

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA TERRA

**CARACTERIZAÇÃO DA PLUMA DE
CONTAMINAÇÃO NUMA ANTIGA LIXEIRA COM O
MÉTODO DE RESISTIVIDADE ELÉCTRICA**

João Pedro Lóio Oliveira

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica
(Georrecursos)

Orientador: Doutor José António de Almeida

Lisboa
Outubro 2009

AGRADECIMENTOS

A elaboração desta tese, entre Fevereiro e Setembro de 2009, teve o contributo de várias pessoas às quais desejo agradecer.

Em primeiro lugar ao meu orientador, o Prof. Doutor José António Almeida pela orientação dada ao longo da elaboração da tese e nas várias idas ao campo, a criatividade e o rigor científico que sempre me inspiraram.

À Eng. Mara Lopes pelo apoio constante e contribuição com a sua experiência.

Ao Eng. Pedro Cabral pela total disponibilidade e cedência de dados da área de estudo sem a qual não seria possível a realização da presente dissertação.

Ao Paulo Quental pela camaradagem e ajuda indispensável nos trabalhos de campo.

Ao Prof. Doutor Paulo Caetano e Prof. Doutora Graça Brito pelo ambiente saudável e bem-disposto durante o tempo que trabalhei no Centro de Investigação em Ciência e Engenharia Geológica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

À Luísa Bragança, à Filipa Vieira Matias, Filipe Soares, Fernando Alves, Gonçalo Almeida e Catarina Gusmão pela amizade e apoio ao longo destes meses.

A todos os meus colegas e amigos que me acompanharam ao longo do meu percurso académico.

À minha família por serem como são.

RESUMO

O método de resistividade eléctrica é frequentemente utilizado na investigação e monitorização de plumas de contaminação, pois permite efectuar esta avaliação de forma não invasiva, célere e económica.

Neste trabalho enquadra-se, em primeiro lugar, este método de prospecção geofísica do ponto de vista teórico, dentro dos habitualmente utilizados em geofísica ambiental; descrevem-se os fundamentos físicos e matemáticos; distingue-se resistividade aparente de resistividade real e apresentam-se os dispositivos ou configurações de eléctrodos mais comuns; discute-se as aplicações do método, as suas vantagens e desvantagens.

Ainda do ponto de vista mais teórico, relaciona-se a geologia com a resistividade, indicando os factores geológicos que condicionam a resistividade eléctrica; e apresentam-se os valores de resistividade e condutividade de algumas rochas e outros materiais geológicos.

Relativamente ao caso de estudo, descreve-se a metodologia utilizada para caracterização da pluma contaminação numa antiga lixeira com o método de resistividade eléctrica. Apresentam-se os resultados obtidos pelo método de resistividade (dados *soft*) e faz-se a sua correlação com dados provenientes de métodos directos como as análises químicas (dados *hard*).

PALAVRAS-CHAVE: geofísica ambiental; método de resistividade eléctrica; dispositivos geoelectricos; pluma de contaminação.

ABSTRACT

The electrical resistivity geophysical method is one of the most used in research and monitoring of contamination plumes, as it enables a non-invasive, fast and economic evaluation.

In the present work, firstly, this method is described from the theoretical point of view, namely the physical and mathematical background; apparent resistivity is distinguished from true resistivity and the most used electrode arrays are detailed; the applications, advantages and disadvantages of the methods are also discussed.

From the theoretical point of view, the relationships between geology and resistivity are also presented, highlighting the geological factors that should influence electrical resistivity; common values of resistivity and conductivity of some rocks and other geological materials are listed.

In what concerns the case study, this thesis describes the methodology followed to characterize the contamination plume in an abandoned waste dump using the electrical resistivity method. The results are presented and the correlation between this soft data and that obtained from direct methods (hard data), such as drillings and piezometer wells, is established.

KEY WORDS: environmental geophysics; electrical resistivity method; electrode arrays; contamination plumes.

ÍNDICE GERAL

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento da Tese	1
1.2	Objectivos.....	2
1.3	Organização	2
2	ENQUADRAMENTO TEÓRICO	4
2.1	Geofísica	4
2.1.1	Geofísica ambiental.....	4
2.1.2	Métodos de prospecção	5
2.1.3	O problema directo e o problema inverso	7
2.1.4	Alguns trabalhos na área da Geofísica ambiental.....	8
2.2	Método de Resistividade Eléctrica	9
2.2.1	Introdução	9
2.2.2	Fluxo de corrente no solo	10
2.2.3	Resistividade aparente	12
2.2.4	Dispositivos geoelectricos.....	13
2.2.5	Profundidade de investigação.....	16
2.2.6	Técnicas de aquisição de dados.....	17
2.2.7	Áreas de aplicação	18
2.2.8	Capacidades e limitações do método de resistividade eléctrica.....	19
2.3	Relação entre Geologia e Resistividade	20
2.3.1	Fase sólida e fase líquida	20
2.3.2	Resistividade dos minerais e rochas.....	21
2.3.3	Efeito dos minerais argilosos	22
2.3.4	Efeito da temperatura na resistividade.....	23
2.3.5	Anisotropia da resistividade	23
2.3.6	Lei de Archie.....	23
3	METODOLOGIA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS.....	25
3.1	Introdução	25
3.2	Equipamento	26
3.3	Planeamento da Campanha de Prospecção.....	27
3.4	Definição da Sequência de Medições	29
3.5	Colocação dos Eléctrodos	30
3.6	Obtenção das Leituras.....	31
3.7	Transferência dos Dados.....	32
3.8	Inversão dos Dados de Resistividade Aparente.....	33

4	TRABALHO DE CAMPO.....	41
4.1	Enquadramento da Área de Estudo.....	41
4.1.1	Geologia.....	42
4.1.2	Hidrogeologia.....	44
4.1.3	Análises químicas.....	46
4.2	Aquisição e Processamento de Dados.....	47
4.3	Resultados.....	48
4.3.1	Perfil de resistividade 1.....	48
4.3.2	Perfil de resistividade 2.....	49
4.3.3	Perfil de resistividade 3.....	50
4.3.4	Perfil de resistividade 4.....	52
4.3.5	Perfil de resistividade 5.....	54
5	CONCLUSÕES.....	56
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
	ANEXOS.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Parâmetros usados na definição da resistividade de um material (Kearey <i>et al</i> , 1984).....	10
Figura 2.2 – Fluxo de corrente a partir de um único eléctrodo à superfície (adaptado de Kearey <i>et al</i> , 1984).	11
Figura 2.3 – Fluxo de corrente a partir de 2 eléctrodos à superfície (Kearey <i>et al</i> , 1984).	12
Figura 2.4 – Fracção de corrente que passa abaixo da profundidade Z para uma separação de eléctrodos L (Kearey <i>et al</i> , 1984).....	16
Figura 3.1 - Resistímetro <i>Syscal Junior Switch</i>	26
Figura 3.2 – Cabos e estacas	26
Figura 3.3 – Planeamento da prospecção com dados sintéticos (<i>Survey planner</i>).....	28
Figura 3.4 - Definição da sequência de medições no software <i>Electre II</i>	29
Figura 3.5 – Trabalho de campo	30
Figura 3.6 – Sequência de medições (adaptado de <i>IRIS Instruments</i>).....	31
Figura 3.7 – Software <i>Prosys II</i>	33
Figura 3.8 – Problema directo (adaptado de Aktarakçi, 2008).....	34
Figura 3.9 – Problema inverso (adaptado de Aktarakçi, 2008).....	34
Figura 3.10 – Definições iniciais (<i>EarthImager AGI</i>).....	37
Figura 3.11 – Definições do problema directo (<i>EarthImager AGI</i>)	38
Figura 3.12 – Definições do problema inverso (<i>EarthImager AGI</i>)	39
Figura 3.13 – Perfis de resistividade aparente medida, aparente calculada e modelo de resistividade (<i>EarthImager AGI</i>).....	40
Figura 4.1 - Área de estudo e localização dos perfis de resistividade, sondagens e piezómetros.....	41
Figura 4.2 – Colunas litológicas das sondagens S8, S16 e S10.	43
Figura 4.3 – Colunas litológicas das sondagens S12, S15 e S16	44
Figure 4.4 – Sentido de fluxo do aquífero	45
Figura 4.5 – Modelo de condutividade 1	48
Figura 4.6 – Modelo de condutividade 2	50
Figura 4.7 – Modelo de condutividade 3	51
Figura 4.8 – Modelos de condutividade 4.....	53
Figura 4.9 – Modelos de condutividade 5.....	55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Aplicabilidade de algumas técnicas geofísicas em diferentes problemas ambientais (adaptado de Sharma, 1997 <i>in</i> Martinho, 2002)	7
Tabela 2.2 – Dispositivos geoelectricos mais comuns e respectivas expressões para cálculo da resistividade (adaptado de Sharma, 1997).....	13
Tabela 2.3 – Adequação dos dispositivos geoelectricos a cada caso de estudo (Loke, 1999)	16
Tabela 2.4 – Resistividade e condutividade de alguns minerais e rochas (Telford <i>et al</i> , 1990; Aktarakçi, 2008)	21
Tabela 3.1 – Tempo de duração das medições	32
Tabela 4.1 – Profundidade do nível freático nos piezómetros	45
Tabela 4.2 – Análises químicas à água subterrânea.....	46

1 INTRODUÇÃO

1.1 *Enquadramento da Tese*

O tema desta dissertação insere-se na área da Engenharia Geológica e foca a prospecção Geofísica, em particular a aplicação do método de resistividade eléctrica à caracterização de uma pluma de contaminação numa antiga lixeira.

A Geofísica é uma ciência que aplica os princípios da Física, incluindo instrumentos e métodos, para estudar as propriedades do interior da Terra a partir da superfície ou muito próximo dela.

Nos últimos 50 anos, a Prospecção Geofísica tem sido muito utilizada para a prospecção de reservatórios de petróleo e gás e massas minerais, principalmente nas etapas iniciais da prospecção. A partir de meados do Século XX, os métodos geofísicos têm vindo a ser cada vez mais usados na investigação de áreas potencialmente contaminadas (solos e água subterrânea), principalmente antes da observação directa através de sondagens. Surge assim a sub-disciplina de Geofísica Ambiental (Reynolds, 1997 *in* Martinho, 2002).

Um dos problemas ambientais de que resulta a contaminação de solos e água subterrânea persistente em Portugal são os lixiviados das antigas lixeiras, onde foram depositados resíduos sólidos urbanos (RSU) de forma descontrolada e sem confinamento lateral e inferior. Estas lixeiras, apesar de encerradas até 2002, são e vão continuar a ser por muitas décadas a fonte de lixiviados com substâncias contaminantes que se dispersam em pluma a partir de uma fonte e que por isso representam impactes ambientais negativos para o meio envolvente.

O contraste existente entre as propriedades físicas do meio envolvente e dos contaminantes neste tipo de problemas ambientais tornam possível o uso dos métodos geofísicos, podendo apresentar vantagens em relação aos métodos directos que, dada a sua natureza directa e destrutiva, colocam em risco pessoas e bens durante os trabalhos de prospecção. Além disso, podem caracterizar de forma célere e pouco dispendiosa grandes áreas, embora com elevada incerteza. Por isso, as suas medições têm a designação de dados *soft* em oposição aos dados de determinações analíticas e sondagens por exemplo, mais rigorosos (dados *hard*).

Os principais métodos de prospecção geofísica são os gravimétricos, magnéticos, eléctricos (resistividade, potencial espontâneo, polarização induzida e magnetotélurico), electromagnéticos, sísmicos e radiométricos.

Segundo Sharma, 1997 *in* Martinho, 2002, o método de resistividade e o método de polarização induzida são os que apresentam maior aplicação para a caracterização de plumas de contaminação em solos. O contraste entre os valores de resistividade dos contaminantes e do meio envolvente é bem detectado por estes métodos.

1.2 Objectivos

Os objectivos deste trabalho são o estudo do método de resistividade eléctrica e sua aplicação na caracterização de plumas de contaminação numa antiga lixeira de RSU.

Pretende-se, numa primeira fase, fazer uma análise descritiva deste método, assinalando os trabalhos já realizados, os fundamentos teóricos, técnicas, e equipamentos e percebendo a sua aplicabilidade, capacidades e limitações.

Finalmente, faz-se uma aplicação do método eléctrico de resistividade a um caso de estudo de uma antiga lixeira, entretanto abandonada e confinada na parte superior. Para a caracterização da área envolvente foram feitos vários perfis de resistividade nas imediações que permitiram identificar as zonas mais contaminadas (lateralmente e em profundidade). Estes dados de resistividade foram ainda cruzados com a descrição geológica das sondagens e com alguns resultados analíticos recentes provenientes do programa de monitorização do local.

1.3 Organização

Enquadrada a dissertação e definidos os objectivos, a organização por capítulos e respectivos conteúdos é a seguinte:

No capítulo 1 enquadra-se o presente trabalho dentro das metodologias geofísicas, e na sub-disciplina Geofísica Ambiental, e são definidos os objectivos.

No capítulo 2 faz-se o enquadramento teórico do método de resistividade e aborda-se a relação entre a geologia e a resistividade.

No capítulo 3 descreve-se a metodologia usada para o caso de estudo, os equipamentos utilizados, e os fundamentos do tratamento de dados.

No capítulo 4, dedicado ao trabalho de campo, apresentam-se os resultados obtidos, sua interpretação e discussão.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões mais relevantes.

2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1 *Geofísica*

2.1.1 *Geofísica ambiental*

O estudo da Terra usando medições, à superfície, de parâmetros físicos é designado por Geofísica. Embora estando bastante ligada à Geologia pode distinguir-se desta pelo tipo de dados que são considerados. A Geologia envolve o estudo da Terra por via da observação directa das rochas, quer à superfície, quer proveniente de amostras recolhidas em furos. A Geofísica, por seu turno, aplica métodos indirectos baseados nos princípios da Física ao estudo da Terra.

A maior parte do conhecimento terrestre em profundidade, abaixo das que se podem atingir por intermédio de sondagens, é proveniente de observações geofísicas. A existência e as propriedades da crosta, manto e núcleo terrestres foram determinadas sobretudo por medições de ondas sísmicas originadas por sismos e por medições do campo magnético, gravítico e ainda propriedades térmicas. Trabalhando em diferentes escalas, os métodos geofísicos podem ser aplicados a uma vasta gama de estudos, que vão desde os estudos à escala global até à exploração de uma área limitada (levantamentos geofísicos).

Nos últimos 50 anos os métodos geofísicos foram desenvolvidos sobretudo para a prospecção de hidrocarbonetos e massas minerais. Mais recentemente, com a tomada de consciência das questões ambientais, os métodos de prospecção geofísicos passaram a ser utilizados com sucesso para a investigação deste tipo de problemas levando até ao desenvolvimento da sub-disciplina, “Geofísica Ambiental” (Reynolds, 1997 *in* Martinho, 2002).

Os métodos geofísicos são facilmente adaptados aos problemas ambientais, e os instrumentos e experiência acumulada podem continuar a ser usados, necessitando, de algumas adaptações como, por exemplo, a utilização de uma resolução espacial mais detalhada para atingir pequenas anomalias a pequenas profundidades.

Os problemas ambientais mais comuns no solo e na água subterrânea, que podem ter o contributo dos métodos geofísicos, são a localização de resíduos perigosos enterrados, a contaminação a partir de diferentes fontes e o planeamento de locais seguros para o depósito de resíduos industriais e domésticos (Martinho, 2002).

Um dos principais problemas ambientais identificados em Portugal consiste nas antigas lixeiras, locais onde foram depositados resíduos sólidos urbanos (RSU) de forma descontrolada e sem qualquer controlo ambiental. Em 2002, na sequência do Plano Estratégico dos Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU), as 341 lixeiras espalhadas por todo o país encontravam-se encerradas, no entanto, o facto de não ter sido efectuado uma reabilitação ambiental destes espaços, algumas lixeiras continuam a causar impactes ambientais negativos ao nível da contaminação dos solos, das águas subterrâneas e mesmo do ar.

A utilização dos métodos geofísicos a estes casos pode apresentar grandes vantagens em relação aos métodos directos, dado o seu carácter indirecto e pouco invasivo, evitando a propagação da poluição e afectação de pessoas e bens materiais durante os trabalhos de prospecção.

Além disso, a natureza tridimensional das manchas ou plumas de contaminação, tornam os métodos analíticos tradicionais, de que fazem parte a recolha e análise de solos, sedimentos, águas e observação de poços, muito limitativos. Grandes áreas e volumes podem ser inspeccionados com celeridade a baixo custo (Martinho, 2002).

O ponto fraco destes métodos é a sua incerteza e por isso tem a designação comum de dados *soft*. Os resultados obtidos devem ser sempre validados, usando outros métodos geofísicos na mesma área (por exemplo mais dois), e devem comparar-se os resultados com os dados provenientes de prospecção directa (dados *hard*) como sondagens por exemplo.

2.1.2 Métodos de prospecção

As técnicas geofísicas mais usadas no domínio ambiental incluem a gravimetria, magnética, electromagnética, georadar, resistividade e polarização induzida (IP) (Martinho, 2002).

Não é do âmbito desta dissertação a descrição de todos estes métodos geofísicos, no entanto, dá-se uma breve indicação da aplicação de cada uma delas dentro dos problemas ambientais segundo bibliografia consultada (Martinho, 2002):

- A gravimetria, que se baseia na medição da diferença de gravidade entre dois pontos com um gravímetro, é adequada para a detecção de cavidades.

- A prospecção magnética é importante na localização de resíduos enterrados. Os magnetómetros detectam alterações no campo magnético terrestre e, portanto, podem ser utilizados para localizar anomalias provocadas pela presença de objectos ferromagnéticos enterrados.
- Os métodos electromagnéticos, de resistividade e IP podem ajudar a delimitação de plumas de contaminação no subsolo. O método de resistividade mede a resistividade eléctrica do terreno e, por isso, é adequado para delimitar plumas de contaminação e localizar resíduos enterrados. A resistividade desempenha também um papel importante na caracterização em profundidade dos limites geológicos desde que as litologias presentes exibam forte contraste em termos de resistividade eléctrica.
- O georadar pode ajudar a definir limites de valas enterradas e outras infraestruturas subterrâneas instaladas. O sistema de georadar, através da emissão e recepção de impulsos electromagnéticos de curta duração, permite detectar e mapear áreas contaminadas, uma vez que muitos contaminantes provocam uma alteração mensurável da condutividade do solo e rocha em relação ao fundo local ou “background”.

A tabela 2.1 resume a aplicabilidade destes métodos de prospecção geofísica para vários problemas ambientais. Constata-se que as técnicas da resistividade e IP são aplicáveis a todos os problemas ambientais indicados.

Tabela 2.1 – Aplicabilidade de algumas técnicas geofísicas em diferentes problemas ambientais (adaptado de Sharma, 1997 *in* Martinho, 2002)

Técnica de prospecção	Estruturas e barreiras geológicas	Estruturas hidráulicamente activas	Lixeiras ou depósitos de resíduos	Plumas de contaminação
Gravimetria	+	0	-	0
Magnética	+	-	-	-
Potencial Espontâneo	0	+	0	-
Resistividade + IP	+	+	+	+
Electromagnética	0	+	+	0
Georadar	0	+	0	+
Radiometria	0	0	0	-
Refracção sísmica	+	0	-	0
Reflexão sísmica	+	0	-	-

+ aplicável; 0 aplicabilidade limitada; - não aplicável.

2.1.3 O problema directo e o problema inverso

Se a estrutura interna e as propriedades físicas da Terra fossem conhecidas com precisão em cada local, a intensidade de uma medição efectuada à superfície, poderia ser prevista com precisão e sem ambiguidades. Este é conhecido como o problema directo. Todavia, na prospecção geofísica o problema é o inverso deste, ou seja, pretende-se deduzir alguns aspectos da estrutura interna a partir de medições feitas à superfície. Enquanto os problemas directos têm uma única solução, os problemas inversos sofrem de uma ambiguidade inerente, ou de não unicidade.

Veja-se o exemplo das ondas sísmicas que podem ser usadas para determinar a profundidade de uma dada interface geológica. Mede-se o tempo de ida e volta da onda sísmica desde a superfície à interface e depois de volta à superfície. A conversão do tempo do percurso em profundidade requer o conhecimento da velocidade de propagação da onda no meio, que geralmente, não é conhecida. Se admitirmos uma dada velocidade obtemos uma estimativa da profundidade, mas esta representa apenas uma de muitas soluções possíveis.

A interpretação geofísica preocupa-se com a determinação das propriedades sub-superficiais que todas as soluções possíveis partilham ou em introduzir

constrangimentos realistas que restrinjam o número de soluções possíveis (Luís, 2005).

2.1.4 Alguns trabalhos na área da Geofísica ambiental

Ritsema (1984) efectuou um estudo na vizinhança de uma lixeira na Holanda utilizando o método de resistividade (*in* Sharma, 1997). A secção geológica estudada possui algumas zonas distintas: do topo para a base, a sequência consiste em areia limpa, areia contaminada, camada de argila impermeável, areia limpa, areia contaminada e água com elevada concentração de sais. Enquanto a areia limpa tem condutividade mais baixa (<55 mS/m), a areia contaminada é mais condutora (>200 mS/m). A água salinizada nas camadas de areia tem condutividade de 500 mS/m.

Chambers (1999) realizou um estudo em Inglaterra com o método de resistividade para investigar resíduos industriais armazenados em 3 pequenas escavações num substrato de argila. O estudo mostra áreas superficiais com elevada resistividade no topo das cavidades (condutividade <10 mS/m), possivelmente constituídas por materiais inertes de preenchimento. A maior profundidade, o estudo mostra áreas de baixa resistividade (condutividade >66 mS/m) que foram identificadas como áreas contaminadas pelos resíduos industriais.

Martinho (2002) estudou com o método de resistividade eléctrica e o método de polarização induzida, áreas contaminadas por duas lixeiras municipais (Ovar e Ílhavo), por um cemitério (Gafanha da Encarnação) e devido a um fenómeno de intrusão salina (Vagos). Os terrenos avaliados como contaminados apresentavam normalmente uma resistividade inferior a 50 ohm.m, ou seja, condutividade superior a 20 mS/m.

Cruz (2006) faz o estudo da pluma de contaminação de uma antiga lixeira com o método electromagnético de prospecção em Vila Moreira, Alcanena. Os terrenos contaminados apresentavam uma condutividade na ordem dos 110 mS/m, apresentando um contraste de 20 vezes em relação à condutividade dos terrenos da região.

Costa (2008) caracteriza e avalia ambientalmente a área do aterro sanitário de Palmela, recorrendo aos métodos electromagnético, resistividade eléctrica e georadar. Este último dá resultados inconclusivos devido à alta condutividade que a área apresenta. O método electromagnético mostrou fazer um bom mapeamento lateral de

toda a área, delimitando as zonas potencialmente mais contaminadas. O método da resistividade permitiu caracterizar a pluma de contaminação em profundidade. As zonas mais contaminadas apresentaram condutividade na ordem dos 1000 mS/m.

2.2 Método de Resistividade Eléctrica

2.2.1 Introdução

A utilização do método de resistividade eléctrica tem origem da década de 1920 com os trabalhos dos irmãos Schlumberger, sendo mais desenvolvidos na segunda metade do século XX.

No método de resistividade, é injectada corrente eléctrica no terreno através de um par de eléctrodos (A e B – eléctrodos de corrente) e é medida a diferença de potencial resultante entre outro par de eléctrodos (M e N – eléctrodos de potencial). A resistividade do terreno é então calculada a partir das distâncias entre os eléctrodos, corrente aplicada e diferença de potencial medida, com base na Lei de Ohm. O resultado é a resistividade do terreno em ohm.m ou o seu inverso, a condutividade em Siemen(S)/metro.

A corrente eléctrica consiste num fluxo de partículas portadoras de carga eléctrica. A quantidade de carga que flui por unidade de tempo é a intensidade de corrente (I). A unidade padrão no S.I. para medir a intensidade de corrente é o Ampere (A) em homenagem a André-Marie Ampère (1775-1836).

O potencial eléctrico é a capacidade de um corpo realizar trabalho, neste caso, atrair ou repelir cargas eléctricas. A tensão eléctrica é a diferença de potencial eléctrico entre dois pontos. A unidade de medida é o volt (V) em homenagem ao físico Alessandro Volta (1745-1827).

A resistividade de um material (no S.I. em ohm.m) é definida como a resistência entre as faces opostas de um cubo de aresta unitária desse material. Num cilindro condutor (Figura 2.1) de resistência δR , comprimento δL e área δA , a resistividade ρ é dada, por (Kearey *et al*, 1984):

$$\rho = \frac{\delta R \delta A}{\delta L} \quad (2.1)$$

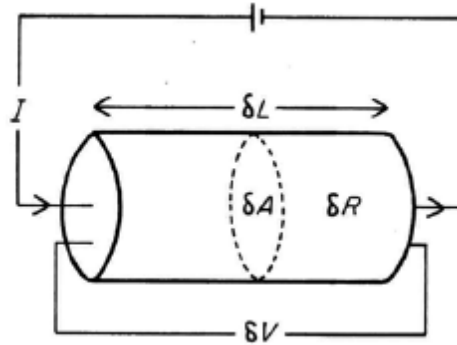


Figura 2.1 – Parâmetros usados na definição da resistividade de um material (Kearey *et al*, 1984).

2.2.2 Fluxo de corrente no solo

Considere-se o elemento cilíndrico da Figura 2.1. A intensidade de corrente I que atravessa o cilindro provoca uma queda de potencial entre as extremidades do elemento. A lei de Ohm diz que $\delta V = I\delta R$ donde a partir da equação (2.1) sabe-se que $\delta R = (\rho\delta L)/\delta A$, e substituindo:

$$\frac{\delta V}{\delta L} = \frac{\rho I}{\delta A} = \rho i \quad (2.2)$$

$\delta V/\delta L$, representa o gradiente de potencial através do elemento de volume (em volt/m) e i é a densidade de corrente em A/m^2 . Em geral, a densidade de corrente numa direcção qualquer é dada pela derivada parcial do potencial nessa direcção, dividida pela resistividade (Kearey *et al*, 1984).

Considere-se agora um único eléctrodo de corrente na superfície de um meio de resistividade uniforme. O circuito é fechado a grande distância do eléctrodo (Figura 2.2).

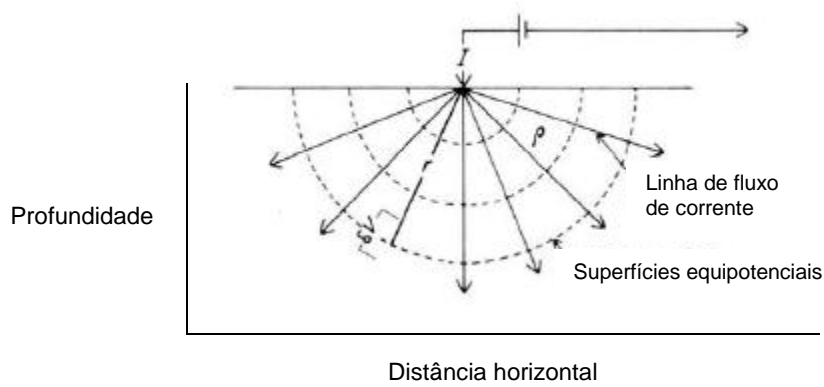


Figura 2.2 – Fluxo de corrente a partir de um único eléctrodo à superfície (adaptado de Kearey *et al*, 1984).

Num cenário de terreno homogéneo quanto à resistividade, a corrente flui radialmente a partir do eléctrodo de tal modo que a distribuição de corrente é uniforme em calotes hemisféricas centradas na fonte. À distância r do eléctrodo a calote terá uma área de $2\pi r^2$ e a densidade de corrente será:

$$i = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2.3)$$

Associando as equações (2.2) e (2.3) o gradiente de potencial associado à densidade de corrente i é dado por:

$$\frac{\delta V}{\delta r} = \rho i = \rho \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2.4)$$

O potencial V_r à distância r é obtido por integração:

$$V_r = \int_r^{\infty} \delta V = \int_r^{\infty} \frac{\rho I}{2\pi r^2} dr = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (2.5)$$

A equação (2.5) permite o cálculo do potencial num ponto qualquer do hemiespaço. As calotes da figura são equipotenciais (Kearey *et al*, 1984).

Considere-se agora o caso do outro eléctrodo de corrente estar a uma distância finita da fonte (Figura 2.3).

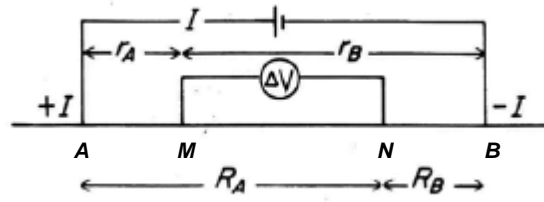


Figura 2.3 – Fluxo de corrente a partir de 2 eléctrodos à superfície (Kearey *et al*, 1984).

O potencial V_M no eléctrodo M é dado pela soma das contribuições devidas aos potenciais V_A e V_B dos eléctrodos de corrente A e B , $V_M = V_A + V_B$.

Da equação (2.5)

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \qquad V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right)$$

Os potenciais absolutos são difíceis de medir, por isso, o que se costuma medir é a diferença de potencial ΔV entre os eléctrodos M e N (Kearey *et al*, 1984).

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) - \left(\frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right] \quad (2.6)$$

Ou seja,

$$\rho = \frac{2\pi \Delta V}{I \left[\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) - \left(\frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right]} \quad (2.7)$$

2.2.3 Resistividade aparente

Quando o solo é homogêneo, a resistividade calculada pela equação anterior deverá ser constante e independente da configuração dos eléctrodos e da localização espacial. Porém, quando existem heterogeneidades, a resistividade irá variar com a posição relativa dos eléctrodos. O valor calculado chama-se então resistividade aparente ρ_a :

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} k \quad (2.8)$$


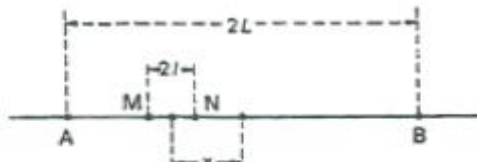
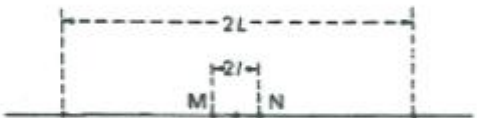


Onde k é o factor geométrico próprio de cada dispositivo geoelectrico.

A resistividade aparente não é uma propriedade física do terreno, ao contrário da resistividade verdadeira. Para estimar as resistividades verdadeiras, a partir dos dados de campo de resistividade aparente, tem de se recorrer a um processo designado por **inversão** dos dados.

2.2.4 Dispositivos geoelectricos

O valor da resistividade aparente depende da geometria dos eléctrodos, estando representadas na Tabela 2.2 as configurações mais comuns dos eléctrodos de corrente e potencial.

Tabela 2.2 – Dispositivos geoelectricos mais comuns e respectivas expressões para cálculo da resistividade (adaptado de Sharma, 1997)

<p>(a) </p> <p style="text-align: center;">WENNER</p>	$\rho_a = 2\pi a \left(\frac{\Delta V}{I} \right)$
<p>(b) </p> <p style="text-align: center;">GRADIENTE</p>	$\rho_a = \frac{\pi (L^2 - x^2)^2 \Delta V}{I (L^2 + x^2) 2l}$
<p>(c) </p> <p style="text-align: center;">SCHLUMBERGER</p>	$\rho_a = \frac{\pi L^2 \Delta V}{I 2l}$
<p>(d) </p> <p style="text-align: center;">POLO-DIPOLO</p>	$\rho_a = 2\pi a n(n+1) \frac{\Delta V}{I}$
<p>(e) </p> <p style="text-align: center;">DIPOLO-DIPOLO</p>	$\rho_a = \pi a n(n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{I}$

2.2.4.1 Wenner

O dispositivo de Wenner é um dos mais simples e mais utilizados. Aqui, os eléctrodos são igualmente espaçados ao longo de uma linha.

Esta configuração é relativamente sensível a variações verticais de resistividade (estruturas horizontais), contudo é menos sensível a variações horizontais (estruturas verticais). Comparando com as outras configurações, o dispositivo Wenner faz investigação até profundidades médias e é o que apresenta a força de sinal mais elevado. Este facto é importante quando o ruído de fundo é elevado (Loke, 1999).

2.2.4.2 Schlumberger

Neste dispositivo, os eléctrodos de corrente (A e B) são espaçados com distância superior à distância entre os eléctrodos de potencial (M e N). O factor $2l$ é a distância entre os eléctrodos de potencial M e N, e $2L$ é a distância entre os eléctrodos de corrente A e B.

É uma configuração sensível tanto para variações horizontais como verticais de resistividade. Em áreas em que se espera encontrar estruturas geológicas com variação vertical e lateral, este dispositivo é um bom compromisso entre o dispositivo Wenner e o Dipolo-Dipolo. A profundidade média de investigação é superior em 10%, aproximadamente, ao dispositivo de Wenner para o mesmo espaçamento entre os eléctrodos de corrente A e B. A força do sinal é menor do que no dispositivo de Wenner mas é maior do que no dipolo-dipolo (Loke, 1999)

Comparativamente ao dispositivo dipolo-dipolo, este tem a vantagem de ser mais sensível na região central sob os eléctrodos de potencial M e N. Tem ainda, maior cobertura horizontal que a configuração de Wenner, embora seja menor que a cobertura horizontal da configuração dipolo-dipolo (Loke, 1999).

2.2.4.3 Dipolo-dipolo

Este arranjo tem sido muito utilizado em estudos de resistividade e potencial induzido (IP). O espaçamento entre os eléctrodos de corrente A e B e de potencial M e N é dado por " a ". Considera-se ainda um factor de distância " na " entre os dipolos de corrente e os de potencial. Neste tipo de dispositivo o espaçamento " a " é mantido inicialmente constante; para aumentar a profundidade de investigação o espaçamento é aumentado de um factor " n ", que não deve ultrapassar o valor de 8 (Loke, 1999).

A sensibilidade desta configuração é maior sob os dipolos de corrente A e B e de potencial M e N, e menor no centro do dispositivo. É também mais sensível a variações horizontais na resistividade mas menos sensível a variações verticais. Este facto faz dele um bom dispositivo para detectar estruturas verticais como diques e cavidades mas é pouco indicado para detectar estruturas horizontais como estruturas geológicas com geometria horizontal. A profundidade média de investigação depende do factor “ n ” assim como do valor de “ a ”. Em geral atinge menores profundidades que o dispositivo de Wenner (Loke, 1999)

Uma possível desvantagem deste dispositivo é a fraca força de sinal para valores elevados do factor “ na ”. A voltagem é inversamente proporcional ao cubo do factor “ na ”. Isto significa que para a mesma corrente, a voltagem medida diminui cerca de 200 vezes com o aumento do factor “ n ” para o valor 6. Uma técnica para ultrapassar esta limitação consiste em aumentar o espaçamento “ a ”.

Para usar este dispositivo eficazmente, o resistímetro deve rejeitar bem o ruído de fundo, e deve estabelecer-se um bom contacto dos eléctrodos com o solo (Loke, 1999).

2.2.4.4 Polo-polo

Este dispositivo é o mais adequado para prospecção a 3D. Na prática o dispositivo polo-polo, com um eléctrodo de corrente e outro de potencial não existe. Para fazer uma aproximação, o segundo eléctrodo de corrente e de potencial devem ser colocados a uma distância 20 vezes maior do que o espaçamento entre os eléctrodos A e M. O efeito produzido pelos eléctrodos B e N é proporcional ao espaçamento a que se encontram dos dois eléctrodos centrais e por isso o seu efeito não é levado em conta. É importante manter a distância de 20 vezes o maior espaçamento entre A e M para assegurar um erro inferior a 5% (Loke, 1999).

Em campanhas de prospecção onde o espaçamento entre eléctrodos é muito elevada pode haver problemas práticos para encontrar localizações adequadas para os eléctrodos B e N. Outra desvantagem tem a ver com o facto de os eléctrodos de potencial estarem tão afastados que ficam susceptíveis ao ruído telúrico o que diminui a qualidade das medições. Por essa razão é mais utilizado em campanhas onde o espaçamento entre eléctrodos é menor (inferior a 10 metros). É muito utilizado em arqueologia com espaçamentos entre eléctrodos pouco elevados.

A vantagem deste dispositivo é a maior cobertura horizontal e a grande profundidade de investigação (Loke, 1999).

2.2.4.5 Selecção do dispositivo a considerar

Para ajudar à selecção do melhor dispositivo a aplicar em cada caso de estudo apresenta-se a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Adequação dos dispositivos geoelectricos a cada caso de estudo (Loke, 1999)

	Identificação de estruturas horizontais	Identificação de estruturas sub-verticais	Profundidade de investigação	Resposta do sinal	Cobertura horizontal
Wenner	A	C	B	A	C
Schlumberger	B	B	B	B	B
Dipolo-dipolo	C	A	B	C	A
Polo-polo	C	C	A	B	A

A, B e C do mais adequado para o menos adequado.

2.2.5 Profundidade de investigação

Num solo homogéneo, a profundidade de penetração da corrente aumenta com a separação dos eléctrodos de corrente. A Figura 2.4 mostra a percentagem de corrente que flui abaixo de uma dada profundidade Z em função da razão de separação L dos eléctrodos de corrente e da profundidade Z .

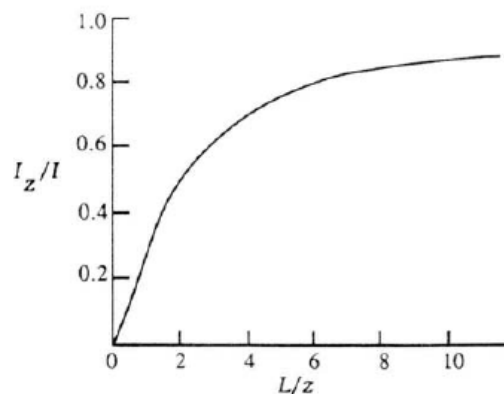


Figura 2.4 – Fracção de corrente que passa abaixo da profundidade Z para uma separação de eléctrodos L (Kearey *et al*, 1984).

Quando $L=Z$ cerca de 30% da corrente flui abaixo de Z e quando $L=2Z$ cerca de 50% flui abaixo de Z . Assim, para pequenos valores de L/Z só a parte superficial é sondada, enquanto para grandes valores da relação L/Z só as maiores profundidades são sondadas. A separação dos eléctrodos de corrente tem que ser escolhida de modo a que seja injectada corrente no solo até à profundidade requerida e deve ser no mínimo o dobro e preferencialmente mais do que três vezes a profundidade (Reynolds, 1997).

Além do afastamento entre eléctrodos, outros factores, como a configuração escolhida, características dos terrenos e capacidade do resistímetro, influenciam a qualidade das medições em profundidade. Para fazer prospecção a grandes profundidades a situação ideal é possuir um equipamento que injecte maior intensidade da corrente e o terreno possuir resistência baixa entre os eléctrodos de corrente (Benard, 2003).

2.2.6 Técnicas de aquisição de dados

O objectivo dos estudos de resistividade eléctrica é estimar a distribuição espacial de resistividade, quer seja na vertical quer seja na horizontal, ou ambas.

As sondagens eléctricas verticais (SEV) permitem medir variações verticais nas propriedades eléctricas numa dada secção geológica. Os dados das sondagens eléctricas obtêm-se com vários espaçamentos entre eléctrodos, geralmente, segundo uma progressão geométrica (Martinho, 2002). Esta técnica considera um modelo a 1D, e tem dado resultados satisfatórios em situações onde se procura detectar o nível freático, por exemplo. No entanto, esta técnica é muito limitada porque na geologia é frequente encontrar variações laterais da natureza dos materiais e respectivos valores de resistividade (Loke, 1999).

Por outro lado, para se estimar as variações horizontais, o espaçamento entre eléctrodos mantém-se constante, deslocando todo o arranjo de sítio ao longo da linha de prospecção. Neste caso, perde-se a informação acerca das variações em profundidade e a interpretação deve ser meramente qualitativa (Loke, 1999).

Para representar a distribuição vertical e horizontal de resistividade são geralmente utilizadas as pseudosecções. Nestes modelos a 2D, é assumido que não existem variações na direcção perpendicular à linha de prospecção. Esta é das técnicas mais utilizadas funcionando, normalmente, com uma linha com vários eléctrodos e um

resistivímetro com capacidade para alterar automaticamente as funções dos eléctrodos responsáveis pela medição. São obtidos valores de resistividade a várias profundidades e em vários pontos ao longo da linha de prospecção.

Neste trabalho consideraram-se modelos 2D para a distribuição de resistividade, representados sob a forma de perfis de resistividade.

2.2.7 Áreas de aplicação

Segundo Hasan Aktarakçi (2008) as aplicações mais frequentes e eficazes do método de resistividade são:

- Detecção de cavidades;
- Caracterização geotécnica;
- Prospecção de águas subterrâneas;
- Mapas litológicos;
- Prospecção de massas minerais;
- Investigações arqueológicas;
- Detecção de plumas de contaminação;
- Monitorização de terrenos sujeitos a técnicas de remediação;
- Monitorização de processos subterrâneos como recarga de aquíferos, infiltração, intrusão salina, túneis e infiltração em barragens.

No que respeita ao estudo de locais de resíduos perigosos ou não perigosos, o método pode ser usado para (Martinho, 2002):

- Localizar e delimitar plumas de contaminação;
- Estabelecer a direcção e fluxo de propagação de plumas de contaminação (se forem feitas campanhas sucessivas);
- Localizar locais de resíduos enterrados;
- Investigar a qualidade da água subterrânea.

2.2.8 Capacidades e limitações do método de resistividade eléctrica

As principais capacidades e limitações do método da resistividade eléctrica são as seguintes (adaptado de Martinho, 2002):

Capacidades

- Os perfis de resistividade podem ser usados para detectar e delimitar plumas de contaminação em associação com as características hidrogeológicas tais como o nível freático;
- As sondagens de resistividade podem estimar a profundidade, espessura e resistividade das camadas;
- Os dados das sondagens e dos perfis podem ser avaliados no campo;
- Os valores de resistividade podem ser usados para identificar a provável composição geológica de uma camada ou para estimar a condutividade de uma pluma;
- A profundidade de lixeiras e locais de depósito de resíduos enterrados podem ser estimadas.

Limitações

- O método é muito susceptível ao ruído provocado por cercas metálicas, tubos e heterogeneidade geológica;
- A interpretação quantitativa exige o uso de curvas padrão e/ou programas de computador e experiência na sua utilização;
- O método é relativamente lento e exige dois ou três operadores no campo.

2.3 *Relação entre Geologia e Resistividade*

2.3.1 Fase sólida e fase líquida

Uma rocha é um material heterogéneo constituído geralmente por uma fase sólida (matriz) e uma fase líquida ou gasosa que lhe preenche os poros. O comportamento eléctrico da rocha vai assim depender de factores como a resistividade intrínseca da matriz, porosidade, textura e distribuição dos poros, resistividade do líquido intersticial e processos que ocorrem nas superfícies de contacto entre a matriz e as fases fluidas.

Existem vários processos físicos que permitem a condução eléctrica numa rocha, são eles a condução electrónica, electrolítica, e dieléctrica. A condução electrónica corresponde ao mecanismo dos condutores metálicos que têm electrões livres; a condução electrolítica tem como portadores os iões que se movimentam (lentamente); e a condução dieléctrica verifica-se nos condutores pobres ou isoladores com poucos electrões disponíveis (Telford *et al*, 1990).

Na natureza, a resistividade dos minerais é muito variável, sendo os extremos a prata nativa com resistividade muito baixa ($1,6 \times 10^{-8} \Omega.m$) e o enxofre puro com resistividade elevada ($10^{16} \Omega.m$). De uma forma muito geral, as rochas ígneas têm resistividades mais elevadas e as rochas sedimentares resistividades mais baixas (Reynolds, 1997).

O comportamento dos minerais agrupa-se, quanto à resistividade, no sentido crescente de resistividade, do seguinte modo: em primeiro lugar o grupo dos metais, em que predomina a condução electrónica e onde a resistividade varia entre $10^{-6} \Omega.m$ e $10^{-4} \Omega.m$; em segundo lugar temos o grupo dos minerais cujo comportamento se assemelha aos semi-condutores, que inclui materiais bons condutores (como a covelite) e maus condutores (como o quartzo); neste grupo a condutividade é muito influenciada pela temperatura, aumentando com ela. O terceiro grupo é formado pelos minerais com condutividades muito baixas apresentando habitualmente valores de resistividade superiores a $10^7 \Omega.m$.

Os líquidos que preenchem total ou parcialmente os poros das rochas são habitualmente soluções de sais minerais. A resistividade destas soluções varia na razão inversa da concentração de sal dissolvido, pelo que, em condições normais, as águas mais profundas apresentam resistividades inferiores às águas superficiais, uma vez que estão mais fortemente mineralizadas. Valores típicos para as águas

subterrâneas superficiais variam entre 0,01 Ω .m e 10 Ω .m, enquanto as águas fluviais, mais fracamente mineralizadas apresentam valores superiores a 20 Ω .m. Os poros das rochas podem ainda conter soluções não aquosas, como por exemplo os hidrocarbonetos, que neste caso exibem resistividade muito elevada (Reynolds, 1997).

2.3.2 Resistividade dos minerais e rochas

A prospecção geofísica pelo método da resistividade dá uma imagem da distribuição da resistividade no subsolo. Para converter esta imagem num modelo geológico são necessários conhecimentos acerca dos valores típicos de resistividade dos diferentes materiais no subsolo que podem ser consultados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Resistividade e condutividade de alguns minerais e rochas (Telford *et al*, 1990; Aktarakçi, 2008)

Rocha	Resistividade (ohm.m)	Condutividade (mS/m)
Granito (húmido e seco)	$4,5 \times 10^3 - 1,3 \times 10^6$	0,0008 – 0.22
Gabro	$10^3 - 10^6$	0,001 - 1
Xisto	$20 - 10^4$	0,1 - 50
Mármore	$100 - 2,5 \times 10^8$	0,000004 - 10
Quartzito	$10 - 2 \times 10^8$	0,000005 - 100
Argilito	10 - 800	1,25 - 100
Calcário	$50 - 10^7$	0,0000001 - 20
Argila (húmida e seca)	1 - 100	10 - 1000
Areia (húmida e seca)	$1 - 10^4$	0,1 - 1000
Água doce (20° C)	80	12,5
Água subterrânea	0,5 - 300	3,3 - 2000
Água salgada	0,1 - 1	1000 - 10000
Água do mar	0,2	5000
Ferro	9×10^{-8}	1.1×10^4
Cobre	2×10^{-8}	5×10^4
Solo	1 - 10	100 - 1000

Para converter os valores de resistividade em condutividade é feita a conversão do seguinte modo:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{100} = 0,01 \text{ S/m} = 10 \text{ mS/m}$$

A resistividade dos minerais e das rochas é muito variável, podendo ter várias ordens de magnitude. Comparando com outros métodos geofísicos, os valores de densidade usados na gravimetria variam no máximo um factor de 2, e as velocidades das ondas

sísmicas não variam mais que um factor de 10. Este facto faz da resistividade um método muito versátil dentro das técnicas da geofísica (Loke, 1999).

As rochas sedimentares caracterizam-se por baixa resistividade, quando comparadas com outras variedades. Contudo, algumas rochas sedimentares possuem resistividades muito elevadas. Estão neste caso as areias de duna quando secas e as que possuem muito baixa porosidade como o gesso. As argilas desempenham um papel muito particular no comportamento eléctrico deste tipo de rochas; na presença de água as argilas apresentam baixos valores de resistividade, pelo efeito combinado da água e da polarização superficial das partículas de argilas.

As rochas ígneas apresentam valores elevados de resistividade eléctrica, em particular, devido à sua porosidade muito baixa.

As rochas metamórficas apresentam valores de resistividade que se situam entre os valores apresentados pelas rochas sedimentares e as ígneas. Como a porosidade e o conteúdo em água dependem do grau de metamorfismo, a resistividade efectiva aumenta com aquele. Existem excepções associadas, por exemplo, à presença de grafite, que conduz ao aumento da condução eléctrica e, como tal, à diminuição da resistividade efectiva. As rochas metamórficas apresentam frequentemente valores elevados de anisotropia de resistividade (Reynolds, 1997).

2.3.3 Efeito dos minerais argilosos

As partículas de argila fornecem, em relação ao percurso electrolítico, um percurso alternativo de baixa resistência para a condução de electricidade. A origem da condutividade anormalmente elevada dos minerais de argila assenta na distribuição de catiões em torno desses minerais. As dimensões finitas dos catiões impedem a formação de uma camada única em torno do mineral. Em vez disso, forma-se uma camada dupla constituída por uma camada fixa nas imediações do mineral e uma camada difusa, cuja densidade decai exponencialmente com a distância à camada fixa. Contrariamente à camada fixa, a camada difusa tem liberdade para se mover quando sujeita à acção de um campo eléctrico exterior. O efeito resultante é o aumento da condutividade, que neste caso se chama condutividade superficial (Luís, 2005).

2.3.4 Efeito da temperatura na resistividade

A resistividade das soluções intersticiais varia com a temperatura: para temperaturas mais elevadas é maior a energia cinética média dos componentes iónicos, o que aumenta a capacidade de condução iónica. A expressão 2.10 descreve esta variação:

$$\rho(T) = \frac{\rho(18^\circ)}{1 + \alpha (T - 18^\circ)} \quad (2.10)$$

onde $\rho(18^\circ)$ representa a resistividade a 18° Celsius e α é um coeficiente experimental cujo valor normal é de $0,025 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (Miranda, 2009)

2.3.5 Anisotropia da resistividade

A resistividade da matriz depende da sua textura e pode – em função dela – demonstrar anisotropia. Numa matriz isotrópica, onde a estrutura porosa é aleatória, a resistividade não depende da direcção em que é medida. Numa matriz onde a forma dos grãos possui direcções preferenciais, a resistividade varia com a direcção, devendo neste caso ser definido um coeficiente de anisotropia que é habitualmente calculado da seguinte forma:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}} \quad (2.11)$$

Onde ρ_n e ρ_t representam as resistividades máximas e mínimas medidas em direcções perpendiculares (Reynolds, 1997)

2.3.6 Lei de Archie

A matriz rochosa é pior condutora do que as soluções aquosas que ocupam os seus poros. Por esta razão, o comportamento eléctrico das rochas que ocupam as camadas superiores da crosta é condicionado essencialmente pela fase líquida. Uma forma geral da Lei de Archie estabelece uma expressão empírica para a resistividade efectiva de uma rocha cujos poros estão parcialmente preenchidos por água (Reynolds, 1997):

$$\rho = a\rho_0\phi^{-m}s^{-n} \quad (2.9)$$

onde ρ_0 é a resistividade da água intersticial, \emptyset é a porosidade da rocha, s é a fracção dos poros preenchidos com água e a , n e m são coeficientes empíricos específicos de cada rocha. O valor de a varia entre 0,5 e 2,5; n é próximo de 2,0 para o caso em que mais de 30% dos poros se encontram preenchidos e m depende do grau de compactação da rocha – que pode ser função da respectiva idade – variando entre 1,3 para as formações recentes, 1,9 para formações do Paleozóico, com o máximo de 2,5. A razão entre a resistividade efectiva e a resistividade da água intersticial denomina-se “factor de formação”. Esta expressão só é válida na ausência de argilas.

Dado que a compactação aumenta com a profundidade o conteúdo em água das rochas irá também diminuir, de tal forma que para grandes profundidades a condução iónica deixa de ser significativa, passando as rochas a comportar-se essencialmente como um semi-condutor.

3 METODOLOGIA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

3.1 Introdução

Para realizar um estudo com o método de resistividade, obtendo os dados da distribuição da resistividade ao longo de pseudosecções, o equipamento mais utilizado é um resistímetro multi-eléctrodos, que está ligado a um grande número de eléctrodos (24, 48, 72, ...). Este equipamento tem capacidade para efectuar medições entre os vários eléctrodos de forma automática, depois de definida, pelo operador, a sequência de medições (dispositivo, espaçamento e outros parâmetros).

Num resistímetro, depois de inserida a sequência de medições há que colocar os eléctrodos ao longo da linha escolhida respeitando o espaçamento previamente definido. Posteriormente são efectuadas as leituras e guardadas temporariamente, faz-se a transferência dos dados para um computador e inicia-se o seu processamento e inversão que transformará os dados de resistividade aparente em resistividade real.

A obtenção de um mapa com a distribuição da resistividade em profundidade envolve os seguintes passos:

1. Escolha do equipamento (caso seja possível)
2. Planeamento da prospecção
3. Escolha do dispositivo eléctrico
4. Colocação dos eléctrodos no solo e ligação dos cabos
5. Obtenção e registo das leituras
6. Transferência dos dados para o computador
7. Processamento por inversão

3.2 Equipamento

O resistímetro é o equipamento principal para realizar um estudo de resistividade do subsolo. Este aparelho é responsável pela injeção de corrente eléctrica no subsolo, através dos dois eléctrodos de corrente (A e B) e pela medição de diferença de potencial entre os eléctrodos de potencial (M e N).

Actualmente são utilizados resistímetros multi-eléctrodos que fazem a troca automática entre os eléctrodos responsáveis pelas medições. Permite ainda o armazenamento temporário das leituras para posteriormente serem transferidos para o software de processamento. Existem resistímetros com vários canais (*multi-channel*) permitindo fazer a várias medições simultâneas de diferença de potencial para a mesma injeção.

No trabalho de campo efectuado, utilizou-se um resistímetro da *IRIS Instruments*, o *Syscal Junior Switch*, equipado com cabos para a utilização de 48 eléctrodos. Possui potência de 100 W e 400 V de voltagem.



Figura 3.1 - Resistímetro *Syscal Junior Switch*



Figura 3.2 – Cabos e estacas

Os cabos utilizados têm, cada um, 120 metros de comprimento, sendo possível usar qualquer espaçamento entre eléctrodos igual ou menor que 5 metros. Os cabos têm na sua constituição cobre, pesando cada um cerca de 12 kg. Para facilidade de utilização são transportados em bobines.

Os 48 eléctrodos utilizados são constituídos por estacas de aço e são ligados ao cabo principal por cabos de cobre.

Em síntese, o material necessário e recomendável para um trabalho de campo como o que foi desenvolvido neste trabalho é o seguinte:

- Resistímetro;
- Bateria externa;
- Eléctrodos (estacas de aço);
- Cabo sísmico;
- Cabos eléctricos para ligação entre as estacas e o cabo principal;
- Marreta;
- Fita métrica;
- Garrafão com água e sal;
- Computador portátil para transferência e interpretação dos dados;
- Caderno de campo.

3.3 Planeamento da Campanha de Prospecção

Antes de se iniciar um levantamento geofísico com o método de resistividade eléctrica, é necessário conhecer, minimamente, o problema ambiental em causa e ter alguns conhecimentos do substrato no local. Uma das condições fundamentais para o sucesso da utilização deste método é existir contraste entre as propriedades físicas do meio e as dos contaminantes ou alvos a detectar.

No presente caso de estudo, o problema ambiental em causa é a existência de uma pluma de contaminação oriunda de uma lixeira, que já foi identificada anteriormente. Esta pluma localiza-se em terrenos arenosos com intercalações argilosas de espessuras diversas. À partida, a pluma de contaminação ocupa preferencialmente os terrenos arenosos e apresentando baixa resistividade contrastando com os materiais livres de contaminação que têm resistividade mais elevada.

Como software utilizou-se o *EarthImager 2D* da *Advanced Geoscience Inc. (AGI)*. Este programa, para além de efectuar a inversão dos dados de campo, tem a vantagem de se poder fazer o planeamento do levantamento e sua aplicabilidade, com base em dados sintéticos. Esta funcionalidade denomina-se *Survey planner*.

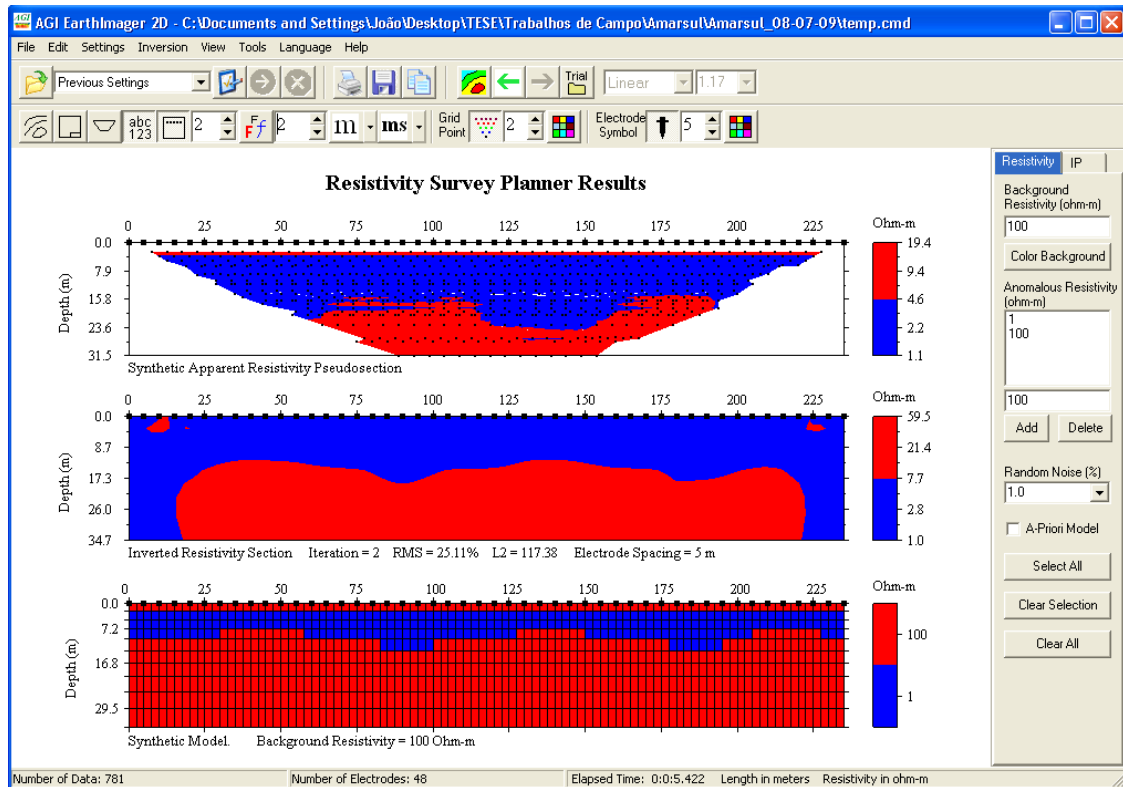


Figura 3.3 – Planeamento da prospecção com dados sintéticos (*Survey planner*)

Com base nas colunas litológicas das sondagens na área de estudo, criou-se um modelo sintético (Figura 3.3), admitindo-se uma zona constituída por areias entre os 2 e 10 metros de profundidade com resistividade mais baixa (1 ohm.m), dado que se apresenta contaminada, e outra zona a maior profundidade, que diz respeito às zonas sob as formações argilosas que por não apresentarem contaminação, têm resistividade mais alta (100 ohm.m).

A partir deste modelo sintético, é feita uma simulação directa para estimar o mapa com a distribuição dos dados de resistividade aparente que se obteriam testando um ou vários dispositivos e espaçamentos entre eléctrodos.

De seguida é feita a inversão deste mapa para se obter o mapa da distribuição de resistividade. Ao comparar este mapa com o modelo sintético usado, pode concluir-se se as estruturas geológicas (ou hipotética pluma de contaminação) que se pretende identificar são evidenciadas pelo método de resistividade.

Neste caso, com o dispositivo dipolo-dipolo, espaçamento de 5 metros entre eléctrodos, e o modelo sintético admitido, os resultados da previsão da prospecção

foram satisfatórios, evidenciando que seria possível identificar lateralmente e em profundidade uma pluma de contaminação.

3.4 Definição da Sequência de Medições

No caso de estudo, para a definição da sequência de medições, utilizou-se o software *Electre II*. Neste software são definidos parâmetros como a configuração dos eléctrodos (*Array type*), o espaçamento entre eles (*Electrode spacing*) e o número de níveis a estudar em profundidade (*Depth level*).

Além disso, podem ser escolhidos outros parâmetros mais específicos como, o tempo de duração de cada injeção de corrente (500 ms, 1000 ms, ...), a percentagem de erro máxima admissível (*Q max*), e o número mínimo e máximo de medições para cada leitura (*stack min/max*).

Para definir a sequência de medições e os parâmetros referidos seguem-se os seguintes passos: *Set of Sequences – New*.

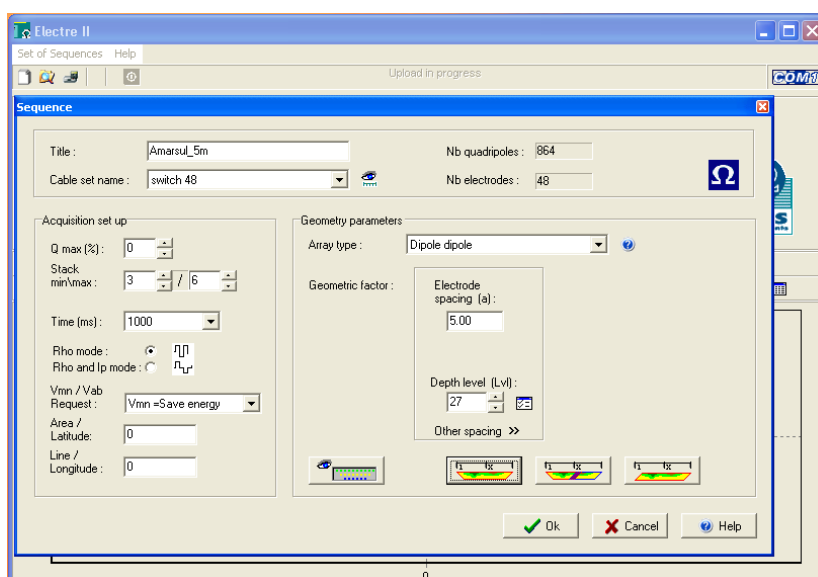


Figura 3.4 - Definição da sequência de medições no software *Electre II*

Após definição dos parâmetros indicados, procede-se à transferência da sequência de medições para o resistivímetro. Para esta operação utiliza-se a opção *Save a set of sequences*.

3.5 Colocação dos Eléctrodos

Depois da observação de certas condições existentes no terreno como, topografia pouco acidentada, camada de solo facilmente penetrável pelas estacas, pouca vegetação e árvores que podem ser um obstáculo à colocação dos eléctrodos e manutenção de uma linha recta e, finalmente, ausência de factores externos que perturbem a qualidade das medições como, estruturas metálicas à superfície e postes de electricidade, pode iniciar-se a colocação dos eléctrodos.

Estes são espaçados com os intervalos previamente definidos e devem ser correctamente introduzidos no terreno. É utilizada uma marreta e fita métrica para esta operação. De seguida é esticado o cabo ao longo da linha de prospecção e feita a ligação entre o cabo, os eléctrodos e o resistímetro. Este é colocado a meio da linha de prospecção.

A colocação e retirada dos eléctrodos e dos cabos pode ser morosa e fisicamente exigente devido às distâncias percorridas (no caso de grandes espaçamento entre os eléctrodos) e à natureza do trabalho, pelo que, é recomendável, no mínimo, uma equipa de três pessoas.



Figura 3.5 – Trabalho de campo

Seguidamente é importante verificar se todas as ligações e eléctrodos estão correctamente instalados e a transmitir corrente ao solo. No aparelho utilizado, esta operação é feita muito rapidamente com a função *RS CHECK*. Os valores de resistência medidos não devem ultrapassar o valor de 20 kohm. Para melhorar o contacto entre os eléctrodos e o terreno deve molhar-se os eléctrodos e o solo envolvente com água salgada que, como se sabe, apresenta elevada condutividade.

Após terem sido efectuadas todas as medições, devem retirar-se primeiro os eléctrodos e só depois o cabo, pois estes ficam facilmente escondidos na vegetação.

3.6 Obtenção das Leituras

Como foi dito anteriormente, no resistivímetro utilizado a obtenção das medições é automática, não tendo o operador que intervir durante o processo de aquisição de medições.

A Figura 3.6 representa a forma como está definida a sequência de medições no resistivímetro para o dispositivo dipolo-dipolo.

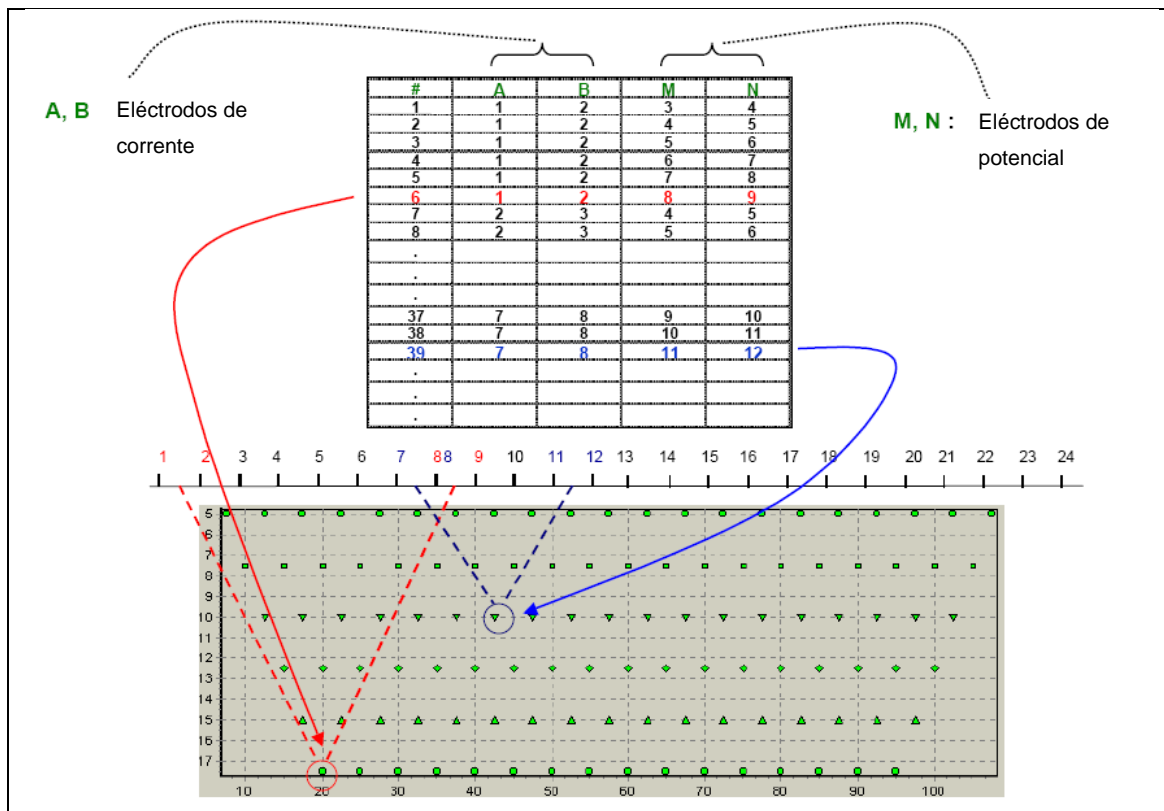


Figura 3.6 – Sequência de medições (adaptado de *IRIS Instruments*)

O tempo de duração das medições depende de vários factores, desde o tipo de resistivímetro, configuração dos eléctrodos, profundidade de investigação (*Depth level*), duração de cada injeção de corrente e número de medições (*stacks min/max*). Se a resistência do terreno junto aos eléctrodos for elevada os erros são maiores e poderão ser feitas mais leituras levando a que a duração das medições seja mais elevada.

A Tabela 3.1 mostra a duração das medições de alguns perfis efectuados durante o trabalho de campo.

Tabela 3.1 – Tempo de duração das medições

Dispositivo	Perfil	Nº de medições total	Nº de medições (min/max)	Tempo de impulso (ms)	Tempo de prospecção (hh:mm)
Dipolo-dipolo	PR1	944	3 a 6	1000	2:15
	PR2	944	2 a 6	2000	4:35
	PR3	657	1 a 2	250	0:15

3.7 Transferência dos Dados

Terminada a recolha dos dados pode fazer-se, imediatamente e no próprio local, a sua transferência para um computador portátil, processar os dados e obter-se um mapa da distribuição da resistividade ou da condutividade.

No caso de estudo, e para o equipamento utilizado, é necessário um software próprio (*PROSYS II*) para transferir os dados do resistímetro para o computador; só depois é usado o software de inversão (*EarthImager*) dos dados para obtenção do mapa da distribuição da resistividade.

Depois das ligações feitas (cabo RS232), para transferir os dados seguem-se os seguintes passos no software: *Communication – Data download – Syscal Kid Switch*.

É nesta fase que se pode fazer uma filtragem preliminar dos dados. Neste caso limitou-se o desvio das medições de resistividade a 5%.

Para exportar os dados para o software de inversão, seguem-se os seguintes passos: *File – Export and Save – Res2dinv*.

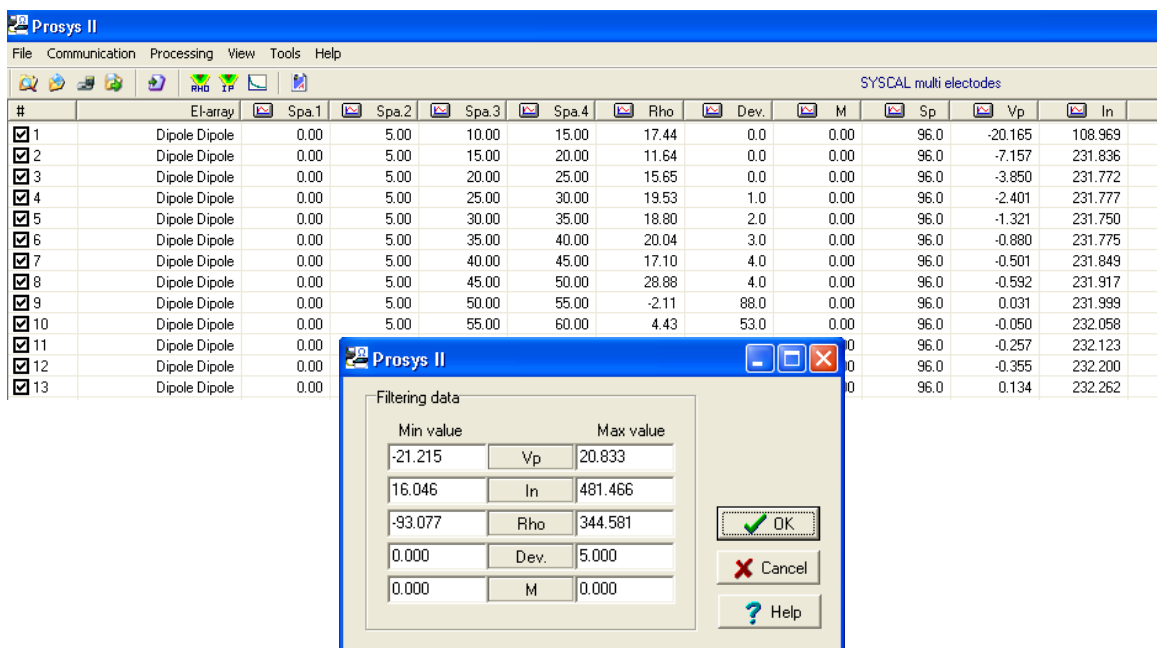


Figura 3.7 – Software *Prosys II*

3.8 Inversão dos Dados de Resistividade Aparente

O objectivo do método de resistividade é a obtenção de uma imagem da distribuição da resistividade sob a superfície que está correlacionada com a geologia do local de estudo. A obtenção da distribuição da resistividade sob a superfície a partir dos dados de resistividade aparente é feita através da chamada inversão.

Em primeiro lugar há que distinguir o **problema directo** do **problema inverso**.

O problema directo é definido como o processo de previsão dos valores de resistividade aparente a partir do modelo de distribuição de resistividade pseudo-real. Conhecendo os parâmetros do modelo (distribuição da resistividade no subsolo, dispositivos geoelectricos e parâmetros da prospecção) é possível obter um mapa com a distribuição da resistividade aparente calculada a partir daquele modelo (Figura 3.8)

Este mapa é obtido utilizando-se métodos numéricos (método das diferenças finitas ou o método dos elemento finitos). Estes métodos baseiam-se na resolução de equações diferenciais com aproximações às respostas do sistema real (Barreiras, 2008).

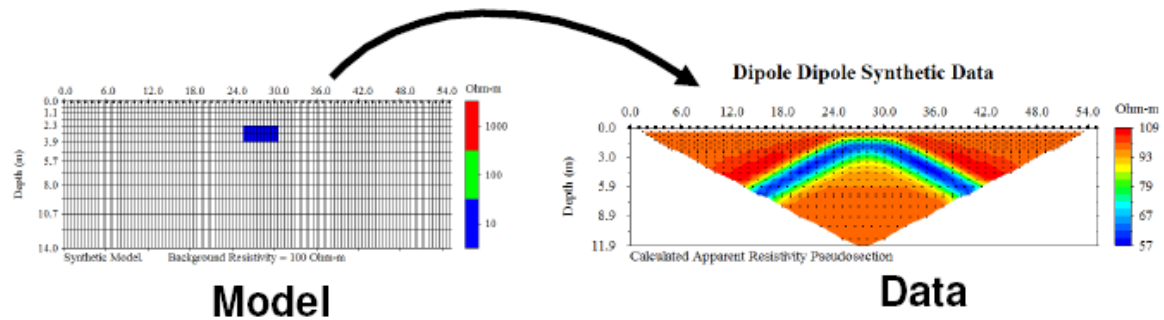


Figura 3.8 – Problema directo (adaptado de Aktarakçi, 2008)

O problema inverso consiste na transformação dos dados medidos no campo para um modelo de distribuição de resistividade.

A resposta de um modelo reconstruído deve ajustar-se aos dados medidos no campo. Para aferir a qualidade da inversão são considerados os desvios entre a pseudo resistividade medida e a pseudo resistividade calculada.

A não unicidade de soluções baseia-se no facto de existirem um ilimitado número de modelos cujas respostas se ajustarão às medições de campo (Aktarakçi, 2008).

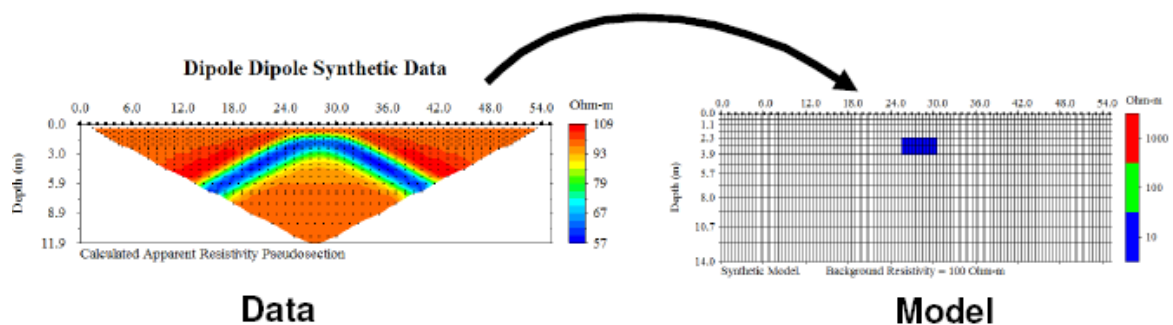


Figura 3.9 – Problema inverso (adaptado de Aktarakçi, 2008)

Os programas de inversão usam normalmente métodos iterativos, onde, a partir do modelo inicial, os programas procuram melhorar o modelo até que a diferença entre os valores de resistividade aparente calculada e os valores de resistividade aparente medida no campo seja mínima.

Um método iterativo de diferenças finitas muito utilizado é o método não linear dos mínimos quadrados constrangidos na optimização da inversão (*smoothness-constrained method*), que tem a seguinte formulação matemática:

$$(J^T J + \mu F)d = J^T g - \mu F r \quad (3.1)$$

Onde:

F = matriz filtro

J = matriz das derivadas parciais

r = vector com o logaritmo dos valores de resistividade

μ = factor de amortecimento

d = vector de perturbação do modelo

g = vector de erro ou discrepância

O vector de discrepância (g) contém a diferença entre a resistividade aparente calculada e a medida. Esta é a medida que o programa de inversão procura reduzir numa tentativa de encontrar o melhor modelo depois de cada iteração. O vector de perturbação do modelo (d) é a variação entre o modelo considerado e o modelo melhorado. A equação acima procura minimizar a combinação destas duas medidas.

O factor de amortecimento (μ) controla o peso dado ao modelo no processo de inversão. Quanto mais elevado for este factor mais suave é o modelo, contudo a incerteza é maior.

A equação 3.1 pode ser modificada de várias formas no sentido de obter melhores resultados para certos casos. Os elementos da matriz filtro (F) podem ser modificados para dar mais ênfase às variações verticais ou horizontais no modelo de resistividade. Na equação acima, é dado o mesmo peso a todos os dados obtidos no campo. Em alguns casos, especialmente para dados com muito ruído e com valores anómalos de resistividade aparente, o efeito dos dados de pior qualidade na inversão podem ser minimizados através de uma matriz de ponderação dos vários pontos.

Esta equação também procura minimizar o quadrado das variações espaciais (*roughness*) do modelo dos valores de resistividade. Este facto tende a produzir um modelo com variações mais suaves de resistividade. Esta abordagem é aceitável se

as variações da resistividade na área em estudo forem graduais e sem variações bruscas. Em certos casos a geologia caracteriza-se por um número de regiões que são internamente homogéneas mas com variações bruscas entre diferentes regiões. Nestes casos é mais adequado utilizar uma formulação no processo de inversão que enfatize as variações absolutas no modelo de resistividade (Loke, 1999).

Outro factor que pode ser controlado é a dimensão e distribuição dos blocos rectangulares usados nos programas de inversão. Por definição, os programas usam um algoritmo heurístico baseado na posição dos pontos de medição para criar a dimensão e localização dos blocos. A profundidade máxima do modelo corresponde à máxima profundidade de investigação e o número de blocos não excede o número de medições. Em geral, esta técnica produz um modelo onde a espessura das camadas aumenta com a profundidade e os blocos nas extremidades laterais e nas camadas mais profundas são maiores.

Para produzir um modelo mais uniforme, o utilizador pode escolher um modelo no qual o número de blocos excede o número medições. Todavia, à medida que o número de blocos aumenta, o tempo de cálculo para a inversão é maior. Este é um facto importante para levantamentos com elevado número de dados.

Pode aumentar-se a profundidade máxima para além da profundidade de investigação. Isto pode ser útil nos casos em que uma estrutura importante encontra-se logo abaixo da máxima profundidade de investigação, embora acarrete grande incerteza (Loke, 1999).

A inversão matemática é um processo complexo e por vezes moroso. Neste sentido, estão disponíveis softwares programados para operar, tanto quanto possível, de forma automática. O utilizador pode alterar alguns parâmetros para obter melhores resultados no processo de inversão.

Neste trabalho foi utilizado o software da *Advanced Geoscience, Inc.* (AGI), o *EarthImager 2D Resistivity Inversion Software*.

Depois de abrir o ficheiro de dados, nas definições iniciais (*Initial Settings*) podem alterar-se alguns critérios de remoção de dados com ruído e valores anómalos (*Criteria for data removal*) (Figura 3.10).

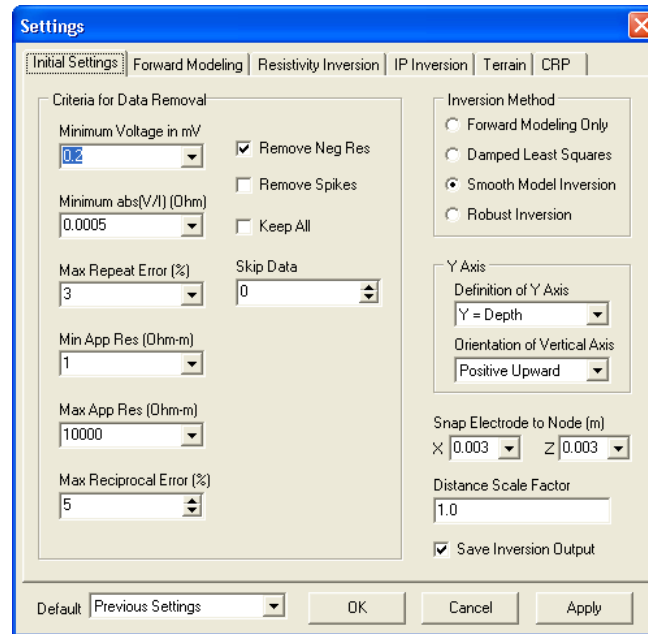


Figura 3.10 – Definições iniciais (*EarthImager AGI*)

O critério da mínima voltagem (*Minimum Voltage in mV*) está relacionado com a força do sinal. A voltagem mínima deve estar próxima da capacidade de resolução do resistímetro e do nível de ruído natural da área de estudo.

Podem definir-se os valores mínimo e máximos e dos valores de resistividade aparente. A opção *Remove spikes*, permite remover automaticamente valores anómalos.

Estão disponíveis três métodos de inversão. São eles, *smooth model inversion*, *robust inversion*, *damped least square*. O método *damped least squares* é relativamente rápido, porém, o modelo reconstruído tende a ter alterações bruscas entre zonas. O método *robust inversion* tem uma melhor performance em dados com bastante ruído e resolve melhor as zonas de fronteira. O *smooth model* é considerado o mais estável e robusto e é aplicável para todo o tipo de situações.

Na janela da modelação directa (Figura 3.11), é possível escolher o método numérico a utilizar na resolução do problema directo, condições de fronteira, discretização da malha, entre outros parâmetros.

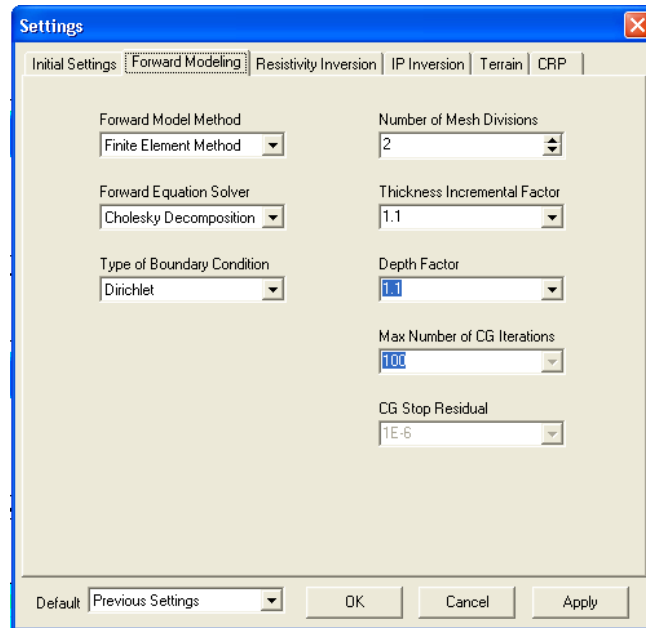


Figura 3.11 – Definições do problema directo (*EarthImager AGI*)

O método dos elementos finitos produz soluções mais precisas e funciona melhor com topografias mais acidentadas. Contudo, o método das diferenças finitas é mais recomendado devido à sua rapidez. O número de iterações (*Max number of CG Iterations*) deve situar-se entre as 100 e as 1000.

O número de divisões da malha (*number of mesh divisions*) define o número de blocos entre dois eléctrodos. À medida que aumenta a profundidade perde-se resolução, sendo preferível incrementar-se a espessura dos blocos em profundidade (*Thickness incremental factor*).

Nas definições da inversão (Figura 3.12), existem vários parâmetros a considerar. Enumerar-se-á apenas os que são considerados mais importantes.

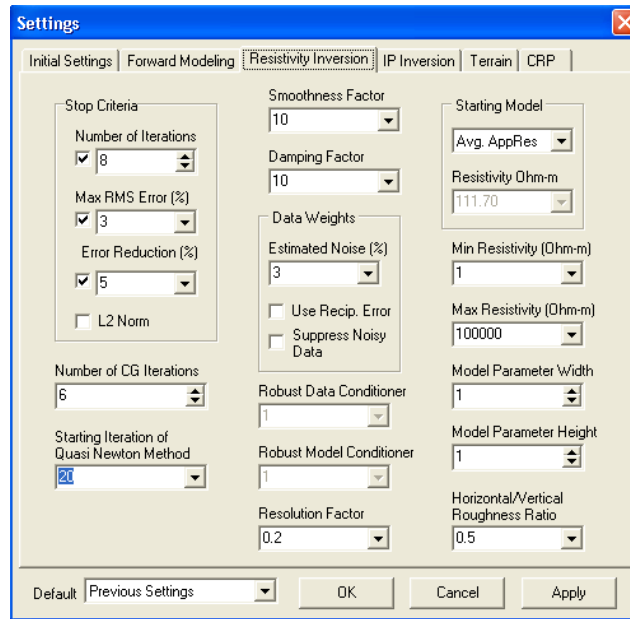


Figura 3.12 – Definições do problema inverso (*EarthImager AGI*)

No primeiro quadro, correspondente ao *Stop Criteria*, definem-se os parâmetros que interrompem a iteração. Os quatro parâmetros, dentro deste grupo, estão dependentes uns dos outros, de forma que, se algum dos critérios for atingido, as iterações são suspensas.

O número de iterações (*number of iterations*) é importante pois no caso de a inversão divergir, o processo pára ao fim das iterações definidas. Normalmente é escolhido o intervalo de 8 a 10.

O primeiro objectivo da inversão é a redução da diferença entre os dados da resistividade aparente medida e a resistividade aparente calculada. A diferença entre estes dois conjuntos de dados é quantificada pelo erro quadrático médio (*root mean square* - RMS) em percentagem.

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{\left(\frac{d_i^{Pred} - d_i^{Meas}}{d_i^{Meas}}\right)^2}{N}} \times 100\% \quad (3.2)$$

Onde N é o número total de medições, d^{Pred} corresponde aos dados previstos e d^{Meas} aos dados medidos. O erro RMS está muito dependente do número de valores anómalos e da magnitude dos mesmos. Um único valor anómalo pode aumentar

substancialmente o valor do erro *RMS*, ainda que as restantes medições sejam de boa qualidade. A melhor solução será remover estes valores anómalos. O erro máximo recomendado *RMS* é 3%.

Espera-se que o *RMS* vá diminuindo de iteração para iteração, definindo-se o critério redução do erro (*error reduction*) que suspende as iterações. O valor recomendado é de 5%.

A Figura 3.13 apresenta os valores de resistividade aparente medidos no campo (a), os valores da resistividade aparente calculados pela modelação directa a partir do modelo (b) e o modelo de distribuição de resistividade obtido por inversão (c).

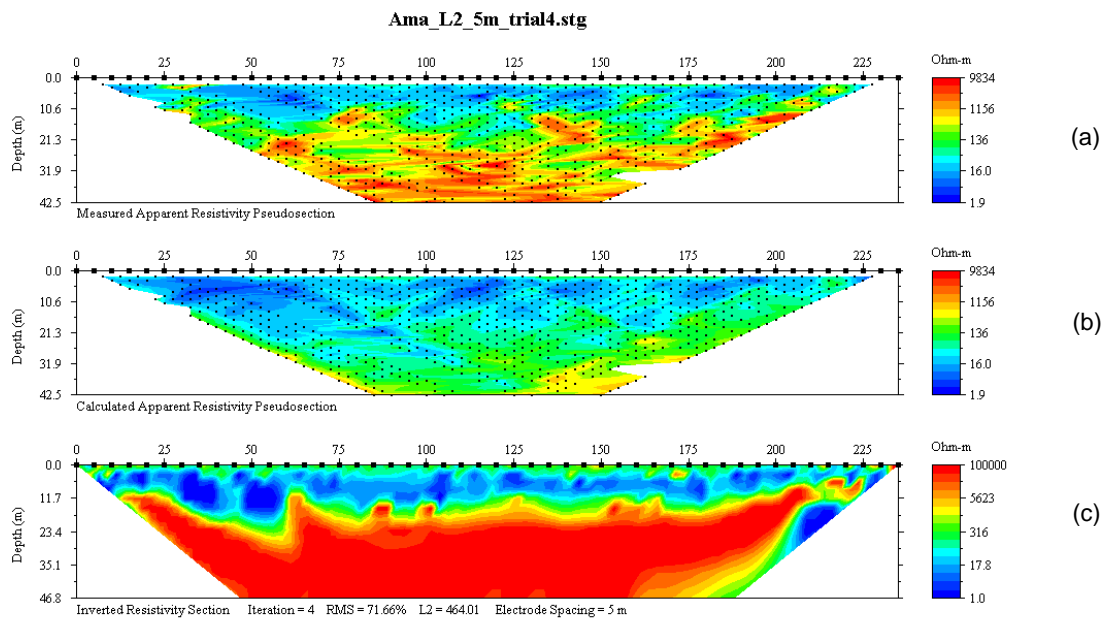


Figura 3.13 – Perfis de resistividade aparente medida, aparente calculada e modelo de resistividade (*EarthImager AGI*).

4 TRABALHO DE CAMPO

4.1 Enquadramento da Área de Estudo

Uma das escolhas óbvias para a aplicação prática do método de resistividade eléctrica foi a prospecção de plumas de contaminação que, segundo a bibliografia, é um dos problemas ambientais para o qual o método é mais aplicável (Martinho, 2002).

Neste contexto surgiu a oportunidade de fazer uma campanha de resistividade nas imediações de uma antiga lixeira localizada na Península de Setúbal. Devido a razões de confidencialidade não se indica a localização geográfica exacta do local (Figura 4.1).



Figura 4.1 - Área de estudo e localização dos perfis de resistividade, sondagens e piezómetros.

Dentro dos limites da área de estudo, além de um aterro de RSU existe uma antiga lixeira onde todo o tipo de resíduos eram depositados sem qualquer tratamento e num local não confinado. Actualmente esta lixeira encontra-se selada na cobertura, contudo, inferiormente, não existe qualquer protecção, contrariamente ao caso do

aterro localizado imediatamente ao lado, e assim é muito provável que haja contaminação dos solos e águas subterrâneas na área envolvente à lixeira e a existência de plumas de contaminação.

Este tipo de contaminação apresenta geralmente, em valores de resistividade, grande contraste com os terrenos envolventes não contaminados, daí tratar-se à partida, de um bom exemplo para aplicação do método da resistividade.

Devido à existência de grande quantidade de dados directos (*hard*) na área de estudo como, colunas litológicas obtidas através de sondagens, profundidade do nível freático e análises químicas das águas subterrâneas recolhidas nos piezómetros, foi possível correlacionar os dados obtidos com o método de resistividade (dados *soft*).

4.1.1 Geologia

A nível regional, a área em estudo localiza-se numa bacia constituída por depósitos paleogénicos, miocénicos e pliocénicos, recobertos em quase toda a área por depósitos quaternários. De acordo com a Carta Geológica de Portugal à escala 1/50000 da região, a geologia da área onde se insere o estudo é constituída por uma formação geológica formada por um complexo detrítico composto por calhaus e areias de dunas e de praia.

Os relatórios das sondagens / piezómetros existentes na área de estudo mostram uma alternância de areias de granulometria diversa e lentículas de argilas com espessuras variadas.

Nas figuras 4.2 e 4.3 apresentam-se as colunas litológicas de algumas sondagens anteriormente realizadas na área de estudo, dispostas em 2 perfis. Pode observar-se que os níveis mais superficiais são constituídos essencialmente por areias, estando os níveis argilosos a maior profundidade.

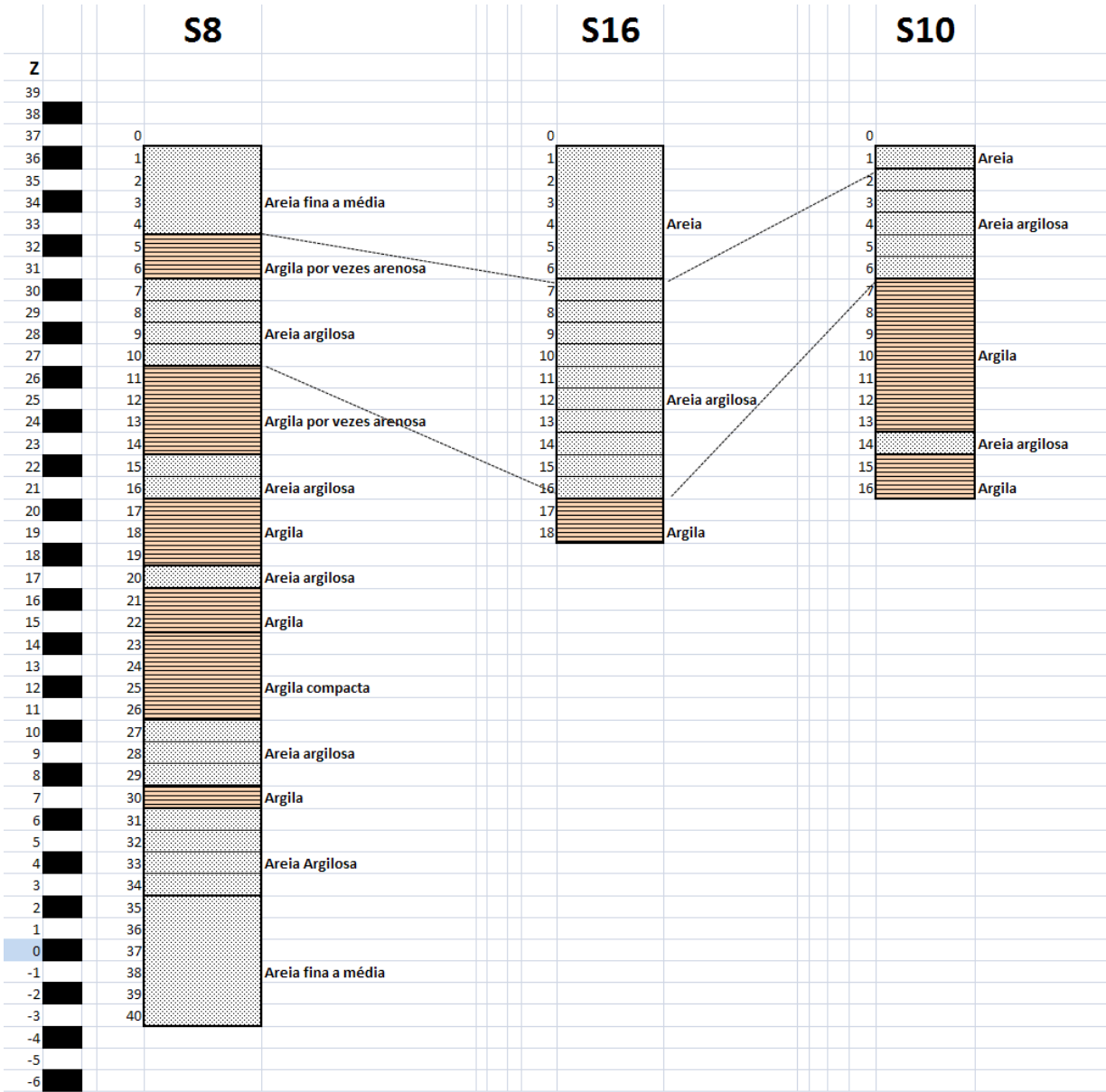


Figura 4.2 – Colunas litológicas das sondagens S8, S16 e S10.

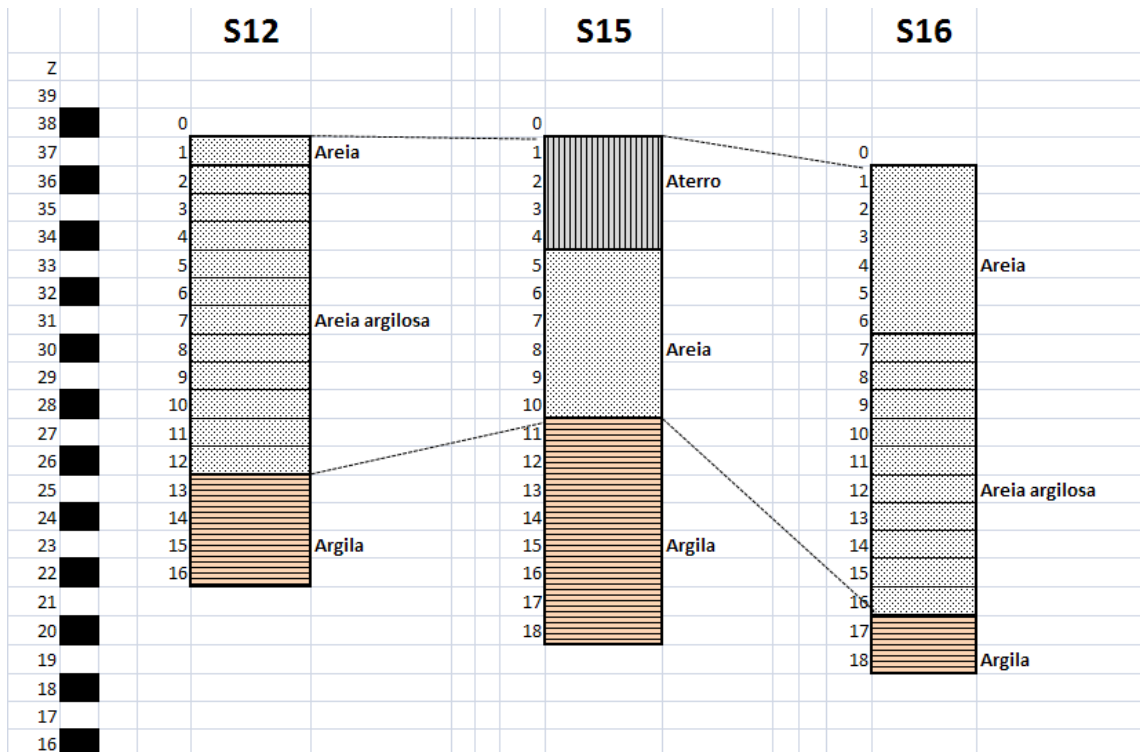


Figura 4.3 – Colunas litológicas das sondagens S12, S15 e S16

4.1.2 Hidrogeologia

A nível regional, a bacia onde se insere a área de estudo integra um importante sistema aquífero de Portugal. É um sistema multicamada constituído por um aquífero superior livre, instalado nas formações do Pliocénico e depósitos detríticos mais recentes, e um aquífero inferior semi-confinado em terrenos do Miocénico.

O sistema aquífero é recarregado pela precipitação, e por infiltração nos leitos das linhas de água e subsequente percolação para os níveis inferiores. Relativamente ao aquífero livre a recarga faz-se essencialmente através da infiltração das águas das chuvas e escorrência superficial. Este aquífero é explorado essencialmente para rega de pequenas explorações agrícolas.

Quanto à hidrogeologia local, as formações do Pliocénico constituem localmente aquíferos com uma elevada transmissibilidade e boa permeabilidade.

Pela análise das cotas do nível freático em piezómetros e poços nas imediações da área de estudo concluiu-se que fluxo de águas subterrâneas da bacia faz-se de Sul para Norte (figura 4.4).

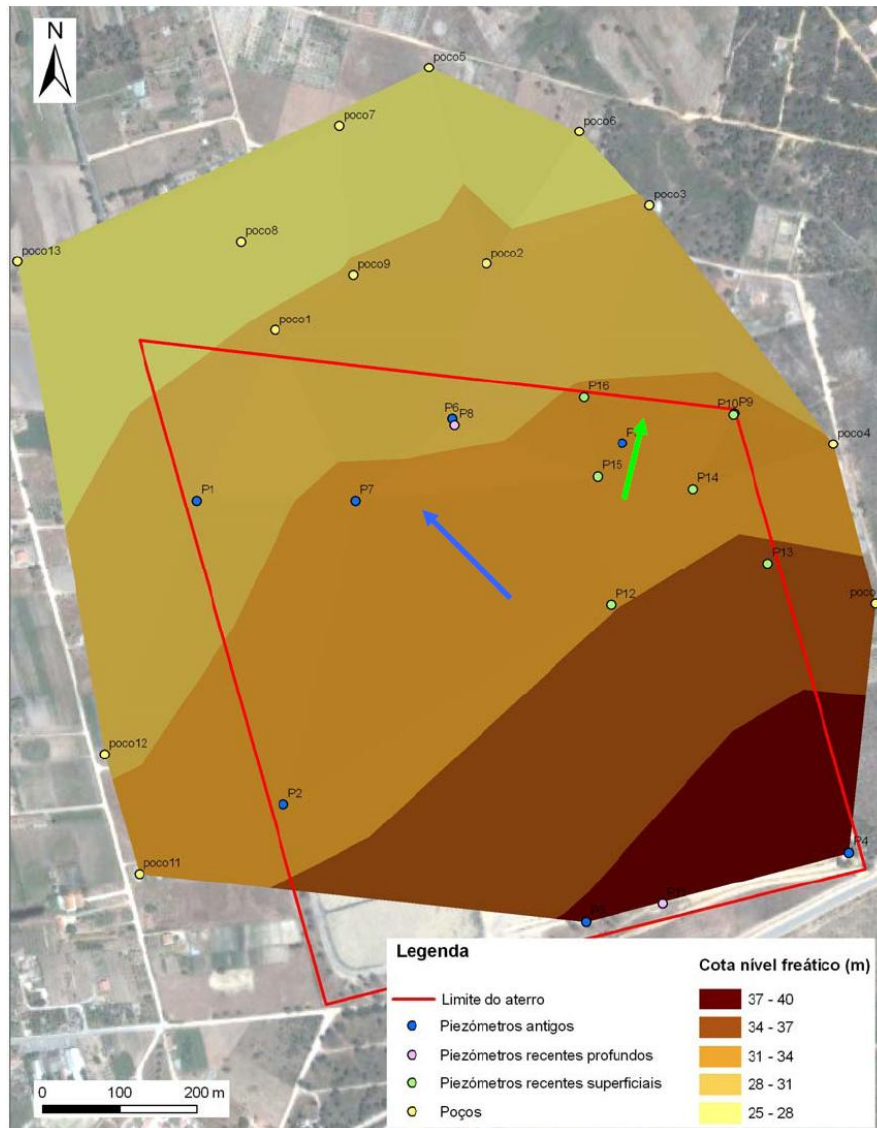


Figure 4.4 – Sentido de fluxo do aquífero

A Tabela 4.1 mostra a profundidade do nível freático nos piezômetros da área em análise conforme medições efectuadas no dia 8 de Julho de 2009.

Tabela 4.1 – Profundidade do nível freático nos piezômetros

Piezómetro	Profundidade do nível freático (m)
P1	3,7
P2	2,8
P3	4,6
P4	4,5
P5	2,4
P6	4,0

4.1.3 Análises químicas

Na Tabela 4.2 apresentam-se os resultados das análises químicas à água subterrânea recolhida nos piezômetros P1, P3, P5, P6 e P7, no ano 2008. São apresentados também, os valores de referência que constam no anexo I do Decreto-Lei 236/98 de 1 de Agosto – Qualidade da Água.

Tabela 4.2 – Análises químicas à água subterrânea

Parâmetro	P1	P3	P5	P6	P7	Valores Referência	
						Classe A1	
						VMR	VMA
pH	5,2	5,5	8,1	7,6	6,6	6,5-8,5	-
Condutividade (mS/m)	24	16	920	610	62	100	-
Cloretos (Cl mg/l)	80	23	2 100	1 100	130	200	-
CBO5 (O ₂ mg/l)	<3,0	<3,0	10,0	20	<3,0	3	-
Cianetos (CN mg/l)	<0,005	<0,005	<0,02	<0,029	<0,005	-	0,05
Arsénio (As mg/l)	0,02	<0,01	0,04	0,04	<0,01	0,01	0,05
Cádmio (Cd mg/l)	0,0016	<0,0005	<0,0005	0,00097	<0,0005	0,001	0,005
Crómio total (Cr mg/l)	0,069	<0,01	0,032	0,031	<0,01	-	0,05
Crómio VI (Cr (VI) mg/l)	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	-	-
Merúrio (Hg mg/l)	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,0005	0,001
Chumbo (Pb mg/l)	0,054	0,024	0,018	0,042	0,022	-	0,05
Selénio (Se mg/l)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	-	0,01
Fenóis (C ₆ H ₅ OH mg/l)	<0,0010	0,0010	0,20	0,05	<0,0010	-	0,001
Nitratos (NO ₃ mg/l)	7,0	31	<3,0	<3,0	5,0	25	50
Sulfatos (SO ₄ mg/l)	6,7	9,2	<3,0	3,7	11	150	250
Bário (B mg/l)	0,07	0,03	0,15	0,42	0,05	-	0,1
Cobre (Cu mg/l)	0,030	<0,015	<0,015	0,026	<0,015	0,02	0,05
Ferro (Fe mg/l)	21	0,24	3,3	25	10	0,1	0,3
Manganês (Mn mg/l)	0,067	<0,050	0,074	0,097	0,23	0,05	-
Hidrocarbonetos totais (mg/l)			<0,030	<0,030		0,05	0,05

Nota: Classe A1 – Valores recomendados para águas subterrâneas; VMR – Valor máximo recomendado; VMA – Valor máximo admissível.

Pela análise da tabela anterior, conclui-se que a área nas imediações ao piezómetro P5 e o P6, a norte da lixeira, são os que apresentam maior condutividade. O piezómetro P7 que se encontra a norte do aterro, também apresentam condutividade elevada, embora em menor grau que o P5 e P6. O piezómetro P1, situado já muito afastado da lixeira, e o P3, situado a sul do aterro apresentam condutividade mais baixa.

4.2 Aquisição e Processamento de Dados

Para execução dos perfis de resistividade eléctrica foi utilizado o resistímetro da *IRIS Instruments*, o *SYSCAL Junior Switch 48*. Este equipamento está programado para trocar automaticamente entre os seus 48 eléctrodos, obtendo autonomamente os dados de resistividade aparente que foram, posteriormente, invertidos para valores de resistividade real com o software da *AGI*, o *2D Resistivity Inversion Software*.

Na Figura 4.1 pode observar-se a localização dos perfis de resistividade efectuados na área de estudo. Trabalhos anteriores indicavam que a zona mais sensível à contaminação seria a norte, precisamente porque o fluxo hidrogeológico no local é de sul para norte. Além disso, procurou-se cruzar os perfis com os piezómetros existentes e os locais onde foram realizadas sondagens numa tentativa de validar os dados *soft* obtidos pelo método de resistividade com os dados *hard* obtidos nas sondagens e na amostragem da água subterrânea.

Em todos os perfis utilizou-se a configuração dipolo-dipolo pois é a que melhor detecta as variações laterais de resistividade. O espaçamento entre eléctrodos dependeu da área disponível para a colocação da linha, da profundidade que se pretendia atingir e da resolução dos perfis. Para os perfis PR1, PR2 e PR3 utilizou-se o espaçamento entre eléctrodos de 5 metros e para o PR4 e PR5 adoptou-se o espaçamento entre eléctrodos de 1 metro. A distância entre os eléctrodos de corrente (A e B) e de potencial (M e N) mantém-se fixa, 5 e 1 metro, respectivamente, e a distância entre os dipolos de corrente e os de potencial afastam-se até uma distância de 135 e 20 metros, respectivamente. Este afastamento entre os dipolos de corrente e potencial permitiu alcançar grandes profundidades contudo levou a que o erro RMS fosse algo elevado.

Os valores de resistividade obtidos em todos os perfis, após a inversão, foram posteriormente convertidos em condutividade eléctrica, considerando os valores limite de 0,1 a 1000 mS/m divididos numa escala de 10 cores. Em todos os perfis foi utilizada a mesma escala de cores e intervalos.

Aos perfis obtidos foram sobrepostos os dados das sondagens, efectuadas na área de estudo, e as profundidades do nível freático do dia 8 de Julho de 2009, estando este representado por uma linha a tracejado ao longo do perfil. As colunas litológicas das sondagens foram simplificadas para duas “camadas”, uma constituída

maioritariamente por areias (cor branca), mais permeável e mais sensível à presença de lixiviados, e outra constituída maioritariamente por argilas (cor preta), podendo funcionar como barreira à pluma de contaminação (Figura 4.5).

4.3 Resultados

4.3.1 Perfil de resistividade 1

O perfil de resistividade 1 (PR1) foi efectuado no topo sul da área de estudo cruzando o piezómetro P3 e a sondagem S11 com o objectivo de detectar indícios de contaminação nesta zona.

À partida, nesta zona não seria espectável contaminação pois o fluxo hidrológico tem o sentido de sul para norte e as análises químicas no piezómetro P3 não evidenciam sinais de contaminação (a condutividade neste piezómetro é de 16 mS/m).

Do piezómetro P3 foi também obtido o valor do nível freático nesta zona, que era de 2,6 metros, e encontra-se assinalado no perfil por uma linha. Da sondagem S11 obtiveram-se os dados litológicos que se encontra assinalada no início do perfil.

Neste local foi definida uma linha de 48 eléctrodos com espaçamento de 5 metros entre si. Com esta configuração, o perfil tem 240 metros de comprimento e atingiu a profundidade de 40 metros.

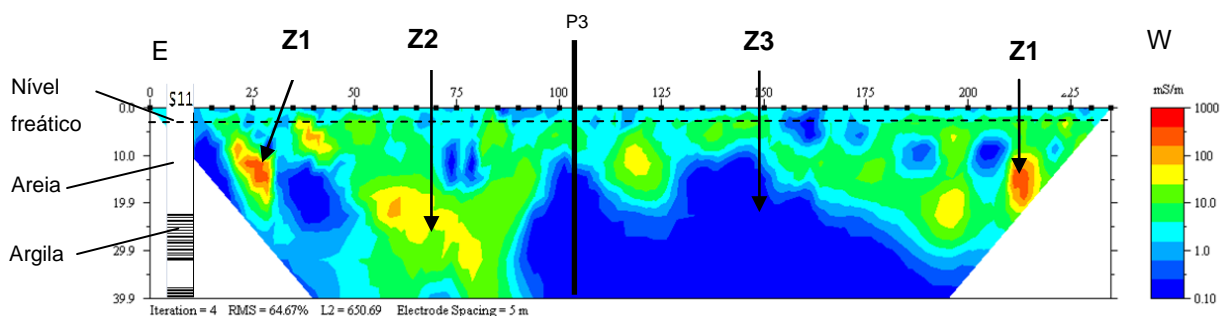


Figura 4.5 – Modelo de condutividade 1

No modelo de condutividade da figura 4.5 foram distinguidas 3 zonas conforme os graus de condutividade:

- A zona Z1 com alta condutividade (100 a 1000 mS/m), representada a tons laranja no perfil, aparece em duas zonas muito localizadas. Estas duas zonas podem ser duas manchas de contaminação muito localizadas e sem expressão lateral e vertical ou podem constituir duas valas por onde se processe uma fuga a partir do aterro. Não se pode excluir a hipótese destas duas zonas de alta condutividade serem de resultado de um corpo estranho que cause interferência nas medições, dado que na área onde se efectuou a prospecção haver a presença de corpos metálicos à superfície.
- A zona Z2 com condutividade intermédia (10 a 100 mS/m), representada a tons verdes e amarelos. Prolonga-se na parte Este do perfil à profundidade máxima do perfil e a Oeste tem uma profundidade de cerca de 20 metros com algumas oscilações. Pelos dados da sondagem esta zona deverá coincidir com o nível mais superficial constituído por areias que, devido à sua maior permeabilidade, apresenta água que aumenta ligeiramente a sua condutividade.
- A zona Z3 com condutividade baixa (0,1 a 10 mS/m), representada a tons azuis. Encontra-se, quando aparece, abaixo dos 20 metros. Esta zona pode ser interpretada como um nível que, por se encontrar livre de água, é menos condutiva.

4.3.2 Perfil de resistividade 2

O PR 2 foi efectuado na área a Norte na lixeira a cerca de 50 metros da mesma. À partida, nesta área esperar-se-ia encontrar evidências da pluma de contaminação oriunda da lixeira pois o seu fluxo faz-se neste sentido.

O nível freático no piezómetro mais próximo P5 foi atingido aos 2,4 metros, apresentando as análises químicas à água, neste piezómetro, um grau de contaminação elevado e valores de condutividade próximas de 1000 mS/m. A sondagem mais próxima utilizada para cruzar com este perfil foi a S10.

Novamente utilizaram-se os 48 eléctrodos com um espaçamento entre si de 5 metros, tendo a linha o comprimento de 240 metros e o atingido o perfil 47 metros de profundidade.

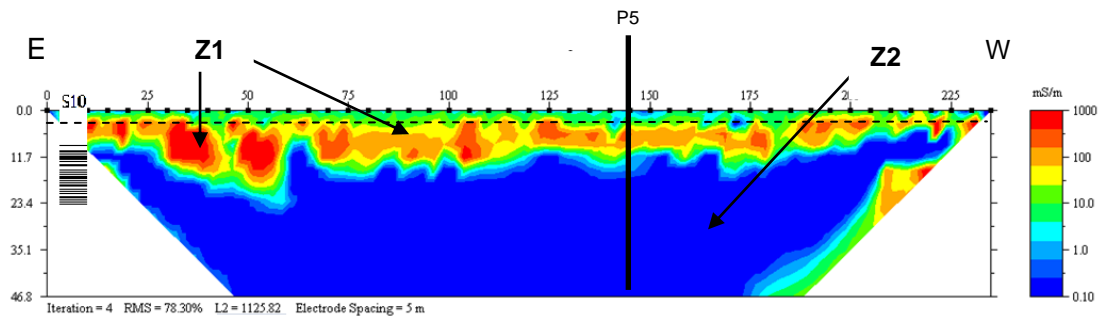


Figura 4.6 – Modelo de condutividade 2

No perfil da figura 4.6 foram distinguidas duas zonas com grande contraste de condutividades:

- A zona Z1 com alta condutividade (10 a 1000 mS/m), representada a tons laranja, concentrando-se entre o nível freático e os 10 metros de profundidade. Pode corresponder ao nível de materiais mais arenosos presentes na sondagem S10, que se apresentam contaminados por lixiviados oriundos da lixeira.
- A zona Z2 com baixa condutividade (0,1 a 10 mS/m), representada a tons de azul, localizada abaixo dos 10 metros. Pode interpretar-se como uma zona livre de contaminação, provavelmente, devido à existência de níveis argilosos que funcionam como barreira à propagação da pluma de contaminação em profundidade.

4.3.3 Perfil de resistividade 3

Tal como o perfil anterior, o PR3 também foi efectuado a Norte da lixeira embora ligeiramente mais afastado (100 metros de distância), e atingiu um comprimento maior que permitiu interceptar também a zona a Norte do aterro. Em princípio esta zona junto ao aterro não deveria apresentar contaminação, como acontece na zona a jusante da lixeira. Foi feito ao longo de uma estrada de terra batida e por isso apresentava uma superfície plana e sem vegetação.

Foram cruzadas com os perfis as sondagens S10 e S16, e a S8 que também se encontra nas proximidades do final do perfil. Foram igualmente adicionados a profundidade dos níveis freáticos dos piezómetros mais próximos, P5 e P6, com 2,4 e 4,0 metros respectivamente. As análises químicas realizadas nestes piezómetros

apresentam grau de contaminação elevado, com valores de condutividade entre os 610 e 920 mS/m.

Desta vez foi utilizada apenas uma das duas linhas do resistímetro, devido a problemas técnicos numa das linhas. Foram utilizados 24 eléctrodos, efectuando-se a técnica do *roll-along*. Esta técnica permitiu estender horizontalmente a área coberta com apenas uma linha. A utilização desta técnica causou uma sobreposição dos perfis que se tornou útil para validação do método, obtendo duas leituras na mesma área.

Foi adoptado um espaçamento de 5 metros entre eléctrodos. Ao efectuar-se as medições de uma linha, arrastava-se o arranjo até metade do comprimento da primeira, que correspondia ao eléctrodo 12. Este processo foi repetido 5 vezes obtendo-se um perfil de 360 metros de comprimento. A profundidade média de investigação foi de cerca de 30 metros. Nem todos os modelos obtidos atingiram a mesma profundidade de investigação, pois em alguns perfis havia a presença de valores anómalos a maiores profundidades que foram eliminados pelo software num pré-processamento dos dados.

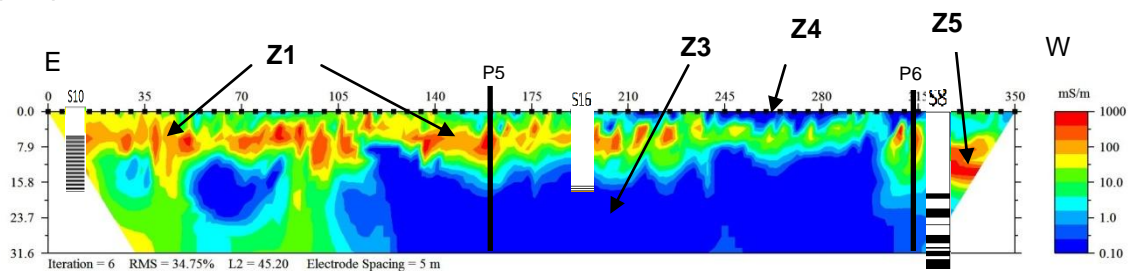


Figura 4.7 – Modelo de condutividade 3

Na análise do modelo da figura 4.7 foram distinguidas 5 zonas:

- A zona Z1 de alta condutividade (100 a 1000 mS/m) representada a tons laranja. Pelos valores de condutividade é muito provavelmente uma mancha de contaminação que ocupa os níveis mais permeáveis que se encontram geralmente a menor profundidade (até cerca de 15 metros). Porém na marca dos 100 metros, aproximadamente, esta zona de alta condutividade atinge os 25 metros de profundidade. Esta mancha propaga-se bastante nos primeiros metros e reduz-se a partir da marca dos 220 metros, podendo dizer-se que coincide com o fim da zona sob a influência da lixeira o que era um resultado esperado à partida.

- A zona Z2 de média condutividade (10 a 100 mS/m) representada a tons de verde. Pode interpretar-se como uma zona saturada que apresenta menor grau de contaminação. Surgem manchas de maior dimensão entre a marca dos 0 e os 50 metros e a partir dos 220 metros.
- A zona Z3 de baixa condutividade (0.1 a 10 mS/m) representada tons de azul. Esta zona encontra-se livre de contaminação. Até à marca dos 200 metros, o nível a que se encontra apresenta grande variação, oscilando entre a profundidade total do perfil até aos 10 metros, aproximadamente. A partir da marca dos 200 metros, sensivelmente, o nível a que se encontra reduz-se para os 8 metros e apresenta maior continuidade horizontal. Próximo da marca dos 180 metros foi identificada uma possível lentícula argilosa de pequenas dimensões.
- A zona Z4 apresentando condutividade baixa (0,1 a 10 mS/m) mas distinguindo-se da zona Z3 por surgir mais superficialmente. Estas manchas podem coincidir com as areias encontradas nesta zona quando se estavam a efectuar as medições, que por se encontrarem acima no nível freático, não apresentam saturação, e assim apresentam valores baixos de condutividade.
- A zona Z5 apresentando valores altos de condutividade (100 a 1000 mS/m) que se distingue da zona Z1 pois provavelmente a origem da contaminação ser distinta. Esta mancha surge no final do perfil na marca dos 330 metros, e portanto muito afastada da lixeira. Dada a maior proximidade do aterro e também da ETAR pode ser atribuída a uma fuga de uma destas estruturas.

4.3.4 Perfil de resistividade 4

O PR4 foi efectuado a norte da lixeira junto ao piezómetro P5, com uma profundidade do nível freático de 2,4 metros. Esta é o piezómetro que apresenta maiores valores de condutividade (920 mS/m). Seguiu uma direcção perpendicular aos perfis 2 e 3 com o intuito de cruzar estes perfis e tentar caracterizar a mancha de contaminação a norte da lixeira à medida se aumenta a distância desta.

Foi adoptado um espaçamento entre eléctrodos de 1 metro e novamente utilizou-se apenas uma das linhas com 24 estacas sendo necessário recorrer à técnica do *roll-*

along. O perfil atingiu uma profundidade de investigação de cerca de 4 metros e cobriu um comprimento total de 60 metros.

Dada a menor profundidade de investigação e em compensação a maior resolução do perfil num nível mais superficial foi possível perceber melhor o papel do nível freático para a variação dos valores de condutividade.

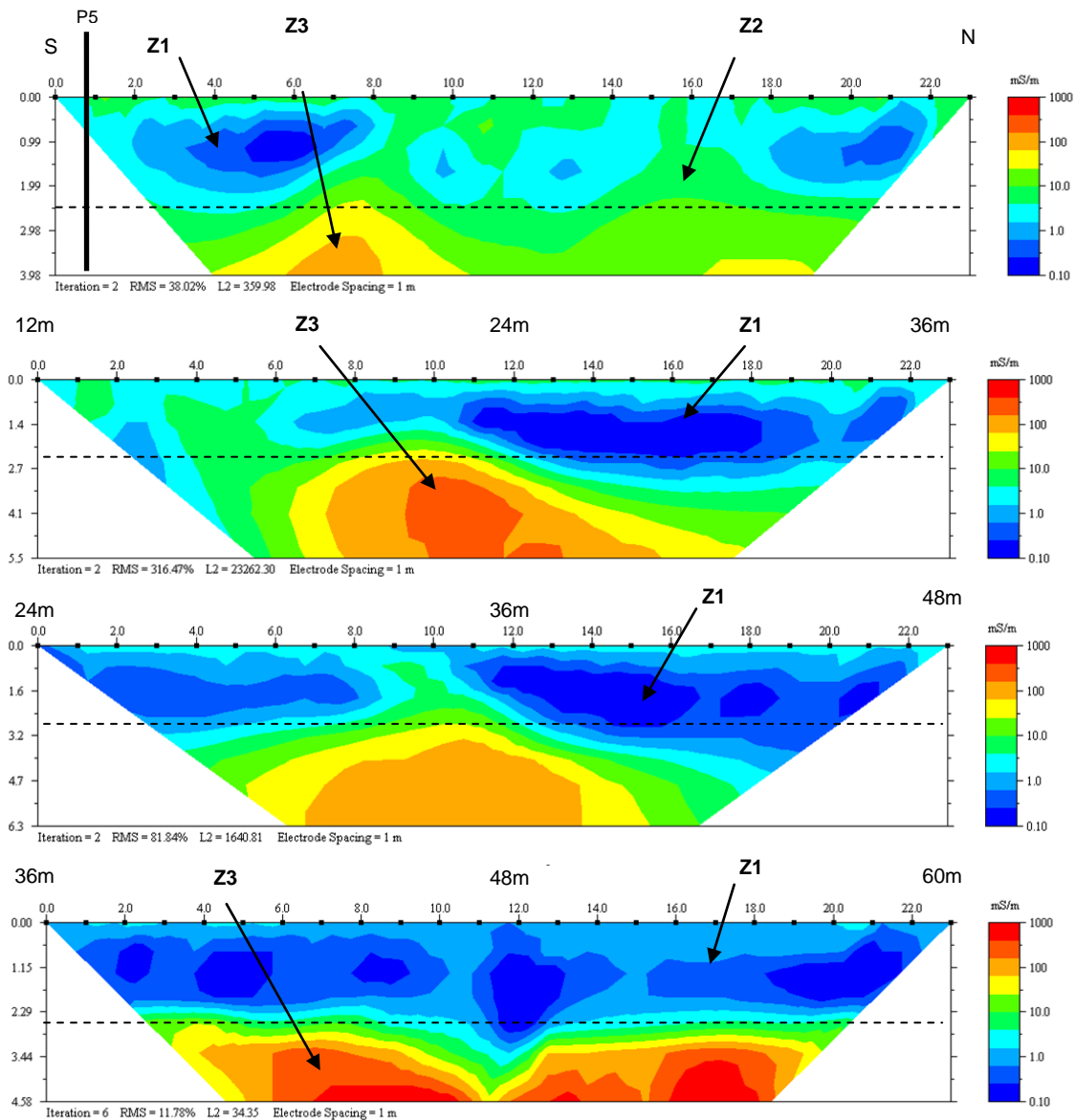


Figura 4.8 – Modelos de condutividade 4

Dos modelos acima foram distinguidas 3 zonas com condutividades distintas:

- A zona Z1 de baixa condutividade (0.1 a 1 mS/m) representada essencialmente a tons de azul. Corresponde em todos os perfis à zona mais

superficial que se encontra acima do nível freático (2.4 metros). As sondagens mais próximas da zona onde se efectuou este perfil (S10 e S16) apresentam sempre um nível arenoso até pelo menos os 10 metros, pelo que, pode afirmar-se que o contraste de condutividades, aqui verificado, não se deve a variações litológicas mas sim à profundidade do nível freático.

- A zona Z2 de condutividade intermédia (1 a 10 mS/m) representada a tons de verde. É uma mancha que se desenvolve principalmente entre as marcas dos 0 e 24 metros entre as manchas com valores mais extremos de condutividade (zona Z1 e Z3). Esta zona aparece acima do nível freático como abaixo deste.
- A zona Z3 de alta condutividade (10 a 1000 mS/m) representada a tons de laranja coincide com a zona abaixo do nível freático, desenvolvendo-se francamente abaixo dos 3 metros. Dada a reduzida profundidade de investigação não é possível observar o prolongamento desta mancha em profundidade. A partir deste perfil não é possível tecer conclusões acerca do desenvolvimento da contaminação horizontalmente nem em profundidade.

4.3.5 Perfil de resistividade 5

O PR5 foi efectuado numa zona de jardins muito afastada do aterro e ainda mais da lixeira pelo que não deveria detectar-se indícios de contaminação. Foram utilizados 24 eléctrodos com um espaçamento de 1 metro fazendo-se três conjuntos de medições, sendo que, nas duas primeiras realizou-se a técnica do *roll-along*.

O nível freático do piezómetro mais próximo (P1) tinha a profundidade de 3.7 metros, apresentando as análises químicas efectuadas às águas grau baixo de contaminação e uma condutividade reduzida (24 mS/m).

Desta vez optou-se por não dividir os perfis em zonas de condutividade distintas dado que os resultados obtidos são muito homogéneos e o que parece de maior importância salienta é o predomínio de valores baixos de condutividade.

Os valores de condutividade apresentaram redução substancial, o que veio, de certa forma, a contribuir para a validação do método da resistividade e a dar indicações que as zonas cujos perfis apresentam manchas a vermelho (com condutividade superior a 100 mS/m) estão contaminadas.

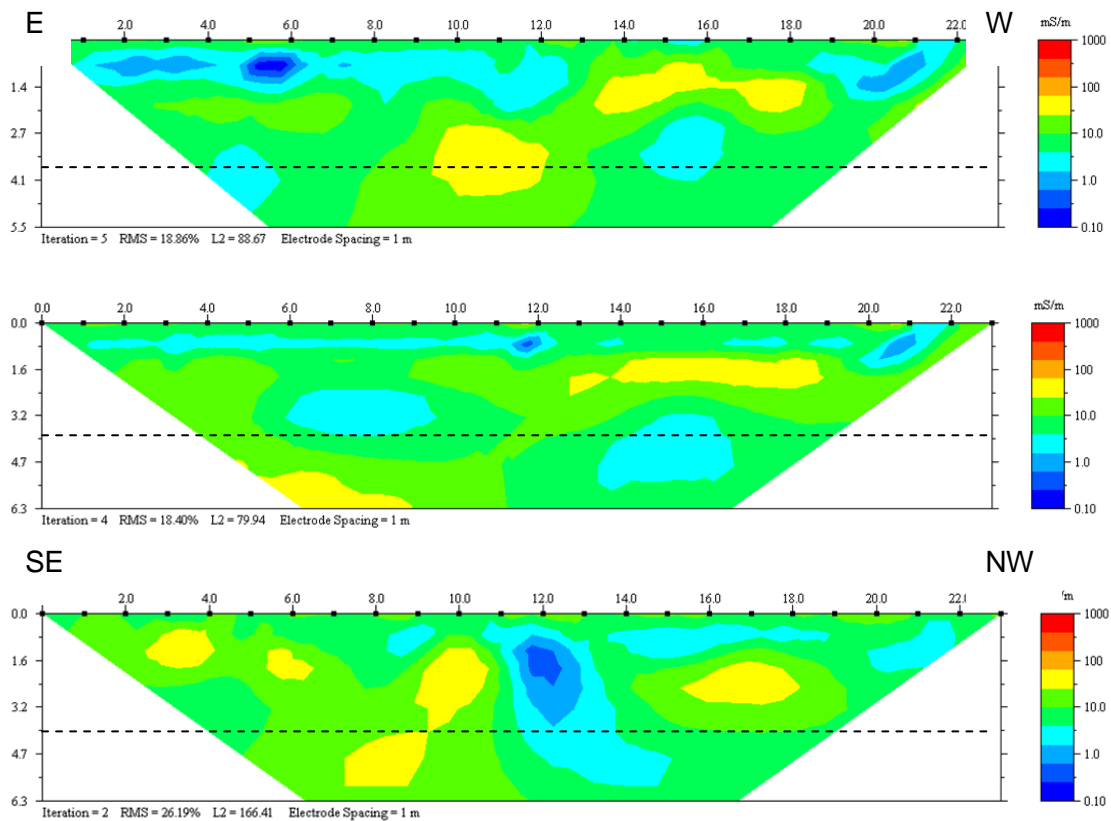


Figura 4.9 – Modelos de condutividade 5

Faz-se notar que as medições foram efectuadas logo após a rega dos jardins, estando o subsolo saturado. Ainda assim, os valores de condutividade não são muito altos, reforçando a teoria de que apenas os solos saturados com lixiviados provenientes da lixeira e de eventuais fugas no aterro, vão apresentar valores altos de condutividade na ordem dos 100 a 1000 mS/m.

Os valores de resistividade obtidos, depois convertidos em valores de condutividade, estão de acordo com os resultados obtidos em trabalhos anteriores utilizando o método de resistividade no estudo deste tipo de problemas ambientais (ver capítulo 2.2.8).

5 CONCLUSÕES

Como foi definido no início da tese, os objectivos deste trabalho consistiam na descrição do método da resistividade eléctrica e sua aplicação na caracterização de plumas de contaminação numa antiga lixeira de RSU.

Estudou-se em primeiro lugar, o método da resistividade eléctrica do ponto de vista teórico, enquadrando-o dentro dos métodos geofísicos, estudando os seus fundamentos teóricos, as técnicas e equipamentos desenvolvidos para aplicação prática, assinalando os trabalhos já realizados e percebendo a sua aplicabilidade, capacidades e limitações.

Em segundo lugar, realizou-se a aplicação prática do método de resistividade num caso de estudo concreto, a caracterização das plumas de contaminação nas imediações de uma antiga lixeira e aterro de RSU. A metodologia adoptada ao longo do trabalho de campo é descrita de forma a orientar e auxiliar possíveis trabalhos futuros com este método.

Quanto a caracterização da área de estudo tiraram-se as seguintes conclusões:

- O perfil de resistividade 1 (PR1), efectuado na zona a Sul do aterro e da lixeira, não apresentou valores de condutividade elevado, situação que já era esperada dado que o fluxo hidrogeológico se faz no sentido Sul-Norte e as análises no piezómetro mais próximo (P3) apresentaram baixo grau de contaminação.
- Os perfis PR2, PR3 e PR4, efectuados na zona a Norte da lixeira e do aterro, apresentam manchas com valores elevados de condutividade o que é um indicador da contaminação dos solos nessa zona. As manchas de contaminação localizam-se, geralmente, abaixo do nível freático até uma profundidade de cerca de 15 metros, tirando algumas zonas em que a contaminação pode prolongar-se a maiores profundidades, cerca de 30 metros.
- O PR3, ao cruzar a zona a norte da lixeira e do aterro, permitiu observar que a contaminação é maior na área envolvente à lixeira diminuindo na área envolvente ao aterro.

- O PR5, efectuado numa localização mais remota em relação ao aterro e lixeira, apresenta uma redução significativa nos valores de condutividade. Pode afirmar-se que esta zona não apresenta contaminação, pelo menos até aos 6 metros de profundidade.

O cruzamento dos perfis com as colunas litológicas das sondagens, os níveis freáticos e as análises químicas realizadas nos piezómetros apresenta, de forma geral, um bom cruzamento, contribuindo para a validação do método de resistividade. Pelos resultados das sondagens pode dizer-se que os níveis mais arenosos (permeáveis) são susceptíveis à contaminação e os níveis argilosos (não permeáveis) funcionam como uma barreira natural à propagação da contaminação. Pela correlação dos dados de resistividade com a profundidade do nível freático, pode afirmar-se que as manchas de maior condutividade surgem logo abaixo do nível freático e prolongam-se até ao início dos níveis argilosos.

Os dados de resistividade apresentam grande correlação com as análises químicas da água recolhida nos vários piezómetros da área de estudo. Os perfis de resistividade que apresentam maior grau de contaminação localizam-se, normalmente, em zonas onde as análises químicas confirmam essa contaminação. Os valores de condutividade das manchas de contaminação obtidos pelo método de resistividade são da mesma ordem de grandeza dos obtidos pelas análises químicas das águas subterrâneas.

Fazendo uma análise final dos trabalhos de campo efectuados, pode dizer-se que, o método de resistividade eléctrica deu bons resultados na caracterização da presença ou ausência de contaminação na área de estudo.

A aplicação do método de resistividade eléctrica permitiu a caracterização de uma extensa área de estudo, de forma célere e pouco dispendiosa. A partir dos perfis de resistividade obtidos foi possível:

- A obtenção dos valores de resistividade/condutividade que indicam a presença / ausência e o grau de contaminação da zona prospectada.
- A definição da pluma de contaminação e da estrutura sedimentar dando indicações de quais as litologias mais susceptíveis à propagação dessa pluma.

- A conformação da profundidade do nível freático.

O custo estimado dos trabalhos de prospecção com o método de resistividade tendo em conta uma equipa de 3 pessoas (25€/hora) e considerando dois dias de trabalho é de 1 200 euros. O valor de mercado de um resistivímetro e restante equipamento necessário aos trabalhos, juntamente com o software de inversão é cerca de 20 000 euros.

Como sugestão para trabalhos futuros nesta área de estudo, utilizando o método de resistividade, sugere-se a realização de mais perfis de resistividade na área próxima da ETAR para caracterizar melhor a mancha de contaminação detectada na parte final do perfil PR3. Poder-se-iam também realizar perfis mais afastados da antiga lixeira, na zona a norte, para tentar identificar-se a extensão horizontal da pluma de contaminação.

Além disso, poderia complementar-se o trabalho utilizando outro método de prospecção geofísica, como o método de polarização induzida (IP) ou o método electromagnético.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGI (2008). *Instruction manual for Earthlymager 2D resistivity and IP inversion software*. Advanced Geosciences, Inc., Austin, Texas, 139 p.

AKTARAKÇI, H. (2008). *Resistivity Imaging*. Seminar on resistivity imaging. Madrid.

BARREIRAS, N. (2008). *Contributo para a Caracterização e Modelação Hidrogeológica do Concelho do Seixal*. Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. 164 p.

BENARD, J. (2003). *Short Note on the Depth of Investigation of Electrical Methods*. IRIS Instruments, Orleans, France. (<http://www.iris-instruments.com>).

BENARD, J.; LEITE, O.; VERMEERSCH, F. *Multi-electrode resistivity imaging for environmental and mining applications*. IRIS Instruments, Orleans, France. (<http://www.iris-instruments.com>). Consulta em Abril 2009.

CHAMBERS, J.; OGILVY, R.; MELDRUM, P.; NISSEN, J. (1999). *3D Resistivity Imaging of Buried Oil and Tar contaminated waste deposits*. European Journal Of Environmental Geophysics, 4 3-15.

COSTA, C. N.; LOPES, M.; KOHNKE, M.; VERDIAL, P. H. (2008). *Avaliação das Opções de Remediação para a Antiga Lixeira Moita-Barreiro*. GIGA/UNL. 135p.

CRUZ, R.; FIGUEIREDO, F.; PRATAS, J. (2006). *Estudo de Contaminação de uma Antiga Lixeira pelo Método Electromagnético de Prospeção – Lixeira de Vila Moreira, Alcanena*. Centro de Geociências da Universidade de Coimbra. VII Congresso Nacional de Geologia, Évora. pp. 339-342.

IRIS Instruments (2003). *Syscal Switch User's Manual*. Orléans, France, 64 p.

KEAREY, P.; BROOKS, M. (1984). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Scientific Publications, Oxford. pp. 198-225.

LOKE, M. H. (1999). *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies*. Penang, Malaysia. 57 p.

LUÍS, J. (2005). *Geofísica Ambiental. Métodos eléctricos*. Universidade do Algarve. (http://w3.ualg.pt/~jluis/files/folhas_cap3.pdf)

MIRANDA, J. M.; LUÍS, J.; COSTA, P. T.; SANTOS, F. M. *Manual de Fundamentos de Geofísica. Capítulo 5 - Geoelectricidade*. Instituto Geofísico do Infante D. Luís. (http://www.cgul.ul.pt/docs/Cap5_Geoelectricidade.pdf). Consulta em Fevereiro 2009.

MARTINHO, E. (2002). *Estudo Integrado de Problemas Ambientais por Métodos Geofísicos*. Dissertação de Doutoramento. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 269 p.

REYNOLDS, J. M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons. 796 p.

SHARMA, P. V. (1997). *Environmental and Engineering Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge. 475 p.

TARANTOLA, A. (2005). *Inverse Problem Theory and Methods for Parameter Estimation*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia. 358p.

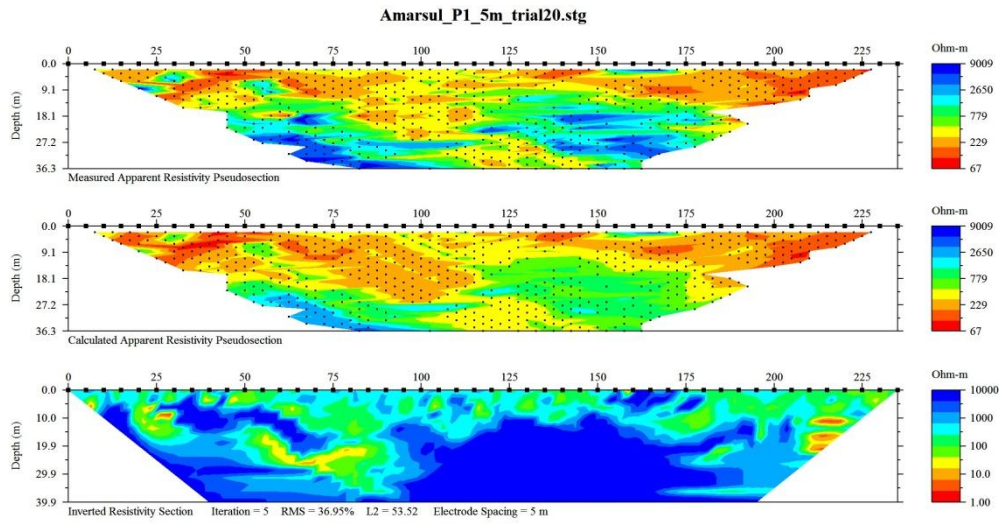
TELFORD, W.M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R.E. (1990). *Applied Geophysics. Second Edition*. Cambridge University. pp. 283-292 e pp. 522-577.

Legislação consultada:

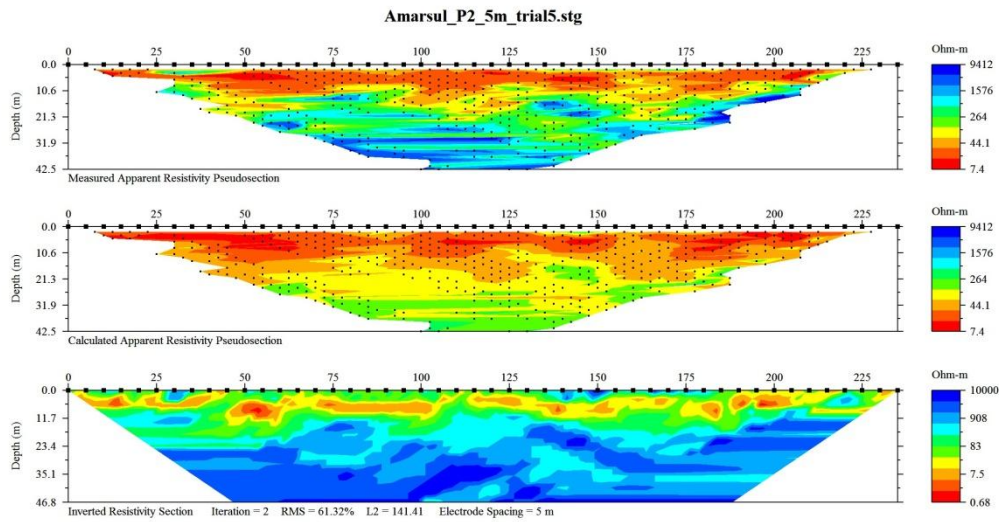
- Decreto-Lei 236/98 (1 de Agosto) – Qualidade das Águas
- Decreto-Lei 178/2006 (8 de Setembro) – Gestão de Resíduos

ANEXOS

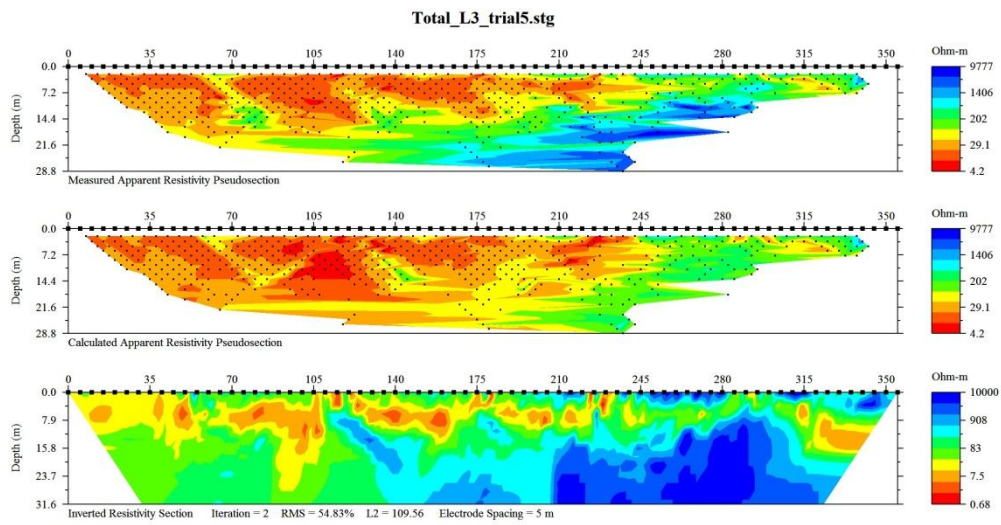
Perfil de resistividade 1 – Processo de Inversão



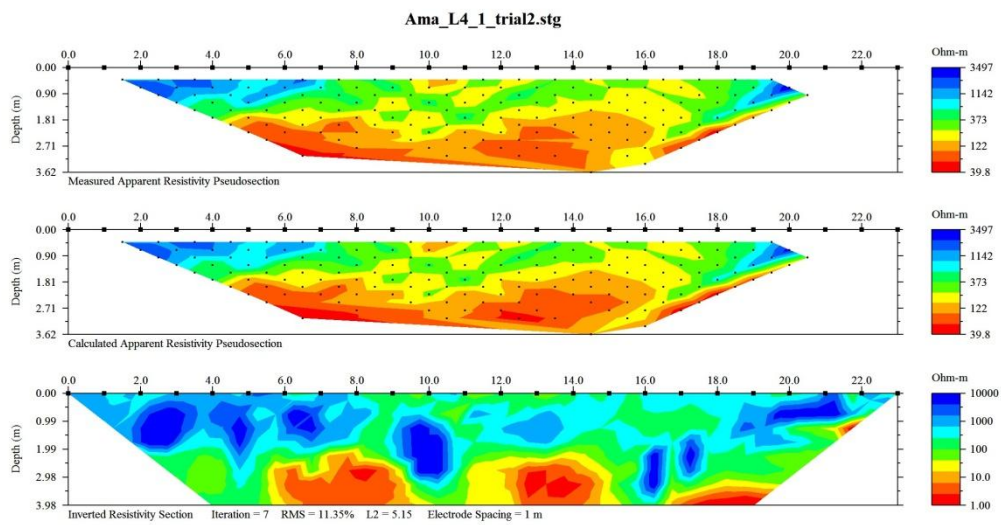
Perfil de resistividade 2 – Processo de Inversão

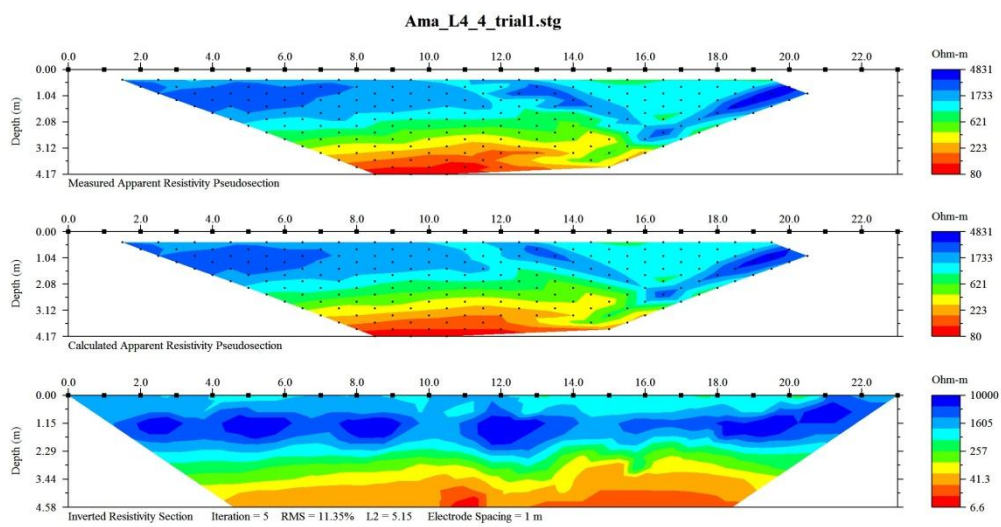
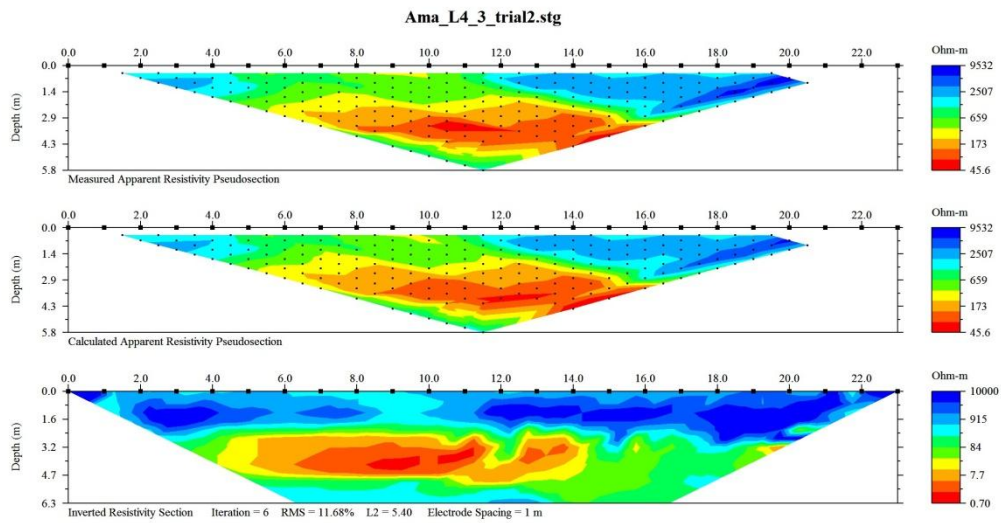
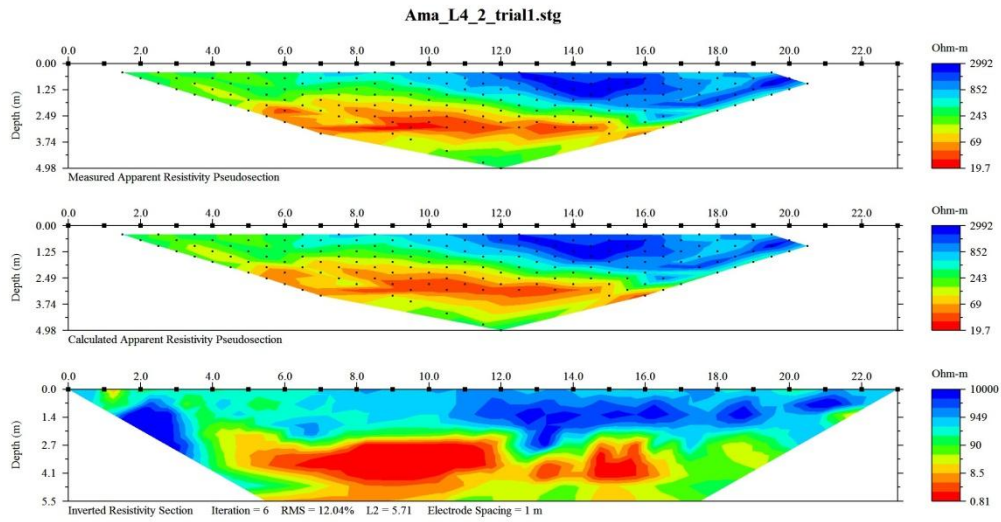


Perfil de resistividade 3 – Processo de Inversão



Perfil de resistividade 4 – Processo de Inversão





Perfil de resistividade 5 – Processo de Inversão

