



**Universidade de
Aveiro**

Departamento de Geociências



**Universidade do
Porto**

DGAOT - Faculdade de Ciências

2014

Carlos Suizane Júlio Bonga

**PROSPECÇÃO GEOELÉCTRICA DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA NO FONTÃO, ANGEJA-PORTUGAL**



**Universidade de
Aveiro**

Departamento de Geociências



**Universidade do
Porto**

DGAOT - Faculdade de Ciências

2014

Carlos Suizane Júlio Bonga

**PROSPECÇÃO GEOELÈCTRICA DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA NO FONTÃO, ANGEJA-PORTUGAL**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Geomateriais e Recursos Geológicos, realizada sob a orientação científica de Fernando Ernesto Rocha de Almeida, Professor Associado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

O júri

Presidente

Prof. Doutor Maria do Rosário Mascarenhas de Almeida Azevedo
Professor Auxiliar do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Rui Miguel Marques Moura
Professor auxiliar do DGAOTda Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Prof. Doutor Fernando Ernesto Rocha de Almeida
Professor associado do Departamento de Geociências -da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço aos meus orientadores: Ao professor. Dr Fernando Almeida do Departamento de Geociências de Universidade de Aveiro que acreditou em mim e aceitou a orientação deste trabalho. Pela total disponibilidade mostrada desde o primeiro momento de contacto, emprestando-me os seus livros e acolhimento par-a-passo – Sua presença foi constante – nunca me senti sozinho! E, ainda, à professora Dr Helena Mendes pelo apoio na componente geológica do trabalho.

À professora Dr. Maria do Rosário, pelo ABC da Geologia, pela oportunidade de aprender ao seu lado.

Ao Dr. Jesus M. Vidinha, pelo apoio na fase do reconhecimento do terreno.

À empresa GEOSURVEYS pelo acolhimento na empresa no início da minha formação.

À empresa CAPTÀGUA, pela oportunidade cedida na aquisição de dados geofísicos.

À Carla Martinhas pela paciência, pelo amparo, pelo entusiasmo ao longo de todo este percurso, por tudo o resto – foste a parte essencial deste trabalho.

Ao Nuno Barraca e ao Tiago Cerejo pelo apoio no trabalho de campo.

Aos colegas: Agostinho Mussa; João Lino Pereira, obrigado pela companhia cedida e os conselhos de amigo cedidos nas horas mais difíceis.

À minha esposa Helena Caetano Bonga que foi forçada a isentar-se na rotina de convivência amorosa de seu marido – Helena, muito obrigado pela paciência!

Aos meus filhos que “forçosamente” sentiram abdicada a educação do pai.

Aos meus pais e irmãos, pela sua presença, no tempo, pela coragem que me transmitiram e pelo apoio e incentivo com que sempre estimularam.

Agradeço ainda aos meus colegas e amigos por estarem presentes, por me darem um ombro uma mão, pelo carinho e apoio que recebi de Vós.

Não podia deixar de agradecer ao Engenheiro João Ribeiro da Universidade de Aveiro pela assistência do computador e das aulas de informática.

A todos professores do Departamento de Geociências da Universidade do Aveiro e da Faculdade de Ciências do Porto, Curso de Geomateriais e recursos geológico.

Finalmente os meus sinceros agradecimentos à Universidade Pedagógica de Moçambique e Universidade de Aveiro pelas bolsas de estudo que me foram concedidas!

Palavras-chave

Geofísica, sondagem eléctrica, pseudo-secção, aquífero, nascente.

Resumo

Este trabalho resulta da aplicação do método de da resistividade eléctrica recorrendo às técnicas da sondagem eléctrica e pseudo-secções para a prospecção hidrogeológica levada a cabo no local do Fontão em Portugal.

Consta como principal objectivo: gerar, disponibilizar informação e conhecimento sobre a ocorrência, potencialidade e circulação de águas subterrânea num ambiente geológico constituído por um substrato Pré-Câmbrico (formação xisto de Arada deformada e fracturada) que está coberto por sedimentos Quaternários. As observações geológicas, compreendendo a identificação das litologias e as orientações das fracturas predominantes, permitiram suportar os modelos obtidos através da inversão geofísica de dez sondagens eléctricas e quatro pseudo-secções.

A integração dos resultados geológicos e geofísicos permitiu compreender a origem das águas de duas nascentes locais, associando-as a um sistema aquífero fracturado orientado aproximadamente segundo a direcção N-S.

Keywords

Geophysics, electrical survey, vertical electrical sounding, pseudo-section, aquifer, spring.

Abstract

This work results from applying the method of electrical resistivity using the techniques of vertical electrical sounding and pseudo-sections for hydro-geological prospecting carried out at the site of Fontão in Portugal.

Appears as the main goal: generate, provide information and knowledge on the occurrence and movement of groundwater in a geological environment consisting of a Pre-Cambrian substrate (deformed and fractured formation Xisto de Arada) that is covered by Quaternary sediments. Geological observations, including the identification of lithologies and guidelines of the predominant fractures, allowed withstand the models obtained through geophysical inversion of ten electrical soundings and four pseudo-sections.

The integration of geological and geophysical results allowed to understand the origin of waters from two local sources associating them to a fractured aquifer system oriented approximately NS direction according to.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 – JUSTIFICAÇÃO DO ESTUDO	11
1.2. OBJECTIVOS	13
1.3 Organização e metodologia do trabalho	14
2. ENQUADRAMENTO REGIONAL	18
2.1. LOCALIZAÇÃO E SITUAÇÃO GEOGRÁFICA.....	18
2.2 GEOMORFOLOGIA.....	18
2.3. CLIMA.....	19
2.4 GEOLOGIA DA REGIÃO	21
2.5-HIDROGEOLOGIA.....	23
3. MÉTODOS E TÉCNICAS (FUNDAMENTAÇÃO PRÉVIA).....	26
3.1. GEOFÍSICA APLICADA	27
3.1.1. Classificação dos métodos geofísicos	27
3.1.2. Propriedades eléctricas das rochas	28
3.1.3. Método da resistividade eléctrica - geoelectrica	30
3.1.4. Dispositivos e técnicas	35
3.1.4.1 Dispositivo Schlumberger	36
3.1.4.2 Dispositivo Wenner	36
3.1.4.3. Sondagens eléctricas.....	37
3.1.4.4 Pseudo-secções	39
3.1.5 Modelação	39
3.2. HIDROGEOLOGIA	40
3.2.1. Águas subterrâneas.....	40
3.2.2 Armazenamento de água em rochas.....	41
3.2.3. Classificação hidrogeológica das formações rochosas.....	42
3.2.4. Escoamento em meio poroso.....	43
3.2.5. Recarga do aquífero	45
3.3. MODELOS GEOFÍSICOS - HIDROGEOLÓGICOS	46
4. DADOS E RESULTADOS	50
4.1. OBSERVAÇÕES GEOLÓGICAS	51

4.1.1. Litologias aflorantes	51
4.1.2. Análise do sistema de fracturas predominantes	55
4.2 GEOFÍSICA.....	56
4.2.1. Sondagens eléctricas	56
4.2.1.1 Interpretação qualitativa	57
4.2.1.2- Interpretação quantitativa.....	58
4.2.1.3. Modelo 3D integrando as Sondagens eléctricas.....	63
4.2.2. Pseudo-secções de resistividade.....	65
4.2.2.1.Modelo da pseudo-secção 1.....	67
4.2.2.2 Modelo da pseudo-secção 2.....	69
4.2.2.3. Modelo da pseudo-secção 3.....	70
4.2.2.4 Modelo da pseudo-secção 4.....	71
4.2.3. Resistividade da água das nascentes	73
4.2.4 Integração dos resultados geofísicos.....	74
4.2.4.1 Comparação dos modelos das SEVs e da pseudo-secção l.	74
4.2.4.2 Resistividades da rocha e da água	75
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
5.1 CONCLUSÕES	80
5.2. TRABALHOS FUTUROS	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Fila de mulheres no abastecimento de água.	12
Figura 2 - Localização geográfica da área do estudo;	18
Figura 3 - A: Esquema da plataforma litoral em Portugal (segundo Ferreira, 1961); d - plataforma litoral e níveis inferiores relacionados. Adaptado da Carta Geológica de Portugal, esc. 1/500000, Instituto Geológico e Mineiro; (Cabral e Ribeiro (1988)).....	19
Figura 4 - Clima de Portugal segundo a classificação climática de Köppen (IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera 2014); Adaptado de FAO-SDRN, 1997.	20
Figura 5 - Mapas: (A) Precipitação acumulada anual e (B) Temperatura média anual de Portugal (IPMA, 201).	21
Figura 6 - Enquadramento geológico da área de estudo: a – Extraído da Carta Geológica de escala 1:500000. Serviços geológicos de Portugal; b – adaptado da Geoportal, LNG, (2014)...	22
Figura 7.- Distribuição de sistemas de fracturas indicando a azul a localização da área do estudo. Carta Neotectónica de Portugal, adaptado de Cabral e Ribeiro, 1988).	23
Figura 8 - Localização de nascente e furos – Aveiro; Adaptado de Geoportal LNG, (2010)	24
Figura 9 - Modelo esquemático de fluxo de corrente eléctrica em rochas saturadas 1, e na presença de fluido não electrolítico 2; adaptado de Keller, 1970.....	29
Figura 10 - Variação da resistividade rochas e solos; Modificado de Ward, (1990).	30
Figura 11 - Montagem eléctrica em tubo de corrente (lei de Ohm).	31
Figura 12 – Fluxo da corrente eléctrica no solo homogéneo; Adaptado de Filho, 2007.....	31
Figura 13 - Diferença do potencial no campo; Adaptado de Filho, (2007).....	32
Figura 14 - Dispositivo de quatro eléctrodos para a determinação de resistividade eléctrica de rochas; (Marescote, s/d).	33
Figura 15 - Fluxo da corrente em diferentes meios: a – homogéneo; b – heterogéneo; c e d – camadas horizontais; Adaptado de Marescote, 2006.	34
Figura 16 - Arranjo de Schlumberger.	36
Figura 17 - Arranjo de Wenner.	36
Figura 18 - Morfologia das curvas de campo; (Braga, 2000).....	38
Figura 19 - Inversão de curvas com IP2win mostrando a equivalência do H.	39
Figura 20 - Fluxo subterrâneo Teixeira, et al. (2000).	41
Figura 21 – a)porosidade granular, b)porosidade fissurada e c) cavidades carsicas.	41
Figura 22 - Estágios de desenvolvimento de fracturas (Banks e Robins, 2002).a) Fracturas fechadas; b) Fracturas quase fechadas; c) Fracturas interconectados (zona permeável); d) Fracturas interconectados (zona muito permeável); e) Fractura interconectados (zona muito permeável).....	45

Figura 23 - Modelos conceptuais/hipóteses de trabalho.	46
Figura 24 - Mapa de trabalhos geológicos e geofísicos à azul a localização das nascentes e a vermelho os trabalhos geofísicos (pontos de sondagens e linhas das pseudo-secções); UTM_WGS84.....	50
Figura 25 - Mapa geológico da área estudada.....	51
Figura 26 - A conglomerado e arenito; B – arenito e argilito e argila; C – Xisto grafitoso com dobramento assimétrico da xistosidade e veios de quartzo; D - xisto grafitoso bancadas mais metapsamíticas.....	52
Figura 27 - Quaternário (terraços fluviais) assente no xisto.....	52
Figura 28 - A – dobras de plano axial subvertical B - Dobra tipo Chevron de plano axial subhorizontal afetando a xistosidade.....	53
Figura 29 - A – fractura com argila; B – fractura associada a dobras kink.....	54
Figura 30 - Falha normal subvertical e subhorizontal.....	55
Figura 31 - Diagrama estruturais – Rua da Ribeira; Fontão – Angeja.....	55
Figura 32 - Localização UTM-WGS84 dos trabalhos geofísicos sobre a superfície topográfica com posicionamento dos centros das SE (circulo vermelho), das linhas das pseudo-secções e das nascentes (circulo azul).....	56
Figura 33 - Equipamento auxiliar aplicado ao resistivímetro;	57
Figura 34 - Curvas logarítmicas das SEV´ e interpretação preliminar.....	58
Figura 35 - Curvas e tabelas de resistividade eléctrica aparente das Sondagens eléctricas: (5; 4; 3; 0; 2 e 3).	59
Figura 36 - Interpretação dos modelos de inversão das Sondagens eléctricas (5; 4; 0; 2 e 3). ...	60
Figura 37 - Curvas e tabelas de resistividade eléctrica aparente das Sondagens eléctricas (6, 7 e 8)	61
Figura 38 - Modelos de inversão das Sondagens eléctricas (6, 7 e 8).....	61
Figura 39 - Curvas e tabelas de resistividade eléctrica aparente das Sondagens eléctricas (9 e 10).	63
Figura 40 - Interpretação dos modelos de inversão das Sondagens eléctricas (9 e 10).....	63
Figura 41 - Disposição das camadas segundo a saturação de água: a) zona superficial; b) superfície freática e c) rocha não alterada.....	64
Figura 42 – Direcção de fluxo de água no aquífero.	64
Figura 43 - Resistivímetro WDA-1.....	66
Figura 44 - Arranjo de eléctrodos para pseudo-secção de resistividade eléctrica; Adaptado de (Loke1999).....	67
Figura 45 – Pseudo-secções teórica e experimental e modelo da resistividade eléctrica relativo à pseudo-secção1.	67
Figura 46 Pseudo-secções teórica e experimental e modelo da resistividade eléctrica relativo à pseudo-secção2.	69

Figura 47 Pseudo-secções teórica e experimental e modelo da resistividade da pseudo-secção 3.	70
Figura 48 - Pseudo-secções teórica e experimental e modelo da pseudo-secção4.....	72
Figura 49: a – Nascente à cota 45; b – Nascente à cota 25; c - Linha de água à cota 23; d - Medindo a resistividade eléctrica.....	73
Figura 50 – Sobreposição dos modelos de inversão das sondagens eléctricas (5; 4; 0; 2 e 3) e da pseudo-secção 1.	74
Figura 51 - - Ligação entre o Modelo Geofísico e as nascentes.....	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Aplicações dos métodos geofísicos	27
Tabela 2 - Resumo dos principais métodos Geofísicos, modificada (Keary, 2009).	28
Tabela 3 - Classifica hidrogeológica das rochas. Adaptado de Singhal e Gupte, (1999).....	43
Tabela 4 - Condutividade hidráulica segundo a natureza das rochas; (Lima 2007).....	44
Tabela 5 Prováveis litologias, camadas e suas resistividades.	60
Tabela 6 - litologia das camadas e sua resistividade das camadas.	62
Tabela 7 - Valores das resistividades segundo a dist (m) e prof (m) do modelo da pseudo-secção2.	69
Tabela 8 - Teores de resistividades segundo a distância ao longo da linha de aquisição e à profundidade obtida no modelo da pseudo-secção4.....	72
Tabela 9 - Relação entre a resistividade, porosidade e parâmetros da rocha.	76

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Adap.	Adaptado
1D	uma dimensão
2D	duas dimensões
3D	três dimensões
Fig.	Figura
FIPAG	Fundo de Investimento e Património de Abastecimento de Água
GPS	Aparelho para a navegação: Sistema de Posicionamento Global
SEV	Sondagem eléctrica vertical
Q	Quaternário

CAPÍTULO I
INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho versa sobre aplicação do método geofísico da resistividade eléctrica em prospecção de águas subterrâneas, tendo como objectivo a caracterização das estruturas aquíferas drenadas pelas nascentes do Fontão situadas a oriente de Angeja no concelho de Albergaria-a-Velha em Portugal.

A água é um recurso natural, um bem mineral, essencial para a vida, é componente bioquímica dos seres vivos, constitui o meio para a vida de várias espécies vegetais e animais, participa também como elemento essencial no processo de produção de bens de consumo.

A procura de água potável no mundo moderno é cada vez mais intenso dado que os reservatórios superficiais, no caso de Moçambique são sazonais. Estes tornam-se, assim, cada vez mais insustentáveis à medida que aumenta a exploração da água potável. Paralelamente ao aumento da pressão demográfica encontram-se outros constrangimentos que são, por um lado, a vulnerabilidade dos aquíferos superficiais à poluição e, por outro, a diminuição das quantidades/reservas que se vão tornando insuficientes pelo aumento do consumo.

Em função dos problemas relativos à falta da água, cada vez mais evidentes, os estudos sobre prospecção de águas subterrâneas veem ganhando importância e interesse porque respondem, de algum modo, aos problemas sobre o abastecimento público, à irrigação de campos, controle de qualidade, entre outras necessidades.

O estudo das águas suscita interesse de muitas disciplinas das Geociências, são relevantes neste estudo a Hidrogeologia, a Geologia Estrutural e a Geofísica, tendo por isso um carácter multidisciplinar.

A Hidrogeologia é geralmente encarada como uma parte da Hidrologia, que tem como objectivo o estudo do armazenamento, circulação e distribuição das águas na zona saturada das formações geológicas e tem em conta as suas propriedades físicas e químicas, as suas interacções com o meio físico e biológico e as suas reacções à acção do Homem (Custodio & Llamas, 2001).

A Geofísica Aplicada neste trabalho serve-se do método da resistividade eléctrica, que constitui um instrumento de grande valia para a aquisição de informações e identificação de áreas favoráveis à localização de aquíferos, guia de prospecção para projectos de perfuração/captação e no controlo da qualidade de águas subterrâneas.

Os métodos geofísicos são técnicas indirectas de investigação das estruturas do interior da Terra através da aquisição e interpretação de dados instrumentais, caracterizando-se, portanto, como métodos não invasivos ou não destrutivos. A eficácia de um levantamento está condicionada à existência de contrastes dos valores da grandeza física traduzidas em variações da resistividade das rochas na zona em estudo.

A aplicação adequada do método da resistividade eléctrica em pesquisa de águas subterrâneas exige considerar o estudo geológico regional e local para poder enquadrar os resultados geofísicos. Assim, ao longo do trabalho, foi recolhida informação

geológica/estrutural importante para explicar, através de um modelo geofísico, os resultados da aplicação do método.

As informações obtidas através, da aplicação das técnicas das Sondagens Eléctricas Verticais (SEV) e das pseudo-secções, permitiram a obtenção de um modelo geofísico que integra as estruturas geológicas observadas e explica a existência das nascentes na área de estudo.

O Levantamento geofísico foi realizado com o propósito de ligar as técnicas SEV e pseudo-secção, avaliar as suas potencialidades na prospecção de água subterrânea em estrutura fissural e relacionar os aquíferos com as nascentes na área de estudo.

1.1 – JUSTIFICAÇÃO DO ESTUDO

O trabalho desenvolvido parte de uma necessidade de querer intervir com acções práticas no âmbito da pesquisa de águas subterrâneas no país de proveniência do autor (Moçambique).

Sobre a hidrogeologia de Moçambique existem cartas, artigos, dissertações que tratam o tema à escala da África Austral (SADC, 2009) e à escala do território (Ferro e Bouman, 1987). Entretanto, percebe-se na literatura que é nos estudos de grande escala que a prospecção geofísica se torna uma ferramenta para guiar trabalhos ou projectos de pesquisa de água subterrânea.

A escassez de água é um dos grandes problemas que assola o território moçambicano cuja consequência contribui de forma negativa no desenvolvimento dos sectores sociais: da saúde, da segurança alimentar, bem como do progresso económico.

Ainda que Moçambique não possa ser considerado um país com escassez de água, é muito afectado pelos eventos climáticos (secas) que naturalmente, contribuem para a falta de água. O país é altamente afectado pela dependência dos recursos hídricos compartilhados com outros países e este é outro factor determinante em relação ao acesso à água. O desenvolvimento e o uso dos recursos hídricos é afectado pelo clima tropical, altamente variável, com grandes alterações de precipitação anual, intra-anual, frequentes inundações e ocorrência de secas. Os efeitos nefastos das alterações climáticas são mais sentidos pela maioria da população pobre.

O crescimento rápido da população nos países em vias de desenvolvimento tem pressionado os recursos hídricos superficiais e a capacidade dos serviços ligados ao abastecimento de água potável à população. Um estudo efectuado pelo Fundo de Investimento e Património de Abastecimento de Água (FIPAG) indicou que Albufeira da Barragem do Rio Monapo, que abastece água à capital provincial de Nampula, poderá ficar praticamente sem água, até ao ano 2029, devido à crescente procura que se fez sentir nos últimos anos (Mondlane, 2011).

Para além dos aspectos acima referenciados, as cidades enfrentam grandes problemas de poluição de águas superficiais por fontes pontuais urbanas e domésticas, nomeadamente: redes de drenagens mal construídas ou obsoletos e lixeiras a céu aberto, que, nos tempos pluviosos, poluem os mananciais de água. Assim, o problema

Capítulo I - Introdução

relacionado com o acesso à água potável constitui um embaraço para a maioria da população moçambicana, sobretudo, a população rural, com mais reflexos na mulher que está, cultural e directamente, mais ligada às actividades domésticas.

Para entender a dimensão da problemática da água em Moçambique, refere-se a notícia do jornal @verdade (2013): em Moçambique o acesso à água potável continua a ser um luxo de uma minoria que vive nas zonas urbanas. Nas zonas rurais, onde reside a maioria do povo moçambicano, apenas 30 por cento da população tem acesso à água potável. Muitos moçambicanos precisam de andar longas distâncias, todos os dias, em alguns casos mais de 20 quilómetros, à procura de água potável.

Em muitas zonas suburbanas, as mulheres, para além de suportar longas filas, (Fig. 1) para adquirirem no mínimo 20 litros de água, percorrem quilómetros à procura deste precioso líquido.



Figura 1 - Fila de mulheres no abastecimento de água.

Como se pode observar na figura 1, o acesso à água potável é um dos maiores desafios do governo moçambicano, porque a falta de água constitui também um entrave ao bom saneamento público.

Segundo a imprensa (@verdade, 2013) apenas 19 % dos agregados familiares têm acesso ao saneamento e 90% das mortes são devidas a doenças diarreicas provocadas pelo consumo de água imprópria.

O acesso à água potável continua a estar muito aquém das necessidades da população moçambicana e os mais penalizados são as populações que vivem nas zonas rurais e suburbanas.

A falta de acesso à água potável em Moçambique condiciona os direitos da criança à educação, à saúde e à protecção. A maioria das escolas moçambicanas não têm instalações de água e, conseqüentemente, é um perigo para as pessoas que se servem dessas infra-estruturas. É uma situação que afecta de forma negativa a presença nas escolas.

Um dos objectivos principais do governo moçambicano é a satisfação das necessidades básicas do consumo humano de água, na base de um abastecimento de água potável seguro e fiável.

A materialização deste objectivo governamental, em muitos casos, encontra muitos entraves e fracassos por parte das empresas ligadas à localização de áreas favoráveis para a perfuração e a exploração de águas que conduzem aos abastecimentos das áreas, suburbanas e rurais.

A maioria dos insucessos sobre a localização de camadas aquíferas deve-se ao facto de a escolha de locais de perfuração ser feita, em muitos casos, com a utilização do conhecimento do senso comum, por vezes ao acaso, e raras vezes se usam conhecimentos geológicos regionais e/ou prospecção geofísica para definir criteriosamente a localização das captações de água.

Como se pode aludir, as pesquisas de água não são rigorosas e são feitas usando o princípio de tentativa e erro. Acarretam grandes investimentos que se vão multiplicando anualmente, adiando assim o investimento público em outras áreas também importantes para o desenvolvimento.

Este rol de dificuldades contribui para o insucesso da maioria das perfurações, bem como para o fracasso dos esforços envidados pelo governo no investimento no sector de água e saneamento público.

Estas são razões mais do que suficientes para dinamizar estudos geológicos/geofísicos que apoiem a pesquisa de estruturas hidrogeológicas favoráveis à exploração de águas subterrâneas do território.

Pelo facto do autor ter adquirido algum conhecimento em Geofísica Aplicada e de Hidrogeologia na Universidade de Aveiro, desenvolveu um estudo sobre a prospecção de águas subterrâneas, como pressuposto para a futura intervenção em trabalhos de pesquisa de águas subterrâneas em Moçambique. Assim, a meta ao longo deste estudo foi o de adquirir conhecimentos sobre a prospecção de águas subterrâneas usando o método de resistividade eléctrica em duas variantes técnicas: sondagem eléctrica e pseudo-secções.

1.2. OBJECTIVOS

Neste trabalho definem-se um objectivo geral e objectivos específicos

O estudo tem como objectivo geral: Conhecer, gerar e disponibilizar informação sobre a ocorrência, potencialidade e circulação de águas subterrâneas nas formações metamórficas das nascentes do Fontão-Angeja.

Para o estudo de uma dada área, a prospecção geofísica não consiste unicamente na aplicação de uma técnica isolada, isto é, para o alcance de um objectivo é necessário combinar informação que envolve uma sequência de trabalhos interdisciplinares em que o fim é a busca de soluções do problema.

Assim, os objectivos específicos são:

- Identificar as estruturas geológicas da área;
- Adquirir os dados geofísicos de resistividade
- Tratar os dados geofísicos de (sondagens eléctricas e pseudo-secção) e interpretá-los com base nas características geológicas do lugar;
- Determinar as relações dos aquíferos e as nascentes no domínio da área de pesquisa.

1.3 Organização e metodologia do trabalho

A dissertação está organizada do seguinte modo:

O capítulo I (**Introdução**) faz uma abordagem inicial à problemática discutida ao longo da dissertação bem como uma descrição sucinta dos assuntos abordados nos vários capítulos. Justifica a razão da escolha do tema de estudo, os objectivos que se pretendem alcançar e a metodologia empregue para a recolha de dados.

O capítulo 2 (**Enquadramento do estudo**) constitui uma descrição sistematizada acerca da situação geográfica, enquadramento geomorfológico, geológico, climático e hidrogeológico da área de estudo no contexto regional e local.

O capítulo 3 (**Fundamentação teórica**) diz respeito à aplicação dos métodos geofísicos de superfície em problemas diversos. São descritas situações em que se usam as técnicas de sondagens verticais e de pseudo-secções de resistividade eléctrica com o objectivo de prospecção de águas subterrâneas. São também descritos aspectos como: resistividades das rochas, importância da Geofísica Aplicada, princípios da resistividade eléctrica, técnicas de sondagens eléctricas, tipos de arranjos e pseudo-secções de resistividade eléctrica. No final trata-se da hidrogeologia e apresentam-se modelos conceptuais que correspondem às hipóteses de trabalho, constituindo, assim, um suporte teórico para a recolha de dados e o seu tratamento no laboratório.

No capítulo 4 (**Dados e resultados**), faz-se a apresentação dos dados colhidos no campo através da observação geológica e das técnicas: sondagens eléctricas e de pseudo-secção de resistividade eléctrica. Por fim, apresenta-se o modelo hidrogeológico provável para a área de estudo.

No capítulo 5 (**conclusões**) faz-se as considerações finais, resumindo sucintamente os principais resultados baseados em todo processo de recolha de dados, das observações geológicas (geologia campo/estrutural), aplicação das técnicas de sondagens e de pseudo-secções de resistividade eléctrica e no final são propostos trabalhos futuros de modo a dar continuidade ao conhecimento obtido.

Para a materialização do estudo, em primeiro lugar entrou-se em contacto com individualidades experientes na área de pesquisa e exploração de águas subterrâneas entre elas professores, consultores e posteriormente uma leitura de informações de cunho académico onde foram adquiridos dados organizados e actualizados em formato de papel e em formato digital que serviram para a compreensão do tema.

Prospecção Geolétrica de Água Subterrânea no Fontão, Angeja-Portugal

A metodologia utilizada nesta pesquisa foi dividida em três etapas principais, compreendendo: uma etapa preliminar (gabinete/laboratório), uma de campo e finalmente a do gabinete pós-campo onde se chegou ao modelo geofísico/hidrogeológico da área.

A etapa preliminar iniciou-se com uma preparação prévia do aluno no laboratório de geofísica do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro onde dentre outras actividades o aluno foi envolvido em aulas teóricas e práticas sobre sondagens eléctricas.

A etapa de campo foi realizada em várias viagens. Compreendeu principalmente o reconhecimento lito-estrutural e finalmente a execução das sondagens eléctricas e das pseudo-secções.

A etapa de gabinete pós-campo correspondeu ao tratamento e interpretação dos dados geofísicos e geológicos obtidos em campo.

As informações mais específicas e completas acerca dos levantamentos realizados em campo, envolvendo tanto a geologia quanto a geofísica, são apresentadas posteriormente nos capítulos subsequentes.

CAPÍTULO II
ENQUADRAMENTO REGIONAL

2. ENQUADRAMENTO REGIONAL

Este capítulo trata da localização geográfica, do clima, da geologia regional e local da área de estudo. O tratamento destes temas oferece possibilidades de conexões com o objecto de estudo, uma vez que esses elementos influenciam a percepção do objecto de estudo e do problema. Sobre o clima, trata-se da caracterização do tempo, da precipitação e sua correlação com as rochas. Depois faz-se o enquadramento geológico e hidrogeológico, tanto regional como local, da área do estudo.

2.1. LOCALIZAÇÃO E SITUAÇÃO GEOGRÁFICA

A área estudada situa-se na Beira Litoral, no município de Albergaria-a-Velha e no distrito de Aveiro. Localiza-se a nordeste do rio Vouga e de Angeja, entre as localidades de Gândara e da Ribeira do Fontão (Fig2). Está representada na folha topográfica 174 (Murtosa), na escala de 1: 25 000, da Carta Militar de Portugal, editada pelo Serviço Cartográfico do Exército e na parte mais a sudeste do mapa geológico 16A (Aveiro), na escala 1: 50 000, editada pelos Serviços Geológicos de Portugal.

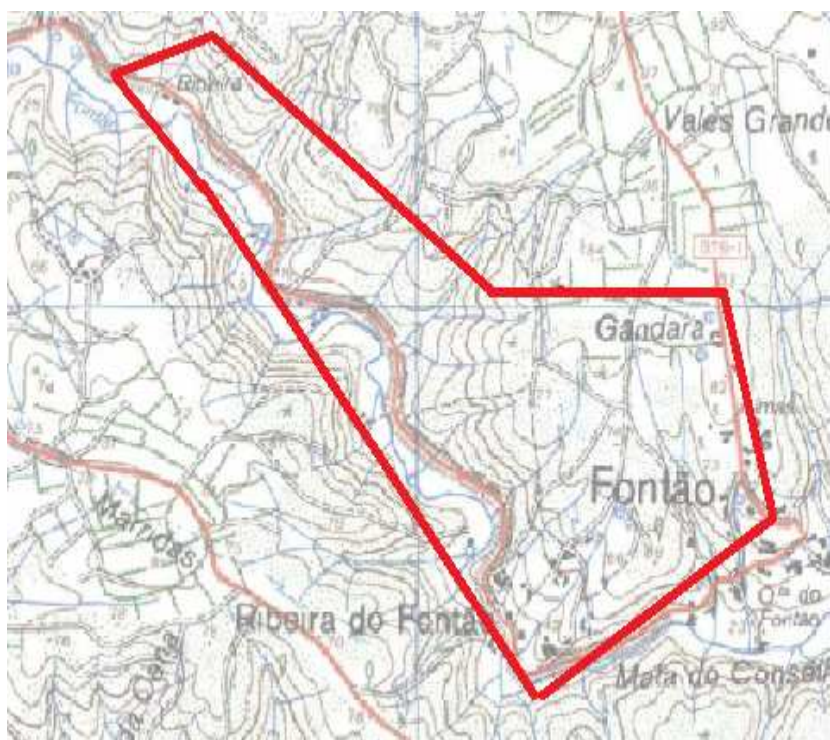


Figura 2 - Localização geográfica da área do estudo;

2.2 GEOMORFOLOGIA

Em termos geomorfológicos, esta região faz parte da superfície aplanada de largura e altitude variáveis (altitudes que não ultrapassam os 250m) que acompanha todo o litoral oeste de Portugal e que se designa de plataforma litoral (Ferreira, 1983 e Daveau, 1995).

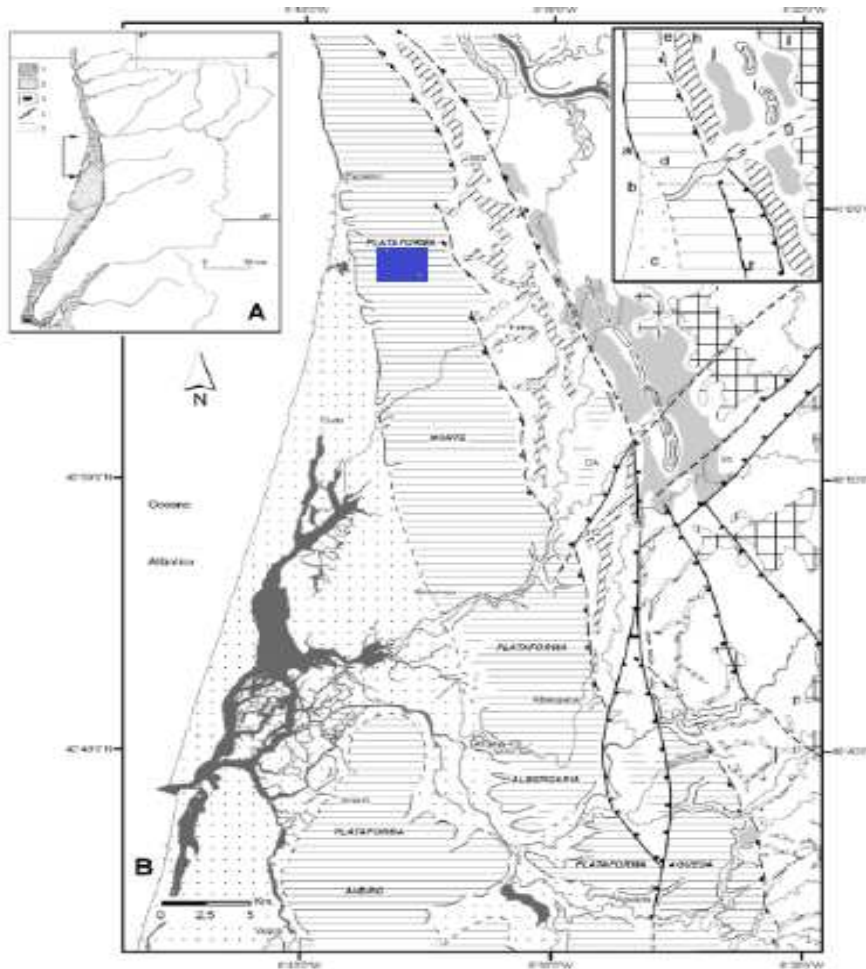


Figura 3 - A: Esquema da plataforma litoral em Portugal (segundo Ferreira, 1961); d -plataforma litoral e níveis inferiores relacionados. Adaptado da Carta Geológica de Portugal, esc. 1/500000, Instituto Geológico e Mineiro; (Cabral e Ribeiro (1988)

Na área estudada (fig.3) o relevo apresenta-se comparativamente mais escarpado do que na região situada mais a oeste de Angeja testemunhando, provavelmente, a influência das diferentes litologias aflorantes nestes dois domínios.

O relevo acidentado do interior é composto por uma série de elevações estreitas e alongadas, com topos aplanados muito exíguos e vertentes muito íngremes, fortemente dissecadas pela rede hidrográfica, ela própria assumindo direcções preferenciais, nomeadamente, NE/SW.

As elevações, muitas vezes de topos planos, situam-se a altitudes que variam entre os 78 e os 83 metros (junto a Gândara). Estes relevos são interrompidos por vales encaixados (a cotas entre 9 e 27 metros) construídos pela Ribeira do Fontão e pelos seus afluentes. Fazem parte deste grupo, os terraços fluviais mais altos da mesma ribeira e do Vouga, assim como os depósitos aluviais actuais e os depósitos de vertente com expressão cartográfica que, no geral, cobrem pequenas áreas.

2.3. CLIMA

A abordagem do clima e dos seus respectivos factores neste trabalho tem a ver com a necessidade de compreender a hidrogeologia da área estudada. Alguns comportamentos hidrogeológicos serão diferentes quando se apreciam em Moçambique

Capítulo II – Enquadramento Regional

comparativamente a Portugal (fig. 4), como por exemplo a recarga dos aquíferos livres; no entanto, no que diz respeito à circulação em meios rochosos fracturados assume-se que as duas regiões possam ter algumas parecências.

É conhecido o papel do clima na modificação da composição e da estrutura das rochas, na erosão, no transporte e na deposição dos materiais meteorizados. Refere-se, neste contexto, a ligação entre diferentes climas e os diferentes aspectos da meteorização física e química bem como do tipo de erosão e transporte dos materiais.

Além de outros factores como o relevo e a geologia, o clima exerce influência sobre a produtividade dos aquíferos controlando a profundidade e a natureza da meteorização, além de regular a recarga (Custódio e Llamas, 1996). A quantidade da precipitação altera o nível freático e a qualidade da água causando grandes diferenças nas características dos aquíferos de regiões distintas e na mesma região ao longo do ano.

Se considerarmos a alteração da mesma litologia numa região de clima árido-semiárido e numa área de clima húmido (com valores de precipitação anual superior a 1000 mm) verifica-se que na primeira das duas situações os produtos da meteorização não ultrapassam, geralmente, um metro de espessura enquanto em regiões de clima húmido, a camada alterada é mais espessa, variando entre 65 e 130 metros de espessura Unesco; (1984).

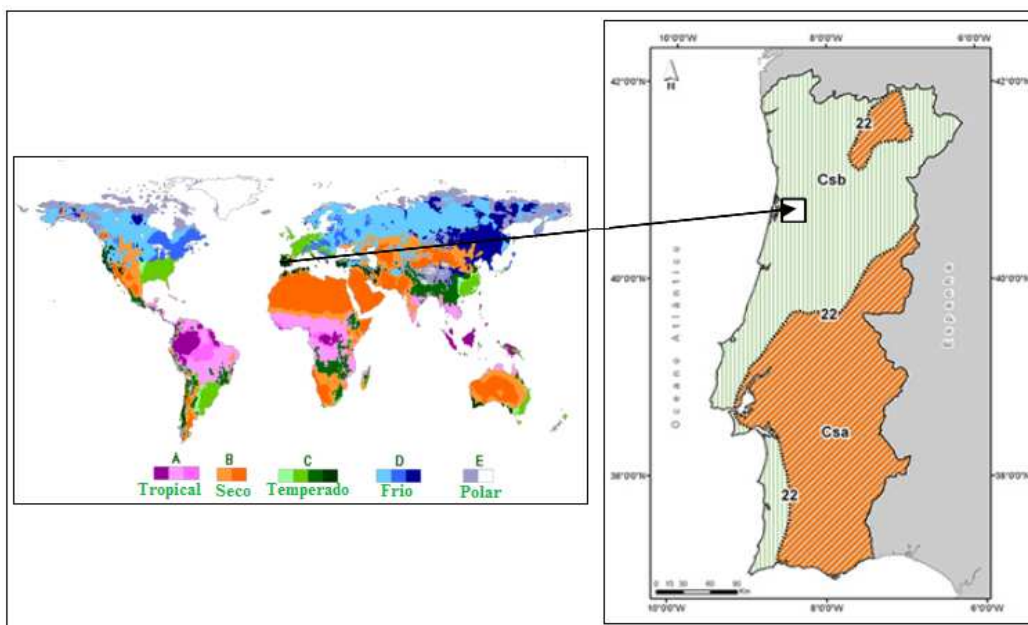


Figura 4 - Clima de Portugal segundo a classificação climática de Köppen (IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera 2014); Adaptado de FAO-SDRN, 1997.

De acordo com a classificação de Köppen, (FAO-SDRN, 1997), a península Ibérica tem um clima temperado (Fig. 4). Todavia, o clima de Portugal continental, segundo a classificação de Köppen, divide-se em duas regiões: uma de clima temperado com Inverno chuvoso e verão seco e quente (Csa) e outra de clima temperado com inverno chuvoso e verão seco e pouco quente (Csb). O clima da região estudada inclui-se neste último tipo (Csb).

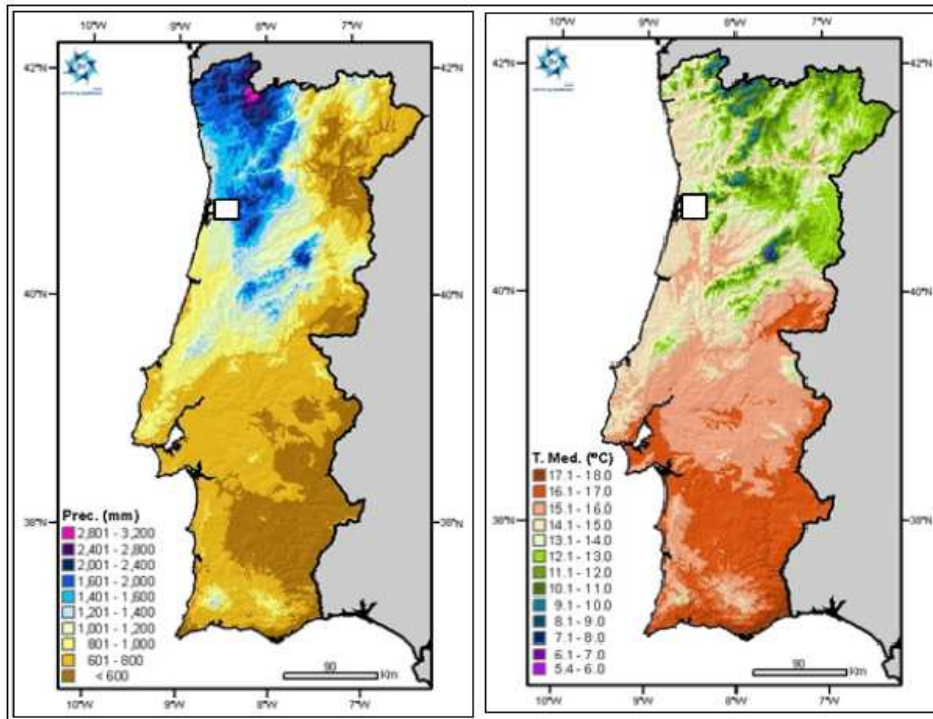


Figura 5 - Mapas: (A) Precipitação acumulada anual e (B) Temperatura média anual de Portugal (IPMA, 201).

A análise de dados obtidos entre 1961-1990, mostra que a temperatura média anual, na área estudada é cerca de 15°C e que a precipitação média anual é da ordem dos 1200mm (Fig.5).

2.4 GEOLOGIA DA REGIÃO

O conhecimento geológico é fundamental para compreender as condições que governam a localização, natureza e características de um enorme conjunto de recursos próprios de uma determinada área e que podem ou não ser essenciais à manutenção da qualidade de vida e do desenvolvimento económico, citam-se os casos dos solos, da água, dos recursos minerais e energéticos. O conhecimento da geologia de um lugar é, ainda, uma mais-valia de extrema importância e indispensável às políticas públicas, à investigação científica, aos programas para o desenvolvimento económico e às políticas de gestão dos recursos naturais (energéticos, minerais e hídricos).

Em termos geológicos, a região estudada abrange rochas metamórficas antigas de idade Proterozóica pertencentes à Zona de Ossa Morena do Maciço Ibérico, e rochas sedimentares mais recentes que fazem parte da Orla Meso-Cenozóica (Fig. 6).

As formações mais antigas, pertencentes à zona de Ossa Morena, são formadas por filádios ricos em grafite e que constituem o prolongamento dos afloramentos dos “xistos de Arada” cartografados na carta geológica de Ovar. Apresentam uma anisotropia planar tectónica bastante penetrativa de atitude geral NNW-SSE, subvertical.

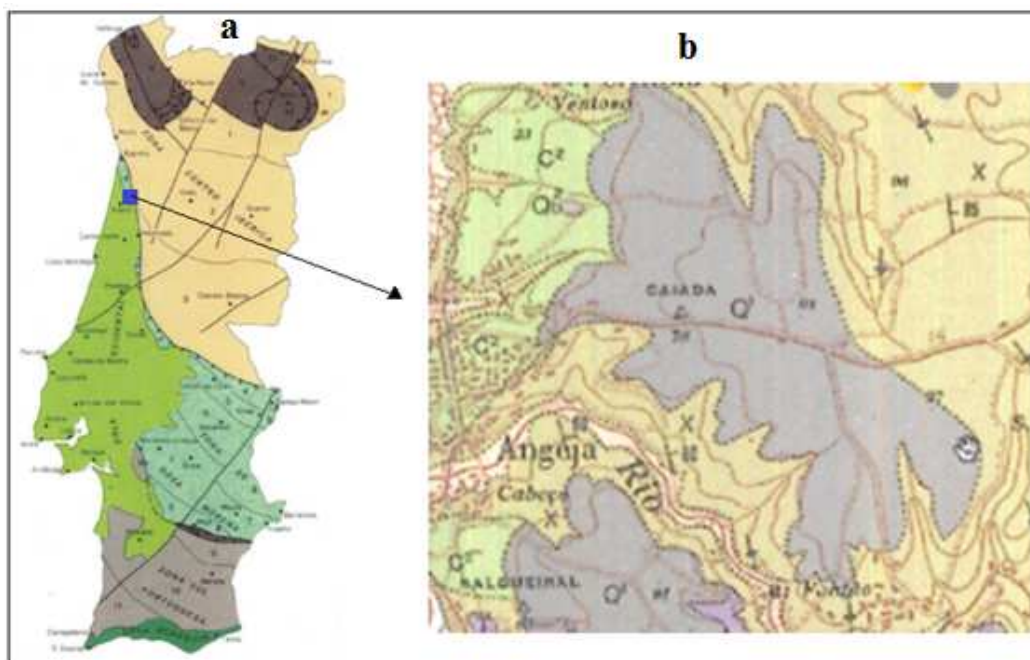


Figura 6 - Enquadramento geológico da área de estudo: a – Extraído da Carta Geológica de escala 1:500000. Serviços geológicos de Portugal; b – adaptado da Geoportall, LNG, (2014).

Estes filádios, de idade Pré-câmbrico, foram metamorfizados durante a orogenia varísca e foram afectados pelo cisalhamento dúctil, de movimentação direita, de Porto-Tomar. Esta formação está parcialmente coberta por litologias mais recentes de idade Triássico e/ou Cretácico e/ou Quaternário pertencentes à orla meso-cenozóica.

As formações do Triássico são formada por rochas sedimentares (conglomerados, arenitos e alguns níveis pelíticos) de tom tipicamente avermelhado. Na base predominam os conglomerados com clastos de grandes dimensões (por vezes de granito porfiroíde e de quartzito) e para o topo os sedimentos são mais finos. As camadas inclinam, em geral, 10 a 15° para SW (Teixeira et al, 1976). Na área de Frossos os conglomerados do Triássico assentam directamente em cima dos xistos de Arada (Teixeira et al, 1976).

Seguem-se, temporalmente, as formações do Cretácico. São formados por arenitos, argilitos e alguns níveis calcários (Teixeira et al, 1976.).

As formações do cenozóico, de idade plio-pleistocénico, estão, principalmente, relacionadas com depósitos sedimentares, a diferentes níveis, de praias antigas. Trata-se, frequentemente, de depósitos de cor clara, pouco consolidados de cascalheiras, por vezes muito espessos. O nível mais representado, na área estudada, é o nível que ocorre a 80-90m de altitude.

A litologia dos clastos é muito variada (quartzo, quartzito, gneisse, granito e xisto), assim como o seu grau de arredondamento. É visível a imbricação dos clastos e, em alguns casos, uma abundante matriz fina micácea ou argilosa de cor acinzentada. Nos terraços mais elevados nota-se que alguns clastos de quartzo e quartzito apresentam forte alteração química, com penetração irregular, conferindo aos clastos um aspecto cariado. Estes factos levam-nos a admitir que alguns dos materiais que alimentaram estes

terraços devem provir de depósitos mais antigos, nos quais se encontram clastos semelhantes e em avançado estado de alteração (Gomes, 2008).

Todas as formações referidas foram sujeitas a fracturação tardi-pós varisca testemunhando o regime frágil. As falhas tardi-variscas, com comprimento que pode ter várias centenas de quilómetros, apresentam duas orientações preferenciais (Fig. 7):

- NE-SW a NNE-SSW
- NW-SE a NNW-SSE (conjugadas das anteriores);
- N-S falhas associadas ao relevo marginal do litoral.

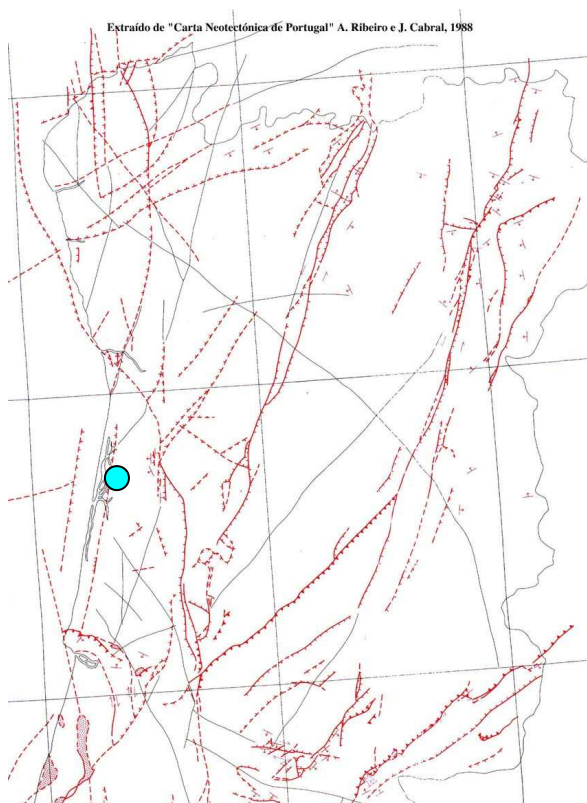


Figura 7.- Distribuição de sistemas de fracturas indicando a azul a localização da área do estudo. Carta Neotectónica de Portugal, adaptado de Cabral e Ribeiro, 1988).

2.5-HIDROGEOLOGIA

Do ponto de vista hidrogeológico a região sedimentar de Aveiro possui dois grandes sistemas aquíferos: o sistema aquífero Quaternário de Aveiro e o sistema multiaquífero Cretácico de Aveiro. O sistema aquífero Quaternário de Aveiro é definido, essencialmente, por sedimentos detríticos de idades Plistocénicas e Holocénicas, formado fundamentalmente por níveis de praias marinhas e depósitos fluviais associados. Constituem unidades aquíferas do tipo freático ou semiconfinado, por vezes de carácter local. Esta unidade é facilmente recarregada pelas precipitações locais. Na área em estudo ocorre este tipo de aquífero livre associado aos depósitos de cobertura.

Capítulo II – Enquadramento Regional

No topo do substrato rochoso constituído pela formação xisto de Arada ocorrem zonas meteorizadas que correspondem à base do aquífero livre no entanto ocorrem mais de uma dezena de nascentes na região (Fig. 8) que, poderão estar sendo alimentadas por zonas fracturadas. Declarações de um habitante local revelaram que a água da nascente principal do Fontão, junto à Igreja da freguesia, mantém o caudal todo o ano. Apesar de este estudo não contemplar, medições de caudais é possível supor: pelo facto do caudal da nascente ser constante todo o ano este não depende substancialmente da recarga pelo que a drenagem feita pela nascente deverá estar associado ao sistema de fracturas que afecta o substrato ou a um aquitardo.

A recarga dos aquíferos está influenciada pelo clima em função da pluviosidade média anual, da evapotranspiração e humidade. A recarga também depende de factores geológicos em função da porosidade e permeabilidade das formações e da inclinação do terreno que conduz ao escoamento superficial

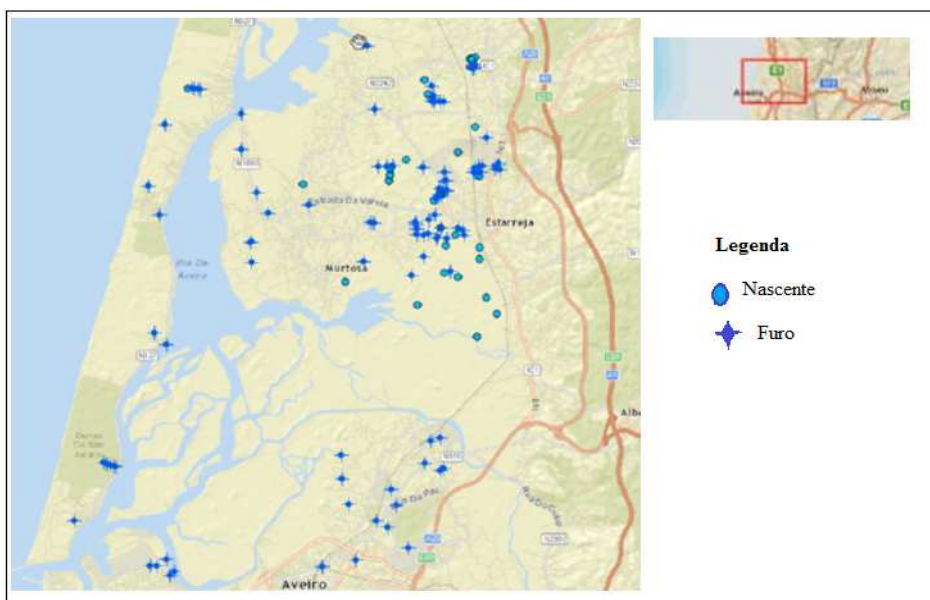


Figura 8 - Localização de nascente e furos – Aveiro; Adaptado de Geoportal LNG, (2010)

CAPÍTULO III
MÉTODOS E TÉCNICAS (FUNDAMENTAÇÃO PRÉVIA)

3. MÉTODOS E TÉCNICAS (FUNDAMENTAÇÃO PRÉVIA)

A investigação científica é um caminho para entender a percepção dos fenómenos físico-naturais da terra e do universo, é principalmente um modo de obter conhecimento sobre eles. Existe, desse modo, uma implicação directa entre o investigador e a percepção/observação de informação de outrem, dando como produto, o desenvolvimento da ciência e da técnica.

Na literatura científica, podem-se encontrar inúmeros trabalhos que tratam a utilização de métodos geofísicos, particularmente da resistividade eléctrica usando a técnica da sondagem eléctrica, por si só ou associada à técnica da pseudo-seção em trabalhos do tipo: hidrogeológico, prospecção arqueológica, pesquisa de minerais metálicos e estudos ambientais.

R. Rocha *et al.* (2003) no trabalho intitulado: *Métodos geofísicos aplicados à prospecção de água subterrânea em rochas cristalinas do Alentejo – vantagens e limitações*; aplicaram com sucesso métodos eléctricos usando várias técnicas: sondagens eléctricas e pseudo-seções dipolo-dipolo. Nesse estudo, foi discutida e demonstrada a importância e a utilidade dos métodos geofísicos de profundidade e de superfície em hidrogeologia e apresentando exemplos de estudos concretos ao nível académico, apoio às autarquias na pesquisa de água subterrânea e localização de novas captações. O estudo permitiu detectar com precisão estruturas geológicas (falhas, fracturas, filões), contactos entre diferentes formações geológicas susceptíveis de apresentar potencialidades de água para o abastecimento público daquela região.

Lima e Barbosa (2011) no estudo: *Prospecção de recursos hidrotermais em terrenos cristalinos, em Caminha, Noroeste de Portugal*, usando métodos geofísicos, nomeadamente, a resistividade eléctrica associado ao método electromagnético, desenvolveram um estudo hidrogeológico desta área, tendo conseguido identificar zonas de baixa resistividade, relacionadas com o contacto entre a rocha granítica e a formação metassedimentar e/ou com a faixa de deformação onde está parcialmente instalada uma ribeira. Os mesmos autores, notabilizam as vantagens dos métodos geofísicos relativamente aos métodos tradicionais de investigação do subsolo (ex.: sondagens), essencialmente devido à sua rapidez na avaliação de grandes áreas e com custos relativamente menores. As sondagens permitiram inferir a real situação geofísica e hidrogeológica das zonas e afiguram-se como as mais promissoras para a realização de sondagens mecânicas de pesquisa e eventualmente para a construção de captações definitivas, visando a revelação e exploração do recurso hidromineral.

Custodio e Llamas, (1983) no livro intitulado *Hidrogeologia Subterrânea*, referem que para a compreensão dos contextos geológicos mais ou menos complexos, os métodos geofísicos têm-se revelado muito importantes para estudos referentes à localização e caracterização de estruturas subsuperficiais susceptíveis de apresentar interesse na prospecção e pesquisa de águas subterrâneas.

3.1. GEOFÍSICA APLICADA

A geofísica aplicada é um ramo da Geociências que estuda propriedades das rochas e minerais bem como os fenómenos associados a estas. Nos seus estudos aplicam-se os princípios da Física, tendo como objectivo investigar, localizar e identificar a distribuição espacial dos materiais e estruturas que compõem a Terra. Os estudos geofísicos aplicam-se na caracterização de estruturas geológicas, na prospecção de recursos naturais, no apoio à caracterização de sítio para geotecnia e engenharia civil e do ambiente de acordo com a (Tabela1):

Tabela 1 – Aplicações dos métodos geofísicos

Caracterização de estruturas geológicas	Falhas geológicas, sinclinais, anticlinais, camadas rochosas,
Prospecção de Recursos	Identificação de: zonas mineralizadas, depósitos de argila e de areia, ocorrências de recursos energéticos (carvão e petróleo), circulação de águas subterrâneas entre outras armadilhas minérios de alto valor económico.
Ambiente	Estimar a porosidade dos materiais rochosos nos estudos ambientais; identificação e avaliação de riscos naturais, sismos, vulcões, deslizamentos de terras, contaminação de águas e solos
Engenharia Civil/Geotecnia	Localização de cavidades e outras medições de heterogeneidades do subsolo, propriedades geotécnicas dos materiais para escarificação de solo, etc.

3.1.1. Classificação dos métodos geofísicos

A prospecção geofísica compreende variados métodos, de acordo com a propriedade física em estudo (Tabela 2).

Cada método empregue em pesquisas da subsuperfície, fornece uma resposta geofísica de uma estrutura segundo os parâmetros físicos que o método investiga. De facto, a resposta obtida varia de acordo com o método empregue, sendo o sucesso da aplicação do método dependente do contraste entre a estrutura a prospectar e o seu encaixante (Oliveira, 2010).

Como se pode verificar na (tabela 2), esta ciência engloba diferentes métodos de investigação. Porém, para fins deste trabalho, será somente focalizada a resistividade, para revelar as propriedades da subsuperfície, vertical e lateralmente, com o propósito de testar e identificar reservatórios naturais de água.

Capítulo III – Métodos e Técnicas (Fundamentação Prévia)

Tabela 2 - Resumo dos principais métodos Geofísicos, modificada (Keary, 2009).

Método	Parâmetro Medido	Propriedade Física
Sísmico	Tempo de percurso de ondas sísmicas reflectidas/refractadas	Densidade e Elasticidade das Rochas
Gravimétrico	Variação espacial da força do campo gravitacional da Terra	Densidade
Magnético	Variação espacial da força do campo geomagnético	Susceptibilidade Magnética
Resistividade	Resistividade aparente	Resistividade Eléctrica
Polarização Induzida	Voltagens de polarização ou resistência dependente da frequência	Cargabilidade ou efeito de frequência
Potencial Espontâneo	Potenciais Eléctricos	Resistividade Eléctrica
Electromagnético	Resposta à radiação electromagnética	Condutividade e Indutância Eléctrica
Radar	Tempo de percurso de pulsos de radar reflectidos	Constante Dieléctrica Permeabilidade magnética Resistividade
Geotérmico	Propagação do calor	Fluxo Térmico

3.1.2. Propriedades eléctricas das rochas

As rochas podem ter uma composição muito diversificada, sendo que o valor da sua resistividade pode variar de local para local em função da sua heterogeneidade: nível de humidade presente na rocha, natureza dos sais dissolvidos e da porosidade efectiva, da profundidade das camadas, da idade da formação geológica, da temperatura, e de outros factores naturais (Nóbrega, et al. , 2003).

A propriedade eléctrica resistividade é conhecida através da detecção de efeitos superficiais ao nível do potencial eléctrico gerados pelo fluxo de corrente eléctrica no subsolo Telford et al. (1976). Assim, a condução da corrente eléctrica na rocha é condicionada pelos seus constituintes minerais ou pelo fluido contido nos poros da rocha (Fig. 9) e ocorre segundo dois processos: o primeiro é iónico podendo conduzir a corrente eléctrica por meio dos sais dissolvidos na água contida em seus poros por condução electrolítica e o segundo, electrónico, quando a condução por electrões é possível em minerais que admitem a condução electrónica.

Prospecção Geolétrica de Água Subterrânea no Fontão, Angeja-Portugal

Em águas no subsolo os iões são directamente responsáveis pelos valores da resistividade, entre outros, o cálcio, o magnésio, o potássio, o sódio, carbonatos, carbonetos, sulfatos e cloretos; algumas rochas contêm minerais metálicos em alta concentração e permitem a condução ou semicondução electrónica.

A resistividade eléctrica está relacionada com os mecanismos de propagação de corrente eléctrica nos materiais. Em geral, a propagação de corrente eléctrica em solos e rochas ocorre predominantemente devido ao deslocamento de iões dissolvidos na água contida nos poros e fissuras, sendo afectada principalmente pela composição mineralógica, porosidade, teor em água, quantidade e natureza dos sais dissolvidos (Michaud, 1991; Elis et al., 2004 e Milsom, 2003).

Existe uma relação empírica entre a resistividade da rocha (ρ_{rocha}) e a do electrólito (ρ_{agua}) que é dependente da porosidade (P) sendo determinada pela lei de Archie (Orellana, 1982). Segundo esta lei, a resistividade em rochas porosas completamente saturadas em água e sem argila, varia com a porosidade de acordo com a equação 3.1 em que m é o factor de cimentação.

$$\rho_{rocha} = \rho_{agua} P^{-m} \quad 3.1$$

É conhecida uma outra relação (equação de Winsauer; Orellana, 1982) onde se acrescenta à dependência entre as duas resistividades o parâmetro textural (α) variável entre 0.5 e 1.5 que se apresenta em seguida:

$$\rho_{rocha} = \alpha \rho_{agua} P^{-m} \quad 3.2$$

O valor m varia com o grau de compactação ou cimentação da rocha que é função da respectiva idade; variando entre 0,6 para rochas sedimentares bem cimentadas; 0,9 para rochas não cimentadas, 1 a 2 para calcários e dolomites e 1,4 para rochas ígneas. São necessárias várias medidas de porosidade e resistividade da rocha e da água para conhecer a dependência e característica de cada tipo litológico. Desde que se conheça a resistividade da água a equação anterior permite obter limites de variação da resistividade das rochas dependentes dos parâmetros (α, m e P).

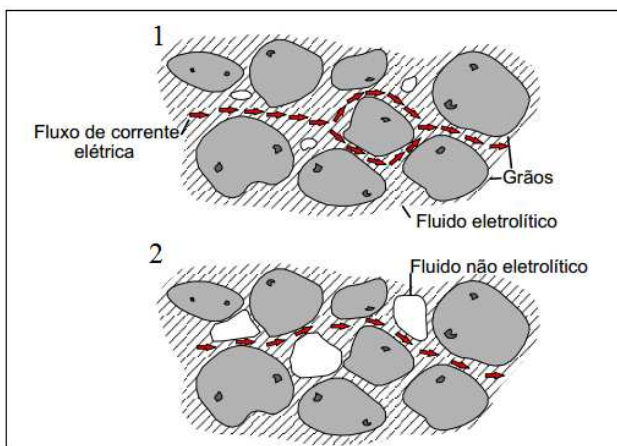


Figura 9 - Modelo esquemático de fluxo de corrente eléctrica em rochas saturadas 1, e na presença de fluido não electrolítico 2; adaptado de Keller, 1970.

No caso de presença de gases a saturação de água na rocha será reduzida e terá maiores valores de resistividade. Microscopicamente, a diminuição de fluidos acarreta redução da quantidade de sais, aumentando a dificuldade para o fluxo da corrente eléctrica como se pode observar na figura 9.

As equações anteriores possibilitam a aplicação da resistividade eléctrica em pesquisas de água ou no controle de sua qualidade.

3.1.3. Método da resistividade eléctrica - geoelectrica

Neste item, serão inicialmente apresentadas informações referentes à teoria do método da resistividade eléctrica, também conhecido por Geoelectrica, e, em seguida, serão discutidas as técnicas de aquisição dos dados.

A resistividade eléctrica é um método geofísico cujo princípio está baseado na determinação do parâmetro físico resistividade eléctrica dos materiais o qual reflecte algumas de suas características servindo para caracterizar seus estados, em termos de alteração, facturação, saturação, etc., e até identificá-los litologicamente, sem necessidade de escavações físicas (Filho, 2012).

A (fig. 10) ilustra valores de resistividade eléctrica que se podem registar em diferentes rochas e solos.

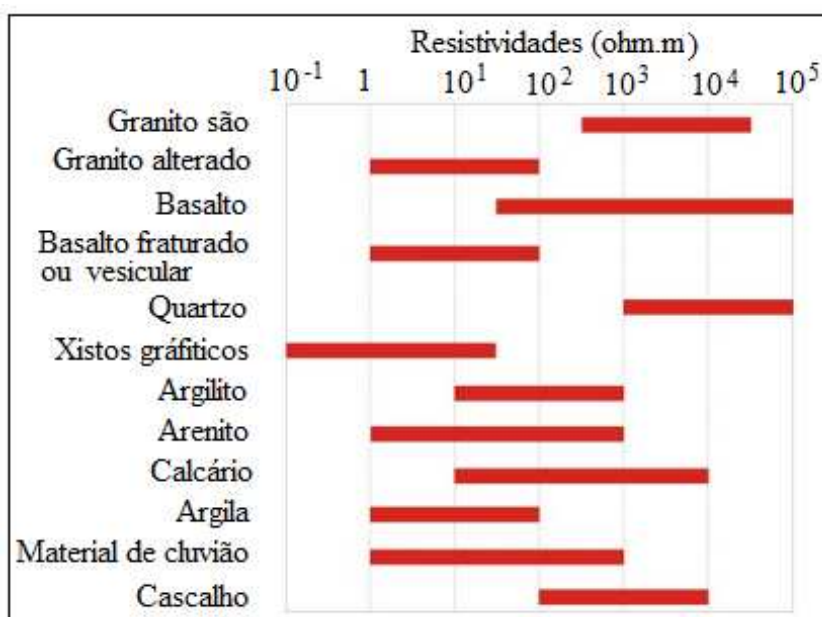


Figura 10 - Variação da resistividade rochas e solos; Modificado de Ward, (1990).

A aplicação da geofísica tem como alvo a investigação de aspectos da Terra, a partir da determinação de seus efeitos nos campos eléctrico das rochas (Luís e Silva, 1995).

Os princípios básicos do fluxo eléctrico foram definidos pelo cientista alemão Georg Simon Ohm em 1827. A lei de Ohm (equação 3.3) determina: que a corrente eléctrica (I) que atravessa um fio condutor é proporcional à diferença de potencial (V) entre os extremos do fio em função da resistência (R) do condutor (Fig. 11).

$$V = R I$$

3.3

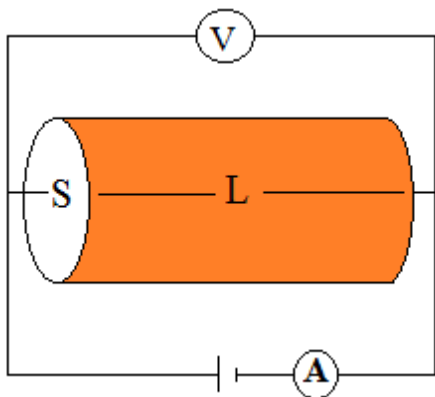


Figura 11 - Montagem eléctrica em tubo de corrente (lei de Ohm).

A propriedade física resistividade (ρ) pode ser vista como uma resistência normalizada à secção (S) e ao comprimento (L) do condutor de acordo com a expressão 3.4.

$$\rho = R \frac{S}{L} \tag{3.4}$$

As unidades no Sistema Internacional (SI) são o volt (V), para representar a diferença do potencial; o ampere (A) para a corrente, o Ohm (Ω) para a resistência e no caso da resistividade usa-se o Ohm.m.

No meio geológico, a corrente eléctrica não flui numa única direcção e sentido; a sua propagação ocorre de modo radial, perpendicular às superfícies denominadas equipotenciais, sendo que em três dimensões elas formam um hemisfério centralizado nos eléctrodos onde se faz a injeção de corrente. As linhas equipotenciais mais distantes dos eléctrodos de corrente, indicam menores potenciais e em infinito o potencial é nulo.

Considerando uma bateria ligada ao solo através de dois eléctrodos de corrente em que um se considera em infinito verifica-se uma corrente no amperímetro e no caso da resistividade do solo ser uniforme, aplicando a equação 3.3 a uma superfície (calote semiesférica) de raio r e superfície $2\pi r^2$ obtém-se a expressão 3.5 integrando todas as parcelas diferenciais das resistências desde infinito onde o potencial é nulo, até à distância r. (fig. 12)

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} \tag{3.5}$$

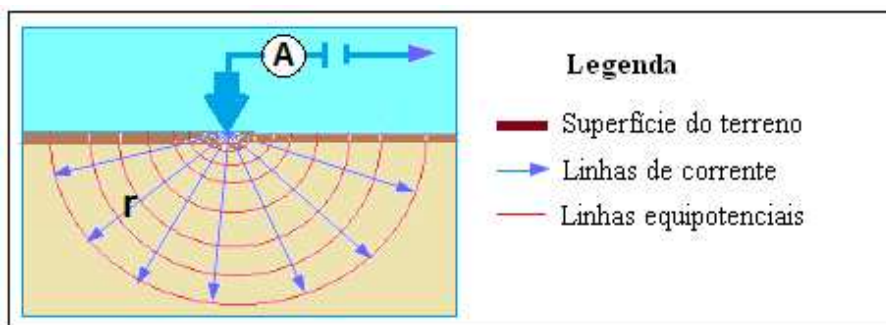


Figura 12 – Fluxo da corrente eléctrica no solo homogéneo; Adaptado de Filho, 2007.

Substituindo na Lei de Ohm (equação 3.1). Tem-se a seguinte expressão:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad 3.6$$

Portanto, considerando o meio geológico homogéneo, isto é, com uma resistividade constante, pode-se determinar a sua resistividade (equação 3.7) a partir da manipulação algébrica da equação 3.6.

$$\rho = 2\pi r \frac{V}{I} \quad 3.7$$

Quando o meio não é homogéneo podem-se realizar medidas eléctricas mas o resultado deve ser tido como uma resistividade aparente.

Para obter medidas do potencial o arranjo da figura anterior não exemplifica convenientemente; por isso, ilustra-se na figura 13 a disposição dos eléctrodos de potencial. Nesta situação a diferença do potencial medida será a diferença dos potenciais obtidos por sobreposição da equação 3.6 e obtém-se a equação 3.8

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad 3.8$$

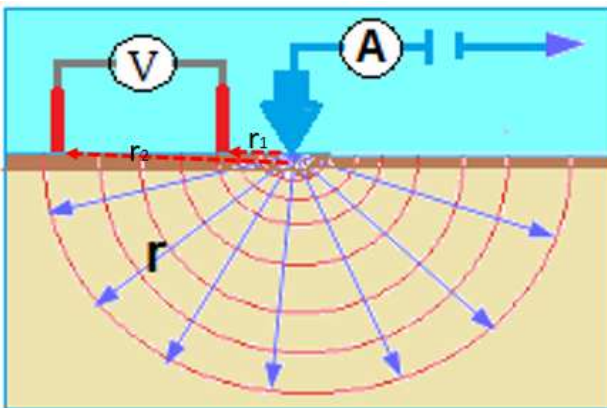


Figura 13 - Diferença do potencial no campo; Adaptado de Filho, (2007).

Portanto, em trabalhos práticos, na dificuldade de ter um eléctrodo de corrente em infinito usam-se pouco os dispositivos das figuras anteriores. Usa-se de modo geral, um dispositivo de medição formado por quatro eléctrodos (Fig. 14); executam-se medidas da resistência eléctrica que se transformam em resistividades aparentes em função da geometria dos eléctrodos para subsequente interpretação da distribuição espacial da propriedade eléctrica no meio geológico.

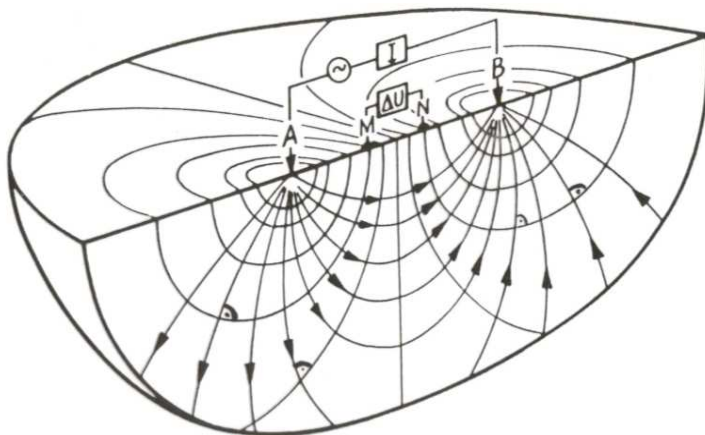


Figura 14 - Dispositivo de quatro eléctrodos para a determinação de resistividade eléctrica de rochas; (Marescote, s/d).

Para o efeito, cravam-se no terreno quatro eléctrodos (A, B, M e N) (Fig. 14); um par de eléctrodos (AB), serve para introduzir a corrente eléctrica de baixa frequência (inferior a 10 Hz) no subsolo e, o outro par, é utilizado para medir a diferença de potencial (vtagem) que se estabelece entre os eléctrodos (MN) resultante da passagem da corrente. A corrente eléctrica atravessa as equipotenciais e o campo eléctrico define-se como a razão entre a diferença do potencial e a distância infinitesimal entre dois pontos muito próximos. Nas três próximas figuras, ilustram-se linhas de corrente resultantes da acção do campo eléctrico gerado entre os eléctrodos de corrente para terreno homogéneo (fig.15 - a), para meios heterogéneos (fig.15 - b) e para camadas horizontais (fig.15 c e d), deste modo fazendo, à superfície, leituras do potencial eléctrico que é perpendicular às linhas de corrente é possível aproximar o conhecimento, dentro de certos limites, à constituição do terreno em profundidade.

Quando uma corrente eléctrica é injectada no subsolo através de dois eléctrodos (AB), esta produz uma diferença de potencial que é medida por um segundo par de eléctrodos (MN).

O valor medido desta diferença de potencial é função da resistividade aparente do subsolo e do arranjo geométrico dos eléctrodos, sendo que a profundidade investigada depende do espaçamento entre os eléctrodos de corrente em virtude do fluxo eléctrico atingir maiores profundidades com espaçamentos maiores Orellana, (1972).

Os potenciais em M (V_M) e em N (V_N) pode ser obtido por sobreposição de acordo com equações 3.9 onde AM, BM, NA e BN são distâncias entre eléctrodos de corrente e de potencial.

$$\begin{aligned}
 V_M &= \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \\
 V_N &= \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

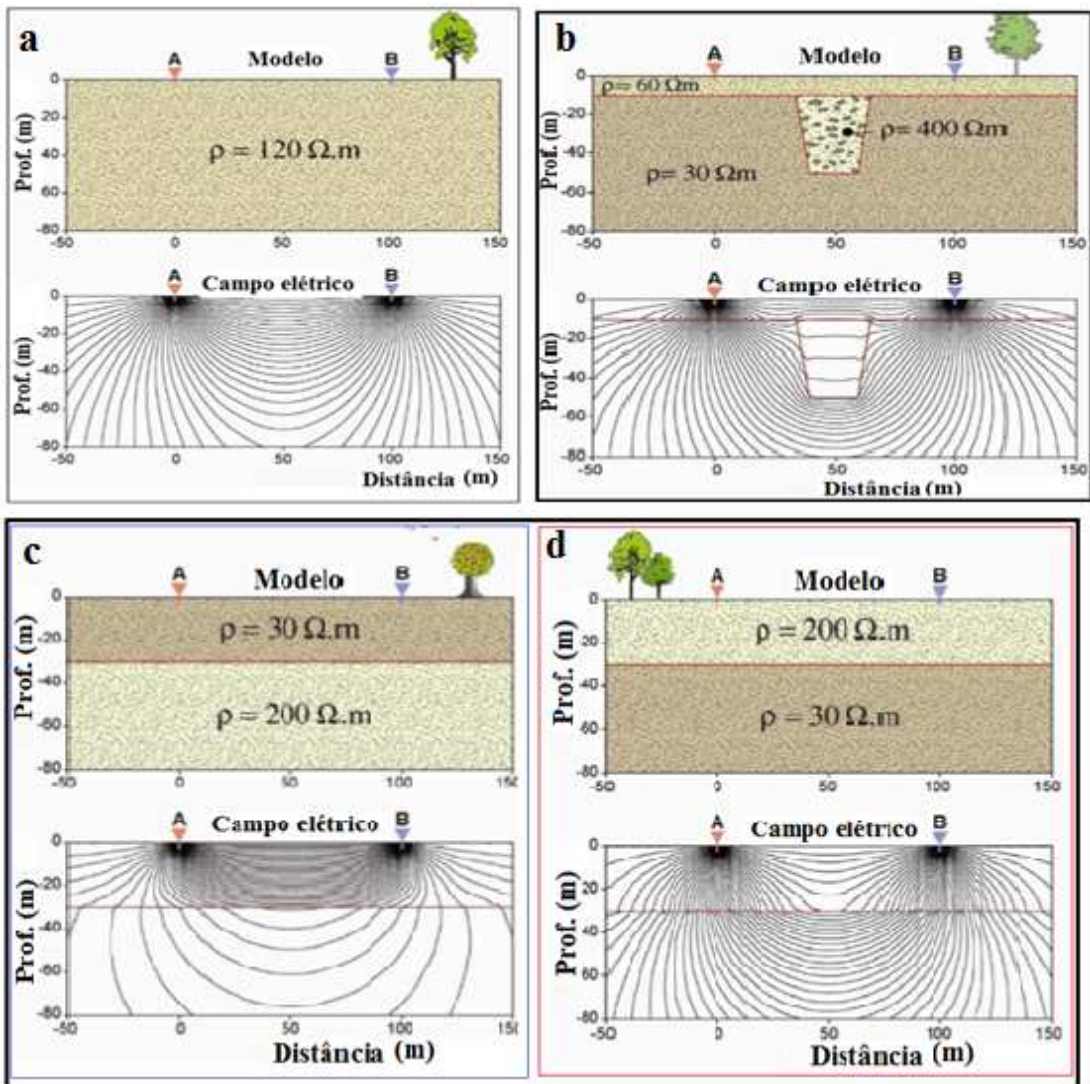


Figura 15 - Fluxo da corrente em diferentes meios: a – homogéneo; b – heterogéneo; c e d – camadas horizontais; Adaptado de Marescote, 2006.

A diferença de potencial registada no equipamento para uma definida posição dos eléctrodos MN, será:

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N, \quad 3.10$$

Substituindo as equações 3.9 em 3.10 obtém-se a seguinte expressão:

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \quad 3.11$$

Assim, pode-se calcular o valor da resistividade aparente (ρ_a) do meio estudado mediante as seguintes equações:

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \quad 3.12$$

Onde: K é o factor geométrico do arranjo de quatro eléctrodos (ABMN)

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad 3.13$$

Portanto, ao utilizar o mesmo arranjo de eléctrodos para efectuar medições sobre um meio homogéneo (fig. 15 - a), a diferença de potencial observada ΔV será diferente da obtida sobre um meio heterogéneo (fig. 15 - b) como também em camadas horizontais com diferentes resistividades (Fig. 15 - c e d), pois o campo eléctrico deverá sofrer modificações em função da heterogeneidade dos materiais geológicos. O efeito da anisotropia também é muito comum, no entanto, em trabalhos práticos, muitas vezes considera-se o meio como homogéneo e isotrópico no sentido de simplificação do problema.

Quando se faz a aplicação do método da resistividade eléctrica, durante a interpretação dos dados recolhidos, deve-se considerar as possíveis distorções do campo eléctrico provocadas pela existência dessas heterogeneidades ou anisotropias no terreno. As distorções que na prática mais afectam o campo eléctrico são: a estratificação e suas inclinações, a xistosidade, ocorrência de falhas ou de outros acidentes geológicos.

3.1.4. Dispositivos e técnicas

Como foi visto anteriormente, pode-se deduzir que as resistividades das rochas dependem de inúmeros factores e podem apresentar uma ampla gama de variação o que leva à realização de medidas eléctricas no terreno com diversos arranjos de quatro eléctrodos variando as distâncias entre eléctrodos de acordo com procedimentos técnicos padronizados.

Entre estes procedimentos, encontra-se a técnica das sondagens eléctricas onde se usam dispositivos simétricos que irradiam de um centro, aumentando desse modo a profundidade de penetração da corrente no subsolo, e fornecem, no caso de camadas horizontais, modelos de resistividade ao longo de uma linha vertical. É por esta razão que se adopta o termo SEV como uma sondagem eléctrica vertical, se o terreno não for constituído por camadas horizontais a aplicação do termo SEV pode ser questionável.

Outro procedimento técnico é conhecido por pseudo-seção que pode ser realizado com diferentes arranjos de eléctrodos numa única linha. Neste caso é costume distribuir eléctrodos igualmente espaçados ao longo de um alinhamento recto.

Além das sondagens eléctricas, que fornecem informação segundo a dimensão vertical (1D), e da pseudo-seção de resistividade (2D), existem, ainda, a resistividade 3D e o perfil de resistividade 1D. Nesta última variante técnica mantêm-se a dimensão da distância entre eléctrodos que se deslocam lateralmente ao longo de uma linha à superfície do terreno.

A escolha do arranjo de eléctrodos para um dado estudo depende de vários factores: facilidades operacionais, resolução vertical e resolução lateral.

Diversos tipos de arranjo podem ser usados: Schlumberger, Wenner, dipolo-dipolo, polo-dipolo, gradiente, unipolo, três eléctrodos, dois eléctrodos, etc. Orellana, (1982). Os mais utilizados são os primeiros dois anteriormente referidos.

3.1.4.1 Dispositivo Schlumberger

O arranjo de eléctrodos designado por Schlumberger (Fig.16), é um dispositivo simétrico em que a distância entre os eléctrodos de potencial (M e N) não varia e é pequena em relação à distância entre os eléctrodos (A e B) que se expande para a corrente atingir profundidades maiores. As medidas são atribuídas ao ponto central do dispositivo.

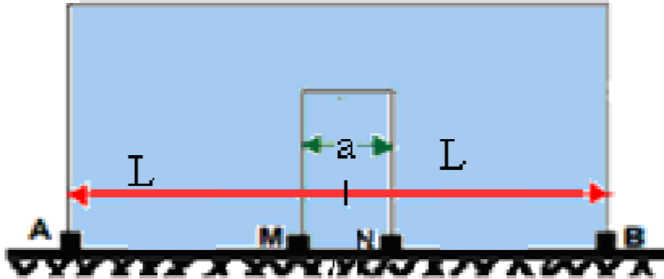


Figura 16 - Arranjo de Schlumberger.

As leituras, neste tipo de arranjo, estão menos sujeitas às variações laterais no parâmetro físico medido, irregularidades na superfície topográfica e ruídos produzidos por fontes artificiais (Braga, 2007).

Substituindo as distâncias AB/2 (L) e MN (a) na expressão 3.10 obtém-se:

$$\rho_a = \frac{\pi}{a} \left(L^2 - \frac{a^2}{4} \right) \frac{\Delta V}{I} \quad 3.14$$

Ou segundo Orellana (1982) pode simplificar-se desde que $MN \leq AB/5$;

$$\rho_a = \frac{\pi}{a} L^2 \frac{\Delta V}{I} \quad 3.15$$

Este autor demonstrou-a que para a relação 3.15 o erro na transformação dos valores das resistências em resistividades aparentes é inferior a 5 % relativamente ao emprego da equação 3,14

3.1.4.2 Dispositivo Wenner

No dispositivo Wenner os eléctricos são igualmente espaçados, como se mostra na figura 17 em que A e B são os eléctrodos de corrente. A diferença de potencial é medida entre os eléctrodos M e N do dispositivo

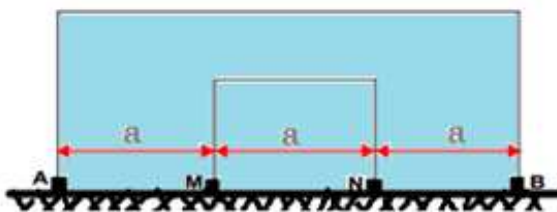


Figura 17 - Arranjo de Wenner.

Na prática são usados quatro eléctrodos localizados em uma linha recta segundo um intervalo entre eléctrodos (a) correspondente à distância $AB/3$ e substituindo e simplificando as distâncias na expressão 3.10 obtém-se 3.16:

$$\rho_{\alpha} = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad 3.16$$

Dependendo da disposição dos eléctrodos de corrente (A e B) e de potencial (M e N), este arranjo pode distribuir-se segundo distintas configurações (Carpenter & Habberjam, 1956): alfa, beta e gama. Geralmente quando se faz referência ao dispositivo Wenner este corresponde a configuração tripotencial alfa.

Neste trabalho optou-se pelo uso do dispositivo de Wenner. A razão da escolha deste dispositivo deve-se ao facto de oferecer bons resultados no mapeamento de estruturas horizontais, pois é relativamente sensível a variações verticais de resistividade em subsuperfície profundidade, fornecendo desta forma, uma boa resolução vertical (Loke, 2004 e Borges, 2002).

O dispositivo Wenner é robusto e a sua aplicação tornou-se mais popularizada a partir dos primeiros trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa da Universidade de Birmingham Griffiths e Turnbull, (1985) e Loke, (2010). Apesar de apresentar variações de sensibilidades verticais, esse dispositivo tem um alcance de profundidade moderada. Estas características permitem sua utilização em locais com alto nível de ruído (Loke, 2010) como meio para identificar estratificações.

Outra relevância tem a ver com os dados obtidos através do arranjo de Wenner serem menos afectados por variações de resistividade e por último refere-se a elevada razão sinal/ruído que este oferece. A estas vantagens os utilizadores do dispositivo Wenner contrapõem, para iguais comprimentos de linha de emissão e intensidade de corrente uma maior resolução e profundidade de investigação do que a obtida com o dispositivo Schlumberger (Borges, 2002 e Loke, 2004).

3.1.4.3. Sondagens eléctricas

Uma das questões importantes na interpretação das sondagens eléctricas é que as curvas de resistividade aparente de campo têm uma relação entre as suas variações com a profundidade e as das secções geológicas. As secções geoeléctricas correspondem às distribuições verticais da propriedade resistividade dentro de um volume determinado do subsolo desde que o modelo geológico possa ser admitido como uma distribuição horizontal da propriedade eléctrica resistividade do meio geológico.

Estas secções, segundo Orellana, (1982), podem ser classificadas segundo seu número de camadas geoeléctricas (Fig. 18), em função de número de camadas identificadas, as secções de resistividade podem se denominadas:

Para duas camadas – Tipo -ascendentes ($\rho_1 < \rho_2$) ou Tipo -descendente ($\rho_1 > \rho_2$).

Para três camadas, Tipo: K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$); H ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$); Q ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$) e A ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$)

Para quatro camadas: Tipos KH ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$) ; QH ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$), etc.

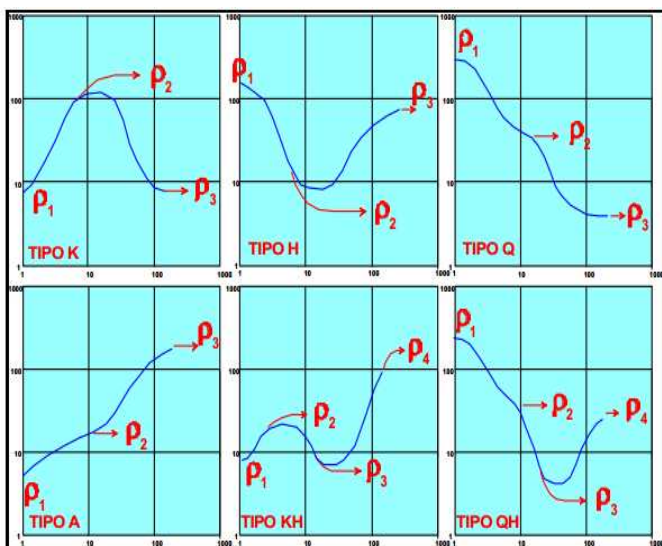


Figura 18 - Morfologia das curvas de campo; (Braga, 2000).

A análise morfológica, constitui na etapa importante da interpretação das sondagens eléctricas. É nesta análise, que o investigador define, o modelo geoelectrico da área.

A modelação das curvas de sondagens eléctricas é feita através de programas informáticos que fornecem uma solução composta por espessuras e a resistividade das camadas. Esta solução resulta muitas vezes de um processo automático de inversão de dados como no caso do programa utilizado IP2win. Orellana (1982) discute ambiguidade do problema inverso definindo resistência transversal (produto da espessura pela resistividade) e a condutância longitudinal (razão entre a espessura e a resistividade) para mostrar que existem várias soluções para os mesmos dados.

O problema de ambiguidade decompõe-se na equivalência do tipo K em que a resistência transversal é constante e no tipo H é constante a condutância longitudinal.

A interpretação dos dados teve em conta o princípio de equivalência e na figura seguinte mostram-se duas sondagens em que se optou pela segunda solução com resistividades mais próximas dos valores médios encontradas em sondagens adjacentes. Esta equivalência é do tipo H (Fig. 19).

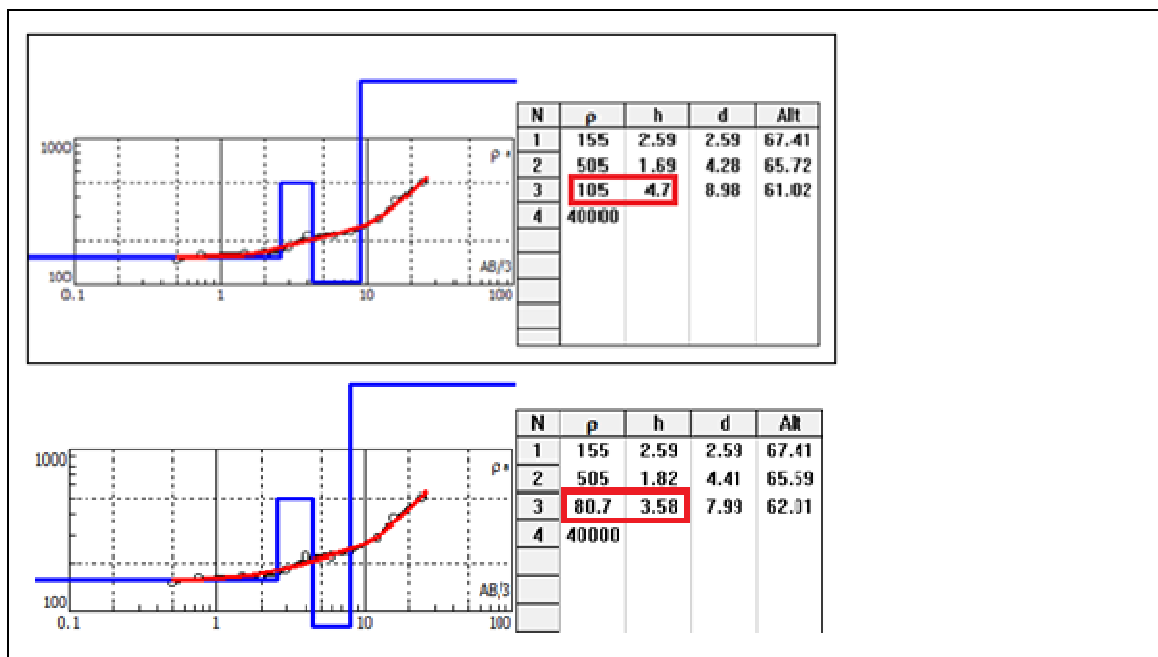


Figura 19 - Inversão de curvas com IP2win mostrando a equivalência do H.

Quando se faz um conjunto de sondagens eléctricas, lateralmente separadas, e sobre o mesmo linha, adquire-se uma imagem que expressa a variação da resistividade do terreno, representando-a lateralmente no centro da sondagem e na vertical, de acordo com espaçamento entre eléctrodos de corrente. Como resultado desta operação, obtendo-se uma pseudo-secção de resistividade aparente (Sharma, 1976; Telford et al., 1990; Kirsch e Yaramanci, 2006). Representação idêntica pode ser feita usando as resistividades e profundidades que resultam da modelação mas neste caso designa-se por secção geoeléctrica.

3.1.4.4 Pseudo-secções

O estudo, além de recorrer, numa primeira fase, às sondagens eléctricas para obtenção de modelos horizontais, foi aperfeiçoado dado que a técnica mostrou sensibilidade provocada pela heterogeneidade geológica de estruturas verticais. Martinho, (2002) refere este problema no trabalho: *Estudo integrado sobre problemas ambientais por métodos geofísicos*, limitando de certo modo, a investigação da profundidade, espessura e a resistividade das camadas verticais.

3.1.5 Modelação

A modelação consiste na obtenção de uma resposta teórica de uma distribuição espacial do parâmetro geofísico semelhante à resposta revelada pelos dados experimentais. A modelação directa consiste em conhecer a resposta teórica da distribuição espacial do parâmetro geofísico. A modelação por inversão de dados é uma metodologia que através de iterações calcula um modelo para o terreno cuja resposta teórica, segundo o mesmo dispositivo de campo, apresenta uma boa aproximação em relação ao que foi medido no campo, minimizando o erro associado ao ajuste.

A aplicação deste método permite então obter um modelo final da distribuição da resistividade do corte geofísico em função da profundidade Loke, (2004) ou seja, obter uma secção bidimensional vertical que se pode relacionar com a geologia.

A inversão de dados geofísicos, em especial dados de pseudo-secções de resistividade, é a técnica mais utilizada para a interpretação dos dados de campo em trabalhos da geofísica e para dar resposta do modelo geofísico. Ao contrário do modelo directo. A inversão de dados através de programa Res2dinv é um processo computacional iterativo, no qual só é necessário modificar os parâmetros de inversão para conseguir resultados que se ajustem a um provável modelo geológico.

A teoria da inversão só é aplicada em questões ou observações que podem ser representadas numericamente. Essas observações são os dados adquiridos e, as questões estão relacionadas, à propriedade física da Terra a serem inferidas (Barbosa, 2007).

O problema geofísico inverso solicita uma quantidade de informação maior que aquela contida nos dados, ou seja, a tentativa de resolver um problema inverso é ambíguo, uma vez que a solução não existe, ou não é estável ou não é única;isto é, a solução não obedece pelo menos a uma das condições anteriores: existência, estabilidade e unicidade (Gondolfo, 2007, Treitel e Lines, 2001).

Esta relação demonstra mais uma vez que as pseudo-secções obtidas são interpretadas tendo em conta o conhecimento adquirido pelo investigador ou através das literaturas regionais e ou local, donde resultará a respectiva interpretação geo-estrutural, hidrogeológica ou geotécnica.

3.2. HIDROGEOLOGIA

Neste subcapítulo, são revistos alguns princípios e conceitos hidrogeológicos considerados importantes para o conhecimento e a identificação de zonas favoráveis a ocorrência de águas subterrâneas.

3.2.1. Águas subterrâneas

As águas subterrâneas são um recurso natural, um bem extremamente importante para a vida e para a integridade dos ecossistemas que delas dependem, muitos estudos sobre águas subterrâneas indicam que elas representam mais de 95% das reservas de água doce exploráveis ao nível do globo. Carvalho (2006) refere que as águas subterrâneas integram a componente não visível do ciclo de água. O tempo decorrido entre a infiltração de uma gota de água (Fig. 20), precipitada pela atmosfera num dado terreno até a sua aparição em nascentes, galerias, poços, furos, ou outras manifestações naturais ou forçadas pelas actividades humanas, pode variar entre algumas semanas, meses a vários anos; centenas ou milhões de anos.



Figura 20 - Fluxo subterrâneo Teixeira, et al. (2000).

3.2.2 Armazenamento de água em rochas

As rochas funcionam como reservatórios de água, e que, pelas suas propriedades químicas e físicas, podem ser extraídas ou exploradas para diversos fins, através de técnicas apropriadas. O conjunto destes reservatórios, com água disponível para ser utilizada denomina-se aquífero. Um aquífero é um estrato ou formação geológica que permitindo a circulação da água nos seus poros ou fissuras, faz com que o Homem possa aproveitá-las em quantidade economicamente apreciáveis, para suprir as suas necessidades (Custódio & Llamas, 1983).

É importante considerar que o aquífero é um reservatório de água subterrânea, forma-se naturalmente em formações geológicas contendo poros ligados entre si, podendo armazenar a água em grandes quantidades e transmiti-la com relativa rapidez.

Na literatura sobre a hidrogeologia, são apontados três tipos de aquíferos: poroso, fissurado e carsico (Fig. 21).

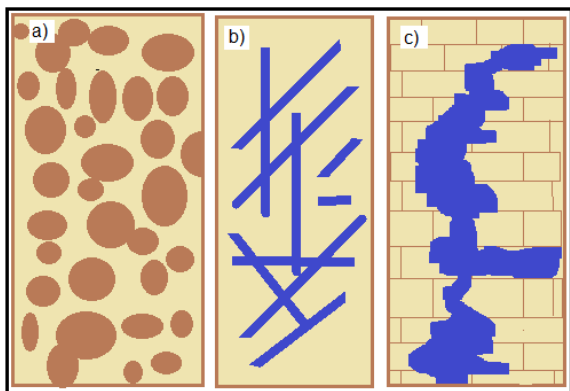


Figura 21 – a) porosidade granular, b) porosidade fissurada e c) cavidades carsicas.

Aquífero poroso granular – é aquele formado por rochas sedimentares não consolidadas, onde a circulação da água se faz nos poros formados entre os grãos de areia, silte e argila. Constituem os mais importantes aquíferos, pelo grande volume de água que armazenam, e pela ocorrência em grandes áreas. Estes aquíferos ocorrem nas bacias sedimentares e zonas de planícies onde se acumularam sedimentos arenosos. Uma particularidade desse tipo de aquífero é a sua porosidade quase sempre homogeneamente distribuída, permitindo que a água flua para qualquer direcção, em função da pressão hidrostática ali existente. Essa propriedade é conhecida como isotropia;

Aquífero fissurado – formado por rochas ígneas e metamórficas (cristalinas), por exemplo: basalto, granitos, gabros, xistos, etc. a circulação da água faz-se nas fracturas, fendas e falhas, abertas devido as tensões tectónicas. A capacidade dessas rochas de acumularem água está relacionada à quantidade de fracturas, à abertura e intercomunicação, permitindo a infiltração e fluxo da água.

Aquífero cársico (*Karst*) - formado em rochas calcárias ou carbonatadas, onde a circulação da água se faz nas fracturas e por outras descontinuidades (diáclases) que resultaram da dissolução do carbonato pela água.

Os aquíferos desenvolvem várias funções, tais como, armazenamento, regularização do fluxo hídrico, filtragem, transporte, conduzindo a água de um lugar (área de infiltração ou recarga), para outra área onde pode servir para extracção, produção energética (águas termais), ou para o desenvolvimento de estratégias ambientais (Midões, et al. 2001).

Uma das características importantes apresentadas pela superfície freática é a flutuação sazonal dos níveis de água na zona saturada. Essa flutuação é movida pelos diversos eventos naturais, sendo o mais importante o clima da região que determina os períodos sazonais de recarga.

A água subterrânea apresenta uma qualidade que pode variar desde a composição química original das águas que se infiltram, até uma composição química resultante, por um lado da dissolução de minerais constituinte das rochas atravessadas pelo fluxo e por outro, do tempo de permanência da água nas rochas.

3.2.3. Classificação hidrogeológica das formações rochosas

O estudo das características das formações rochosas no que se refere a espessura, profundidade, bem como, da sua organização espacial, constitui um requisito prévio à compreensão da ocorrência e da circulação de água subterrânea.

A capacidade de armazenar a água, (armazenamento hídrico) e permitir a circulação (condutividade hidráulica), permitem agrupar as formações e estruturas geológicas em quatro grandes tipos segundo Singhal e Gupta, (1999) – o grupo das rochas cristalinas, o das rochas vulcânicas, o das rochas carbonatadas e das rochas clásticas, (tabela 3).

Os aquíferos possuem duas características fundamentais: a primeira é a aptidão do aquífero em armazenar água e a segunda corresponde com a capacidade de escoar a água subterrânea Foster et al, (2003). Assim, os aquíferos podem ser classificados de acordo com as características hidrodinâmicas e geológicas no seguinte:

- a) Formações geológicas saturadas - a rocha contém água, possui elevada capacidade de armazenar e transmitir essa água em condições naturais e designa-se por aquíferos.
- b) Formações geológicas que podem armazenar água mas que a transmitem lentamente não sendo rentável o seu aproveitamento a partir de captações, mas que podem desempenhar um papel importante na recarga dos aquíferos adjacentes. (Um exemplo é constituído por formações de argilas siltosas ou silto-arenosas – aquitardos.)
- c) Formações geológicas que podem armazenar água mas não a transmitem, por possuírem características de retenção muito fortes (praticamente são impermeáveis), não

Prospecção Geoelectrica de Água Subterrânea no Fontão, Angeja-Portugal

possibilitando assim a sua extracção. (As formações mais características abrangidas por esta definição são as de elevado teor em argila) – aquíclusos.

d) Formações geológicas impermeáveis e sem vazios que não armazenam nem transmitem água, (por exemplo, os maciços graníticos são e não fracturados, formações metamórficas não alteradas e sem fendas e fracturas) – aquífugos.

Tabela 3 - Classifica hidrogeológica das rochas. Adaptado de Singhal e Gupta, (1999).

Grupo de rochas	Tipos de Rochas e exemplos	Principais meios de ocorrência de água
Cristalinas	Roc. Ígneas intrusivas: granito etc.; Metamórficas: xistos, gnaisses, etc.	Zonas de alteração fís. e quím. (diáclases, falhas, planos de foliação).
Vulcânicas	Roc. Vulcânicas: basaltos, andesitos, riólitos, etc.	Zona de alteração física e química. Diáclases falhas, vesículas e descontinuidades entre camadas
Carbonatadas	Roc. Carbonatadas: calcário e dolomite	Descontinuidades: falhas, diáclases; cavidades de dissolução.
Clásticas	Roc. Sedimentares consol.: siltitos, arenitos, conglomerados, etc. Roc. Sedimentares não consol. Cascalho, areia, silte, etc	Espaços intergranulares (Poros); diáclases, falhas.

3.2.4. Escoamento em meio poroso

A água subterrânea movimenta-se através dos espaços vazios interconectados no solo e do subsolo e ao longo de linhas de fractura das rochas.

Uma das propriedades mais importantes no meio poroso é a permeabilidade K definida pela lei de Darcy. A permeabilidade representa a capacidade de transportar os fluidos através da formação rochosa (Lima, 2007).

Em 1856, Henry Darcy desenvolveu esta relação básica realizando experiências com areia, concluindo que o fluxo de água através de um meio poroso é proporcional ao gradiente hidráulico, ou às diferenças de pressão (equação 3.17).

$$q = k \frac{\partial h}{\partial x} \quad e \quad Q = k \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad 3.17$$

Capítulo III – Métodos e Técnicas (Fundamentação Prévia)

Onde

q - É o caudal de água ($m^3 \cdot s^{-1}$);

A - é a área (m^2);

Q - é o fluxo de água por unidade de área ($m \cdot s^{-1}$);

K - é o coeficiente de proporcionalidade designado por condutividade ou permeabilidade hidráulica ($m \cdot s^{-1}$);

h - é a carga hidráulica e x a distância

A condutividade hidráulica k é fortemente dependente do tipo de material poroso. Assim, o valor de k para solos arenosos é próximo de $20 \text{ cm} \cdot \text{hora}^{-1}$. Para solos silteosos este valor diminui para $1,3 \text{ cm} \cdot \text{hora}^{-1}$, em solos argilosos este valor decresce muito mais para $0,06 \text{ cm} \cdot \text{hora}^{-1}$.

A condutividade hidráulica das rochas depende do tipo de rocha, sendo maior em rochas sedimentares, como o arenito, e menor em rochas ígneas ou metamórficas, excepto quando estas são muito fracturadas; neste caso a sua condutividade pode ser relativamente alta (Fetter, 2001). A (tabela 4) a seguir, apresenta faixas de valores de condutividade hidráulica normalmente encontrados em diferentes tipos de solos e rochas.

Tabela 4 - Condutividade hidráulica segundo a natureza das rochas; (Lima 2007).

Material	Limite inferior ($mm \cdot s^{-1}$)	Limite superior ($10^{-3} m \cdot s^{-1}$)
Karst	10^{-3}	103
Rochas ígneas e metamórficas fracturadas	10^{-5}	10
Arenito	10^{-8}	10^{-4}
Rochas ígneas e metamórficas não fracturadas	10^{-10}	10^{-4}
Areia	10^{-2}	10^2
Seixos	10^{-1}	10^3

As rochas, raras vezes, são absolutamente sólidas e compactas. Na sua composição física, contempla numerosos vazios (poros e fracturas) denominados também por porosidade, que podem variar dentro de mesma rocha, lugar, concentrações de minerais ou grau de alterabilidade das rochas. Estas assimetrias são factores que jogam um papel muito importante para a acumulação e a conseqüente circulação. Segundo Midões et al (2001) Singhal e Gupta (1999), se por um lado o armazenamento e a circulação de água

subterrânea dependem da porosidade e da permeabilidade das formações, por outro esta ao circular vai interferir nestas propriedades porque ao longo do seu percurso vai interagindo com as rochas que atravessa.

No estudo hidrogeológico em rochas fracturadas (Banks e Robins, 2002) referencia-se o comportamento e a complexidade das fracturas de cisalhamento e classificam-se as fracturas de acordo com o desenvolvimento, a intensidade e da natureza da rocha (fig. 22).

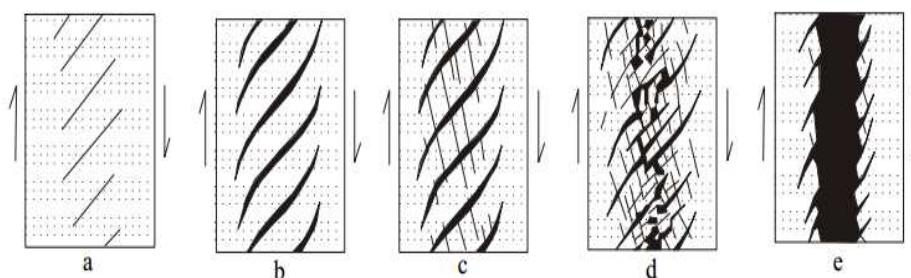


Figura 22 - Estágios de desenvolvimento de fracturas (Banks e Robins, 2002). a) Fracturas fechadas; b) Fracturas quase fechadas; c) Fracturas interconectados (zona permeável); d) Fracturas interconectados (zona muito permeável); e) Fractura interconectados (zona muito permeável).

A relação entre a ocorrência e a potencialidade de acumulação de água num determinado aquífero cristalino depende das características das fracturas que podem estar associadas a um sistema de fracturação. As fracturas fortemente interligadas, como as descritas na (fig. 22), são as mais favoráveis para a formação de aquíferos de elevado caudal, ou seja, a transmissibilidade da água num aquífero fracturado é condicionada pelo grau ou índice de facturação e interconexão das mesmas.

Fracturas abertas que não são preenchidas com material da rocha meteorizada, são excelentes condutas da água subterrânea, mas a sua permeabilidade é fortemente reduzida quando as fracturas são preenchidas com material argiloso (Neves, 2004).

3.2.5. Recarga do aquífero

A recarga num aquífero é a quantidade de água que escoa verticalmente até atingir o nível freático aumentando assim a quantidade de água subterrânea armazenada. Contribui para esta componente do ciclo hidrológico a infiltração da água que pode provir da chuva e da neve, da conectividade entre os lagos ou rios com aquíferos ou entre aquíferos.

No balanço hídrico do solo, a recarga é estimada a partir da seguinte (eq. 3.18)

$$R = P - E_s - ETR \pm \Delta S \quad 3.18$$

Em que:

R – é recarga

P - Precipitação

E_s - é o escoamento superficial

ETR – evapotranspiração real

ΔS – é a variação do conteúdo de humidade no solo.

A recarga num aquífero é processada por meio de infiltração proveniente da precipitação através do contacto com as rochas permeáveis e pode ser definida como o processo pelo qual a água penetra nas camadas superficiais do solo, se move para baixo através dos vazios pela acção da gravidade, até atingir uma camada impermeável, formando um aquífero.

Para que um determinado aquífero seja recarregado há vários factores nomeada mente: porosidade, permeabilidade condutividade entre outros que em conjunto se correlacionam.

3.3. MODELOS GEOFÍSICOS - HIDROGEOLÓGICOS

Segundo Castany (1982); Sander (1998); Cruz, (2000) Assad et al. (2004), a prospecção hidrogeológica compreende em uma sequência de actividades a saber: estudos prévios, reconhecimentos geológicos e geomorfológicos da área, análise da cartografia geológico, estrutural, hidrogeológica, e finalmente, levantamentos geofísicos. A aplicação da Geofísica à Hidrogeologia necessita de um conhecimento geofísico de base com vista a estabelecer, a partir dos dados brutos, um modelo geofísico sobre um modelo geológico que permita, deduzir determinado comportamento hidráulico.

Os modelos conceptuais são uma simplificação das condições naturais de circulação das águas ou representam o entendimento das condições hidrogeológicas, possibilitando explicar de forma didáctica o comportamento dos fluidos em profundidade. Podem ser imprecisos ou conter simplificações, no entanto, apresentam subsídios para o conhecimento dos aquíferos (Rosen & LeGran, 2000).

A conceptualização, ou melhor a cénarização de modelos conceptuais admissíveis no contexto geológico de um lugar, constitui uma prioridade absoluta para conduzir a investigação, ou seja, a partir dos modelos pré concebidos será possível esboçar possíveis situações de intervenção posterior para o alcance dos objectivos.

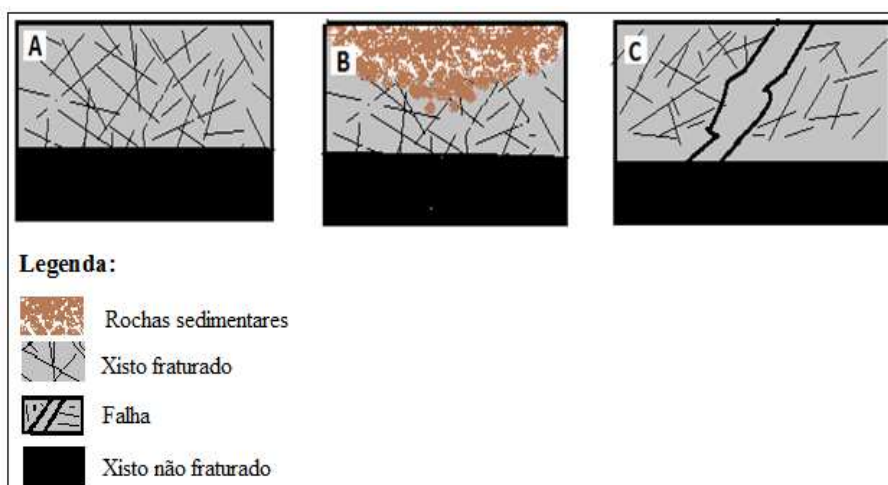


Figura 23 - Modelos conceptuais/hipóteses de trabalho.

Propõem-se os seguintes modelos como hipóteses de trabalho (Fig. 23):

- **Primeiro modelo /hipótese I**

Sabe-se que nas rochas cristalinas, a ocorrência da água subterrânea pode estar relacionada com as descontinuidades do maciço, pelo que a prospecção da água subterrânea neste ambientes visa fundamentalmente a identificação, caracterização das zonas fracturadas com potencialidades para a reserva de água. Usando esta lógica, foi criado o primeiro modelo (Modelo /hipótese I). Acreditou-se neste modelo devido a localização de zonas fissuradas humedecidas com água (Fig. 23 - A).

- **Segundo modelo /Hipótese II**

Dentro do quadro tectónico e geológico regional, a área de estudo, encontra-se totalmente inserida no domínio do Maciço Antigo (Série-Negra), uma unidade geológica muito complexa, composta por essencialmente rochas metamorfizadas e muito fracturadas, cujos elementos litológicos localmente se sobrepõem, de cobertura Quaternária (Fig. 23 - B), constituindo um factor relevante que possibilita a infiltração de águas e a respectiva formação de aquíferos. Neste tipo de litologia, admitiu-se a possibilidade da existência de aquíferos livres e que se comunicam com a nascente.

- **Terceiro modelo/ Hipótese III**

Finalmente a observação de áreas de falha possibilitou a criação do terceiro modelo caracterizado por uma estrutura sub vertical que corta o xisto.

CAPÍTULO IV

DADOS E RESULTADOS

4. DADOS E RESULTADOS

Neste capítulo, faz-se à apresentação, análise e interpretação referente aos dados e aos resultados que foram obtidos através de: sondagens eléctricas, pseudo-secções e da geologia de campo/estrutural tendo sempre, como referência, o suporte do quadro conceptual, tal como os objectivos e os modelos/hipóteses de pesquisa que orientaram o estudo.

No mapa seguinte (Fig. 24) sobre a base cartográfica UTM referida ao datum WGS84, apresentam-se resultados do levantamento da facturação através dos símbolos rodados segundo a direcção do plano, à azul a localização das nascentes e a vermelho os trabalhos geofísicos (pontos de sondagens e linhas das pseudo-secções).

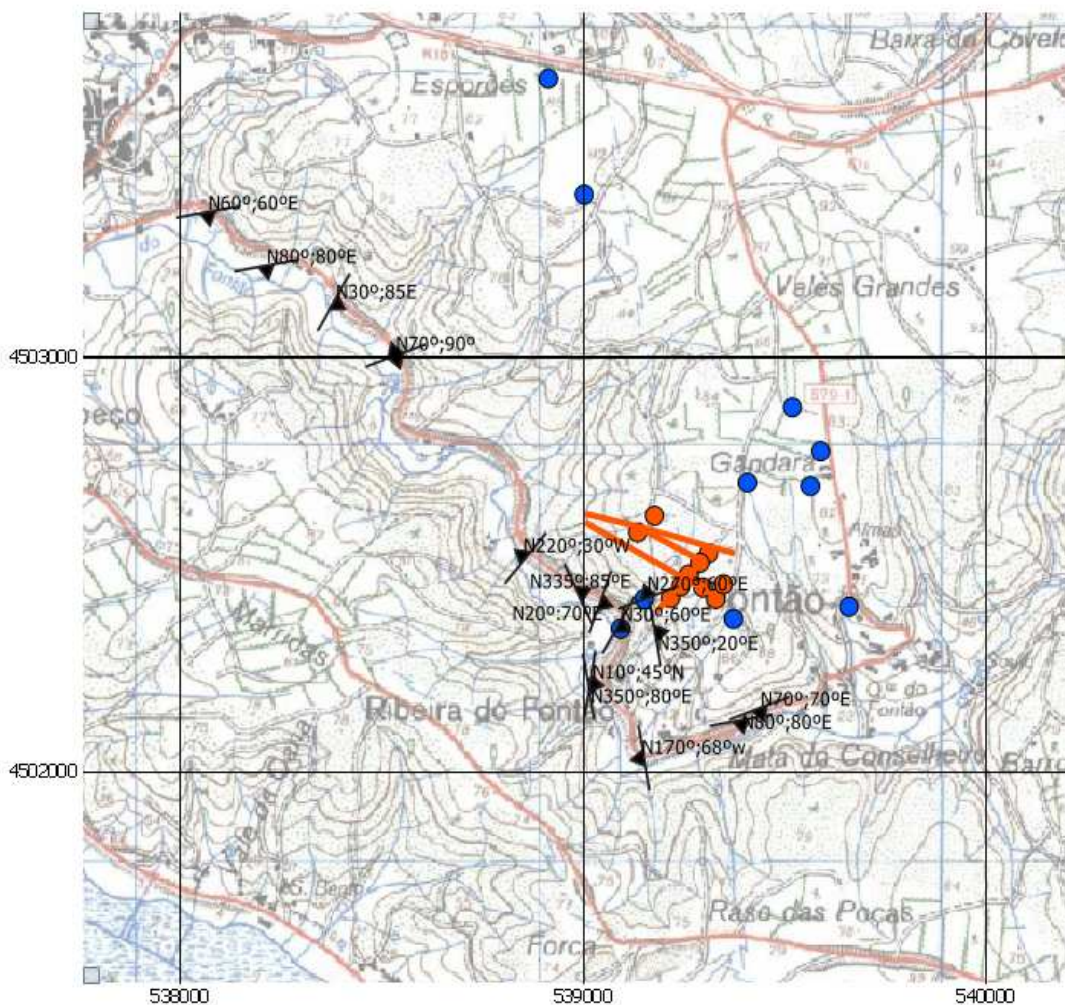


Figura 24 - Mapa de trabalhos geológicos e geofísicos à azul a localização das nascentes e a vermelho os trabalhos geofísicos (pontos de sondagens e linhas das pseudo-secções); UTM_WGS84.

4.1. OBSERVAÇÕES GEOLÓGICAS

Para a análise do problema geofísico que constitui o principal objectivo deste trabalho, é crucial a apresentação das observações geológicas de campo. Nesse sentido, faz-se referência às litologias aflorantes na área em estudo bem como a dados estruturais relativos às atitudes das fracturas mais importantes (Fig.25).

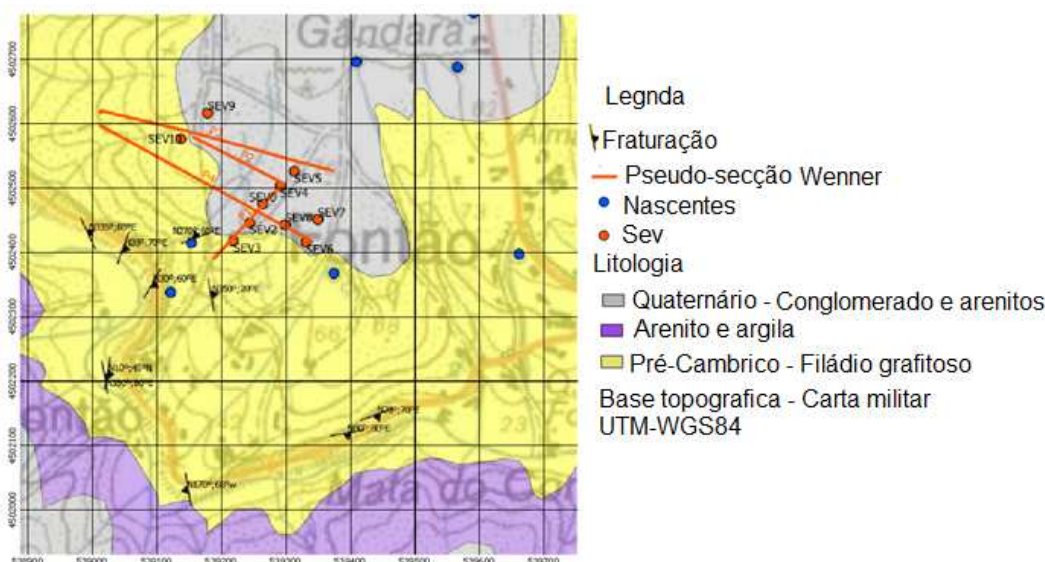


Figura 25 - Mapa geológico da área estudada.

4.1.1. Litologias aflorantes

Na área estudada afloram rochas sedimentares detríticas e metamórficas (Fig.25; Fig.26). As rochas sedimentares são, predominantemente, conglomerados e arenitos de idade Quaternária e Triássica (Fig.25).

As formações do Quaternário, aflorantes às cotas dos 70 a 82m (fig.25) são de cor clara e são formadas por conglomerados mal calibrados, pouco consolidados, com clastos arredondados e subarredondados de esfericidade baixa, de quartzito e, menos frequentemente, de filádios e de granito. Em vários locais observa-se a intercalação de estratos horizontais de arenito (fig.26).

As formações do Triássico são identificadas na parte sul da área estudada (Fig.25), às cotas dos 10 a 15m, dada a sua cor vermelha característica (Fig.26B). Nesta área as rochas são, essencialmente, conglomerados mal calibrados, com alguns níveis de arenitos e argilitos (Fig.26).

Por baixo da formação do Quaternário e do Triássico são observadas rochas metamórficas, de idade pré-câmbria, e pertencentes à unidade de Arada (Fig.25, 26,27).



Figura 26 - A conglomerado e arenito; B – arenito e argilito e argila; C – Xisto grafitoso com dobramento assimétrico da xistosidade e veios de quartzo; D - xisto grafitoso bancadas mais metapsamíticas.



Figura 27 - Quaternário (terraços fluviais) assente no xisto.

Tratam-se de filádios, geralmente grafitosos, com algumas intercalações de bancadas mais metapsamíticas (fig 26 D, 27D.) e com veios de quartzo. Mais raramente são

encontradas bancadas de filádios de tom avermelhado, cuja cor pode ser resultante da presença de óxidos de ferro.

As observações geológicas de maior pormenor foram realizadas ao longo da Rua Ribeira da Figueira nos afloramentos de talude. Ao longo desta estrada, a única litologia aflorante é a dos filádios de idade pré câmbria. Trata-se de filádios de cor acinzentada, com clivagem xistenta bastante penetrativa de atitude geral N-S, subvertical.

Os filádios apresentam uma clivagem xistenta bastante penetrativa, de atitude geral N 10°W, subvertical. Todavia, esta atitude foi modificada por diferentes tipos de dobras (Fig.28). Frequentemente é observado o dobramento assimétrico da xistosidade e dos veios de quartzo (Fig. 26C).

Mais localmente, são observadas dobras de plano axial vertical N10° Subvertical, dobras do tipo chevron e do tipo Kink de plano axial subhorizontal (Fig.28). Estas últimas têm associado fracturação.

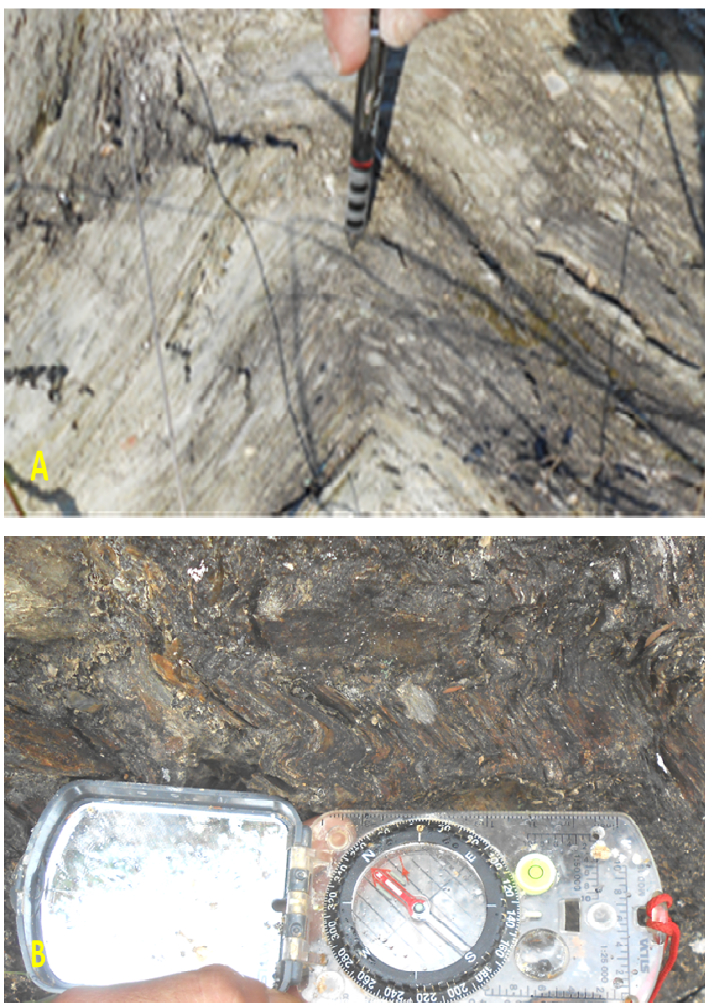


Figura 28 - A – dobras de plano axial subvertical B - Dobra tipo Chevron de plano axial subhorizontal afetando a xistosidade

A fracturação é observada nos filádios e define um conjunto de famílias de fracturas e de falhas de diferente atitude.

Foram identificadas, na área de estudo, fracturas paralelas à xistosidade, com esmagamento e preenchimento de argila. Algumas fracturas estão associadas a dobras do tipo Kink (Fig. 29)

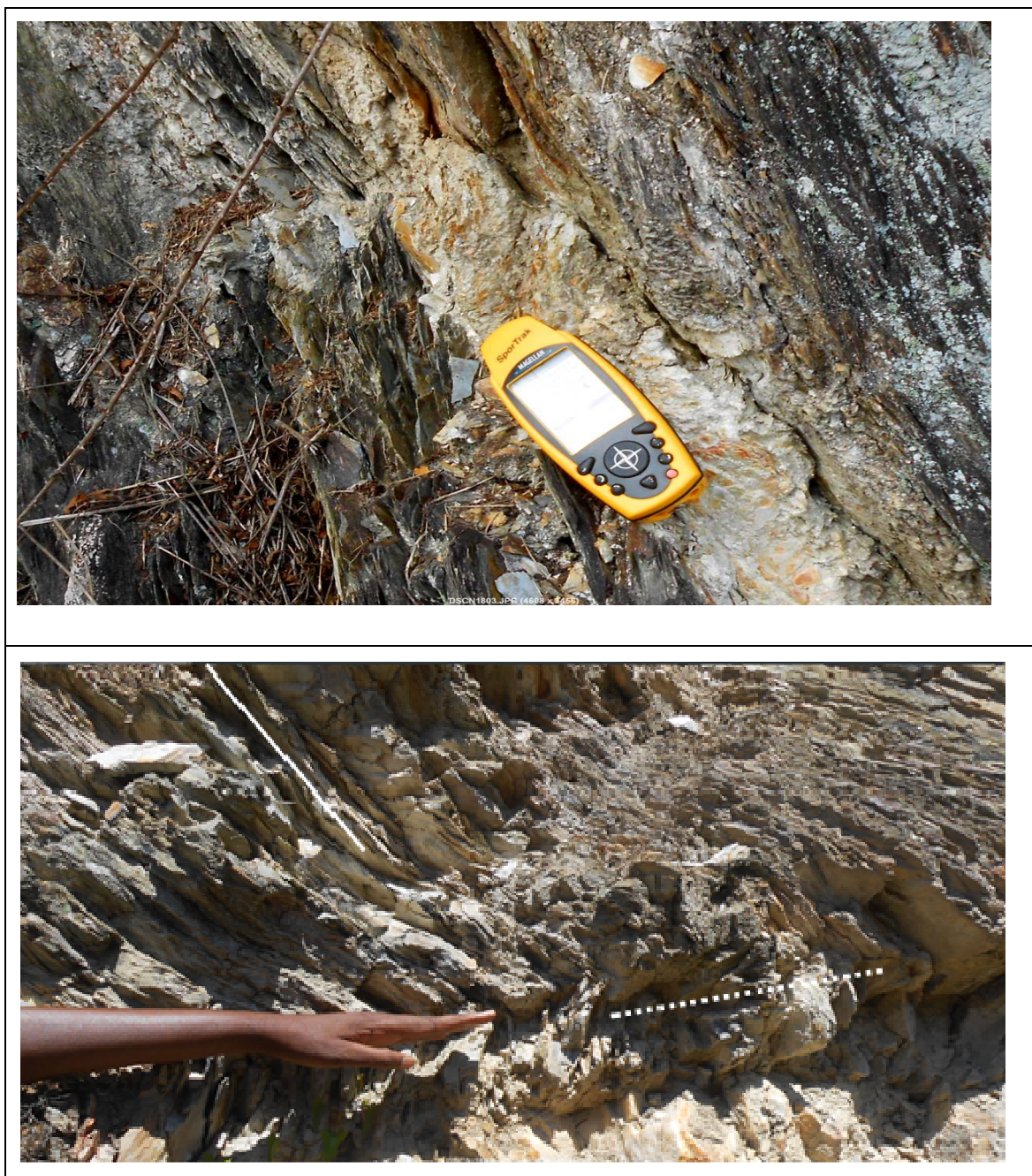


Figura 29 - A – fractura com argila; B – fractura associada a dobras kink



Figura 30 - Falha normal subvertical e subhorizontal

A fracturação representa um reflexo dos últimos impulsos da orogenia varisca e constitui a expressão de deformação em regime frágil que afectou o maciço Hespérico entre o fim do dobramento e metamorfismos variscos e as fases de distensão do Mesozóico. Localmente é composta por um importante sistema de desligamento com fracturas subhorizontais e conjugadas que afectam todas as estruturas existentes mediante uma orientações N-S, NW-SE e E-W (Fig. 29 A e B ; Fig.30).

4.1.2. Análise do sistema de fracturas predominantes

Depois do levantamento estrutural, os dados foram agrupados e analisados com ajuda do programa computacional *Stereo Net* (fig. 31).

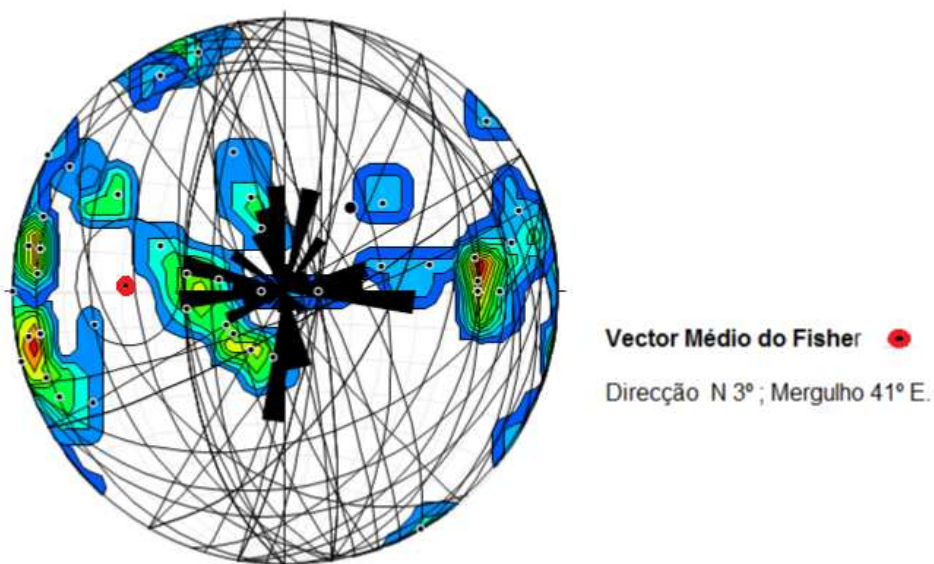


Figura 31 - Diagrama estruturais – Rua da Ribeira; Fontão – Angeja.

Na figura 31 nota-se a existência de duas famílias (sistemas de fracturação) que se passa a descrever.

Sistemas principais:

Entre 0 a N10°; mergulho sub-vertical paralela a xistosidade

E-W mergulho subhorizontal conjugadas com a direcção preferencial

Na figura 31 também se representou a vermelho o valor médio de Ficher relativo aos pólos. Este valor médio dá uma maior representatividade à orientação N-S e considera um mergulho médio de 42°E.

Observou-se nas zonas com maior intensidade de fracturação e com fracturas abertas (entre 5 e 10 cm) há preenchimento de argila e por vezes drenam água (fig29. B).

4.2 GEOFÍSICA

Numa primeira fase realizaram-se sondagens eléctricas e numa segunda fase as pseudo-secções com o objectivo: explicar a origem da água das nascentes localizadas na área do estudo geofísico. Na Figura 32 apresentam-se a topografia, envolvente do trabalho geofísico, as localizações dos centros das sondagens eléctricas, das linhas referentes às pseudo-secções e, ainda, das nascentes locais identificadas no campo e na carta topográfica do exército 174.

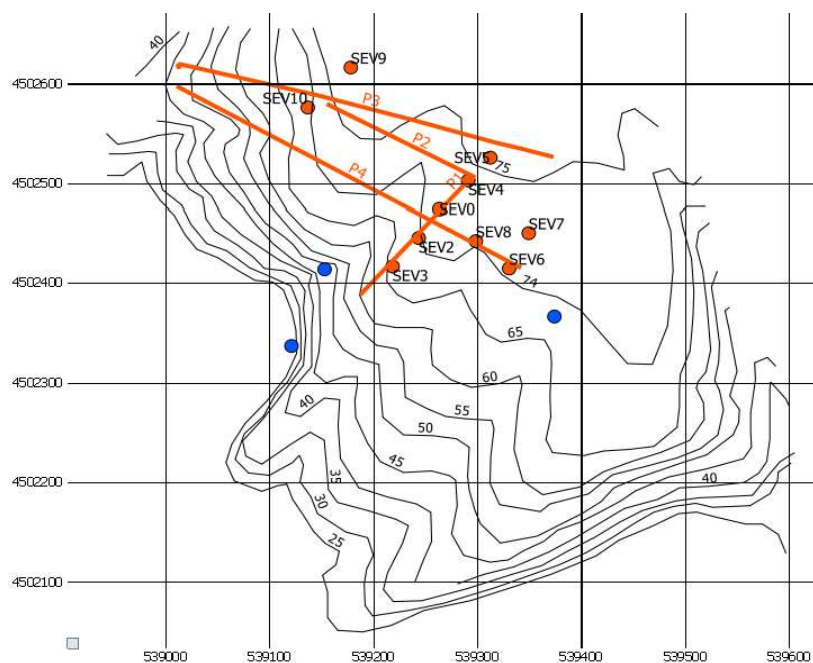


Figura 32 - Localização UTM-WGS84 dos trabalhos geofísicos sobre a superfície topográfica com posicionamento dos centros das SE (circulo vermelho), das linhas das pseudo-secções e das nascentes (circulo azul).

4.2.1. Sondagens eléctricas

No total foram realizadas dez sondagens eléctricas com o dispositivo Wenner representadas através dos seus respectivos centros de acordo com a ordem do levantamento (Fig. 32).

A técnica das sondagens eléctricas deve ser usada em situações onde se esperam encontrar distribuições horizontais das propriedades eléctricas do solo. Neste estudo,

existe uma cobertura sedimentar quaternária que cumpre essas condições e é provável que o topo do substrato esteja alterado de modo a conferir igualmente essa horizontalidade à hipótese de trabalho. Nesse contexto, o substrato, não alterado, deverá apresentar valores de resistividade elevados e a tendência da SEV deve ser de modo a aumentar os valores da resistividade aparente quando o espaçamento entre os eléctrodos de corrente cresce. Nesse sentido o espaçamento máximo entre os eléctrodos de corrente foi 36m o que facilitou tanto o espalhamento dos eléctrodos como a escolha da orientação das sondagens eléctricas de modo a minimizar as irregularidades topográficas desfavoráveis na aplicação da técnica SEV.

Para a aquisição de dados utilizou-se o resistivímetro *Terrameter*, modelo SAS 300B, fabricado pela empresa sueca ABEM e construiu-se um equipamento para comutar através de quatro selectores (a vermelho na figura 33) os eléctrodos ABMN e realizar desse modo as sondagens eléctricas com facilidade e rapidez.

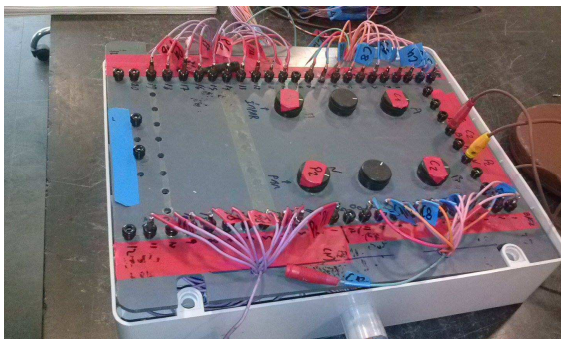


Figura 33 - Equipamento auxiliar aplicado ao resistivímetro;

Os dados obtidos nas SEV foram interpretados qualitativamente e quantitativamente com o programa IPI2win (Shevnin,1990).

4.2.1.1 Interpretação qualitativa

Pode verificar-se que a maioria das sondagens eléctricas apresentam resistividades elevadas à superfície decrescem para valores baixos de resistividade e voltam a subir revelando a influência do substrato resistivo (Fig.34). Exclui-se deste comportamento a SEV9 (Tipo Q) e SEV10 (Tipo A) Apesar do comportamento do Tipo H poder ser explicado por uma camada resistiva no topo em que a porosidade estará preenchida com ar, seguida de uma camada intermédia com água e na base uma camada resistiva do substrato rochoso pouco poroso; é possível considerar mais camadas intermédias que podem conferir às sondagens morfologias de quatro camadas do tipo HA e QH e até de mais camadas.

Dentro do grupo de sondagens do tipo H distingue-se a SEV10 realizada sobre o xisto aflorante na zona Oeste da área (Fig. 25) que mostra um baixo contraste entre as resistividades das três camadas variando entre 400 a 600 Ohm.m e devem ser características do xisto com alguma humidade. A SEV9 é do tipo Q e situa-se junto à sondagem anterior (SEV10) no sector Oeste, mas, neste caso, está implantada sobre a cobertura (Fig. 25) a camada superior apresenta resistividades muito elevadas, cerca de 4000 Ohm.m que são características da cobertura quaternária sem água e tende, quando aumenta o espaçamento entre eléctrodos, para os valores do xisto obtidos na sondagem

anterior. A outra sondagem que merece atenção especial é a SEV2; é do tipo A e corresponde a uma sondagem próxima da nascente, situada a meia encosta, e do contacto entre o xisto e a cobertura; este comportamento anormal pode revelar: por um lado, a não aplicabilidade da técnica devido ao contacto próximo, ou por outro lado, devido à presença de uma zona mais fracturada e com água evidencia variações laterais de resistividade.

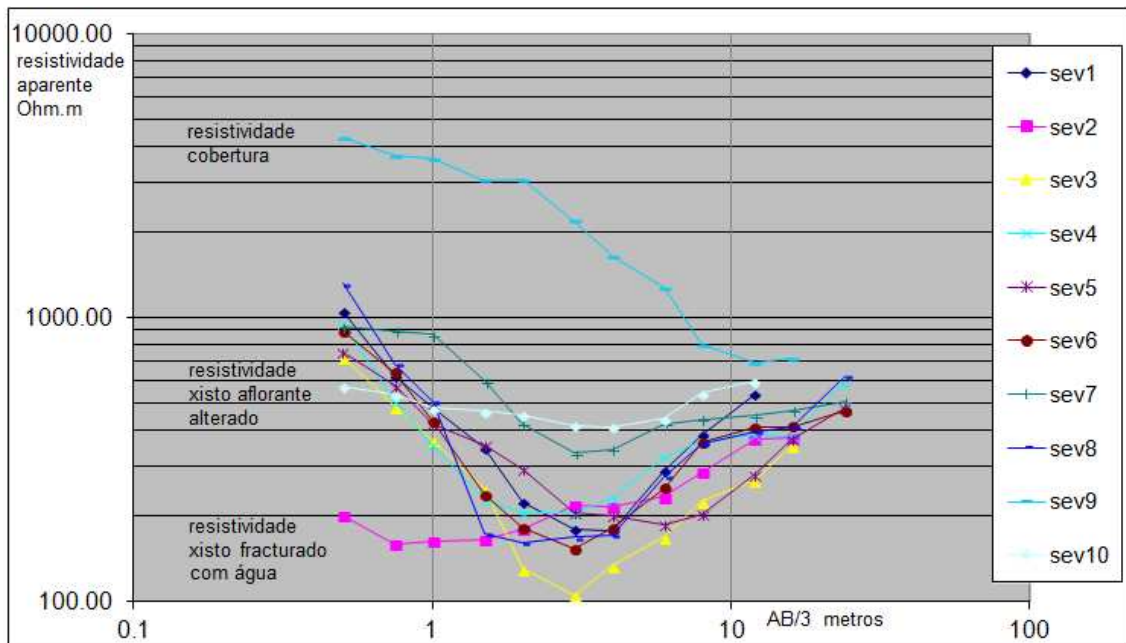


Figura 34 - Curvas logarítmicas das SEV' e interpretação preliminar.

4.2.1.2- Interpretação quantitativa

A interpretação quantitativa foi efectuada com a aplicação informática livre IPI2Win desenvolvida na Universidade de Moscovo. Esta aplicação permitiu a interpretação automática de dados de SEV.

Foi possível interpretar e escolher entre um conjunto de soluções equivalentes, a curva que mais se adequa aos dados geofísicos correspondente aquela que produz um erro de ajuste baixo entre a curva teórica e a experimental. Esta abordagem forneceu uma oportunidade de usar uma informação qualitativa e obedeceu aos seguintes aspectos:

Análise quantitativa dos dados apresentados através de processamentos de inversão;

Análise qualitativas dos dados obtidos destes processamentos com intuito de fixar na inversão resistividades e profundidade das camadas geofísicas

As curvas SEV foram suavizadas ao desprezar valores anómalos isolados. Estas relacionam a resistividade aparente ρ_a com valores de e e $AB/3$ e representam-se juntamente com tabelas. Os dados foram subdivididos em três grupos nomeadamente: 1- Norte-Sul, 2- Este 3- Grupo Oeste.

• Grupo - Norte-Sul

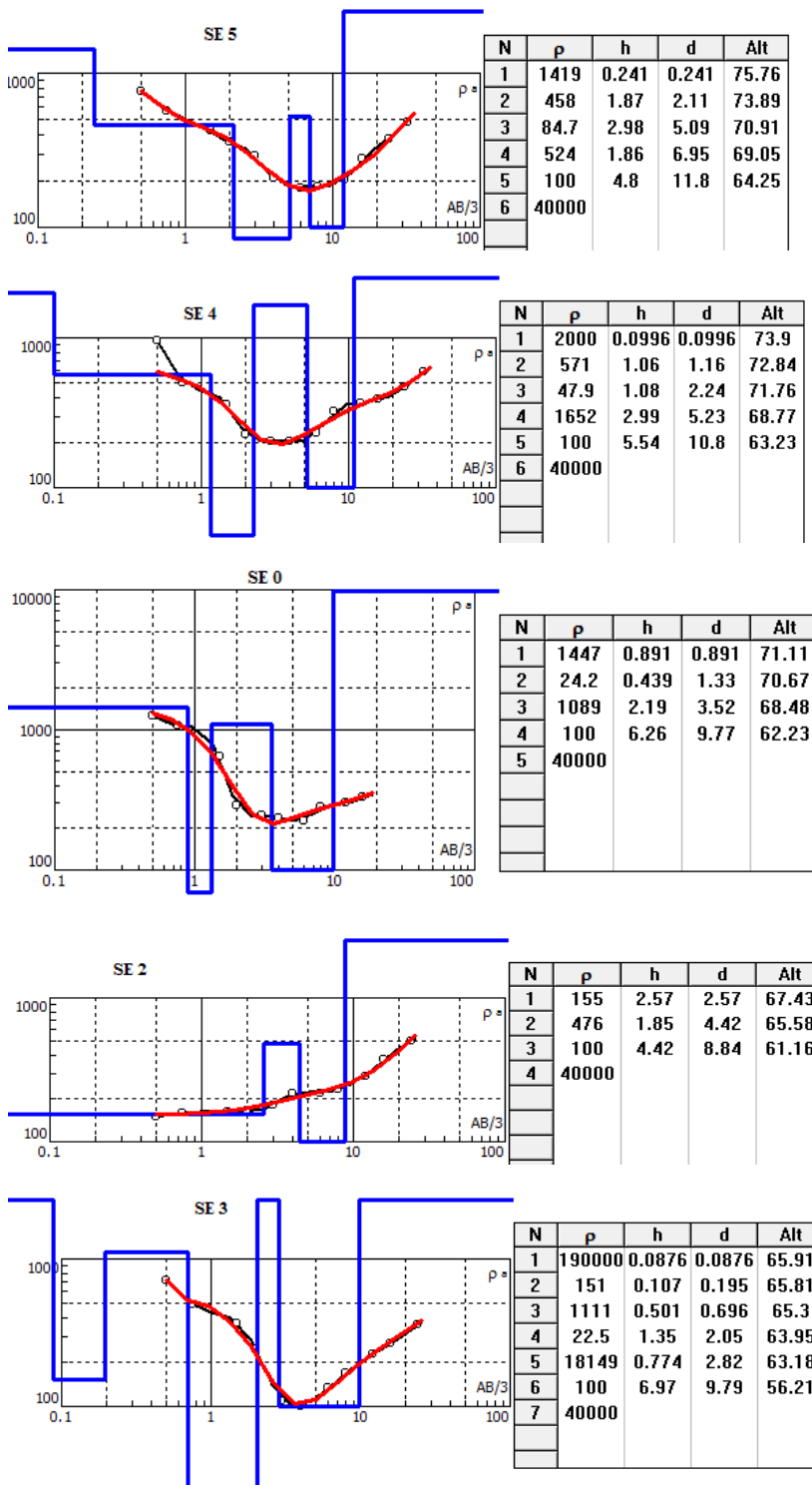


Figura 35 - Curvas e tabelas de resistividade eléctrica aparente das Sondagens eléctricas: (5; 4; 3; 0; 2 e 3).

Na figura 35 integram-se as cinco sondagens efectuadas ao longo de uma linha. Consideraram três horizontes geofísicos: a base com resistividades 4000 Ohm.m corresponderá ao xisto compacto, a zona do aquífero com 100 Ohm.m que poderá corresponder ao xisto alterado em que a porosidade estará preenchida por água e, superiormente, estará a cobertura do quaternário em que os valores baixos de

Capítulo IV - Dados e Resultados

resistividade se podem explicar devido às intercalações de camadas argilosas saturadas em água que foi dado observar no local. Da análise dos dados das curvas e tabelas representadas nas figuras 35 e 36, propõem-se um modelo provável na tabela 5.

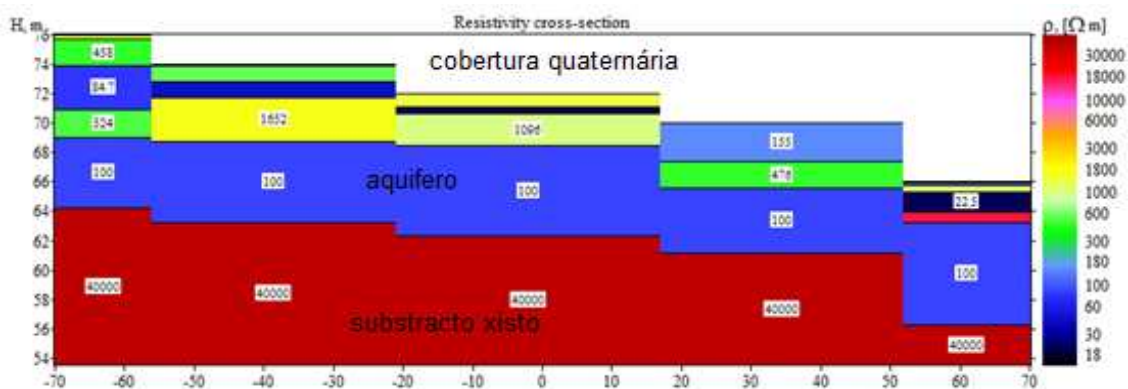


Figura 36 - Interpretação dos modelos de inversão das Sondagens eléctricas (5; 4; 0; 2 e 3).

Tabela 5 Prováveis litologias, camadas e suas resistividades.

Camadas	Interpretação	Resistividade Ohm.m	Espessura metros
1	Solo residual seco contendo areia, cascalho fragmentos de xistos, ambos seco.	$1328 \leq \rho_1 190000$	0.24 a 2.3
2	Sedimento predominantemente arenosos e secos	$416 \leq \rho_2 473$	0.5 a 1.9
3	Argila com água	$47.9 \leq \rho_3 94.6$	1.3 a 3.0
4	Sedimentos areno-argilosos ou xisto alterado secos	$524 \leq \rho_4 4.10^4$	1.3 a ∞
5	Xisto alterado com água	$103 \leq \rho_5 18149$	4.8 a 6
6	Xisto	∞	∞

• Grupo 2 - Este

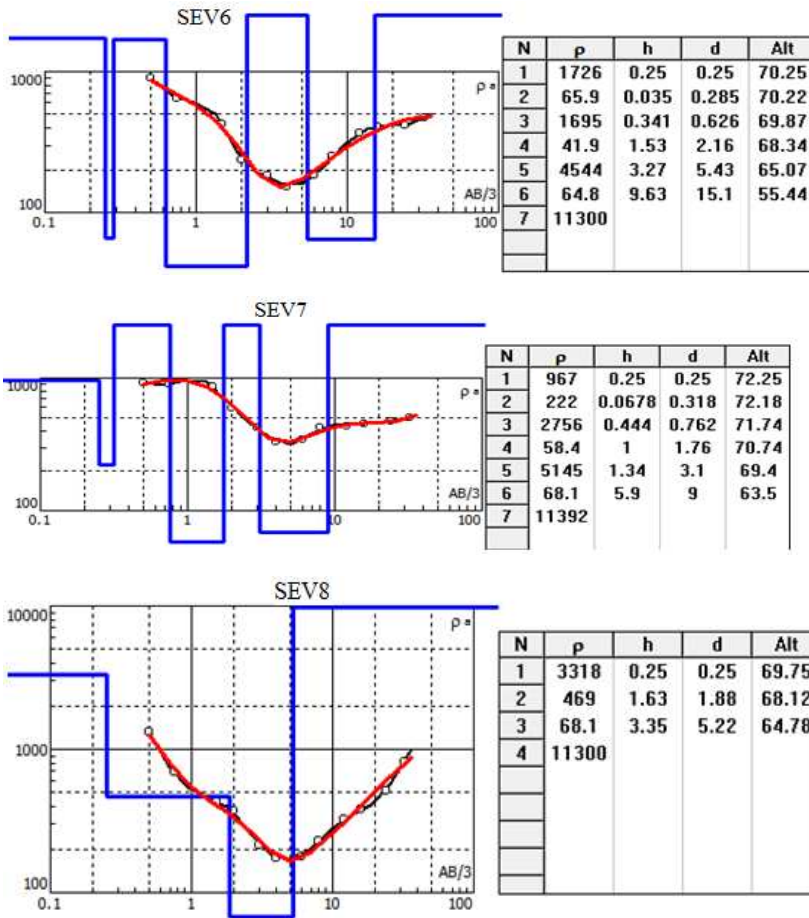


Figura 37 - Curvas e tabelas de resistividade eléctrica aparente das Sondagens eléctricas (6, 7 e 8)

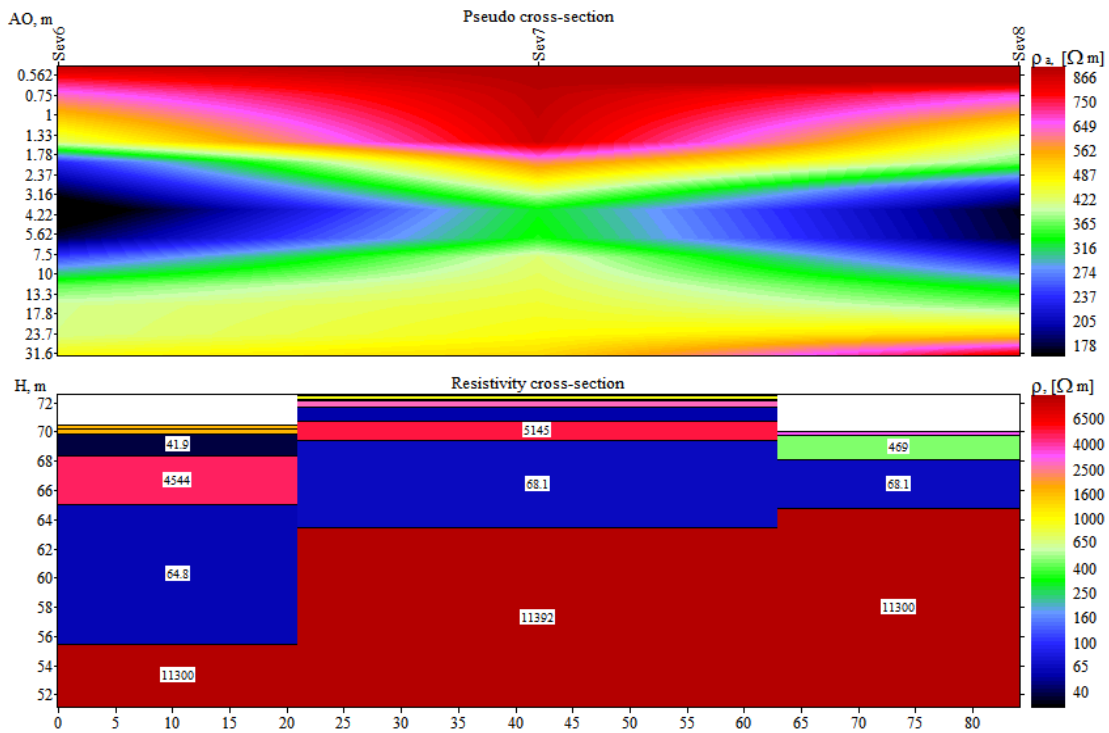


Figura 38 - Modelos de inversão das Sondagens eléctricas (6, 7 e 8).

Tabela 6 - litologia das camadas e sua resistividade das camadas.

Camadas	Interpretação	Resistividade	Espessura
1	Solo superficial de composição areno -argiloso seco	$967 \leq \rho_1 11300$	0.25 -
2	Solo superficial de composição areno - argiloso com humidade edáfica	$65.9 \leq \rho_2 200$	0.1
3	Sedimentos (clastos e areia)	$1695 \leq \rho_3 2000$	0.5
4	Sedimentos argilosos com água	$41 \leq \rho_4 58$	2.0
5	Sedimentos arenosos ou rocha alterada seca	$4000 \leq \rho_4 5000$	2.2
6	Rocha alterada com água	$64.1 \leq \rho_6 68.1$	6.29
7	Rocha não alterada	$11300 \leq \rho_1 11392$	∞

A tabela 6 resulta do resumo dos resultados das sondagens eléctricas 6, 7 e 8; e do seu modelo de inversão (Fig. 38). Depois da interpretação, foram identificadas sete camadas diferentes e com assinaturas eléctricas definidas.

A primeira zona, com valores de resistividades bastante variáveis e profundidades entre 0.25m e 0,40m, corresponde ao solo superficial, de composição areno - argilosa e muito seco.

Em seguida, ocorre uma camada relativamente condutora, com pequena continuidade lateral, que corresponde ao solo arenoso com argila constituído por humidade edáfica.

Depois desta fina camada ocorrem sedimentos detríticos, trata-se de uma camada arenosa seca com resistividades muito altas, situadas entre 4000 a 5000 Ohm.m.

Abaixo desta camada, pode-se localizar uma camada condutora, com relativa continuidade lateral, que se julga corresponder ao xisto fracturado. Apresenta valores de resistividade eléctrica na ordem dos 100 Ohm.m e julga-se corresponder a um aquífero livre.

Abaixo da zona alterada ocorre o xisto com valores altos de resistividade, cerca de 11000 Ohm.m.

• Grupo3- SEVs Noroeste.

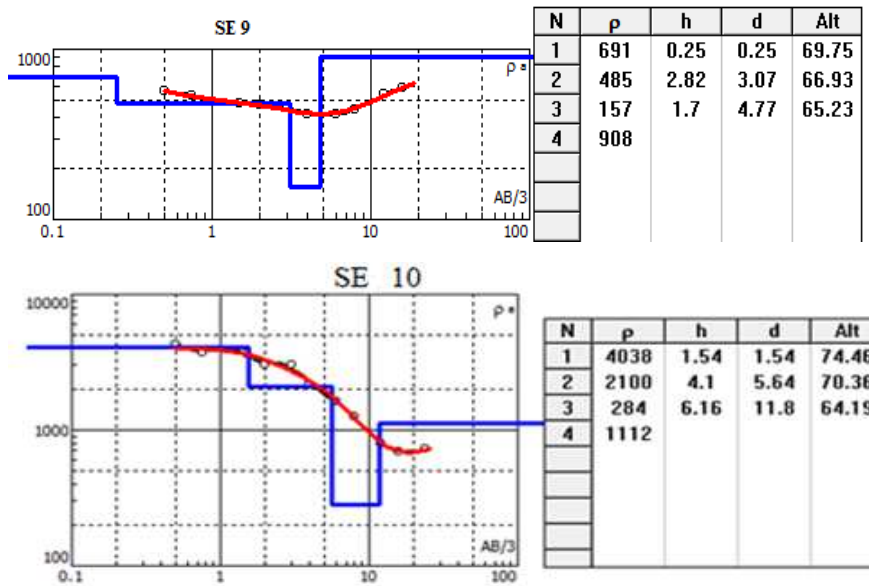


Figura 39 - Curvas e tabelas de resistividade eléctrica aparente das Sondagens eléctricas (9 e 10).

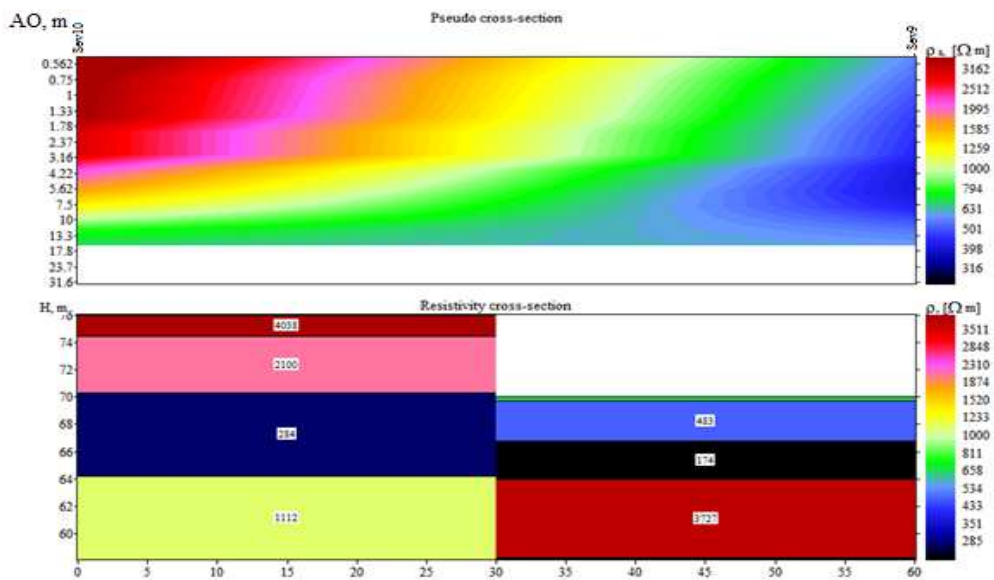


Figura 40 - Interpretação dos modelos de inversão das Sondagens eléctricas (9 e 10).

Da análise dos resultados das figuras. 39 e 40 percebe-se que as SEV9 e SEV10 são muito diferente entre si. Conforme já foi abordado na interpretação qualitativa (Fig. 34), revela-se aqui uma enorme descontinuidade lateral porque a cobertura quaternária só abrange a SEV9 (Fig. 25).

4.2.1.3. Modelo 3D integrando as Sondagens eléctricas

O conjunto de dados obtidos das sondagens eléctricas foi utilizado na elaboração das superfícies referentes ao relevo topográfico, ao topo e a base da zona de baixa resistividade que delimita o hipotético aquífero livre. Admitido que o referido topo é a superfície freática pode fazer-se a análise do comportamento do fluxo de subterrâneo da água (Fig. 41). Para o caso, foi necessário um levantamento de cotas dos centros das sondagens eléctricas. Esta informação cartográfica permitiu a determinação da

profundidade do nível de água em cada ponto após a conversão dos dados a partir software IP2WIN.

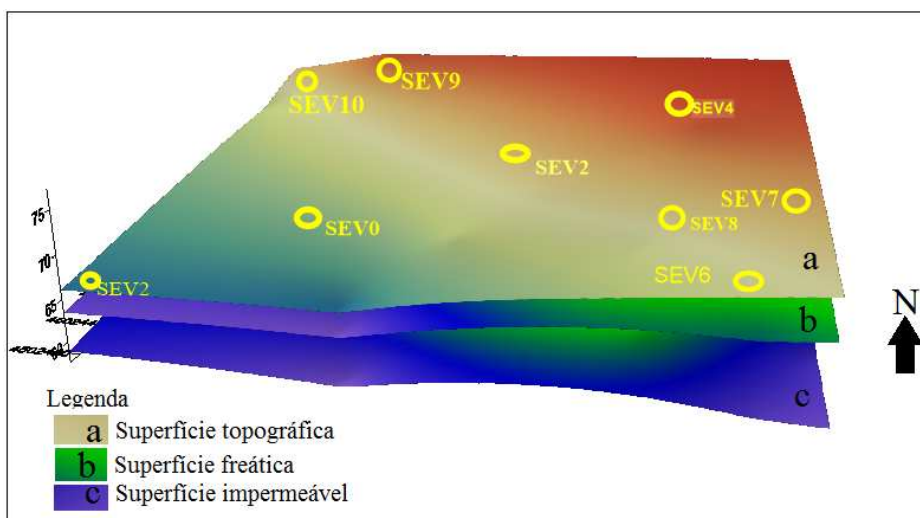


Figura 41 - Disposição das camadas segundo a saturação de água: a) zona superficial; b) superfície freática e c) rocha não alterada

Posteriormente através do programa (*Surfer 10.2*) representou-se o horizonte geofísico identificado com o aquífero.

Assim de acordo com a figura tem-se: a) zona superficial constituída por rochas detríticas; b) superfície freática (topo da camada alterada); c) xistos compacto (camada impermeável).

Para a determinar a direcção do fluxo de água no aquífero o *Surfer* permite colocar setas representativas do gradiente da superfície. Assim, fez-se o mapa da superfície freática (Fig. 42) ilustrativo do sentido do fluxo subterrâneo predominantemente NE-SW.

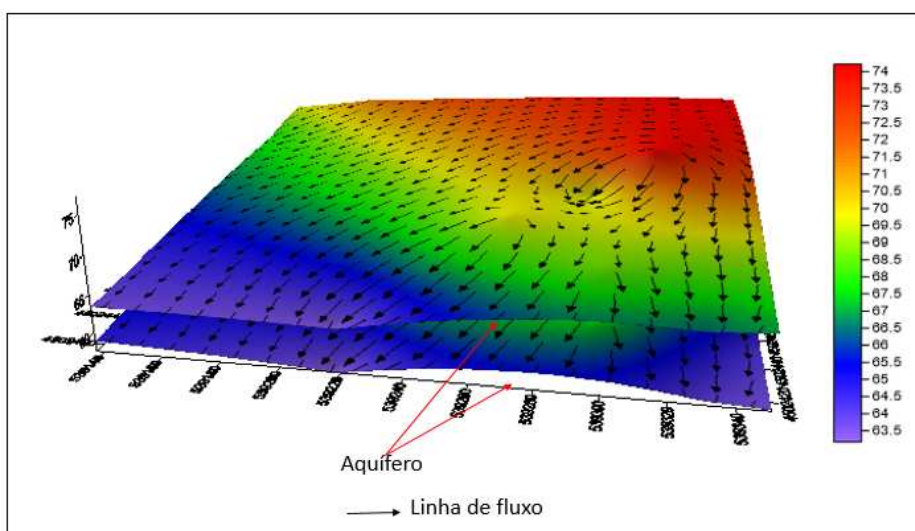


Figura 42 – Direcção de fluxo de água no aquífero.

Quando se observam as figuras. 41 e 42, é fácil perceber, que o fluxo aqui determinado tende a seguir, com mais destaque, no sentido da nascente a meia encosta à cota 50, que aparece no canto inferior direito figura próximo da SEV3.

Para o caso da classificação hidrogeológica, trata-se de um aquífero, livre, limitado no topo por uma camada permeável constituída por rochas do Quaternário que funcionam como a recarga da mesma. Na base é limitado por rocha (filádio) impermeável. A pressão de água é igual à pressão atmosférica e a recarga é muito rápida, faz-se ao longo de toda extensão do terreno pela precipitação e pode sofrer variações com as estações do ano.

Ainda de acordo com a figura 42 pode-se inferir que o nível de água ou nível freático aumentam em direcção às linhas de fluxo. Esse resultado deveria ser esperado, pois, por natureza, o nível freático tende a migrar para cotas menores, ao encontro de drenagens e/ou originando nascentes.

4.2.2. Pseudo-secções de resistividade

Terminada a primeira fase referente às sondagens eléctricas onde se apresentou um modelo compatível com uma estrutura geofísica superficial em camadas, achou-se importante abordar a zona, numa segunda fase, com a técnica das pseudo-secções. Deste modo, procurou-se caracterizar as variações laterais de resistividade que esperavam poder ocorrer no substrato em virtude do conhecimento geológico estrutural adquirido.

A técnica da pseudo-seção fundamenta-se na realização de medidas de resistividade aparente ao longo de uma linha, com o objectivo de investigar variações laterais a várias profundidades.

Actualmente existem no mercado vários resistivímetros com capacidade de automatizar a execução das pseudo-secções, facilitando assim, o processo de investigação e recolha de dados no terreno. Esses equipamentos utilizam eléctrodos, ligados de forma independente, que podem ser activados ou desactivados por meio de um microprocessador, de forma a deslocar separadamente apenas quatro eléctrodos, com diferentes espaçamentos, sobre o terreno.

Esse tipo de sistema permite adquirir centenas de medidas de resistividade, a diferentes profundidades e ao longo das linhas onde os eléctrodos são instalados. O grande volume de dados possibilita a sua apresentação como pseudo-secções correspondentes a representações gráficas da variação da resistividade na subsuperfície em 2D (duas dimensões, comprimento e pseudo-profundidade).

Neste trabalho foi utilizado um equipamento, para a realização das pseudo-secções de resistividade eléctrica designado por *super digital resistivity* WDA-1 DC doravante também referida como sistema: WDA-1 de fabrico Chinês.

Este aparelho foi desenvolvido baseando-se nas experiências adquiridas no passado recente com estudos técnico-científicos e na construção de instrumentos de resistividade eléctrica avançados em vários países como Canadá, Estados Unidos, entre outros territórios (fig.43).

O resistivímetro WDA-1 é um instrumento para executar medidas de sondagens eléctricas e pseudo-secções, usa tecnologias avançadas, tais como computadores portáteis, Bluetooth, 24bit A/D e controle de alta potência. Possui tamanho compacto e

é muito leve, aspectos que o tornam prático e simples no transporte. O sistema WDA-1 apresenta algumas características que se referem:

- a) Realiza medidas de resistividade com apenas um ou dois eléctrodos de corrente e um ou dois eléctrodos de potencial
- b) Gera imagem resistividade multi-eléctrodo: 2D/3D quando trabalha em conjunto com cabos de resolução multi-eléctrodos, eléctrodos e fonte de alimentação.
- c) Permite utilizar cabos inteligentes com eléctrodos duplos: impolarizáveis para polarização induzida (IP) e de corrente.
- d) Usa uma fonte de tensão externa que pode atingir no máximo 800Volt.



Figura 43 - Resistivímetro WDA-1.

Para investigação e representação geolétrica da área de estudo, foram executadas quatro pseudo-seções entre Julho e Agosto de 2014. As linhas de aquisição atingiram comprimento máximo de 400 m com espaçamentos de 5 e 10 m entre eléctrodos permitindo 9 a 14 níveis de investigação que resultam em profundidades aparentes entre 21.5 a 62.5m. Os dados de cada medida efectuada no resistivímetro são transmitidos via Bluetooth para um PDA que representa a pseudo-seção durante a execução da pseudo-seção. No final o sistema exporta os dados num formato de texto para poderem ser corrigidos e processados com o programa RES2DINV.

Na (fig. 44) ilustra-se um esquema de uma pseudo-seção estabelecendo a relação entre as pseudo -profundidades (níveis) e espaçamentos entre eléctrodos da medida ao longo da linha.

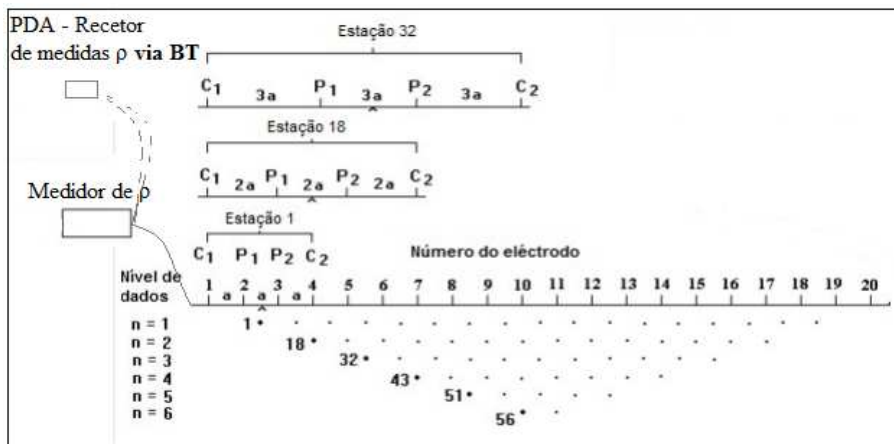


Figura 44 - Arranjo de electrodos para pseudo-secção de resistividade eléctrica; Adaptado de (Loke1999).

Os dados obtidos na forma de um ficheiro foram editados para incluir a topografia e posteriormente processados com a aplicação RES2DINV da autoria de Loke (2004). Esta, converte as resistividades aparentes da pseudo-secção (dados), por inversão geofísica em resultados materializados numa imagem 2D constituída por células de resistividade do terreno.

4.2.2.1. Modelo da pseudo-secção 1.

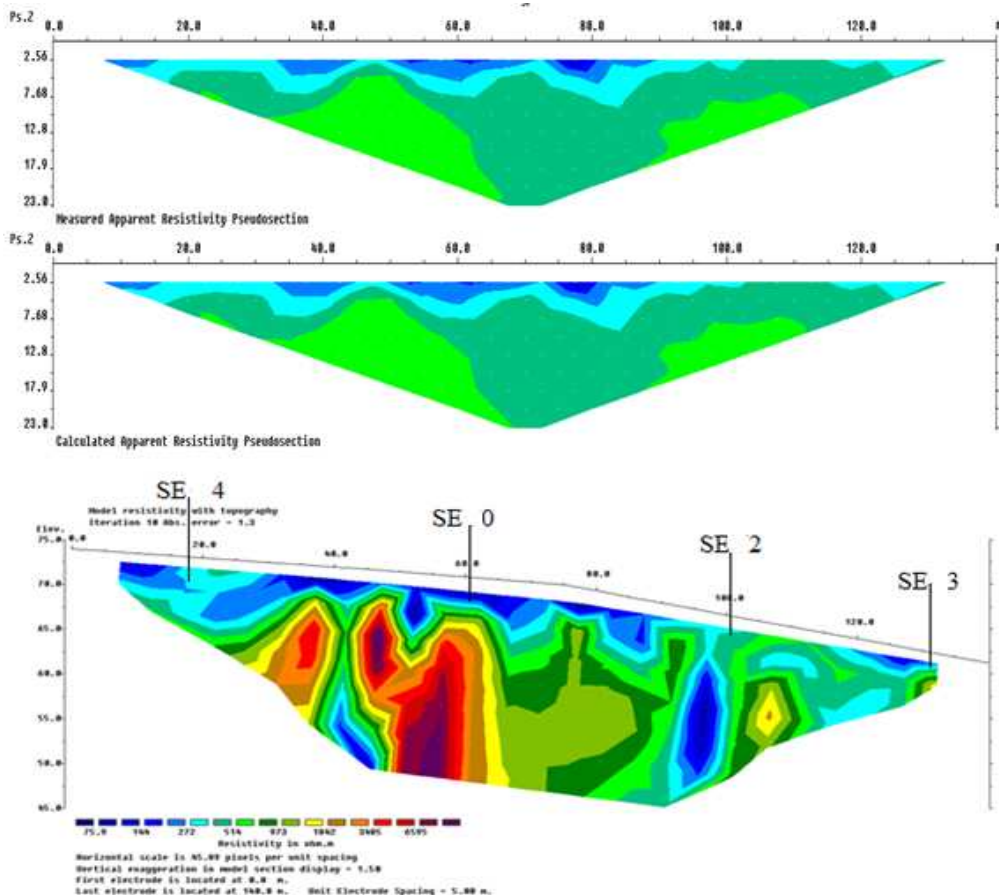


Figura 45 – Pseudo-secções teórica e experimental e modelo da resistividade eléctrica relativo à pseudo-secção 1.

A linha da pseudo-secção (P1), foi efectuada com 5m de separação entre eléctrodos e coincidiu com quatro centros de sondagens (Fig 45). Comparando os resultados da figura com a interpretação das sondagens eléctricas (5; 4; 0; 2 e 3) verifica-se que o modelo obtido com a pseudo-secção mostra variações laterais de resistividade ao nível do substrato rochoso e perde resolução nas camadas mais superficiais. Nota-se que as variações laterais de resistividade são compatíveis com uma estrutura verticalizada que está de acordo com uma fracturação dominante na região

A resistividade aparente obtida no modelo da pseudo-secção variou de 75.9 a 6595 Ohm.m caracterizando um meio muito heterogéneo entre materiais mais resistivos e uma grande variabilidade em termos de resistividade eléctrica.

À superfície, verifica-se a ocorrência de resistividades mais baixas, que variam entre os 75.5 a 272 Ohm.m. Estes valores podem estar relacionados com sedimentos superficiais não consolidados, cascalhos, areias, seixos, e alguma argila presentes na superfície. Interpreta-se a camada condutiva entre as cotas 63 e 75 metros como aquífero livre com profundidade variável entre 1.5 m a 8.5 m.

Abaixo desta camada condutiva encontra-se uma zona seca cujas resistividades aparentes variam entre 514 a 6595 Ohm.m, ocorrendo em toda área excepto nas zonas de fracturação. Valores desta ordem de grandeza são muito semelhantes com os encontrados nas sondagens eléctricas. Trata-se do substrato do xisto da unidade de Arada.

Esta variação da resistividade na mesma rocha deve-se a vários factores entre eles: eventos tectónicos e eventos atmosféricos; os primeiros contribuíram para o dobramento e fragmentação e os últimos para uma relativa alteração química localizada em algumas zonas da rocha. As consequências destes fenómenos, naturalmente condicionam valores altos para áreas de rocha não alterada e valores baixos onde a rocha foi alterada e ou fracturada e se encontra saturada com água.

Nos 42.5 m ocorre um contraste de resistividade eléctrica identificado com valores mais baixos 75 – 272 Ohm.m, poderá tratar-se de uma de fractura com água.

No ponto 65, tal como indica a SEV1, propõem-se um aquífero livre com uma profundidade aproximadamente de 4.2 m, cota 61m, que foi também confirmada num poço abandonado à cota 76.

Entre os 98 a 105m da mesma linha regista-se outra zona de baixa condutividade, os valores da resistividade situam-se entre 75.9 a 272 Ohm.m. Estes valores são comparáveis com os referidos anteriormente registados aos 42.5m, sou seja, está-se perante outra provável zona de falha com água nas cotas 47.5 a 62.5m.

4.2.2.2 Modelo da pseudo-secção 2

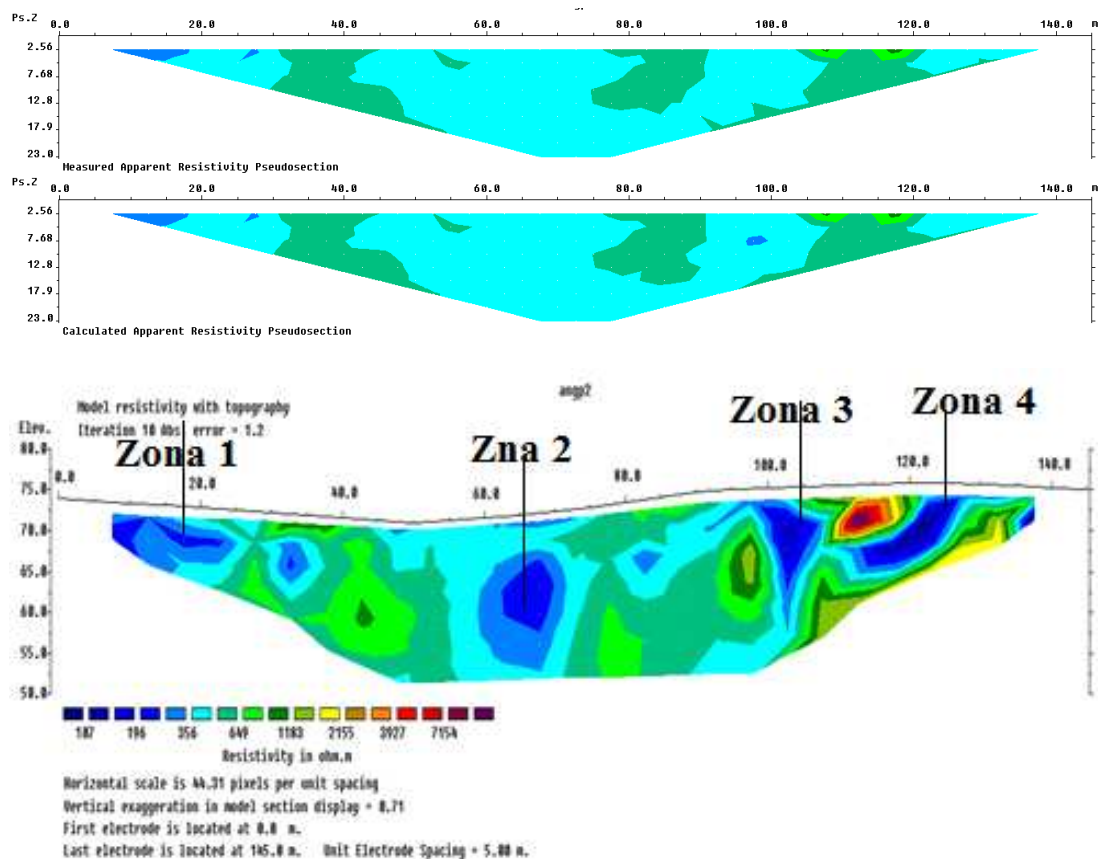


Figura 46 Pseudo-secções teórica e experimental e modelo da resistividade eléctrica relativo à pseudo-secção 2.

Tabela 7 - Valores das resistividades segundo a dist (m) e prof (m) do modelo da pseudo-secção 2.

Dist. (m)	Prof. (m)	Características do material
0 - 25	0 - 20	Sedimentos areno-argilosos; fragmento de xistos, areia e cascalho; $\rho \approx 107 - 356$ Ohm.m.
55 - 65	0 - 21.5	Sedimentos detríticos (cascalho, areia e fragmentos de xistos muito alterados); $\rho \approx 200 - 376$ Ohm.m.
100 - 105	0 - 21	Sedimentos detríticos (cascalho, areia e fragmentos de xistos muito alterados e saturado com água); $\rho \approx 100 - 300$ Ohm.m.
120 - 127	0 - 6	Sedimentos detríticos (cascalho, areia silte e argila); $\rho \approx 200 - 200$ Ohm.m parcialmente saturados
	6 - 10	Xisto não alterado. $\rho \approx 356 - 2155$ Ohm.m.

Apresentam-se os resultados do modelo geofísico relativo à pseudo-secção 2 na figura 46 e uma interpretação geológica plausível na Tabela 7. A linha com 150m de aquisição desta pseudo-secção teve o mesmo início da linha de aquisição da pseudo-secção 2 (P2). O sentido desta linha de aquisição foi ESE-WNW enquanto o da outra linha é NNE-SSW permitindo interpretar alinhamentos condutores de acordo com as orientações geológicas dominantes. Ambas as linhas foram executadas com espaçamento entre eléctrodos de 5m.

A interpretação feita na tabela 7, associa em camadas variações das feições geológicas superficiais ligadas ao quaternário e ao substrato de xisto. As camadas mais superficiais (zonas 1; 3 e 4) do modelo da figura 46 mostram características geológicas de solos com resistividades próprias de sedimentos detríticos assentes em xisto fracturado com água. Estas atingem profundidades até 21m o que se adequa perfeitamente às condições geológicas locais, já que a área de estudo se localiza na zona quaternária rica em sedimentos flúvio-marinhos referentes a vales e terraços de antigos rios que podem estar encaixados em zonas fracturadas erodidas previamente.

A zona 2 do modelo com resistividade inferior a 200 Ohm.m, está próxima de uma linha de água, que se dirige para a nascente a meia encosta. Foi possível observar o nível de água superficial de um poço situado junto à intersecção da linha de água com o alinhamento em que se fez a aquisição. Este facto sugere que esta linha de água se localiza também numa zona de fractura ou de contacto.

4.2.2.3. Modelo da pseudo-secção 3

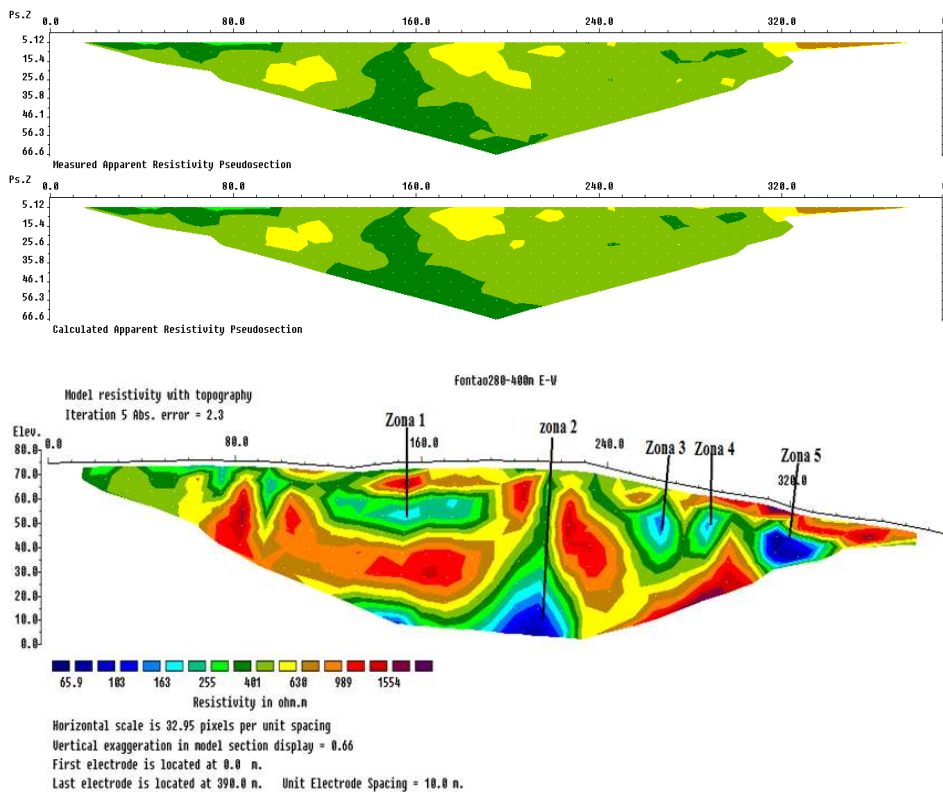


Figura 47 Pseudo-secções teórica e experimental e modelo da resistividade da pseudo-secção 3.

A pseudo-seção de resistividade P3, figura. 47, foi efectuada no sentido similar da pseudo-secção anterior (P2), passou sensivelmente a 3 metros do centro da SEV1.

Em seguida faz-se uma interpretação dos resultados obtidos na pseudo-seção três:

A zona superficial é composta por sedimentos detríticos (cascalho, areia e silte) quaternários e fragmentos de xisto da formação de idade mais antiga. Esta camada possui espessuras entre 0.5 e 8.0 m e valores de resistividades entre 300 a 1554 Ohm.m. A variabilidade da resistividade pode ser condicionada em alguns casos pela possibilidade de ocorrência de argila intercalada em cascalho ou areias.

Sobe a primeira camada, encontram-se algumas zonas relativamente alteradas, identificadas por: Zonas (1; 3; 4 e 5) nos pontos 153; 265; 285 e 310 a 325 metros da linha da pseudo-secção. Estas zonas podem corresponder a fracturas ou a um manto de alteração com água. São zonas não homogêneas em que a resistividade varia entre 65 a 160 Ohm.m. Os valores de resistividade aparente relativamente baixa, 100 Ohm.m podem resultar da fragmentação e alteração da rocha em áreas localizadas possibilitando assim a acumulação de água na porosidade da rocha. Os altos índices de resistividade aparente, maiores do que 350 Ohm.m são interpretados como dizendo respeito a rocha que se deverá apresentar compacta e não alterada.

Nos 215m da linha é possível observar uma anomalia representada pelo número 2 que poderá estar ligada com as nascentes em estudo, ou seja, a área apresenta características de uma zona de falha compatível com a direcção principal de facturação (N10°-20° e mergulho 80°E).

Finalmente, apresenta-se uma estrutura altamente resistiva referente aos xistos da Arada.

4.2.2.4 Modelo da pseudo-secção 4.

Os dados da figura 48 foram adquiridos ao longo da linha P4, com uma orientação Este - Oeste e com espaçamento 10m idêntico ao da pseudo-secção anterior.

A análise do modelo da figura. 48 levou ao estabelecimento de relações tabela 8 entre zonas caracterizadas por intervalos de resistividade e a sua explicação geológica hipotética ao longo do perfil.

O modelo mostra um forte contraste entre estruturas de resistividades altas e de baixa resistividade supostamente associadas a zonas saturadas com água. Em geral, os valores inferiores 100 Ohm.m, permitem identificar e assinalar os locais saturados

A estrutura superficial mostra uma grande heterogeneidade em termos da resistividade. Essa heterogeneidade reflecte-se também nos valores da resistividade devido a intensa mistura de materiais que caracterizam a cobertura de sedimentos de coluviões, cascalho, areia, silte e alguma argila existente na área.

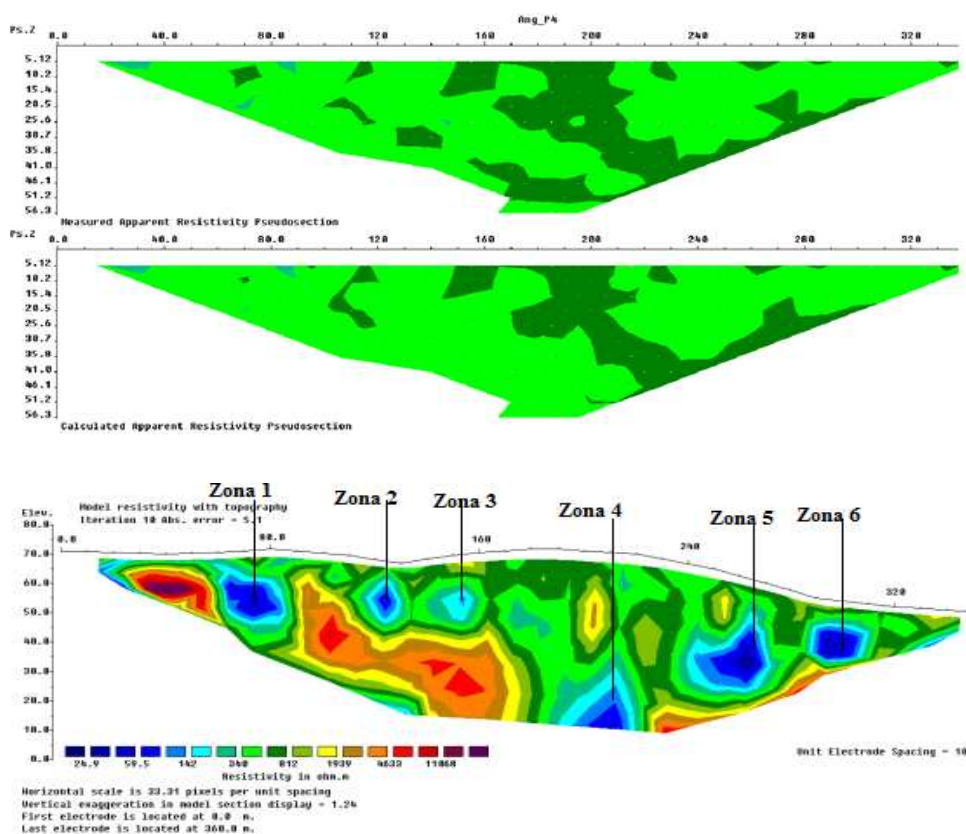


Figura 48 - Pseudo-seções teórica e experimental e modelo da pseudo-seção4.

Tabela 8 - Teores de resistividades segundo a distância ao longo da linha de aquisição e à profundidade obtida no modelo da pseudo-seção4.

Dist. (m)	Prof. (m)	Características do material
70 - 80	0 - 39	Sedimentos detríticos (fragmento de xisto, areia, cascalho) secos $\rho \approx 300$ a 400 Ohm.m; provável fractura $\rho \approx 65.9$ a 142
215	0-70	Sedimentos detríticos (fragmento de xisto, areia, cascalho) secos $\rho \approx 300$ a 400 Ohm.m; provável fractura $\rho \approx 65.9$ a 163
260 - 270	60 - 40	Sedimentos detríticos; (fragmento de xisto, areia, cascalho) saturados com água; resistividades entre: 100 a 200 Ohm.m;
280 - 290	60 - 40	Sedimentos detríticos; (fragmento de xisto, areia, cascalho) saturados com água; resistividades entre: 100 a 200 Ohm.m;
310 - 330	45 - 30	Sedimentos detríticos (xisto alterado, areia, cascalho) com presença de água; $\rho = 65 - 200$ Ohm.m;

Abaixo da primeira camada, encontram-se algumas zonas relativamente alteradas, identificadas por: Zonas (1; 3, 5 e 6) respectivamente centradas nas distâncias 72, 127,

265, e 309 metros da linha da pseudo-seção. Estas zonas podem corresponder a fracturas que afectam o xisto incrementando desse modo a interacção da água com a rocha na formação de um manto de alteração mais espesso. São zonas heterogéneas onde a resistividade é da ordem dos 100 Ohm.m.

À distância de 215m da linha de aquisição desta pseudo-seção encontra-se a anomalia mais proeminente relativa a baixos valores da resistividade e da mesma ordem de grandeza das anomalias anteriores. Esta zona deve igualmente estar saturada e facilmente se pode estabelecer uma relação com zona idêntica do modelo da pseudo-seção3 identificada por Zona 2 à distância 220m dessa linha de prospecção.

4.2.3. Resistividade da água das nascentes

Durante a última aquisição de dados geofísicos em Agosto recolheu-se água das duas nascentes alvo do estudo para esclarecer a relação entre a resistividade das rochas e a da água da formação. As medidas de resistividade (fig. 49) foram feitas com o SAS300 no local usando um tubo de corrente com medidas conhecidas da secção e do espaçamento entre os eléctrodos de potencial (MN). A corrente foi introduzida nos topos do tubo (AB) e registou-se a Resistência que foi de seguida convertida em resistividade aplicando a equação (3.4). Obtiveram-se as seguintes resistividades da água: para a nascente a meia encosta 60 Ohm.m, e na outra nascente, junto à estrada e situada a cota mais baixa, o valor determinado foi 30 Ohm.m. (Fig. 49).



Figura 49: a – Nascente à cota 45; b – Nascente à cota 25; c - Linha de água à cota 23; d - Medindo a resistividade eléctrica.

Uma análise desses valores, permite verificar que a resistividade 60 Ohm.m determinada a meia encosta corresponderá a uma água com pouco tempo de residência no aquífero quando se compara com a água recolhida a cotas mais baixas caracterizada com resistividade inferior de 30 Ohm.m Esta constatação por um lado pode indicar que

solução obtida com a pseudo-secção parece resolver uma superfície de erosão característica de um relevo de dureza muito plausível no substrato de xisto.

2) No que se refere à cobertura quaternária, o modelo das sondagens eléctricas resolve melhor a estrutura em camadas horizontais, enquanto a solução apresentada nas pseudo secções não é eficaz devido à fraca resolução espacial dependente do espaçamento entre eléctrodos usado que foi de cinco metros.

3) Relativamente ao substrato de xisto, o modelo obtido com as sondagens consideram um meio homogéneo devido às constricções aplicadas na inversão; mas, o modelo da pseudo-secção é mais próximo da realidade, uma vez que é compatível com estruturas geológicas verticalizadas conforme foi possível observar no levantamento geológico. Assim resolve espacialmente o problema das zonas fracturadas de baixa resistividade e revela a causa da existência das nascentes em estudo.

Concluiu-se que, neste caso, há complementaridade na utilização das duas técnicas, mas para detectar estruturas verticais fracturadas é a pseudo-secção que revela o melhor desempenho.

4.2.4.2 Resistividades da rocha e da água

A equação de Winsauer (3.2) relaciona a resistividade da rocha com a resistividade água da formação. Esta relação depende da porosidade, do parâmetro textural α , variável entre 0.5 e 1.5 e de m característico do grau de compactação ou de cimentação da rocha dentro dos limites 0,9, para rochas sedimentares, e 1,4, para rochas compactas. Assumiu-se o valor de 30 Ohm para a resistividade da água da formação em virtude da determinação experimental feita na nascente situada junto à estrada, e calcularam-se valores em função da porosidade para vários cenários (Tabela 9)

Dentro da gama de variação dos parâmetros texturais e de compactação realçam-se na Tabela 9 os valores a amarelo que são aproximadamente 100 Ohm.m idênticos aos que resultaram da inversão geofísica e são interpretados como representativos de rocha impregnada com água.

Deste modo, conclui-se com esta análise que os resultados obtidos para a porosidade nos vários cenários são compatíveis com uma estrutura geológica impregnada, total ou parcialmente, com água de resistividade 30 Ohm. Verifica-se ainda que os valores de resistividade elevada superiores a 1000 Ohm.m, obtidos na inversão das pseudo-secções, também são compatíveis com os valores realçados a verde na Tabela 9 referentes a rocha de baixa porosidade e parâmetro de compactação elevado; estas características são típicas de um substrato não alterado.

Tabela 9 - Relação entre a resistividade, porosidade e parâmetros da rocha.

Porosidade da rocha	Resistividade da rocha $m=0.9$ e $a=0.5$	Resistividade da rocha $m=0.9$ e $a=1$	Resistividade da rocha $m=0.9$ e $a=1,5$	Resistividade da rocha $m=1.4$ e $a=0.5$	Resistividade da rocha $m=1.4$ e $a=1$	Resistividade da rocha $m=1.4$ e $a=1.5$
0,05	222	445	667	994	1989	2983
0,1	119	238	357	377	754	1130
0,15	83	165	248	214	427	641
0,2	64	128	192	143	286	428
0,25	52	104	157	104	209	313
0,3	44	89	133	81	162	243
0,35	39	77	116	65	130	196
0,4	34	68	103	54	108	162

4.3. – Modelo geofísico/hidrogeológico

Depois do tratamento de medidas obtidas no campo aplicou-se outro procedimento computacional correndo a uma aplicação Matlab com um objectivo visualizar em 3D de modo integrado as quatro pseudo-secções estudadas (Fig.51-b)).

A partir das figuras 51 pode interpretar-se que as águas são captadas pela formação Quaternária e circulam pelo maciço através do seu sistema de fracturas, sob a acção dos gradientes hidráulicos em condições que, incluindo o próprio regime de escoamento, se revelam fortemente dependentes das características geométricas das zonas alteradas do filádio.

Na figura. 51 –b), é possível identificar alinhamentos de resistividade da ordem dos 100 Ohm.m ilustrados por linhas rectas a negro que se associam a estruturas em que a rocha estará impregnada de água.

Anteriormente, destacou-se nos modelos das pseudo-secções 3 e 4 uma estrutura de resistividade ligeiramente inferior a 100 Ohm.m, alinhada sensivelmente segundo a direcção N-S, onde o tecto pende para Este.

O tecto desta estrutura foi interpretado nos modelos das duas pseudo secções como um plano e representado através dos traços horizontais às cotas 20; 30 e 40m sendo de realçar a coincidência entre as orientações dos traços desse plano e a da família de fracturas N-S referente à fracturação dominante. Refere-se ainda que prolongando o traço horizontal do plano aos 40m (linha a tracejado) intersecta-se a nascente a meia encosta com erro altimétrico inferior a 10m o que foi considerado satisfatório.

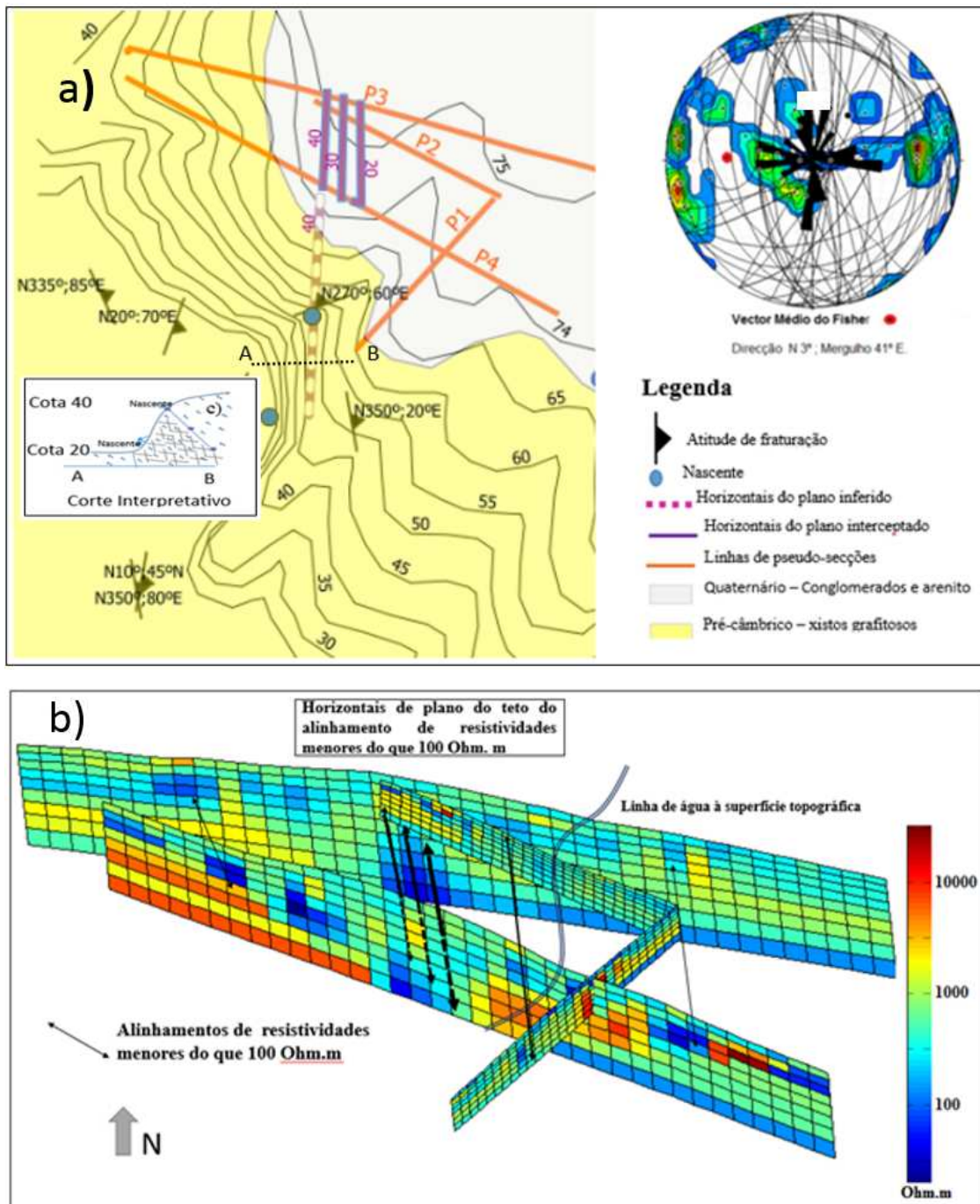


Figura 51 - - Ligação entre o Modelo Geofísico e as nascentes

Também se encontrou uma coincidência extraordinária entre o mergulho aproximado de $45^\circ E$ para o tecto da estrutura geofísica de baixa resistividade e a média de Fisher de $42^\circ E$ para a fracturação dominante (Fig.51-a)).

Concluiu-se deste modo que esta zona de baixa resistividade corresponderá a uma zona de intensa fracturação que se julga corresponder ao sistema aquífero de desenvolvimento vertical drenado pelas nascentes localizadas a Oeste do traço horizontal extrapolado à cota 40m. Este modelo hidrogeológico é compatível com o modelo 3 e ilustra-se através do corte interpretativo da figura 51-a) realizado entre as duas nascentes de Oeste para Este.

Além desta estrutura profunda que só foi detectada com as duas últimas pseudo-seções, em que o espaçamento entre eléctrodos foi de 10m, também se podem interpretar alinhamentos de igual direcção à principal (Fig. 51 b)) nos dois primeiros modelos obtidos das pseudo-seções realizadas com espaçamento entre eléctrodos de 5m. Estes alinhamentos tanto podem estar associados a estruturas fracturadas como ao relevo de dureza provocado pela erosão que antecedeu a deposição da cobertura quaternária.

CAPÍTULO V

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo faz-se referência às conclusões do trabalho e aponta-se para uma continuidade do estudo fazendo algumas sugestões que se consideram relevantes.

5.1 CONCLUSÕES

Com este trabalho foi atingido o objectivo geral: Conhecer, gerar e disponibilizar informação sobre a ocorrência, potencialidade e circulação de águas subterrâneas nas formações metamórficas das nascentes do Fontão-Angeja. Assim: as nascentes a Oeste do Frontão drenam água com resistividade 30 Ohm.m de um aquífero fracturado que deve ter uma recarga nas formações quaternárias

Em termos dos objectivos específicos:

- Identificar as estruturas geológicas da área: Trata-se de um substrato constituído por filádios pré-câmbricos (formação xisto de Arada) dobrados com amplitudes e formas diversas, afectados por duas famílias de fracturas.
- Adquirir os dados geofísicos de resistividade: Construiu-se um sistema para adquirir os dados das sondagens eléctricas com facilidade e rapidez enquanto nas pseudo-secções utilizou-se um sistema moderno de eléctrodos inteligentes.
- Tratar os dados geofísicos de (sondagens eléctricas e pseudo-secção) e avaliá-los com base nas características geológicas do lugar: Usou-se inversão geofísica nos dois casos para obter modelos compatíveis com a fracturação predominante (N-S) e com a cobertura sedimentar quaternária.
- Determinar as relações dos aquíferos e as nascentes no domínio da área de pesquisa: As relações entre o aquífero e as nascentes que o drenam estabeleceram-se com base na resistividade da água medida nas nascentes (30 a 60 Ohm) e as resistividades obtida nos modelos para o aquífero (100Ohm.m) que permitiram estimar valores de porosidade característicos de rocha fracturada e rocha compacta.

Apesar de não se ter formulado nenhum objectivo relativamente à comparação das técnicas SEV e pseudo-secção também se concluiu que neste caso, há complementaridade na utilização das duas técnicas: Para detectar estruturas verticais fracturadas é a pseudo-secção que revela o melhor desempenho enquanto o problema da cobertura sedimentar é melhor resolvido com as SEV.

Assim, recorrendo à prospecção geofísica, podem ser feitas interpretações qualitativas e quantitativa das propriedades eléctricas das rochas. Desta forma tem-se uma descrição baseada nas propriedades físicas sobre a composição do solo.

Não obstante, a prática revelou que quantificar de forma detalhada e precisa a constituição interna das camadas geológicas e determinar com exactidão a espessura da mesma é uma tarefa muito exigente sob ponto de vista técnico e científico.

Os métodos geofísicos apesar de suas limitações, aparecem como meios confiáveis para a determinações de resistividades da estrutura interna do subsolo.

Uma vez que a resistividade aparente medida em campo não é uma propriedade física da subsuperfície, para transformar os dados obtidos, foi necessário utilizar técnicas de interpretação que ajustam os dados das sondagens eléctricas e pseudo-secções à propriedade física resistividade.

O conhecimento pormenorizado da geologia local da área permitiu o desenvolvimento de modelos hidrogeológicos mais próximos da realidade que aprimoram a formulação de modelos conceptuais frente à exigência de nascentes no local.

O reconhecimento da geologia de campo e da cartografia geológica-estrutural de pormenor efectuado na área de estudo permitiu caracterizar os afloramentos, aferir as heterogeneidades litológicas, o estado de alteração e fracturação para formar modelos conceptuais/hipótese que guiaram a execução dos trabalhos de prospecção, a análise e a discussão de resultados.

Por meio das sondagens eléctricas podem-se identificar as profundidades das zonas com plena saturação de água. Porém, esta técnica, mostrou algumas limitações na identificação de camadas verticais e com alto mergulho.

Com a técnica das sondagens eléctricas, conseguiu-se obter a estimativa da profundidade do nível freático e a caracterização indirecta de algum modo da área. As pseudo-secções detectaram as falhas relacionadas com águas subterrâneas.

Em termos práticos, a técnica das sondagens eléctricas necessita de um conhecimento e habilidade pois requer muita rotina no afastamento de eléctrodos, leitura, análise, correcção pontual de resistividades aparentes (repetição de medidas) sempre que haja dúvida do sinal ou distorções dos valores obtido.

A pseudo-secção de resistividade permite a investigação em dois níveis: lateral e vertical, e apresenta-se como uma técnica de aquisição dos dados muito rápida e fiável.

Da análise dos dados sobre a geologia estrutural, conciliada com os levantamentos eléctricos, presume-se que todos modelos conceptuais/hipótese são favoráveis no presente estudo, dado que, cada situação forma uma realidade não isolada no contexto local e ambas constituem um todo para análise da hidrogeologia local.

A geoeléctrica é importante na prospecção e localização de estruturas geológicas potencialmente favoráveis à ocorrência de água subterrânea, reduzindo a incerteza na pesquisa e os custos associados às sondagens improdutivas.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

A médio prazo será importante continuar o trabalho geofísico numa área mais ampla que abranja as outras nascentes próximas a par da realização de estudos hidroquímicos e hidrogeológicos direccionados para a avaliação das características da água das várias nascentes locais. Essa monitorização mensal durante um período anual deverá relacionar os resultados a obter com dados climáticos e litológicos.

Capítulo V – Considerações Finais

A médio-longo prazo será muito importante usar os conhecimentos adquiridos na Universidade de Aveiro em Moçambique que é o país do autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assad, E. D.; Pinto, H. S.; Zullo Júnior, J.; Ávila, A. M. H. *Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.39, p.1057-1064, 2004.
- Borges, W. R. (2002). *Investigação geofísica na borda da bacia sedimentar utilizando-se GPR e resistividade*. Dissertação (Mestrado em Geociências). Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Braga, A. C. O. *Método da resistividade eléctrica e polarização induzida nos estudos de captação e contaminação de águas subterrâneas: Uma abordagem metodológica e prática*. Tese de livre docência na disciplina de Métodos Geolétricos aplicados a Hidrogeologia. Universidade Estadual Paulista.
- Cabral J, Ribeiro A (1988) *Carta Neotectónica de Portugal*. Serv. Geol. Portugal.
- Carvalho, J. M. (2006). *Prospecção e pesquisa de recursos hídricos subterrâneos no Maciço Antigo Português: linhas metodológicas*. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Geociências (Hidrogeologia Aplicada). Aveiro - Portugal.
- Castany G. (1982) *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*, Dunod université, Paris, 238 p.
- Chorley, R.J.; Schumm, S.A. & Sugden, D. E. (1985). *Geomorphology*. Methuen, Inc., New York.
- Cruz, José. (2000). *Prospecção, Pesquisa e Captação de Águas Minerais Naturais, Recursos Geotérmicos e Águas de Nascente*. LNG (investigação para a sustentabilidade). Disponível em: <http://www.lneg.pt/CienciaParaTodos/>. Acesso 20 de Fevereiro 2014.
- Custódio, E. & Llamas, M.R. (1996) - *Hidrologia subterrânea*, 2º edição, Tomo I e II, ediciones Omega, Barcelona, 2350 pp.
- Custódio, E. e Llamas, M.R., (1983) - *Hidrologia Subterrânea*, Ediciones Omega, S. A. Barcelona.
- Custódio, E., Llamas, M. R. 2001. *Hidrologia Subterrânea*. 2ed. Barcelona: Omega. p. 274.
- Daveau, S. 1995. Portugal Geográfico, Ed. J. Sá da Costa, Lisboa.
- Elis, V. R. Mendonça, C.A., Luís, J. et al. *O uso de sondagens dipolo-dipolo em estudos hidrogeológicos e de depósitos de resíduos*. Rev. Bras. Geof. Vol.26 no.3 São Paulo July/Sept. 2008.

- Elis, V. R.; Barroso, C. M. R.; Kiang, C. H. *Aplicação de ensaios de resistividade na caracterização do Sistema Aquífero Barreiras*. Marituba em Maceió – AL. Revista Brasileira de Geofísica, v. 22, n. 2, p. 2004.
- FAO-SDRN. (1997). *Classificação Climática de Koppen*. The Agromet Group, SDRN, FAO of the UN.
- Ferreira, A. Brum 1978. Planaltos e Montanhas do Norte da Beira - Estudo de Geomorfologia. Memórias do Centro de Estudos Geográficos, nº 4, 379 pp
- Ferro, BPA. & Bouman, D. (1987). *Explanatory notes to the hydrogeological map of Mozambique: Scale 1:1.000.000*. Project of the hydrogeological map of Mozambique, sponsored by UNICEF. National Directorate for Water Affairs, Maputo, Mozambique
- Fetter, C.W. (2001) – *Applied Hydrogeology*. 4th Edition. Prentice Hall, New Jersey, 545-598 p.
- Filho, J.M. (2007), *Geofísica Aplicad*. Módulo: Métodos Geoelectricos Aplicados nos Estudos de Captação e Contaminação das Águas Subterrâneas. Instituto de Geociências e Ciências Exatas – IGCE. Rio Claro. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/216780352/11/Sondagem-Eletrica-Vertical-SEV>. Acesso em 20 de Fevereiro de 2014.
- Foster, S.; Garduño, H. *et al.* (2003). *Groundwater Quality Protection: defining strategy and setting priorities* GW-MATE Briefing Note n.8.
- Freitas, F. D.S. *Modelagem geoelectrica de reservatórios em ambientes de águas doces: Estudos da sensibilidade de medidas de IP-resistividade na exploração petrolífera*. Dissertação apresentada à Universidade de Bahia – Instituto de Geofísica.
- Gomes, A. (2008) - *Evolução Geomorfológica da plataforma litoral entre Espinho e Águeda*. Dissertação de Doutoramento apresentada na Universidade do Porto, 337p.
- Griffiths, D.H; e Turnbull, J., (1985). *A multi-electrode array for resistivity surveying*. Firt Break 3 (Nº7), 16-20.
- Kirsch, R. e Yaramanci, U. (2006) *Geophysical characterisation of aquifers, Groundwater Geophysics*. Springer, Germany.
- Lima A.S e Barbosa, S. (2011). *Prospecção de recursos hidrominerais em terrenos cristalinos - caso de estudo em caminha, Noroeste de Portugal – Artigo*. Publicado In: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/15150>. Acesso em 20 de Abril 2014.
- Lima, H. Marta. (2007). Apontamentos sobre hidráulica subsuperficial. Disponível em <http://cee.uma.pt/hlima/Doc%20Hidraulica/0666HidraulicaSubsuperficial>. Acesso em 12 de Abril de 2014.
- Lng. (2010). *Geoportal*. Disponível em: <http://geoportal.lneg.pt>. Acesso: 12 de Setembro de 2014.

Referências Bibliográficas

- Loke M. H & Barker R. D. 1996. *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method*. Geophysical Prospecting, 44: 131-152.
- Loke, M. H., (2004). *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*, 128.
- Loke, M. H., (2010). *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging survey*. 147
- Luiz, J. G.; Silva, L. M. da C. (1995). *Geofísica de Prospeção*. Belém, UFPA, Cejup, 11 p.
- Marescot. L., 2006. *Introduction à l'imagerie électrique du sous-sol*. Bull. Soc. vaud. Sc. nat.
- Martinho, E. (2002). *Estudo Integrado de Problemas Ambientais por Métodos Geofísicos*. Dissertação de Doutorado. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 269 p.
- Michaud, J.P. A (1991). *Citizen's guide to understanding and monitoring lakes and streams*. Publications Office, Olympia, WA, USA v. pp, 360, 407.
- Midões, C.; Fernandes, J. at al. (2001). *Água subterrânea: conhecer para proteger e preservar*. IGM Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.9/488> Acesso em 20 de Maio de 2013.
- Milsom, J. (2003). *Field Geophysics. University College London*. Third Edition. England
- Neves, M. A. (2004). *Análise integrada aplicada a exploração de água subterrânea na Bacia do Rio Jundaí (SP)*. Tese (Doutorado em Geologia Regional) – Instituto de Geociências e Ciências Exactas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- Nóbrega. C. A.; Chang, H. K., et al. (2003) *Avaliação preliminar da corrosividade de solo com o emprego de resistividade elétrica em uma planta industrial utilizada para armazenamento de derivados de petróleo*. UNESP, Geociências, São Paulo.
- Oliveira, V. M. G. (2010). *Modelação hidrogeológica da área mineira abandonada de castelejo (guarda)*. Tese de doutoramento em Geologia (Hidrogeologia), apresentada a Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências Departamento de Geologia.
- Orellana, E. (1982). *Prospeccion geoelectrica en corriente continua*. Madrid, Ed. Paraninfo Biblioteca Técnica Philips, 571 p.
- Rosen L. & Legran H.E. 2000. *Systematic makings of early stage hydrogeologic conceptual models*. Groundwater, 38:887-893
- SADC. (2009). *Folheto Explicativo do Mapa e Atlas Hidrogeológico*. Assistência Técnica Comunidade para o Desenvolvimento da África Austral (SADC) - "Projecto de Elaboração do Mapa hidrogeológico da SADC.
- Sanders L.L. (1998). *A manual of field hydrogeology*. Prentice Hall. 381 pp.

Shevenin, V. A. (1990). IPI2Win *Guia do usuario*. Moscow State University, Geological Faculty, Department of Geophysics. In: Modin <http://www.geol.msu.ru/deps/geophys>. acesso em 23 de Maio de 2014.

Schlische, R. W. (1995). *Geometry and origino f faulted-related folds in extensional settings*. AAPG, 79 (1), 1661 – 1678.

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

Singhal, B.B.S. e Gupta, R.P. (1999).- *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Kluwer Academic Publishers, 400 pag.

Telford, W. M; Geldart, L. P; Sheri R. E. and Keys D. A. (1976), *Applied Geophysics*. Cambridge Un. Press, Cambridge.

UNESCO; (1984). *Prize for peace education*. 7, place de Fontenoy, 75700 Paris.

Ward, S. H. (1990). Resistivity and polarization methods. In: WARD, S. H. Geotecnical and environmental geophysics. Tulsa, OK: SEG, v.1, p.147-189.

Cartografia de apoio:

Carta Geológica de Portugal, 1:500 000, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, 199.