoeletricos (WARD, 1990; ZHDANOV e KELLER, 1994). Estes são constituídos pela eletroresistividade, polarização induzida, potencial espontâneo e *Ground Penetrating Radar* (GPR), sendo este último, aplicado normalmente para os alvos mais rasos.

Na região do Distrito Federal, os resíduos sólidos são depositados em uma área conhecida como aterro controlado do Jokey Clube de Brasília (JCB). Ele está localizado no divisor

topográfico das microbacias hidrográficas do Córrego Cabeceira do Valo a oeste e do Córrego do Acampamento a leste, sendo este último localizado no Parque Nacional de Brasília (PNB). Desde a década de 70, todo o lixo gerado no Distrito Federal é depositado nessa área como um lixão. Somente a partir de 1995 a área passou a ser gerenciada como um aterro controlado.

A contaminação do subsolo no interior e nas proximidades do aterro JCB foi pesquisada por estudos geofísicos. Franco (1996) mostrou, com o uso de sondagens elétricas verticais (SEVs), que o chorume produzido pelos resíduos contaminou a água subterrânea que flui para o córrego Vicente Pires e para o PNB. Araújo (1996) observou, através de análises químicas de águas subterrâneas, que a maior lixiviação do chorume nos meses de alta precipitação pluviométrica, evidenciando a alta permeabilidade dos solos da região. Modelos matemáticos de fluxos subterrâneos para a área do aterro mostram que há duas tendências principais de percolação de contaminantes no subsolo: uma em direção ao PNB e outra em direção ao córrego Cabeceira do Valo (CARNEIRO, 2002).

## **1.2 - Objetivo e Justificativa**

Diante do anteriormente exposto, este trabalho tem como o objetivo geral o delineamento da pluma de contaminação nos limites do aterro JCB, para fins de controle ambiental. Para tanto, são utilizados os métodos de eletrorresistividade e GPR, na investigação geofísica, nos limites da área do aterro JCB.

A presente pesquisa é justificada pela existência de contaminação do solo para além dos limites do aterro JCB, indicada pelos trabalhos anteriormente realizados, e ainda, que esses foram desenvolvidos há mais de uma década. Em vista disso propõe-se um levantamento mais abrangente e atual nos limites do aterro.

## CAPÍTULO II

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 – Áreas de disposição de resíduos sólidos

Os resíduos sólidos são comumente atribuídos a todos os restos de atividades humanas que são indesejáveis, descartáveis e inúteis. Conforme a NBR 10.004, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004) a definição de resíduo sólido se estende a todo o material descartável de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e de serviços de varrição. Os resíduos sólidos são classificados em classes conforme os seus riscos potenciais ao meio ambiente, a saúde pública e as formas de manuseio e destinação adequados. As classificações dos resíduos são:

- Classe I – Perigosos: apresentam periculosidade ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade (lixo biológico e químicos).
- Classe II – Não inertes: são os resíduos que não se enquadram como resíduos da Classe I e da Classe III, e podem ter as seguintes propriedades: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água, como por exemplo, matéria orgânica e papel.
- Classe III – Inertes: não têm constituinte algum solubilizado em concentração superior ao padrão de potabilidade de águas, como por exemplo: rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são decompostos facilmente.

Ao contrário dos resíduos líquidos e gasosos que podem ser tratados e filtrados, os resíduos sólidos têm se configurado em um grande desafio devido ao acréscimo em seu volume gerado e pelo aumento de seu potencial de contaminação (CARNEIRO, 2002; COSTA, 2009). Os métodos atuais de manejo e disposição final dos resíduos sólidos urbanos são a incineração, o processamento e o aterramento. Sendo o último o mais utilizado mundialmente (EPA, 1997).

Segundo Carvalho (1997), no Brasil há três formas de disposição:

1. O lixão é o método tradicional para a disposição dos resíduos sólidos a céu aberto. O resíduo sólido é disposto em um terreno baldio ou dentro de ravinas e erosões, sem nenhum tipo de impermeabilização, cobertura e controle de pessoas no local. A maioria das áreas designadas para um lixão são locais inadequados, ocasionando impactos ambientais através da proliferação de vetores. A contaminação do ar, água e solo é intensa.
2. O aterro controlado é um termo utilizado para denominar os aterros não sanitários, é um método que aplica a cobertura de terra sobre o lixo para evitar a proliferação de odores e de vetores; neste método é também utilizado a instalação de queimadores de gás, que são produzidos pela decomposição do lixo e o controle de acesso de pessoas na área. O controle da infiltração e geração do percolato (chorume) e seu tratamento não é aplicado neste tipo de aterro.
3. O aterro sanitário é o método que utiliza estudos de engenharia para reduzir ao máximo os impactos causados ao meio ambiente pela deposição de resíduos. Um projeto de aterro sanitário possui cuidados com a impermeabilização do solo, a implantação de sistemas de drenagem pluvial e de gás, e no tratamento do chorume (OBLADEN, 2009; IAP, 2012).

Dentre os métodos de aterramento (controlado ou sanitário) destacam-se:

- Método da trincheira: o lixo é disposto em valas escavadas no solo, compactado e recoberto;
- Método da rampa: empregado em área com talude natural ou construído, onde o lixo é compactado de encontro a esse talude. O material de cobertura da célula de lixo é obtido por escavação da próxima célula, em cota inferior;
- Método da área: nesse método as camadas de lixo se superpõem, preenchendo áreas baixas ou depressões (atualmente em desuso), ou então se elevando em forma de tronco piramidal acima do nível original do terreno.

No Brasil, a disposição final dos resíduos sólidos é de competência do poder público local. Este, porém não se preocupa com a escolha de áreas adequadas para o descarte dos resíduos, ignorando as limitações impostas pelo ambiente e desobedecendo a regras e técnicas de manejo adequadas as características da área de disposição. Os serviços de manejo dos resíduos sólidos compreendem a coleta, a limpeza pública bem como a destinação final desses resíduos. É importante lembrar que boa parte dos resíduos urbanos não é coletada e seu des-

carte ocorre em áreas de maior fragilidade a contaminações como descartes em rios, matas e áreas de recarga de aquíferos (CARVALHO; 1997).

Diante do panorama da gestão de resíduos sólidos os lixões constituem 50,8% dos métodos de deposição utilizados pelos municípios brasileiros, conforme levantamento realizado pela Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), em 2008. Embora este quadro venha se alterando nos últimos 20 anos, em algumas regiões brasileiras, tal situação se modela como um cenário de destinação reconhecidamente inadequado, que exige soluções urgente e estrutural. Na **Tabela 2.1** consta a porcentagem de destinação dos resíduos sólidos no período de 1989 a 2008.

**Tabela 2.1** – Destino final dos resíduos sólidos, por unidade de destino dos resíduos (%). Brasil – 1989/2008 (IBGE, 2008).

Ano	Vazadouro a céu aberto	Aterro controlado	Aterro sanitário
1989	88,22	9,6	1,1
2000	72,3	22,3	17,3
2008	50,8	22,5	27,7

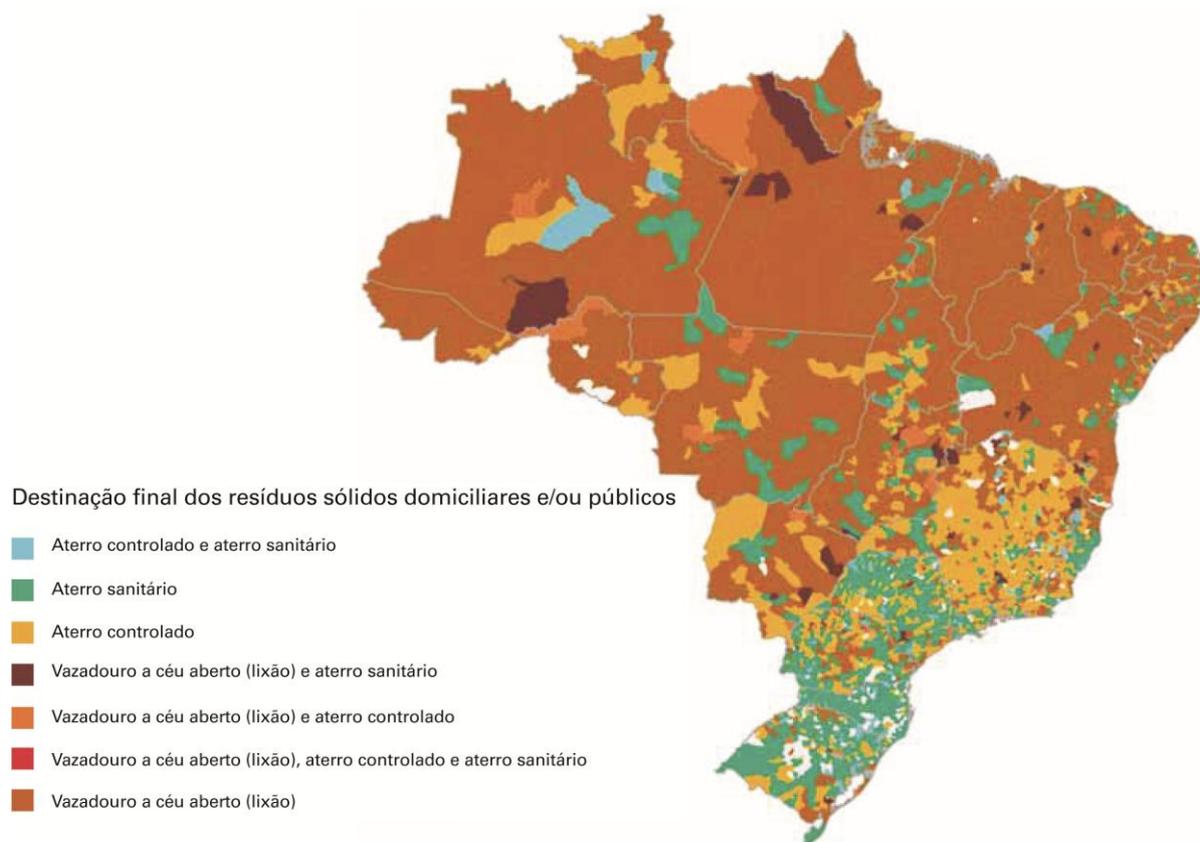
A PNSB (2008) identificou que os municípios com serviços de manejo dos resíduos sólidos situados nas Regiões Norte e Nordeste registraram os valores de 85,5% e 89,3%, respectivamente, com as maiores proporções de destinação desses resíduos aos lixões. Sendo que na Região Norte os municípios do Estado do Pará, se destacaram com 94,4% das destinações dos resíduos sólidos em lixões. Na Região Nordeste o destaque foram para os municípios dos Estados do Piauí (97,8%), Maranhão (96,3%) e Alagoas (96,1%).

Na Região Sul os Estados de Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Paraná – registraram os valores de 2,7%, 16,5% e 24,6%, respectivamente da destinação dos resíduos sólidos em lixões. Os municípios do Estado de Santa Catarina tiveram destaque com 87,2% dos resíduos sólidos destinados a aterros sanitários.

Na Região Sudeste, os municípios do Estado de São Paulo tiveram as menores proporções de destinação dos resíduos sólidos aos lixões, 7,6%, bem diferente dos municípios do Estado do Rio de Janeiro, que tiveram destaque negativo, por ter a destinação de seus resíduos em 33,0% em lixões.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2010, a Região Centro-Oeste apresentou índices baixos em relação ao destino final dos resíduos sólidos nos anos de 2009 e 2010, tendo 22,6% dos resíduos destina-

dos a lixões, 48,6% destinados a aterros controlados e 28,8% dos resíduos destinados a aterros Sanitários. A **Figura 2.1** apresenta um cartograma da destinação final dos resíduos sólidos no território Brasileiro em 2008.



**Figura 2.1** – Cartograma da destinação de resíduos sólidos no Território Brasileiro no ano de 2008 (IBGE, 2008).

## 2.2 – Resíduos Sólidos

A característica dos resíduos sólidos é muito complexa dependendo de sua origem (urbana, industrial ou hospitalar), variações sazonais, condições climáticas, hábitos e costumes, variações na economia (LIMA, 1995). O resíduo sólido urbano é originado pela dinâmica das áreas urbanas, sendo constituídos por restos orgânicos de alimentos, produtos deteriorados, papéis, vidros, plásticos entre outros itens. Às vezes pode conter resíduos com certo grau de toxicidade, como tintas, solventes, pigmentos, pesticidas, óleos lubrificantes, baterias e lâmpadas fluorescentes.

Os resíduos sólidos passam por processos físicos, químicos e biológicos de decomposição, gerando gases e líquidos. O líquido originado pela ação de microrganismos é carregado, através da percolação da água da chuva, para as camadas inferiores do material depositado.

Em ambientes anaeróbios o líquido resultante da decomposição passa para um caráter mais ácido dando origem ao chorume (MERBACH, 1989).

### 2.3 – Chorume

A ação da biodegradação dos resíduos sólidos gera um líquido formado a partir de enzimas de bactérias de decomposição, água de constituição e água de chuva. Conforme Tchobanoglous *et al.* (1993) a água é o principal fator de formação do chorume, e que sua introdução no aterro ocorre nas condições de precipitação, escoamento superficial, variação do nível freático e líquidos provenientes das ações de biodegradação.

A definição de chorume é estabelecida pela NBR 8849/85 como sendo o líquido produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos de cor escura, mau cheiro e elevada Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). A percolação da água da chuva através do resíduo sólido lixivia os sais solúveis e substâncias orgânicas biodegradáveis, formando assim o chorume (ROWE *et al.*, 1995).

A composição do chorume relaciona-se diretamente com as características dos resíduos, condições ambientais do meio (oxigênio dissolvido, gás carbônico, umidade e temperatura), das características das fontes externas de água, composição do solo de cobertura e idade do aterro (MERBACH, 1989). O chorume apresenta elevadas concentrações de amônia, sólidos totais dissolvidos, carbono orgânico, cloretos, ferro e outros contaminantes inorgânicos e orgânicos (MIRECKI e PARKS, 1994).

Conforme Elis (1999), vários estudos foram realizados, na década de 70, na América do Norte e Europa, onde os problemas de poluição de águas subterrâneas eram causados por aterros de resíduos sólidos. Os aterros instalados em arenitos, conglomerados e rochas fraturadas apresentaram contaminação dos aquíferos pela percolação do chorume.

#### 2.3.1 – Características Físico-químicas do chorume

São vários os fatores que compõem as características do chorume, desde a sua idade, a composição dos resíduos e até os diferentes processos biológicos (COLMANETTI, 2000). Os principais parâmetros utilizados na caracterização físico-química do chorume são:

- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

É definida como a quantidade de oxigênio requerida pela bactéria para estabilizar a matéria orgânica degradável, sob condições aeróbias (SAWYER *et al.*, 1994). É um procedimento de oxidação em meio líquido onde os organismos vivos servem como meio de oxidação de matéria orgânica em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e água (H<sub>2</sub>O). As reações oxidantes são resultado de uma atividade biológica e a taxa com que as reações acontecem é governada pela quantidade de populações e pela temperatura.

A decomposição dos resíduos sólidos é realizada por bactérias aeróbias que utilizam o oxigênio presente no resíduo. Com a diminuição da DBO a decomposição passa a ser mais lenta e iniciando a fase anaeróbia, que hidrolisa e fermenta os materiais presentes no resíduo. Esta etapa é caracterizada pela redução da concentração de carbono orgânico, aumento dos teores de amônia e de condutividade elétrica (POHLAND, F. G. e HARPER, S.R. 1985).

- Demanda Química de Oxigênio (DQO)

Sua definição é semelhante ao da DBO. A diferença está no fato de compostos orgânicos serem decompostos pela ação de fortes agentes oxidantes, em condições ácidas. A vantagem do ensaio de DQO é o curto período de tempo para sua realização. Segundo Reichert (1999), a relação DBO/DQO é utilizada como indicador do percentual da matéria orgânica que é biodegradável e diminui com a idade do aterro. Inicialmente esta relação é de 0,5 a 0,8, passando a 0,07 a 0,08 após vários anos (REICHERT, 1999). Isso ocorre devido à diminuição dos nutrientes que vão sendo consumidos, restando apenas a parte de difícil diodegradação, com ácidos húmicos e fúlvicos.

- Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH é um termo usado universalmente para expressar a intensidade de acidez ou alcalinidade de uma solução, ou mais precisamente a atividade dos íons hidrogênio. Segundo Sorenson (1909), citado por Sawyer *et al.* (1994), os valores de pH são representados por uma escala de valores que vai do 0 até 14, com pH igual a 7 a 25°C sendo a representação de neutralidade. Os valores menores que 7 são tidos como soluções ácidas.

O pH do chorume é baixo (ácido) no início, tornando-se alto (alcalino) com o passar do tempo. Quando o pH está próximo de 6,0 indica que o chorume é novo, se está próximo de 8,0 isso indica que o chorume encontra-se na fase metanogênica. É nesta fase que ocorrem à degradação da matéria orgânica pela atividade anaeróbia, transformando os ácidos voláteis em metano e gás carbônico (CO<sub>2</sub>), que caracteriza o chorume velho (GIORDANO *et al.*, 2011).

- Nitrogênio Amoniacal e Nitrogênio Nitrato

Os compostos de nitrogênio são de grande interesse aos engenheiros ambientais devido à sua importância na atmosfera e nos processos biológicos dos seres vivos. Nos estudos de qualidade de água os compostos de maior interesse são: amônia ( $\text{NH}_3$ ); gás nitrogênio ( $\text{N}_2$ ); nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e uréia [ $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ].

A relação entre amônia e nitrato é de suma importância, pois é um indicativo das condições em que se encontra o aterro (aeróbias ou anaeróbias). Em condições aeróbias, a amônia é oxidada para nitrito e depois para nitrato. Nas condições anaeróbias o nitrato é reduzido a nitrito e posteriormente a gás nitrogênio.

Entre as classes de poluentes encontradas no chorume a amônia é a mais preocupante devida ao seu elevado poder tóxico. A forma mais tóxica da amônia é a não ionizada ( $\text{NH}_3$ ), por interagir com o sistema nervoso de organismos vertebrados (KIM *et al.*, 2005).

A utilização da amônia como indicador de contaminação de águas subterrâneas, se dá pelo fator de ser estável em condições anaeróbias. A presença de teores elevados de amônia já é um indicativo de que, ocorrendo a oxidação para nitrato, poderá aumentar os teores dessa substância e vir a ultrapassar o limite de potabilidade (1,5 mg/L de  $\text{NH}_3$ ) conforme a Portaria 2914/2011, do Ministério da Saúde, que estabelece os padrões de potabilidade e de aceitação para consumo humano (BRASIL, 2004).

Alem disso, em aterros onde ocorre a recirculação do chorume, com o intuito de acelerar a decomposição dos materiais biodegradáveis, a concentração de nitrogênio amoniacal é bem maior que em aterros que não adotam esta prática (ONAY e POHLAND, 1998).

Outros parâmetros são importantes para a caracterização do chorume, como a concentração de metais e a presença de ácidos orgânicos voláteis (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993). O chorume proveniente de aterros recentes é caracterizado por altos níveis de ácidos orgânicos, amônia e sólidos totais dissolvidos, mas grande parte da massa biodegradada é fragmentada com o tempo, e a concentração destes parâmetros decresce no material lixiviado de aterros antigos. As mudanças típicas nas composições químicas presentes no chorume e sua relação temporal são vistas na **Tabela 2.2**.

As substâncias tóxicas do chorume podem se apresentadas nas formas sólida e gasosa contendo altas concentrações dos íons cloreto, ferro e zinco. A elevada mobilidade iônica dos elementos apresenta-se em altas concentrações se comparados aos elementos de baixa mobilidade iônica (BAGCHI, 1987).

Ao ser lixiviado para a subsuperfície do aterro os íons metálicos são removidos da fase aquosa pela troca iônica, sorção ou precipitação para a estrutura do subsolo, em especial para argila (MOURA, 2009).

Meju (2000) comenta que a contaminação na água subterrânea, pela percolação do chorume, depende da hidrogeologia da área sob o aterro e da capacidade de atenuação do substrato. Este processo pode ser efetivo por diluição e dispersão em água subterrânea, em aquíferos de alta permeabilidade e com elevada condutividade hidráulica. Em aquíferos de baixa permeabilidade e de baixa condutividade hidráulica, os sais inorgânicos presentes na contaminação podem provocar mineralizações. Através das flutuações no nível freático, a zona de deposição mineral pode se estender desde a base do aterro até a formação geológica subjacente, dependendo da permeabilidade, saturação em fluidos, fluxo da água subterrânea, características de dispersão em seu substrato e mobilidade dos íons em solução (MEJU 2000).

**Tabela 2.2** – Mudanças típicas nas concentrações de chorume com a idade do resíduo (FARQUHAR, 1989; BIRKS e EYLES, 1997).

Parâmetro (mg/L)	Idade do Resíduo			
	0– 5 anos	5 – 10anos	10 – 20 anos	> 20 anos
STD*	10000 – 25000	5000 – 10000	2000 – 5000	> 1000
pH	5 - 6	6 -7	7 – 7.5	7.5
DBO	1000 – 25000	1000 – 4000	50 – 100	< 50
DQO	15000 – 40000	10000 – 20000	1000 – 5000	< 1000
N Amoniacal	500 – 1500	300 – 500	50 – 200	< 30
P total	100 – 300	10 – 100	-	< 10
Cloretos	1000 – 3000	500 – 2000	100 – 500	< 100
Sulfatos	500 – 2000	200 – 1000	50 – 200	< 50
Cálcio	2000 – 4000	500 – 2000	300 – 500	< 500
Sódio + Potássio	2000 – 4000	500 – 1500	100 – 500	< 100
Magnésio + Ferro	500 – 1500	500 – 1000	100 – 500	< 100
Zinco + Alumínio	100 – 200	50 – 100	10 – 50	< 10
Alcalinidade	10000 – 15000	1000 – 6000	500 – 2000	< 500

\*SDT – Sólidos Totais Dissolvidos

## 2.4 – Contaminações das Águas Subterrâneas

Conforme a NBR – 9896/93, a definição de água subterrânea é toda a água que ocupa a zona saturada do subsolo ou num sentido mais amplo, toda a água situada abaixo da superfície do solo, na litosfera (ABNT, 1993).

A contaminação das águas pode ocorrer pela introdução de micro-organismos, substâncias tóxicas, resíduos ou efluentes no ar, no solo ou na água, alterando as características de potabilidade e/ou balneabilidade do recurso hídrico.

Deve ser feita uma distinção entre os termos contaminação e poluição, visto que contaminação refere-se à simples transmissão, pela água, de elementos, compostos ou micro-organismos que possam prejudicar a saúde do homem ou de animais que a bebem (BRANCO, 1991).

A definição de poluição, conforme a Lei 6.938/81 é a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente prejudiquem a saúde, a segurança e o bem estar da população, criando condições adversas às atividades sociais e econômicas, afetem desfavoravelmente a biota; afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente, e lancem materiais ou energia em desacordo com os padrões ambientais.

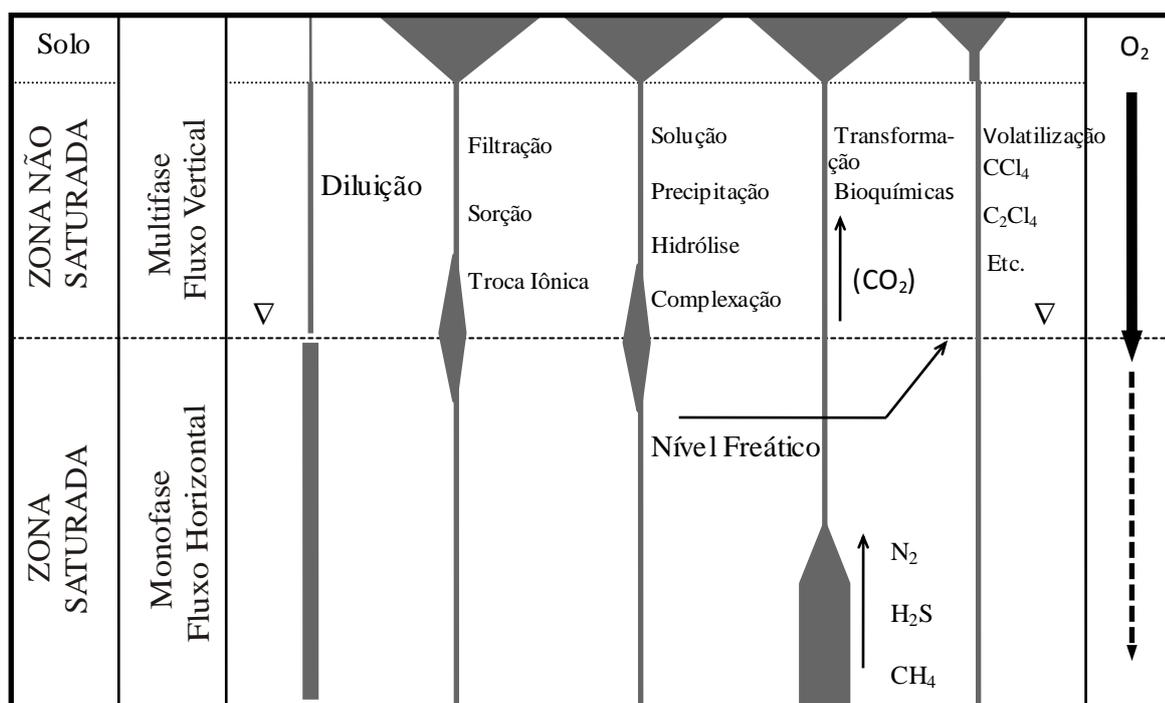
As áreas para disposição de resíduos sólidos podem apresentar contaminação pela superfície, atravessando a estrutura não saturada do solo e a zona capilar atingindo a zona saturada do solo. A zona não saturada é preenchida por espaços vazios e água, nesta zona o fluxo da água depende principalmente da força gravitacional e da forma dos poros, favorecendo a percolação para partes mais profundas da área de deposição. Na zona saturada os poros são totalmente preenchidos por água e a percolação ocorre principalmente no sentido do fluxo do gradiente hidráulico. Os contaminantes podem atingir longas distâncias, cobrindo extensas áreas, após longos períodos de tempo. Caracterizando assim, plumas de contaminação com variações no espaço e tempo (quatro dimensões), dependentes das condições hidrogeológicas da área (OLIVEIRA e BRITO, 1998).

Elis (1999) ressalta os processos atenuadores que ocorrem naturalmente no ambiente que podem amenizar, e até impedir, a contaminação da água subterrânea. Na zona não saturada a percolação do contaminante passa por uma condição química aeróbica e alcalina gerando um potencial para ação dos seguintes processos de atenuação:

- Intercepção, adsorção, eliminação de bactérias e vírus patogênicos.
- Atenuação de metais pesados e alguns compostos orgânicos, mediante precipitação, adsorção ou troca iônica.
- Absorção e biodegradação de muitos hidrocarbonetos e compostos orgânicos sintéticos.

Na zona saturada esses processos ainda ocorrem, mais de forma lenta. O fluxo das águas subterrâneas favorece a diluição dos agentes contaminantes, presentes na zona saturada.

Conforme Elis (1999), esses processos de atenuação são variáveis de região para região, bem como as diferentes características do tipo de solo, permeabilidade e características do aquífero. A **Figura 2.2** apresenta os processos de atenuação em um sistema de águas subterrâneas utilizando-se de faixas, onde a largura se relaciona com o grau de importância do processo no solo e nas zonas não saturada e saturada.



**Figura 2.2** - Processos que produzem atenuação de ação de contaminantes (FOSTER *et al*,1987 *apud* ELIS, 1999).

#### 2.4 – Aplicações de métodos geofísicos a aterros

Os métodos de investigação geofísica são bastante utilizados na detecção, monitoramento e delimitação de plumas contaminantes por líquidos percolados dos depósitos de resíduos urbanos e industriais. Na década de 60 vários estudos e pesquisas mostraram os benefícios do uso da técnica de eletrorresistividade em dimensionar um corpo de águas subsuperficiais contaminado. Este método se mostrou mais rápido e de baixo custo em relação aos métodos diretos de investigação do subsolo (STOLLAR e ROUX, 1975).

A aplicação de métodos geoeletricos em estudos ambientais é amplamente relatada na literatura, podendo citar Cartwright e McComas (1968), Kelly (1976), Urish (1983), Mendes (1987), Vogelsang (1995) e Reynolds (1997).

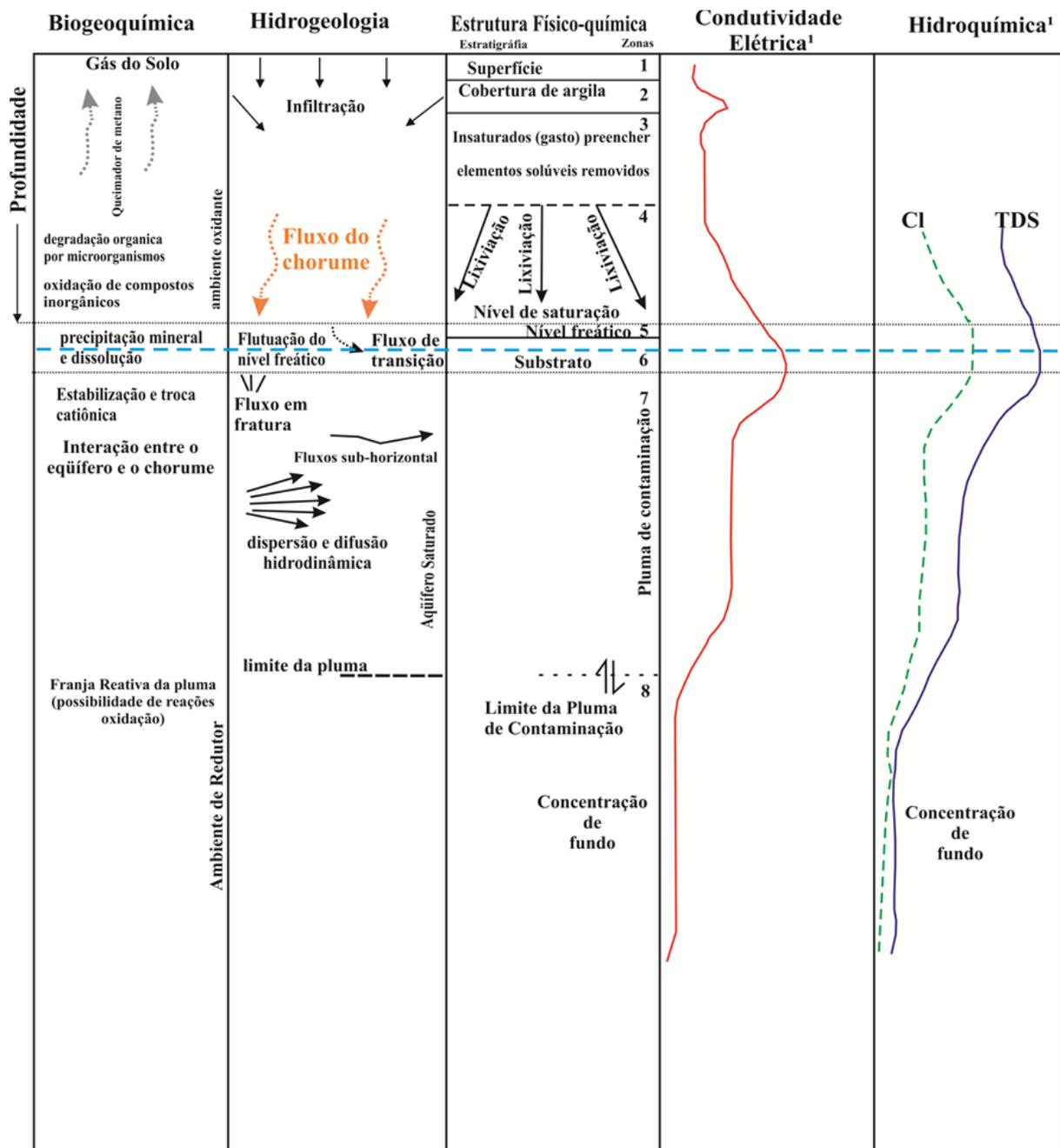
Franco (1996) mostrou, com o uso de sondagens elétricas verticais (SEVs), que o chorume produzido pelo resíduo do aterro do Jokey Clube, em Brasília, contaminou a água subterrânea que flui tanto no sentido do córrego Cabeceira do Valo quanto no sentido do Parque Nacional de Brasília.

Araújo (1996) mostrou, através de análises químicas de águas subterrâneas, coletadas em poços de monitoramento, que há uma maior lixiviação do chorume nos meses de alta precipitação pluviométrica, evidenciando a alta permeabilidade dos solos da região.

Chambers (1999) realizou investigações de eletrorresistividade com o objetivo de investigar três escavações para descarte de resíduos industriais em um substrato argiloso. Os resultados apresentaram baixos valores de condutividade elétrica ( $< 100$  mS/m) na parte superficial das escavações, relacionados ao material inerte de preenchimento da cava. Na parte inferior das cavas os valores de alta condutividade ( $> 66$  mS/m) foram associados à contaminação pelos resíduos industriais.

Meju (2000) elaborou um modelo de resistividade versus profundidade conceitual para aterros sanitários antigos e abandonados. Foram incorporados resultados geotécnicos, geoquímicos e hidrogeológicos dos comportamentos espaços-temporais do chorume, em um contexto geoeletrico. O autor observou que nas áreas inferiores do subsolo, onde ocorre a penetração do lixiviado, há um aumento da temperatura, nas regiões mais inferiores o que favorece o aumento da atividade bacteriana, e, por conseguinte, aumento das reações de troca iônica nas partes mais inferiores das áreas do aterro. O modelo de resistividade foi desenvolvido em relação às interações entre o biogeomorfismo e a hidroquímica nas áreas dos aterros de resíduo sólidos, resultando em várias zonas (**Figura 2.3**).

Shiraiwa *et al.* (2002) realizaram uma investigação geofísica no lixão desativado de Cuiabá – MT. Os pesquisadores utilizaram os métodos de Eletrorresistividade, Eletromagnético e Radar de Penetração no Solo (GPR). Os resultados revelaram a contaminação pelo chorume, desde a superfície até o nível freático, os valores de delimitação da pluma foram interpretados com os valores baixos de resistividade ( $> 20$  ohm.m), valores altos de condutividade ( $< 60$  mS/m) e áreas de atenuação do sinal do GPR.



**Figura 2.3** – Modelo de resistividade conceitual para aterros antigos com a produção de chorume e migração para o sistema de águas subterrâneas (DoE, 1996 *apud* MEJU, 2000)

Moura e Malagutti Filho (2003) realizaram ensaios geofísicos pelos métodos da eletrorresistividade e polarização induzida (domínio do tempo), na área do aterro controlado da cidade de Rio Claro/SP. Os valores de baixa resistividade encontrados são associados às elevadas concentrações de íons cloreto, e outros íons, como o sódio, sulfatos e nitratos que contribuíram para o aumento da condutividade elétrica do contaminante. Os resultados descreveram uma interpretação conjunta da resistividade e da polarizabilidade, reduzindo a ambiguidade dos modelos geoeletricos permitindo determinar a geometria das cavas de resíduos, zo-

nas de percolação de chorume e a diferenciação dos litotipos das formações identificando materiais arenosos e siltsosos.

As contaminações inorgânicas em subsuperfície são, frequentemente, os locais em que ocorrem anomalias eletricamente condutivas, devido ao aumento do conteúdo iônico diluído nos fluidos. Um dos protocolos ambientais eficientes na localização de áreas contaminadas por lixiviação de resíduos sólidos cita o uso dos métodos geoeletricos (eletrorresistividade), uma vez que em subsuperfície os locais contaminados apresentam as mais baixas resistividades devido à presença de metais pesados, intensificando o conteúdo iônico e a propagação da corrente com mais facilidade (GALLAS *et al.*, 2005).

Fachin *et al.* (2006) empregaram os métodos de eletrorresistividade, eletromagnético indutivo e GPR para determinar e localizar áreas potencialmente contaminadas com os resíduos sólidos e provenientes da indústria do couro, localizado próximo ao limite da área urbana de Várzea Grande – MT. Os resultados permitiram classificar os intervalos de resistividade, condutividade elétrica e sinal do GPR com o grau de contaminação (**Tabela 2.3**). O uso dos métodos geofísicos aliados a informação geológica de superfície e de poços mostraram uma eficiente ferramenta de análise preliminar na identificação de áreas potencialmente contaminadas.

**Tabela 2.3** – Classificação para as áreas contaminadas de acordo com intervalos de resistividade elétrica, condutividade elétrica aparente e atenuação da onda eletromagnética do GPR (FACHIN *et al.*, 2006).

Classificação	$\sigma$ (mS/m)	$\rho$ (ohm.m)	Atenuação no Sinal do GPR
AC – Área Contaminada	> 40	< 30	Alta
AS – Áreas Suspeitas de Contaminação	20 a 40	30 a 50	Média
AN – Área Não Contaminada	< 40	> 50	Baixa

Veloze (2006), realizou estudos geológicos e geotécnicos com uso dos métodos geofísicos (eletrorresistividade e polarização induzida) na caracterização do lixão desativado de São Carlos – SP, bem como analisou a evolução da pluma de contaminação. Os resultados mostram que a aplicação dessa técnica permitiu caracterizar a situação de contaminação atual da área. Foi constatada a propagação da pluma nos sentidos horizontal e vertical, sendo confirmada até uma profundidade de 25 metros.

Laureano e Shiraiwa (2008) mapearam a condutividade elétrica do subsolo do aterro sanitário de Cuiabá (MT) através dos métodos de GPR e eletromagnético indutivo. Os perfis de GPR apresentaram ausência de reflexão, nas áreas onde os valores de condutividade (resul-

tados pelo método eletromagnético indutivo) foram acima de 100 mS/m, sendo relacionada a percolação do chorume no subsolo. Os dados de GPR também indicaram com mais precisão o topo da pluma de contaminação.

Moreira (2009) utilizou métodos geofísicos de eletrorresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo sobre valas de resíduos fechados anualmente, no aterro controlado do município de Cordeirópolis (SP). O autor observou que a degradação de resíduos sólidos e seus subprodutos alteram as propriedades físicas do meio geológico, sendo associado a uma relação direta entre a queda nos valores de resistividade e as elevadas concentrações de chorume. A resistividade apresentava baixos valores onde as valas eram mais recentes e aumento progressivo, da resistividade, nas valas mais antigas. Os resultados comparativos dos valores de referência sugerem idades de término da produção e percolação de chorume para o subsolo.

Os métodos geofísicos revelam-se os mais aplicados neste tipo de investigação em áreas para disposição de resíduos sólidos, mostrando eficiência e confirmando ser uma ferramenta versátil e de qualidade, com baixo custo de aplicação quando comparado com os demais métodos diretos de investigação.

## CAPÍTULO III

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 – Eletrorresistividade

Pertencente ao grupo dos métodos geoeletricos, a eletrorresistividade é um método geofísico que usa uma fonte artificial de corrente elétrica, a qual é introduzida nas camadas da subsuperfície do solo por meio de eletrodos fixados na superfície do solo (GALLAS, 2000). A eletrorresistividade tem sua origem no ano de 1920 pela aplicação do método pelos irmãos Schlumberger (LOKE, 2004). A corrente introduzida no solo, através de 2 eletrodos (A e B), produz uma diferença de potencial que é medida por outros 2 eletrodos de potencial (M e N). Os valores medidos da diferença de potencial e da corrente injetada resultam nos valores da resistividade aparente do solo (ORELLANA, 1972). A eletrorresistividade é usada no estudo de descontinuidades horizontais e verticais nas propriedades elétricas do solo e também na detecção de corpos tridimensionais de condutividade elétrica anômala (KEAREY *et al.*, 2009).

Conforme Loke (2004), o método da eletrorresistividade possui as características pela rapidez, operacionalidade e resultados satisfatórios. O ponto fraco deste método é a necessidade de detalhamento com grande resolução espacial. O que neste caso implicaria numa grande quantidade de dados e aumento do tempo de aquisição, em campo. Mas com o advento de sistemas automáticos de coleta de dados, que aceleram os processos de medida e interpretação, da implementação de algoritmos e microcontroladores nos equipamentos de aquisição, consentiram na obtenção de imagens em 2D e 3D da distribuição real de resistividade do subsolo.

### 3.1.1 – Propriedades Elétricas dos Materiais.

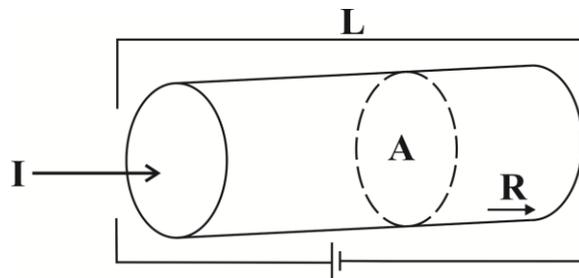
Nos métodos de prospecção elétrica as variadas propriedades elétricas dos materiais que constituem o solo são de fundamental importância. As propriedades elétricas mais significativas seriam:

- a) Constante dielétrica: propriedade de armazenamento de cargas elétricas nos materiais, pela injeção de corrente elétrica no subsolo;
- b) Atividade eletroquímica do material: propriedade responsável pelo aparecimento de correntes elétricas naturais geradas sem a influência de correntes elétricas artificiais; e
- c) Resistividade: propriedade que define a quantidade de corrente elétrica que atravessa uma determinada área quando aplicado uma diferença de potencial.

Sendo a resistividade a mais importante (TELFORD *et al.*, 1990).

A resistividade ( $\rho$ ) pode ser definida como a resistência elétrica (R) de um cilindro de seção transversal (A) e de comprimento (L), dada pela **Equação 3.1** e **Figura 3.1** (KEAREY *et al.*, 2009).

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} \quad (\text{Eq. 3.1}).$$



**Figura 3.1** – Ilustração gráfica dos parâmetros usados no cálculo da resistividade de um material (KEAREY *et al.*, 2009)

A corrente elétrica propaga-se fisicamente, pelos materiais, através de três modos de condução (KELLER e FRISCHKNECHT, 1966):

1. Condução eletrônica (ôhmica) – que ocorre nos materiais com estrutura homogênea, com alta concentração de portadores de carga (elétrons livres) com elevada mobilidade, sua ocorrência se dá em materiais semicondutores, metais condutores e isolantes.
2. Condução eletrolítica (iônica) – tipo de condução predominante nas rochas, tendo os espaços porosos a ocorrência do fluxo da corrente por solução iônica.

Este modo de condução tem uma maior importância nos estudos e levantamentos geofísicos de eletrorresistividade.

3. Condução dielétrica – ocorre em meios isolantes com fraca presença de elétrons livres. Com a injeção de uma corrente elétrica os elétrons se polarizam em cargas positivas e negativas e produz uma corrente de deslocamento (TELFORD *et al.*, 1990)

No geral, a condutividade é eletrolítica, e acontece ao longo da umidade e porosidade contidas dentro da matriz isolante (McNEILL, 1980). A resistividade é dependente de:

1. Porosidade – forma e tamanho dos poros, número, tamanho e forma das passagens de interconexão;
2. Capacidade de preenchimento dos poros – quantidade de solução;
3. Concentração de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) na solução – presença de compostos que possam favorecer ou não a condutividade;
4. Temperatura e estado físico da água nos poros;
5. Concentração e composição das partículas (colóides);
6. Composição mineralógica – características dos minerais;
7. Textura – proporção das frações minerais (areia, silte e argila);
8. Estrutura – agregação das partículas.

A razão entre a precipitação e a evaporação é primordial na quantidade de água presente no solo. A água pluvial em sua maior parte é escoada superficialmente. Somente uma pequena fração é infiltrada, preenchendo a porosidade e a fratura no solo. O preenchimento dos fluidos na porosidade do solo pode ocorrer:

- a) Saturação pendular: ocorre com o cobrimento da superfície dos grãos, em pequenos interstícios de conexão, como um filme adesivo.
- b) Saturação funicular: onde a saturação não ocorre em uma fase úmida contínua ao longo dos interstícios, tendo a presença conjunta entre água e vapor.
- c) Saturação insular: ocorre na fase úmida contínua (franja capilar), mas com a ocorrência da fase não úmida em glóbulos vazios suspensos na fase aquosa (glóbulos insulares).

Existem a zona saturada e a zona vadosa, sendo a primeira completamente saturada com água e a segunda com oscilações da quantidade de água (McNEILL, 1980).

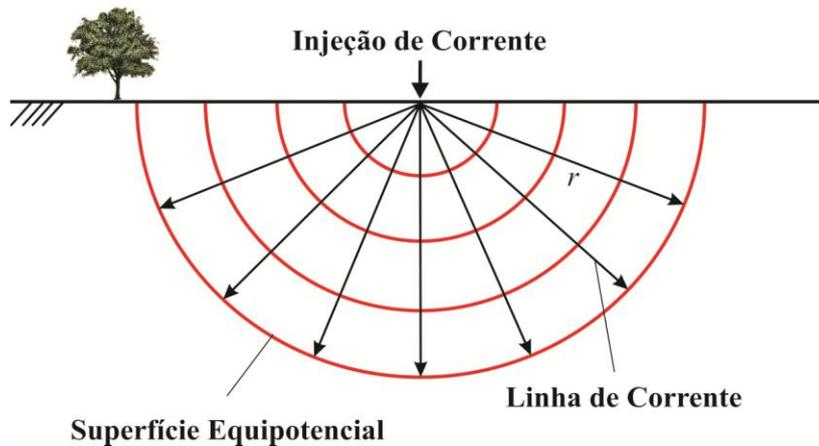
Segundo Elis (1999) o mais importante para a condução eletrolítica é o teor de água e sua salinidade nas estruturas do solo/rocha. A presença do teor de água e sua salinidade são

inversamente proporcionais aos valores de resistividade do meio em que se encontram. Essa relação contribui com a aplicação do método em estudos ambientais e hidrogeológicos.

### 3.1.2 – Teoria Elementar

A corrente flui radialmente em qualquer superfície esférica (S), a uma distância (r) da origem. Em uma superfície, homogênea e isotrópica, a corrente flui radialmente em uma semiesfera, fluindo por uma resistividade constante ( $\rho$ ) (**Figura 3.2**). Se aplicarmos uma corrente (I) em um ponto na superfície, esta irá fluir para fora através da semiesfera de raio (r), e superfície  $2\pi r^2$ . Portanto a densidade de corrente ( $\vec{J}$ ) é a corrente (I) dividida pela área da semi-esfera ( $A = 2\pi r^2$ ), e a densidade de corrente diminui com o aumento da distância da fonte de corrente (**Equação 3.2**).

$$\vec{J} = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{Eq. 3.2}).$$



**Figura 0.2** - Injeção de corrente em um ponto na superfície e a distribuição do seu fluxo em subsuperfície (LAGO, 2009).

A Lei de Ohm relaciona a corrente (I), a diferença de potencial ( $\delta V$ ) e a resistência R de forma que  $-\delta V = \delta RI$ , e da **Equação 3.1** que  $\delta R = \rho \delta L / \delta A$ . Na **Figura 3.2**, à distância L é o raio da semiesfera (r), e assim a diferença de potencial será dada por:

$$\delta V = -\rho \vec{J} \delta r = -\rho \frac{I}{2\pi r^2} \delta r \quad (\text{Eq. 3.3}).$$

Finalmente, a voltagem com relação à distância ( $V_r$ ) será dada pela integração da diferença de potencial em relação ao raio da semiesfera (**Equação 3.4**).

$$V_r = \int \delta V = - \int \rho \frac{I}{2\pi r^2} \delta r = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (\text{Eq. 3.4}).$$

Ao inserir um novo ponto de injeção de corrente ao esquema (**Figura 3.4**), uma nova distribuição de potencial ocorrerá. Nesta nova configuração, o potencial VP em algum ponto P no solo será igual à soma das voltagens geradas nos dois pontos, indicados por A e B, com P entre A e B, de modo que  $V_P = V_A + V_B$ , sendo  $V_A$  e  $V_B$  as contribuições potenciais de cada ponto de injeção de corrente, A(+I) e B(-I). Nessas condições, o potencial  $V_P$  em um ponto qualquer do solo também dependerá da distância deste ponto aos pontos de injeção de carga.

Na **Figura 3.4** tem-se uma configuração de quatro eletrodos, onde os eletrodos de injeção de corrente estão localizados nos pontos A e B, e os eletrodos de potencial estão localizados nos pontos M e N. Os potenciais nos eletrodos M e N podem ser calculados através das Equações 3.5 e 3.6.

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{MB}} \right] \quad (\text{Eq. 3.5}).$$

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{\overline{AN}} - \frac{1}{\overline{NB}} \right] \quad (\text{Eq. 3.6}).$$

Na Equação 3.5,  $\overline{AM}$  é a distância entre o eletrodo de corrente A e o eletrodo de potencial M, e  $\overline{MB}$  é a distância entre o eletrodo de potencial M e o eletrodo de corrente B. Na Equação 3.6,  $\overline{AN}$  é a distância entre o eletrodo de corrente A e o eletrodo de potencial N, e  $\overline{NB}$  é a distância entre o eletrodo de potencial N e o eletrodo de corrente B.

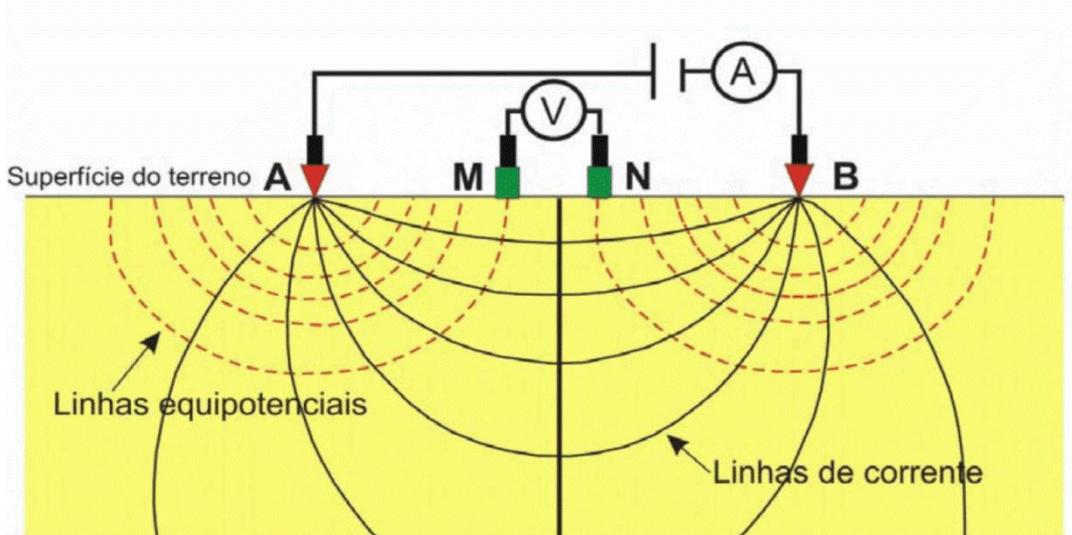
Na prática, é mais fácil medir a diferença de potencial,  $\delta V_{MN}$ , do que o potencial V. A diferença de potencial para o arranjo de quatro eletrodos (**Figura 3.4**) pode ser calculada utilizando a equação abaixo:

$$\delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left[ \frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{MB}} \right] - \left[ \frac{1}{\overline{AN}} - \frac{1}{\overline{NB}} \right] \right\} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Reajustando a Equação 3.7 para calcular a resistividade elétrica, tem-se:

$$\rho = \frac{2\pi \delta V_{MN}}{I} \left\{ \left[ \frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{MB}} \right] - \left[ \frac{1}{\overline{AN}} - \frac{1}{\overline{NB}} \right] \right\}^{-1} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

A resistividade real de um solo homogêneo e isotrópico pode ser calculada com a Equação 3.8. No entanto, para um meio heterogêneo o campo elétrico gerado pela corrente que foi injetada no solo sofrerá variações decorrentes desta heterogeneidade em função do meio (solo). Desta forma, o valor da resistividade irá variar conforme a localização e/ou disposição do arranjo de eletrodos (**Figura 3.3**), e sendo assim, a Equação 3.8 fornecerá um valor médio da resistividade, frequentemente chamado de resistividade aparente ( $\rho_a$ ).



**Figura 30.3** - Representação esquemática da disposição dos eletrodos de corrente (AB) e potencial (MN) em arranjo Schlumberger (BRAGA, 2007).

### 3.1.3 – Resistividade Aparente

Os valores de resistividade medidos em um levantamento de campo de eletrorresistividade são a corrente ( $I$ ), transferida ao solo por dois eletrodos **A** e **B** e a diferença de potencial  $\Delta V$ , registrado através de dois eletrodos de potencial ditos **M** e **N**. Esses valores permitem obter a resistividade  $\rho$ . Para um terreno homogêneo e isotrópico esta resistividade será constante para quaisquer disposições de eletrodos, o que na realidade não ocorre.

Sabe-se que na natureza os substratos não são homogêneos e tão pouco isotrópicos. Considerando que os eletrodos (**A**, **B**, **M** e **N**) estão posicionados em locais com valores de resistividade antagônicos, a resistividade resultante medida não será a verdadeira e sim uma resistividade dita aparente  $\rho_a$ . Esta não será igual a nenhum dos quatro valores de resistividade, mas terá influência de todos eles e de suas respectivas configurações e geometrias (ORELLANA, 1972).

Esta resistividade não real é obtida a partir de medidas realizadas sobre um meio heterogêneo aplicando-se a expressão válida para meios homogêneos e é denominada resistividade aparente ( $\rho_a$ ). Ela não pode ser entendida como média nem média ponderada dos valores heterogêneo, já que ela pode ser maior ou menor que qualquer um dos valores de resistividade (ORELLANA, 1972).

Cada medida de resistividade em subsuperfície é a resistividade aparente de um semi-espaço homogêneo equivalente. A resistividade aparente reflete as propriedades médias do meio pelo qual a corrente passa (TELFORD *et al.*, 1990). A Equação 3.8 pode ser rearranjada para a Equação 3.9 e Equação 3.10 da seguinte forma:

$$\rho_a = \frac{\delta V_{MN}}{I} K \quad (\text{Eq. 3.9}).$$

Sendo K conhecido como Fator Geométrico, e dado pela Equação 3.10.

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM}\right) - \left(\frac{1}{MB}\right) - \left(\frac{1}{AN}\right) + \left(\frac{1}{NB}\right)} \quad (\text{Eq. 3.10}).$$

O valor da resistividade aparente na Equação 3.9 depende da posição dos eletrodos usados na Equação 3.10 durante o levantamento de eletrorresistividade, no entanto, outros fatores também irão influenciar, tais como, as características do meio abarcado pela corrente.

### 3.1.4 – Técnicas de aquisição de dados

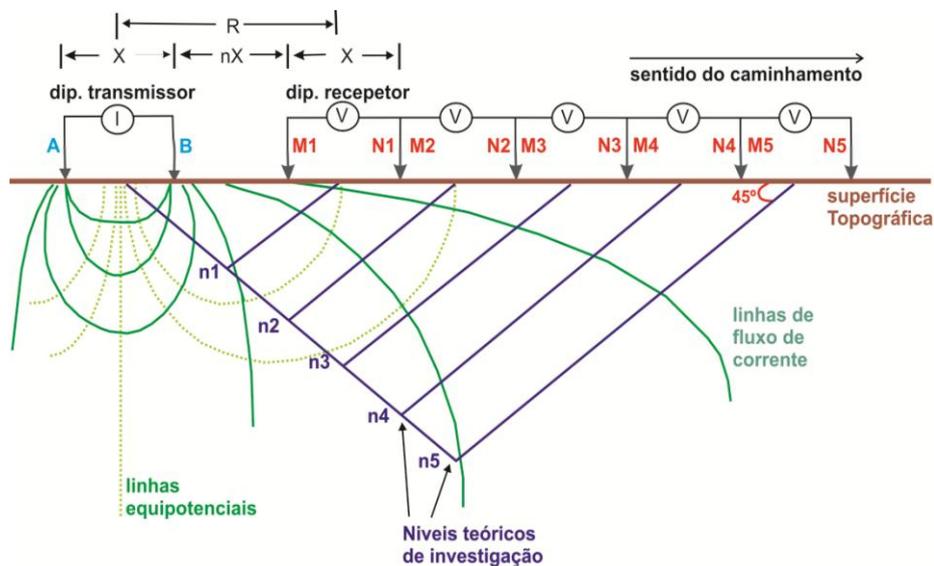
O levantamento de dados por eletrorresistividade geralmente é configurado para um arranjo quadripolo (A, B, M e N). Os equipamentos utilizados consistem basicamente de uma fonte controlada para emissão de corrente elétrica e medidores para as diferenças de potencial geradas. A potência da fonte pode variar de centenas de watts até alguns kilowatts. O circuito emissor pode medir valores entre 5 e 500mA, e o potencial normalmente lido no circuito receptor varia entre 10mV a 20V. Esses equipamentos podem trabalhar com corrente contínua ou corrente alternada de baixa frequência, preferivelmente menor que 60Hz (TELFORD *et al.*, 1990). Atualmente existem equipamentos de resistividade que consistem de um sistema de emissão e recepção montadas em uma única unidade, conhecidos como resistímetro (ELIS, 1998).

Existem várias técnicas de aquisições de dados de eletrorresistividade, sendo divididas basicamente em duas: Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Caminhamento Elétrico (CE). Dentro das quais pode ser aplicada uma grande variedade de configurações de arranjos eletródicos possíveis, o que confere ao método um elevado grau de versatilidade. Além das técnicas, citadas acima, existe a técnica de aquisição por Perfilagem Elétrica de Poços (PEP), que é aplicada em investigações dentro de poços que medem alguma propriedade elétrica da rocha.

Destas três técnicas, somente o Caminhamento Elétrico (CE), será discutido a seguir, devido ao seu uso nesta dissertação, de acordo com a precisão e tipo de parâmetro investigado.

O CE consiste em obter a variação lateral de resistividade a profundidades aproximadamente constantes. Fixa-se um espaçamento entre eletrodos e caminha-se ao longo de perfis, efetuando medidas de resistividade aparente (**Figura 3.4**).

O arranjo de campo que vem sendo mais utilizado para a técnica CE em estudos ambientais é o dispositivo dipolo-dipolo (**Figura 3.4**. ELIS, 1998).



**Figura 3.4** – Caminhamento elétrico pelo método de Arranjo dipolo-dipolo, com as profundidades de investigação ( $n$ ) atribuídas a intersecção das linhas entre os eletrodos AB e MN com ângulo de  $45^\circ$ .

Conforme Loke (2001) nesse arranjo o acoplamento eletromagnético entre os circuitos de potencial e de corrente é baixo. O espaçamento entre os eletrodos do par de corrente (A e B) é dado como “ $a$ ”, que é igual à distância entre os eletrodos do par de potenciais (M e N). Este arranjo tem outro fator indicado como “ $n$ ”, este fator corresponde à razão entre a distância entre os eletrodos  $A \leftrightarrow M$  e a separação “ $a$ ” ( $A \leftrightarrow B$ ). Para levantamentos com este arranjo, o espaçamento “ $a$ ” é mantido inicialmente fixo e o fator “ $n$ ” é aumentado de 1, 2 ou 3 a cerca de 6 para aumentar a profundidade de investigação.

Isto significa que o arranjo dipolo-dipolo é mais sensível a variações de resistividade entre os eletrodos dos pares dipolos. Assim o arranjo é muito sensível a variações horizontais de resistividade, mas pouco sensível a variações verticais desta propriedade. Isto implica que este arranjo é bom para mapear estruturas horizontais como sills e camadas sedimentares. A

profundidade média de investigação deste arranjo também depende do fator “**n**”, assim como do fator “**a**” (**Tabela 3.1**).

Para determinar a profundidade máxima mapeada em um levantamento, multiplica-se o espaçamento máximo “**a**” entre os eletrodos, ou o comprimento máximo do arranjo “**L**” pelo fator de profundidade (**Ze**) adequado da **Tabela 3.1**. Por exemplo, se o espaçamento máximo entre os eletrodos “**a**” num arranjo dipolo-dipolo é de 10 metros e com um valor máximo de 6 para “**n**”, então o comprimento máximo “**L**” é de 80 metros, isto permite uma profundidade máxima mapeada de 17 metros.

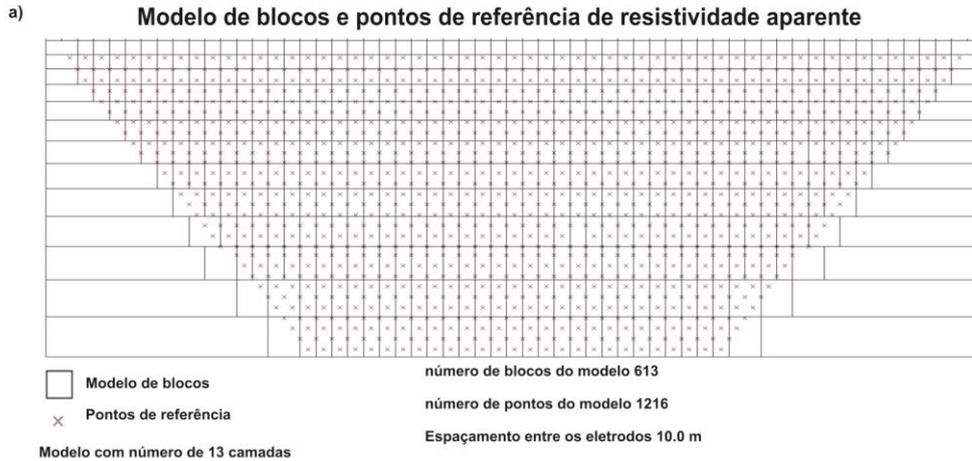
Em geral, este arranjo tem profundidade de investigação menor que a do arranjo Wenner. Porém, para levantamentos bidimensionais, o arranjo dipolo-dipolo dá uma cobertura horizontal melhor que a do arranjo Wenner (LOKE, 2001).

**Tabela 3.1** – Profundidade média de investigação (**Ze**) para o arranjo dipolo-dipolo (Adaptado de EDWARDS, 1977).

Arranjo eletródico	Níveis de Investigação							
	N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N=∞
Dipolo-dipolo								
<b>Ze/a</b>	0.416	0.697	0.962	1.220	1.476	1.730	1.983	1.220
<b>Ze/L</b>	0.139	0.174	0.192	0.203	0.211	0.216	0.220	0.250

### 3.1.5 – Modelagem de dados de eletrorresistividade

Após a aquisição de dados, as medidas de resistência são traduzidas a valores de resistividade aparente. Para interpretação dos valores de resistividade aparente um modelo bidimensional com grande número de blocos retangulares é utilizado (**Figura 3.7**). Uma rotina de inversão matemática (*smoothness-constrain*) é aplicada em cada bloco, obtendo-se o valor verdadeiro da resistividade para cada medida coletada (ROSS *et al*, 1990; SASAKI, 1994). A disposição destes blocos está moderadamente relacionada à distribuição dos pontos na pseudo-seção. A profundidade máxima do modelo direto é definida através da profundidade equivalente de investigação dos pontos dos dados, com o maior espaçamento de eletrodos (EDWARD, 1977).



**Figura 3.7** – Subdivisão da subsuperfície em blocos retangulares para interpretar dados de um imageamento bidimensional. (a) Modelo com algoritmo padrão e com número maior de blocos que o número de pontos de referência (datums) (adaptado de Loke, 2001).

Uma sub-rotina de modelagem direta é usada para calcular os valores de resistividade elétrica aparente em cada bloco, e uma técnica de otimização de mínimos quadrados não linear (*smoothness-constrain*) é usado na rotina de inversão (deGROOT-HEDLIN e CONSTABLE, 1990; SASAKI, 1992; LOKE e BARKER, 1996). O programa utilizado neste trabalho para realizar a modelagem foi o Res2dinv (GEOTOMO, 2010), o qual suporta ambas as técnicas de modelagem: diferenças finitas e elementos finitos.

O método de inversão do programa usa os parâmetros dos valores de resistividade dos blocos do modelo, enquanto que os dados são os valores medidos de resistividade aparente. Além de tentar minimizar as diferenças entre os valores calculados e os medidos, o método da inversão tenta reduzir outros parâmetros que produzem certas características desejadas no modelo resultante.

Em geral, durante o processo de inversão, o modelo resultante é vinculado a informações *a priori*. O vínculo mais comum utilizado no método de mínimos quadrados é o da suavidade, e este pode ser apresentado conforme a Equação 3.11:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + u \mathbf{F}) * \mathbf{d} = \mathbf{J}^T \mathbf{g} - u \mathbf{F} \mathbf{r} \quad (\text{Eq. 3.11}).$$

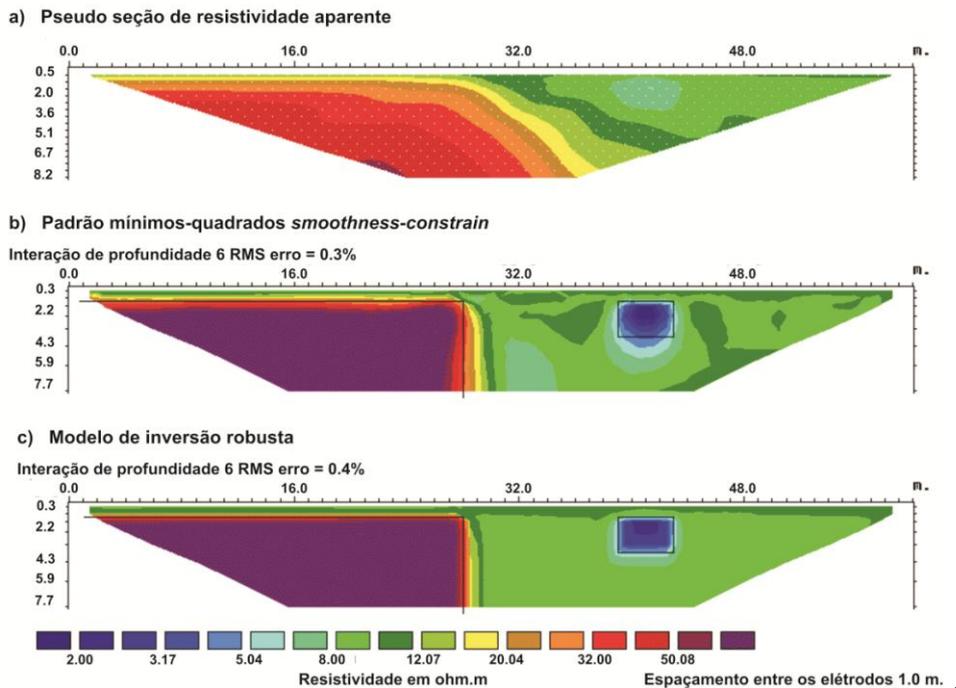
Onde:  $\mathbf{F}$  = uma matriz de suavização;  $\mathbf{J}$  = matriz Jacobiana de derivadas parciais;  $\mathbf{r}$  = vetor contendo o logaritmo dos valores de resistividade modelados  $u$  = fator de amortecimento;  $\mathbf{d}$  = vetor de perturbação do modelo;  $\mathbf{g}$  = vetor de discrepância.

O vetor de discrepância ‘ $\mathbf{g}$ ’ contém a diferença entre os valores calculados e medidos de resistividade aparente. A magnitude deste vetor é frequentemente dada como um valor do erro médio quadrático (*Root Mean Square* – RMS). Este é a quantidade que o método de in-

versão tenta reduzir. O vetor de perturbação ‘**b**’ é a variação dos valores de resistividade do modelo calculados usando a equação (3.11), resultando num modelo melhorado. A equação (3.11) procura minimizar a relação entre os valores medidos de resistividade aparente e calculados assim como a irregularidade ou rugosidade dos valores de resistividade (LOKE, 2001 *apud* FERREIRA, 2002).

O programa permite utilizar uma nova implementação do método dos mínimos quadrados com base na técnica de otimização quasi-Newton (LOKE e BARKER, 1996b). Esta técnica é ligeiramente mais rápida que o método convencional dos mínimos quadrados, usado para grandes conjuntos de dados que requerem menos memória. Também pode ser usado o método convencional Gauss-Newton.

A **Figura 3.8** mostra resultados de inversões de um conjunto de dados sintéticos usando o método-padrão dos mínimos-quadrados (*smoothness-constrain*) e um modelo robusto de inversão. Nesta simulação os corpos são internamente homogêneos e com limites abruptos. Assim sendo, não é de estranhar que a inversão robusta forneça resultados significativamente melhores. Entretanto os corpos com limites gradativos, como plumas de contaminação, o método de inversão por mínimos-quadrados gera modelos que representam melhor a realidade (LOKE, 2001).

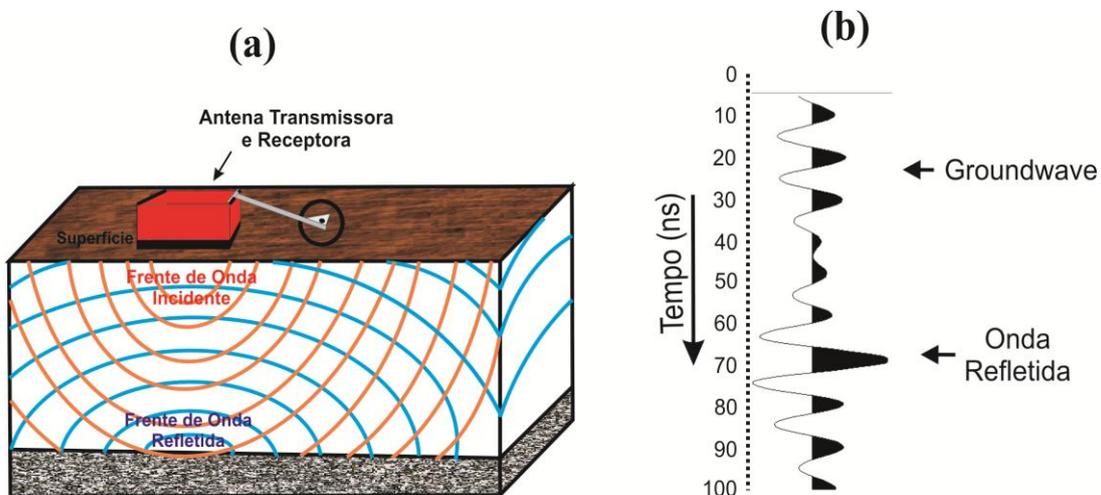


**Figura 3.8** – Exemplo de resultados de inversão: (a) pseudo seção de resistividade aparente para um modelo sintético de teste com um bloco falhado (100 ohm.m) na parte inferior esquerdo e um pequeno bloco retangular (2 ohm.m) à direita, num meio de 10 ohm.m. Os modelos de inversão gerados com (b) o método por mínimo-quadrado (*smoothness-constrain*) e (c) método de inversão robusta.

### 3.2 – Ground Penetrating Radar – GPR

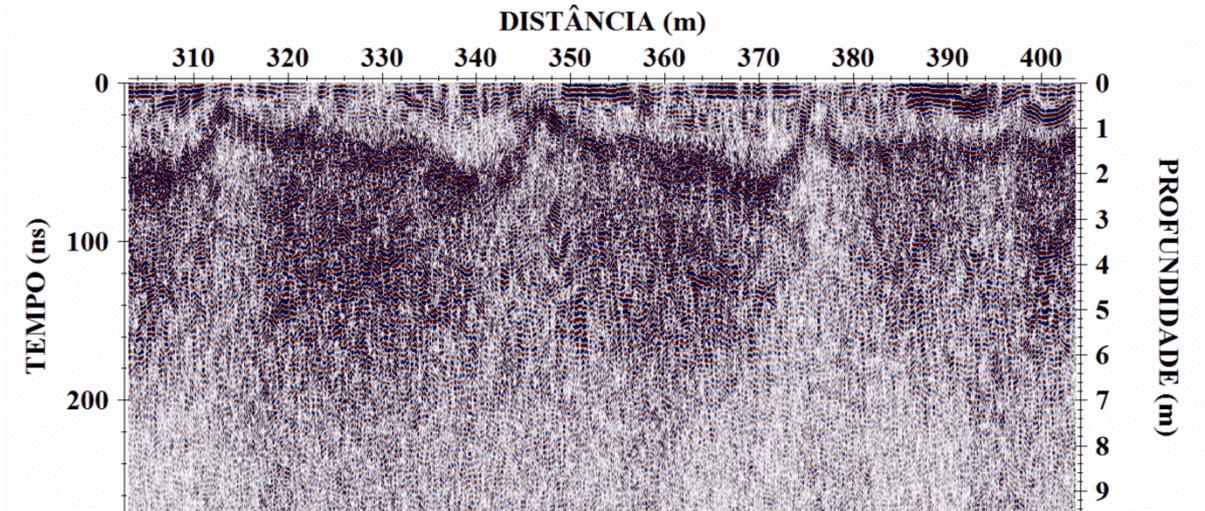
O GPR é um método eletromagnético que emprega ondas de rádio em frequências altas (normalmente entre 10 a 3000 MHz) para delimitar estruturas e feições geológicas rasas de subsuperfície ou localizar materiais enterrados pelo homem (PORSANI, 1999). A metodologia do GPR é análoga à técnica de reflexão sísmica e a técnica de sonar, com exceção de que o GPR é baseado na reflexão de ondas eletromagnéticas (DANIEL, 1989; ANNAN, 1992; PORSANI, *op. cit.*; PRADO, 2000; dentre outros).

Utilizando-se da propagação do sinal eletromagnético (EM) repetidamente radiadas para dentro da Terra por uma antena transmissora colocada na superfície. A propagação do sinal EM é subordinada a frequência do sinal emitido e das propriedades elétricas dos materiais, as quais são principalmente dependentes do conteúdo de água presente no solo (TOPP *et. al*, 1980). Quanto maior o conteúdo de água maior será a atenuação do sinal da onda EM, e vice-versa. As mudanças das propriedades elétricas em subsuperfície faz com que parte do sinal seja refletida. As ondas de radar refletidas e difratadas em subsuperfície são recebidas através de outra antena, denominada de antena receptora, também colocada na superfície da Terra (**Figura 3.9**, BORGES, 2007).



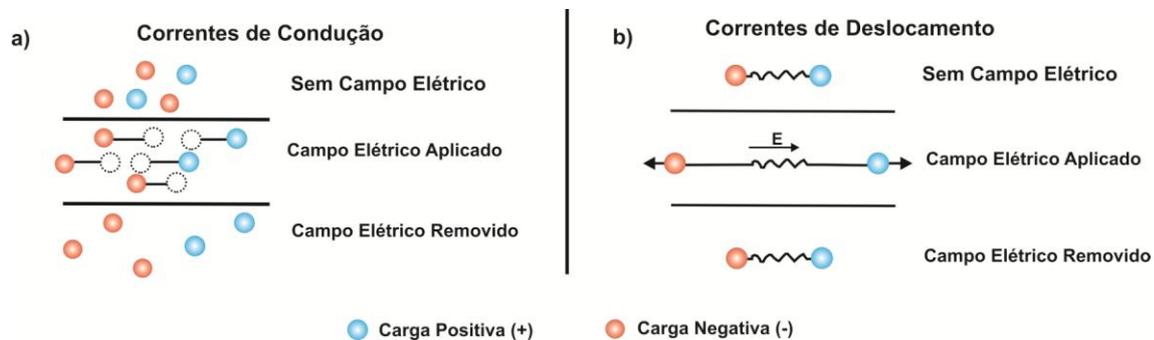
**Figura 3.9** – (a) Antena blindada de GPR (modo biestático) ilustrando o comportamento das frentes de onda. (b) Traço esquemático mostrando as chegadas das principais frentes de onda do GPR.

A energia refletida é gravada em função do tempo de atraso, amplificada, digitalizada e armazenada no disco rígido de um computador notebook (DAVIS e ANNAN, 1989). Após o processamento dos dados, o resultado obtido é uma imagem de alta resolução da subsuperfície (**Figura 3.10**).



**Figura 3.10** – Perfil de GPR, adquirido com antena de 200 MHz blindada, com 7 metros de profundidade de investigação no subsolo.

A ocorrência de um campo elétrico ( $\vec{E}$ ) em um terreno provoca a movimentação de cargas elétricas (corrente elétrica), na subsuperfície. Existem dois tipos de corrente (**Figura 3.11**): corrente de condução e de deslocamento.



**Figura 3.11** – Efeito da presença de campo EM na distribuição de cargas em corpo condutor: a) distribuição de cargas por condução; b) distribuição de cargas por deslocamento (ANNAN, 1992).

Ao se aplicar um campo elétrico ( $\vec{E}$ ) em um material inicia-se a distribuição do momento dipolo e no qual a separação de cargas é descrita em termos da densidade do momento dipolo (**Equação 3.12**).

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

$\epsilon$  = *permissividade dielétrica*

A permissividade dielétrica é a propriedade dos materiais em permitir um fluxo de campo elétrico em sua estrutura.

A ocorrência do momento dipolo em um material está associada à movimentação de cargas, e, por conseguinte há ocorrência de dois tipos de correntes elétricas. A corrente por deslocamento ( $\vec{J}_D$ ), isto é, a razão da variação da densidade de momento dipolo no tempo (**Equação 3.13**). E a corrente por condução ( $\vec{J}_C$ ), produto entre a condutividade e o campo elétrico, definida na **Equação 3.14**:

$$\vec{J}_D = \frac{d\vec{D}}{dt} \therefore \vec{J}_D = \frac{d(\epsilon \cdot \vec{E})}{dt} \rightarrow \vec{J}_D = \epsilon \cdot \frac{d\vec{E}}{dt} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

$$\vec{J}_C = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

$\sigma = \text{condutividade}$

A **Tabela 3.2** mostra a permissividade dielétrica ( $\epsilon_r$ ) e a condutividade elétrica ( $\sigma$ ) de alguns materiais comuns, com base em experimentos práticos com as frequências do GPR.

A corrente total ( $\vec{J}_T$ ) que flui em um material natural é uma resposta à aplicação de um campo elétrico e a composição das correntes de deslocamento e de condução (**Equação 3.15**).

$$\vec{J}_T = \epsilon \cdot \frac{d\vec{E}}{dt} + \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

Em estruturas com condutividade e permissividade dielétricas constantes, existe uma frequência de transição ( $F_t$ ), na qual  $\vec{J}_C = \vec{J}_D$ . Para a ocorrência de frequências que estejam acima da frequência de transição ( $F_t$ ), a corrente por deslocamento ( $\vec{J}_D$ ) é predominante; entretanto, as características condutivas e dielétricas dos materiais são dependentes das frequências de excitação ( $\omega$ ) (ANNAN, 1992). As correntes de deslocamento se caracterizam por se propagarem como onda com pouca ou nenhuma dispersão.

$$\omega = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

Para um material simples, a frequência de transição ( $F_t$ ) é definida na **Equação 3.17**:

$$F_t = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon} \quad (\text{Eq. 3.17})$$

As frequências que ocorrem abaixo da  $F_t$ , a corrente por condução ( $\vec{J}_C$ ) é predominante, e a energia se difunde para o material.

**Tabela 3.2** - Permissividade dielétrica ( $\epsilon_r$ ) e a condutividade elétrica ( $\sigma$ ) de alguns materiais comuns para as frequências utilizadas no GPR (PORSANI, 1999).

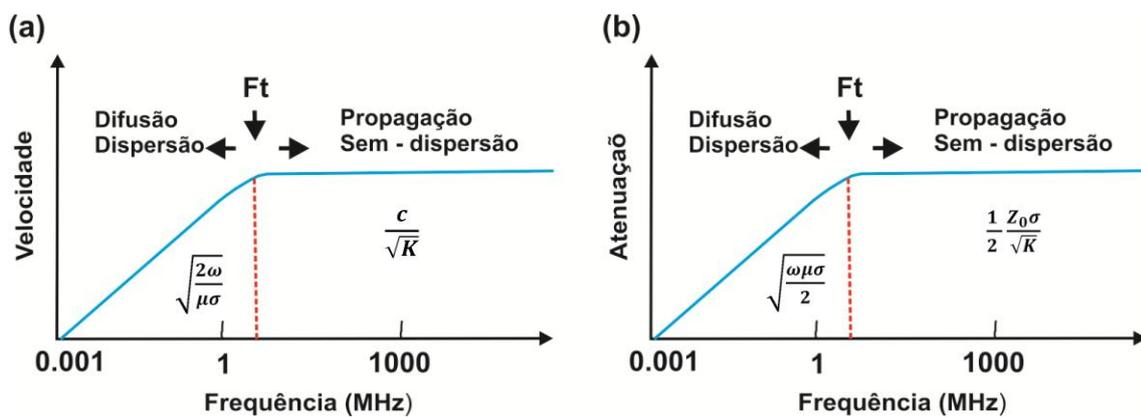
Materiais secos	$\epsilon_r$	$\sigma$ (mS/m)	Materiais Saturados	$\epsilon_r$	$\sigma$ (mS/m)
Ar	1	0	Água destilada	81	0,01
Areia seca e cascalho	2 – 6	0,01	Água fresca	81	0,5
Argila	5	2	Água do mar	81	3000
Folhelho e siltito	5	1	Areia	20 – 30	0,1 – 1
Calcário	4	0,5	Silte saturado	10	1 – 10
Solo arenoso	2,6	0,14	Argila	40	1000
Solo argiloso	2,4	0,27	Solo arenoso	25	6,9
Sal	5 – 6	0,01 – 1	Solo argiloso	15	50
Granito	5	0,01	Arenito	20 – 30	40
Basalto	6	1	Siltito	30	100
Diabásio	7	10	Folhelho	7	100
Ferro	1	$10^9$	Calcário	8	2
Aço	1	$\infty$	Granito	7	1
PVC	8	0	Basalto	8	10
Asfalto	3 – 5	0	Diabásio	8	100
Concreto	5,5	0	Concreto	12,5	0

Na ocorrência de frequências acima de  $F_t$ , a velocidade ( $V$ ) e a atenuação ( $\alpha$ ) das ondas são relacionadas com a permissividade relativa e com a condutividade elétrica (ANNAN, 1992, **Figura 3.12**).

$$V = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{K}} \quad (\text{Eq. 3.18})$$

$$\alpha = 1,64 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{K}} \quad (\text{Eq. 3.19})$$

$K =$  constante dielétrica do material ( $\epsilon/\epsilon_0$ ), sendo  $\epsilon_0 =$  permissividade dielétrica no vácuo ( $8,854 \times 10^{-12}$  F/m) e  $\epsilon =$  permissividade dielétrica do material.



**Figura 3.12** – Gráfico da variação da velocidade e da atenuação pelo Log da frequência, mostrando a frequência de transição ( $F_t$ ), e as zonas de dispersão e de propagação das ondas EM (JOL, 2009).

Conforme Annan (1996), a condutividade elétrica e a permissividade dielétrica são importantes no método GPR, porque afetam diretamente a atenuação e a propagação das ondas de radar.

A permeabilidade magnética raramente é de grande importância para aplicações do GPR. É realmente relacionada com as características intrínsecas elétricas dos blocos básicos da física dos materiais. A permeabilidade magnética mede o grau em que momentos dipolares individuais dos átomos podem ser alinhados ou movidos a partir de sua orientação normal, por um campo magnético aplicado externamente (ANNAN, 2001).

Relacionando o campo magnético ( $\vec{H}$ ) com o campo de indução magnética ( $\vec{B}$ ) e a constante de proporcionalidade é a permeabilidade magnética do material ( $\mu$ ), **Equação 3.20**.

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (\text{Eq. 3.20})$$

A atenuação do sinal do GPR é invariavelmente transmitida nas propriedades elétricas e magnéticas em variadas escalas de heterogeneidade. Em baixas escalas de heterogeneidade, tem-se a ocorrência de respostas fracas e indetectáveis do sinal, isso porque a energia do campo EM é disperso em várias direções ao passar pela heterogeneidade de um meio.

### 3.2.1 – Coeficiente de Reflexão

Nos estudos de GPR, as ondas EM se propagam com uma incidência normal as interfaces das camadas (ANNAN, 1992). As propriedades elétricas são diferentes em cada camada causando uma forte impedância nas interfaces, deste modo a quantidade do sinal é refletida e expressa pelo coeficiente de reflexão (WARD e HOHMANN, 1987; PORSANI, 1999).

A amplitude do coeficiente de reflexão pode ser escrever em termos da impedância elétrica,  $Z$ . Uma onda se propagando através de um meio atenua-se com a profundidade até encontrar uma interface onde ocorra um contraste na impedância elétrica, onde parte dessa onda é refletida. A impedância  $Z$  é definida pela relação entre o campo elétrico  $\vec{E}$  e o campo magnético ( $\vec{H}$ ), ortogonais entre si (BORGES, 2002).

$$Z = \left| \frac{E}{H} \right| \quad (\text{Eq. 3.21})$$

Na superfície, a impedância é expressa por:

$$Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\mu}} \quad (\text{Eq. 3.22})$$

Conforme Borges (2002), para um ângulo de incidência da onda EM perpendicular à superfície (incidência normal), as frequências de operação do GPR são predominante sobre as correntes de deslocamento, tendo o coeficiente de reflexão GPR ( $r_{\text{GPR}}$ ) escrito como :

$$r_{\text{GPR}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (\text{Eq. 3.23})$$

### 3.2.2 – Profundidade de Penetração

Uma das limitações do método do GPR é a profundidade de investigação. O sinal atenua na razão de  $1/e$  do valor inicial (37%) com a profundidade, sendo inversamente proporcional à atenuação. Essa relação é conhecida como *skin depth* ( $\delta$ ). Em materiais com alta condutividade elétrica, tem-se um baixo valor de  $\delta$ , enquanto que, em materiais com baixa condutividade elétrica ocorre um aumento do  $\delta$ , proporcionando uma maior profundidade de investigação (REYNOLDS, 1997).

A profundidade de investigação e a resolução do GPR variam de acordo com a frequência da antena. Quanto maior a frequência, maior a resolução vertical e menor a profundidade de investigação (**Tabela 3.3**). A profundidade de investigação do GPR é influenciada pelos fatores de: espalhamento geométrico, atenuação pelo terreno e partição da energia nas interfaces. Todos relacionados com a perda de energia da onda EM, durante a sua propagação.

**Tabela 3.3** – Frequência versus profundidade de penetração (MALA, 1997).

Frequência Central (MHz)	10	25	50	100	200	400	500	1000
Profundidade Máxima de Penetração (m)	50	40	30	25	4	2	1,5	1

## CAPÍTULO IV

### 4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

#### 4.1 – Localização

A área de estudo localiza-se no Distrito Federal (DF). A principal via de acesso ao Aterro do Jokey Clube de Brasília (JCB) é a Rodovia EPCL-DF-096/BR-070, conhecida como Via Estrutural, que liga o Plano Piloto às cidades de Taguatinga, Ceilândia e Brazlândia (Figura 4.1).

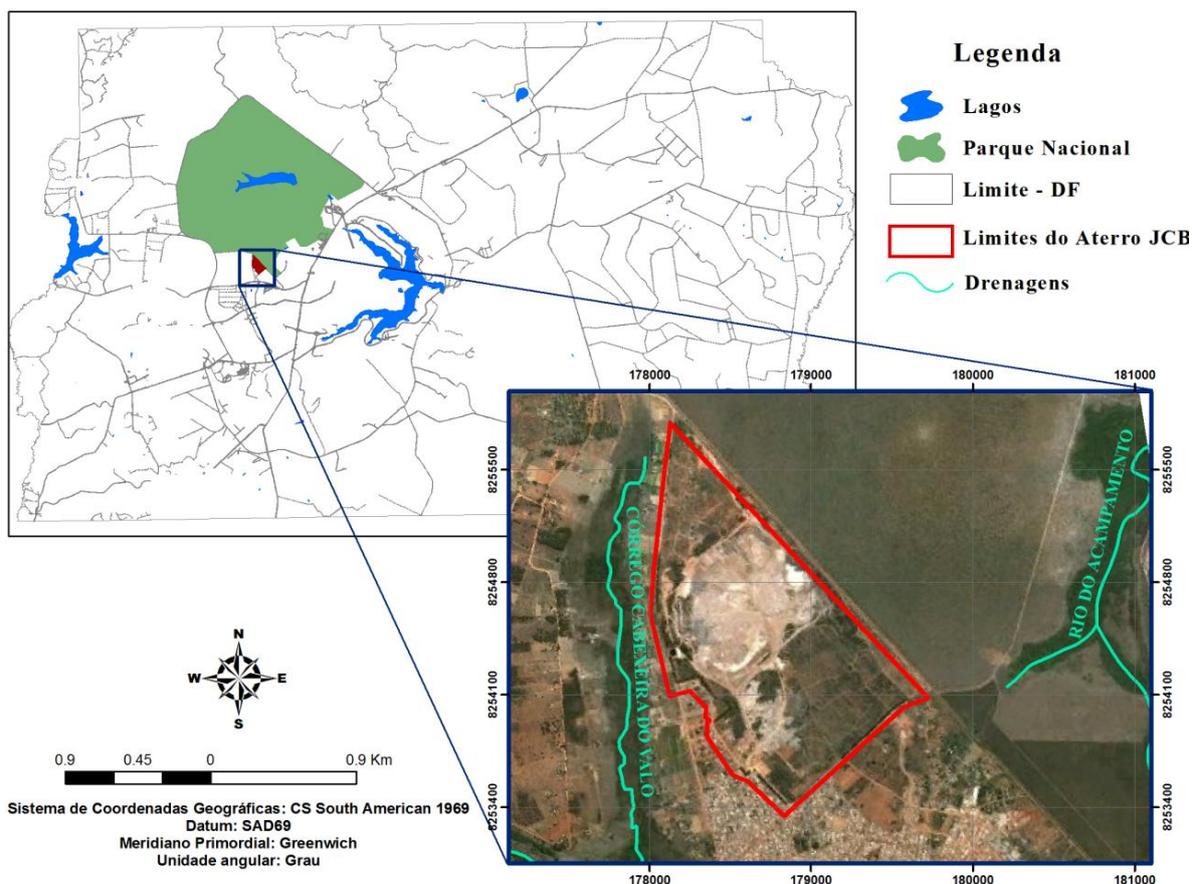


Figura 4.1 – Mapa de localização do Aterro Controlado do Jokey Clube no DF.

A área do Aterro JCB tem um formato trapezoidal, com o vértice do topo triangular apontando, aproximadamente, para o noroeste. Ao sul encontra-se uma porção de terra, que no passado fez parte do Aterro, hoje se encontra habitada por famílias de baixa renda. A oeste do Aterro está o córrego Cabeceira do Valo e uma região de chácaras, de pequena produção hortifrutigranjeira. A norte e a leste está o córrego do Acampamento e a área do Parque Nacional de Brasília (PNB).

#### 4.2 – Histórico do Aterro JCB

No período de 1977 a 1978 o lixo foi depositado a céu aberto em trincheiras, utilizando o método de rampas, onde o próprio solo retirado para a abertura de uma célula era usado para cobrir a célula adjacente já utilizada. A profundidade das trincheiras era variada em 2 a 4 metros, e o lixo depositado era compactado e recoberto com uma camada de solo de aproximadamente 50 cm de espessura. Atualmente esta área encontra-se fora dos limites atuais do Aterro JCB, sendo habitada por moradores que utilizam água de poços do tipo cacimba (SANTOS, 1996).

De 1978 a 1995 a deposição do lixo se estendeu nas direções NE e SW (próximo ao vale do córrego Cabeceira do Valo), sendo considerada a porção intermediária do Aterro (**Figura 4.2**). O lixo foi depositado em valas com 20 a 30 m de largura, 100 a 80 m de comprimento e 2 a 3 m de profundidade (SANTANA e IMAÑA-ENCINAS, 2004). No início de 1995, a disposição do lixo no Aterro JCB cobriu toda a área intermediária, sendo observado o prolongamento da área de deposição em direção à porção norte do Aterro.

De 1995 a 1996 a porção norte foi completamente coberta pelo depósito de lixo. Conforme Koide e Bernardes (1998) relatam que, a espessura das camadas de lixo nesta região eram superiores as porções mais antigas, devido à escassez de área disponível (**Figura 4.2**).

De 1996 até hoje, parte da porção intermediária, é utilizada para a deposição do lixo, através do “método da área”.

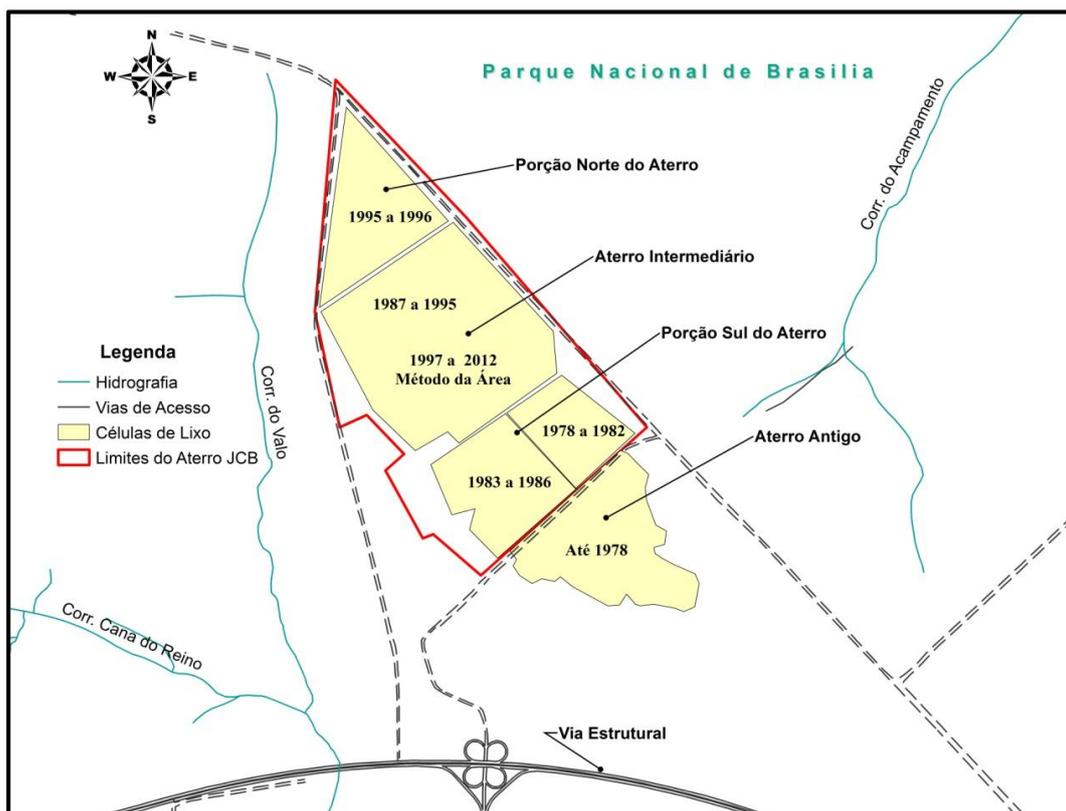


Figura 4.2 – Deposição temporal do lixo na área do Aterro do JCB (SANTOS, 1996).

### 4.3 – Clima

Conforme a classificação de Köppen, o clima de Brasília é definido como tropical, tendo duas estações bem nítidas, o inverno é seco e frio e o verão é úmido e quente, ou seja, concentrações de chuvas no período de verão e estiagem no inverno. As diferenças altimétricas condicionam uma diferenciação de temperatura na região (Tabela 4.1).

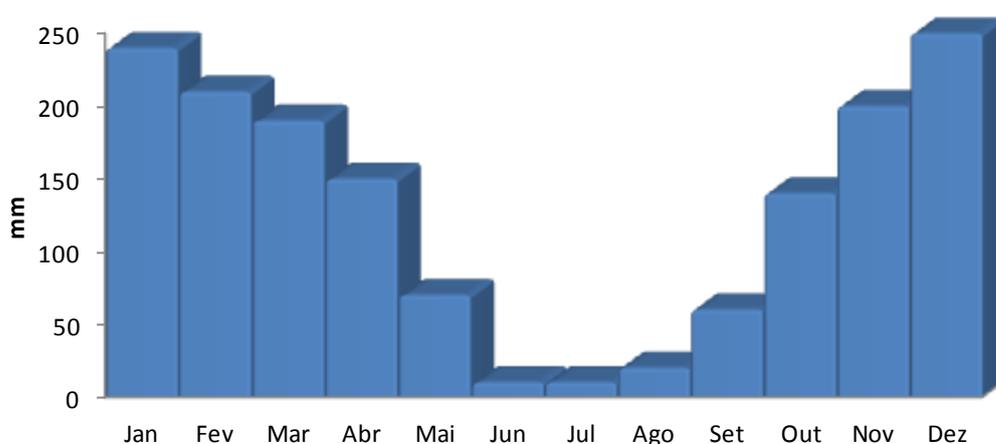
Tabela 4.1 – Relação dos tipos climáticos de ocorrência na região de Brasília/DF e sua relação com a altimetria e com a temperatura.

Tipo	Denominação	<T°C – Inverno	> T°C – Verão	Cota Altimétrica
AW	Tropical	>18°C	--	< 1000 m
CWa	Trop. de altitude	<18°C	>22°C	1000 - 1200m
CWb	Trop. de altitude	<18°C	<22°C	> 1200m

Fonte: CODEPLAN, 1984.

A classificação climática baseia-se, fundamentalmente no valor mínimo de temperatura registrado no mês mais frio, e no valor médio do mês mais quente.

A altura pluviométrica anual média de Brasília é da ordem de 1.574 mm, com uma concentração das chuvas no período de novembro a abril, sendo que no verão as médias mensais podem atingir 300 mm. No período de inverno, as chuvas atingem um mínimo, particularmente nos meses de maio a outubro, se houver ocorrência de chuvas neste período, estas não afetariam as condições de baixa umidade. Os dados registrados na estação meteorológica de Brasília confirmam essa tendência (**Figura 4.3**).



Fonte: Baptista, 1998.

**Figura 4.3** – Totais mensais de precipitação pluviométrica – Estação de Brasília (média histórica do período de 1963 a 1990).

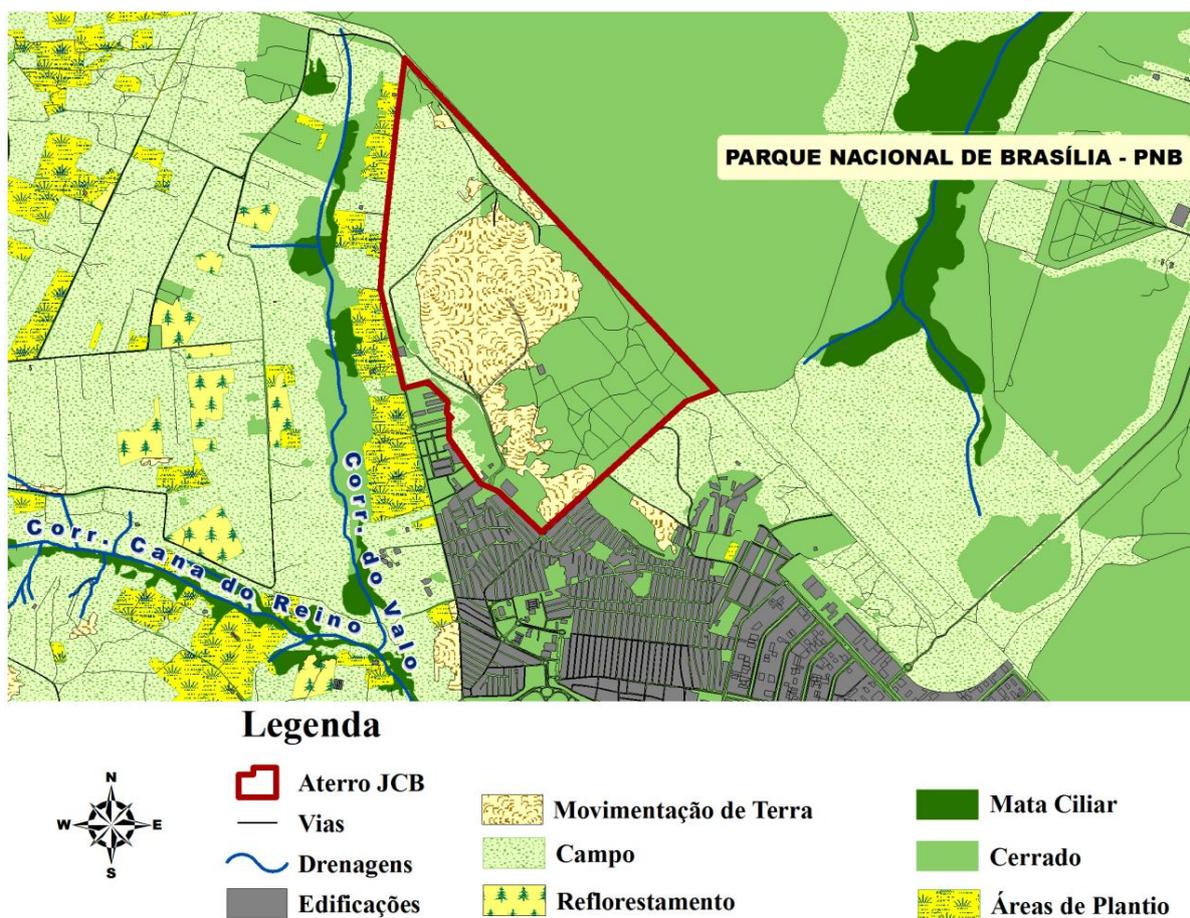
#### 4.4 – Vegetação e Hidrografia

A vegetação predominante no Distrito Federal é do tipo cerrado com algumas variações. O cerrado é composto por árvores baixas, inclinadas, tortuosas com ramificações irregulares e retorcidas. As folhas são rígidas e os troncos possuem casca bastante grossa. As raízes são profundas, devido à profundidade do nível freático (CODEPLAN, 1984).

Na região entre o Aterro JCB e a o Parque Nacional de Brasília (PNB), predomina a vegetação dos Campos de Cerrado, na sua variação Campo Limpo. Tendo ocorrência nas áreas mais elevadas e geralmente sobre Latossolos vermelhos argilosos e em topografia suave (Plano de Manejo do PNB, 1979. *op. cit.* ABREU, 2001). A oeste do Aterro JCB áreas de cultivo de hortaliças e de reflorestamento (**Figura 4.4**).

Conforme Campos (2007), a área do Aterro JCB é caracterizada como um divisor hidrográfico que delimita a bacia do córrego Cabeceira do Valo (próximo ao setor de chácaras), que drena suas águas em direção a oeste/sudoeste com a bacia do Córrego do Acampamento (dentro dos limites do PNB) que drena para nordeste.

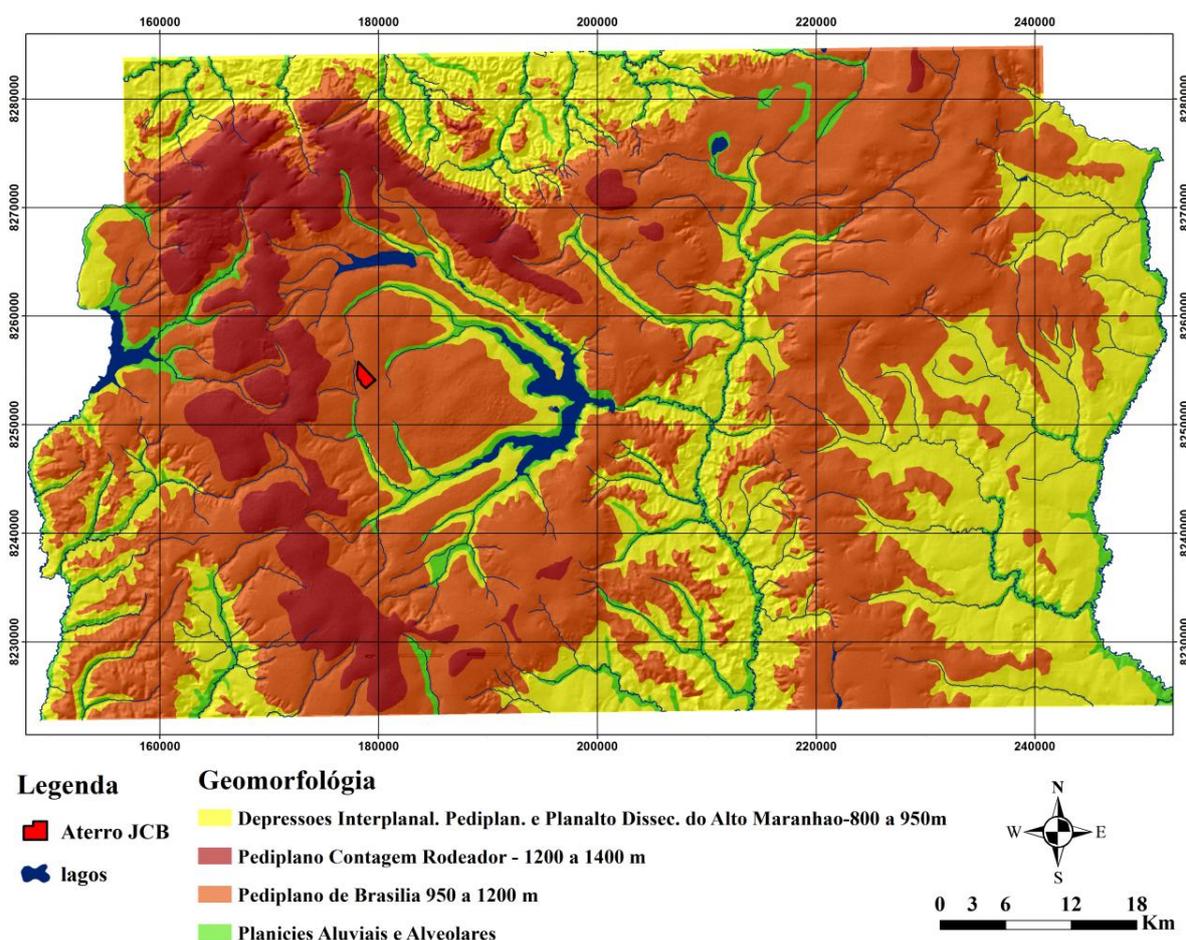
O córrego do Cabeceira do Valo é utilizado pelos moradores para irrigação de hortaliças, piscicultura e dessedentação de animais (**Figura 4.4**).



**Figura 4.4** – Mapa com o tipo de vegetação e drenagens nas proximidades do Aterro JCB.

### 4.5 – Geomorfologia

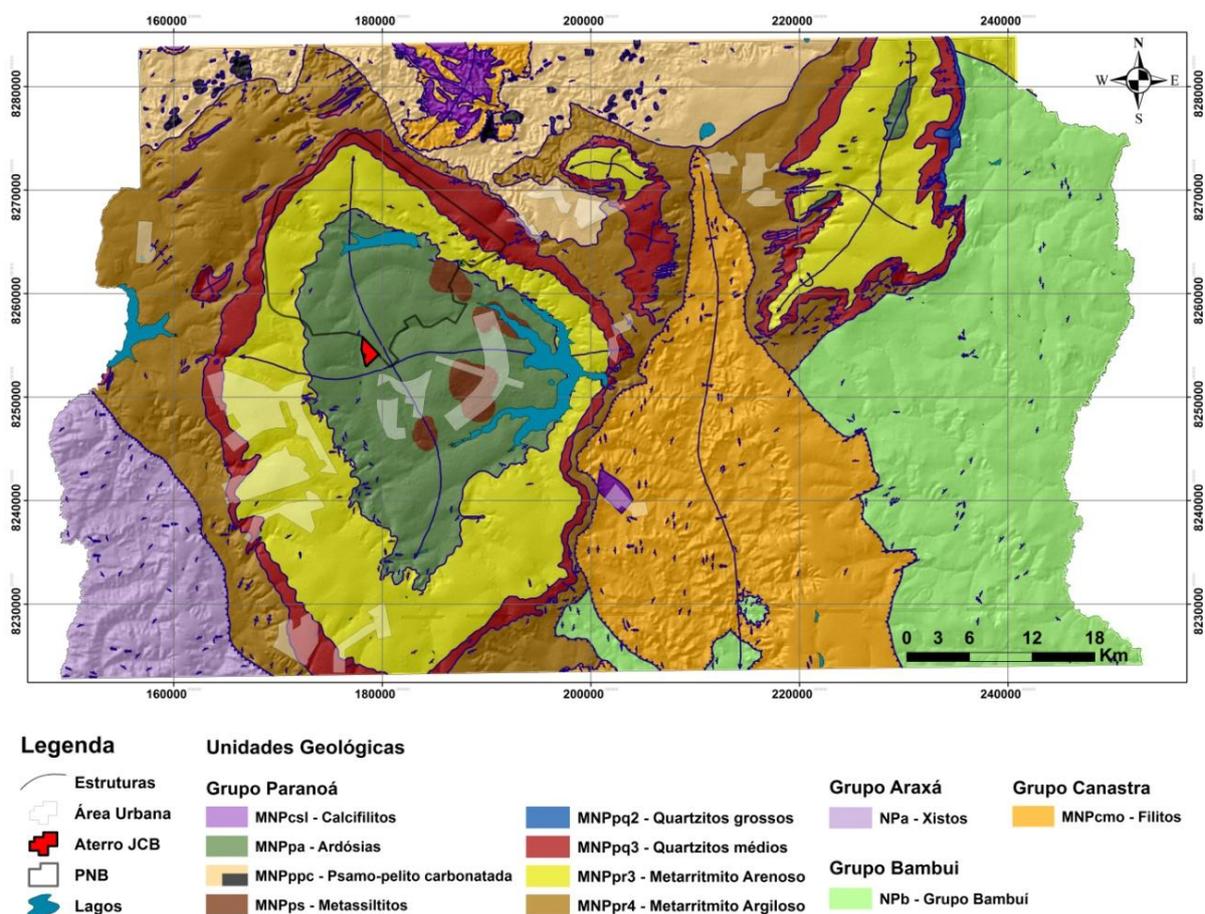
Conforme o mapa de compartimentação geomorfológica do Distrito Federal (**Figura 4.5**), a região do Aterro JCB está associada à Depressão do Paranoá, sendo caracterizada por um relevo suave ondulado com declividade menor que 10%, restrita amplitude topográfica, presença de rampas longas e predominância de pedogênese sobre o transporte e deposição (NOVAES-PINTO, 1994a). Apresenta interflúvios constituídos por afloramentos de ardósias e/ou quartzitos com ocorrências de laterita e fragmentos de quartzo (NOVAES-PINTO, 1994).



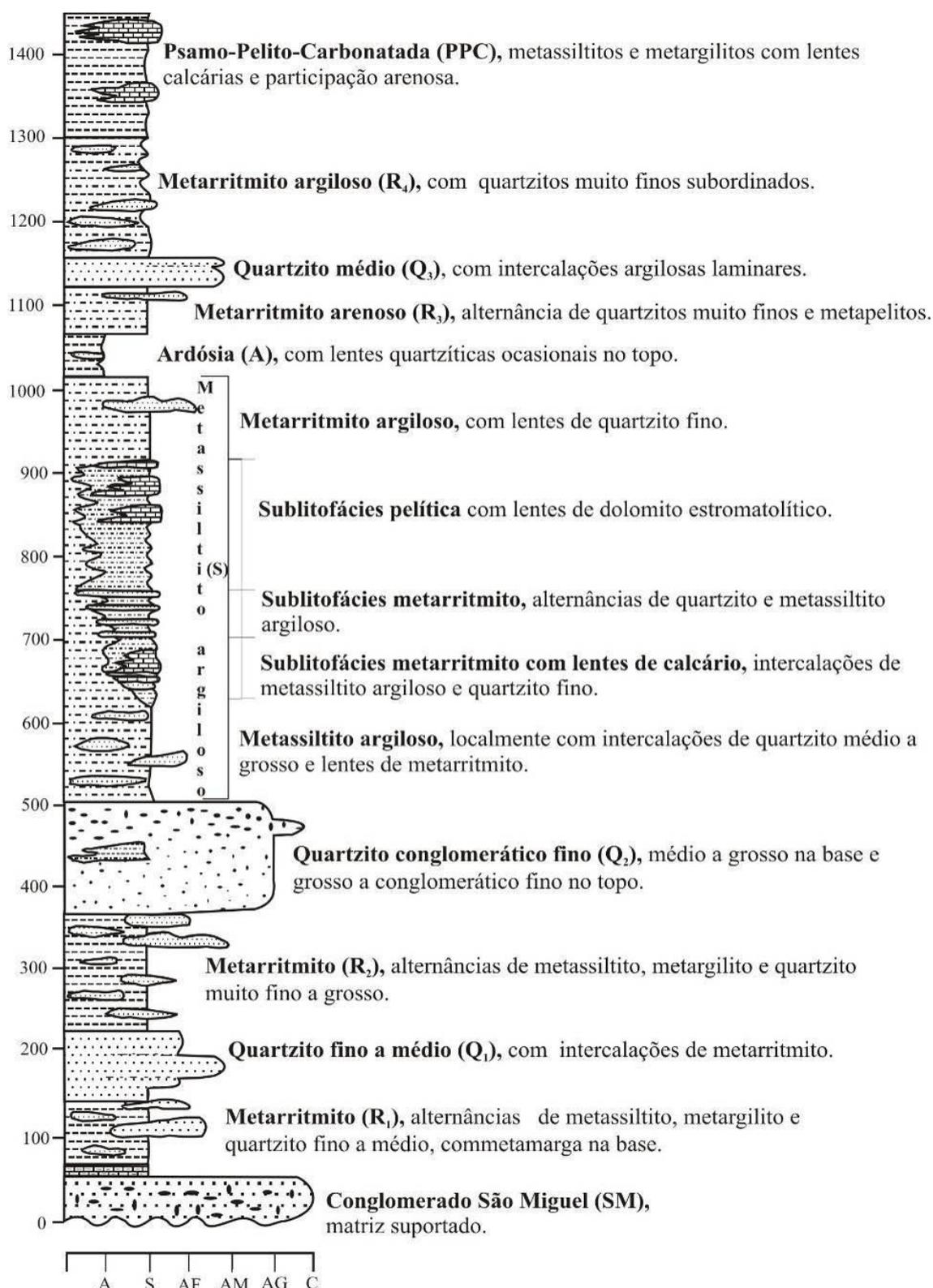
**Figura 4.5** – Mapa de Compartimentação Geomorfológica do Distrito Federal. Adaptado de Embrapa (1998).

## 4.6 – Geologia

Conforme Campos (1998), o Grupo Paranoá é a unidade geológica que ocupa a maior área no Distrito Federal, dividida em seis unidades estratigráficas: a Ardósia, o Quartzito Médio, o Metarritmito Argiloso, o Metassiltito Argiloso, o Metarritmito Arenoso e a Psamo-Pelito Carbonata (Figura 4.6). Os cavalgamentos ocasionaram inversões estratigráficas no DF, onde o Grupo Canastra ocorre sobre os grupos Paranoá e Bambuí, o Grupo Paranoá sobre o Grupo Bambuí e o Grupo Araxá sobre o Grupo Paranoá. Segundo Freitas-Silva e Campos (1999), os grupos Canastra e Paranoá são unidades cronocorrelatas dispostas lateralmente, e os grupos Araxá e Bambuí possuem sedimentações cronocorrelatas depositadas em bacias, formando porções mais internas e externas, dentro da Faixa Brasília (Figura 4.7).



**Figura 4.6** – Mapa Geológico do Distrito Federal. Adaptado de Freitas Silva e Campos (1998).



**Figura 4.7** – Coluna estratigráfica completa do Grupo Paranoá. A - argila, S - silte, AF - areia fina, AM - areia média, AG - areia grossa e C – cascalho (FARIA, 1995).

Faria (1995), em seus estudos na região de São João da Aliança/Alto Paraíso de Goiás, considera o Grupo Paranoá como de idade Meso-neoproterozóico, composto de rochas metap-

samo-pelíticas e carbonatadas. Sendo separadas em onze unidades: SM, R<sub>1</sub>, Q<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, Q<sub>2</sub>, S, A, R<sub>3</sub>, Q<sub>3</sub>, R<sub>4</sub> e PPC. Todas correlacionáveis da base para o topo.

Freitas-Silva e Dardenne (1993), em sua pesquisa dataram o Grupo Canastra como de idade Meso-neoproterozóico, com três formações: Serra do Landin, Paracatu e Serra dos Piões. Sua constituição é caracterizada por clorita e sericita filitos e subordinadamente calcifilitos, filitos carbonosos, quartzitos e mármore finos, correlacionáveis com as formações Serra do Landin e Paracatu.

O Grupo Araxá foi datado como Neoproterozóico por Pimentel *et al* (1993), sendo representado por muscovita xistos, clorita-quartzo xistos, muscovita-granada xistos e raras lentes de quartzitos micáceos.

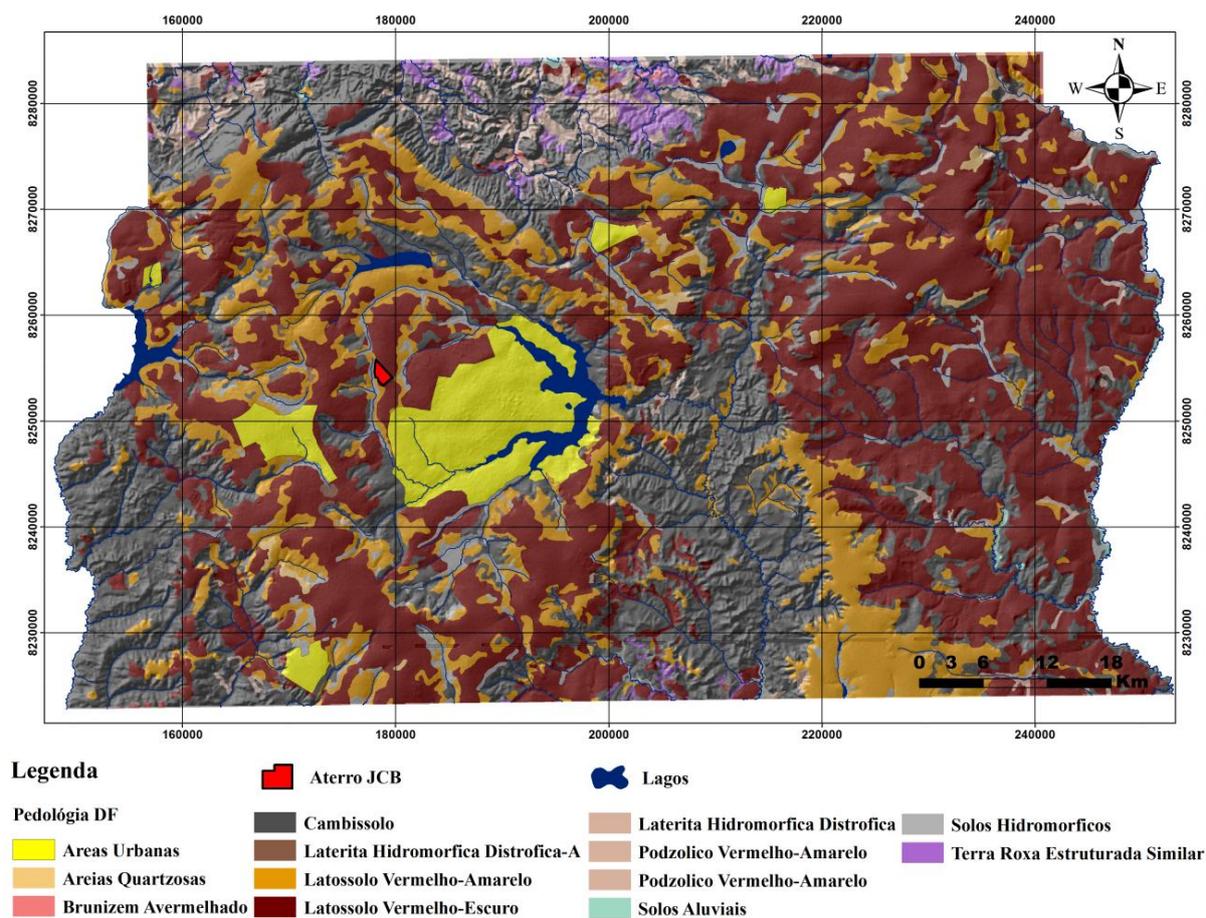
O Grupo Bambuí foi amplamente estudado por Dardenne (1978), sua pesquisa datou a formação com a idade Neoproterozóica e constituído pela sequência pelito carbonatada-arcoseana, dividida nas formações Jequitaí, Sete Lagoas, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias (divisão da base para o topo). No DF o Grupo Bambuí é caracterizado pela presença de metassiltitos, metassiltitos argilosos, metargilitos e raras intercalações de arcóseos, correlacionáveis ao topo da Formação Serra da Saudade e a base da Formação Três Marias.

O Aterro JCB está situado sobre rochas do Grupo Paranoá, onde os litotipos que compõem essa litofácies são capeadas por um espesso latosso argiloso. A formação litológica da área do Aterro JCB é caracterizada por ardósias roxas (alteradas) ou cinza esverdeada (não alterada), com ocorrências de quartzitos dentro do conjunto das ardósias (CARNEIRO, 2002).

Araújo (1996) observou afloramentos de ardósia nas proximidades do Aterro JCB, próximos ao córrego Cabeceira do Valo e na porção oeste do Aterro, associados a veios métricos de quartzo de coloração branca. É visível a presença de blocos de quartzito próximo à via de acesso à área do Aterro JCB (Via Estrutural-BR070) indicando que esses blocos interagem com as ardósias.

#### 4.7 – Pedologia

Estudo realizado pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos (EMBRAPA, 1978), produziu o mapa pedológico do DF, que até hoje permanece como fonte de informação sobre os solos da região (**Figura 4.8**).



**Figura 4.8** – Mapa Pedológico Simplificado do DF (EMBRAPA, 1978).

No mapa pedológico nota-se que na região de Brasília predominam três classes de solos, denominadas de Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Cambissolo (C), tendo uma representabilidade de 85,49%. Os Latossolos representam 54,47% da área, tendo o LV com presença de 38,63% e ocorrências em topos das chapadas, divisores com topos planos, na Depressão do Paranoá e na Bacia do Rio Preto. O LVA possui a presença de 15,84%, ocorrendo nas bordas de chapadas e divisores, em superfícies planas, abaixo de topos da chapada da Contagem, sempre adjacente à classe LV. O Cambissolo constitui 31,02%, ocorrendo nas vertentes das bacias mais importantes: do Maranhão, do Descoberto e do São Bartolomeu, além das encostas com declividades mais elevadas na depressão do Paranoá e na Bacia do Rio Preto. As outras classes de solos apresentam-se com 9,06% do total da Região de Brasília/DF (MARTINS *et al.*, 2004).

Conforme Franco (1996), na região do Aterro do JCB o desenvolvimento do solo é bem estruturado sobre as ardósias, com o perfil da base para o topo: embasamento ardósiano, camada de solo saprolítico alterando para um nível laterítico com espessura entre 1 a 4 metros

e na superfície um solo homogêneo com espessura média entre 8 a 15 metros. Este solo superficial apresenta alta porosidade, com variação de textura e composição mineralógica, com pouca variação do teor de argila e alto teor de ferro e alumínio.

Araújo (1996) verificou que o solo na região do Aterro JCB apresenta uma pequena coloração avermelhada com 3 a 25 metros de espessura, sendo observado que o solo é mais espesso nas partes norte e intermediária do Aterro, e com espessura média de 5 metros na parte sul da área do Aterro JCB.

Santos (1996) relata a ocorrência de nível laterítico concrecional próximos ao córrego Cabeceira do Valo, o que indica a existência de um nível laterítico entre o saprolito e o solo superficial.

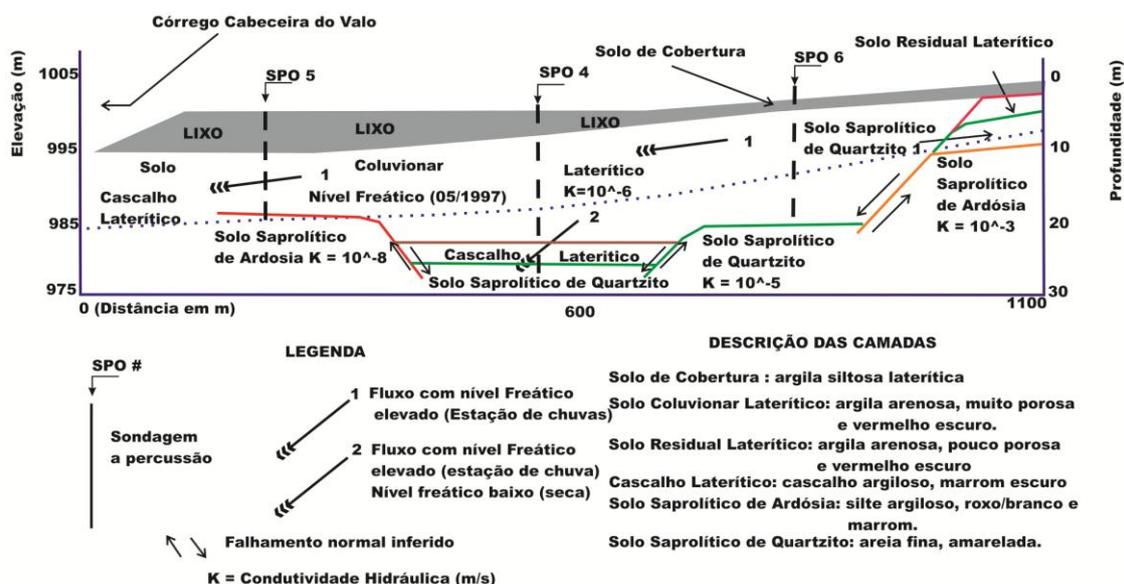
Pereira *et al.* (1997) na elaboração de estudos geológico-geotécnico na área do Aterro JCB, constataram a ocorrência de Latossolo Vermelho com espessuras entre 10 a 15 metros em solo residual laterítico, e com espessuras entre 15 a 25 metros quando solo é coluvionar laterítico, ambos com porosidade elevada e variação de permeabilidade entre  $10^{-4}$  e  $10^{-6}$  cm/s, tendendo a diminuição dos valores com a profundidade. É relatada a presença de nível laterítico descontínuo (cascalho marrom escuro), ocorrendo no topo dos solos saprolítico e na zona de oscilação do nível freático, com espessura média de 2 metros. Há ocorrência de solo saprolítico de coloração roxa, marrom e branca, caracterizado por baixa porosidade e permeabilidade de campo inferior a  $10^{-6}$  cm/s, originado de rochas ardósias da Fácies Ardósia da Sequência Depositional Paranoá. Por fim os autores descrevem a presença de solo Saprolítico de quartzito (na porção sudoeste do Aterro JCB) derivado de rochas quartzíticas pertencente à Fácies Ardósia da Sequência Depositional Paranoá, com permeabilidade entre  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  cm/s. ocorrem intercaladas nas ardósias apresentando-se em pequenas lentes ou lentes de grandes dimensões.

Bernardes *et al* (1999) em seu estudo de caracterização geofísica e geoquímica da área do Aterro JCB, utilizando sondagens mecânicas efetuadas, elaboraram um modelo das seções geológico-geotécnicas da área do Aterro JCB (**Figura 4.9**). O modelo aborda quatro tipos de solos, com as respectivas características:

- Solo residual laterítico e solo coluvionar laterítico, constituído de camadas de argila arenosa, vermelha-escura, pertencentes ao grupo LG da classificação MCT, com elevada porosidade, a qual diminui com a profundidade. Apresenta baixo valor de  $N_{SPT}$  (índice de resistência a penetração) de 2 a 12 golpes e valores de permeabilidade variando entre  $10^{-4}$  e  $10^{-6}$  cm/s em função da profundidade e distribuição espacial. A espessura desta camada é variável para o solo

residual laterítico, variando entre 10 a 15 metros, e para o solo coluvionar laterítico variando entre 15 a mais de 25 metros.

- Solo de cascalho laterítico composto basicamente por cascalho de cor marrom escura, apresentando  $N_{SPT}$  elevado de 12 a 45 golpes. A espessura desta camada é aproximadamente 2,0 metros, não sendo contínua e encontrando-se no topo dos solos saprolíticos e na zona de oscilação do nível freático.
- Solo saprolítico de ardósia composto por silte argiloso de coloração roxa, branco e marrom, com baixa porosidade e com  $N_{SPT}$  variavelmente randômico (5 a impenetrável) apresentando valores de permeabilidade de campo inferiores a  $10^{-6}$  cm/s.
- Solo saprolítico de quartzito composto essencialmente por areia fina amarela/branca, com  $N_{SPT}$  elevado (12 a impenetrável) e valores de permeabilidade com magnitude da ordem de  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  cm/s.



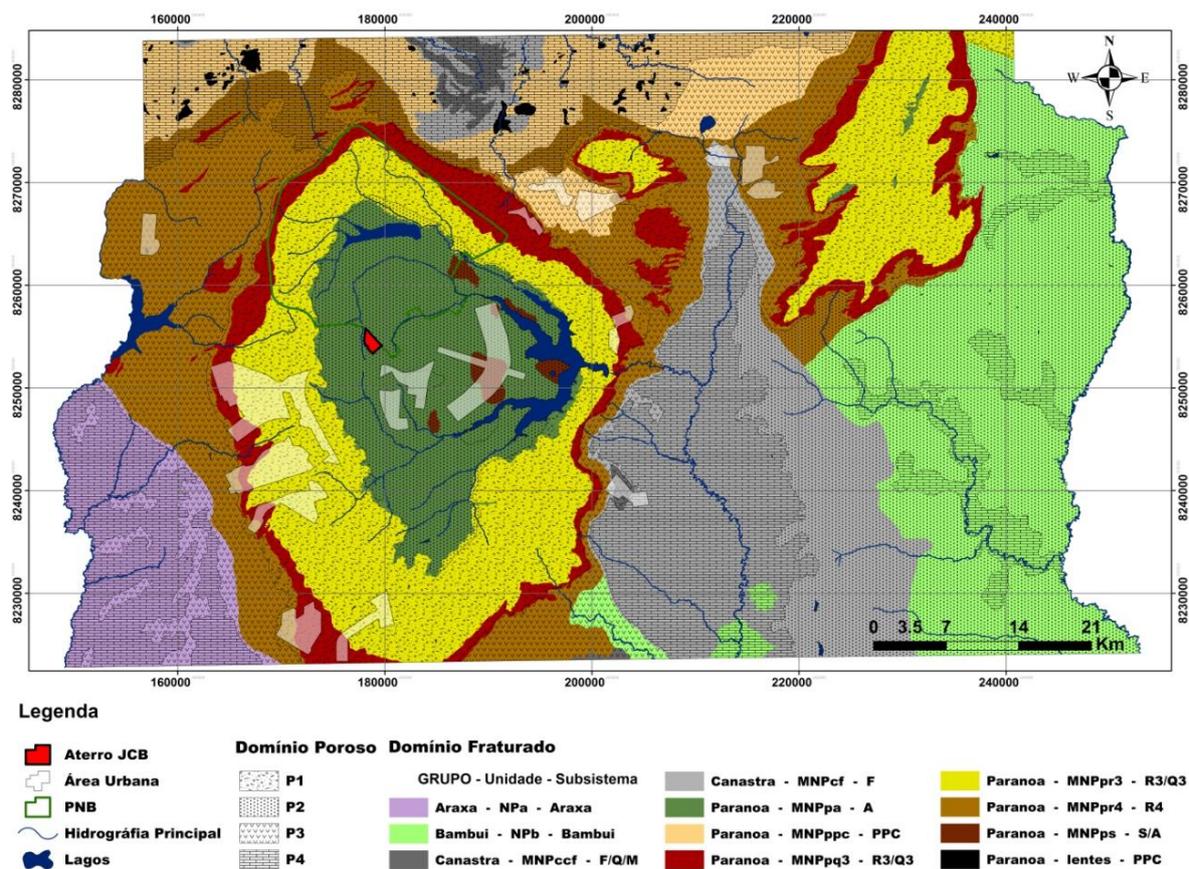
**Figura 4.9** – Seção geológico-geotécnica do Aterro JCB. Sentido oeste para leste. (BERNARDES *et al*, 1999).

#### 4.8 – Hidrogeologia

A região do DF é abundante em nascentes, o que considera a segurança das águas subterrâneas para a manutenção das pequenas vazões dos cursos d'água superficiais. Campos e Freitas-Silva (1998) desenvolveram um estudo onde foi subdividido os sistemas aquíferos do Distrito Federal, incluindo os domínios poroso e fraturado (**Tabela 4.2**).

**Tabela 4.2** – Sistemas Aquíferos do DF, seus domínios e as médias das vazões (CAMPOS e FREITAS SILVA, 1998).

Aquífero (Sistema/Subsistema)	Médias das Vazões (Litros/horas)
<u>Domínio Poroso</u>	
Sistemas P1, P2, P3 e P4.....	> 800
<u>Domínio Fraturado</u>	
Sistema Paranoá	
Subsistema S/A .....	12.700
Subsistema A .....	4.390
Subsistema Q3/R3 .....	12.200
Subsistema R4 .....	6.150
Subsistema PPC .....	9.100
Sistema Canastra	
Subsistema F.....	7.500
Subsistema F/Q/M .....	33.000
Sistema Bambuí.....	5.210
Sistema Araxá.....	3.150



**Figura 4.10** – Mapa Hidrogeológico do DF. (FREITAS-SILVA e CAMPOS, 1998).

A recarga dos aquíferos no domínio poroso ocorre pela precipitação pluvial. Onde a água infiltrada ocupa os espaços vazios intergranulares dos meios geológicos. O domínio poroso é caracterizado com espessura entre 15 a 25m, e de boa homogeneidade (CAMPOS e FREITAS-SILVA, 1998).

Segundo Barros (1993) e Campos e Freitas-Silva (1998), as águas infiltradas no domínio poroso podem apresentar os seguintes comportamentos:

- Armazenar-se no manto de cobertura;
- Percolar para as encostas (exutórios), gerando as fontes de contato e/ou as fontes de depressão;
- Percolar para as fontes de barramento;
- Infiltrar-se para os aquíferos do domínio fraturado;
- Evaporar pela ação da densidade vegetativa (evapotranspiração).

No domínio fraturado ocorre um vínculo com as várias unidades litoestatigráficas que ocorrem na região de Brasília/DF (**Figura 4.10**). A acumulação e recarga desse domínio é por planos de fratura, microfraturas, diáclases, juntas, zonas de cisalhamento e falhas nos meios rochosos. Podendo ser livres ou confinados e de elevada heterogeneidade e anisotropia. Na região do DF, o domínio fraturado limita-se a grandes profundidades (250 metros), tendo a densidade das discontinuidades do corpo rochoso como controlador da condutividade hidráulica. Sua recarga se dá de forma indireta, pela infiltração das águas de precipitação pluviométrica (CAMPOS e FREITAS-SILVA, 1998).

Segundo Santos (1996) a recarga do domínio fraturado ocorre de três maneiras:

- Infiltração indireta com água oriunda do manto de solos de cobertura;
- Indiretamente, por escoamento superficial de água, com ocorrência do leito de drenagem com a zona de descontinuidade do embasamento rochoso.
- Infiltração direta com o afloramento de rochas permeáveis.

Conforme Campos e Freitas-Silva (1998) o Sistema Paranoá (subsistema S/A), do domínio fraturado, é representado pela litologia pertencentes à Unidade Metassilito do Grupo Paranoá. De acordo com a figura 4.10, o subsistema A está relacionado a áreas de afloramento da Unidade Ardosiana, o subsistema R4 é caracterizado litologicamente por metarrimito argiloso e o subsistema PPC está relacionado a litologia da Unidade Psamo-Pelito Carbonatada. O subsistema R3/Q3, por apresentar características hidrogeológicas bastante similares, fica relacionado à unidade Quartzito Médio e Metarrimito Arenoso.

A localização do Aterro JCB, está sobre o subsistema A (Ardósia) que é caracterizado por bastantes fraturas e baixas vazões, devido ao comportamento dúctil da ardósia que resulta no selamento das estruturas abertas com o aumento da pressão litostática. As ocorrências de disponibilidade hídrica na região do Aterro JCB podem ser incrementadas em função da presença de lentes de quartzitos e de veios de quartzo de segregação metamórfica, podendo representar a interligação entre sistemas de fraturas (CARNEIRO, 2002).

Segundo Campos (2007), a área do Aterro JCB está posicionada sobre o Sistema P1 do contexto das águas rasas (Domínio Poroso) e o Subsistema A (Sistema Paranoá) relacionada ao Domínio Fraturado. Em sua descrição, Campos (2007) caracteriza o Sistema P1 na área como um sistema heterogêneo e anisotrópico, com espessura saturada da ordem de 30 metros e zona não saturada com espessura de 3 metros a 10 metros (período de estiagem). A condutividade hidráulica variando da ordem de  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  m/s, com vazão média de 4.500 l/h, com alta ocorrência de poços secos, e com baixa vocação hidrogeológica e vulnerabilidade muito baixa.

#### 4.9 – Topografia do Aterro JCB

A topografia do Aterro JCB é caracterizada em um alto topográfico local, com rebaixamento altimétrico em diferentes direções (divisor de águas). Na **Figura 4.11** é visto o perfil topográfico, da área do Aterro JCB, no sentido norte-sul (visada para leste). Neste perfil é observado um rebaixamento suave e extenso na direção sul, com gradiente preferencial de escoamento (identificado pelas setas brancas), onde se encontra a área de assentamento urbano conhecido como cidade da Estrutural. No centro da figura 4.11, se encontra um alto topográfico, que se estende verticalmente, a 20 metros do nível natural, devido ao processo de deposição e aterramento do resíduo sólido.

No perfil de sentido oeste-leste, com visada para norte (**Figura 4.12**) é observado a ocorrência de dois gradientes de escoamento preferencial, um em direção ao córrego Cabeceira do Valo (Oeste) e outro em direção ao Parque Nacional (leste). Com uma declividade mais evidente a oeste é provável um fluxo subterrâneo preferencial nesta área. Um alto topográfico ocasionado pela disposição dos resíduos sólidos, também é representado neste perfil.

Stollberg *et al.* (2011) utilizando informação da profundidade do nível freático em 134 pontos de amostragem, construiu um mapa do nível potenciométrico indicando as direções preferenciais do fluxo da água subterrânea (**Figura 4.13**). A primeira é orientada para o sul, onde se encontra um assentamento urbano (Cidade Estrutural), o fluxo nesta direção mergulha

de forma consistente para o sul, saindo da cota de 1112 m até a cota de 1087 m nas imediações da rodovia DF-095 (gradiente hidráulico estimado de 1,3%). O segundo fluxo se orienta para leste, em contraste, o gradiente hidráulico é maior (1,6%), se calculado do ponto central da disposição dos resíduos sólidos (cota 1.112 m) até o Córrego do Acampamento (cota 1.080 m).

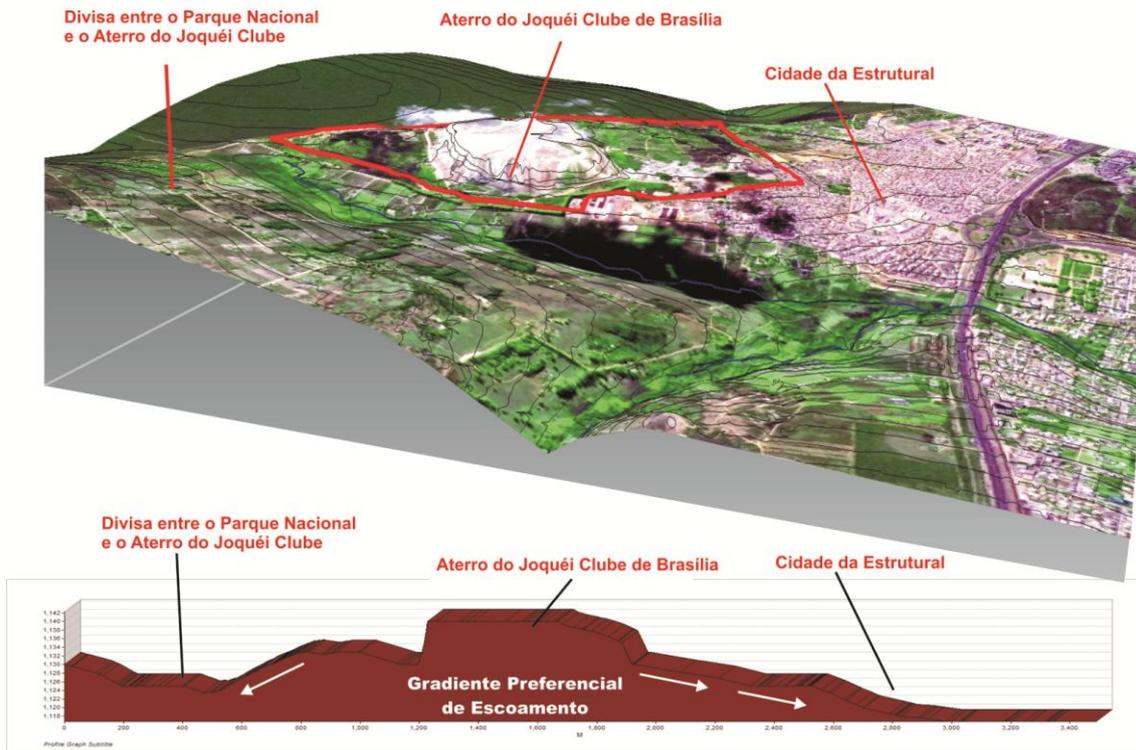
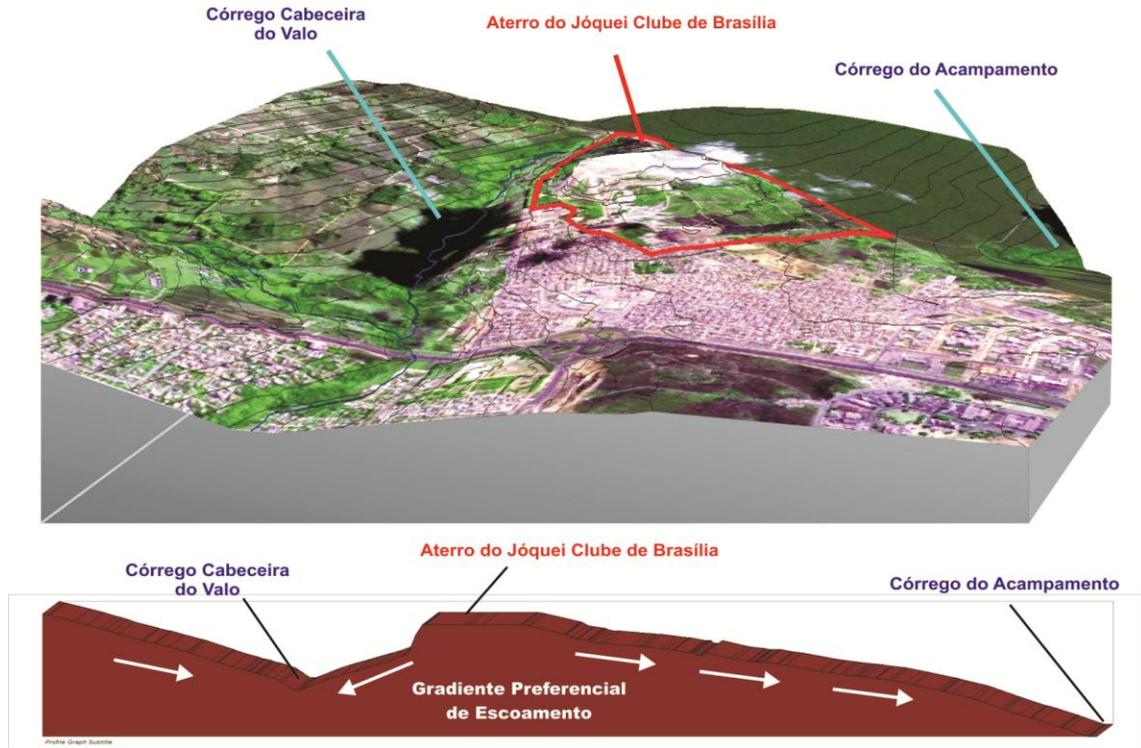
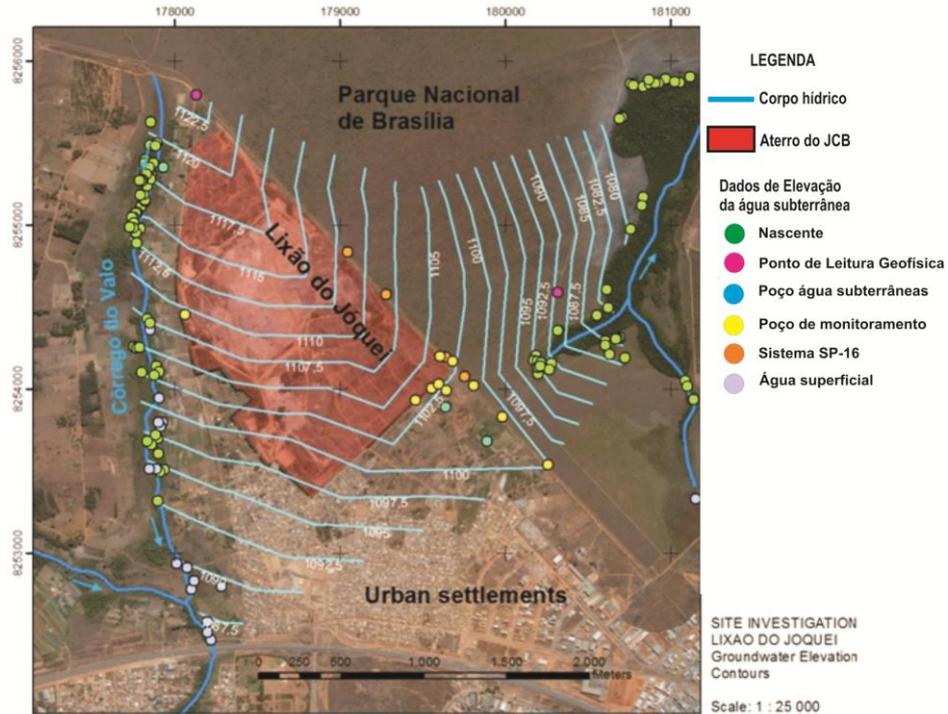


Figura 4.11 – Perfil topográfico do Aterro JCB no sentido norte-sul. Visada para leste.

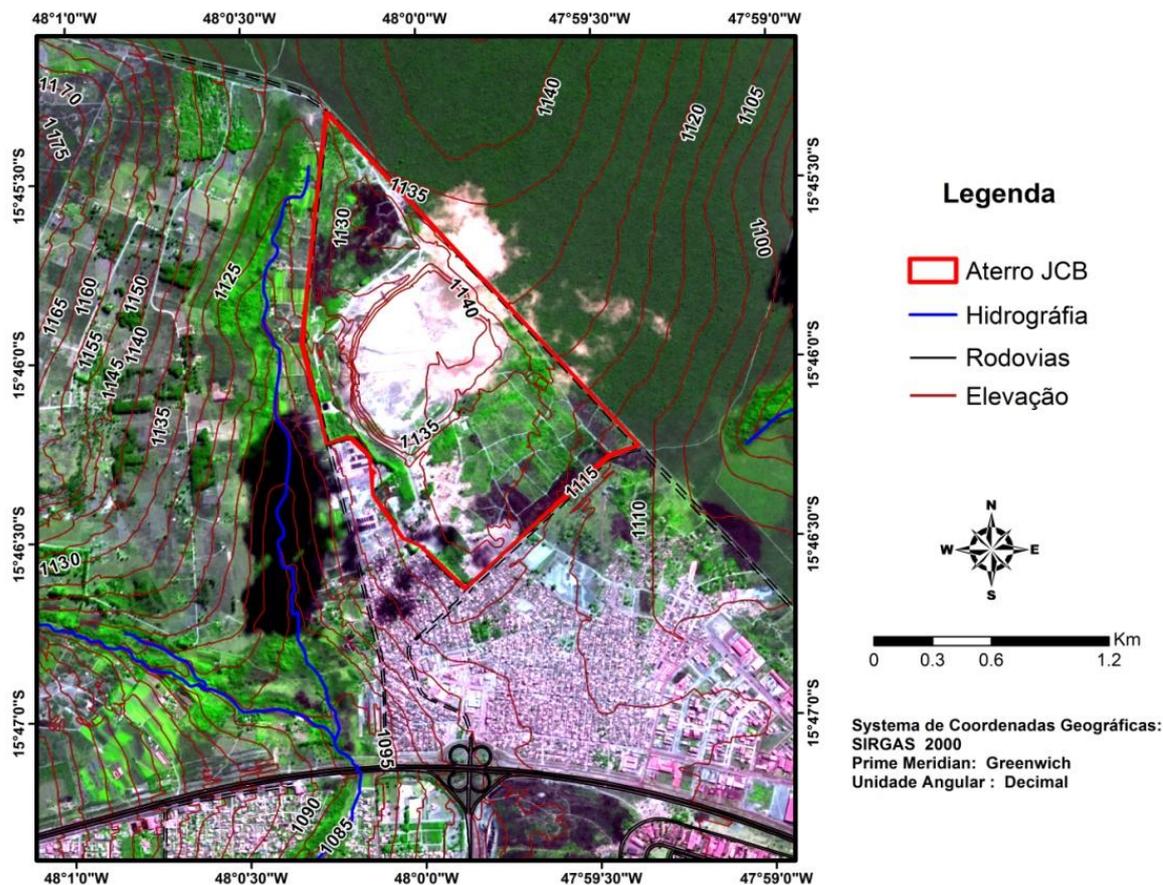


**Figura 4.12** – Perfil topográfico do Aterro JCB no sentido oeste-leste. Visada para norte.



**Figura 4.13** - Mapa dos níveis da água subterrânea na área do Aterro JCB (Stollberg *et al*, 2011).

O mapa topográfico da superfície na área do Aterro JCB e localidades próximas é apresentado na **Figura 4.14**.



**Figura 4.14** – Mapa topográfico da área do Aterro JCB e vizinhanças.

#### 4.10 – A Pluma de Contaminação (Chorume) do Aterro JCB

Conforme Campos (2007), a caracterização química da pluma de contaminação é rica em substâncias e elementos como potássio, cloreto, cálcio, magnésio e nitrato. Devido às variações da composição química da água subterrânea a melhor forma de se apresentar os teores das substâncias dissolvidas e os parâmetros físico-químicos é a partir da média, valores máximos e comparação com valores de background. Para o *background* das amostras químicas da água, Campos (2007) analisou uma nascente com o contexto hidrogeológico similar, sem a presença de fontes contaminantes (**Tabela 4.3**). Os valores destacados (condutividade elétrica e amônia) serão utilizados como parâmetros de amarração para os dados geofísicos elaborados por esta pesquisa.

**Tabela 4.3** – Composição média e máxima do chorume do Aterro JCB e valores de *background*. Todas as unidades em mg/L, com exceção da condutividade elétrica (CE) medida em  $\mu\text{S/cm}$  e pH adimensional. (FRANCO, 1996; ARAÚJO, 1996 e CAMPOS, 2007).

<b>Parâmetro</b>	<b>Média</b>	<b>Máximo</b>	<b>Background</b>
<b>pH</b>	6.0	7.6	4.9
<b>CE</b>	93.1	1220.0	2.6
<b>TSD</b>	68.2	620.0	1.2
<b>Dureza</b>	10.1	46.1	0.03
<b>Nitrato</b>	1.0	2.9	0.0
<b>Nitrito</b>	0.02	0.2	0.0
<b>Amônia</b>	0.24	1.34	0.0
<b>Cloro Total</b>	0.1	0.76	0.0
<b>Alcalinidade</b>	32.3	452.0	0.3
<b>O<sub>2</sub> Consumido</b>	9.9	56.1	0.0
<b>O<sub>2</sub> Dissolvido</b>	27.8	136.2	28.6
<b>Sulfato</b>	5.0	21.0	0.0
<b>Fosfato</b>	0.35	2.5	0.01
<b>Potássio</b>	7.73	44.0	0.56
<b>Ferro</b>	0.15	0.62	0.28
<b>Manganês</b>	0.036	0.366	0.01
<b>Alumínio</b>	32.3	452.0	4.28
<b>Cálcio</b>	6.40	49.1	2.54
<b>Magnésio</b>	1.3	17.86	3.69

Segundo Campos (2007), o parâmetro de pH do chorume apresentou dois tipos de comportamentos. O pH alcalino nas porções mais rasas do Aterro, e pH ácido abaixo de 35 metros.

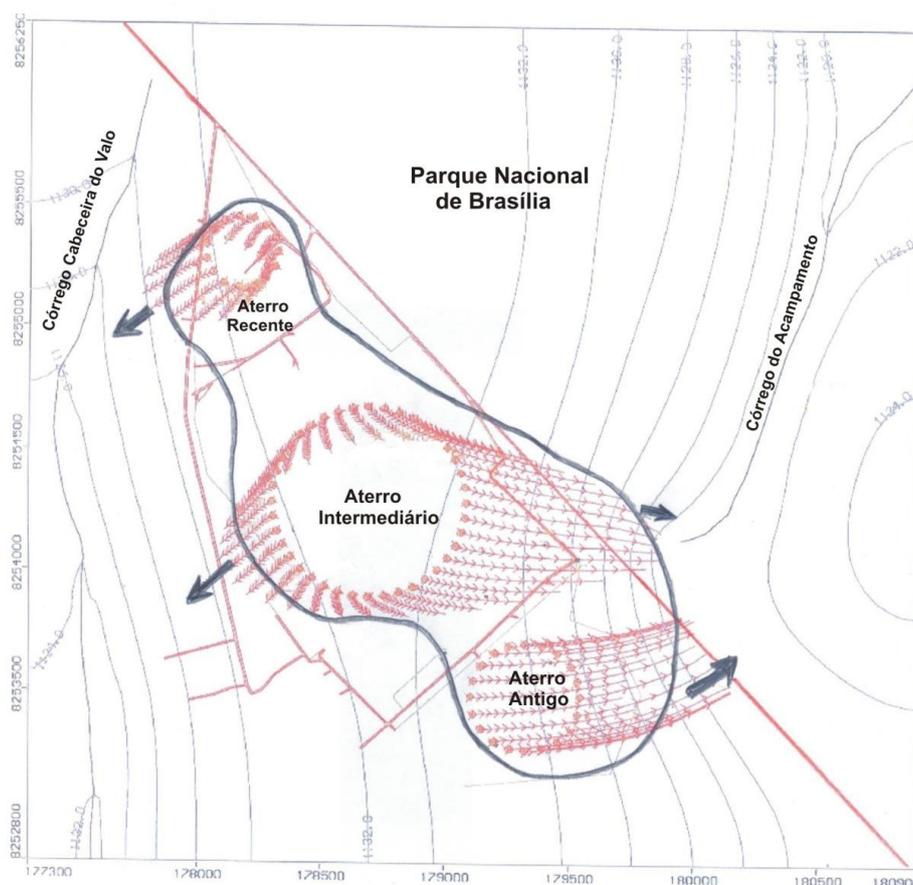
A contaminação do subsolo no interior e nas proximidades do Aterro JCB foi observada por estudos geofísicos e hidrogeológicos anteriores:

- Franco (1996) mostrou, com o uso de sondagens elétricas verticais (SEVs), que o chorume produzido pelo resíduo do Aterro do Jockey Club (<500 ohm.m) contaminou a água subterrânea que flui tanto no sentido do córrego Vicente Pires quanto no sentido do Parque Nacional de Brasília.
- Araújo (1996) mostrou, através de análises químicas de águas subterrâneas, coletadas em poços de monitoramento, que há uma maior produção do chorume nos meses de alta precipitação pluviométrica, evidenciando a alta permeabilidade dos solos da região.
- Franco (1996) utilizando de métodos geofísicos (sísmica de refração, elétricos, sondagem magnetotélurica, perfilagem eletromagnética e gradiometria magnética) e geo-

químicos da água, pode delimitar bem a interface Aterro/cerrado e observar a presença de uma pluma de contaminação rasa em direção ao PNB.

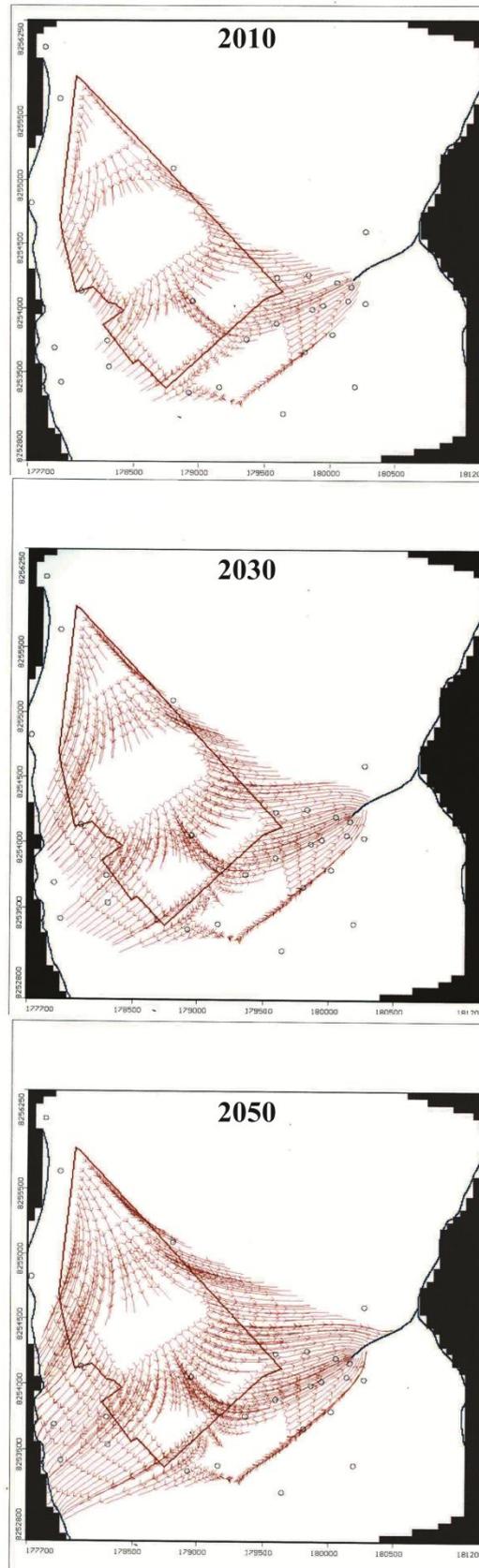
- Abreu (2001) na análise da qualidade da água subterrânea, do lençol freático e de poços de monitoramento entre os limites do Aterro e o Córrego do Acampamento indicou uma tendência de contaminação no lençol freático indo para o interior do Parque.

Campos (2007), determinou os limites da pluma utilizando os dados hidroquímicos obtidos de Araújo (1996), Franco (1996), Koide *et al* (1999) e Abreu (2001). A partir destes dados e de cálculos teóricos elaborou os modelos de evolução da pluma de contaminação para os anos de 1996 ate 2007 (**Figura 4.15**).



**Figura 4.15** – Mapa de distribuição da pluma de contaminação na região do Aterro JCB, com projeção para o ano de 2007. As setas indicam o fluxo subterrâneo local preferencial da pluma (CAMPOS, 2007).

Carneiro (2002) produziu modelos matemáticos de fluxos subterrâneos (para os anos de 2010, 2030 e 2050) na área do Aterro JCB apontando duas tendências principais do fluxo da pluma contaminante no subsolo: uma em direção ao Parque Nacional de Brasília; e outra em direção ao córrego Cabeceira do Valo (**Figura 4.16**).



**Figura 4.16** - Modelagem matemática para o fluxo da pluma do Aterro JCB, com duas tendências, para os anos de 2010, 2030 e 2050 (CARNEIRO, 2002).

Hirsch (2008) utilizando o método de eletrorresistividade, com arranjo Wenner, identificou a presença de zonas de baixa resistividade ( $< 31 \text{ ohm.m}$ ) entre os limites oeste e sul da área do Aterro JCB. Seus estudos apontaram os valores de baixa resistividade à possibilidade de contaminação pelo chorume gerado pelo Aterro JCB.

Cavalcanti *et al.* (2011) aplicando os métodos de eletrorresistividade (arranjo Dipolo-dipolo) e GPR no limite sul do Aterro JCB e no limite leste entre o PNB e o Aterro JCB, identificaram a presença de valores de baixa resistividade entre  $30 \text{ ohm.m}$ , relacionada a possível contaminação do nível freático nesta região. Os resultados do sinal eletromagnético (GPR) apresentaram seções com forte atenuação do sinal na mesma localização das zonas de baixa resistividade.

Stollberg *et al.* (2011) usaram um geoprobe para instalar poços de monitoramento da qualidade da água no limite sul e entre o Aterro JCB e o PNB. Os 13 poços (com profundidade entre 8 a 15 metros) resultaram nas informações de:

- Profundidade do nível freático na região (média de 7,5 metros), no mês de agosto (período de estiagem),
- Valores de pH entre 5.2 para os poço contaminados,
- Valores de teor de amônia em poços contaminados ( $>10 \text{ mg/L}$ ), e
- Valores de condutividade elevados (230 a  $994 \text{ }\mu\text{S/cm}$ ).

Sousa *et al* (2012) realizaram comparações entre os dados de Cavalcanti *et al* (2011) e Stollberg *et al* (2011). Na comparação verificou-se que os valores de baixa resistividade se relacionavam com os valores de amônia acima de  $10 \text{ mg/L}$  e de condutividade acima de  $375 \text{ }\mu\text{S/cm}$ . Os outros autores ainda associaram os valores resistividade entre o período de chuva e o período de estiagem. Suas conclusões comprovaram que durante o período de estiagem a pluma de contaminação fica mais concentrada gerando uma grande área condutiva ( $<30 \text{ ohm.m}$ ), e no período de chuva ocorre uma diluição da pluma de contaminação, diminuindo a área com maior condutividade.

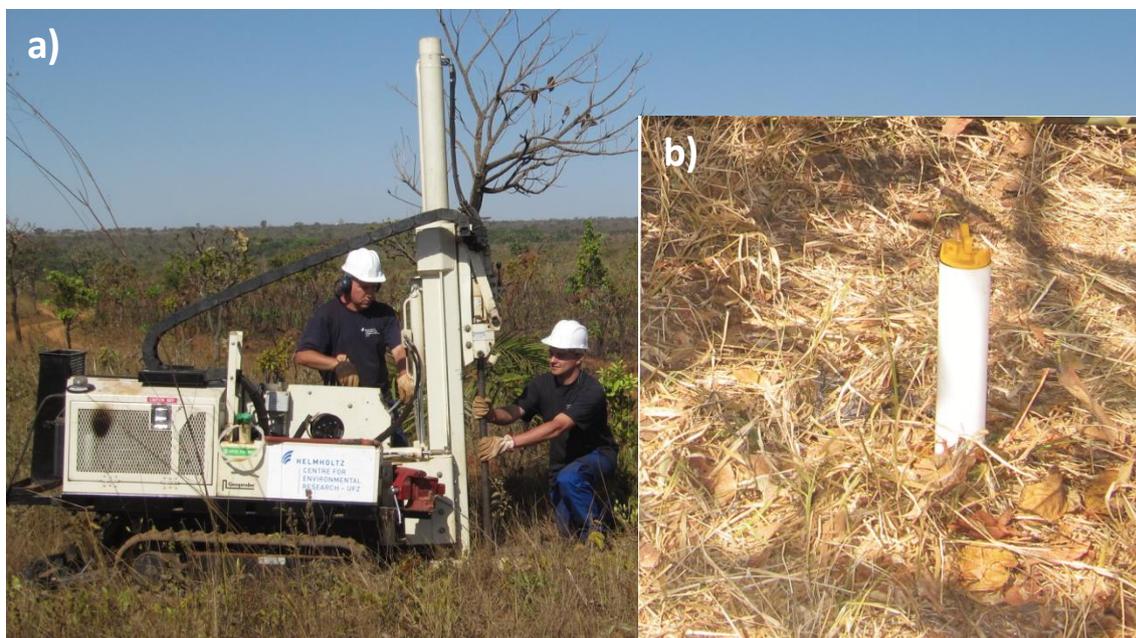
## CAPÍTULO V

### 5 METODOLOGIA

As campanhas de GPR ocorreram no 1º semestre de 2011 (período de chuva), na área externa e no 2º semestre do ano de 2011 (período de seca), na área interna do Aterro JCB.

As campanhas de eletrorresistividade ocorreram no 1º semestre do ano de 2012 (período de chuva), nos limites da área do Aterro JCB.

Stollberg *et al.* (2011), através do acordo de cooperação técnico científica, denominado ÁGUA DF, firmada com a *Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ* e com a Universidade de Dresden (Alemanha), instalaram 13 poços de monitoramento da qualidade da água subterrânea entre os limites do PNB e do Aterro JCB (**Figura 5.1**).

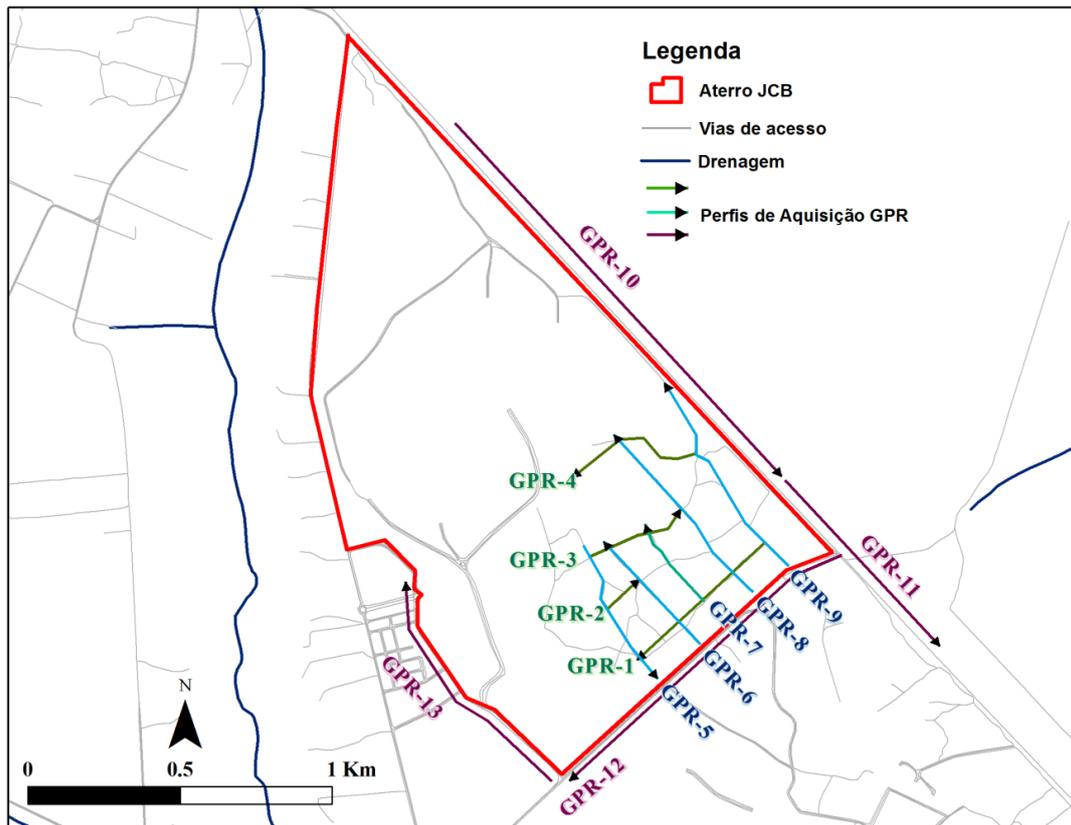


**Figura 5.1** – Fotos evidenciam a instalação de poços de monitoramento da qualidade da água subterrânea nas proximidades do PNB e o Aterro JCB.

### 5.1 – Ground Penetrating Radar (GPR)

As aquisições das seções de GPR foram realizadas na área interna (sobre as antigas cavas de deposição de lixo) e na área externa (limite sul e no limite com o PNB) do JCB, com o objetivo de localizar a pluma de contaminação de choroume.

Os dados de GPR foram adquiridos no modo de afastamento constante (*constant offset*), totalizando 13 perfis nomeados de GPR-1 a GPR-13 (**Figura 5.2**).



**Figura 5.2** – Croqui com a localização e sentido das aquisições dos perfis de GPR na área interna e externa do Aterro JCB.

O equipamento utilizado foi o SIR3000 (fabricado pela *Geophysical Survey Systems – GSSI*), e acoplado a uma antena blindada de 200 MHz (de propriedade do Instituto Nacional de Criminalística – INC/DITEC, Departamento de Polícia Federal, **Figura 5.3**). Os parâmetros de campo utilizados no sistema GPR foram: espaçamento entre os traços de 2,5 cm, frequência de amostragem de 1703 MHz, 1024 amostras por traço, intervalo de amostragem temporal de 0,29 ns e janela temporal de 270 ns.

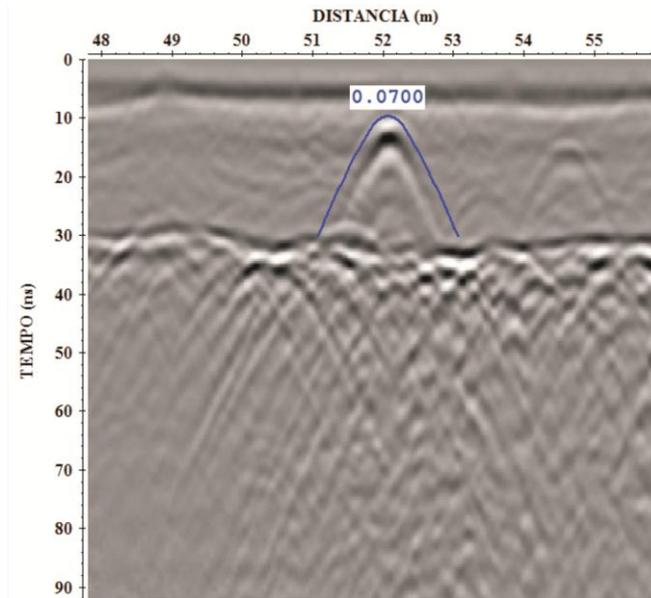
Os dados foram processados no software ReflexW, versão 6.1 (SANDMEIER, 2010). A rotina de processamento consistiu no ajuste do tempo zero, filtro temporal (*dewow* e passa-banda), ganho (*gain function*) e conversão de tempo em profundidade (velocidade constante).

Os mesmos parâmetros de ganho e filtro foram aplicados a todas as seções com o intuito de comparação das amplitudes dos sinais.

A velocidade média de propagação da onda eletromagnética foi determinada pelo método de ajuste hiperbólico, tendo obtido a velocidade de 0,07 m/ns, a qual foi utilizada na conversão dos registros de tempo para profundidade (**Figura 5.4**). Em função do uso de uma janela temporal de 270 ns, foi possível imagear o subsolo até a profundidade de 9,45 metros.



**Figura 5.3** – Fotos evidenciam a aquisição de dados de GPR na área externa e interna do Aterro JCB.



**Figura 5.4** – Parte de uma seção de GPR que evidencia a presença de uma hipérbole que foi utilizada para o ajuste da velocidade hiperbólica da onda eletromagnética na subsuperfície do Aterro JCB.

## 5.2 – Eletrorresistividade

As aquisições das seções de eletrorresistividade foram realizadas nos limites externos do Aterro JCB utilizando-se a técnica de caminhamento elétrico e arranjo dipolo-dipolo, totalizando 15 seções nomeadas de Linhas EL1 a EL15 (**Figura 5.5**).

O protocolo de aquisição de dados com o cabo multieletrodos foi elaborado no programa ELECTRE II, versão 05, da IRIS Instruments. Para configuração de rotinas de aquisição usando-se 54 eletrodos ou 36 eletrodos (**Figura 5.6**). As características das aquisições das seções EL1 a EL12 são apresentados na **Tabela 5.1**.

**Tabela 5.1** – Características do protocolo de aquisição das seções de eletrorresistividade, para obtenção dos dados no Aterro do JCB.

Seções	Quantidade de eletrodos	Espaçamento	Quantidade de pontos	Níveis de investigação
EL1 a EL9 EL11 a EL13	54	10	1784	30
EL10 e EL10A	36	10	765	29
EL14 e EL15	36	05	572	25

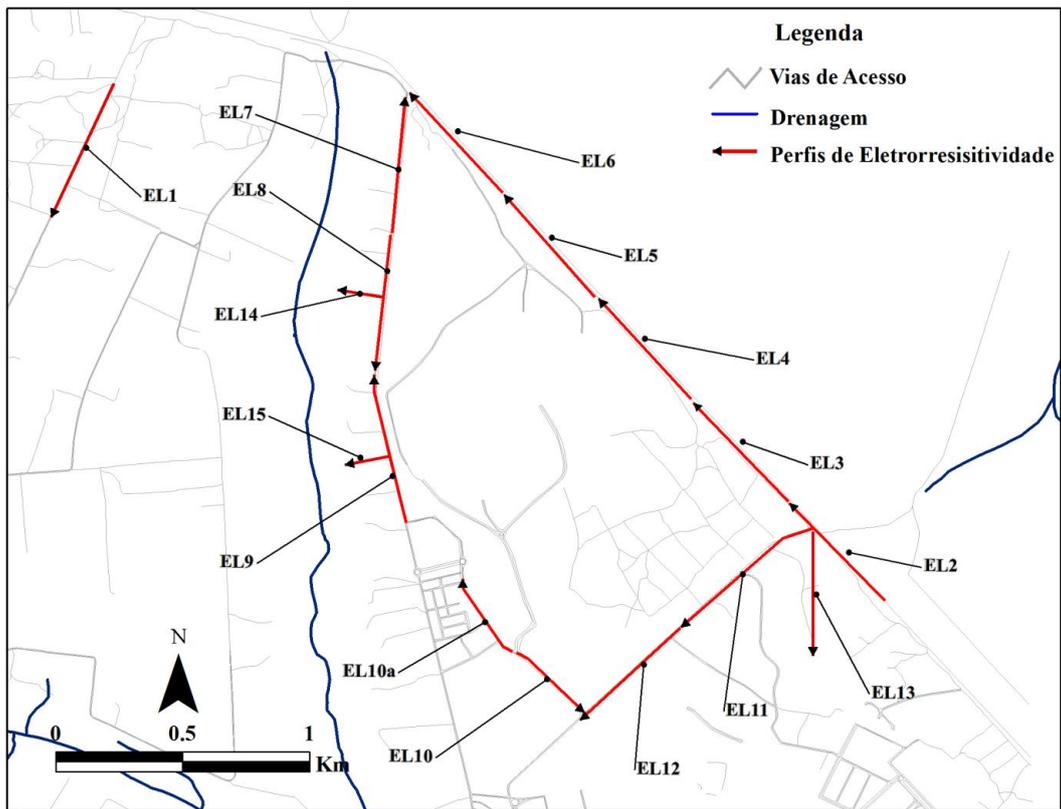


Figura 5.5 – Croqui com a localização e o sentido das aquisições de eletrorresistividade nos limites do Aterro JCB.

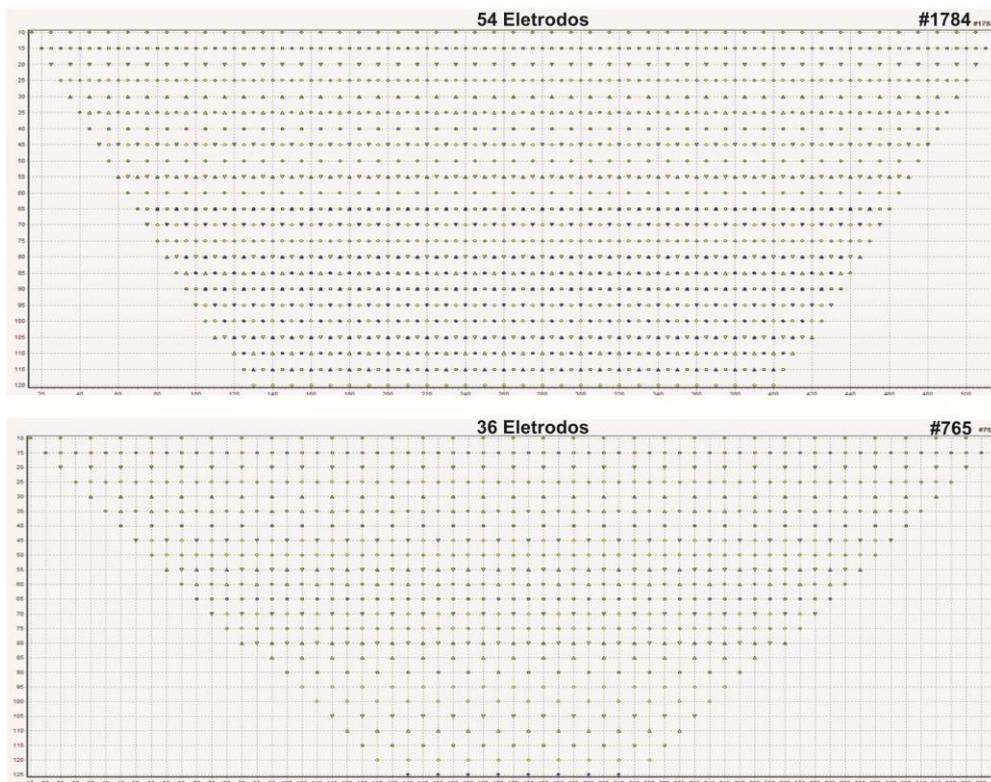


Figura 5.6 – Representação espacial dos pontos investigados com os protocolos de eletrorresistividade preparados para o arranjo dipolo-dipolo com 54 e 36 eletrodos.

O equipamento utilizado foi o eletrorresistímetro multieletródico SYSCAL PRO 72 (fabricado pela empresa francesa *IRIS Instruments*), acoplado a cabos multicanais, com 54 eletrodos de aço inox e 04 conectores de cabos *switch box*, de propriedade do Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA), do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (UnB). Para a alimentação do eletrorresistímetro foram utilizadas baterias automotivas de 12 volts e 45 Amperes (**Figura 5.7**).



**Figuras 5.7** – Fotos evidenciam a aquisição de dados de eletrorresistividade na área externa do Aterro JCB.

A organização, a filtragem e a correção topográfica dos dados de campo foram efetuadas no programa PROSYS II, versão 2 (*IRIS Instruments*). Posteriormente exportaram-se os dados para o formato do programa de modelagem inversa RES2DINV, versão 3.4 (*Geotomo Software*).

A rotina de inversão utilizada foi a de contraste de suavização por mínimos quadrados (SASAKI, 1989), implementada no software. O método de otimização utilizado foi o Gauss-Newton que recalcula as derivadas parciais da matriz jacobiana para todas as iterações. A mo-

delagem das seções de eletrorresistividade 2D foi efetuada até a terceira ou quinta iteração entre os valores de resistividade aparentes medidos e calculados, obtendo-se os valores de 9% a 28% de RMS. Após a terceira e a quinta interação não houve a diminuição significativa dos erros.

## CAPÍTULO 6

### 6 RESULTADOS

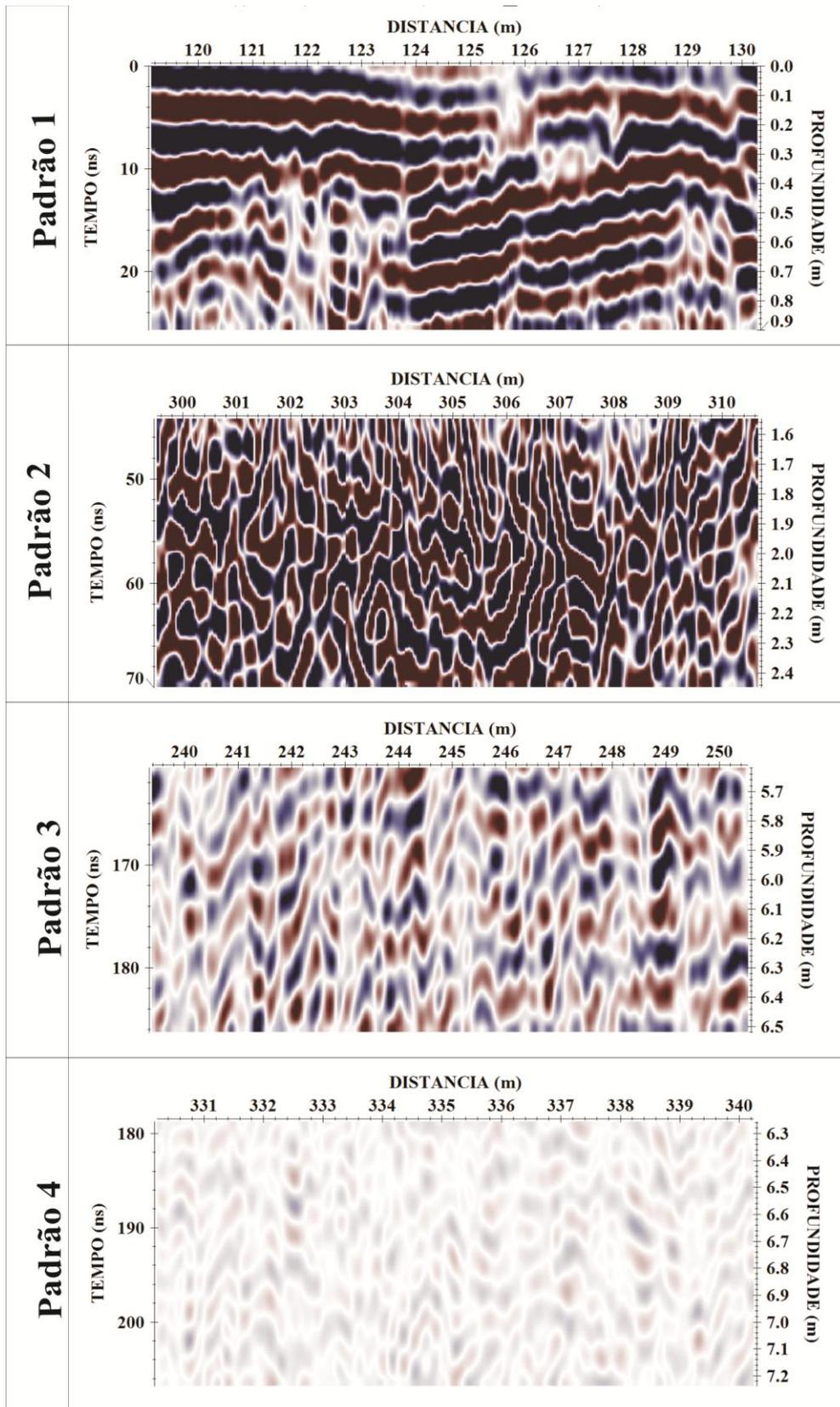
Neste capítulo serão apresentados os resultados geofísicos com as interpretações concomitantemente. Em função da constante movimentação de veículos de transporte de resíduos dentro do aterro do JCB, não houve tempo disponível para executar investigações geofísicas no local. Deste modo toda a interpretação de dados foi efetuada apenas na parte interna sul e na parte externa da área.

#### 6.1 – Ground Penetrating Radar (GPR)

Os resultados de GPR possibilitaram identificar quatro padrões distintos de refletores descritos a seguir:

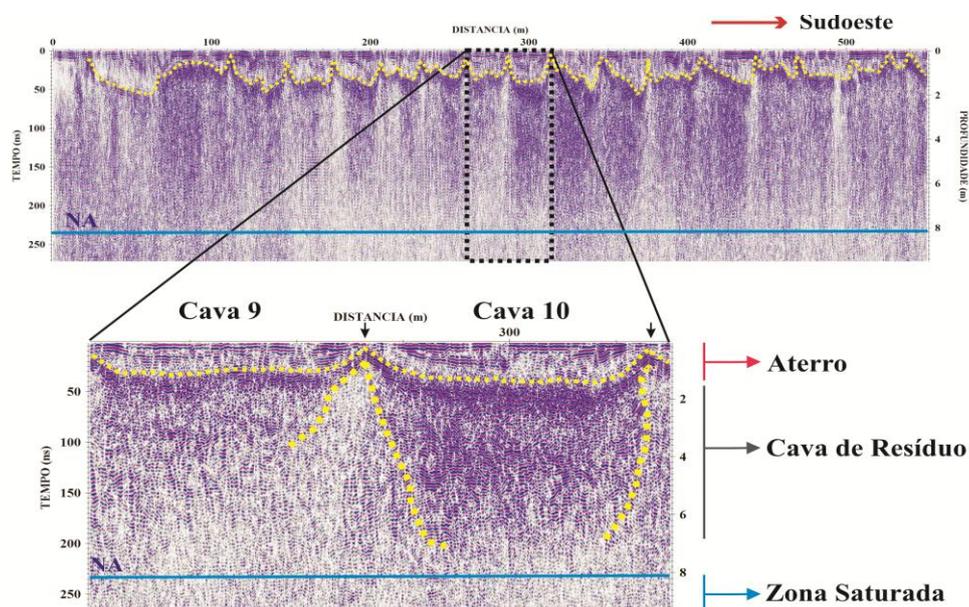
- a) Padrão 1 (PR1) – refletores contínuos horizontalizados e inclinados, e com média amplitude e pequenas difrações. Relacionado à camada de argila utilizada para a cobertura dos resíduos sólidos, possui espessura média de 1,0 metro.
- b) Padrão 2 (PR2) – refletores descontínuos e de alta amplitude. Relacionado à presença de resíduos sólidos.
- c) Padrão 3 (PR3) – refletores descontínuos e de média amplitude. Relacionada à estrutura do solo, com atenuação do sinal EM.
- d) Padrão 4 (PR4) – forte atenuação do sinal EM. Relacionado ao solo contaminado pela percolação do chorume.

A **Figura 6.1** apresenta os padrões de reflexão relacionados às interfaces da subsuperfície da área do Aterro JCB.



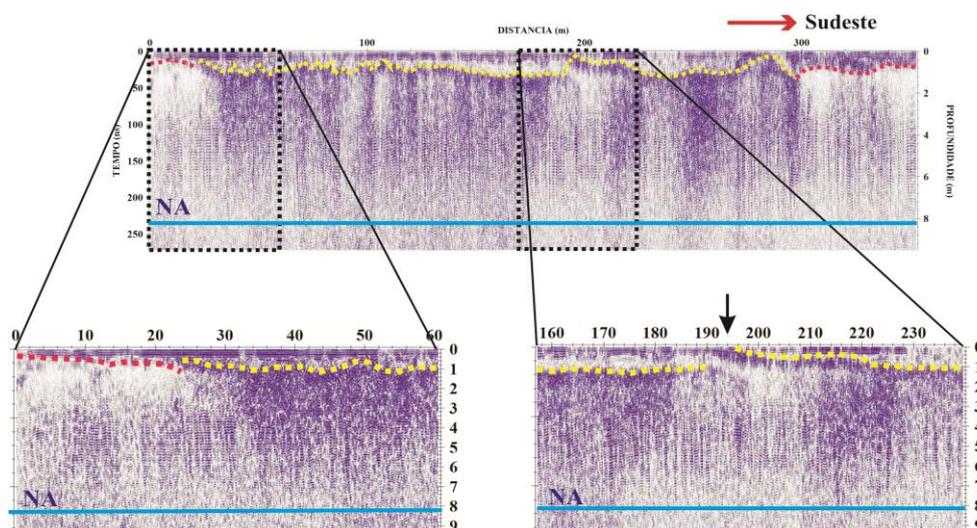
**Figura 6.1** – Partes dos perfis de GPR mostrando os padrões característicos das estruturas presentes na subsuperfície do Aterro JCB. PR1 (Cobertura de solo argiloso), PR2 (Resíduos Sólidos), PR3 (Resíduos Sólidos e solo com percolação do chorume) e PR4 (solo com percolação do chorume).

Os perfis GPR1 a GPR 4, coletados na área interna do Aterro JCB, apresentam o PR2 em toda sua extensão sendo possível identificar os topos e os limites laterais das antigas cavas de resíduos (linha pontilhada amarela) com 30 metros de largura (**Figura 6.2**).



**Figura 6.2** – Perfil de GPR, apresentando os limites da cava de resíduos sólidos.

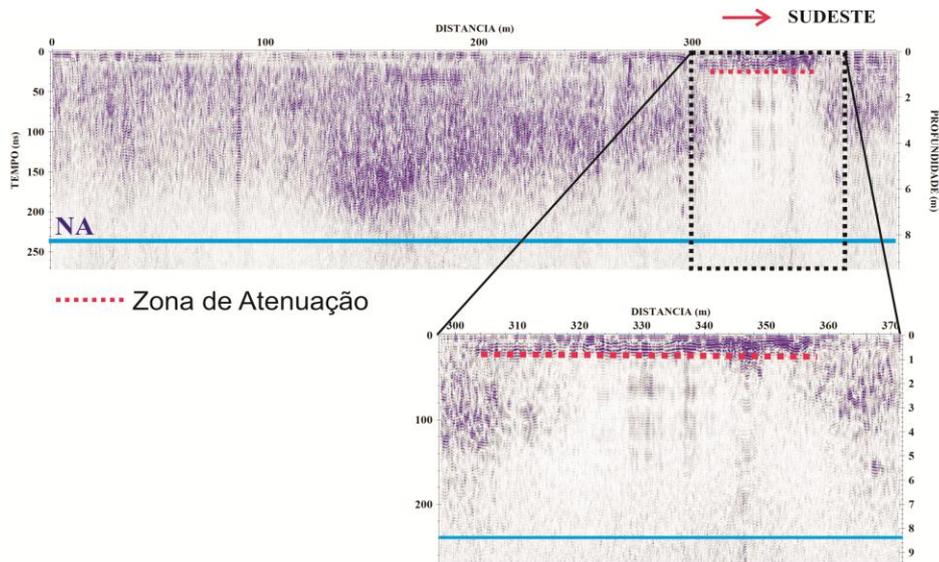
Nos perfis GPR 5 a GPR 9, coletados na área interna do Aterro JCB, o PR2 é identificado com sendo o comprimento das cavas de resíduos, tendo 100 metros de extensão (**Figura 6.3**).



**Figura 6.3** – Perfil de GPR com a divisão entre os prolongamentos das cavas, na posição de 195 metros de extensão.

Os perfis GPR 10 a GPR 13, foram realizados nos limites externos a sudeste e sudoeste do Aterro JCB, e não apresentam o PR2 associado à presença de resíduos sólidos.

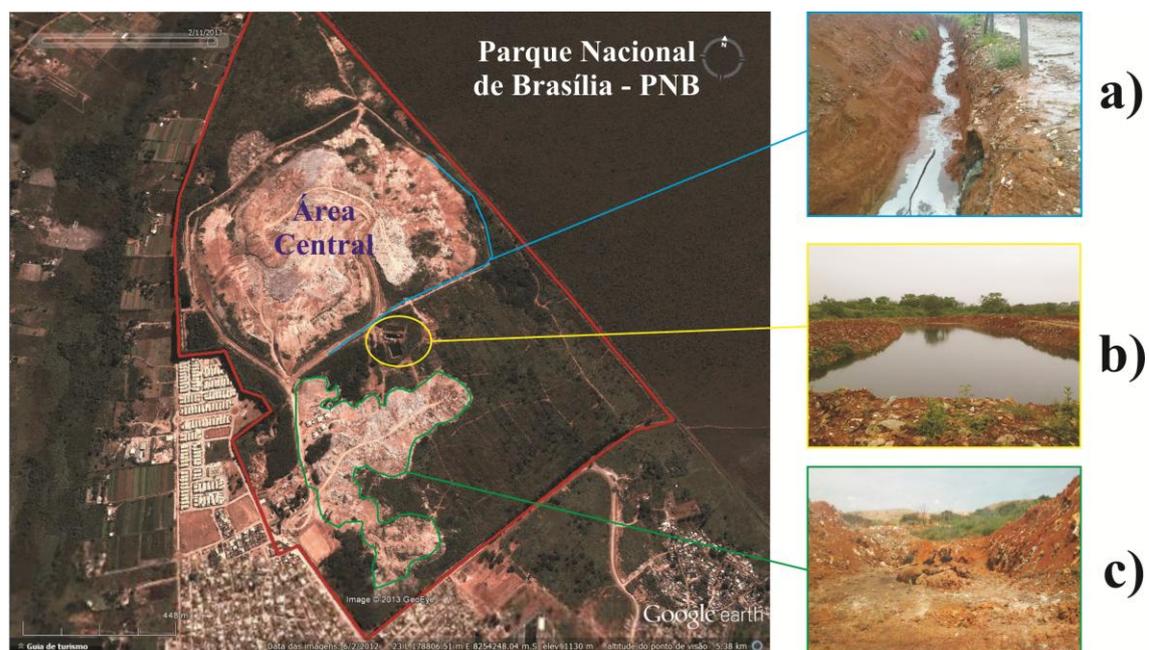
Em todos os perfis de GPR o PR4 (linha pontilhada vermelha) é presente nas extremidades, ocorrendo a partir de 1,0 metro de profundidade e ocorrendo nas profundidades de 4 a 6 metros até o final do sinal EM (**Figura 6.4**).



**Figura 6.4** – Perfil de GPR com a presença de atenuação do sinal (linha pontilhada vermelha) na profundidade de 2 metros.

As zonas de atenuação estão relacionadas à proximidade das obras de contenção do chorume como: trincheiras de drenagem pluvial (**Figura 6.5a**), lagoas de contenção (**Figura 6.5b**), e devido ao despejo de resíduos de abatedouros, estações de tratamento de esgoto (ETE) e descarte de animais mortos a céu aberto (**Figura 6.5c**).

A **Figura 6.5** mostra as fontes de atenuação do sinal EM, dentro da área do Aterro JCB.



**Figura 6.5** – Imagem do Google Earth do ano de 2013. (a) trincheira para drenagem pluvial; (b) lagoas de contenção e (c) área de despejo de resíduos industriais e de animais mortos.

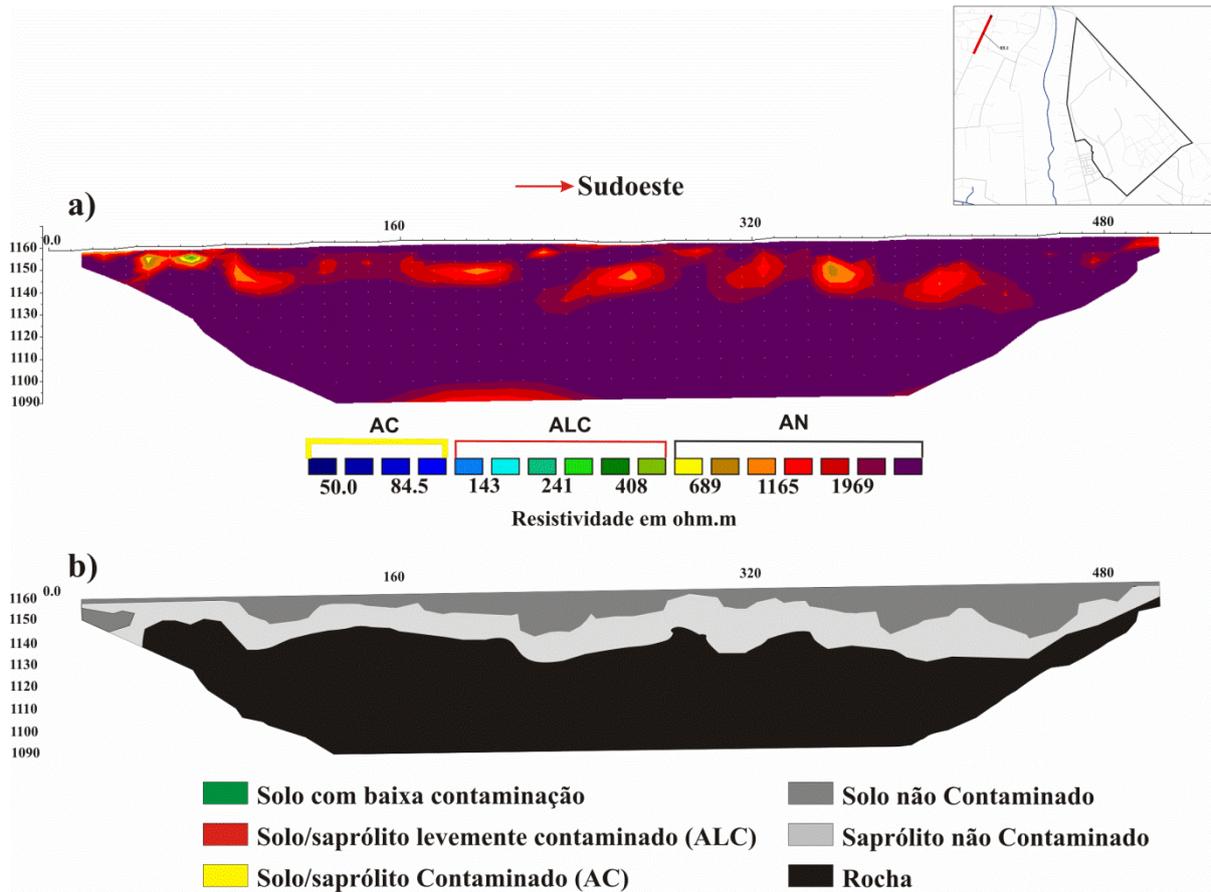
Os perfis de GPR de todas as linhas com as interpretações constam no Anexo I.

## 6.2 Eletorresistividade

Com o objetivo de determinar os padrões elétricos para as áreas não contaminadas (*background* - AN), áreas levemente contaminadas (ALC) e contaminadas (AC), foram realizadas seções de eletorresistividade em locais distantes do aterro, e em locais onde existem informações diretas de contaminação da água subterrânea.

A seção de *background* (sem influência de contaminação) foi realizada a uma distância de 1000 metros da área do aterro JCB (**Figura 6.6**). Esta seção obteve um erro RMS de 18,6% após três iterações e apresenta três camadas geoeletricas: (a) a primeira camada ocorre desde a superfície até a profundidade média de 10 metros, com resistividade elétrica acima de 2000 ohm.m, interpretada como um solo areno-argiloso com presença de concreções lateríticas e quartzitos (zona não saturada); (b) a segunda camada possui valores de resistividade elétrica entre 700 a 2000 ohm.m, até a profundidade de 30 metros, interpretada como um saprólito com presença de água; e (c) a camada geoeletrica mais profunda mostra valores de resistividade superiores a 2000 ohm.m, interpretada como rochas do Grupo Paranoá (possíveis ardósias – Unidade A). Os valores de resistividade entre 700 a 2000 ohm.m foram relacionados aos valores de *background* da análise de água realizada por Campos (2007), onde a condutividade elétrica de 2,6  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , teor de amônia igual a 0 mg/l e valor de pH de 4,9, são interpretados como uma área não contaminada (AN).

As seções de eletorresistividade executadas nos limites do aterro JCB foram calibradas, até a profundidade máxima de 15 metros, com informações de poços de monitoramento instalados por Stollberg *et al.* (2011) para o monitoramento dos parâmetros físico-químicos da água (**Tabela 6.1**). Através da correlação entre os valores de resistividade e os parâmetros físico-químicos da água coletada nos furos de sondagem, estabeleceram-se padrões para as áreas contaminadas (AC) e áreas levemente contaminadas (ALC).

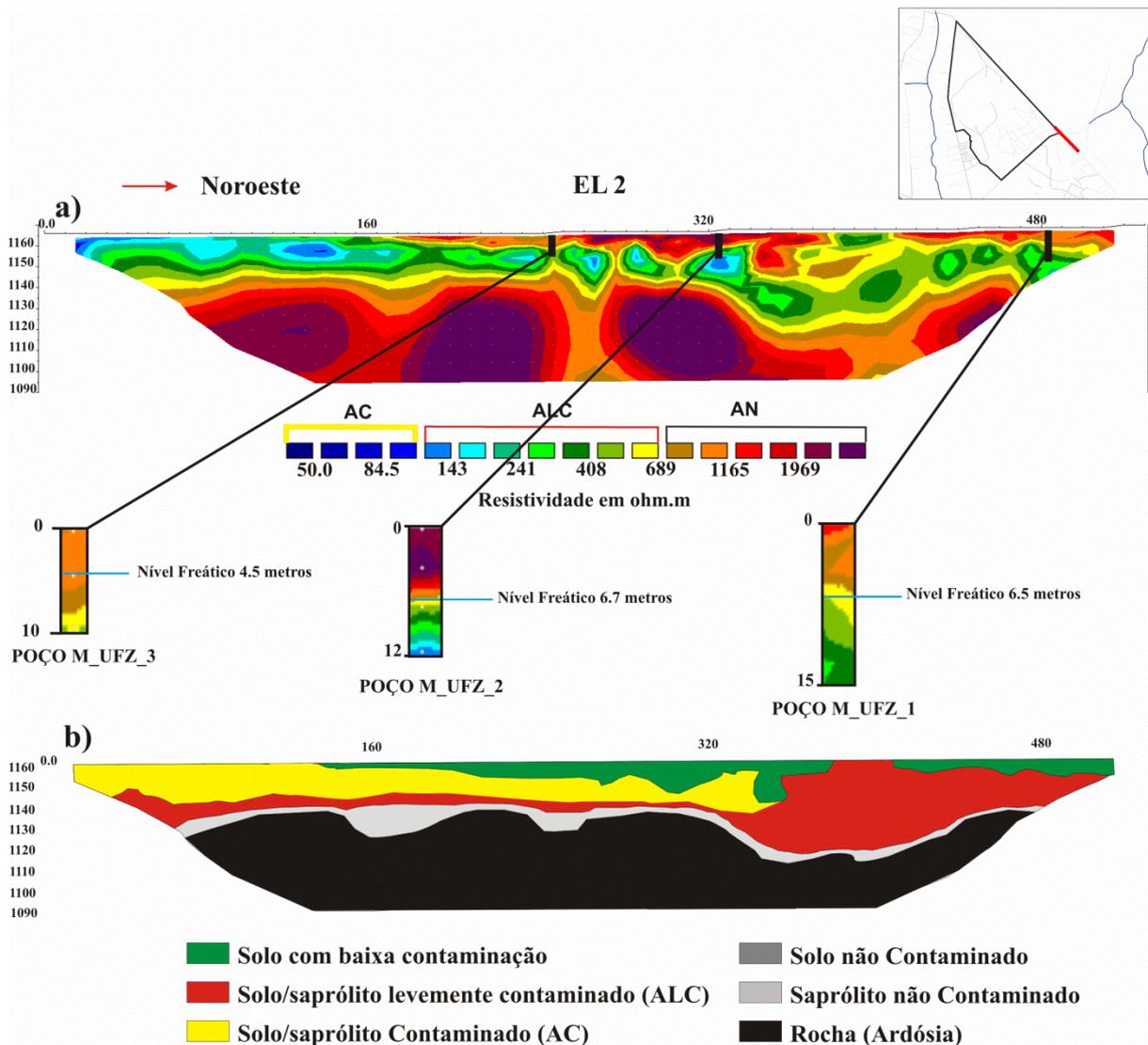


**Figura 6.6** – Seção EL1 (background). (a) modelo de resistividade elétrica obtido após a inversão. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.

**Tabela 6.1** – Valores físico-químicos das análises de água coletadas dos furos de sondagem nas proximidades do aterro JCB, período de estiagem (STOLLBERG *et al.*, 2011).

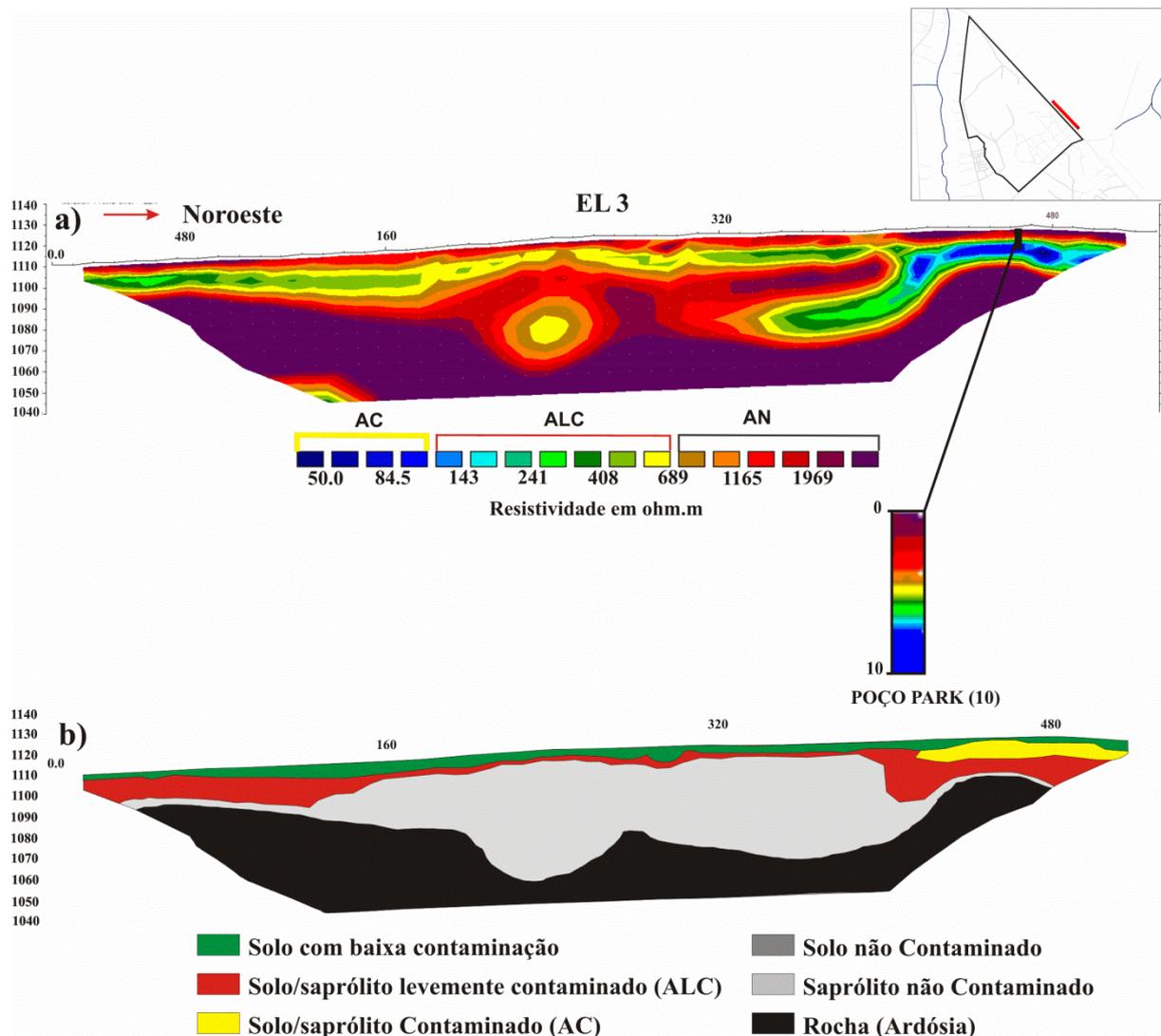
Furos de sondagem	Profundidade (m)	N. Freático (m)	pH	Temperatura (°C)	Condutividade (µS/cm)	Amônia (mg/L)
M_UFZ_7	15	8,2	5,8	24,7	994	60
M_UFZ_6	11	9,8	5,3	26,3	316	20
M_UFZ_9	12	7,1	5,3	24,1	153,2	9
M_UFZ_4	10	2	5,5	24,9	61,6	9
M_UFZ_3	10	4,5	5,3	24,7	21	1
M_UFZ_2	12	6,7	5,7	26,7	44,6	0
M_UFZ_1	15	6,5	5,7	26,8	65	9
Park (10)	10	9,2	6,9	24,7	334	2,73
Park (11)	15	9,5	6,3	25,5	130	0,15
Park (12)	10	8,7	5,6	24	226	0,07

A seção EL2 apresenta um erro RMS de 30% com três iterações (**Figura 6.7**). Os valores de resistividade elétrica abaixo de 100 ohm.m coincidem com os locais onde a água tem uma condutividade de 44,6  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , teores de amônia <9 mg/l e valores de pH entre 5,3 e 5,7; o que foi interpretado como uma área contaminada (AC). Na parte mais rasa da seção os valores de resistividade variam entre 200 e 900 ohm.m, e são interpretados como um solo com baixo grau de contaminação; esta interpretação é adotada devido a presença constante de resíduos sólidos e restos de animais presentes em todo os limites do aterro JCB. Os valores de resistividade entre 100 a 700 ohm.m, são interpretados como área levemente contaminada (ALC). Na profundidade entre 30 a 70 metros, os valores de resistividade de 700 a 2000 ohm.m, são interpretados como saprólito saturado. Os valores acima de 2000 ohm.m são interpretados como rochas do Grupo Paranoá (possíveis ardósias – Unidade A).



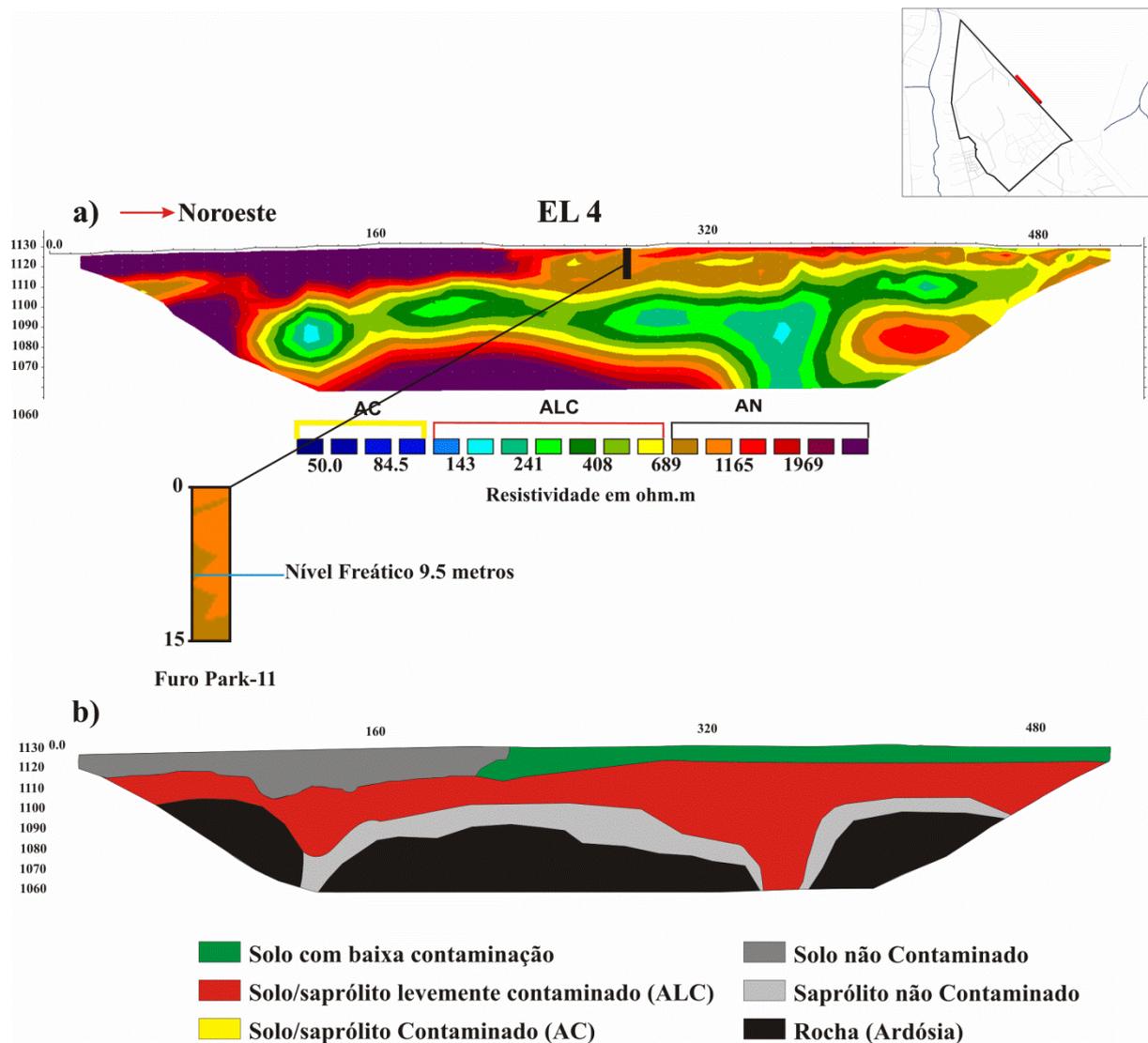
**Figura 6.7** – Seção EL2. (a) modelo de resistividade obtido após inversão e os furos de sondagem de análise de água. (b) modelo geológico/geo-físico elaborado.

A **Figura 6.8** mostra a seção EL3, localizada entre o PNB e o aterro JCB, com o sentido da aquisição para noroeste e o erro RMS de 22,7% com quatro iterações. A seção possui um furo de sondagem (PARK 10), na posição de 440 metros, da seção, e com 10 metros de profundidade. Os valores de condutividade de 334  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , teor de amônia 2,7 mg/L e valor de  $\text{pH} < 7$ , coincidem com os locais onde os valores de resistividade elétrica abaixo de 100 ohm.m, interpretados como AC. Entre as cotas de 1100 a 1110 metros é observado em toda a extensão da seção os valores de resistividade entre 100 a 700 ohm.m, sendo interpretado como ALC. Na posição de 330m a 400m da seção e posicionado na cota de 1090 metros, é observado uma cama com resistividade acima de 2000 ohm.m, sendo interpretado como bloco laterítico. Os valores de resistividade subsequentes seguem a interpretação do *background*.



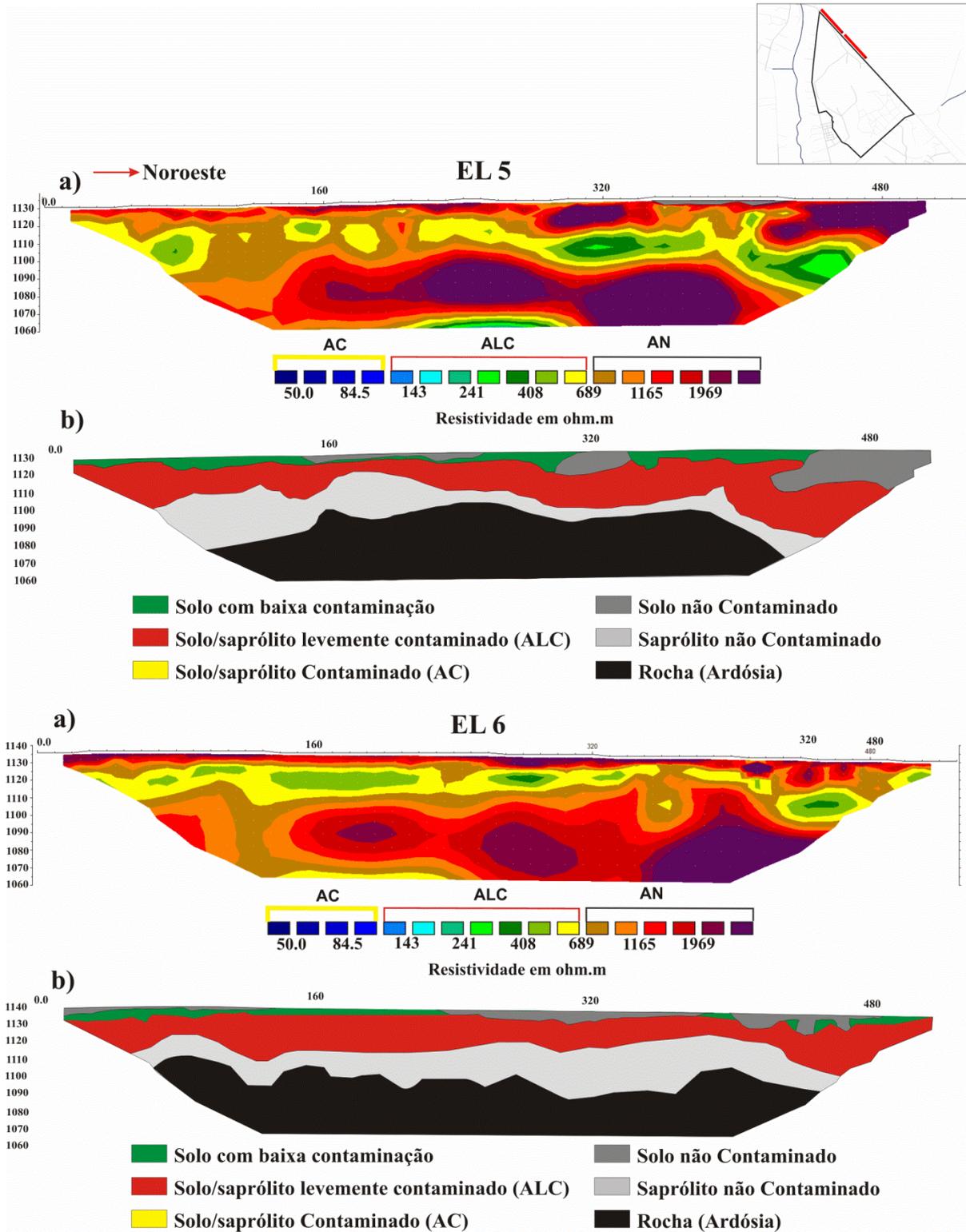
**Figura 6.8** – Seção EL3. (a) modelo de resistividade obtido após inversão e o poço de análise de água. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.

A seção EL4 (**Figura 6.9**) apresenta os valores de erro RMS de 28%, com três iterações. Nesta seção existe um furo de sondagem (PARK 11) com profundidade de 15 metros e na posição de 280 metros. As informações físico-químicas da água mostram valores de condutividade de 130  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , teor de amônia de 0,15 mg/L e pH igual a 6,3. Estes parâmetros coincidem com as áreas onde o valor de resistividade elétrica varia entre 100 a 700 ohm.m, interpretadas como ALC. É observada nas posições de 100 e 450 metros, na cota de 1060 metros de profundidade a presença de fraturas com valores de resistividade entre 100 a 150 ohm.m; sendo relacionado a AC.



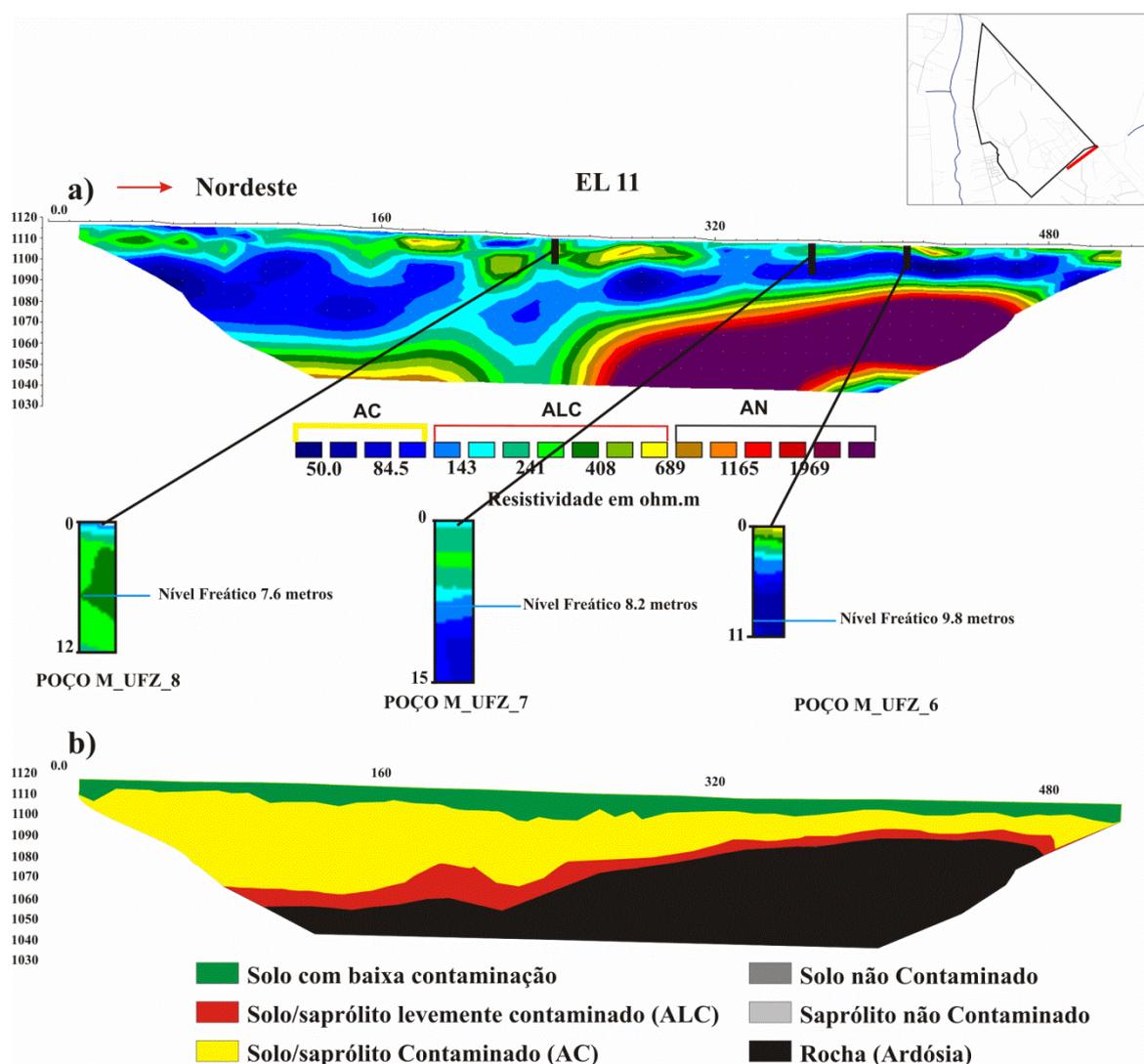
**Figura 6.9** – Seções EL4. (a) modelo de resistividade obtido após inversão com um poço de monitoramento (PARK 11). (b) modelo geológico/geofísico elaborado.

A **Figura 6.10** apresenta as seções EL5 e EL6, com erro RMS em 28% e 19%, respectivamente com três iterações. Nestas seções observar-se valores de resistividade elétrica entre 200 e 700 ohm.m, sendo relacionado a ALC, nas cotas de 130 a 110 metros.



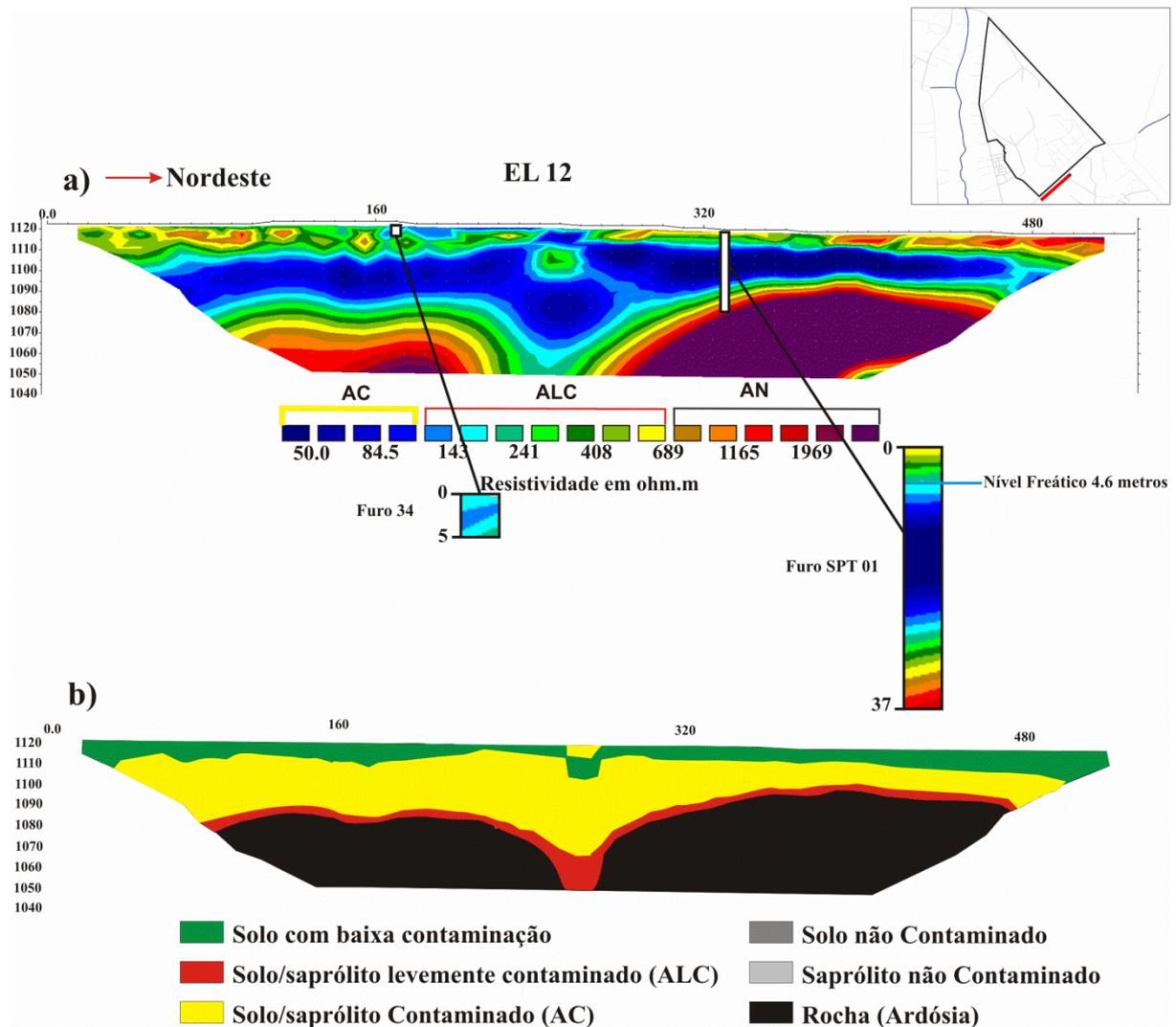
**Figura 6.10** – Seções EL5 e EL6. (a) modelo de resistividade obtido após inversão. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.

A **Figura 6.12** mostra a seção EL 11 obtida após a quarta iteração, com erro RMS de 9,1%. Localiza-se entre o limite sudeste do aterro JCB e com o assentamento urbano irregular, ambos próximos ao limite do PNB. No local de realização da seção, existem três furos de sondagem coincidentes com as posições 244, 364 e 413 metros, com profundidades de 12, 15 e 11 metros, respectivamente nomeados como M\_UFZ\_8, M\_UFZ\_7 e M\_UFZ\_6 (STOLLBERG *et. al*, 2011). Os parâmetros da qualidade da água indicam valores de condutividade entre 316 a 994  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , teores de amônia  $>30$  mg/L e pH entre 5,3 a 7,0. Estas concentrações coincidem com os menores valores de resistividade elétrica encontrados na seção  $<100$  ohm.m, interpretado como AC. Os valores de resistividade elétrica entre 100 a 700 ohm.m foram interpretados como ALC, estando posicionado abaixo da AC. Entre 200 a 700 ohm.m de resistividade elétrica, localizados na superfície foram interpretados como solo com baixa contaminação, devido a diluição pelos períodos de precipitação das chuvas. A acima dos valores de resistividade de 2000 ohm.m foi considerado como embasamento rochoso.

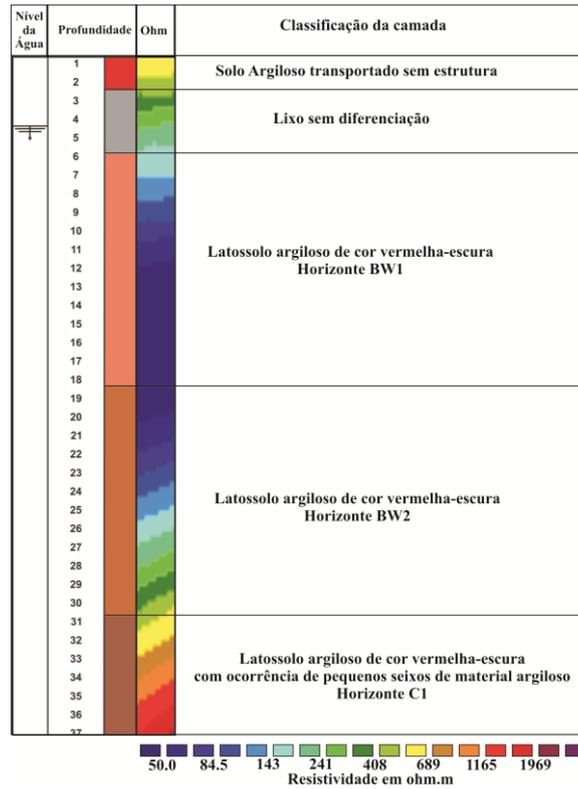


**Figura 6.11** – Seção EL11. (a) modelo de resistividade obtido após inversão e a localização dos furos de sondagem. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.

A **Figura 6.12** mostra a seção EL12, localizada entre o limite sudeste do aterro JCB e a cidade estrutural, após a quinta iteração (erro RMS de 9,6%). Nesta área existem informações geológicas de dois furos de sondagem realizados por Campos (2006). Em ambos os furos existe uma cobertura de resíduos sólidos até a profundidade de 6 metros. Nestas posições ocorre um horizonte geoeletrico com resistividade elétrica variando entre 50 e 700 ohm.m (**Figura 6.13**). Os valores de resistividade abaixo de 100 ohm.m são interpretados como AC, ao passo que os valores de resistividade entre 100 a 700 ohm.m são interpretados como ALC.

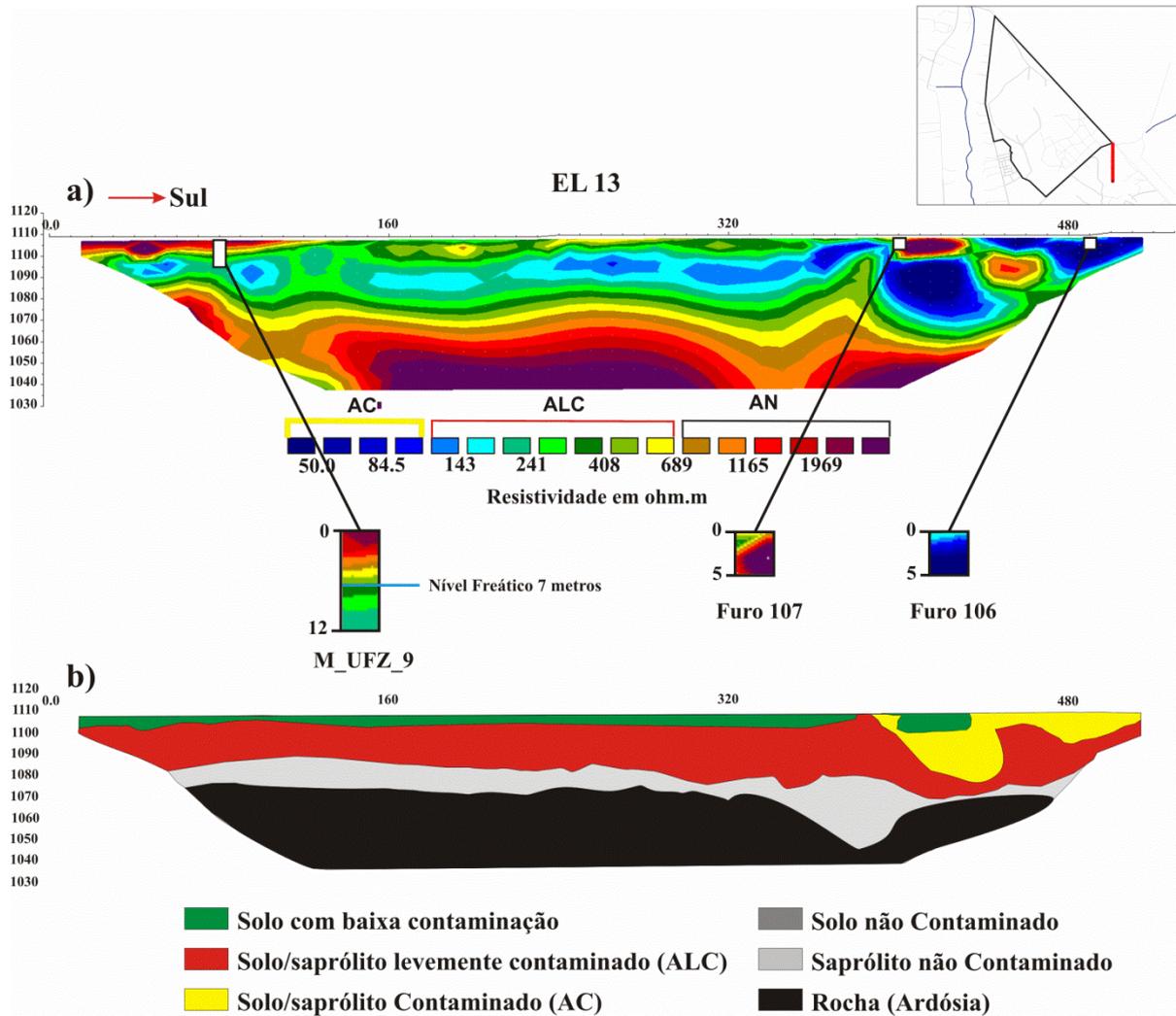


**Figura 6.12** – Seção EL12. (a) modelo de resistividade obtido após inversão e a localização dos furos de sondagem SPT (Furo 01) e a Trado mecânica (Furo 34), Campos (2006). (b) modelo geológico/geofísico elaborado.



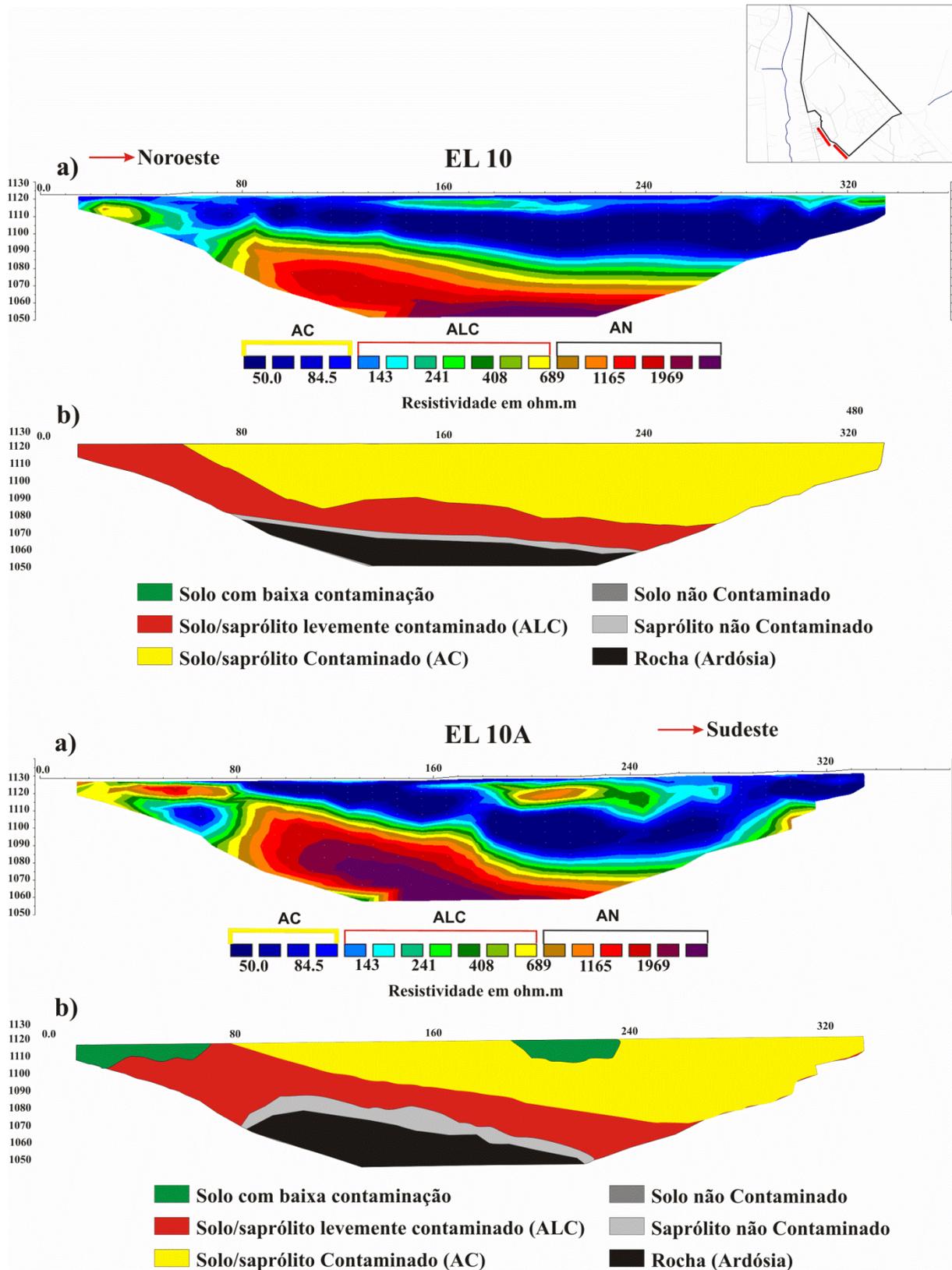
**Figura 6.13** – Profundidade e classificação das camadas pelo furo de sondagem SPT 01 (CAMPOS, 2006) e sua correlação ao gradiente de resistividade elétrica da seção EL12.

A **Figura 6.14** mostra a seção EL13 com um erro RMS de 25% após três iterações. Nesta seção existem informações sobre três furos de sondagem realizados por Stollberg *et al.* (2011) e por Campos, (2006). O poço de monitoramento executado na posição de 80 metros da seção (M\_UFZ\_9), mostra um valor de condutividade de 153  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , teor de amônia de 9 mg/l e pH 5,3; que foi associado aos valores de resistividade elétrica abaixo de 100 ohm.m (AC). O segundo furo de sondagem (Furo 107) encontrou solo argiloso com resíduos sólidos (restos de construção civil) durante sua perfuração, relacionado com os valores de resistividade elétrica entre 1000 a 2000 ohm.m. O Furo 106, localizado na posição de 340 metros tem características de AC uma vez que os valores de resistividade estão próximos de 100 ohm.m. Campos (2006) constatou nesta área a presença de resíduos sólidos (material orgânico) enterrado até 5 metros de profundidade.



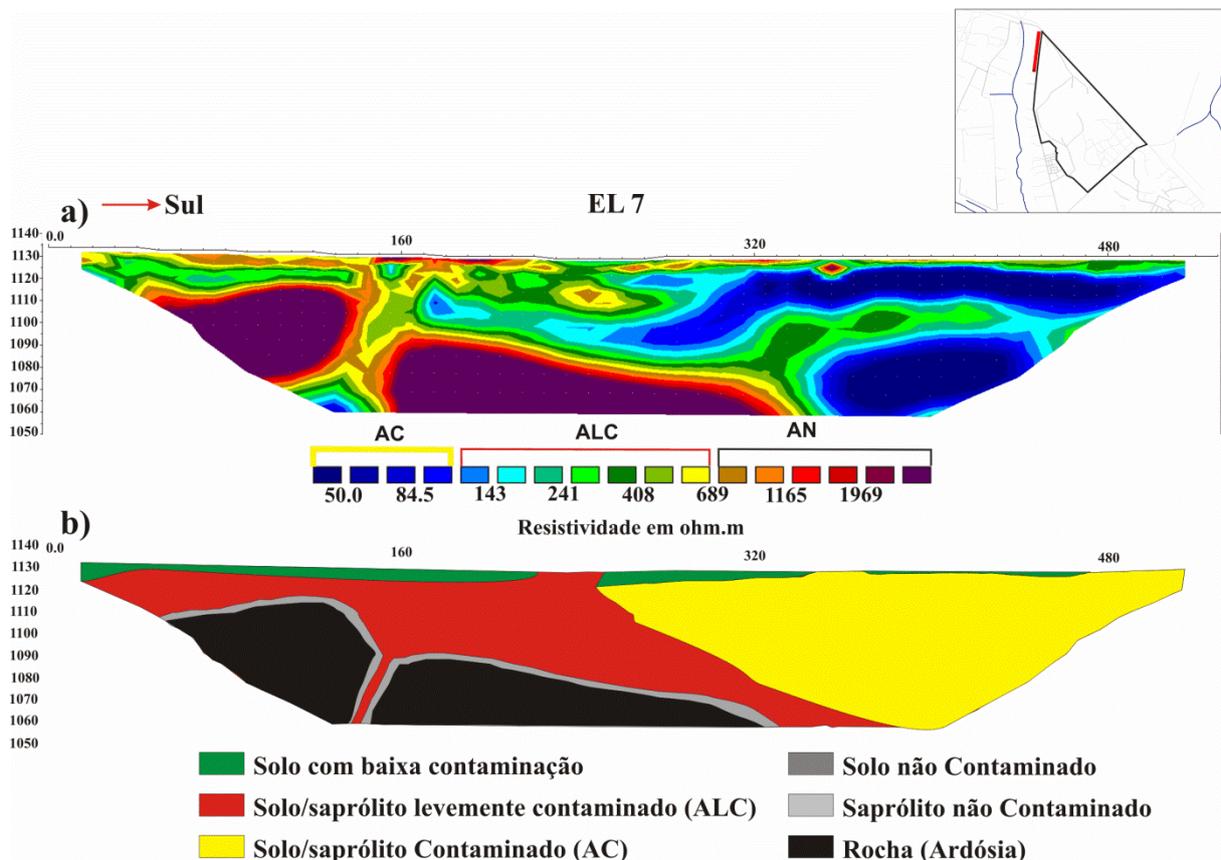
**Figura 6.14**– Seção EL13. (a) modelo de resistividade obtido após inversão e a localização dos furos de sondagem. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.

A **Figura 6.15**, mostra as duas seções EL10 e EL10A, adquiridas entre o limite sudoeste do aterro JCB e a Cidade Estrutural. Em função do trânsito de caminhões o perfil foi segmentado em duas seções. Os erros RMS são de 17% e 21%, respectivamente após quatro iterações. As seções EL10 e EL10A apresentam valores de resistividade abaixo de 100 ohm.m, que ocupa toda a extensão da seção geoeletrica, alcançando uma profundidade de 30 metros, interpretada como AC.



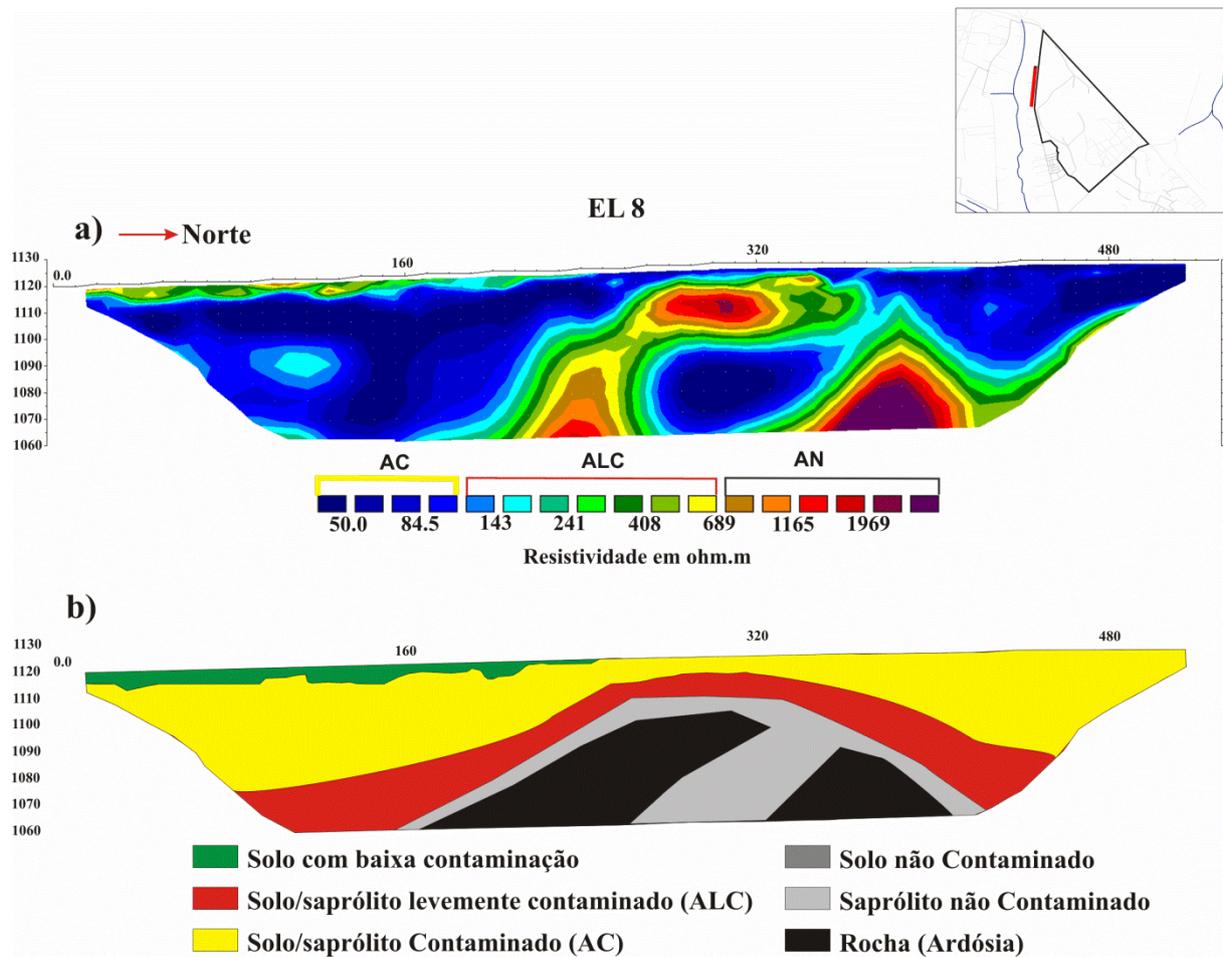
**Figura 6.15** – Seções EL10 e EL10A. (a) modelo de resistividade obtido após inversão. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.

A seção EL7 (**Figura 6.16**), localizada no limite inicial do aterro JCB a noroeste, obteve um erro RMS de 22% após três iterações. Nesta seção notam-se cinco horizontes geoeletricos: no mais superficial os valores de resistividade variam entre 700 a 2000 ohm.m, interpretado como solo com baixo grau de contaminação; o segundo horizonte ocorre desde a cota de 1130 a 1100 metros ao longo de toda a seção, mostra valores de 200 a 700 ohm.m, interpretado como ALC; o terceiro horizonte geoeletrico localiza-se de 280 a 490 metros ao longo da seção, com os menores valores de resistividade elétrica (<100 ohm.m), interpretado como AC; o quarto pacote geoeletrico mostra resistividade entre 700 a 2000 ohm.m, ocorre muito próximo à zona ALC, interpretado como saprólito saturado; o último horizonte geoeletrico ocorre na maior profundidade da seção, possui resistividade acima de 2000 ohm.m, e interpretado como o embasamento rochoso. Além destes horizontes, na posição de 150 metros, nota-se uma anomalia condutiva (100 a 700 ohm.m) verticalizada, interpretada como uma possível zona de cisalhamento.



**Figura 6.16** – Seção EL7. (a) modelo de resistividade obtido após inversão. (b) modelo geológico/geo-físico elaborado.

A **Figura 6.18** apresenta a seção EL8, com erro RMS de 12% em quatro iterações. A seção mostra uma zona condutiva ( $<100$  ohm.m) em toda extensão da seção, com profundidade média de 40 metros, presente quase que 80 % da área da seção geoeletrica, considerado como área contaminada (AC). Na posição entre 270 a 360 metros, ocorre um perfil de resistividade entre 700 a 2000 ohm.m; interpretado como nível laterítico. Observa-se que a área contaminada ocupa a maior parte no início da seção, isto ocorre devido à proximidade da área central do aterro que atualmente está em uso.



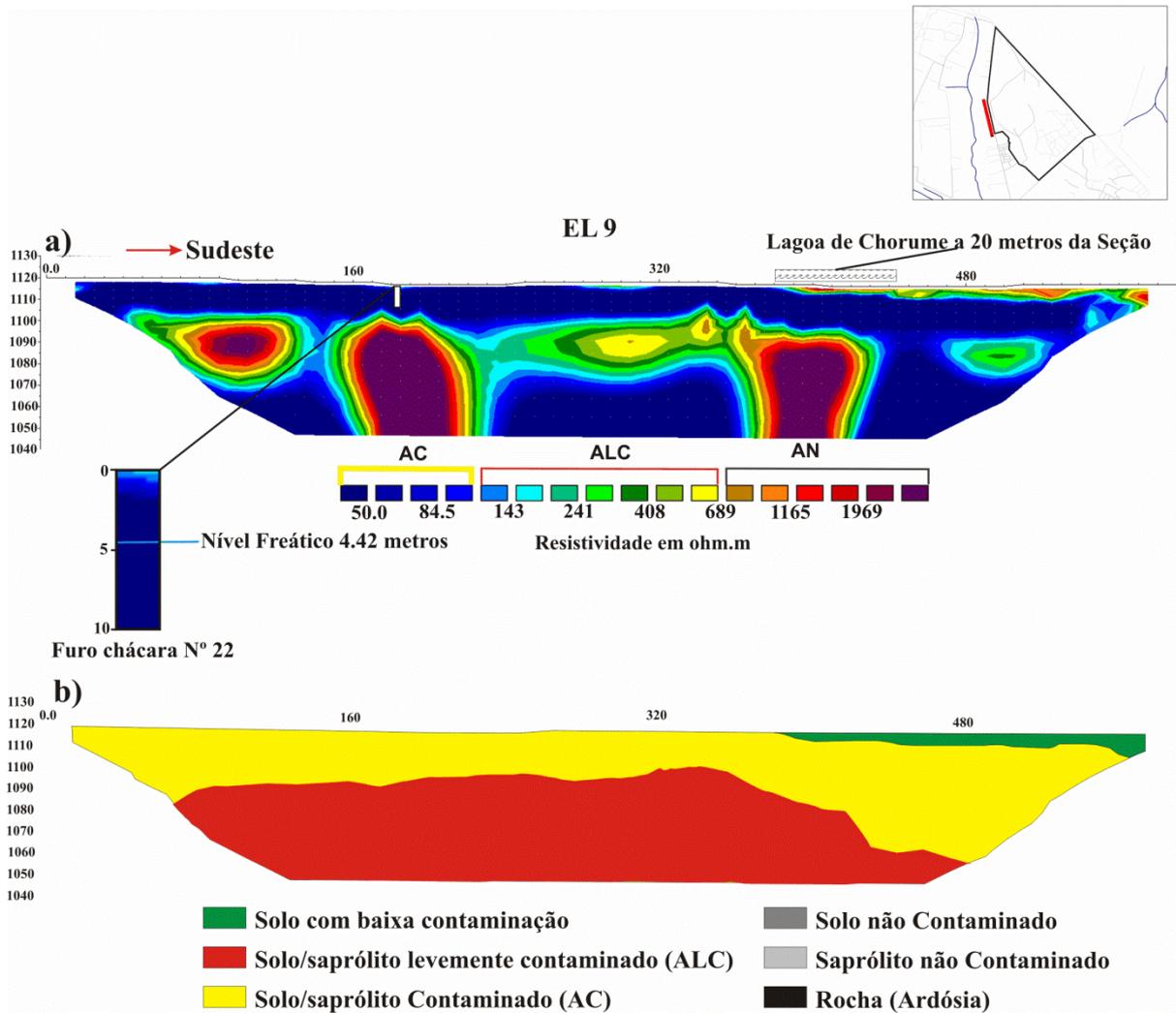
**Figura 6.17** – Seção EL8. (a) modelo de resistividade obtido após inversão. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.

A **Figura 6.18** mostra a seção EL9, com erro RMS de 18% após quatro iterações. A seção mostra uma extensa zona de baixa resistividade (<100 ohm.m). Na cota de 1100 metros é observado a presença de um horizonte com resistividade entre 100 a 2000 ohm.m; interpretado como a ocorrência de nível laterítico levemente contaminado (ALC). A seção apresenta um furo de sondagem (Chácara nº 22), realizado por Pereira *et al.* (1997), onde o valor de amônia não superou 5 mg/L. Stollberg *et al.* (2011) durante suas aquisições encontrou este poço de sondagem sem água, isto devido ao período de estiagem. Uma nova coleta de água foi realizada durante os períodos de chuva (dezembro de 2012, **Tabela 6.2**), e os resultados confirmaram uma condutividade da água de 1370 µS/cm, teor de amônia de 70 mg/L e pH 7, corroborando com a interpretação de uma área contaminada.

**Tabela 6.2** - Valores físico-químicos das análises de água coletadas dos furos de sondagem nas proximidades do aterro JCB, período de chuva, ano 2012.

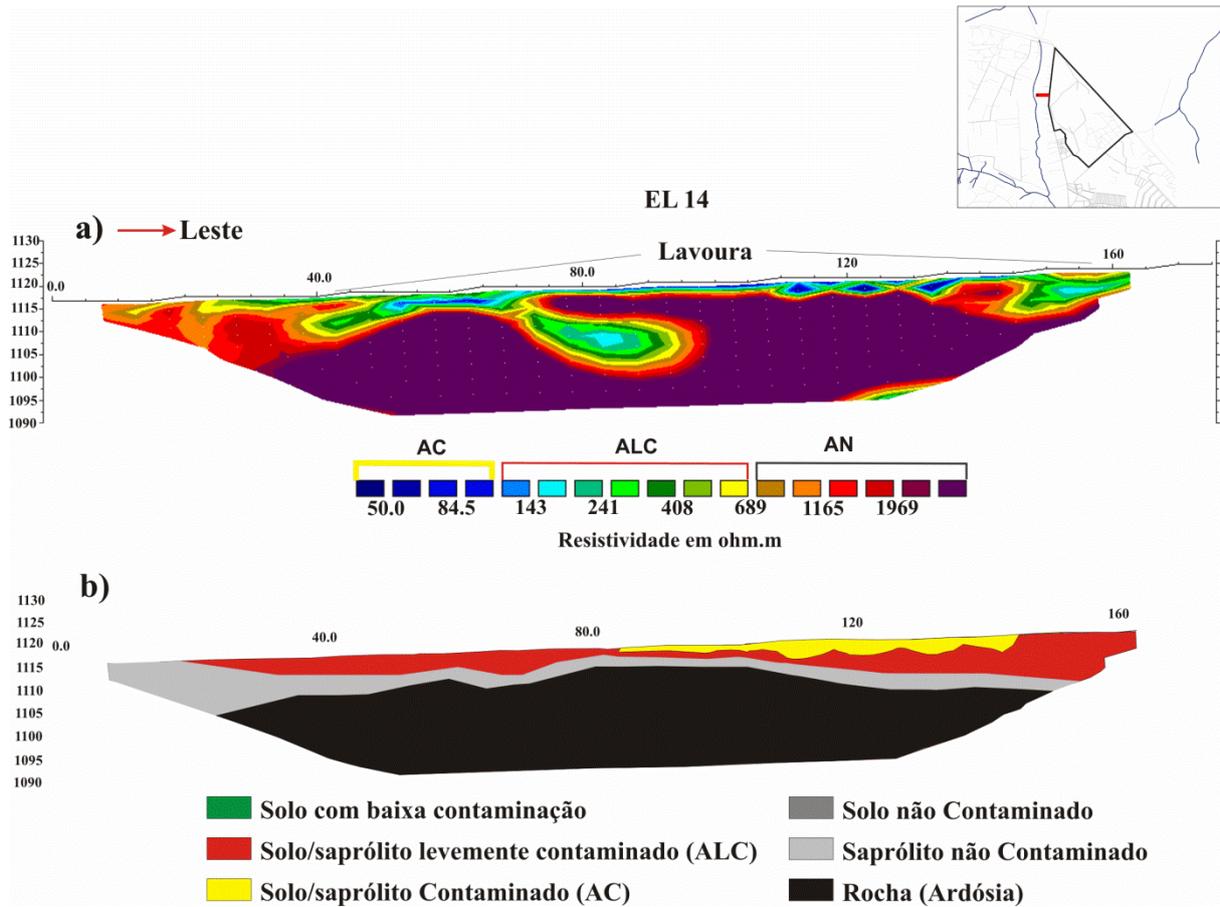
Nome	N. Freático (m)	pH	Temperatura (°C)	Condutividade (µS/cm)	Amônia (mg/L)
M_UFZ_8	-	-	-	-	-
M_UFZ_7	9,27	5,91	25,8	961	63,5
M_UFZ_6	-	-	-	-	-
M_UFZ_9	9,3	5	25,5	141,7	2,49
M_UFZ_4	2,23	6,57	25,2	96,2	0,09
M_UFZ_3	-	-	-	-	-
M_UFZ_2	5,7	6,4	25,6	119	2,45
M_UFZ_1 *	<b>7,2</b>	<b>6,4</b>	<b>29,7</b>	<b>757</b>	<b>107</b>
Park (10)	-	-	-	-	-
Park (11)	-	-	-	-	-
Park (12)	-	-	-	-	-
Chácara N°22 Poço residencial	1,52	5,43	23,1	439	0
Chácara. N°22 Furo de sondagem	4,42	6,93	26,3	1370	70

\*poço adulterado.



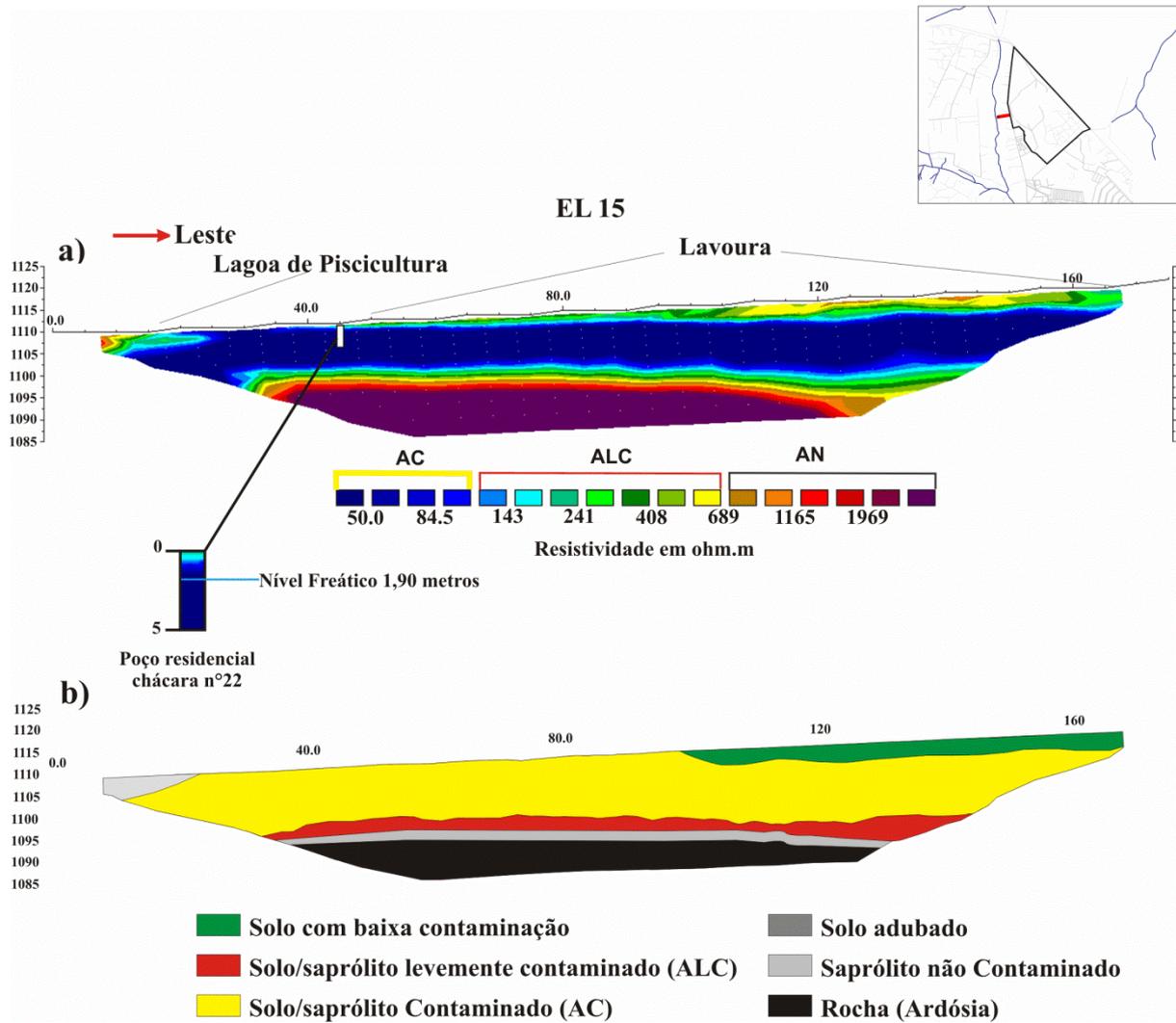
**Figura 6.18** – Seção EL9. (a) modelo de resistividade obtido após inversão e a localização do furo de sondagem (Chácara N° 22). (b) modelo geológico/geofísico elaborado.

As seções EL14 e EL15 foram realizadas perpendicularmente às seções EL7 e EL9 (entre o Córrego do Valo e o aterro JCB.), respectivamente, possuindo 180 metros de extensão e 25 metros de profundidade. Os valores de erro RMS, respectivos, são de 22% e 20%, ambos com quatro iterações. A seção EL14 (**Figura 6.19**) apresenta em sua superfície uma zona de baixa resistividade (<100 ohm.m), entre 40 a 160 metros de extensão, interpretado como AC. No início da seção percebe-se uma zona de resistividade elétrica entre 200 a 700 ohm.m, relacionada aos sedimentos/saprólito saturado bem próximo ao Córrego Cabeceira do Valo. Entre as cotas de 1115 a 1090 metros a presença dos valores de resistividade entre 700 a 2000 ohm.m, interpretada como embasamento rochoso.



**Figura 6.19** – Seção EL14. (a) modelo de resistividade obtido após inversão e a localização da área de lavoura. (b) modelo geológico/geo-físico elaborado.

Na seção EL15 (**Figura 6.20**) nota-se uma zona de resistividade elétrica entre 100 a 700 ohm.m, relacionada a área adubada na posição entre 40 a 160 metros de extensão, com profundidade de 2,5 metros, interpretado como solo de baixa contaminação; uma segunda zona de baixa resistividade elétrica (<100 ohm.m) domina toda a extensão da seção geoeletrica, até a profundidade de 10 metros, interpretada com área contaminada (AC). No início da seção duas zonas de resistividade, sendo a primeira entre 0 a 8 metros de extensão, relacionada à proximidade do Córrego Cabeceira do Valo, e interpretada como saprólito saturado. Próximo à seção EL15 foi coletada água de um poço residencial (Chácara nº 22 – poço residencial), a água deste poço foi coletada e analisada (**Tabela 6.2**). Os resultados da análise de água, deste poço, não apresentaram teores de amônia devido ao fator de oxidação (nitrito e nitrato). O valor de condutividade de 439  $\mu\text{S}/\text{cm}$  foi convertido para resistividade, o valor da água do poço residencial resultou no valor de resistividade de 22 ohm.m, interpretado como AC.



**Figura 6.20** – Seção EL15. (a) modelo de resistividade obtido após inversão e a localização da área de lavoura e da lagoa de piscicultura. (b) modelo geológico/geofísico elaborado.

As seções de eletrorresistividade com os dados de campo, modelos diretos e inversos constam no Anexo II.

## CAPÍTULO 7

### 7 – CONCLUSÕES

Os perfis de GPR resultaram na identificação da geometria das cavas de resíduos, possibilitando o dimensionamento das mesmas. Não foi possível identificar a base das cavas em função da elevada atenuação do sinal eletromagnético provocado pelo aumento da condutividade abaixo dos resíduos, sendo esta zona condutiva associada à lixiviação do chorume em direção ao nível freático.

Notam-se nos dados de GPR que o sinal eletromagnético atenua-se com maior intensidade em direção à área atual de deposição de resíduos.

O método GPR, mostrou-se uma ferramenta versátil para delinear a extensão da pluma de contaminação em função da agilidade na aquisição dos dados em campo, todavia a presença de solos argilosos e fluidos condutivos impossibilitou investigar abaixo de 9m de profundidade.

Os modelos geológico/geofísicos foram elaborados através da correlação dos dados de eletrorresistividade com informações geológicas de poços perfurados nas áreas, bem como de informações geoquímicas das águas coletadas nos poços de monitoramento.

Através da integração dos resultados definiram-se valores limites para caracterização de áreas contaminadas, suspeitas de contaminação e não contaminadas (**Tabela 7.1**).

**Tabela 7.1** – Relação dos valores de resistividade com os parâmetros físico-químicos da análise de água dos poços.

Área	Resistividade (Ohm.m)	Amônia NH <sub>3</sub> (mg/L)	Condutividade (µS/cm)	pH
Contaminada - AC	0 – 100	>2,5	160 – 994	5,2 – 5,3
Levemente Contaminada - ALC	100 – 700	1,0	21 – 160	5,3 – 6,4
Não Contaminada - AN	700 – 2000	0,0	2,6	5,0

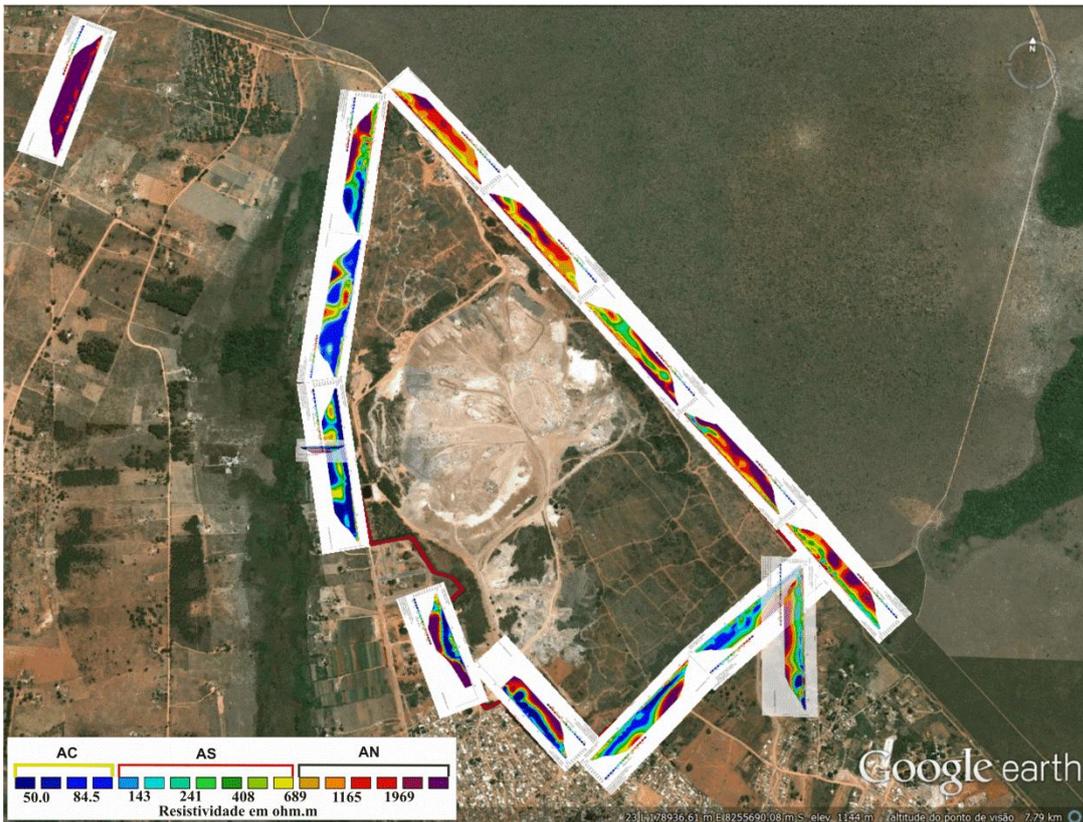
Além desta classificação, os resultados de eletrorresistividade possibilitaram a distinção entre camadas de solo, solo com resíduos, saprolito saturado e embasamento rochoso (unidade A do Grupo Paranoá).

As seções de eletrorresistividade foram adicionadas a imagem de satélite da área do Aterro JCB (Google Earth). Os valores de baixa resistividade (Área Contaminada – AC) estão localizados nas direções noroeste, oeste, sudoeste, sul e sudeste da área do Aterro JCB (**Figura 7.1**). A partir da associação das ocorrências de AC nas seções de eletrorresistividade, aos perfis de GPR e ao mapa topográfico da área do aterro JCB, elaborou-se um mapa com o fluxo preferencial da pluma de contaminação (**Figura 7.2**).

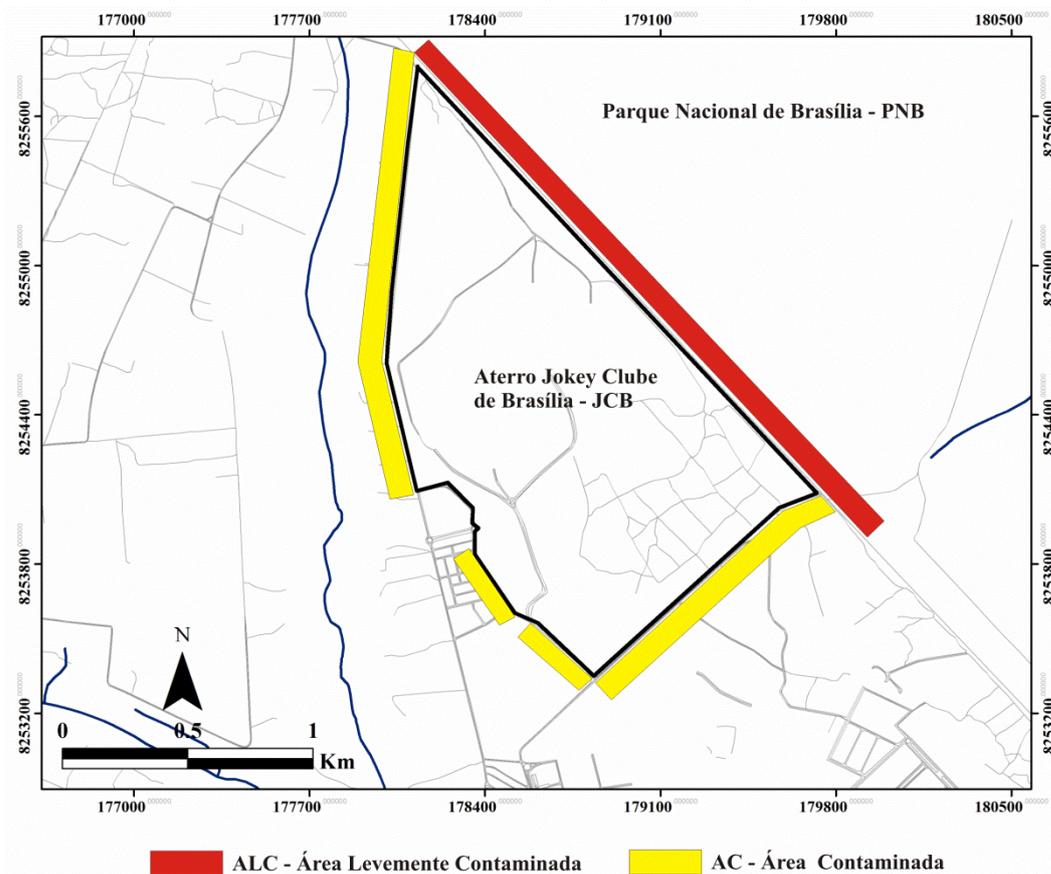
O que se observa nas seções de eletrorresistividade é que a profundidade do topo rochoso está mais rasa a leste, sugerindo um aprofundamento para o oeste. Este modelo concorda com o modelo geológico-geotécnico da área do Aterro JCB (**Figura 4.9**), elaborado, por Bernardes *et al.* (1999).

O método de eletrorresistividade mostrou-se eficiente na sua aplicação no delineamento da pluma de contaminação por chorume.

Recomenda-se a realização de análises físico-químicas de amostras de solo e água, junto às seções de eletrorresistividade e dos perfis de GPR para melhor interpretação e caracterização das áreas contaminadas pelo chorume.



**Figura 7.1** – Imagem do Google Earth 2012, com as sobreposições das seções de eletroresistividade nos limites do Aterro JCB.



**Figura 7.2** – Mapa de localização das áreas contaminadas e com suspeitas de contaminação pelo chumbo, nos limites do aterro JCB, para o ano de 2012.

Atualmente na área onde se encontram as antigas cavas de resíduo ocorre à deposição de novos resíduos sólidos, o que pode potencializar o fluxo de chorume para as áreas do Parque Nacional de Brasília e do Córrego do Acampamento.

Recomenda-se para estudos futuros a aquisição de linhas de eletrorresistividade perpendiculares ao Córrego Cabeceira do Valo, para o melhor entendimento do comportamento geológico entre as duas drenagens, já que a oeste das chácaras e do aterro JCB, não apresenta contaminação em seu nível freático.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1993) – NBR 9896 – **Glossário de Poluição das Águas**. Rio de Janeiro.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004) – NBR 10.004 – **Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1985) – NBR 8849 – **Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos – procedimento**. Rio de Janeiro.

ABREU, Feliciano de. **Estudo e avaliação da contaminação das fontes do Parque Nacional de Brasília**. [Distrito Federal]. 2001. Dissertação de Mestrado. Publicação PTARH. DM – 041/01, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF. 123p. 2001.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. **O pré-cambriano do Brasil**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 501p. 1984.

ANNAN, A. P. **Ground penetration radar workshop notes**. Sensors & Software. Inc. Hc. October. 72p. 1992.

ANNAN, A. P. **Ground penetration radar workshop notes**. Sensors & Software. Inc. Internal Report. 130p. 1996.

ANNAN, A. P. **Ground penetration radar workshop notes**. Sensors & Software. 2001. Inc. Mississauga, Ontário, Canadá. 197p. 2001.

ARANHA, P.R.A. Apostila de Georadar. Departamento de Geologia. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte. MG. 43p. 2010.

ARAUJO, R. de. **Estudo Geoquímico da Contaminação dos Recursos Hídricos e sua Propagação nas Adjacências do Aterro de Resíduos Sólidos Jockey Club – DF**. Instituto de Geociências (Dissertação de Mestrado), IG/UnB, Brasília/DF. 74p. 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 9896. Glossário de Poluição das águas. Rio de Janeiro. 1993.

BAGCHI, A. Natural attenuation mechanisms of landfill leachate and effects of various factors on the mechanism. Waste Management Research. N°5. 453-464p. 1987.

BAPTISTA, G.M.M. Caracterização Climatológica do Distrito Federal. In: IEMA/UnB. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Relatório Técnico, Vol. 1 – Meio Físico do Distrito Federal, SEM/MMA – IEMA/SEMATEC, Brasília – DF. 265-283p. 1998.

BERNARDES, R. S., PASTORE, E. L., PEREIRA, J. H. Caracterização Geofísica e Geoquímica da área de Disposição de Resíduos Urbanos “Aterro do Jockey Clube” em Brasília-DF. 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, maio 12p. 1999.

BIDONE, F. R. A; POVINELLI, J. **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos**. 1ª edição, São Carlos – SP. Publicação da Escola de Engenharia de São Carlos, EESC/USP. 120 p. 1999.

BIRKS, J. e EYLES, C. A. **Leachate from landfill along the Niagara Escarpment**. In: Eyles, N. (Ed.), Environmental Geology of Urban Areas. Geological Association of Canada. Canada. 347 – 363p. 1997.

BORGES, W.R. **Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP**. 2007. Tese de Doutorado, Instituto de astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG/USP. 256p. 2007.

BRAGA, A.C.O. **Métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida Aplicados nos Estudos da Captação e Contaminação de Águas Subterrâneas: Uma Abordagem Metodológica e Prática**. 2007. Tese de Livre-Docência na disciplina “Métodos Geolétricos Aplicados à Hidrogeologia” do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista. São Paulo. 80p. 2007.

BRANCO, S. M. **A água e o homem**. In: PORTO, Hidrologia Ambiental. Editora da Universidade de São Paulo. 1991. Cap. 1, 14-15p.

BRASIL. 2011. Ministério de Estado da Saúde. Portaria 2914, de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 26 mar. Seção 1, 266-270p. 2004.

CAMPOS, J. E. G. e FREITAS-SILVA, F. H. **Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal**. 1998. Relatório Técnico, Vol. 4 – Hidrogeologia do Distrito Federal SRH/MMA – IEMA/SEMATEC, Brasília, DF. 85p. 1998.

CAMPOS, JEG. **Análise e delimitação da pluma de contaminação do Aterro do Jockey, região da Vila Estrutural**. Relatório Técnico, Brasília/DF, 14p. 2007.

CARVALHO, M. E. **Coleta e Disposição de Lixo**, In: Livro Urbano: Três Estudos sobre Coleta e Tratamento. Rio de Janeiro. BNDS, Cadernos FINSOCIAL,. 45-85p. 1997.

CARTWRIGHT, K. e McCOMAS, M.R. Geophysical surveys in the vicinity of sanitary landfills in northcentral Illinois. Ground Water. Ohio-USA. v. 6, n 5, 23-30p. 1968.

COLMANETTI, J. P. **Comportamentos de Filtros em Sistemas de Drenagem para Resíduos Sólidos Municipais**. 2000. Dissertação de Mestrado – Universidade de

Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. 126p. 2000.

COMPANHIA DO DESENVOLVIMENTO DO PLANALTO CENTRAL - CODEPLAN. **Atlas do Distrito Federal**. Codeplan/GDF, Brasília – DF, 79p. 1984.

CARNEIRO, G. A. **Estudo de Contaminação do Lençol Freático Sob a Área do ATERRO de Lixo do Jockey Clube-DF e suas Adjacências**. 2002. Instituto de Geociências (Dissertação de Mestrado), IG/UNB, BRASÍLIA/DF, 123p. 2002.

CAVALCANTI, M. M., BORGES, W. R., ROCHA, M. P., CUNHA, L. S., SEIMETZ, E. X. Investigação Geofísica (Eletrorresistividade e GPR) nos Limites do Lixão da Estrutural e do Parque Nacional de Brasília – DF (Resultados Preliminares). Twelfth International Congresso of the Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro/RJ. 6p. 2011.

CHAMBERS, J.; OGILVY, R.; MELDRUM, P.; NISSEN, J. 3D Resistivity imaging of buried Oil and Tar contaminated waste deposits. *European journal Of Environmental Geophysics*, 3-15p. 1999.

DARDENNE, M. A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. 1978. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30. Salvador/BA. Anais... Salvador: SBG, V.2. 597-610p. 1978.

DANIELS, J. J. **Fundamentals of ground penetrating radar**. In: SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, 2. Golden. In. Proceedings..., Golden: SAGEEP'89, 62 -142p. 1989.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, Vol. 37:531-551. 1989.

DUARTE, O.O. Dicionário Enciclopédico de Inglês-Português de Geofísica e Geologia. Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro,. 352p. 2003

DELLABIANCA, S. M. A. **Projeto, Construção e Monitoramento de Células de Resíduos Sólidos com Aceleração da Decomposição**. 2001. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Brasília – UnB. 113 p. 2001.

EDWARDS, L. S. A modified pseudo-section for resistivity and induced polarization. *Geophysics*, Vol.42(3):1020 – 1036. 1977.

ELIS, V.R. A geofísica como ferramenta para detectar e mapear contaminação. Material Básico – principais métodos geofísicos e aplicações. Departamento de Geofísica – IAG/USP. São Paulo, 35P. 2005.

Disponível:[www.iag.usp.br/agua/geo/contaminacao2\\_vagner.pdf](http://www.iag.usp.br/agua/geo/contaminacao2_vagner.pdf).

ELIS, V. R. **Avaliação da Aplicabilidade de Métodos Elétricos de Prospecção Geofísica no Estudo de Áreas utilizadas para Disposição de Resíduos**. 1999.

Dissertação de Doutorado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, São Paulo. Brasil. 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Levantamento de Reconhecimento dos solos do Distrito Federal.** Boletim Técnico, EMBRAPA/SNLCS, Rio de Janeiro, 455p. 1978.

FACHIN, SJS. HUBER F. SHIRAIWA, S. BORGES, WR & MIGLIORINI RB. Aplicação de métodos geofísicos para identificar áreas contaminadas por resíduos de um curtume. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(1): 129-138. 2006.

FARQUHAR, G.J. Leachate: production and characterization. 1989. *Canadian Journal of Civil Engineering*. N°16, p. 317 – 325.

FARIA, A. **Estratigrafia e sistemas deposicionais do Grupo Paranoá nas páreas de Cristalina, Distrito Federal e São João D’Aliança – Alto Paraíso de Goiás.** 1995. Tese de Doutorado. Instituto de Geologia. Universidade de Brasília, Brasília. 201p. 1995.

FERREIRA, F.J.F. Técnicas e Aplicações de Imageamentos Elétricos 2D e 3D. Métodos Elétricos. Curso de Pós Graduação em Geologia. Disciplina Geofísica Exploratória. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 69p. 2002.

FRANCO, H. A. **Geofísica e Química Aquática Aplicadas ao Estudo da Contaminação de Recursos Hídricos Subterrâneos no Aterro do Jockey Club, Brasília – DF.** 1996. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, DF. 1996. 95p.

FREITAS-SILVA, F. H. e CAMPOS, J. E. G. Geologia do Distrito Federal. In: IEMA/UnB. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Relatório Técnico, Vol. 1 – Meio Físico do Distrito Federal, SRH/MMA – IEMA/SEMATEC, Brasília, DF. 1998. 1-87p.

FREITAS-SILVA, F. H. e DARDENE, M. A. Proposta de subdivisão estratigráfica formal para o Grupo Canastra no oeste de Minas Gerais e leste de Goiás. In: Simpósio de Geologia do Centro – Oeste, 4. Brasília, DF. **Anais...**Brasília, DF: SBG-DF. 164-165p. 1993.

GALLAS JDF, TAIOLI F & SILVA SMCP. Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade. *Revista Brasileira de Geofísica (ISSN 0102-261X)*. 23(1): 51-59p. 2005. Disponível em: [www.scielo.br/rbg](http://www.scielo.br/rbg).

GIORDANO, G; BARBOSA FILHO, O. e CARVALHO, R. J. Processos físico-químicos para tratamento do chorume de aterros de resíduos sólidos urbanos. Série Temática: Tecnologias Ambientais –volume 4. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Engenharia. Rio de Janeiro, 178p. 2011.

HIRSCH, M. DC-Geoelectrical survey for contaminant plume detection – Results form a survey campaign for the investigation of a contaminant plume from an usealed landfill; (a publicar). 2008.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ - IAP. Manual para implantação de aterros sanitários em valas de pequenas dimensões, trincheiras e em células. 2012. Acessado em: <http://www.iap.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteúdo=507>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008.

JOL, H.M. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Elsevier Science, Oxford. ISBN: 978-09-444-53348-7. 402p. 2009.

KELLY, W.E. Geoelectric Sounding for Delineating Ground-Water Contamination. *GroundWater*.v. 14, n.1, p 6-10. 1976.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. Geofísica de exploração. Tradução Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina do Texto, 438p. 2009.

KIM, K. W.; KIM, Y. J.; KIM, I. T.; PARK, G.; LEE, E. H. Electrochemical conversion characteristics of ammonia to nitrogen. *Water Research*, 2006. V.40. pp.1431-1441.

KOIDE, S.; BERNARDES, R.S. Contaminação do Lençol Freático sob a área do Jockey Club, Distrito Federal. X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 11p. 1998.

LAGO, A.P. **Investigação geofísica 2D e 3D com aplicação em meio ambiente: estudo sobre uma área de disposição de resíduos de óleo lubrificante no município de Ribeirão Preto – SP.** 2009. Dissertação de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 194p. 2009.

LAUREANO, A. T e SHIRAIWA, S. Ensaio Geofísicos no Aterro Sanitário de Cuiabá – MT. *Revista Brasileira de Geofísica*, (2008) 26(2): 173-180. 2008. Acessado em: [www.scielo.br/rbg](http://www.scielo.br/rbg).

LIMA, L.M.Q. Lixo: tratamento e Biorremediação. Hemus Editora Limitada, São Paulo, 265 p. 1995.

LOKE, M.H. Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys. 129p. 2001. Disponível em: <http://www.geotomosoft.com>, acessado em 29/06/2012.

LOKE, M.H. Res2Dinv versão 3.54 for Windows 98/Me/2000/NT/XP. Rapid 2D Resistivity and IP Inversion using the least-square method. Software Manual. P 133. 2004. Disponível em :<http://www.geoelectrical.com>.

MALA GEOSCIENCE. RAMAC/GPR. Version 2.28. Software Manual, August, 66p. 1997.

MARTINS, E. S.; REATTO, A.; CARVALHO Jr, O. A.; GUIMARÃES, R. F. Evolução geomorfológica do Distrito Federal. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF. 56p. 2004.

McNEIL, J.D. Electrical Conductivity of Soils and Rocks, Technical note TN-5. GEONICS LIMITED. Mississauga. Canadá. 20p. 1980.

MEJU, MA. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. Journal of Applied Geophysics 44 (2000) 115-150. 2000.

MENDES, JMB. **Técnica geofísica aplicadas no mapeamento e monitoramento de poluição e contaminação de águas subterrâneas.** 1987. Tese Doutorado em Geociências. Universidade de São Paulo (USP). 196p. 1987.

MERBACH, P.S.JR. **Estudos de Avaliação de Metais Pesados em Percolado de Aterro Sanitário em Função do Tempo de Disposição.** 1989. Dissertação de Mestrado. EESC-USP, São Carlos, SP, 83p. 1989.

MOREIRA, C.A. **Geofísica aplicada no monitoramento de área de disposição de resíduos sólidos domiciliares.** 2009. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro-SP. 167p. 2009.

MOURA, HP e MALAGUTTI FILHO, W. Método de eletrorresistividade e de polarização induzida Aplicados na Área de Disposição de Resíduos Urbanos: Aterro Controlado de Rio Claro – SP. São Paulo, UNESP, Geociências, V.22, N. Especial, pag. 129-139. 2003.

NOVAES PINTO, M. Caracterização Geomorfológica do Distrito Federal. In: Novaes Pinto, M. (org). Cerrado: Caracterização, ocupação e perspectivas. Brasília. Editora UnB. 2ª Ed. 511-542 p. 1994.

OBLADEN, N. L; BARROS, K. R e OBLADEN. N.T. Guia para Elaboração de Projetos de Aterros Sanitários para Resíduos Sólidos Urbanos. Volume II. Série de Publicações Temáticas do CREA-PR. 88p. 2009.

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

ONAY, T.T.; POHLAND F.G. In situ nitrogen management in controlled bioreactor landfills. Water Research, V.32, n.5, 1383 – 1392p. 1998.

ORELLANA, E. Prospeccion geoelectrica em corriente continua. Madrid, Ed. Paraninfo, Biblioteca Técnica Philips. 523p. 1972.

PEREIRA, J. H. F., PASTORE, E. L., BERNARDES, R. S. SOUZA, N. M. e CARVALHO, J. C. Estudos Geológico-Geotécnicos para o Planejamento e Projeto de Disposição de Resíduos Urbanos do Aterro de Lixo do Jóquei. Relatório Final, Vol. 4, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 86p. 1997.

PESQUISA NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO – PNSB. 2008. Instituto Brasileiro de Estatística (IBGE). Rio de Janeiro 2010.

PIMENTEL, M. M.; HEAMAN, L.; FUCK, R. A. Idade do metarriolito da sequência Maratá, Grupo Araxá, GO: Estudo geocronológico pelos métodos U-Pb em zircão, Rb-

Sr e Sm-Nd. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, V.64. 19-28p. 1993.

POHLAND, F. G. e HARPER, S.R. Critical review and summary of leachate and gás production form landfill. USEPA-Office of Research and Development, EPA/600/2-86/073. 1985.

PORSANI, J.L. **Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado - SP.** Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 145p. 1999.

PRADO, R. L. **A sísmica de reflexão e o radar de penetração no solo na investigação geológico-geotécnica em ambientes urbanos: Um estudo na cidade de São Paulo - SP, Brasil.** Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 174p. 2000.

REICHERT, G. A. Aterro sanitário – Projeto, implantação e operação. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, RS, 99p. 1999.

REYNOLDS JM. An introduction to applied and environmental geophysics. Ed. John Wiley and Sons. 796 p. 1997.

SANTANA, O.A.; IMAÑA – ENCINAS, J.M. Modelo espacial de contaminação do solo e do lençol freático do Aterro do Jockey Club para o Parque Nacional de Brasília, Brasília-DF. Cartografia Geotécnica e Geoambiental (Conhecimento do Meio Físico) ISBN:85-984506-06-X. 2004.

SANTOS, P.C.V. **Estudos da Contaminação de Água Subterrânea por Percolado de Aterro de Resíduos Sólidos – Caso Jockey Club-Df.** 1996. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF. 1996.

SAWYER, C. N.; McCARTY, P. L.; PARKIN, G. F. Chemistry for Environmental Engineering, McGraw Hill, 655 p. 1994.

SERAFIM, A.C., GUSSAKOV, K.C et al. Chorume, impactos ambientais e possibilidades de tratamentos. Fórum de Estudo Contábeis, 3. São Paulo: UNICAMP. 54p. 2003.

SHIRAIWA, S; LISOVSKY, S.P; ELIS, V.R; PORSANI,J.L; BORGES, W.R. Estudos geofísicos integrados no lixão de Cuiabá, MT, Brasil: resultados preliminares, Revista Brasileira de Geofísica, V.20, n.3, PL 181-186. 2002.

STOLLAR RL & R P. Earth resistivity surveys – A Method for delineating groundwater contamination. Ground Water, 13:145-150. 1975.

STOLLBERG, R., WEIB, H. Municipal waste disposal Lixão do Jóquei, Brasília, Distrito Federal do Brasil: Site investigation, groundwater monitoring, and hydrochemical analysis. Status Report I. Project: IWAS – ÁguasDF, Sub-project 3

“Hydrological cycle”. HELMOLTZ (Centre for Environmental Research – UFZ). 38p. 2011.

TCHOBANOGLIOUS, G. THEISEN, H. & VIGIL, S. A. Integrated Solid Waste Management – Engineering Principles and Management Issues. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. Macgraw Hill, Book Co., Inc., New York, 979 p. 1993.

TELFORD, W.M; GELDART, L. P., SHERIFF, R. E. Applied geophysics. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 770p. 1990.

TOPP, G.C; DAVIS, J. L; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research, Vol. 16 (3): 574-582. 1980.

VELOZO, R. **Caracterização geológica-geotécnica do lixão desativado de São Carlos, com auxílio da geofísica.** 2006. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP. 139p. 2006.

VOGELSANG D. Environmental geophysics – A practical guide. Springer-Verlag, New York, 173 p. 1995.

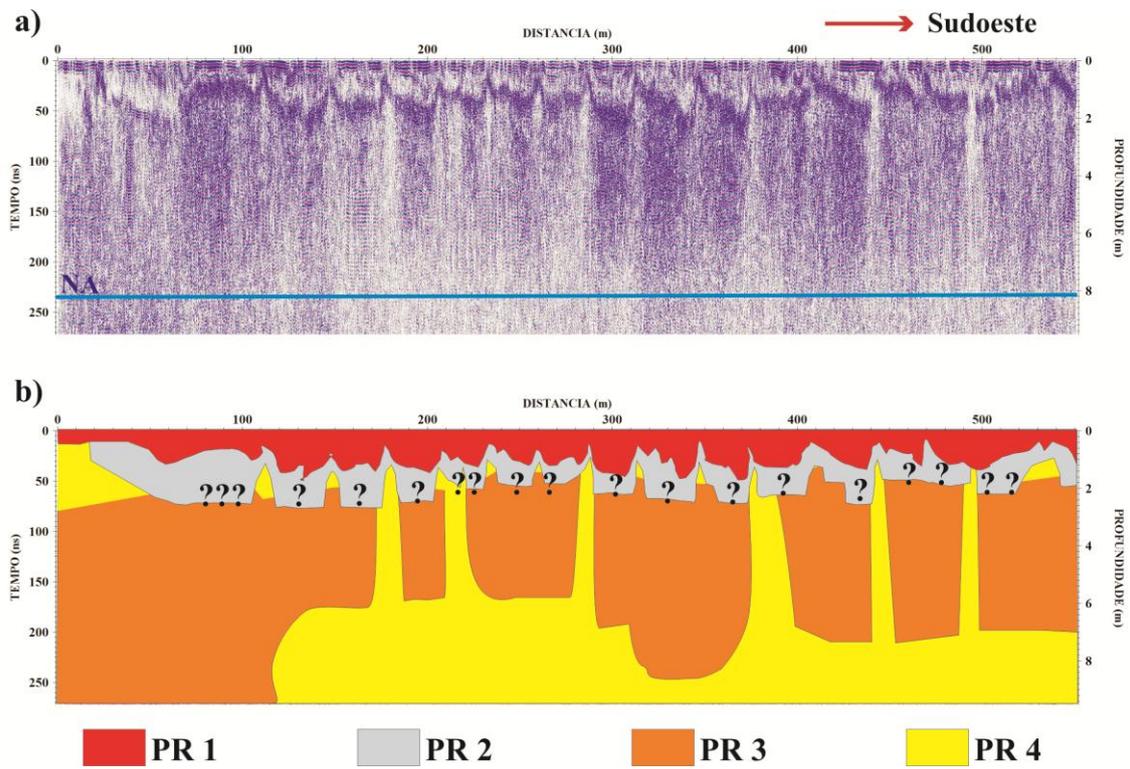
ULRIKSEN, C. P. F., **Application of impulse radar to civil engineering.** Tese de Doutorado, Departamento de Geologia de Engenharia, Lund University of Technology. Lund - Suécia. 175p. 1982.

URISH, D.W. The Practical Application of Surface Electrical Resistivity to Detection of Ground-water Pollution. *Ground Water*. v. 21, n2, 144-152p. 1983.

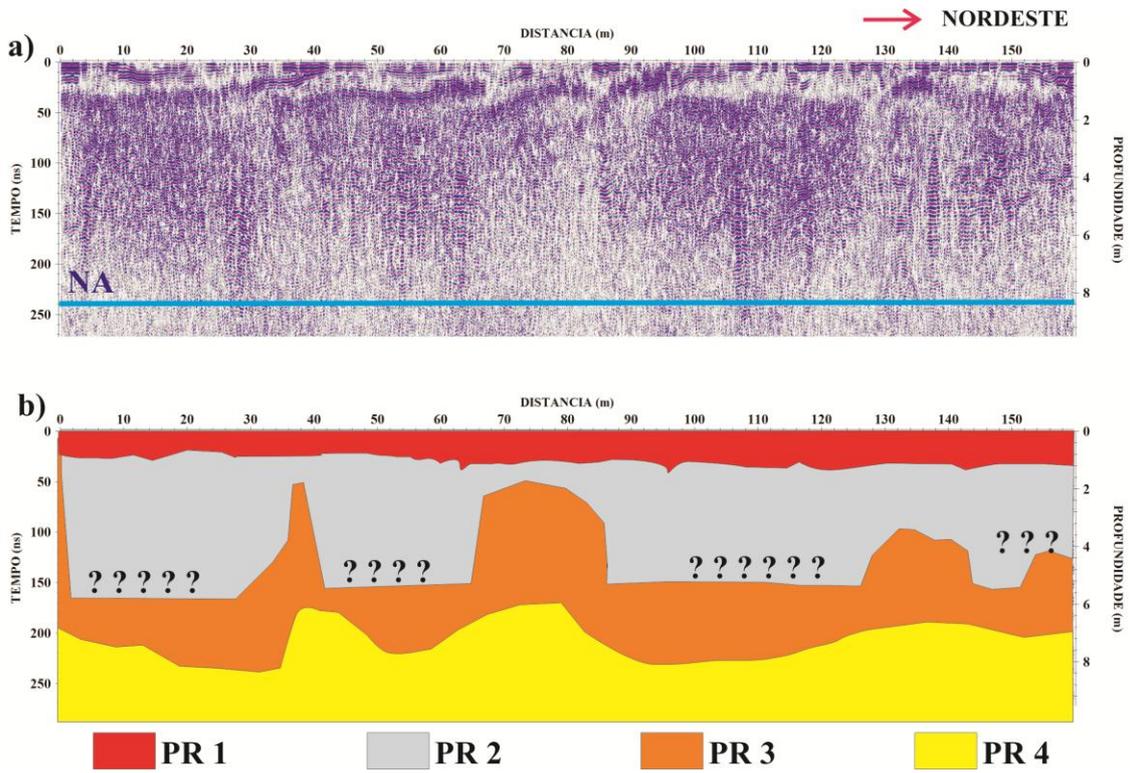
WARD, S. H., HOHMANN, G. W. Electromagnetic theory for geophysical applications: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, Ed. Misac N. Nabighian, Vol.1, 131-311p. (Investigations in Geophysics, n.3). 1987.

## ANEXOS

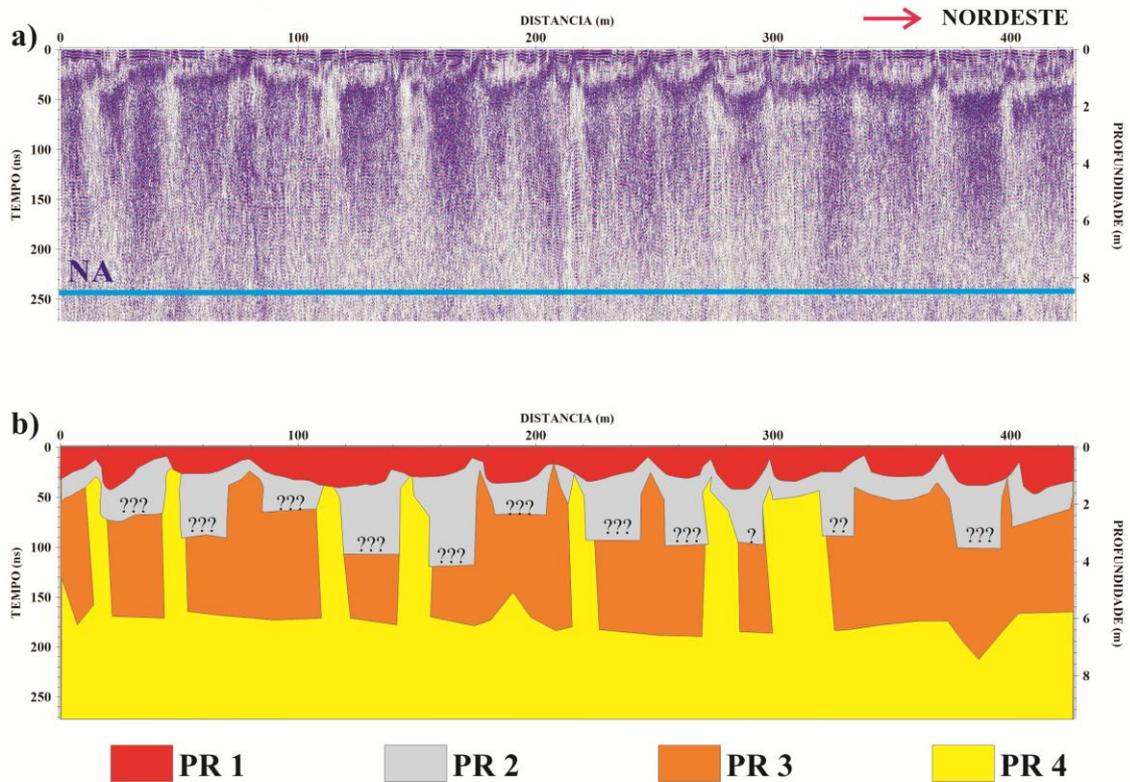
### ANEXO I – Perfis Internos GPR



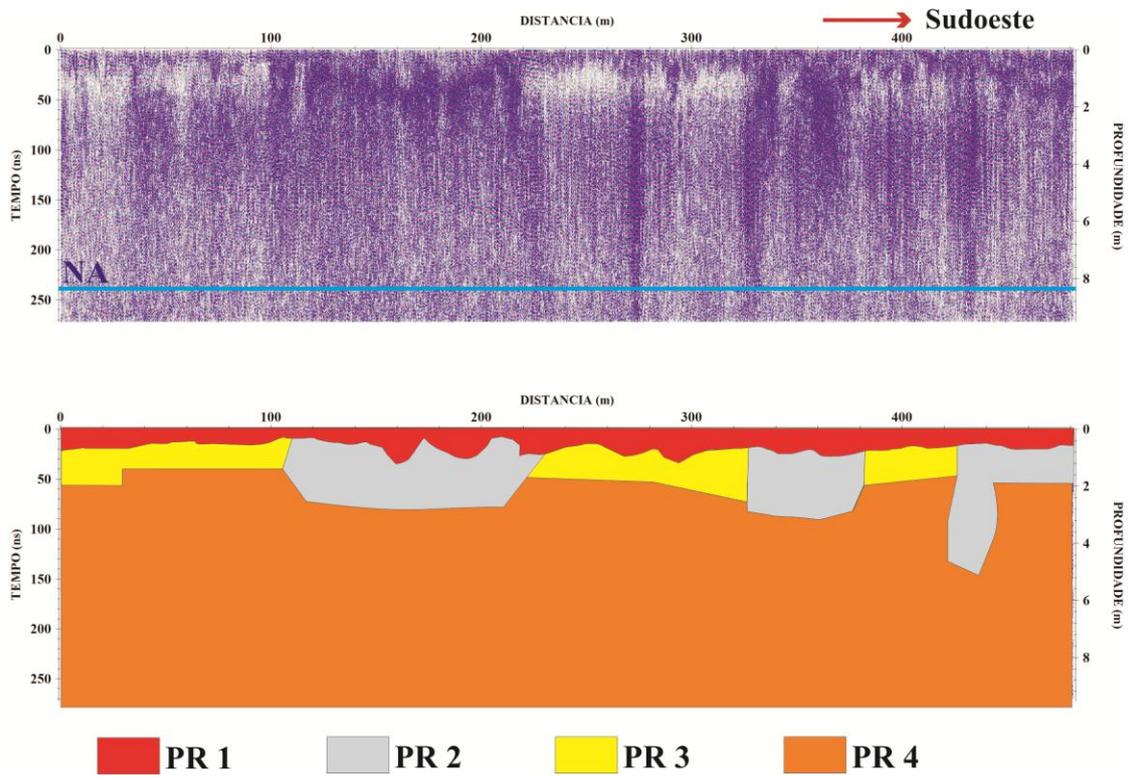
**Anexo Ia** – Perfil GPR-1. (a) Perfil sem interpretação. (b) Perfil com interpretação sobreposta.



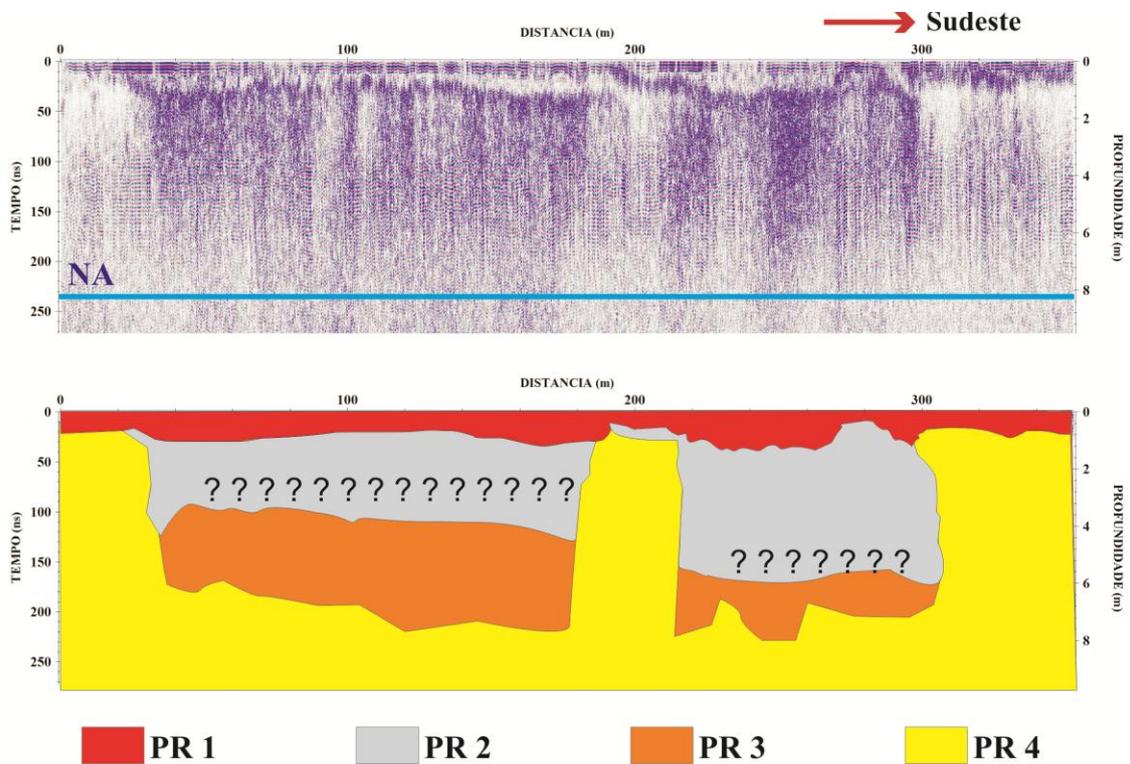
**Anexo Ib** – Perfil GPR-2. (a) Perfil sem interpretação. (b) Perfil com interpretação sobreposta.



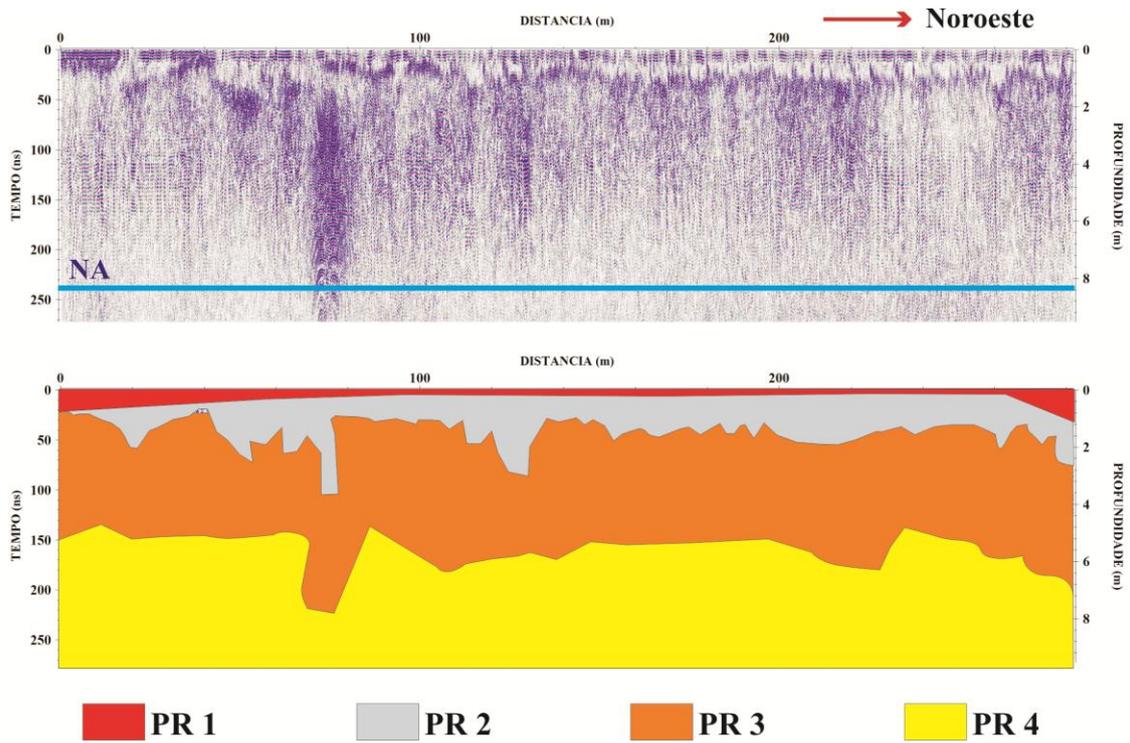
**Anexo Ic** – Perfil GPR-3. (a) Perfil sem interpretação. (b) Perfil com interpretação sobreposta.



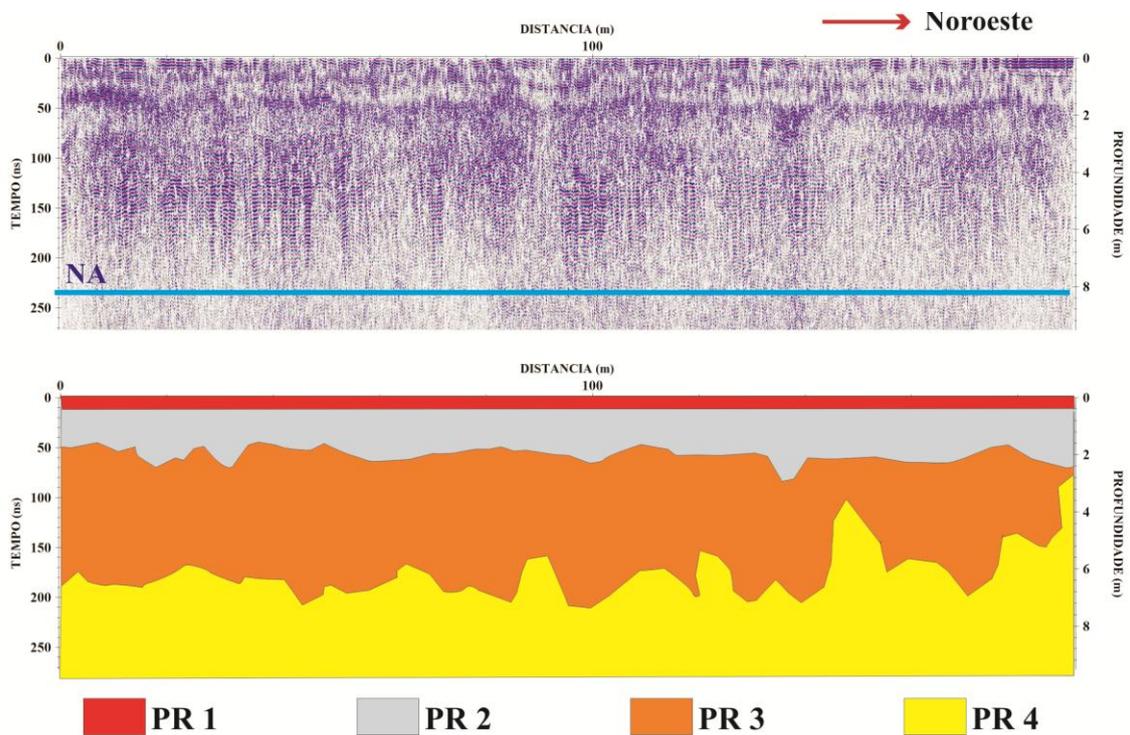
**Anexo Id** – Perfil GPR-4. (a) Perfil sem interpretação. (b) Perfil com interpretação sobreposta.



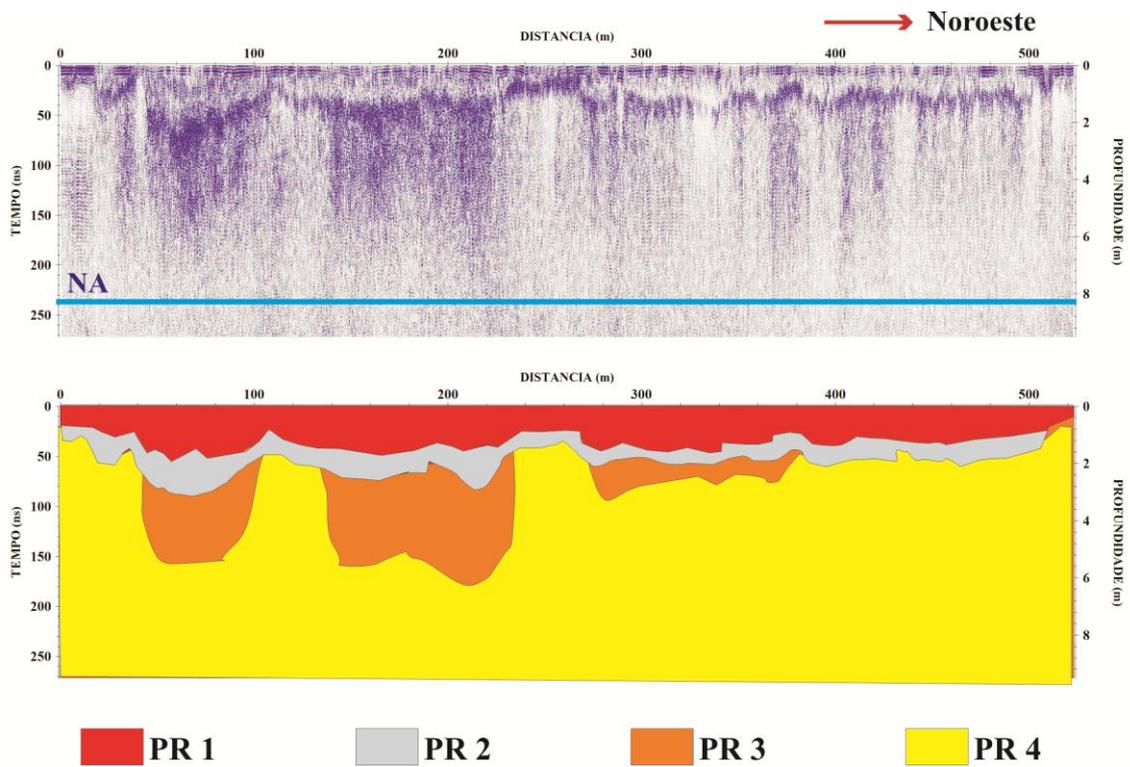
**Anexo Ie** – Perfil GPR-5. (a) Perfil sem interpretação. (b) Perfil com interpretação sobreposta.



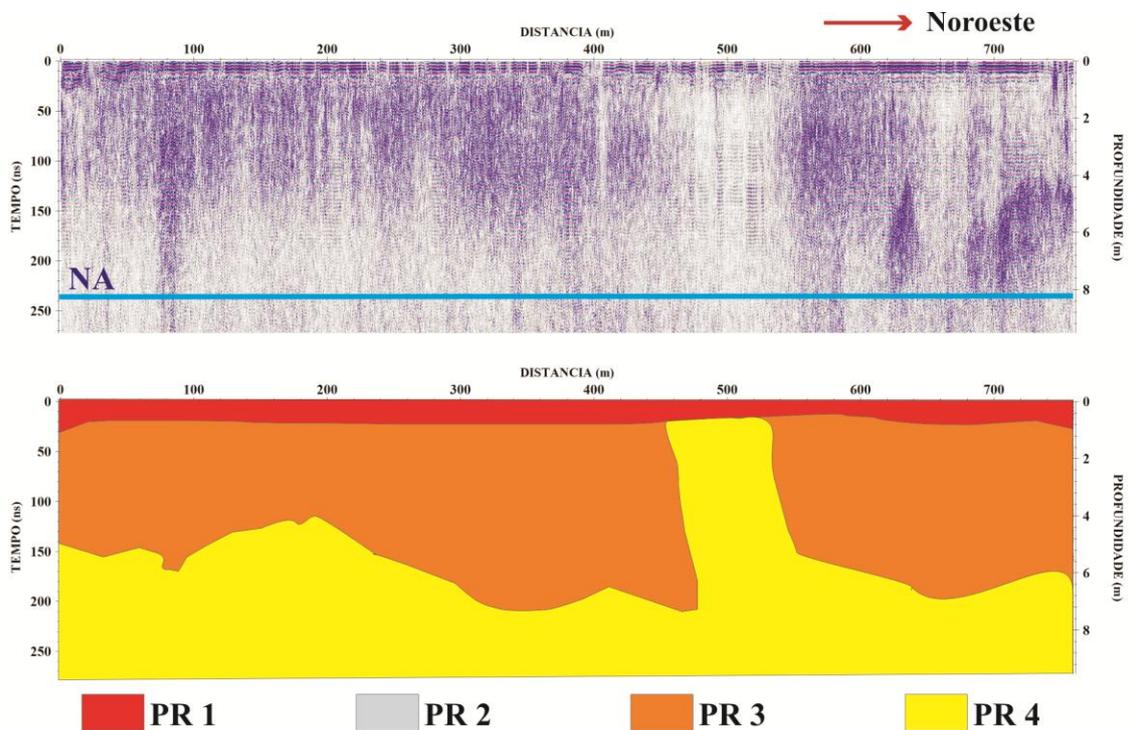
Anexo If – Perfil GPR-6. (a) Perfil sem interpretação. (b) Perfil com interpretação sobreposta.



Anexo Ig – Perfil GPR-7. (a) Perfil sem interpretação. (b) Perfil com interpretação sobreposta.

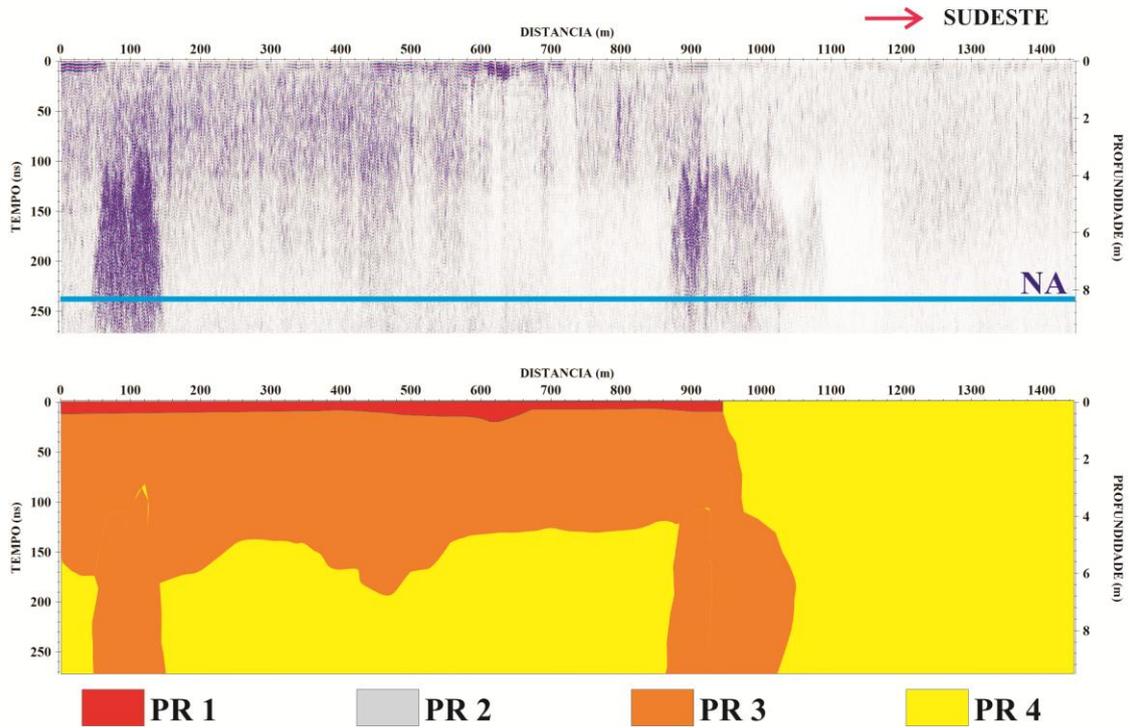


**Anexo Ih** – Perfil GPR-8. (a) Perfil sem interpretação. (b) Perfil com interpretação sobreposta.

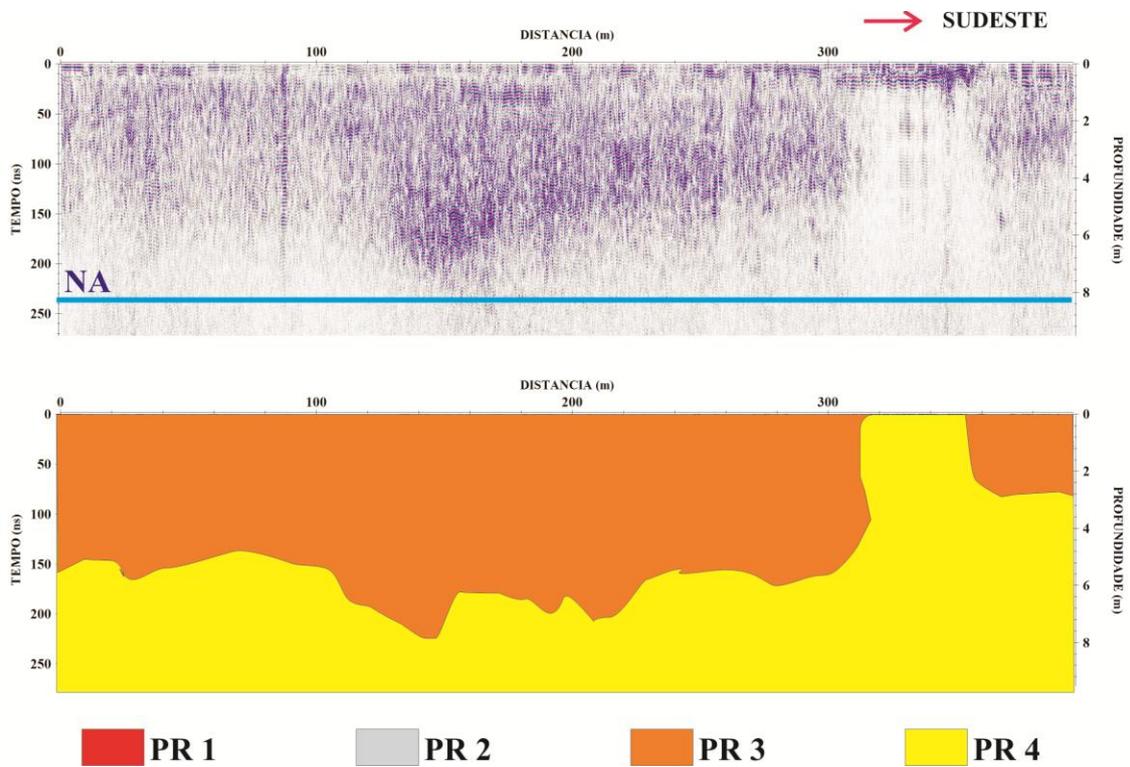


**Anexo Ii** – Perfil GPR-9. (a) Perfil sem interpretação. (b) Perfil com interpretação sobreposta.

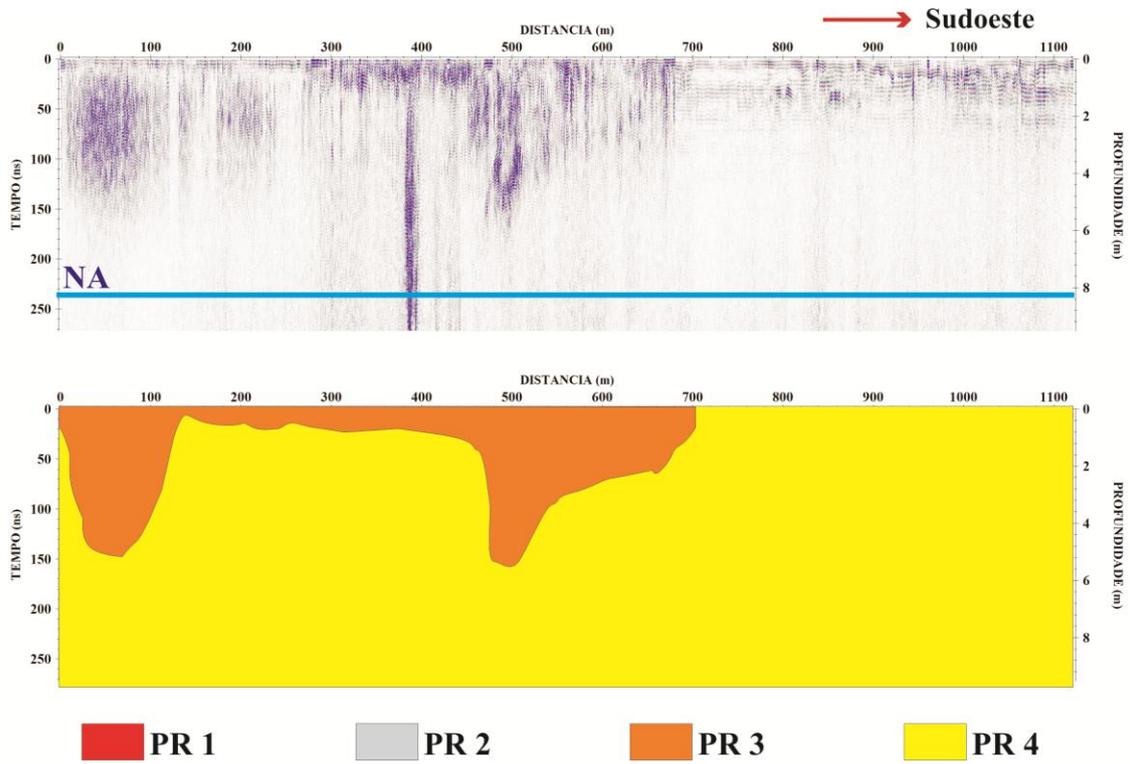
**ANEXO I – Perfis Externos GPR**



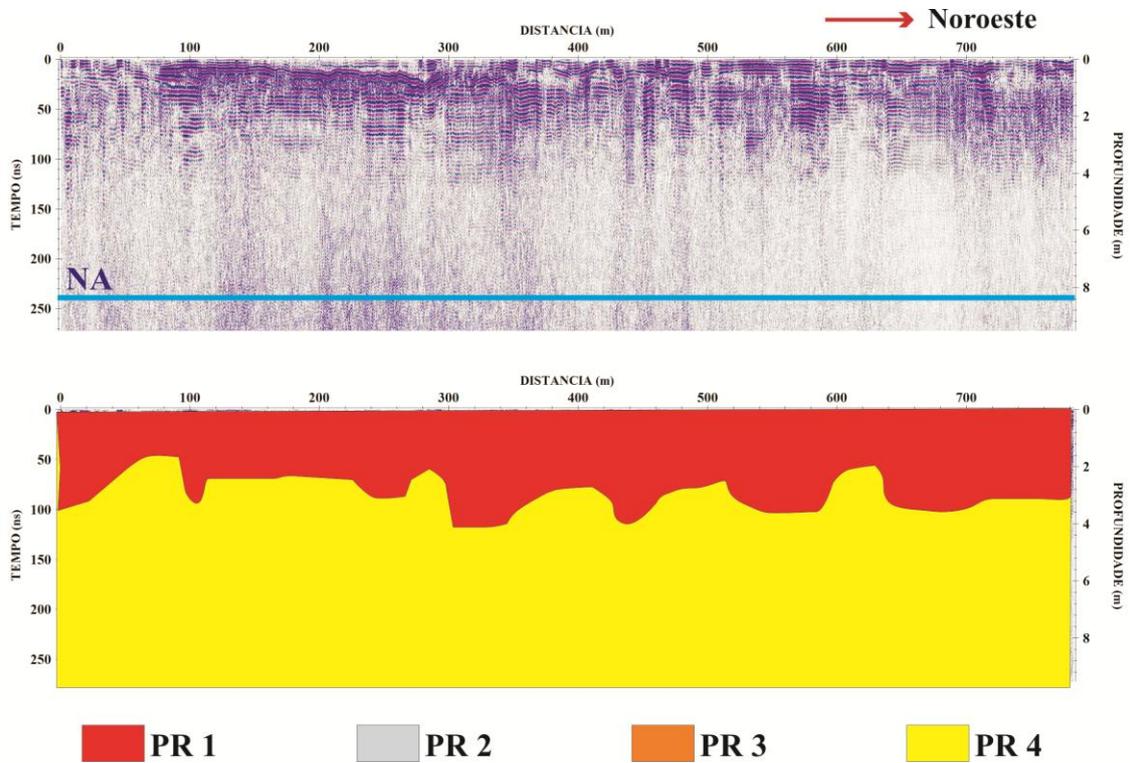
**Anexo Ij** – Perfil GPR-10. (a) Perfil sem interpretação. (b) Perfil com interpretação sobreposta.



**Anexo Ik** – Perfil GPR-11. (a) Perfil sem interpretação. (b) Perfil com interpretação sobreposta.

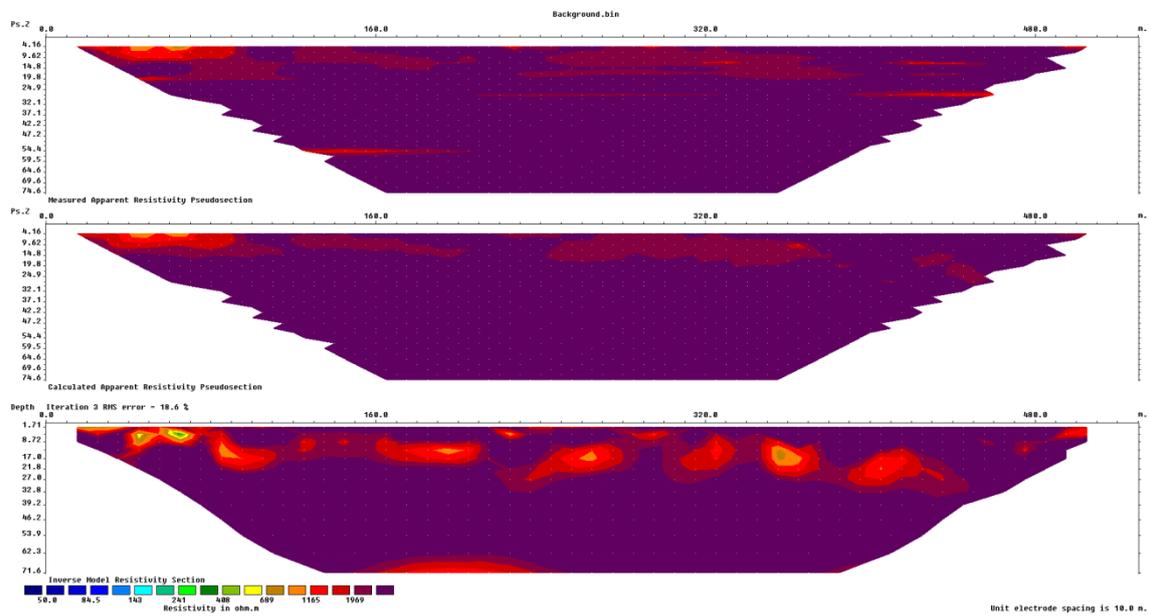


Anexo II – Perfil GPR-12. (a) Perfil sem interpretação. (b) Perfil com interpretação sobreposta.

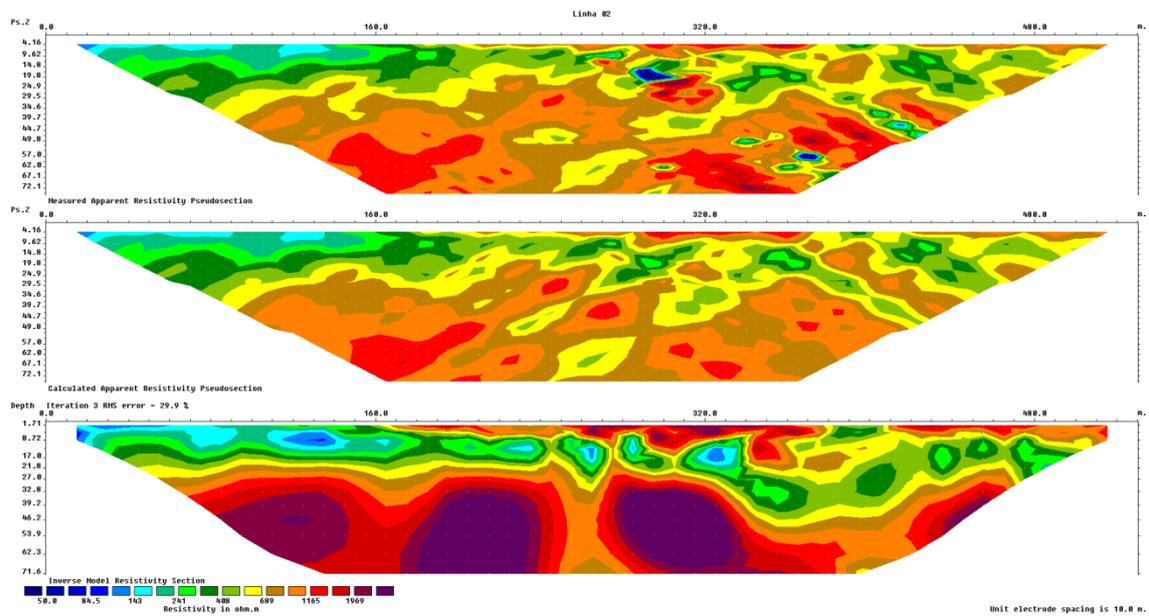


Anexo III – Perfil GPR-13. (a) Perfil sem interpretação. (b) Perfil com interpretação sobreposta.

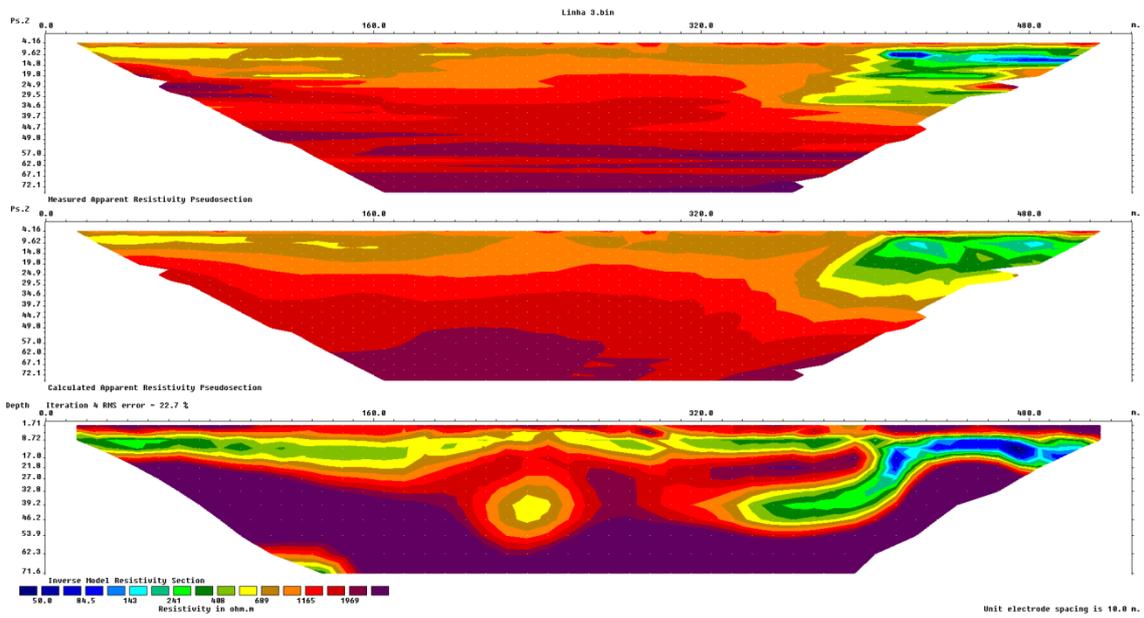
## ANEXO II – Seções de Eletroresistividade



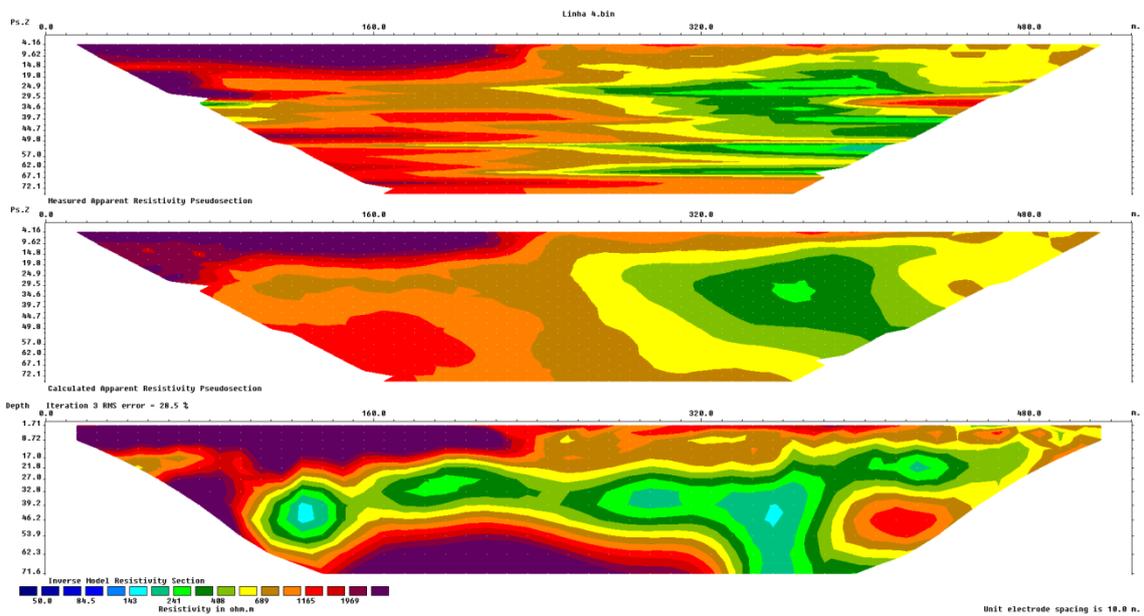
Anexo IIa– Seção de Eletroresistividade L1.



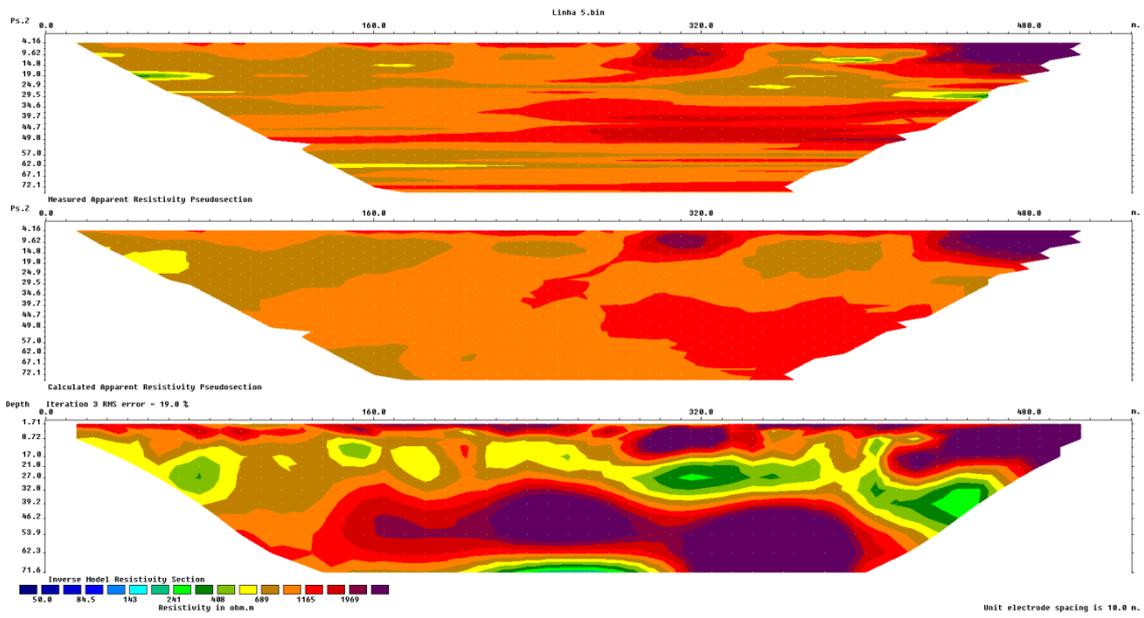
Anexo IIb– Seção de Eletroresistividade L2.



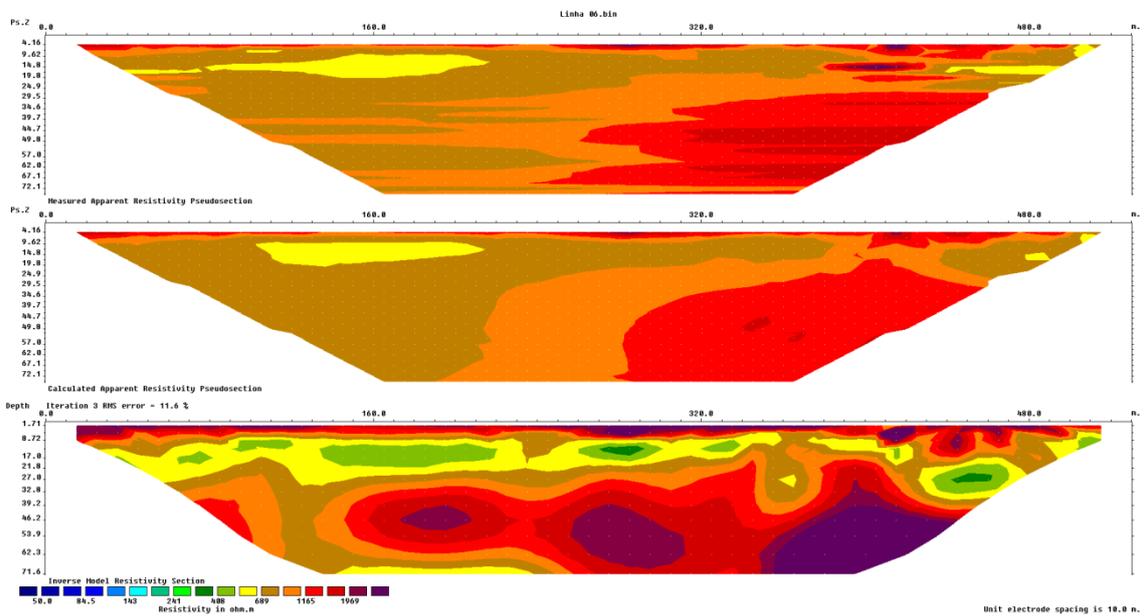
Anexo IIc- Seção de Eletroresistividade L3.



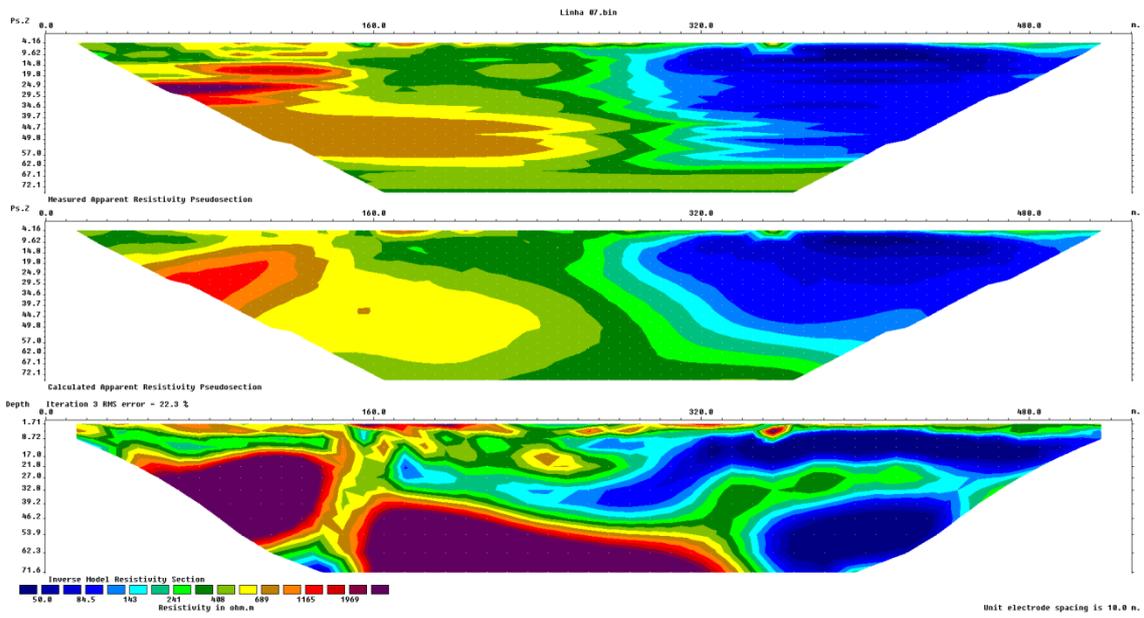
Anexo II d- Seção de Eletroresistividade L4.



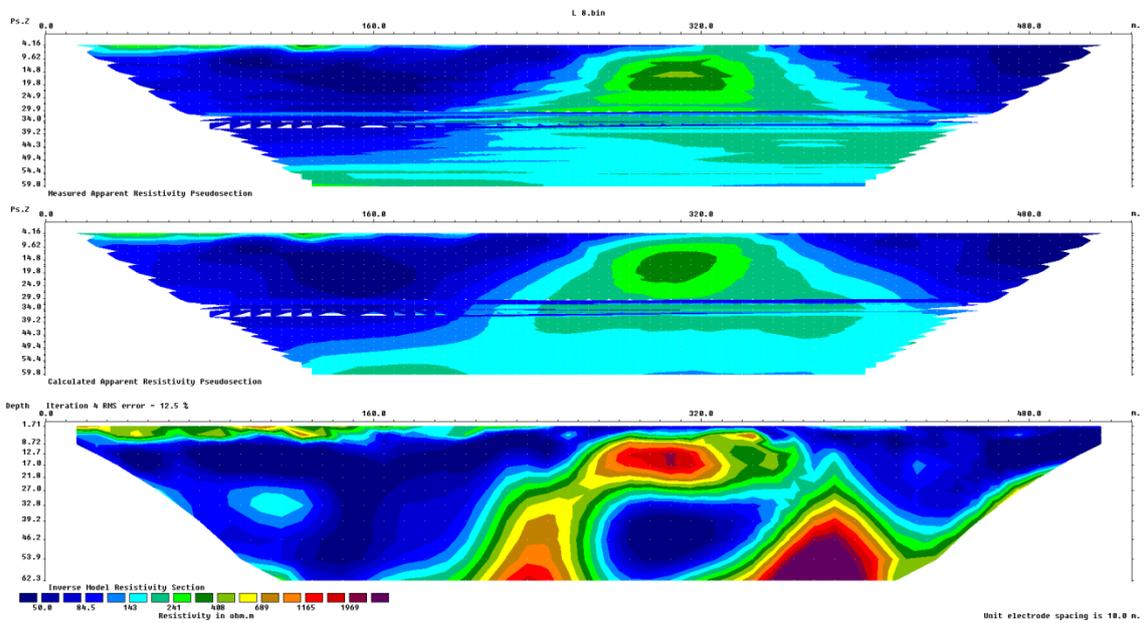
Anexo IIe– Seção de Eletroresistividade L5.



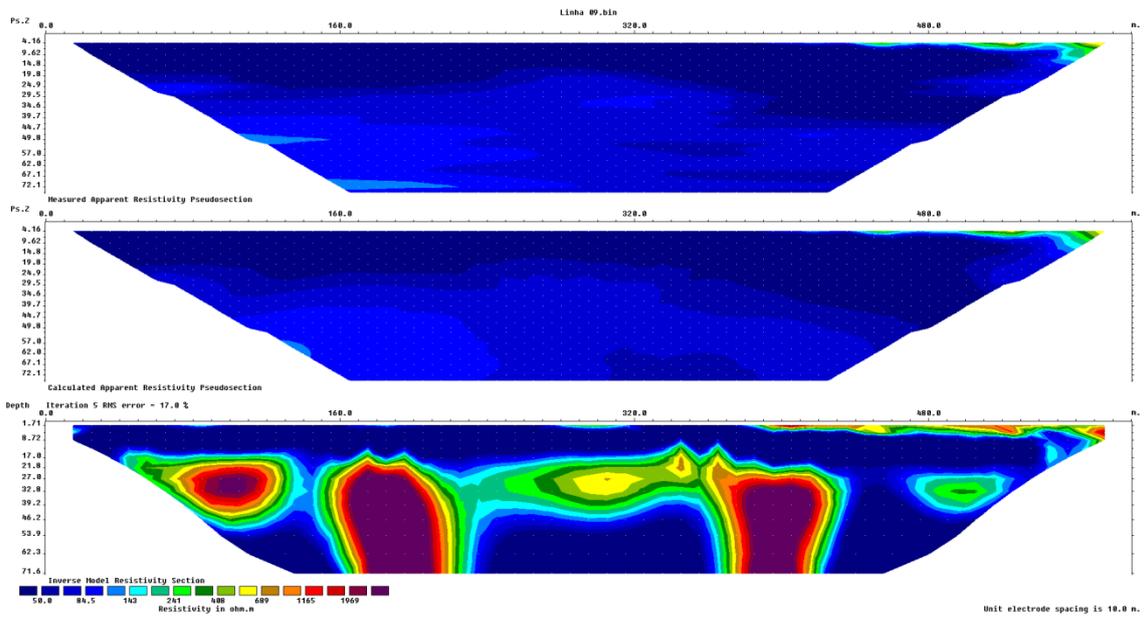
Anexo IIIf– Seção de Eletroresistividade L6.



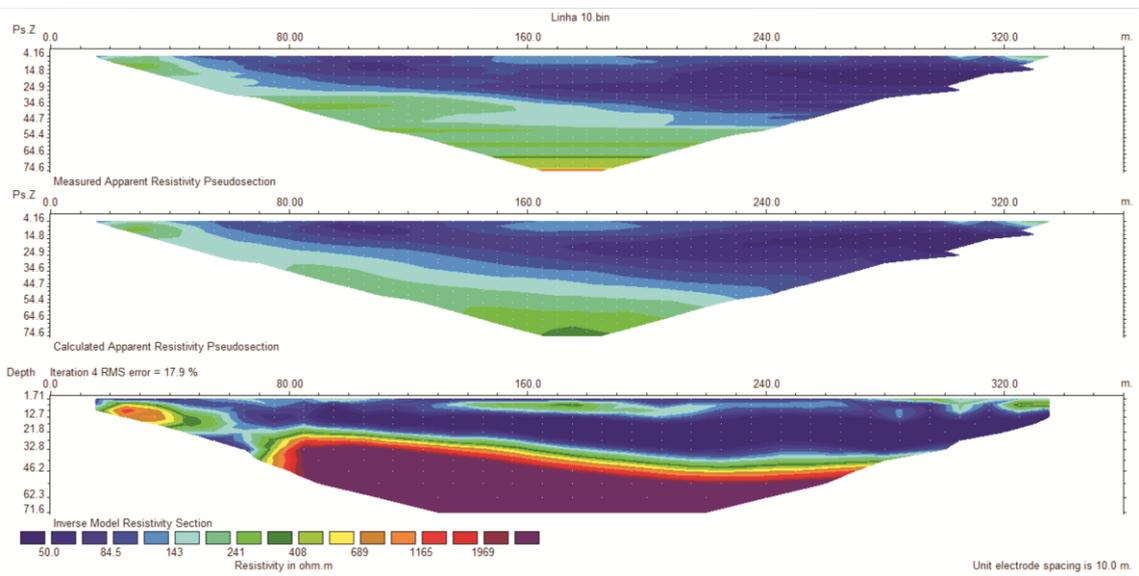
Anexo IIg– Seção de Eletroresistividade L7.



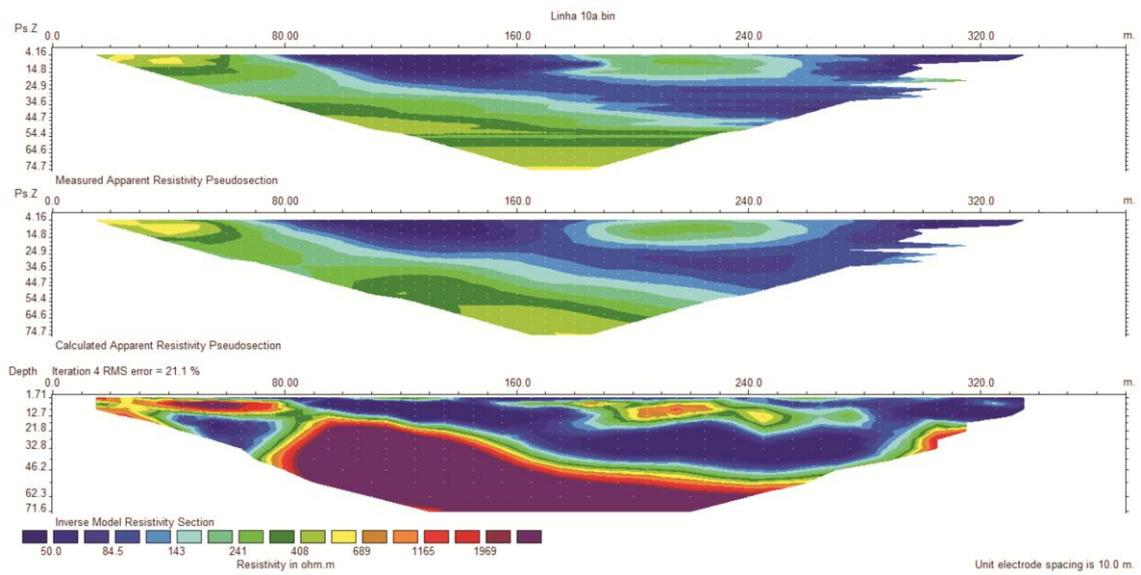
Anexo IIh– Seção de Eletroresistividade L8.



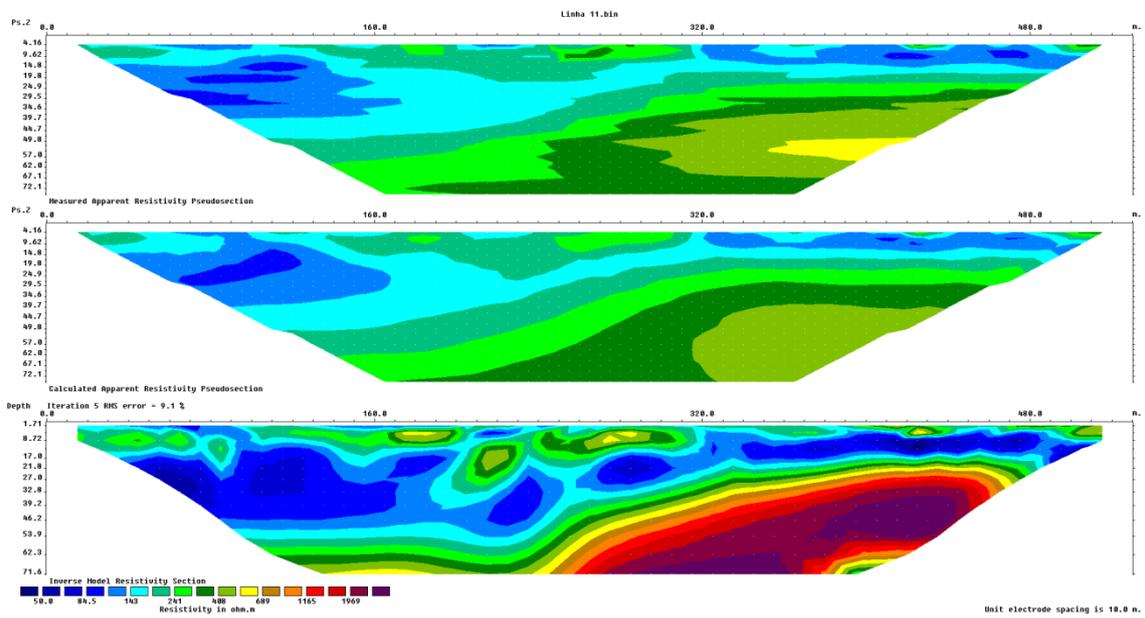
Anexo III– Seção de Eletrorresistividade L9.



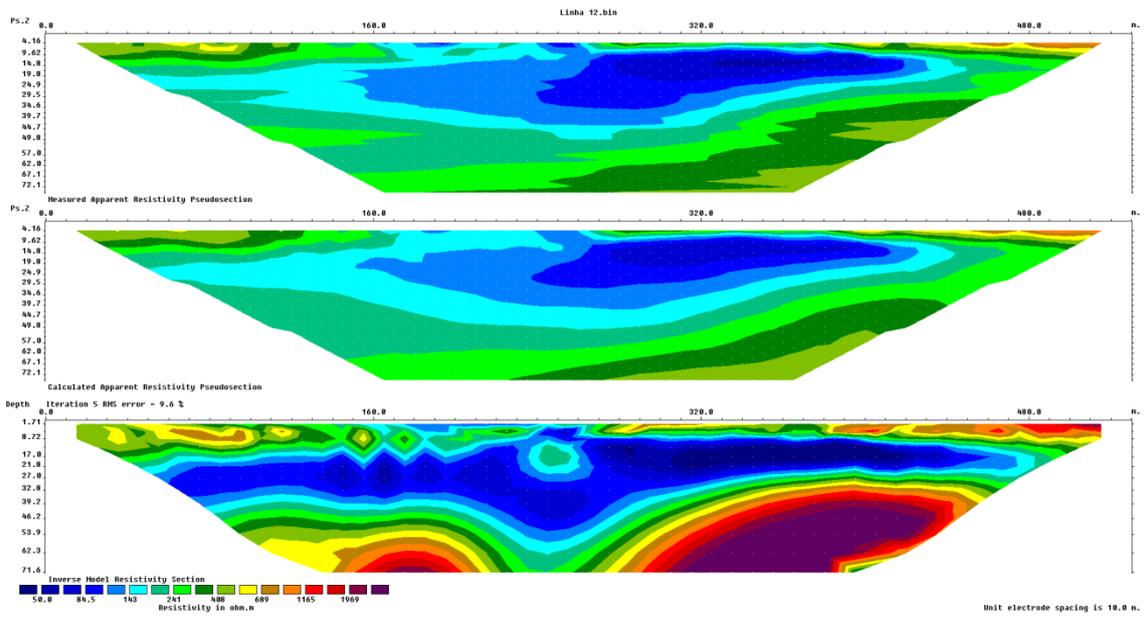
Anexo IIj– Seção de Eletrorresistividade L10.



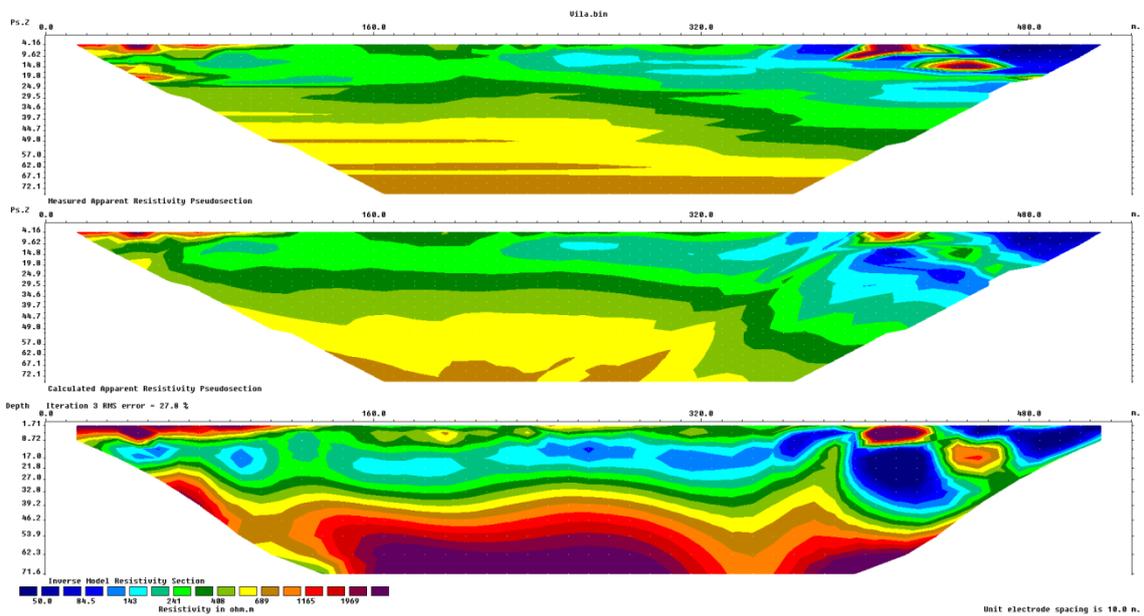
Anexo IIIk– Seção de Eletroresistividade L10a.



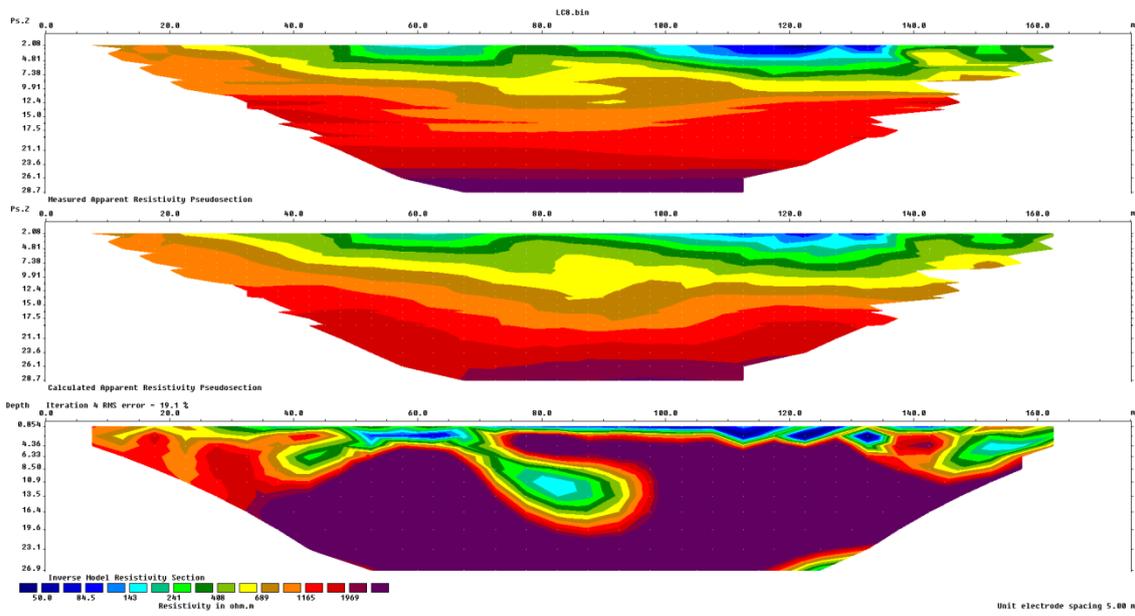
Anexo IIIl– Seção de Eletroresistividade L11.



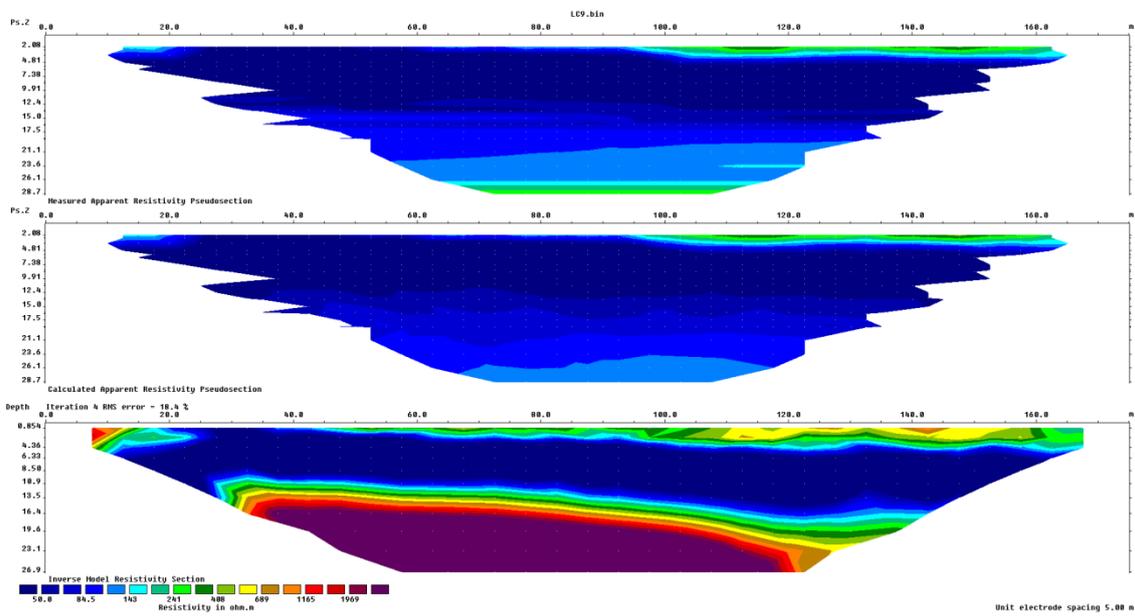
Anexo II m– Seção de Eletroresistividade L12.



Anexo II n– Seção de Eletroresistividade L13.



Anexo IIo– Seção de Eletrorresistividade L14.



Anexo IIp– Seção de Eletrorresistividade L15.